

# PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO - PHI

## PLAN DE GESTIÓN DEL RIESGO

### 2. CONOCIMIENTO DEL RIESGO

#### 2.2.4 Caracterización y evaluación de las amenazas

**MARZO, 2022**

## LISTA DE DISTRIBUCIÓN

DESTINATARIO	No. DE COPIAS
EPM	Documento original

## ÍNDICE DE MODIFICACIONES

ÍNDICE DE REVISIÓN	CAPÍTULO MODIFICADO	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES

## ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

TÍTULO DEL DOCUMENTO:		PLAN DE GESTIÓN DEL RIESGO – CONOCIMIENTO DEL RIESGO					
DOCUMENTO No.:							
APROBACIÓN	NÚMERO DE LA REVISIÓN		0	1	2	3	
	RESPONSABLE DE LA ELABORACIÓN	Nombre:	Consortio Generación Ituango				
		Firma:					
		Fecha:	15/03/2022				
	RESPONSABLE POR REVISIÓN Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	Nombre:	B. Hernández A.				
		Firma:					
		Fecha:	15/03/2022				
	Vo. Bo. DIRECTOR DEL PROYECTO	Nombre:	L. F. Restrepo				
		Firma:					
		Fecha:	15/03/2022				

## TABLA DE CONTENIDO

2	CONOCIMIENTO DEL RIESGO .....	2.27
2.2	VALORACIÓN DEL RIESGO .....	2.27
2.2.4	Caracterización y evaluación de amenazas.....	2.27

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1	Amenazas identificadas en el proyecto hidroeléctrico y su tipología.....	2.27
Tabla 2-2	Niveles de desempeño para el diseño dinámico de la presa Ituango.	2.30
Tabla 2-3	Valores de aceleración para PGA y 2,0s para el diseño de la presa..	2.30
Tabla 2-4	Valores de Aa y Av de la zona del proyecto por municipio.....	2.31
Tabla 2-5	Atributos para estimar la probabilidad de ocurrencia de sismicidad producida por el llenado del embalse.....	2.33
Tabla 2-6	Breve descripción de las rocas presentes en el área de análisis (metamórficas, ígneas y sedimentarias) .....	2.39
Tabla 2-7	Rangos de inclinación de la ladera.....	2.43
Tabla 2-8	Breve descripción de procesos morfodinámicos identificados en el área de estudio. ....	2.44
Tabla 2-9	Parámetros definidos para los suelos derivados de las unidades litológicas presentes en el área de análisis.....	2.49
Tabla 2-10	Valores de aceleración horizontal pico efectiva (Aa) según la NSR-10 para los municipios dentro de la zona de evaluación.....	2.57
Tabla 2-11	Resumen – Resultados análisis de estabilidad y probabilidades de falla para los sitios de interés. ....	2.63
Tabla 2-12	Parámetros de resistencia – Talud PE desviación. ....	2.66

Tabla 2-13	Parámetros geomecánicos de los materiales Romerito. ....	2.83
Tabla 2-14	Parámetros geomecánicos VNMD-Sitio 7.....	2.94
Tabla 2-15	Parámetros de resistencia de los materiales involucrados en el análisis. 2.102	
Tabla 2-16	Parámetros materiales existentes en el sector del km 0+900. ....	2.109
Tabla 2-17	Resumen – Resultados análisis de estabilidad y probabilidades de falla para los sitios de interés. ....	2.133
Tabla 2-18	Seguimiento a los principales factores que contribuyen a la amenaza por movimientos en masa. ....	2.135
Tabla 2-19	Cálculo del MRMR general del proyecto Ituango. ....	2.145
Tabla 2-20	Frentes de Cavernas PHI y sus características de calidad y radio hidráulico.....	2.147
Tabla 2-21	Frentes de túneles mayores PHI y sus características de calidad y radio hidráulico.....	2.147
Tabla 2-22	Frentes de galerías medianas PHI y sus características de calidad y radio hidráulico.....	2.148
Tabla 2-23	Frentes de galerías menores PHI y sus características de calidad y radio hidráulico.....	2.149
Tabla 2-24	Resultados de ensayos de compresión de muestras de suelos (Humagá 2).....	2.152
Tabla 2-25	PFM o factores que contribuyen la amenaza de falla de la presa (asociados con la estructura y el funcionamiento de los órganos de descarga).....	2.156
Tabla 2-26	PFM o factores que contribuyen la amenaza de falla de la presa (asociados con los taludes del embalse).....	2.163
Tabla 2-27	Seguimiento a los principales factores que contribuyen a la amenaza por fallo de la presa.....	2.170
Tabla 2-28	Principales fracturas de cizalla identificadas en el cuenco del vertedero.....	2.177
Tabla 2-29	Tendencias estructurales del macizo rocoso en el cuenco del vertedero.....	2.187
Tabla 2-30	Clasificación de la calidad del macizo rocoso a partir de los valores RQD.....	2.188



Tabla 2-31 Clasificación de la calidad del macizo rocoso según los valores de GSI.....	2.190
Tabla 2-32 Discontinuidades en el talud de margen izquierda, frente al vertedero.	2.196
Tabla 2-33 Determinación de los subíndices Ms, Kb y Kd por tipos de terreno. ...	2.208
Tabla 2-34 Determinación del subíndice Js, según tipo de estructura y dirección del flujo.....	2.208
Tabla 2-35 Probabilidad de erosión del cuenco por cota y tipo de GSI para diferentes crecientes de diseño.....	2.210
Tabla 2-36 Resumen parámetros para el cálculo del índice de erodabilidad – Talud MI al frente del vertedero. ....	2.214
Tabla 2-37 Resultados probabilidad de erosión para los períodos de retorno de 2,33, 50 y 500 - Talud MI al frente del vertedero.....	2.215
Tabla 2-38 Resumen parámetros para el cálculo del índice de erodabilidad – Márgenes del río entre la salida de las descargas y el puente El Beso. ....	2.218
Tabla 2-39 Probabilidad de erosión – Zona entre salidas de las descargas y puente El Beso.....	2.219
Tabla 2-40 Probabilidad de erosión del cuenco por cota y GSI tipo II para diferentes crecientes de diseño.....	2.221
Tabla 2-41 Probabilidad de erosión para los períodos de retorno de 2,33, 50 y 500 - Talud MI al frente del vertedero. ....	2.222
Tabla 2-42 Probabilidad de erosión – Zona entre salidas de las descargas y puente El Beso. ....	2.223
Tabla 2-43 Seguimiento a los principales factores que contribuyen a la amenaza por socavación y erosión en la estructura del vertedero.....	2.224
Tabla 2-44 Características de los aceites almacenados. ....	2.232
Tabla 2-45 Resumen de los sitios identificados susceptibles a generar derrames de contaminantes. ....	2.252
Tabla 2-46 Características principales de la sustancia contaminante analizada.	2.253
Tabla 2-47 Determinación del Nivel de Deficiencia (ND).....	2.254
Tabla 2-48 Determinación del Nivel de Exposición (NE).....	2.254
Tabla 2-49 Determinación del Nivel de Probabilidad (NP). ....	2.255

Tabla 2-50	Condiciones de frontera para la modelación hidráulica. ....	2.257
Tabla 2-51	Coeficientes de contracción y expansión. ....	2.257
Tabla 2-52	Caudales utilizados en la modelación.....	2.258
Tabla 2-53	Concentración de Diesel para caudales máximos con Tr de 2,33 años. 2.263	
Tabla 2-54	Concentración de Diesel para caudales máximos con Tr de 1,01 años. 2.263	
Tabla 2-55	Concentración de Diesel para caudales medios.....	2.263
Tabla 2-56	Concentración de Diesel para caudales mínimos con Tr de 1,01 años. 2.264	
Tabla 2-57	Concentración de Diesel para caudales mínimos con Tr de 2,33 años. 2.264	
Tabla 2-58	Calificaciones para los puntajes obtenidos en las condiciones sin proyecto y de inoperatividad de las compuertas de la DI – Metodología alternativa. ....	2.300
Tabla 2-59	Diferencia entre las calificaciones obtenidas con la condición de cierre de compuertas respecto a la condición sin proyecto – Metodología alternativa. ....	2.300
Tabla 2-60	Casos evaluados para el cálculo de la amenaza por destaponamiento de los túneles de desviación. ....	2.306
Tabla 2-61	Condiciones originales de diseño y operación. ....	2.316
Tabla 2-62	Casos evaluados para el cálculo de la amenaza por fallas operativas en las compuertas del vertedero. ....	2.318
Tabla 2-63	Escala de Probabilidad de ocurrencia de EPM. ....	2.334
Tabla 2-64	Descarga de las crecientes de diseño por la estructura del vertedero.....	2.340
Tabla 2-65	Casos de análisis para la evaluación de las amenazas aguas arriba y aguas abajo del proyecto, por el paso de crecientes naturales del río Cauca. 2.341	
Tabla 2-66	Regla de operación actual del Vertedero.....	2.343
Tabla 2-67	Nivel del embalse durante el paso de las crecientes naturales del río Cauca en la situación actual. ....	2.343

Tabla 2-68	Secuencia de operación de las compuertas del vertedero en condiciones normales, con generación.....	2.345
Tabla 2-69	Estaciones y sus registros para estimación de caudales mínimos. ....	2.373
Tabla 2-70	Relación de eventos de explosiones en polvorines.....	2.380
Tabla 2-71	Identificación de sitios de almacenamiento sustancias peligrosas .....	2.381
Tabla 2-72	Caracterización Zona A: Polvorín El Palmar.....	2.388
Tabla 2-73	Propiedades físicas de los elementos analizados. ....	2.393
Tabla 2-74	Caracterización Zona B: Polvorín Túnel de Acceso.....	2.394
Tabla 2-75	Caracterización Zona: Planta de Asfalto .....	2.395
Tabla 2-76	Caracterización Zona: Subestación – 500 kVA.....	2.396
Tabla 2-77	Método Simplificado de Evaluación de peligro de Incendio (MESERI) Subestación 500Kva. ....	2.397
Tabla 2-78	Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI.....	2.400
Tabla 2-79	Caracterización Zona: Casa de máquinas .....	2.400
Tabla 2-80	Método Simplificado de Evaluación de peligro de Incendio (MESERI) Casa de máquinas.....	2.404
Tabla 2-81	Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI.....	2.406
Tabla 2-82	Caracterización Zona: Caverna de transformadores.....	2.407
Tabla 2-83	Método Simplificado de Evaluación de peligro de Incendio (MESERI) Caverna de transformadores. ....	2.408
Tabla 2-84	Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI.....	2.411
Tabla 2-85	Caracterización Zona: Subestación 44 KVA – Zona El Palmar.....	2.411
Tabla 2-86	Método Simplificado de Evaluación de Riesgo/Peligro de Incendio (MESERI) Subestación 44 KVA .....	2.413
Tabla 2-87	Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI.....	2.416
Tabla 2-88	Caracterización Zona: Estación de Gas .....	2.416
Tabla 2-89	Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI)_ Estación de gas .....	2.417
Tabla 2-90	Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI.....	2.420

Tabla 2-91 Caracterización Zona: Taller ATB – Zona Villaluz .....	2.420
Tabla 2-92 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) Subestación 44kVA El Palmar.....	2.422
Tabla 2-93 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI.....	2.425
Tabla 2-94 Caracterización Zona: Estación de combustible .....	2.425
Tabla 2-95 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) _ Estación de combustible .....	2.426
Tabla 2-96 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI.....	2.429
Tabla 2-97 Caracterización Zona: Taller de mantenimiento – Plazoleta casa de máquinas.....	2.429
Tabla 2-98 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) Taller de mantenimiento .....	2.431
Tabla 2-99 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI.....	2.433
Tabla 2-100 Caracterización Zona: Taller Industrial.....	2.434
Tabla 2-101 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI)	2.435
Tabla 2-102 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI .....	2.438
Tabla 2-103 Caracterización Zona: Estación de Gas – Campamento Villaluz.....	2.438
Tabla 2-104 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) _ Estación de GLP.....	2.440
Tabla 2-105 Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI.....	2.442
Tabla 2-106 Caracterización Zona: Planta Diésel – Plazoleta Casa de máquinas	2.443
Tabla 2-107 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) _ Planta Diésel.....	2.444
Tabla 2-108 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI .....	2.447
Tabla 2-109 Caracterización Zona: Planta Diesel – Campamento Tacuí .....	2.447
Tabla 2-110 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) _ Planta Diésel campamento Tacuí.....	2.449
Tabla 2-111 Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI.....	2.452

Tabla 2-112 Caracterización Zona: Subestación 44 kVA – Casa de máquinas....	2.452
Tabla 2-113 Método Simplificado de Evaluación de Riesgo/Peligro de Incendio (MESERI) _ Subestación 44 kVA – Casa de máquinas.....	2.453
Tabla 2-114 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI .....	2.456
Tabla 2-115 Caracterización Zona: Planta de Concreto.....	2.456
Tabla 2-116 Método Simplificado de Evaluación de Riesgo/Peligro de Incendio (MESERI) _ Planta de concreto.....	2.457
Tabla 2-117 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI .....	2.460
Tabla 2-118 Resultados de radio de afectación.....	2.461
Tabla 2-119 ID 6 Estación Gas Tacuí - Zona riesgo vapores tóxicos.....	2.463
Tabla 2-120 ID 6 Estación Gas Tacuí - Zona riesgo inflamable .....	2.464
Tabla 2-121 ID 6 Estación Gas Tacuí - Resultado Radiación térmica .....	2.466
Tabla 2-122 ID 6 Estación Gas Tacuí - Zona riesgo de sobrepresión (fuerza de choque) .....	2.467
Tabla 2-123 Resultados de radio de afectación.....	469
Tabla 2-124 ID 7 Taller ATB – Nube de vapor tóxica.....	471
Tabla 2-125 ID 7 Taller ATB - Zona riesgo inflamable .....	472
Tabla 2-126 ID 7 Taller ATB - Resultado Radiación térmica .....	473
Tabla 2-127 ID 7 Taller ATB - Zona riesgo de sobrepresión (fuerza de choque) ....	474
Tabla 2-128 Resultados de radio de afectación.....	477
Tabla 2-129 ID 8 Estación combustible plazoleta - Resultado Radiación térmica – Incendio tipo “pool fire”. .....	478
Tabla 2-130 Resultados de radio de afectación.....	481
Tabla 2-131 ID 09 Taller de Mantenimiento - Vapores tóxicos en la atmosfera .....	482
Tabla 2-132 ID 09 Taller de Mantenimiento - Zona riesgo inflamable.....	483
Tabla 2-133 ID 09 Taller de Mantenimiento - Resultado Radiación térmica .....	485
Tabla 2-134 Resultados de radio de afectación.....	487
Tabla 2-135 ID 11 Casino Villa Luz - Vapores tóxicos en la atmosfera .....	489

Tabla 2-136 ID 11 Casino Villa Luz - Zona riesgo inflamable .....	490
Tabla 2-137 ID 11 Casino Villa Luz - Resultado Radiación térmica .....	491
Tabla 2-138 ID 11 Casino Villa Luz - Zona riesgo de sobrepresión (fuerza de choque) .....	493
Tabla 2-139 Resultados de radio de afectación.....	495
Tabla 2-140 ID 18 Planta de Concreto - Vapores tóxicos en la atmosfera.....	497
Tabla 2-141 ID 18 Planta de Concreto – Zona riesgo Inflamable .....	498
Tabla 2-142 ID 18 Planta de Concreto - Resultado Radiación térmica.....	500
Tabla 2-143 Resultados calculo masa equivalente TNT para elementos explosivos analizados.....	502
Tabla 2-144 Resultados radio de afectación por sobrepresión. ....	503
Tabla 2-145 Determinación del nivel de probabilidad para los sitios analizados.....	504
Tabla 2-146 Coberturas vegetales del área y el tipo combustible predominante. ....	509
Tabla 2-147 Categorías de amenaza y calificación según el tipo de combustible. .	510
Tabla 2-148 Duración del combustible según la cobertura vegetal. ....	511
Tabla 2-149 Categorías de amenaza según la duración del combustible .....	512
Tabla 2-150 Carga total de combustibles según la cobertura vegetal.....	513
Tabla 2-151 Categorías de amenaza y calificación según la carga de combustible. ....	514
Tabla 2-152 Categorías de amenaza y calificación según la precipitación. ....	517
Tabla 2-153 Categorías de amenaza y calificación según la temperatura. ....	517
Tabla 2-154 Análisis histórico de los eventos registrados como incendios forestales. ....	519
Tabla 2-155 Categorías de amenaza según el relieve (pendientes). ....	520
Tabla 2-156 Categorías de amenaza según la accesibilidad (Distancia de las vías) .....	521
Tabla 2-157 Amenazas Proyecto Hidroeléctrico Ituango _PHI - Estado actual.....	524
Tabla 2-158 Criterios de calificación de probabilidad de ocurrencia de las amenazas .....	526

Tabla 2-159 Calificación del grado de amenaza por emergencias sanitarias en cada área de afectación .....	527
Tabla 2-160. Amenaza por alteración de orden público y social del Proyecto Hidroeléctrico Ituango _PHI - Estado actual .....	529
Tabla 2-161 Criterios de calificación de probabilidad de ocurrencia de las amenazas .....	530
Tabla 2-162 Calificación del grado de amenaza por orden público y social en cada área de afectación. ....	532
Tabla 2-163 Calificación del grado de amenaza por orden público y social en cada línea vital dentro del área de afectación. ....	533
Tabla 2-164 Calificación del grado de amenaza por orden público y social para sitios puntuales dentro del área afectación. ....	533
Tabla 2-165 Caudales Máximos Esperados - Estación Puerto Valdivia [2623704]. ....	535
Tabla 2-166 Pendiente de la Línea de Tendencia para Estadísticos Asociados a Caudales Máximos.....	539
Tabla 2-167 Caudales Mínimos Esperados - Estación Puerto Valdivia [2623704]. ....	540
Tabla 2-168 Pendiente de la Línea de Tendencia para Estadísticos Asociados a Caudales Mínimos. ....	546

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Espacialización de la amenaza por movimientos sísmicos.....	2.32
Figura 2-2 Evolución temporal de la sismicidad considerando las etapas antes (azul), durante (naranja) y después (verde) del llenado del embalse. Las barras representan el número de eventos al mes y la línea el número acumulado de sismos. ....	2.35
Figura 2-3 Número de eventos para diferentes rangos de magnitud antes (azul), durante (naranja) y después (verde) del llenado del embalse .....	2.35



Figura 2-4	Espacialización de la amenaza por sismicidad desencadenada (o disparada) por el embalse.....	2.37
Figura 2-5	Área de análisis para zonificación por movimientos en masa. ....	2.38
Figura 2-6	Cartografía de unidades geológicas para el área de análisis. ....	2.42
Figura 2-7	Distribución de la pendiente del terreno en el área de análisis. ....	2.44
Figura 2-8	Cartografía de procesos morfodinámicos en el área de análisis. ....	2.46
Figura 2-9	Cartografía de unidades geomorfológicas para el área de análisis... ..	2.48
Figura 2-10	Localización de los sondeos exploratorios utilizados para la definición de parámetros del suelo. ....	2.49
Figura 2-11	Mapa de espesor de suelo. ....	2.52
Figura 2-12	Superposición de las áreas de influencia para las estaciones IDEAM cercanas al área de estudio. ....	2.54
Figura 2-13	Curvas intensidad, duración y frecuencia para las estaciones IDEAM próximas al área de estudio. ....	2.56
Figura 2-14	Zonificación de amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para el Tr: 50 años. ....	2.62
Figura 2-15	Zonificación de amenaza por movimientos en masa detonados por sismo para el Tr: 475 años.....	2.63
Figura 2-16	Planta localización ejes analizados – Talud PE desviaciones. ....	2.65
Figura 2-17	Perfil estratigráfico típico - Talud PE (C) desviación.....	2.66
Figura 2-18	Resultados análisis de estabilidad en condición estática – Desviaciones, Sección A. FS (medio)=2,8 y PF=2,8x10 <sup>-22</sup> %. ....	2.67
Figura 2-19	Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección A – Tr 475 años (Sismo vertical hacia abajo). FS (medio)=1,9 y PF=6,2x10 <sup>-14</sup> %. ....	2.68
Figura 2-20	Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección A – Tr 475 años (Sismo vertical hacia arriba FS (medio)=2,0 y PF=1,5x10 <sup>-12</sup> %. ....	2.69
Figura 2-21	Resultados análisis de estabilidad condición estática Desviaciones, Sección B. FS (medio)=1,7 y PF=1,0x10 <sup>-05</sup> %. ....	2.70



Figura 2-22	Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección B – Tr 475 años (Sismo vertical hacia abajo). FS (medio)=1,3 y PF=0,001%.	2.71
Figura 2-23	Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección B – Tr 475 años (Sismo vertical hacia arriba). FS (medio)=1,4 y PF=0,34%.	2.72
Figura 2-24	Resultados análisis de estabilidad condición estática, Desviaciones, Sección C - FS (medio)=1,2 y PF=3,9%.	2.73
Figura 2-25	Resultados análisis de estabilidad condición pseudo-estática Desviaciones, Sección C – Tr 475 años (Sismo vertical hacia abajo). FS (medio)=0,9 y PF=91,0%.	2.74
Figura 2-26	Resultados análisis de estabilidad condición pseudo-estática Desviaciones, Sección C – Tr 475 años (Sismo vertical hacia arriba). FS (medio)=0,9 y PF=87,9%.	2.75
Figura 2-27	Resultados análisis de estabilidad condición estática – Desviaciones, Sección D FS (medio)=1,4 y PF=0,13%.	2.76
Figura 2-28	Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección D – Tr 475 años (Sismo vertical hacia abajo). FS (medio)=1,0 y PF=37,7%.	2.77
Figura 2-29	Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección D – Tr 475 años (Sismo vertical hacia arriba). FS (medio)=1,1 y PF=30,3%.	2.78
Figura 2-30	Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – Talud de las Desviaciones.	2.79
Figura 2-31	Planta VNMD- Romerito.	2.80
Figura 2-32	Sección de Análisis A-A, Excavación parte alta de pozos de compuertas.	2.81
Figura 2-33	Sección de Análisis B-B, Excavación parte alta de pozos de compuertas.	2.82
Figura 2-34	Sección de Análisis C-C, Excavación parte alta de pozos de compuertas.	2.83
Figura 2-35	Análisis estático– Sección A-A. FS (promedio)=1,63; PF=0,0%.	2.84

Figura 2-36	Análisis pseudo-estático – Sección A-A, coeficiente sísmico vertical hacia arriba con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,2; PF=0,0%. .....	2.85
Figura 2-37	Análisis pseudo-estático – Sección A-A, coeficiente sísmico vertical hacia abajo con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,2; PF=0,0%.....	2.86
Figura 2-38	Análisis estático– Sección B-B. FS (promedio)=2,00; PF=0,00%. ..	2.86
Figura 2-39	Análisis pseudo-estático – Sección B-B, coeficiente sísmico vertical hacia arriba con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,6; PF=0,0%. .....	2.87
Figura 2-40	Análisis pseudo-estático – Sección B-B, coeficiente sísmico vertical hacia abajo con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,6; PF=0,0%.....	2.87
Figura 2-41	Análisis estático – Sección C-C. FS (promedio)=1,5; PF=2,80%. ...	2.88
Figura 2-42	Análisis pseudo-estático – Sección C-C, coeficiente sísmico vertical hacia arriba con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,1; PF=23,6%. .....	2.89
Figura 2-43	Análisis pseudo-estático – Sección C-C, coeficiente sísmico vertical hacia abajo con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,12; PF=27,5%. ...	2.89
Figura 2-44	Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – Romerito. ....	2.90
Figura 2-45	Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – Romerito. ....	2.91
Figura 2-46	Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – Talud de las Desviaciones. ....	2.92
Figura 2-47	Planta VNMD-Sitio 7. ....	2.93
Figura 2-48	Sección de Análisis 1-1 VNMD-Sitio 7. ....	2.94
Figura 2-49	Sección de Análisis 2-2 VNMD-Sitio 7. ....	2.94
Figura 2-50	Sección 1-1. Análisis condición estática. FS (promedio)=1,19; PF=12,30%. .....	2.95
Figura 2-51	Sección 1-1. Análisis pseudo-estático. Coeficiente sísmico vertical hacia arriba con Tr de 475 años. FS (promedio)=0,95; PF=73,20%. .....	2.96
Figura 2-52	Sección 1-1. Análisis pseudo-estático. Coeficiente sísmico vertical hacia abajo con Tr de 475 años. FS (promedio)=0,92; PF=66,20%. .....	2.96
Figura 2-53	Sección 2-2. Análisis condición estática. FS (promedio)=1,52; PF=0,10%. .....	2.97

Figura 2-54	Sección 2-2. Análisis pseudo-estático con Tr de 475 años. Coeficiente sísmico vertical hacia arriba. FS (promedio)=1,13; PF=20,70%..	2.97
Figura 2-55	Sección 2-2. Análisis pseudo-estático con Tr de 475 años. Coeficiente sísmico vertical hacia abajo. FS (promedio)=1,12; PF=23,00%..	2.98
Figura 2-56	Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – Sitio 7.....	2.99
Figura 2-57	Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – Sitio 7.....	2.100
Figura 2-58	Planta helipuerto Villa Luz, ubicación de secciones de análisis.....	2.101
Figura 2-59	Perfil estratigráfico sección A de análisis.....	2.102
Figura 2-60	Perfil estratigráfico sección D de análisis. ....	2.102
Figura 2-61	Análisis de estabilidad estático sección A – FS=6,3 PF=0,0%. ....	2.104
Figura 2-62	Análisis de estabilidad pseudo-estático para un Tr=475 años, sección A, Av hacia arriba – FS=1,86 y PF=0,0%. ....	2.104
Figura 2-63	Análisis de estabilidad pseudo-estático para un Tr=475 años, sección A, Av hacia abajo – FS=2,96 y PF=0,0%.....	2.105
Figura 2-64	Análisis de estabilidad estático sección D – FS=1,3 y PF=1,0%... ..	2.105
Figura 2-65	Análisis de estabilidad pseudo-estático para un Tr=475 años, sección D, Av hacia arriba – FS=1,05 y PF=38,8%.....	2.105
Figura 2-66	Análisis de estabilidad pseudo-estático para un Tr=475 años sección D, Av hacia abajo – FS=1,05 y PF=39,2%. ....	2.106
Figura 2-67	Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – Villa Luz (Helipuerto).....	2.107
Figura 2-68	Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – Villa Luz (Helipuerto).....	2.108
Figura 2-69	Planta con unidades geológicas en el km 0+900, ubicación de secciones de análisis.....	2.110
Figura 2-70	Perfil geológico proyectado Sector Norte (Perfil 1). ....	2.111
Figura 2-71	Perfil geológico proyectado Sector Sur (Perfil 2).....	2.112
Figura 2-72	Perfil geológico proyectado Sector Central (Perfil 3). ....	2.113

Figura 2-73 Resultados análisis de estabilidad condición actual (calibración) Sección A (Perfil 1 – Zona Norte), Condición estática – FS (medio) = 1,01 y PF = 49,20%.....	2.114
Figura 2-74 Resultados análisis de estabilidad condición actual (calibración) Sección B (Perfil 2 – Zona Sur), Condición estática – FS (medio) = 1,07 y PF = 1,90%.....	2.114
Figura 2-75 Resultados análisis de estabilidad condición actual (calibración) Sección C (Perfil 3 – Zona Central), Condición estática – FS (medio) = 1,27 y PF = 5,9E-03%. ....	2.115
Figura 2-76 Resultados análisis de estabilidad Sección A (Perfil 1 – Zona Norte) con tratamientos, condición estática – FS (medio)=1,54 y PF=4,5E-09%....	2.116
Figura 2-77 Resultados análisis de estabilidad Sección B (Perfil 2 – Zona Sur) con tratamientos, condición estática – FS (medio)=1,65 y PF=2,8E-19%....	2.116
Figura 2-78 Resultados análisis de estabilidad Sección C (Perfil 3 – Zona Central) con tratamientos, condición estática – FS (medio)=1,48 y PF=3,2E-06%....	2.117
Figura 2-79 Resultados análisis de estabilidad Sección A (Perfil 1 – Zona Norte) con tratamientos, condición pseudo-estática – FS (medio)=1,1 y PF=4,4%. 2.118	2.118
Figura 2-80 Resultados análisis de estabilidad Sección B (Perfil 2 – Zona Sur) con tratamientos, condición pseudo-estática – FS (medio)=1,13 y PF=0,2%.2.118	2.118
Figura 2-81 Resultados análisis de estabilidad Sección C (Perfil 3 – Zona Central) con tratamientos, condición pseudo-estática – FS (medio)=1,10 y PF=8,5%.2.119	2.119
Figura 2-82 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – km 0+900.....	2.120
Figura 2-83 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – km 0+900. ...	2.121
Figura 2-84 Geología en planta - Sitio La Honda.....	2.122
Figura 2-85 Perfil geológico (Sección 1) – La Honda.....	2.122
Figura 2-86 Perfil geológico (Sección 2) – La Honda.....	2.123
Figura 2-87 Perfil geológico (Sección 2) – La Honda.....	2.123
Figura 2-88 Zonificación talud La Honda.....	2.124
Figura 2-89 Vista en planta de las secciones analizadas en el talud La Honda. ...	2.125
Figura 2-90 Análisis de estabilidad para la zona 1, condición estática. FS=1,1, PF=34,4% .....	2.126

Figura 2-91 Análisis de estabilidad para la zona 4, condición estática. FS=1,4, PF=1,0% .....	2.126
Figura 2-92 Análisis de estabilidad implementando sistema de soporte de pernos en la zona 1 bajo condición estática, FS=1,5, PF=1,6%.....	2.127
Figura 2-93 Análisis de estabilidad implementando sistema de soporte de pernos en la zona 1 bajo condición pseudo-estática, FS=1,1, PF=28,5%. .....	2.128
Figura 2-94 Análisis de estabilidad implementando sistema de soporte de pernos en la zona 4 bajo condición estática, FS=2,8, PF=0,0%.....	2.129
Figura 2-95 Análisis de estabilidad implementando sistema de soporte de pernos en la zona 4 bajo condición pseudoestática, FS=2,0, PF=0,0%.....	2.129
Figura 2-96 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – La Honda. ....	2.130
Figura 2-97 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – La Honda....	2.131
Figura 2-98 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – El Cocal. ....	2.132
Figura 2-99 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – El Cocal.....	2.133
Figura 2-100 Zonas de deformación asociadas a la Subsistencia.....	2.139
Figura 2-101 Colapso en el frente de excavación. Diagrama típico en suelo. La extensión hasta la superficie se presenta comúnmente cuando la relación diámetro túnel/cobertura es menor a 2,5.....	2.140
Figura 2-102 Modelo conceptual de esfuerzos para la propagación del hundimiento.....	2.141
Figura 2-103 RMR promedio obtenidos a partir de la información recopilada de los levantamientos geológicos efectuados durante construcción.....	2.143
Figura 2-104 Resultados esfuerzos desviadores para las cavernas de la central. (Esfuerzo en kPa).....	2.145
Figura 2-105 Trayectorias de esfuerzos para la generación o detención de hundimiento.....	2.145
Figura 2-106 Área de dominio a la susceptibilidad de subsidencia en el proyecto hidroeléctrico Ituango.....	2.146
Figura 2-107 Isométrico general de obras subterráneas PHI. ....	2.147

Figura 2-108 Análisis de subsidencia para las diferentes excavaciones subterráneas PHI.....	2.150
Figura 2-109 Zona de afectación del macizo rocoso en sector sur de las cavernas y análisis de subsidencia.....	2.151
Figura 2-110 Localización y alineamiento preliminar galería de drenaje Humagá 2.....	2.152
Figura 2-111 Geometría y parámetros de análisis en frente de excavación. ....	2.153
Figura 2-112 Resultados del empuje S para diferentes ángulos de cuña. ....	2.154
Figura 2-113 Propuesta de equivalencias entre el método cualitativo y cuantitativo para la escala de probabilidades. ....	2.165
Figura 2-114 Amenaza por falla de la presa del PHI.....	2.166
Figura 2-115 Definición de borde libre para el riesgo de overtopping. ....	2.167
Figura 2-116 Deformaciones en el talud aguas arriba frente a un eventual fallo del manto impermeable inclinado dispuesto en el lleno prioritario. ....	2.168
Figura 2-117 Zona de interés para el riesgo de fallo por los estribos.....	2.168
Figura 2-118 Filtraciones producto de un agrietamiento o erosión en el núcleo ..	2.169
Figura 2-119 Efectos de un fallo en la pantalla plástica (entre cotas 380 msnm y 418 msnm).....	2.170
Figura 2-120 Caudal a lo largo del tramo de estudio para los casos analizados. ....	2.175
Figura 2-121 Horizonte IIB típico al margen derecho del cuenco del vertedero. Talud de corte entre cotas 222,0 a 226,4 m.s.n.m., abscisas 640,0 a 694,00, ordenadas -35,49 a -45,70.....	2.177
Figura 2-122 Fractura de cizalla Cz1 (20/100) identificada en las Cotas 239.4 a 244,8 (m.s.n.m.), abscisas 562,30 a 575,0; ordenadas -59,40 a -59,66. ....	2.178
Figura 2-123 Fractura de cizalla Cz2 (40/130) identificada en las Cotas 216,20 a 223,0 Abscisas 559,0 a 570,0; ordenadas -20,0 a -40,0.....	2.179
Figura 2-124 Fractura de cizalla Cz3 (50/160); Cotas 259,9 a 265.7 (m.s.n.m.); Abscisas 543,50 a 544,40 Ordenadas -60,0 a -91,0. ....	2.180
Figura 2-125 Unidades geológicas y estructuras de cizalla en el cuenco del vertedero.....	2.181

Figura 2-126 Macizo rocoso correspondiente a neis cuarzo-feldespático (Horizonte IIB) en la cota 211,0 m.s.n.m. y la abscisa 652,0 en el cuenco del vertedero.....	2.182
Figura 2-127 Persistencia en el buzamiento de las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero. FO: Foliación, D: diaclasa y CZ: Cizalla. ....	2.183
Figura 2-128 Persistencia en el buzamiento de las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero. FO: Foliación, D: diaclasa y CZ: Cizalla. ....	2.183
Figura 2-129 Abertura de las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero.....	2.184
Figura 2-130 Rugosidad de las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero.....	2.184
Figura 2-131 Alteración en las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero.....	2.185
Figura 2-132 Resistencia de los rellenos identificados en las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero.....	2.185
Figura 2-133 Estereograma de la foliación en el cuenco del vertedero (268 datos).2.186	
Figura 2-134 Estereograma de las diaclasas en el cuenco del vertedero (1093 datos).....	2.186
Figura 2-135 Estereograma de las cizallas en el cuenco del vertedero (375 datos)2.187	
Figura 2-136 Calidad del macizo rocoso a partir de valores RQD en el cuenco del vertedero.....	2.188
Figura 2-137 Carta para evaluar el índice de resistencia geológica (GSI) en macizos rocosos fracturados. ....	2.189
Figura 2-138 Valores estimados de GSI para el cuenco del vertedero.....	2.190
Figura 2-139 Calidad del macizo rocoso a partir de valores GSI en el cuenco del vertedero.....	2.191
Figura 2-140 Tipos de GSI y rangos de ocurrencia, 1085 datos (tomado de Plano para construcción D-PHI-042-VER-EX-C-050).....	2.192
Figura 2-141 Base para la definición de estructuras geológicas dominantes. ....	2.193
Figura 2-142 Zona de estudio MI talud al frente del vertedero. ....	2.194
Figura 2-143. Presencia de depósito de vertiente Talus en la parte inferior del talud (noviembre de 2020). ....	2.195



Figura 2-144 Presencia de roca con horizonte de meteorización IIB en la parte media y baja del talud (noviembre 2020)..... 2.195

Figura 2-145 Estereograma talud MI al frente del vertedero..... 2.197

Figura 2-146 Diagramas de polos general para las estructuras de salida de las descargas de la central subterránea, 110 datos. .... 2.204

Figura 2-147 Diagramas de polos general para las estructuras de salida de las descargas de la central subterránea, 8 datos. .... 2.205

Figura 2-148 Sectorización geológica Cuenco de amortiguamiento del vertedero..... 2.206

Figura 2-149 Sectorización geológica Talud MI al frente del vertedero. .... 2.206

Figura 2-150 Sectorización geológica zona entre las salidas de las descargas y el puente El Besos..... 2.207

Figura 2-151 Valores de los índices de erodabilidad K en el cuenco del vertedero por tipo de estructura y tipo de GSI..... 2.209

Figura 2-152 Probabilidad de erosión en el cuenco por cota y tipo de GSI para diferentes crecientes de diseño..... 2.210

Figura 2-153. Probabilidad de Erosión y socavación del cuenco Tr 2,33 Tr 50 entre cotas 170 a 200 m s.n.m y Tr 500 entre cotas 170 a 190 m s.n.m. (Amenaza por probabilidad de ocurrencia baja – GSI tipo II)..... 2.212

Figura 2-154 Probabilidad de Erosión y socavación del cuenco Tr 500 cotas 200 m s.n.m. (Amenaza por probabilidad de ocurrencia moderada – GSI tipo II) ..... 2.212

Figura 2-155 Índice de Erodabilidad K – Talud MI al frente del vertedero..... 2.215

Figura 2-156 Probabilidad de Erosión y socavación talud margen izquierda al frente del vertedero para los Tr de 2,33, 50 y 500 años. .... 2.216

Figura 2-157 Índice de Erodabilidad K – Zona entre salidas de las descargas y puente El Beso..... 2.219

Figura 2-158 Probabilidad de Erosión y socavación entre la salida de las descargas y el puente El Beso para los Tr de 2,33, 50 y 500 años. .... 2.220

Figura 2-159 Localización general los puntos de interés..... 2.231

Figura 2-160 Redes para infiltraciones en la zona norte de la caverna de transformadores (Plano D-PHI-060-GRL-DR-P-015). .... 2.234

Figura 2-161 Foso de aceites, trampa de aceites (plano DC-PHI-025-SUB-HS-P-005). 2.240



Figura 2-162	Ubicación del punto de derrame analizado. ....	2.251
Figura 2-163	Tramo modelado del río Cauca.....	2.256
Figura 2-164	Isométrico del modelo hidráulico del río Cauca.....	2.256
Figura 2-165	Asimilación del derrame para caudal máximo de 2,33 años. ....	2.260
Figura 2-166	Asimilación del derrame para caudal máximo de 1,01 años. ....	2.261
Figura 2-167	Asimilación del derrame para caudal medio. ....	2.261
Figura 2-168	Asimilación del derrame para caudales mínimos de 1,01 años de periodo de retorno .....	2.262
Figura 2-169	Asimilación del derrame para caudal mínimo de 2,33 años .....	2.262
Figura 2-170	Amenaza por derrame de hidrocarburo tipo Diésel en estación de combustible. ....	2.265
Figura 2-171	Localización general del área de estudio. ....	2.267
Figura 2-172	Distribución de las pendientes sobre el área de estudio.....	2.268
Figura 2-173	Precipitación zona de análisis. ....	2.269
Figura 2-174	Coberturas del suelo de la zona de análisis.....	2.270
Figura 2-175	Geomorfología de la zona de estudio. ....	2.271
Figura 2-176	Materiales superficiales de la zona de estudio. ....	2.272
Figura 2-177	Delimitación morfométrica por tramos en la zona de estudio. ....	2.273
Figura 2-178	Clasificación del Coeficiente de Compacidad.....	2.274
Figura 2-179	Reclasificación de las pendientes.....	2.275
Figura 2-180	Reclasificación de la precipitación.....	2.276
Figura 2-181	Reclasificación de las coberturas vegetales. ....	2.277
Figura 2-182	Reclasificación de las unidades geomorfológicas.....	2.278
Figura 2-183	Reclasificación de los materiales superficiales.....	2.279
Figura 2-184	Amenaza por avenida torrencial en la zona de estudio. ....	2.280
Figura 2-185	Amenaza ante avenidas torrenciales en las zonas de depósitos aluviales. ....	2.281
Figura 2-186	Localización general túnel Descarga Intermedia.....	2.284

Figura 2-187	Diseño original y bosquejo del Sistema de Caudal Remanente (SQR).	2.287
Figura 2-188	Pozo vertical detrás de los codos superiores de los pozos de presión desde las conducciones superiores N°3 y N°4 para garantizar la continuidad del flujo en el río Cauca aguas abajo del proyecto cuando el embalse se encuentre por debajo de la cota 405 m.s.n.m. ....	2.287
Figura 2-189	Configuración general de una estructura con compuertas de fondo deslizantes.....	2.290
Figura 2-190	Resultados de la caracterización hidráulica, perfiles de la variación de los caudales en la zona de estudio. ....	2.295
Figura 2-191	Comparativo de espejos de agua entre un caudal de 450 m <sup>3</sup> /s (naranja) y el caudal de 35 m <sup>3</sup> /s (escala azul) para los sitios: Puerto Valdivia, El Quince -Doce, Cáceres, Puerto Antioquia, Caucasia y Nuevo Mundo (Hacia Nechí) .....	2.297
Figura 2-192	Principales ciénagas caracterizadas para la zona de estudio.....	2.298
Figura 2-193	Calificaciones para los puntajes obtenidos en las condiciones de inoperatividad de las compuertas de la DI (caudal de 35 m <sup>3</sup> /s) – Metodología alternativa. ....	2.303
Figura 2-194	Grado de obstrucción en el túnel de desviación.....	2.304
Figura 2-195	Cálculo de la probabilidad de falla GAD, función de densidad del FS por deslizamiento. ....	2.309
Figura 2-196	Hidrógrafa de destaponamiento transitada – caudal pico de 16.000 m <sup>3</sup> /s.....	2.310
Figura 2-197	Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés. (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí. ....	2.311
Figura 2-198	Mancha de inundación generada con caudal pico de 16.000 m <sup>3</sup> /s (desobstrucción de dos túneles). Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha). No se consideran aportes de sedimentos para este caso (SS).....	2.312
Figura 2-199	Hidrógrafa de destaponamiento transitada – caudal pico de 8.100 m <sup>3</sup> /s.	2.313
Figura 2-200	Mancha de inundación generada con caudal pico de 8.100 m <sup>3</sup> /s (desobstrucción de un túnel). Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad	

máxima (derecha). No se consideran aportes de sedimentos para este caso (SS). 2.314	
Figura 2-201 Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés. (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí. ....	2.315
Figura 2-202 Configuración general de una compuerta radial del vertedero. ...	2.316
Figura 2-203 Curva de calibración del vertedero. ....	2.317
Figura 2-204 Compuertas radiales de vertedero - Vistas frontal y posterior. ....	2.320
Figura 2-205 Unidades de aceite a presión y servomotores. ....	2.321
Figura 2-206 Categorización por amenaza de inundación con una creciente de 2,33 años en las principales zonas de interés. ....	2.327
Figura 2-207 Mancha de inundación generada con una creciente de 2,33 años. ....	2.327
Figura 2-208 Hidrógrafa del Caso de Operación 1 en sitio de presa. ....	2.328
Figura 2-209 Categorización por amenaza de inundación de unos 11.400 m <sup>3</sup> /s asociada con una inoperatividad de las compuertas del vertedero (que se abran y no puedan cerrarse) durante la operación del proyecto. ....	2.329
Figura 2-210 Mancha de inundación generada con una creciente de unos 11.400 m <sup>3</sup> /s asociada con una inoperatividad de las compuertas del vertedero (que se abran y no puedan cerrarse) durante la operación del proyecto. ....	2.330
Figura 2-211 Categorización por amenaza de inundación por una creciente con caudal pico de 368.000 m <sup>3</sup> /s (Sobrevvertimiento de la CMP considerando aporte de sedimentos). en las principales zonas de interés. (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí. ....	2.331
Figura 2-212 Mancha de inundación generada con caudal pico de 368.000 m <sup>3</sup> /s (Sobrevvertimiento de la CMP considerando aporte de sedimentos). Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha) ....	2.332
Figura 2-213 Área de afectación generada a la cota 230 m.s.n.m. – Planta. ....	2.337
Figura 2-214 Área de afectación generada a la cota 230 m.s.n.m. – 3D. ....	2.337
Figura 2-215 Curva de duración de caudales hacia aguas abajo del sitio de presa para la condición existente y para la operación del proyecto. ....	2.340

Figura 2-216	Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés. (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí. ....	2.347
Figura 2-217	Mancha de inundación generada con caudal pico de 2.660 m <sup>3</sup> /s (Tr de 2,33 años). ....	2.347
Figura 2-218	Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés. (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí. ....	2.348
Figura 2-219	Mancha de inundación generada con caudal pico de 4.700 m <sup>3</sup> /s (asociado con una creciente de 50 años de período de retorno). ....	2.349
Figura 2-220	Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés. (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí. ....	2.350
Figura 2-221	Mancha de inundación generada con caudal pico de 5.126 m <sup>3</sup> /s (asociado a la creciente de 100 años de período de retorno). ....	2.351
Figura 2-222	Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés. (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí. ....	2.352
Figura 2-223	Mancha de inundación generada con caudal pico de 6.116 m <sup>3</sup> /s (asociado a la creciente de 500 años de período de retorno). ....	2.353
Figura 2-224	Fluctuación de los niveles del embalse durante la operación del proyecto. ....	2.354
Figura 2-225	Fluctuación de los niveles del embalse durante la situación actual del proyecto. ....	2.355
Figura 2-226	Fluctuación del nivel del embalse durante la operación del proyecto. ....	2.356
Figura 2-227	Localización general del área de estudio. ....	2.358
Figura 2-228	Distribución de las pendientes sobre el área de estudio. ....	2.359
Figura 2-229	Precipitación en la zona de análisis. ....	2.360
Figura 2-230	Coberturas del suelo de la zona de análisis. ....	2.361
Figura 2-231	Delimitación morfométrica por tramos en la zona de estudio. ....	2.362
Figura 2-232	Reclasificación del coeficiente de compacidad. ....	2.363
Figura 2-233	Reclasificación de la pendiente media sobre el área de estudio. ....	2.364

Figura 2-234	Reclasificación de la precipitación.....	2.365
Figura 2-235	Reclasificación de las coberturas vegetales. ....	2.366
Figura 2-236	Clasificación Zonas de Control.....	2.367
Figura 2-237	Órdenes de drenaje y distribución de Buffer.....	2.368
Figura 2-238	Mapa de curvaturas sobre el área de estudio.....	2.369
Figura 2-239	Reclasificación de las curvaturas.....	2.370
Figura 2-240	Amenaza por inundación en la zona de estudio.....	2.371
Figura 2-241	Curva de frecuencia de caudales mínimos en diferentes estaciones.....	2.373
Figura 2-242	Resultados de la caracterización hidráulica, perfiles de la variación de los caudales en la zona de estudio. ....	2.374
Figura 2-243	Comparativo de espejos de agua entre un caudal de 450 m <sup>3</sup> /s (naranja) y el caudal de 35 m <sup>3</sup> /s (escala azul) para los sitios: Puerto Valdivia, El Quince -Doce, Cáceres, Puerto Antioquia, Caucasia y Nuevo Mundo (Hacia Nechí) .....	2.376
Figura 2-244	Principales ciénagas caracterizadas para la zona de estudio.....	2.376
Figura 2-245	Mancha de inundación para un caudal de 450 m <sup>3</sup> /s, asociada a un caudal mínimo de 60% de probabilidad de ocurrencia en la zona del P. H. Ituango. ....	2.378
Figura 2-246	Ubicación de polvorines. ....	2.382
Figura 2-247	Ubicación de sitios de inspección – Polvorín El Palmar.....	2.383
Figura 2-248	Localización general de sitios.....	2.384
Figura 2-249	Ubicación de sitios en zona de presa.....	2.385
Figura 2-250	Ubicación de sitios de inspección – Zona Villa luz.....	2.386
Figura 2-251	Ubicación de las obras en zona de campamento Tacuí. ....	2.386
Figura 2-252	Inventario de materiales polvorín el palmar Zona A – Fecha de corte: 2 diciembre 2021. ....	2.387
Figura 2-253	Radio de afectación por sobrepresión – Zona A Polvorín El Palmar. ....	504
Figura 2-254	Espacialización del tipo de combustible. ....	511
Figura 2-255	Espacialización de la duración del combustible .....	513

Figura 2-256 Espacialización de la carga de combustible según la cobertura vegetal.....	515
Figura 2-257 Susceptibilidad de la vegetación a la ocurrencia de incendios forestales.....	516
Figura 2-258 Espacialización de la amenaza por factores climáticos; Amenaza por precipitación. ....	518
Figura 2-259 Espacialización de la amenaza por factores climáticos; Amenaza por Temperatura. ....	518
Figura 2-260 Espacialización de la amenaza de incendios forestales evaluados desde el factor histórico.....	520
Figura 2-261 Espacialización de la amenaza por relieve (pendientes).....	521
Figura 2-262 Espacialización de la amenaza por el factor de accesibilidad. ....	522
Figura 2-263 Mapa de amenaza total por incendios forestales.....	523
Figura 2-264 Espacialización de la probabilidad de amenaza por emergencia sanitaria dentro del PHI. ....	525
Figura 2-265 Espacialización de la calificación de amenaza por emergencias sanitarias.....	527
Figura 2-266 Espacialización dentro del PHI de la probabilidad de amenaza por Orden Público y social .....	530
Figura 2-267 Espacialización de la calificación de amenaza por Orden Público y Social .....	532
Figura 2-268 Análisis de Frecuencia de Máximos - Estación Puerto Valdivia [2623704].535	
Figura 2-269 Análisis de Frecuencia para Caudales Máximos por Ventanas Móviles - Estación Puerto Valdivia. ....	536
Figura 2-270 Análisis de Frecuencia para Caudales Máximos por Ventanas Móviles - Estación Puerto Valdivia. ....	538
Figura 2-271 Análisis de Frecuencia de Mínimos - Estación Puerto Valdivia [2623704].540	
Figura 2-272 Análisis de Frecuencia para Caudales Mínimos por Ventanas Móviles - Estación Puerto Valdivia. ....	542
Figura 2-273 Análisis de Frecuencia para Caudales Mínimos por Ventanas Móviles - Estación Puerto Valdivia. ....	544

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 2-1 Horizonte IIB en la ladera izquierda del río Cauca, sector de descarga de la Central, tomada en octubre de 2019.....	2.198
Fotografía 2-2 Horizonte IIA en la margen derecha del río Cauca, vía Puerto Valdivia – Sitio de Presa, sector quebrada Ticuitá, tomada en octubre de 2019.....	2.199
Fotografía 2-3 Horizonte IC-IIA en la margen derecha del río Cauca, vía Puerto Valdivia – Sitio de Presa, sector quebrada Ticuitá, tomada en octubre de 2019.....	2.200
Fotografía 2-4 Depósito de vertiente en la margen derecha del río Cauca, sector quebrada Ticuitá, tomada en octubre de 2019.....	2.201
Fotografía 2-5 Depósito aluvial en la margen derecha del río Cauca, vía Puerto Valdivia – Sitio de Presa, sector quebrada Ticuitá, tomada en octubre de 2019.....	2.202
Fotografía 2-6 Conformación de taludes en material aluviotorrencial a la salida de los túneles de desviación, tomada en febrero de 2012.....	2.203
Fotografía 2-7 Lleno antrópico en la margen derecha del río Cauca, sector de descarga de la Central, tomada en octubre de 2019.....	2.203
Fotografía 2-8 Tanque de almacenamiento de 30.000 litros.	2.232
Fotografía 2-9 Almacenamiento de canecas de aceite.	2.232
Fotografía 2-10 Cárcamos perimetrales.....	2.233
Fotografía 2-11 Estibas contenedoras.....	2.233
Fotografía 2-12 Kit de derrames.	2.234
Fotografía 2-13 Máquina para recuperación de aceite.....	2.234
Fotografía 2-14 Dique de contención zona interna	2.235
Fotografía 2-15 Dique de contención zona externa	2.235
Fotografía 2-16 Transformadores Taller ATB.	2.236
Fotografía 2-17 kit de derrames.....	2.236
Fotografía 2-18 Planta diésel y tanque de almacenamiento.....	2.237



Fotografía 2-19	Dique de contención zona casino. ....	2.238
Fotografía 2-20	Dique de contención, zona superior del campamento.....	2.238
Fotografía 2-21	Dique de contención, productos de aseo y limpieza.....	2.239
Fotografía 2-22	Transformador reductor. ....	2.240
Fotografía 2-23	Transformador de potencia. ....	2.241
Fotografía 2-24	Tanque de almacenamiento de diésel.....	2.241
Fotografía 2-25	Planta diésel. ....	2.241
Fotografía 2-26	Planta diésel campamento Tacuí-Cuní. ....	2.242
Fotografía 2-27	Tanque de almacenamiento diésel. ....	2.242
Fotografía 2-28	Estación de combustible, tanques de almacenamiento.....	2.242
Fotografía 2-29	Trampas de aceite. ....	2.242
Fotografía 2-30	Dique de contención, acopio 1. ....	2.243
Fotografía 2-31	Dique de contención, acopio 2. ....	2.244
Fotografía 2-32	Acopio de pinturas, esmaltes, disolventes y resina.....	2.244
Fotografía 2-33	Acopio de aceites y lubricantes. ....	2.245
Fotografía 2-34	Acopio de shampoo, limpiador de concreto y desengrasante. ....	2.246
Fotografía 2-35	Acopio de aceites usados.....	2.246
Fotografía 2-36	Transformador trifásico. ....	2.246
Fotografía 2-37	Plantas diésel. ....	2.247
Fotografía 2-38	Tanque de almacenamiento.....	2.247
Fotografía 2-39	Acopio de sustancias (Separol y sikaplast). ....	2.248
Fotografía 2-40	Kit de derrames.....	2.248
Fotografía 2-41	Tanques de almacenamiento de resina. ....	2.249
Fotografía 2-42	Acopio de almacenamiento general.....	2.249
Fotografía 2-43	Dique de contención aditivos. ....	2.249
Fotografía 2-44	Tanque sedimentador planta de concretos. ....	2.250



## LISTA DE ANEXOS

I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A3	Anexos amenaza sísmica y de movimientos sísmicos inducidos por el embalse
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A4	Anexos amenaza por movimientos en masa
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A5	Anexos amenaza por subsidencia o hundimiento
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A6	Anexos amenaza por modos de falla de la presa
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A7	Anexos amenaza por socavación y procesos erosivos
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A8	Anexos amenaza por derrames de sustancias peligrosas
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A9	Anexos amenaza por avenidas torrenciales
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A10	Anexos amenaza por modificaciones extremas de caudales por riesgo tecnológico
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A11	Anexos amenaza por fenómenos climáticos extremos
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A12	Anexos amenaza por incendios y explosiones
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A13	Anexos amenaza por emergencias sanitarias
I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A14	Anexos amenaza por orden público y social

# 1 INTRODUCCIÓN

## 2 CONOCIMIENTO DEL RIESGO

### 2.2 VALORACIÓN DEL RIESGO

#### 2.2.4 Caracterización y evaluación de amenazas

A partir de la identificación de las amenazas planteadas en la Tabla 2-1 y con el apoyo de estudios técnicos realizados para el PHI tanto para las etapas previa y de construcción, como durante la atención de la contingencia, se realizó la caracterización de las amenaza endógenas y exógenas, la cual permite determinar las características y extensión espacial de la afectación de las mismas (expresada como un mapa de espacialización en caso de manifestación de la amenaza). Esta caracterización de amenazas se actualizó con datos de fuentes de información primaria y revisión de información secundaria relacionada con bases de datos y registros históricos de eventos.

Tabla 2-1 Amenazas identificadas en el proyecto hidroeléctrico y su tipología.

Amenaza	Tipo		Origen			
	Exógenas	Endógenas	Natural	Socionatural	Antrópico	Tecnológico
Amenaza sísmica	x		x			
Movimientos inducidos por el embalse		x		x		x
Movimientos en masa	x	x		x		x
Subsistencia		x				x
Modos de falla de la presa		x				x
Socavación y erosión	x		x			x
Derrames		x		x		x
Avenidas torrenciales	x		x			
Modificaciones extremas de caudal		x		x		x
Fenómenos climáticos extremos	x		x			
Incendios y explosiones		x			x	x
Incendios forestales	x		x		x	
Emergencias	x	x	x	x	x	x

Amenaza	Tipo		Origen			
	Exógenas	Endógenas	Natural	Socionatural	Antrópico	Tecnológico
sanitarias						
Orden público	x			x	x	

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

A continuación, se presenta la caracterización de cada una de las amenazas identificadas.

#### **2.2.4.1 Caracterización de amenaza sísmica**

La amenaza por movimientos sísmicos, conocida como amenaza sísmica, se conoce como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno sísmico que pueda causar daños a la vida de las personas o a bienes (por ejemplo, infraestructura) y se caracteriza por estimar numéricamente la probabilidad estadística de la ocurrencia (o excedencia) de cierto valor de intensidad sísmica (o aceleración del suelo) en un determinado sitio, durante un período de tiempo (periodo de retorno). La amenaza sísmica se expresa en curvas de amenaza, que representan la frecuencia anual de los diferentes niveles de aceleración máxima esperada en el sitio de interés.

La amenaza sísmica del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI) ha sido estudiada en diferentes fases. El proyecto cuenta con un estudio de amenaza sísmica, desarrollado en el año 2010 por el Consorcio Generación Ituango, el cual fue la base para el diseño sismo-resistente de las obras que hoy en día se han construido. Este estudio fue elaborado con base en las recomendaciones del Boletín 72 del ICOLD (1989, revisado 2010). Después de la contingencia ocurrida en el proyecto el 28 de abril de 2018, se consideró oportuno realizar una actualización del estudio de amenaza sísmica, para ajustarse a las recientes recomendaciones del Boletín 148 del ICOLD (2016).

La actualización del estudio de amenaza sísmica del proyecto hidroeléctrico se presenta en el documento I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001 (ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A3), el cual fue oficializado en febrero de 2021 ante Empresas Públicas de Medellín (EPM). De acuerdo con dicho documento, se han caracterizado las diferentes fuentes sismogénicas que contemplan principalmente fallas geológicas consideradas como activas dentro del modelo de amenaza sísmica, teniendo en cuenta parámetros tales como cinemática, buzamiento, profundidad, longitud de ruptura y tasa de deslizamiento.

Dentro del modelo de fallas activas se ha considerado la falla Santa Rita E-W, Santa Rita E-E, Espíritu Santo, Sardinias, Naranjo, Cauca, Sabanalarga Cauca-Almaguer, entre otras. En este modelo de amenaza también contribuyen las zonas de subducción que se ha dividido de acuerdo con los distintos ambientes tectónicos presentes en el territorio colombiano. Dentro de la subdivisión constan las fuentes inter-placa y fuentes intra-placa debido a la interacción de la placa Nazca y Caribe con la placa suramericana. Adicionalmente, en el modelo también se han considerado fuentes tipo área, donde se agrupa la sismicidad que no fue asignada a una fuente específica (falla, zona inter o intra-placa, etc.). Estas áreas están basadas en el comportamiento sísmico de distintas zonas, dando como resultado la selección de 23 áreas para sismicidad superficial y 16 para la sismicidad profunda.

El detalle de identificación y caracterización de las diferentes fuentes sismogénicas empleadas para el desarrollo del análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA, por sus siglas en inglés) del PHI, se presenta en los numerales 2.4 y 3.2 del informe I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001 (ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A3).

#### 2.2.4.1.1 Análisis y evaluación de la amenaza

En el documento de actualización de la amenaza sísmica (informe I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001, ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A3) se encuentran las consideraciones para la evaluación de los parámetros sísmicos de diseño que fueron establecidos de acuerdo con las recomendaciones de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, por sus siglas en inglés), con el fin de revisar la seguridad de grandes presas existentes o para establecer los criterios de diseño de estructuras nuevas. El Comité Internacional de Grandes Presas en su Boletín 148 (2016) define los siguientes sismos que deben ser utilizados para el análisis estructural o de estabilidad y para el diseño de grandes presas:

- **Sismo para Evaluación de la Seguridad (*Safety Evaluation Earthquake – SEE*):** Es el máximo nivel de movimiento del terreno para el cual la presa debe ser diseñada o analizada. Corresponde al nivel de movimiento producido por el Sismo Máximo Creíble obtenido mediante un análisis determinista, o al nivel de movimiento para un período de retorno muy largo, por ejemplo 10.000 años, obtenido mediante un análisis probabilístico. Para este sismo no se permiten daños en la presa que conduzcan a una descarga no controlada del agua.
- **Sismo Básico de Operación (*Operating Basis Earthquake – OBE*):** Representa el nivel de movimiento del terreno para el cual sólo son aceptables daños menores. La presa, las estructuras anexas y los equipos deben permanecer funcionales y el daño debe ser fácilmente reparable. El OBE puede obtenerse a partir de un análisis económico del riesgo, pero se recomienda un período de retorno mínimo de 145 años (probabilidad de excedencia del 50% en 100 años).
- **Sismicidad Disparada por el Embalse (*Reservoir-Triggered Earthquake – RTE*):** Representa el máximo nivel de movimiento del terreno que se puede producir debido al llenado del embalse. Este sismo puede ser mayor o menor que el OBE, pero nunca será mayor que el SEE.

En el Boletín 148 (2016) del ICOLD, el sismo SEE reemplaza el término *Sismo Máximo de Diseño (MDE)*, usado en la primera edición este boletín, y al *Sismo Base de Diseño (DBE)* usado en el Boletín 46 (Sismicidad y diseño de presa, 1983).

De acuerdo con las características de la presa del proyecto hidroeléctrico, donde la capacidad del embalse es superior a 120 hm<sup>3</sup>, la altura de la presa superior a 45 m, los requerimientos de evacuación supera las 1.000 personas y dado que ante un eventual daño los impactos aguas abajo son altos; la presa se ha diseñado con los criterios de diseño sísmico más rigurosos. A continuación, en la Tabla 2-2, se presentan los criterios seleccionados.

Tabla 2-2 Niveles de desempeño para el diseño dinámico de la presa Ituango

Sismo	Período de retorno - $T_r$	Nivel de desempeño
OBE	145 años	Presa y sistemas asociados sin daños importantes
SEE	10.000 años	Presa con daños considerables, pero sin colapso ni descarga no controlada

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2021.

De acuerdo con los resultados del análisis de amenaza sísmica realizado para el PHI, las aceleraciones máximas a nivel de roca (PGA) y la aceleración espectral para 2,0 segundos, para los sismos OBE y SEE se presentan en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Valores de aceleración para PGA y 2,0s para el diseño de la presa

Sismo	Periodo de retorno – $T_r$	PGA (0,01 s)	Periodo 2,0 s
OBE	145 años	0,094 g	0,020 g
SEE	10.000 años	0,601 g	0,133 g

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2021.

Por otro lado, si bien la actualización del estudio de amenaza para el PHI, ha considerado la caracterización de todas las sismofuentes aplicables, respetando los radios de estudio indicados en el ICOLD (2016), los resultados presentados solo aplican para la presa y sus obras conexas. Dado lo anterior, para los taludes localizados en el vaso del embalse, taludes viales o de obras civiles que se rijan por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2010), se deberá considerar las aceleraciones contempladas en el Título A y sus modificaciones de acuerdo con el Título H de dicho código.

De acuerdo con esta norma, para realizar los diseños es necesario estimar un espectro de respuesta donde se determinan los espectros elásticos para un amortiguamiento del 5% expresado en términos de la aceleración ( $S_a$ ) y del período espectral ( $T$ ) para un período de retorno de 475 años. Los parámetros fundamentales para la construcción de estos espectros son:  $A_a$ , que es la aceleración pico efectiva para diseño;  $A_v$ , que representa la velocidad horizontal pico efectiva; y los factores de amplificación ( $F_a$  y  $F_v$ ) que varían según la clasificación del suelo (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2010)

En la NSR-10 se presenta un mapa de zonificación sísmica de Colombia, donde se define el nivel de amenaza según la localización del sitio de interés. Igualmente, se encuentra la definición del tipo de perfil de suelo considerando los parámetros de éste, determinando así su clasificación según la descripción del perfil de suelo donde se emplazará la estructura a diseñar.

Con la información anterior se estima el espectro de diseño de acuerdo con la NSR-10, donde la zona del proyecto está considerada dentro de una zona de amenaza sísmica intermedia a alta, cuyos coeficientes de aceleración horizontal pico efectiva ( $A_a$ ) y velocidad horizontal pico efectiva ( $A_v$ ) se presentan en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Valores de Aa y Av de la zona del proyecto por municipio

Municipio	Aa (Tr=475años)	Av (Tr=475años)	Zona de Amenaza sísmica
Briceño	0,15	0,20	Intermedia
Buriticá	0,20	0,25	Alta
Ituango	0,20	0,20	Intermedia
Liborina	0,15	0,20	Intermedia
Olaya	0,15	0,20	Intermedia
Peque	0,20	0,25	Alta
Sabanalarga	0,20	0,20	Intermedia
San Andrés de Cuerquia	0,15	0,20	Intermedia
Santa Fe de Antioquia	0,20	0,20	Intermedia
Toledo	0,15	0,20	Intermedia
Valdivia	0,15	0,20	Intermedia
Yarumal	0,15	0,20	Intermedia

Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2010)

En la Figura 2-1 se presenta un mapa donde se encuentra el nivel de amenaza por movimientos sísmicos para la zona de influencia del PHI, teniendo en cuenta la categorización de nivel de amenaza sísmica establecido en la NSR-10 en el numeral A.2.3, donde clasifica como zona de amenaza sísmica baja a los lugares donde los coeficientes Aa como el Av son menores o iguales a 0,10, intermedia los lugares donde los coeficientes son mayores a 0,10 y no excede 0,20, y alta a los lugares donde los coeficientes son mayores que 0,20. Teniendo en cuenta esta categorización, la zona de presa y obras conexas del proyecto se encuentran en una zona de amenaza sísmica intermedia, dado que el nivel de aceleración esperado para PGA para un periodo de retorno de 475 años es de 0.17 g, así como se indica en el documento de actualización de la amenaza sísmica y en el mapa (informe I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001 ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A3 y mapa M-PHI-111-TRA-SN-G-010).

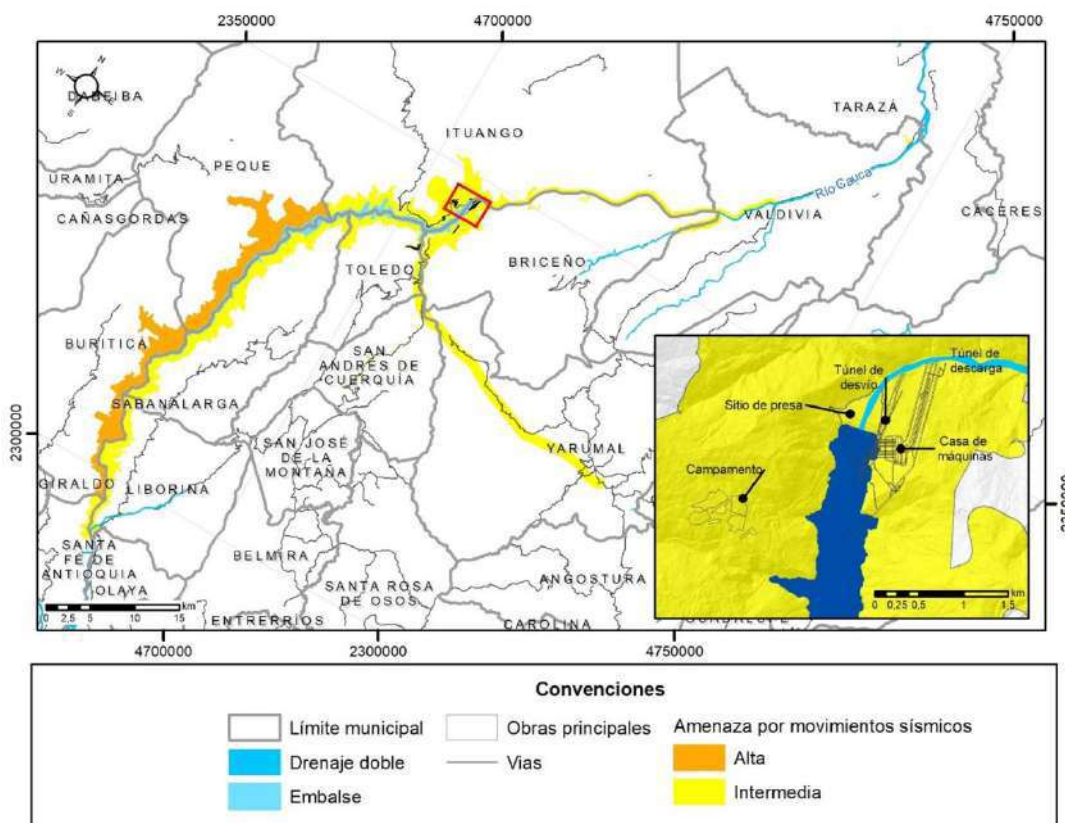


Figura 2-1 Espacialización de la amenaza por movimientos sísmicos.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

### 2.2.4.2 Caracterización de amenaza por movimientos sísmicos inducidos por el embalse

La amenaza por sismicidad desencadenada (también denominada disparada), se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno sísmico que se genera en una sismofuente puntual como respuesta al llenado de un embalse en primera instancia, y a la propagación de la presión de poros en las discontinuidades de la zona de la corteza donde se localiza dicho embalse, a mediano y largo plazo. La caracterización y estimación de la tasa de excedencia de este fenómeno suele ser compleja, dado que depende, entre otras, de las condiciones sismotectónicas de la región, del volumen del embalse, del tipo de roca presente en el área de influencia, de la profundidad del embalse, de los esfuerzos que actúan sobre la zona (tracción, compresión, o cizallamiento) y del grado de actividad de las fallas. Sin embargo, los efectos de un posible sismo desencadenado o disparado por el embalse usualmente son incluidos dentro de los análisis de amenaza sísmica de los proyectos.

El fenómeno de sismicidad desencadenada (también llamada disparada o inducida) por el embalse, ha sido considerado desde el desarrollo de los estudios de impacto ambiental (EIA) del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI). Como se menciona en dichos estudios, la sismicidad desencadenada es un fenómeno observado en algunos embalses del mundo, el cual



consistente en la generación de sismos normalmente de magnitudes moderadas o pequeñas durante el llenado del embalse o incluso varios años después.

De acuerdo con el Boletín 137 del ICOLD (2011), este efecto está relacionado con el aumento de la carga por el peso del agua y el incremento de presión de poros en las fallas geológicas. Los sismos desencadenados durante el primer llenado del embalse están relacionados con los esfuerzos elásticos debido a la carga misma que induce el embalse, mientras que los sismos que se presentan después de varios ciclos de llenado y desembalse corresponden al flujo gradual del agua hacia profundidades sismogénicas en la corteza.

Si una falla activa que se encuentra en el proceso de acumulación de energía es inundada, los cambios en las condiciones de esfuerzos por el llenado del embalse la pueden llevar a liberar la energía acumulada hasta el momento, generando un evento sísmico de magnitud menor o igual al que hubiera resultado más tarde en estado natural. En cualquier caso, la energía principal disipada en un sismo desencadenado por el embalse corresponde a la deformación tectónica preexistente (ICOLD, 2011).

Según ICOLD (2011), la activación debida al embalse no puede cambiar los procesos tectónicos existentes, es decir, no modifica las condiciones de diseño de las obras en cuanto al valor de la aceleración de diseño, si la amenaza se evalúa correctamente (como en el caso del PHI) y no implica la ocurrencia de sismos mayores a los que ocurrirían sin el embalse. De acuerdo con lo anterior, su único impacto al ambiente es la coincidencia de estos eventuales sismos con la puesta en funcionamiento del proyecto y la reducción en el tiempo de recurrencia de un evento, que, en condiciones normales, en todo caso hubiera ocurrido alguna vez en el futuro.

Los casos más comunes de sismicidad desencadenada se presentan en embalses de gran profundidad (más de 100 m), con volúmenes de agua altos (más de  $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ ), y que cubren fallas que han sido activas durante el Cuaternario Tardío, especialmente en ambientes de esfuerzos de tracción (asociados con fallas normales) o en fallas de rumbo. Los sismos se desencadenan más fácilmente en épocas de cambios rápidos en el nivel del embalse. No se ha comprobado una influencia directa del tipo de roca, aunque se han presentado más casos en rocas sedimentarias (Schwartz et al., 1996).

#### 2.2.4.2.1 Análisis y evaluación de amenazas

Si se comparan las condiciones específicas del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI) con otros proyectos que han presentado sismicidad desencadenada en el mundo, puede decirse que, en el caso del PHI, la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno es media a alta, de acuerdo con lo presentado en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5 Atributos para estimar la probabilidad de ocurrencia de sismicidad producida por el llenado del embalse

Atributo	Probabilidad de ocurrencia		
	Alta	Media	Baja
Profundidad (m)	Muy profundo	Profundo	Superficial



Atributo	Probabilidad de ocurrencia		
	Alta	Media	Baja
	(más de 150)	(entre 92 y 150)	(menos de 92)
Volumen (m <sup>3</sup> )	Muy grande (más de 1E10)	Grande (1.2 a 10E9)	Pequeño (menos de 1.2E9)
Estado de esfuerzos	Tracción	Compresión	Corte
Actividad de la falla	Fallas activas presentes	Fallas activas no presentes	Desconocida
Geología	Sedimentaria	Metamórfica	Ígnea

Fuente: Beacher y Keeney, (1982).

La magnitud máxima relacionada con casos de sismicidad desencadenada por embalses es difícil de estimar si no se basa en la frecuencia relativa de tales casos en comparación con el número de grandes represas (ICOLD, 2011). Considerando todos los casos aceptados de sismicidad desencadenada por embalses, solo en cuatro casos se han registrado magnitudes asociadas a este fenómeno en el rango de 6,0 a 6,3 (ICOLD, 2011), por lo tanto, es lógico aceptar un sismo de magnitud 6,5 como la magnitud máxima o “techo” para sismicidad asociada al llenado de embalses (ICOLD, 2011).

Considerando lo anterior, en el diseño de la presa y de las obras anexas, ya se estarían contemplando los efectos dinámicos de un sismo de tal magnitud relacionado a sismicidad desencadenada por el embalse, e incluso magnitudes superiores. Lo anterior se puede evidenciar en el desarrollo del estudio de amenaza sísmica, donde las sismo-fuentes localizadas en el área de influencia del embalse, pueden generar magnitudes de hasta 7,8 Mw. Adicional a lo anterior, en el estudio de amenaza se presenta el análisis de disgregación, donde el escenario más probable para que se alcance un nivel de aceleración relacionado a un periodo de retorno ( $T_r$ ) de 10.000 años (sismo SEE), corresponde a un sismo de magnitud 7,0 Mw a una distancia de 11 km desde el sitio de presa (numeral 3.4.4 del documento I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001, dispuesto en Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A3). El escenario descrito anteriormente fue considerado en la selección de los acelerogramas con los que fue realizado el análisis dinámico de la presa.

Por medio de la red sismológica local del PHI, se puede evidenciar que la sismicidad que ha sido registrada desde el año 2016 en la zona del embalse, hasta la fecha, ha permanecido con una tasa aproximadamente constante, antes, durante y después del llenado como se observa en la Figura 2-2. Adicionalmente, teniendo en cuenta que han transcurrido más de dos años desde el inicio del llenado del embalse y que las magnitudes de los eventos registrados durante las tres etapas analizadas son inferiores a 4.0  $M_L$  (ver Figura 2-3), es poco probable que en el futuro se presenten eventos con magnitudes mayores relacionados a sismicidad desencadenada por el embalse.

Es importante tener en cuenta que el catálogo presentado en el informe I-2194-PHI-010-GEO-REP-SIS-001 (ver documento en Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A3) corresponde a una entrega preliminar, ya que las ventanas de análisis del registro de las señales sísmicas antes y después del llenado son diferentes, por lo que actualmente se siguen realizando validaciones

a algunos eventos registrados durante las tres etapas del proyecto (antes, durante y después del llenado del embalse). Durante estas validaciones, se identifican eventos que por error humano o ruidos ambientales fueron omitidos, se mejoran las localizaciones de los eventos sísmicos, la magnitud y los mecanismos focales, para así disminuir las incertidumbres asociadas al procesamiento de cada uno de los eventos presentados en este informe.

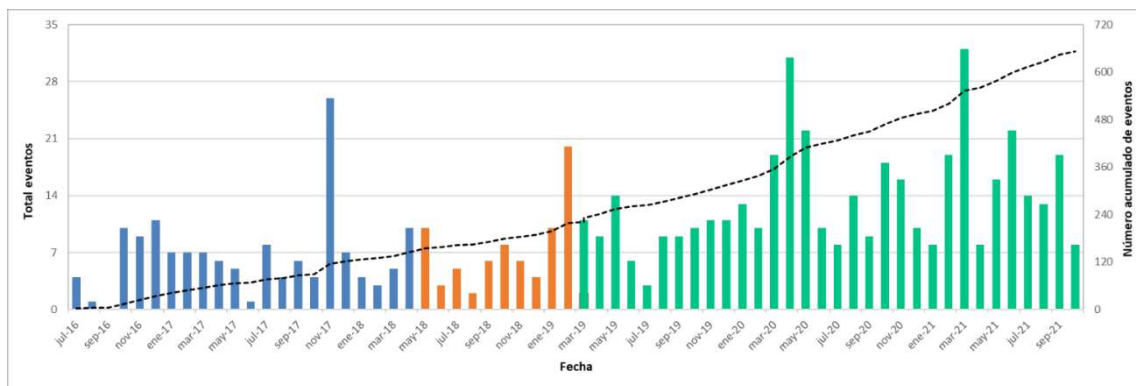


Figura 2-2 Evolución temporal de la sismicidad considerando las etapas antes (azul), durante (naranja) y después (verde) del llenado del embalse. Las barras representan el número de eventos al mes y la línea el número acumulado de sismos.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2021.

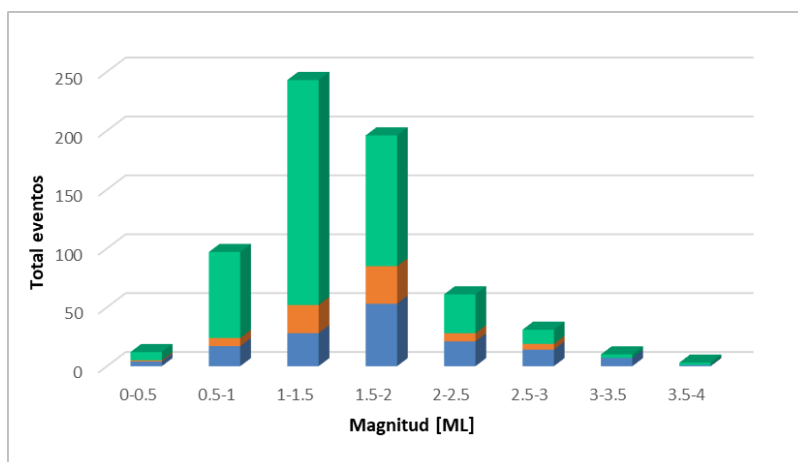


Figura 2-3 Número de eventos para diferentes rangos de magnitud antes (azul), durante (naranja) y después (verde) del llenado del embalse

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2021.

Teniendo en cuenta las características del proyecto, la información recolectada por las redes sísmológicas y considerando que las zonas alrededor de las fallas activas son las áreas donde sería más probable desarrollar el fenómeno de sismicidad desencadenada, debido principalmente a la propagación de la presión de poros en las estructuras, además, teniendo en cuenta que la tasa de actividad de las fallas en la zona del proyecto es moderada a baja (ver informe I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001 en ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A3), se

les asignó un nivel de amenaza medio a estas estructuras, lo que indica que sería medianamente probable que en las zonas de falla y en su área de influencia se presentara el fenómeno, debido a las maniobras de embalse y desembalse o a la presión de poros causada por la filtración de agua en dichas discontinuidades.

A la zona del embalse, a una distancia máxima de 3 km desde el mismo, se le asignó un nivel de amenaza bajo, teniendo en cuenta que pueden existir discontinuidades no identificadas, localizadas en profundidad, que podrían activarse por el efecto de la carga del agua y/o la filtración de esta hasta profundidades sismogénicas. En todo caso, basado en el conocimiento que se tiene de la zona, estas estructuras serían menores, por lo tanto, la sismicidad en caso de ser desarrollada sería de baja energía (magnitudes bajas). Si bien la altura máxima del embalse no ha sido alcanzada, alrededor de 12 m es lo que faltaría para llegar al nivel normal de operación del proyecto (aproximadamente un 5%), es poco probable que el incremento de la cabeza hidráulica faltante pueda desencadenar sismos de magnitudes mayores a los registrados en los catálogos históricos e instrumentales disponibles y por la red sismológica del PHI, en el área de influencia del proyecto.

Por último, las áreas por fuera de la influencia del embalse y de las fallas activas, la sismicidad no se categorizaría como una amenaza por sismicidad disparada, dado que la sismicidad presentada en estas zonas no tendría relación directa con el fenómeno de sismicidad desencadenada, en caso de que se presente.

De acuerdo con lo expuesto, en la Figura 2-4 se presenta un mapa donde se establece, de forma cualitativa, el nivel de amenaza por sismicidad desencadenada por el embalse para la zona de influencia del PHI (ver mapa M-PHI-111-TRA-SE-G-010).

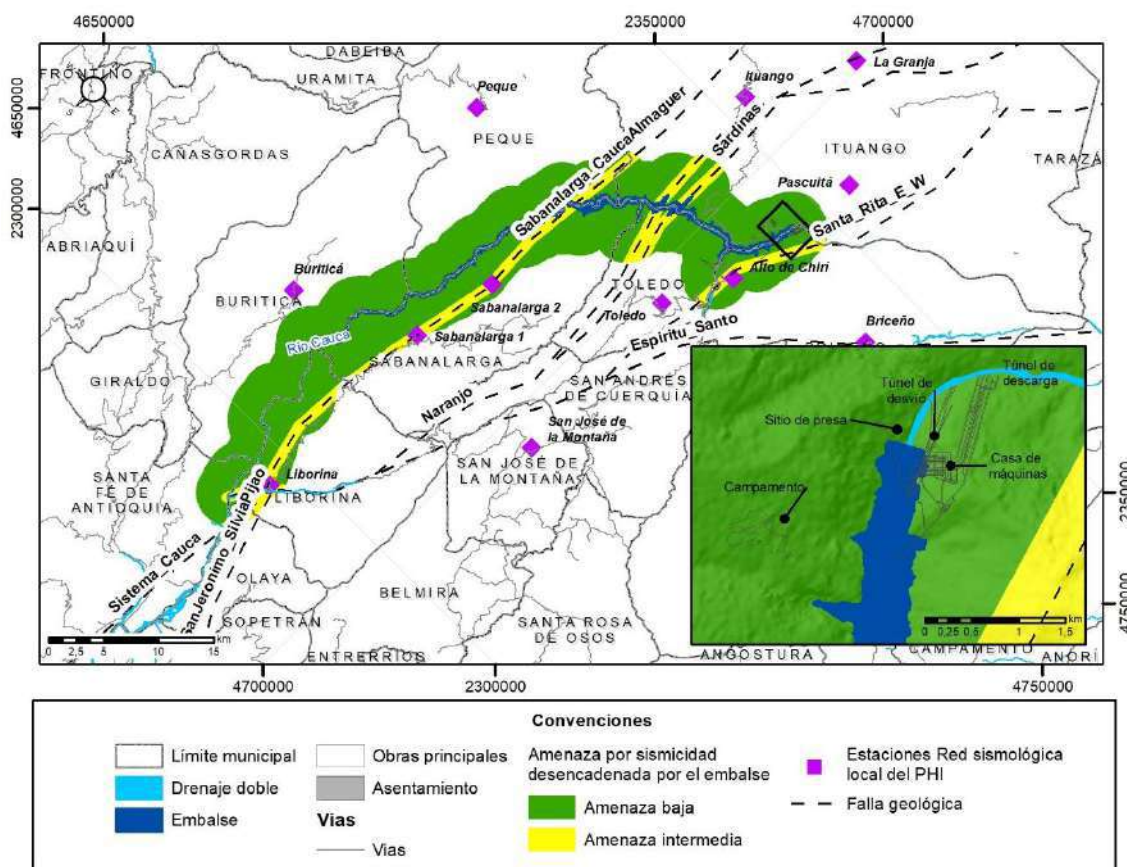


Figura 2-4 Espacialización de la amenaza por sismicidad desencadenada (o disparada) por el embalse.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

### 2.2.4.3 Caracterización de amenaza por movimientos en masa

A continuación, se presenta la definición de los parámetros de análisis y demás aspectos para la caracterización de la amenaza por movimientos, tanto desde el enfoque regional, como el local, para posteriormente poder evaluarla.

#### 2.2.4.3.1 Análisis regionales

Como se mencionó anteriormente, en el marco para la atención del Numeral 2 del Artículo 2 de la Auto 2292 del 15 de mayo del 2018 de la ANLA, se realizó una zonificación de amenaza por movimientos en masa en laderas naturales, considerando diferentes escenarios de lluvia y sismo como factores detonantes (Integral S.A., 2018), la cual se encuentra vigente dentro del marco regional del PHI y a continuación se presentan de manera breve la caracterización realizada para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa para dicha zonificación (para una consulta de mayor detalle, ver documentos “0090007\_Auto2292\_Art2\_N2\_Rev01” y “0090007\_Auto2292\_Art2\_N2\_Info3\_Rev1 en Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A4).

### A. Definición de área de análisis

Para la zonificación regional por movimientos en masa, se delimitó un área de análisis de acuerdo con la ubicación de las obras principales del PHI, el embalse y un tramo aguas abajo del sitio de presa, teniendo en cuenta aspectos fisiográficos importantes, como la conformación topográfica y orientación de las vertientes aledañas al cañón del río Cauca para la zona del proyecto.

El área de análisis abarcó la zona del embalse desde su cola, localizada en el departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Buriticá (corregimiento La Angelina), Liborina (veredas La Sucia y Llano Grande) y Santa Fe de Antioquia (vereda Cativo), hasta aguas abajo del sitio de presa (hacia el norte por el eje del río Cauca), en las inmediaciones del corregimiento El Doce del municipio de Tarazá (Antioquia). También se extendió hasta las divisorias de agua de las laderas que, según su orientación, disposición fisiográfica y estructural, y morfología, conforman el cañón del río, donde los procesos de inestabilidad y su propagación inciden directamente en el área de influencia del proyecto (Figura 2-5).

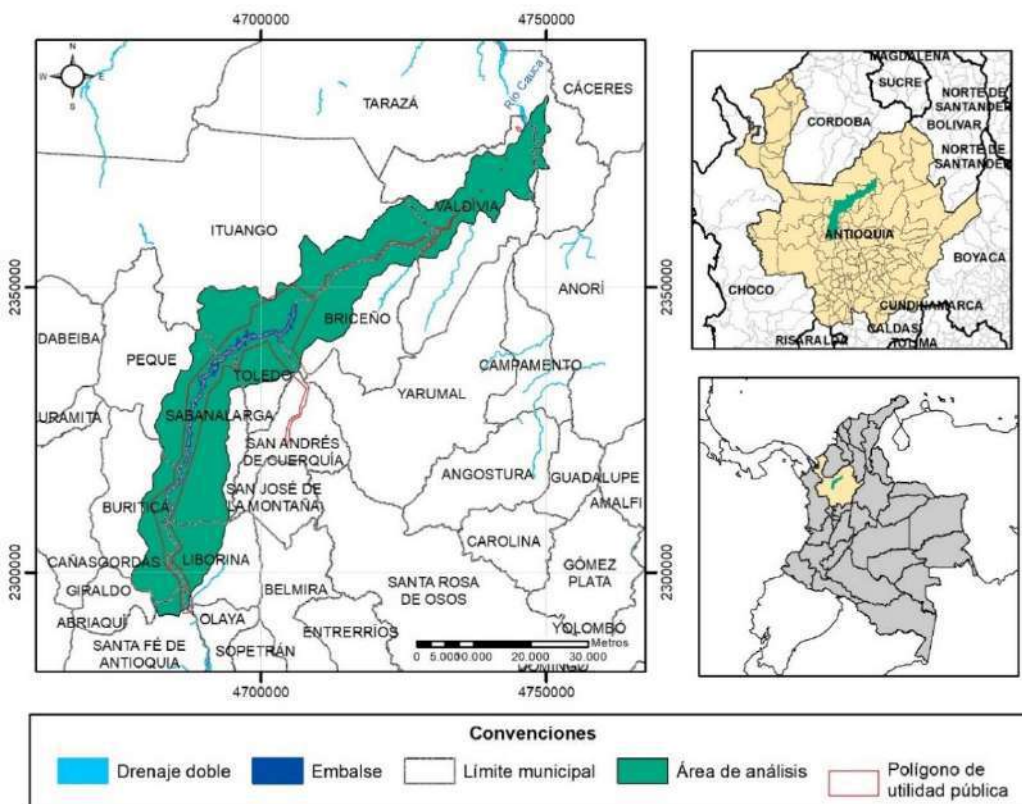


Figura 2-5 Área de análisis para zonificación por movimientos en masa.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



## B. Caracterización geológica y geomorfológica

### 1) Geología

En la zona de estudio afloran unidades litológicas de tipo metamórfico, ígneo y sedimentario con edades que van desde el Paleozoico al Neógeno, adicionalmente se tiene una serie de depósitos Cuaternarios de carácter aluvial y de vertiente, asociados a la dinámica fluvial del río Cauca y sus tributarios, y a los procesos hidrogravitacionales presentes en las laderas adyacentes al río.

Las rocas metamórficas están conformadas por unidades litológicas pertenecientes al Complejo de Puquí y al Complejo Cajamarca, estas consisten en una serie de anfibolitas, gneises, ortogneises y esquistos. Las rocas ígneas tienen en común una fuerte influencia tectónica dada esencialmente por las estructuras N-S del Sistema de Fallas Cauca-Romeral y dentro de este grupo se incluyen los intrusivos sintectónicos y algunas rocas básicas asociadas a secuencias ofiolíticas desmembradas. Por último, las rocas sedimentarias en la zona de estudio están representadas por las unidades denominadas Rocas Sedimentarias del Terciario y el miembro sedimentario de la Formación Barroso. En la Tabla 2-6 se presenta una breve descripción de las unidades litológicas en roca, presentes en el área de estudio.

Tabla 2-6 Breve descripción de las rocas presentes en el área de análisis (metamórficas, ígneas y sedimentarias)

Tipo de roca	Unidad litológica	Descripción
Metamórficas	Gneises (Pzmf)	Conjunto de gneises cuarzofeldespáticos con estructura que varía entre esquistosa, gnéisica y migmatítica; plegados y con diferenciaciones mineralógicas y texturales debido a la variabilidad del metamorfismo y a la heterogeneidad de los sedimentos originales.
	Complejo de Puquí (PEmp, Penp, PEap)	Corresponde a las unidades de Gneis Micáceo (PENp) metatonalita de Puquí (PEmp) y Anfibolitas de Puquí (PEap); la unidad de gneis está constituida por cuarzo, sillimanita, plagioclasa, hornblenda, biotita y moscovita, asociados a migmatitas y granitoides. Los gneises fueron intruídos por la metatonalita de Puquí, que generó un metamorfismo térmico con asimilación de la roca encajante. La composición de la metatonalita aunque variables es una tonalita y localmente granodiorita, con minerales metamórficos que la caracterizan.
	Esquistos cuarzo sericíticos, Esquistos actinolíticos y cloríticos Esquistos cloríticos y sericíticos intercalados (Pzes, Pezev, Pz(es+ev))	Intercalaciones de esquivo de diferente composición, denominados esquistos verdes (cuarzo-sericíticos) y esquistos verdes (actinolíticos- cloríticos) que se presentan en bancos de esquistos o filitas fracturados, con predominio de una de las composiciones mencionadas o en proporciones similares (Pz(es+ev)) Las relaciones de éstos con los cuerpos ígneos son en general de tipo intrusivo, mientras que con los gneises es de tipo gradacional a normal. En algunos sectores desarrollan zonas de alteración, que se caracterizan por un incremento en el grado de fracturamiento, en la oxidación y meteorización de los macizos. El desarrollo de suelos residuales es escaso, con espesores inferiores a los 10 m.
	Intrusivos Gneísicos	Pequeños cuerpos de gneis de composición tonalítica y granítica.

Tipo de roca	Unidad litológica	Descripción
	sintectónicos (Pzni)	Pueden variar en composición a esquistos y anfibolitas con variaciones a gneis pegmatítico, de esquistosidad plana, fina a mal definida por bandas finogranulares de cuarzo y feldespato concordantes con la esquistosidad. Se presentan alterados parcialmente y forman suelos arcillo arenosos, de color amarillo y café claro, además conserva fracciones de cuarzo, feldespato y mica.
	Anfibolitas (Pa)	Afloran como cuerpos alargados y controlados por el tren estructural regional de dirección N-S. Son rocas de textura foliada, en la que sobresalen las hornblendas y plagioclasas orientadas. Las anfibolitas se presentan altamente fracturadas y su capa de meteorización la constituye un escaso suelo saprolítico inferior a tres metros de espesor, que localmente puede alcanzar los 15 m, es de color amarillo rojizo y café oscuro, de grano fino a medio.
	Serpentinita (Kiu)s	Rocas ultrabásicas, controladas por el tren regional de fallas de dirección N-S. Corresponden a serpentinitas de color negro grisáceo, gris oscuro a negro verdoso, en alto grado de fracturación por el efecto tectónico en la zona.
Ígneas	Gabros (Kig)	Cuerpos intrusivos básicos que aparecen tanto por diferenciación magmática de los intrusivos intermedios, como por segmentación de las columnas ofiolíticas. Los primeros, aparecen en fajas delgadas y alargadas de poco espesor, mientras que las asociadas a columnas ofiolíticas se presentan en delgadas franjas anexas a las rocas ultrabásicas.
	Intrusivos máficos – Metagabro (Kg)	Cuerpos básicos que aparecen tanto por diferenciación magmática de los intrusivos intermedios, en cuyo caso son intrusivos y se observan como fajas delgadas y alargadas. Se denominan como metagabro y son rocas masivas, faneríticas, de grano medio a grueso, de color verde oscuro, compuestas por plagioclasa, hornblenda y piroxeno, con una foliación preferencial de dirección norte - sur.
	Volcánico de la Formación Barroso (Ksvb)	Una de las unidades de mayor extensión de afloramiento al largo de la zona del embalse, lo constituye una secuencia de diabasas, basaltos, rocas volcano-sedimentarias y paquetes de chert, pertenecientes a la denominada Formación Barroso (Álvarez y González, 1978). Son rocas de variables propiedades geomecánicas, desde muy duras y resistentes hasta altamente frágiles en las zonas de falla.
	Batolito de Sabanalarga (Ksts)	Constituido en su mayoría por una diorita de grano medio, que aflora en gran parte de la zona central del embalse, siguiendo la dirección N-S del tren estructural regional. Como característica general, son rocas de buena calidad geotécnica, salvo localizados sectores de alto fracturamiento debidos al cruce de fallas. En la zona de influencia del embalse, su sobrecapa de meteorización es inferior a los 8 m, con predominio de roca fracturada y oxidada.
	Andesita Porfírica (Tap)	Pequeño cuerpo de rocas hipoabisales de color gris, finogranular, localmente porfírica con cristales de fenocristales de plagioclasa, con litología dominante de andesitas basálticas, basaltos augíticos y andesitas augíticas de color gris a verde oscuro con textura porfídica.
	Andesita de Buriticá (Tab)	Andesita hornbléndica de carácter afanítico a porfídico. Afectada en



Tipo de roca	Unidad litológica	Descripción
		los bordes por alteración hidrotermal.
Sedimentarias	Sedimentitas de la Formación Barroso Barroso (Klb)	Sedimentitas asociadas a la Formación Barroso, compuestas por bancos de liditas en parte calcáreas y lodolitas con fósiles del Cretácico superior.
	Rocas Sedimentarias del Terciario (Ts)	Una cobertura local de sedimentitas terrígenas Terciarias afloran en los alrededores de Santa Fe de Antioquia, como parte de la denominada Formación Amagá. Se intercalan capas de conglomerados polimícticos, areniscas, lutitas y carbones, en estratos métricos, por lo general planares, con pliegues isópacos. Conforman terrenos estables en cuanto a fenómenos de remoción en masa, pero altamente afectables por erosión.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2018.

Respecto a los depósitos recientes, el fuerte gradiente y por ende la elevada tasa morfodinámica de las vertientes del cañón del río Cauca y sus cuencas tributarias, han generado depósitos no consolidados, principalmente de alta energía y compuestos predominantemente por materiales de tamaños gruesos, donde se destacan los depósitos de vertiente, depósitos aluviales y aluviotorrenciales.

Los depósitos de vertiente o coluviales son producto de procesos morfodinámicos como los movimientos en masa, se presentan puntualmente a lo largo de todas las vertientes del cañón del río Cauca y se caracterizan por sus reducidas dimensiones con relación al resto de los materiales no consolidados.

Los depósitos aluviales están conformados por depósitos de llanura de inundación, terrazas y abanicos aluviotorrenciales. Los depósitos de llanura se presentan sobre ambos márgenes del río Cauca, donde el gradiente del terreno y la dinámica fluvial permiten la depositación de material de carácter aluvial y aluviotorrencial. Las terrazas de origen aluvial son acumulaciones de grava, arenas y limos que se encuentran más altas del cauce actual del río Cauca y sus tributarios; se presentan antiguos niveles del fondo del valle o llanuras de inundación.

En la Figura 2-6 se presenta el mapa de unidades litológicas para la zona de estudio.

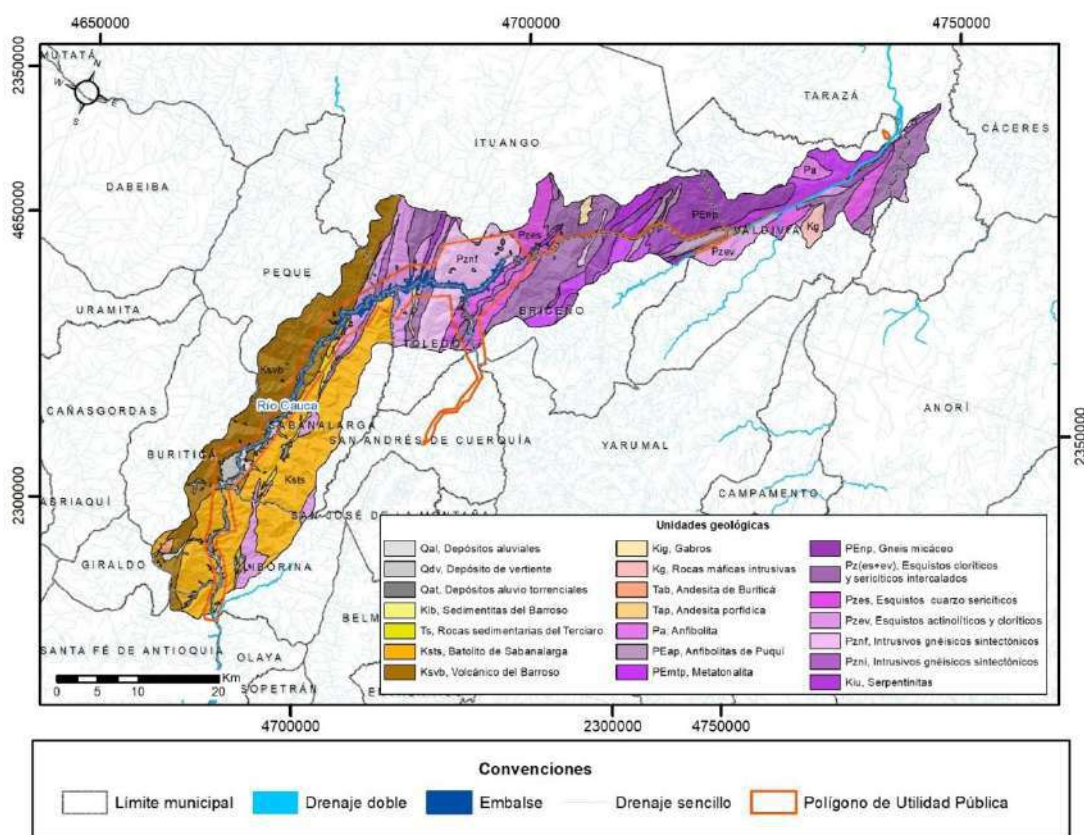


Figura 2-6 Cartografía de unidades geológicas para el área de análisis.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

## 2) Geomorfología

Regionalmente, la zona de estudio se encuentra localizada al norte del departamento de Antioquia, sobre la cordillera Central de Colombia, la cual posee características particulares respecto al contexto fisiográfico de una cadena de montaña, determinadas por una serie de altiplanos, cañones, lomos y filos de carácter denudacional y estructural. La morfología del cañón del río Cauca, corresponde a geoformas asociadas a procesos morfodinámicos de alta incisión y a los eventuales procesos de depositación de gran cantidad de materiales de vertiente y aluviales/aluviotorrenciales en las principales planicies.

### a) Morfometría

Para el área de análisis se elaboró un mapa de pendientes del terreno (Figura 2-7) a partir de información temática como el Modelo Digital del Terreno (DTM) ALOS PALSAR con resolución de 12,5\*12,5 m. Para su construcción se utilizó una clasificación con los rangos de pendientes presentados según la metodología del SGC (2012), donde se relaciona la inclinación del terreno con el tipo de material que lo conforma y su comportamiento en cuanto a susceptibilidad a procesos de remoción en masa (Tabla 2-7).

Tabla 2-7 Rangos de inclinación de la ladera

Inclinación (°)	Descripción	Características del material y comportamiento
<5	Plana a suavemente inclinada	Muy blando y muy baja susceptibilidad a movimientos en masa
6-10	Inclinada	Blando y baja susceptibilidad a movimientos en masa
11-15	Muy inclinada	Moderadamente blando y moderada susceptibilidad a movimientos en masa
16-20	Abrupta	Moderadamente resistente y moderada susceptibilidad a movimientos en masa
21-30	Muy abrupta	Resistente y alta susceptibilidad a movimientos en masa
31-45	Escarpada	Muy resistente y alta susceptibilidad a movimientos en masa
>45	Muy escarpada	Extremadamente resistente y baja susceptibilidad a movimientos en masa

Fuente: SGC, (2012).

De acuerdo con la distribución de los rangos de pendiente, en el área de estudio se puede observar que predominan las zonas con pendientes que varían de abruptas a escarpadas, principalmente hacia las laderas del río Cauca en la zona del embalse. Desde el sur de Puerto Valdivia hacia el norte de la zona de estudio, se observa que las pendientes predominantes oscilan entre 15 y 30° (muy inclinadas a abruptas), este declive se asocia al cambio de gradiente que sufre la cuenca del río para iniciar la conformación de relieves más suaves que determinan las planicies aluviales del Bajo Cauca. De manera localizada se presentan algunos sectores con pendientes muy escarpadas (>45°), donde el terreno está conformado principalmente por rocas resistentes de relieve relativo más alto y con poco o nulo desarrollo de suelos. Las zonas inmediatas al río y morfogenéticamente asociadas a la dinámica fluvial del mismo y sus tributarios, presentan pendientes planas, suavemente inclinadas a inclinadas, conformadas por depósitos no consolidados con baja a nula susceptibilidad a los deslizamientos.

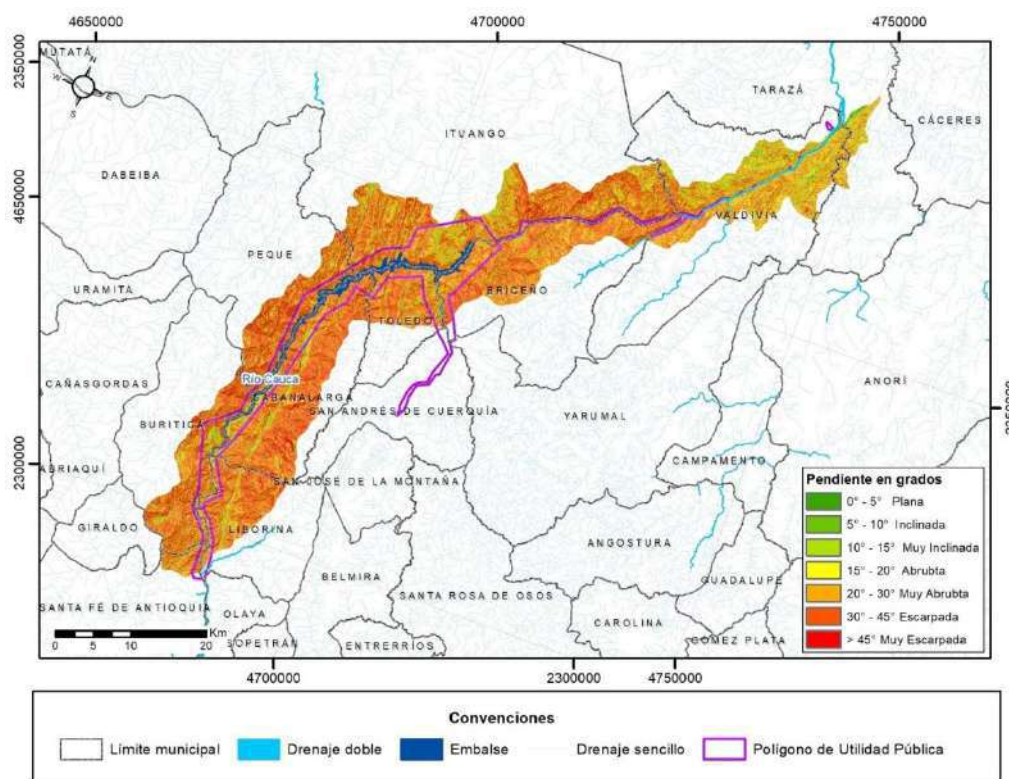


Figura 2-7 Distribución de la pendiente del terreno en el área de análisis.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

## b) Morfodinámica

Los procesos morfodinámicos corresponden a una serie de acciones sucesivas y/o simultáneas a través de las cuales los agentes morfogenéticos, principalmente los externos, son capaces de modelar las formas de la superficie terrestre. Están asociados a una secuencia conformada por la meteorización y erosión de las rocas, el transporte de los materiales removidos y su sedimentación.

A continuación se presenta la descripción de los principales procesos morfodinámicos identificados para la zona de interés (Tabla 2-8, Figura 2-8) por medio de consultas de la base de datos del Servicio Geológico Colombiano (SGC), denominado Sistema de información de Movimientos en Masa (SIMMA), la base de datos del Desinventar, análisis de fotointerpretación y chequeo de datos en campo realizados durante las distintas fases del Proyecto.

Tabla 2-8 Breve descripción de procesos morfodinámicos identificados en el área de estudio.

Proceso morfodinámico	Descripción
Deslizamientos	Derivados de erosión superficial, lixiviación y transporte, generalmente tienen involucrada la caída de rocas de pequeño tamaño, producidas por inestabilidad en las vertientes altas de las

	montañas. Estos fenómenos de inestabilidad se denominan desgarres cuando son superficiales (< 2 a 3 m) o deslizamientos cuando la superficie de ruptura es más profunda.
Reptación	Es un fenómeno de remoción en masa cuyas características principales son la baja tasa de movimiento (del orden centímetros por año) y la inexistencia de una superficie de ruptura definida. Corresponden a un comportamiento plástico de los suelos superficiales que se manifiesta por la irregularización de la vertiente en forma de pequeñas “terracetas” (pisadas de vaca) y la forma curva que adquieren los árboles a través de la deformación.
Erosión laminar	Fenómenos asociados a suelos granulares de baja cohesión, donde la lámina del agua de escorrentía tiene la posibilidad de remover los granos en zonas de vertientes de áreas considerables. Este proceso se evidencia como zonas desprotegidas de vegetación y de colores claros en las fotografías aéreas, además que tienen una alta susceptibilidad a las aguas superficiales de aumentar su impacto.
Erosión concentrada (surcos y cárcavas)	Cuando la lámina de agua de escorrentía labra por erosión unos pequeños canales por donde transcurrir, el fenómeno de remoción de partículas se concentra y acelera drásticamente hasta conformar oquedades considerables en forma de surcos y en su estado más avanzado en cárcavas de extensiones considerables, inidentificables por su forma casi cerrada.
Socavación de orillas	El alto gradiente de las corrientes o la presencia de materiales de baja competencia en los cauces permiten que las aguas eroden su lecho y desconfinen los flacos del cauce, activando una serie de fenómenos de vertiente como desgarres, reptación e incluso deslizamientos hacia las márgenes de las corrientes.
Zonas de empozamiento, humedales	Sobre las vertientes es común la presencia de sectores donde la inclinación o configuración geométrica impide el flujo del agua de escorrentía. Estos sectores poseen unas condiciones de humedad y de vegetación particulares, identificables en las fotografías aéreas como manchas más oscuras.
Minería	Actividad desarrollada hacia las márgenes de ríos y quebradas de manera artesanal que puede provocar destrucción de los suelos y capas vegetales, además que se acumulan materiales de una manera informal hacia las márgenes de las corrientes donde se llevan a cabo estas actividades, principalmente hacia los ríos Cauca, Rayo, Man y Tarazá.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2018.



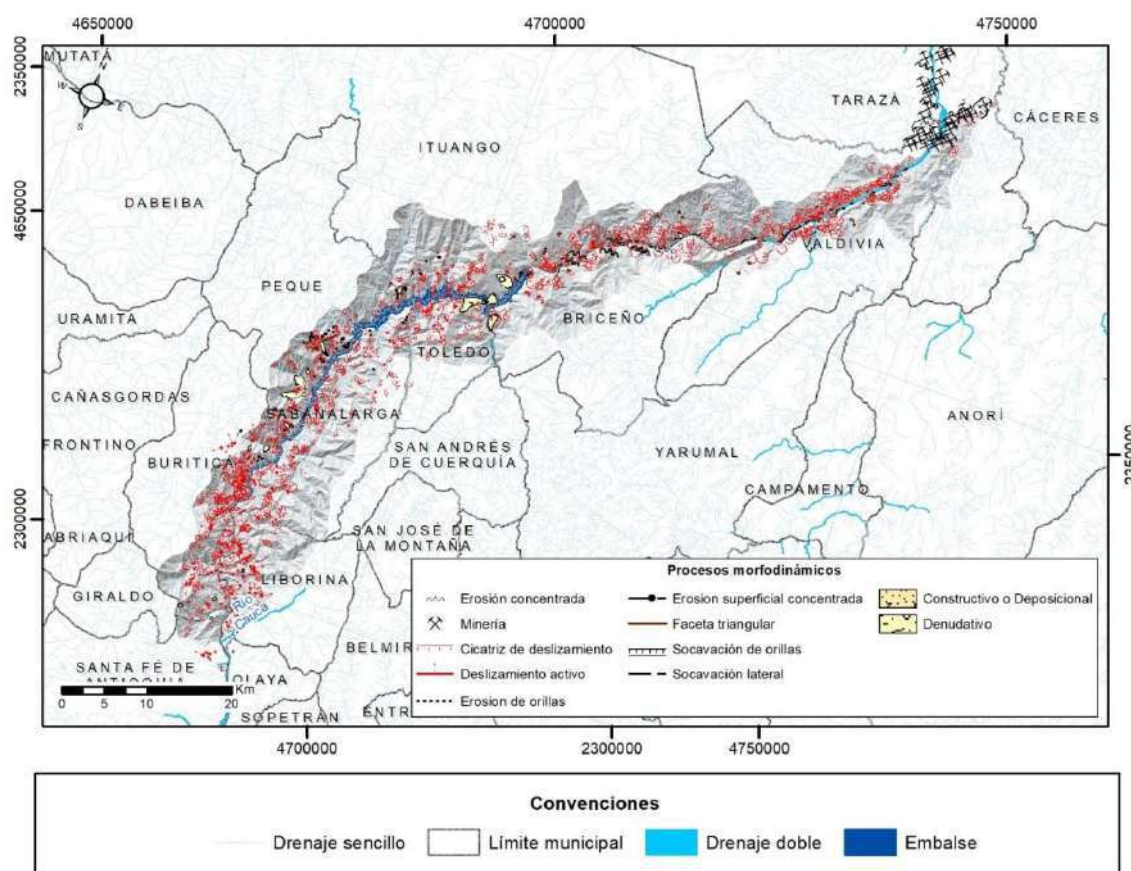


Figura 2-8 Cartografía de procesos morfodinámicos en el área de análisis.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

### c) Unidades geomorfológicas

En la zona de estudio predominan unidades de ambiente denudacional, con geoformas como lomos denudados, laderas erosivas, sierras, entre otras, y geoformas de origen estructural como son las unidades de laderas, lomos, escarpes estructurales, etc. Restringidas a los dominios del cauce aluvial del río Cauca, se pueden encontrar geoformas de origen fluvial como terrazas, barras, llanuras de inundación y abanicos; adicionalmente, se tienen geoformas de ambiente antropogénico demarcadas por las zonas de explotaciones mineras. Para la zona de interés, se definieron las unidades morfogenéticas de acuerdo con el Glosario de Unidades y Subunidades Geomorfológicas establecido por el SGC (2014).

Las unidades de origen denudacional son derivadas por procesos exógenos que se manifiestan en procesos erosivos hídricos y gravitatorios o una combinación de ambos, generando la disección de los paisajes, de acuerdo con las condiciones climáticas, las cuales, si son secas propician geoformas erosivas relacionadas con disección y pérdida del suelo por fenómenos de erosión en forma laminar, surcos y cárcavas,

Las geoformas de ambiente estructural se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, principalmente el plegamiento y fallamiento de las rocas, cuya expresión morfológica está definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades rocosas, encontrado espolones, laderas, escarpes y lomos de fallas entre otras.

El ambiente fluvial, constituye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de ríos y quebradas y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundaciones, como en la dinámica normal de las corrientes. En general, son depósitos transportados y acumulados cuando las corrientes pierden la capacidad de arrastre y se denominan llanuras de inundación, terrazas y barras.

Finalmente, las unidades geomorfológicas de ambiente antropogénico corresponden a geoformas derivadas de la intervención del hombre sobre el suelo y el paisaje; sea para urbanismo, construcción de viviendas, obras de ingeniería, disposición de desechos o escombros, adecuación de nuevas vías o extracción de materiales, que modifica la morfología natural del terreno.

En la Figura 2-9 se presenta el mapa de unidades geomorfológicas definidas para la zona de estudio, de acuerdo con su morfogénesis. La descripción detallada de las unidades puede ser consultada en los documentos “0090007\_Auto2292\_Art2\_N2\_Rev01” y “0090007\_Auto2292\_Art2\_N2\_Info3\_Rev1” en Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A4.



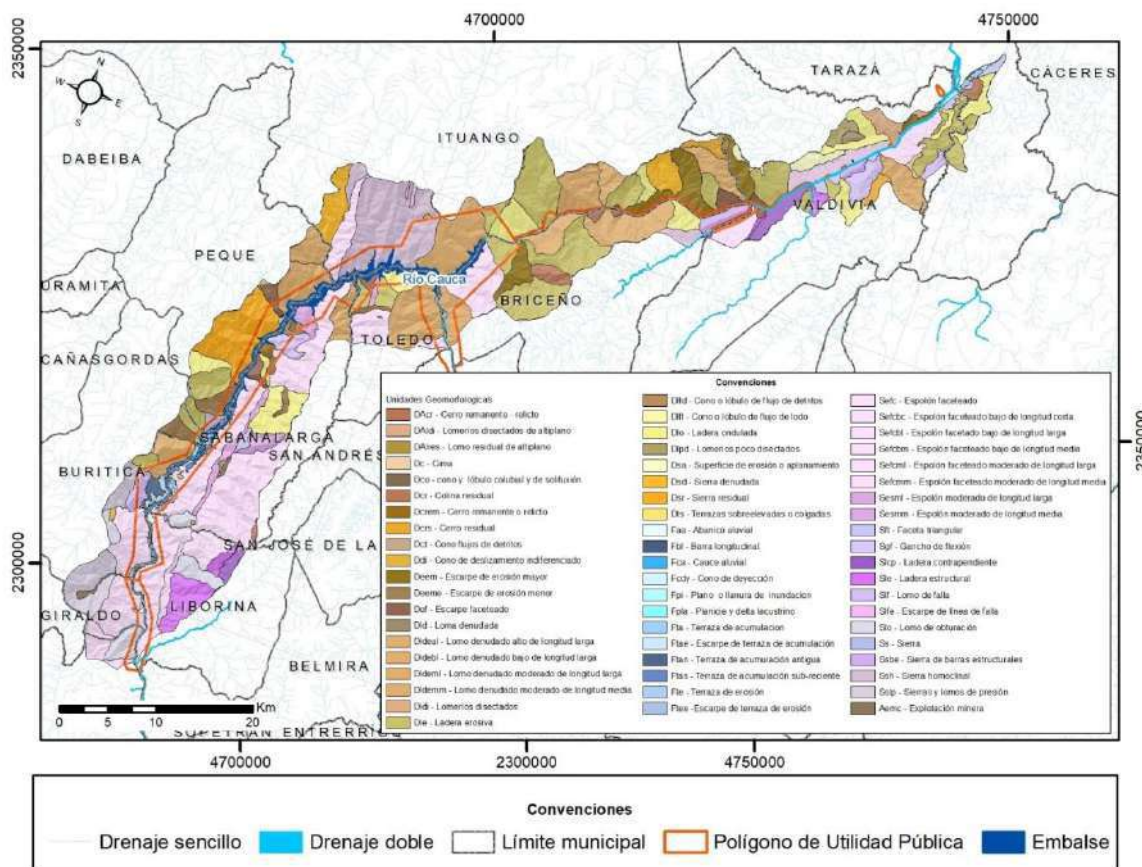


Figura 2-9 Cartografía de unidades geomorfológicas para el área de análisis.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

### C. Definición de parámetros

Los parámetros de entrada para la aplicación del modelo para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala regional se obtuvieron a partir de la recopilación, generalización y homogenización de información técnica de los estudios realizados en el marco de factibilidad, diseños, construcción y actividades socio-ambientales del PHI. Adicionalmente se utilizó información bibliográfica para la obtención, correlación y calibración de algunos parámetros.

#### 1) Parámetros del suelo

La caracterización del suelo y los parámetros de resistencia fueron definidos a partir de la información técnica recopilada en la zona de estudio, los ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras tomadas en diversos sondeos exploratorios, la interpretación de los resultados y las correlaciones reportadas en la literatura para los diferentes tipos de suelo encontrados.

En los documentos "0090007\_Auto2292\_Art2\_N2\_Rev01" y "0090007\_Auto2292\_Art2\_N2\_Info3\_Rev1" que se encuentran en el Anexo I-I-2194-PHI-111-

AMB-PGRD-001\_A4, se presenta la recopilación de resultados de laboratorio de los sondeos exploratorios, el tratamiento estadístico de los datos para la definición y homogenización de parámetros de resistencia y caracterización de suelos y las tablas y referencias de calibración y correlación utilizadas. En la Figura 2-10 se muestra la localización de los sondeos exploratorios utilizados para la definición y homogenización de parámetros del suelo en el área de análisis y en la Tabla 2-9 se presentan los parámetros de resistencia y caracterización para los diferentes suelos derivados de las unidades litológicas del área de análisis.

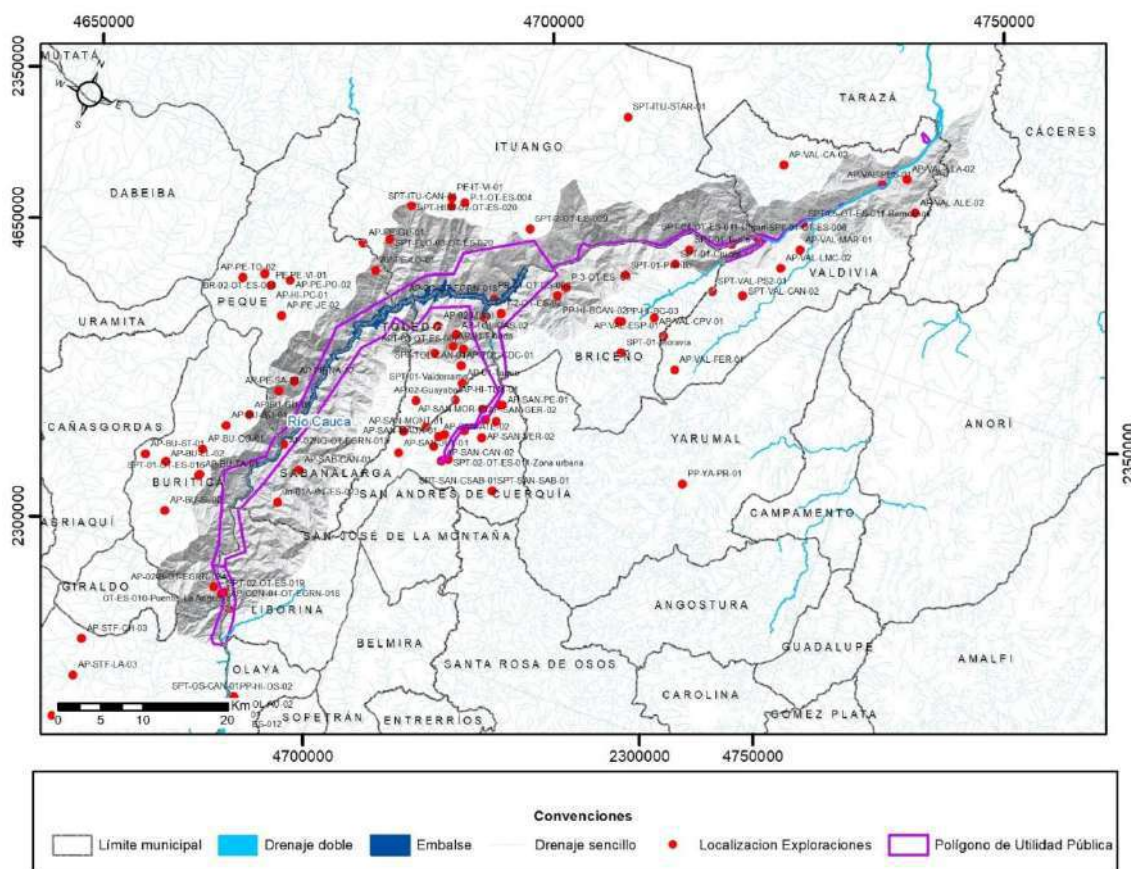


Figura 2-10 Localización de los sondeos exploratorios utilizados para la definición de parámetros del suelo.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Tabla 2-9 Parámetros definidos para los suelos derivados de las unidades litológicas presentes en el área de análisis.

Unidad litológica	Nomenclatura	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)	Hsm in (m)	Hsm ax (m)	Gs (Adim)	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	e (Adim)	n (Adim)	Sr (%)	K (m/s)
Esquistos actinolíticos y cloríticos	Pzev	18,2	19,9	15,6	28	0,5	10	2,65	9,81	0,6	0,37	51,97	5,00E-09
Esquistos cuarzo sericíticos	Pzes	18,2	19,9	15,6	28	0,5	10	2,65	9,81	0,6	0,37	51,97	5,00E-09

Unidad litológica	Nomenclatura	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)	Hsm in (m)	Hsm ax (m)	Gs (Adim)	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	e (Adim)	n (Adim)	Sr (%)	K (m/s)
Esquistos cloríticos y sericíticos intercalados	Pz(es+ev)	18,2	19,9	15,6	28	0,5	10	2,65	9,81	0,6	0,37	51,97	5,00E-09
Gneises cuarzo feldespáticos	Pzmf	18,4	20,1	15,9	27	1	8	2,65	9,81	0,57	0,36	51,36	5,05E-06
Intrusivos gnéissicos sintectónicos	Pzni	18,4	20,1	15,9	27	1	8	2,65	9,81	0,57	0,36	51,36	5,05E-06
Gneis micáceo	PEmp	18,4	20,1	15,9	27	1	8	2,65	9,81	0,57	0,36	51,36	5,05E-06
Batolito de Sabanalarga	Ksts	18,8	20,6	15,2	32	0,5	10	2,65	9,81	0,5	0,33	45,36	1,60E-07
Metatonalita de Puquí	PEmp	18,8	20,6	15,2	32	0,5	10	2,65	9,81	0,5	0,33	45,36	1,60E-07
Formación Barroso (volcánico)	Ksvb	18	19,8	18,6	27	0,8	8	2,65	9,81	0,62	0,38	54,04	1,00E-07
Andesita porfídica	Tap	18	19,8	18,6	27	0,8	8	2,65	9,81	0,62	0,38	54,04	1,00E-07
Andesita de Buriticá	Tab	18	19,8	18,6	27	0,8	8	2,65	9,81	0,62	0,38	54,04	1,00E-07
Formación Barroso (sedimentario)	Kbl	17,1	28,8	12,2	27	1	6	2,65	9,81	0,79	0,44	60,53	5,00E-07
Rocas Sedimentarias del Terciario	Ts	18,3	20,1	23,9	28	1	7	2,65	9,81	0,58	0,37	51,38	5,00E-07
Anfibolitas de Puquí	PEap	18,5	20,4	15,2	32	1	8	2,65	9,81	0,54	0,35	45,94	5,05E-06
Anfibolita	Pa	18,5	20,4	15,2	32	1	8	2,65	9,81	0,54	0,35	45,94	5,05E-06
Gabros	Kig	16,9	18,6	15,1	20	1	7	2,65	9,81	0,83	0,45	61,96	5,00E-07
Rocas máficas intrusivas	Kg	16,9	18,6	15,1	20	1	7	2,65	9,81	0,83	0,45	61,96	5,00E-07
Serpentinitas	Kiu	18,7	20,6	16	29	1	8	2,65	9,81	0,5	0,33	42,91	1,00E-05
Depósitos aluviales	Qal	18,8	20,6	9,5	33	0,5	10	2,65	9,81	0,5	0,33	44,87	5,00E-06
Depósitos aluvio torrenciales	Qat	18,8	20,6	9,5	33	0,5	10	2,65	9,81	0,5	0,33	44,87	5,00E-06
Depósitos de vertiente	Qdv	18,4	20,3	14,1	26	1	6	2,65	9,81	0,55	0,35	46,81	5,00E-07

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2018

## 2) Espesor del suelo susceptible a deslizarse

De acuerdo con la metodología planteada y a la definición de las características y parámetros de los suelos derivados de las unidades litológicas de la zona de estudio (Tabla 2-9) se establecieron los parámetros para la modelación de espesores de suelo susceptibles a desprenderse o deslizarse.

El valor de  $\beta_{lim}$  se refiere a la inclinación a partir de la cual la actuación de este factor ya no interfiere en la variación del espesor del suelo, entendiéndose que los valores de pendiente iguales o superiores al nivel establecido representan aquellas zonas donde el espesor de suelo susceptible a deslizarse es mínimo/despreciable o incluso nulo. Para la zona de análisis, de

acuerdo con el análisis de la distribución de las pendientes (ver el apartado a) del numeral 2) se tomó  $\beta_{lim} = 40^\circ$ .

Los valores de  $Hs_{max}$  y  $Hs_{min}$  se establecieron de acuerdo con los perfiles de meteorización característicos de las unidades litológicas ya descritas. Para el presente estudio, basados en la información de campo, en lo que se refiere a exploraciones directas e indirectas en el área de influencia del Proyecto Hidroeléctrico Ituango, y a la consulta de información bibliográfica, se tienen valores de profundidad aproximados de perfiles de meteorización donde el material no consolidado derivado de los horizontes de saprolito y suelo residual registran espesores generales de hasta 10 m. Por lo anterior se estableció  $Hs_{max} = 10$  m y  $Hs_{min} = 0,5$  m (Tabla 2-9).

El parámetro  $a$  controla la evolución del espesor de suelo dependiendo de la curvatura del terreno (si las vertientes son cóncavas, planas o convexas), lo que influye directamente en la conformación del perfil pedológico de la región de estudio, y  $x$  representa la distancia horizontal de un punto (celda) al drenaje más cercano. El término  $\tanh(a * x)$  corresponde al cálculo de la tangente hiperbólica de  $ax$ , generando una interacción que actúa de forma que cuanto mayor sea la distancia horizontal de determinado punto al drenaje más próximo, mayor será la tendencia de crecimiento de la capa de suelo. Estos dos parámetros y las pendientes son generados como insumos temáticos de tipo raster por medio de herramientas SIG, partiendo del Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM).

Por medio de la organización de los datos espaciales de la zona de estudio en la plataforma de ArConsortio Generación Ituangos como SIG para la aplicación del álgebra de mapas en la implementación del modelo de espesor de suelos, se logró obtener una capa temática de espesor de suelo susceptible a deslizarse con píxeles de 12,5x12,5 m, presentada en la Figura 2-11.



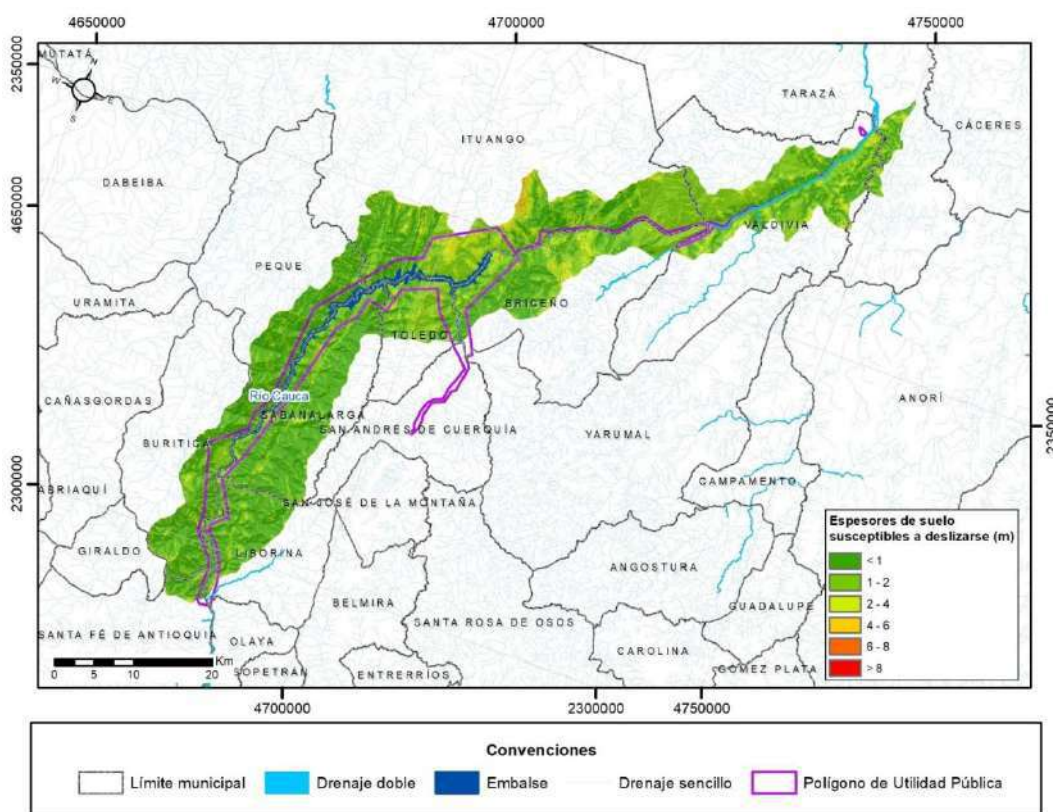


Figura 2-11 Mapa de espesor de suelo.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

### 3) Parámetros de lluvia

Dentro del desarrollo de los estudios de susceptibilidad de deslizamientos en la zona comprendida entre el embalse Ituango y el sector ubicado aguas abajo del sitio de presa, fue necesario llevar a cabo una caracterización de las condiciones de precipitación para el área de estudio.

Para estimar las zonas susceptibles de deslizamiento se requirió identificar la información disponible en cuanto a datos de precipitación en la zona de estudio, los cuales se obtuvieron de la red de estaciones climáticas, pluviométricas y pluviográficas operadas por el IDEAM. Posteriormente se realizó la caracterización de las precipitaciones, donde se identificó que a zona del proyecto presenta un clima que está determinado por el paso del Frente de Convergencia Intertropical, además de establecer la distribución espacial de lluvia, donde se identificaron dos zonas con distribuciones de precipitación muy diferente:

- Cañón del río Cauca: el tramo desde Santafé de Antioquia hasta el sitio de presa Ituango se caracteriza por bajas precipitaciones, en el que se presenta un régimen medio de lluvias de carácter bimodal; cuyas épocas de lluvias se dan de marzo a junio y otra de septiembre a noviembre, y dos períodos secos en los meses de enero a febrero

y de julio a agosto. La precipitación promedio anual acumulada en esta zona es cercana a los 1000 mm.

- Zona aguas abajo del sitio de presa Ituango: en la margen derecha del río Cauca la precipitación es alta y su comportamiento puede considerarse como unimodal ya que se presenta un solo máximo a mediados del año y un solo mínimo entre los meses de noviembre a febrero. En esta zona se registran precipitaciones anuales con valores cercanos a los 5000 mm.

Se determinó el grado de influencia que tienen las estaciones IDEAM sobre la zona de análisis. Para esto se optó por delimitar las áreas aferentes a cada uno de los puntos de monitoreo haciendo uso de las isoyetas o isolíneas de precipitación, entendiendo que este tipo de aproximaciones permite identificar de una forma continua en el tiempo y en el espacio, como la pluviosidad en un punto específico influencia el comportamiento de las sub-zonas que componen el área de estudio. En la Figura 2-12 se exhiben dichas áreas, pero superpuestas contra la zona de estudio, pudiéndose observar la distribución de los diferentes polígonos obtenidos para la red de monitoreo utilizada en el presente estudio.

Finalmente, se realizó el estimativo de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF), mediante un análisis de frecuencia para las precipitaciones máximas acumuladas para las duraciones de 1, 2, 3, 5, 7 y 30 días. En este caso fueron seleccionadas las duraciones intradiarias correspondientes a 6 horas y 12 horas. Las intensidades fueron estimadas al evaluar el cociente entre las precipitaciones acumuladas (diarias y horarias) y sus respectivas duraciones (en horas); en la Figura 2-13 se presentan las curvas intensidad, duración y frecuencia obtenidas para los períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

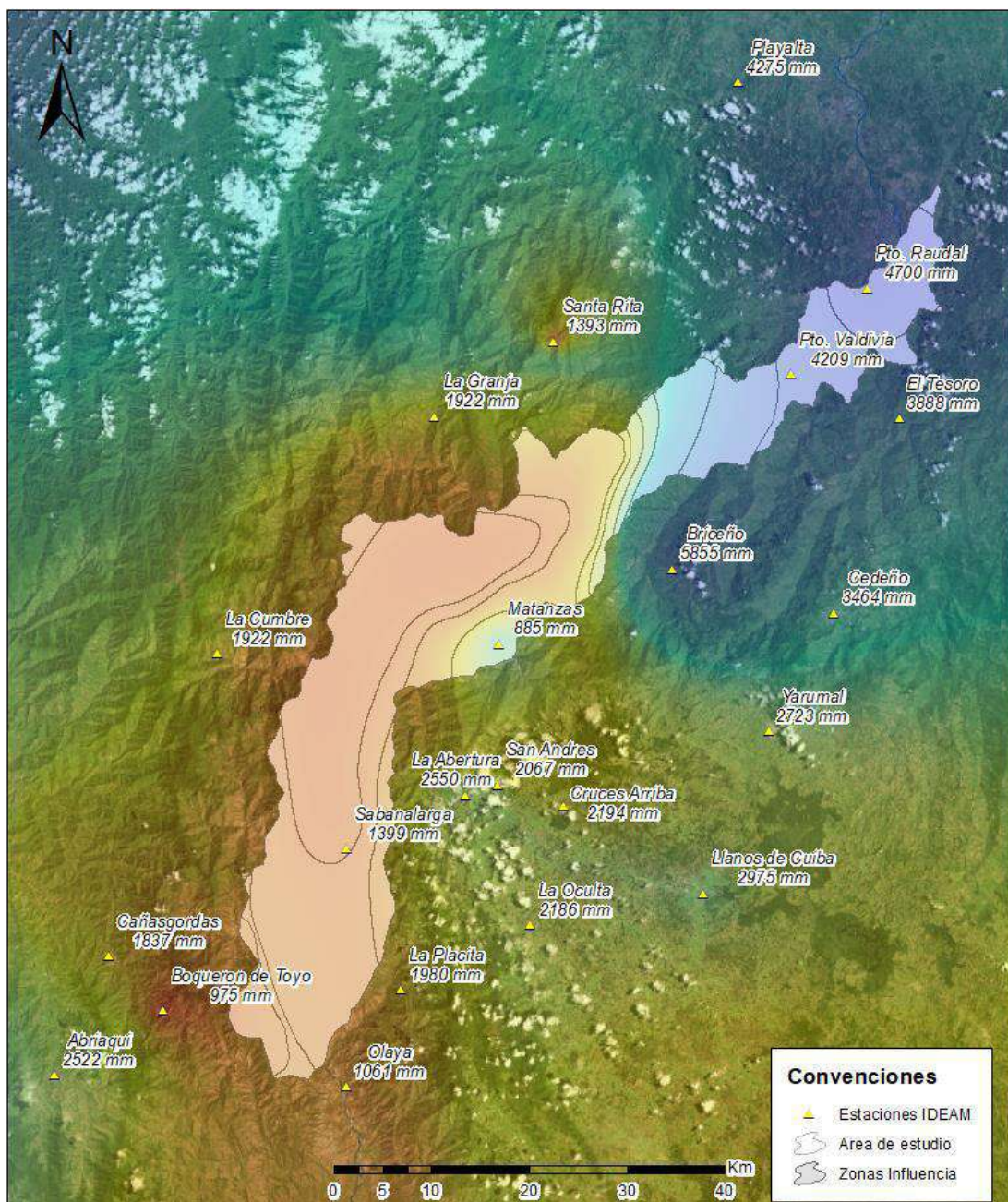
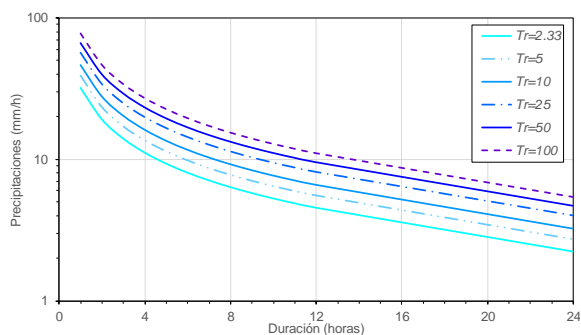


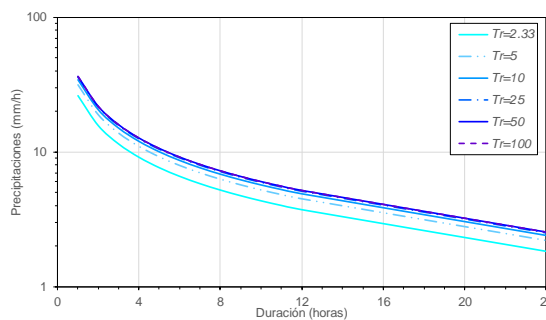
Figura 2-12 Superposición de las áreas de influencia para las estaciones IDEAM cercanas al área de estudio.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2018.

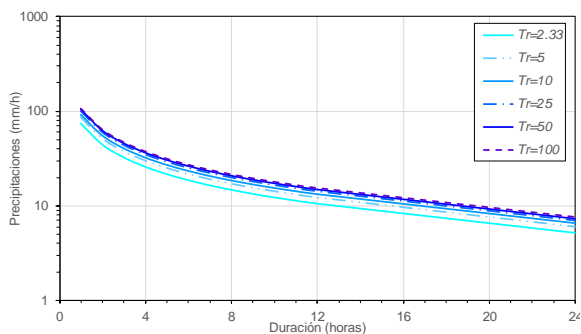




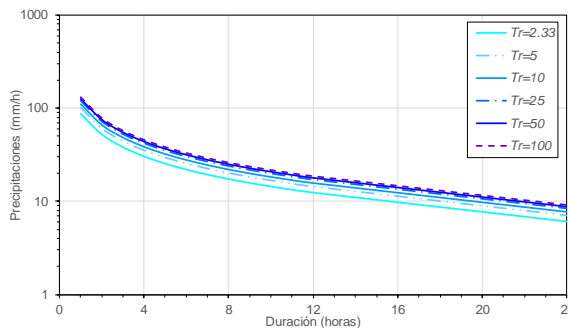
Estación IDEAM Sabanalarga



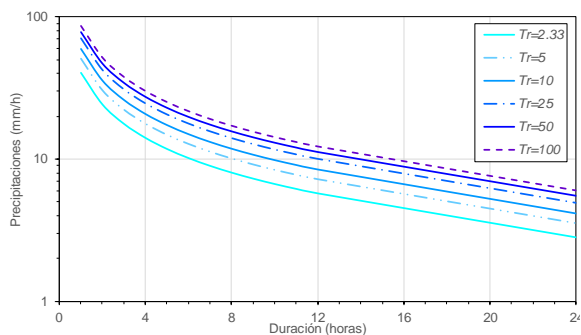
Estación IDEAM Matanzas



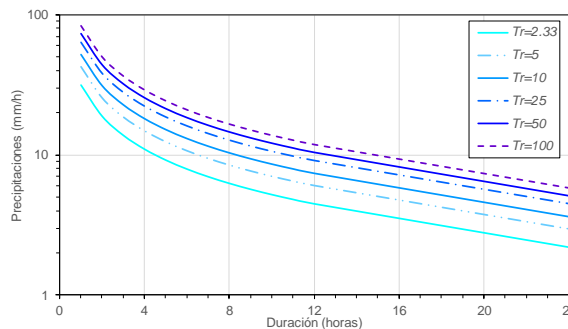
Estación IDEAM Puerto Valdivia



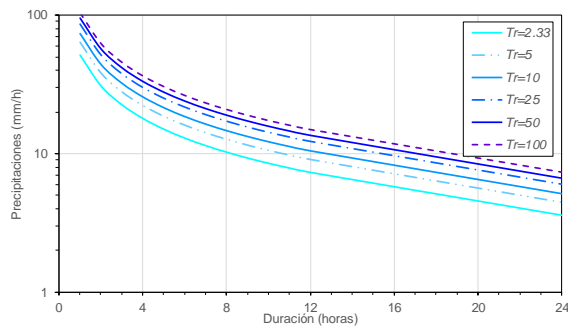
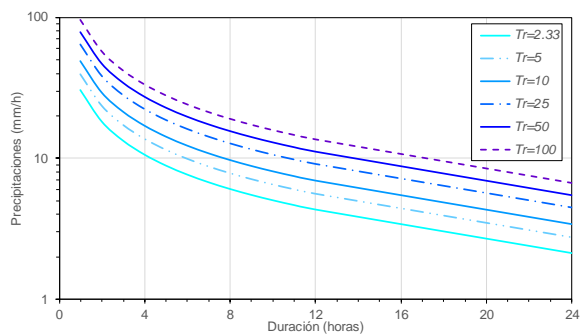
Estación IDEAM Puerto Raudal



Estación IDEAM Olaya



Estación IDEAM Boquerón del Toyo



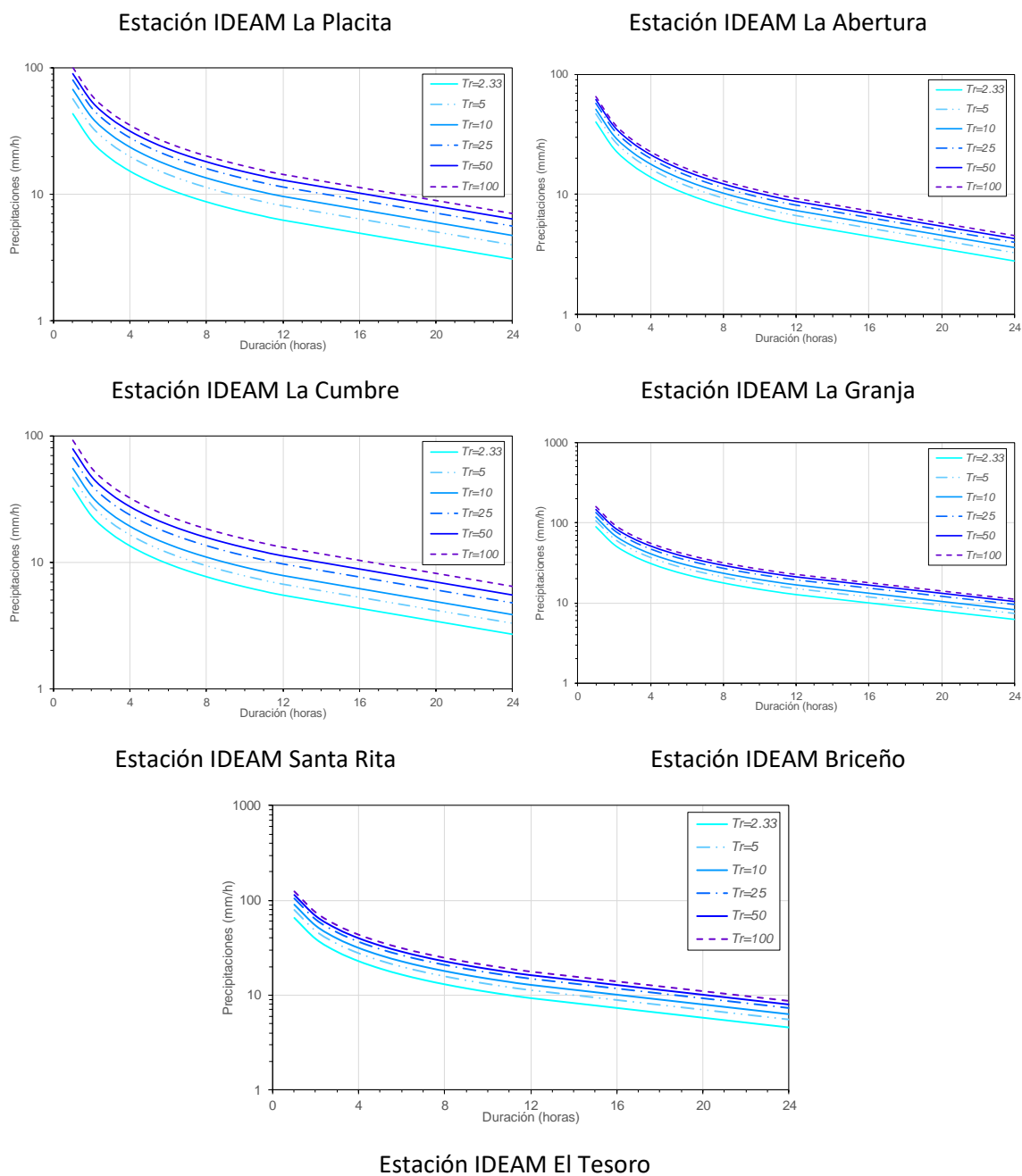


Figura 2-13 Curvas intensidad, duración y frecuencia para las estaciones IDEAM próximas al área de estudio.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2018.

#### 4) Parámetros de sismo

La zona en la que será evaluada la amenaza por movimientos en masa está conformada por 12 municipios que de acuerdo al Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente (NSR-

10) se ubican en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta. En la Tabla 2-10 se encuentran los valores de aceleración pico efectiva determinados en dicho estudio para cada municipio; adicionalmente se presenta la distancia aproximada de los mismo al Proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Tabla 2-10 Valores de aceleración horizontal pico efectiva (Aa) según la NSR-10 para los municipios dentro de la zona de evaluación.

Municipio	Distancia al PHI (km)	Aa (g)	Zona de Amenaza Sísmica
Olaya	58,38	0,15	Intermedia
Liborina	53,10	0,15	Intermedia
Buriticá	53,17	0,20	Alta
Sabanalarga	35,77	0,20	Intermedia
Peque	29,93	0,20	Alta
San Andrés de Cuerquia	24,46	0,15	Intermedia
Ituango	11,87	0,20	Intermedia
Briceño	12,60	0,15	Intermedia
Toledo	13,97	0,15	Intermedia
Valdivia	24,94	0,15	Intermedia
Tarazá	56,85	0,15	Intermedia
Cáceres	59,89	0,15	Intermedia

Fuente: AIS, (2010).

Como se observa en la tabla anterior, el Título A de la NSR-10 considera valores de aceleración horizontal pico efectiva (Aa) para los municipios cercanos a la zona de análisis entre 0,15 y 0,20 g (AIS, 2010).

#### 2.2.4.3.2 Análisis locales

En este numeral se describen las características de las principales unidades litológicas que hacen parte del marco geológico general del PHI, y de manera particular se presentan las características geológicas de los taludes, objeto de interés dentro del marco de análisis locales en este documento (para mayor detalle consultar el informe “I-2194-PHI-010-GEO-DEG-TMCS-001\_Rev3” dispuesto en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A4).

El Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI) se encuentra enmarcado en un ambiente geológico constituido por rocas metamórficas pertenecientes al denominado Complejo Cajamarca, el cual incluye las rocas del Grupo Valdivia en el sentido de Hall *et al.*, (1972) (González, 2001) y que son consideradas de edad triásica tardía (datadas por el método U-Pb) con un rango que varía desde 226 a 245 Ma aproximadamente (Restrepo, Ordóñez-Carmona, Armstrong, & Pimentel, 2011). En el área del PHI afloran las siguientes unidades litológicas.

#### A. Geología – Sitios de análisis

##### 1) Desviaciones

Este sector se encuentra localizado en la zona sur de la margen derecha del PHI. En superficie se encuentra aflorando principalmente gneis cuarzo feldespático con una foliación 10°-25°/090°-140°. En la parte alta de la ladera, se identifica un horizonte de meteorización IC-IIA y

esta zona está caracterizada por una geomorfología de bajas pendientes y cobertura vegetal boscosa; hacia la parte media y baja de la ladera es posible identificar el gneis moderada a ligeramente meteorizado en los horizontes IIA y IIB, caracterizándose este último por pendientes escarpadas. La roca se encuentra alta a moderadamente fracturada. Asociado a los eventos de la contingencia, se presentó un deslizamiento en la ladera que dejó expuesto el macizo rocoso y un sink hole que al parecer está relacionado al tránsito de agua a través de las galerías de construcción 2 y 4 y qué, producto de los desprendimientos de material asociados, se llenó parcialmente de bloques de roca y suelo. En el sector donde el macizo quedó expuesto, se observan varios sistemas de discontinuidades, sin embargo, se destacan dos familias de diaclasas que generan grietas y bloques en la parte baja del talud (horizonte IIB), dichas estructuras presentan disposición estructural  $40^{\circ}$ - $50^{\circ}$ / $350^{\circ}$ - $0^{\circ}$  y una persistencia de entre 1 m y 3 m, y  $60^{\circ}$ - $65^{\circ}$ / $270^{\circ}$ - $290^{\circ}$  con una persistencia de unos 30 m, siendo este último un plano asociado a las diaclasas denominadas “Roldán”.

A profundidad, de acuerdo con lo identificado en las obras subterráneas del sector, se encuentra la roca en horizonte IIB, siendo un macizo levemente fracturado, inalterado a ligeramente meteorizado.

Con base en los rasgos geomorfológicos se delimitan algunos depósitos de vertiente inferidos (Qdv), en la parte media y alta de la ladera, con espesores de hasta 5 m; el depósito delimitado más al norte es correlacionado con el identificado en Romerito y se caracteriza por ser matriz soportado, con una matriz limoarenosa de color café, consistente, con fragmentos de roca de composición gneílica, ligeramente meteorizados y subangulosos de tamaño medio.

La información base utilizada para alimentar los perfiles geológicos corresponde a las perforaciones ejecutadas para la fase de factibilidad y construcción del proyecto, además de los levantamientos de macizo rocoso desarrollados durante la excavación de las galerías de construcción del sistema de desviación y de la GAD.

## 2) Romerito

En este sector se encuentra aflorando el gneis cuarzo feldespático en los horizontes de meteorización IC-IIA y IIA, los cuales se apreciaron durante la excavación del talud en la base militar y en algunos cortes de la vía que conduce hacia la zona.

El horizonte IIA corresponde a roca moderadamente meteorizada, con valores de GSI variables que oscilan entre un mínimo de 35 y un máximo de 55; esta variación se asocia principalmente a la presencia de fracturas de cizalla que condicionan el grado de fracturamiento, aumentándolo considerablemente en algunos sectores. La foliación presenta una orientación variable entre  $10^{\circ}$ - $25^{\circ}$ / $090^{\circ}$ - $140^{\circ}$  controlando el patrón de fracturamiento de la roca, es posible apreciar oxidación en las paredes de las discontinuidades y algunos planos de cizalla. Dada la geología estructural y las condiciones particulares de la roca, es posible diferenciar dentro de este mismo horizonte un macizo altamente meteorizado y deformado, meteorizado, asociado a cizallas intrafoliares con espesores entre 2 y 3 m, con dirección  $17^{\circ}$ - $30^{\circ}$ / $115^{\circ}$ - $132^{\circ}$  y otras oblicuas que generan en el macizo una condición de plegamiento, alteración mineral y alto

fracturamiento, este último controlado principalmente por la foliación, dándole una apariencia esquistosa a la roca.

Así mismo, se ha diferenciado un horizonte IIA desconfinado, haciendo referencia a unas condiciones de fracturamiento más intensas en el horizonte IIA, en las que las discontinuidades tienen aberturas entre 10 y 30 mm (o mayores), lo que incrementa el desconfinamiento y el desprendimiento por cuñas. Ocasionalmente se asocia a una estructura más esquistosa y laminada en la roca, generada por procesos tectónicos.

El horizonte IIB presenta roca sana a ligeramente meteorizada principalmente hacia las paredes de las discontinuidades, ligera a moderadamente fracturado controlado por la foliación. Los valores de GSI usualmente oscilan entre 50 y 70, de acuerdo con lo observado de las perforaciones exploratorias realizadas en este sitio.

Durante la excavación se identificó la presencia de depósitos de vertiente (Qdv), al norte en los límites con el talud de la Base Militar, que se presentan con ángulos de contacto entre 30° y 40°, siguiendo la topografía natural de la ladera, espesores entre 1,5 m y 2 m, mientras que al sur del sector el ángulo de contacto es generalmente bajo, aunque localmente puede llegar a ser de aproximadamente 40° y alcanzar espesores de hasta 3 m; de manera general estos depósitos se caracterizan por ser matriz soportados, con matriz limo arenosa de color café.

### 3) Vertiente norte margen derecha (sitio 7 y Subestación eléctrica 500 kV )

Este sector se caracteriza por la presencia de un depósito de vertiente de gran extensión, principalmente hacia el Sitio 7, con un espesor variable llegando a alcanzar los 10 m, de acuerdo con lo identificado en las perforaciones ejecutadas en el sector. Este, presenta una matriz areno-limosa, firme, compuesta por micas, limos y presencia de fragmentos de roca subangulosos, con un porcentaje matriz/roca entre 70%-60%/30%-40% y tamaños hasta de 0,25 m de diámetro, generalmente en estado moderado de meteorización.

En algunas zonas, subyacente al depósito de vertiente, se encuentra el horizonte IC-IIA del gneis con espesores entre 2 y 14 m, condicionados en gran parte por la presencia de estructuras de cizallamiento y tectonismo que generan en el macizo un grado mayor de alteración. Se constituye por una matriz saprolítica >50%, de textura limosa a limoarenosa y de consistencia firme. Se preservan localmente vestigios de algunas estructuras de fracturas de cizalla, diaclasamiento y algunos plegamientos en la foliación. Su contacto en profundidad con el horizonte IIA es controlado en parte por la presencia de estructuras de debilidad, entre las que se destaca una con tendencia 30°-40°/040°-060°.

El horizonte IIA corresponde a roca moderada a ligeramente meteorizada y moderadamente fracturada, presenta oxidación característica de la roca y asociada a los planos de discontinuidad, con zonas de debilidad de espesores variables que contienen materiales blandos como relleno, paredes pulidas e indicadores cinemáticos (estrías y pliegues de arrastre). De acuerdo con lo observado durante la excavación, el GSI por lo general varía entre 50 y 60, aunque en ocasiones puede ser un poco más bajo debido a la presencia de zonas de

debilidad. En algunos casos puede presentar unas condiciones de fracturamiento más intensas, controlado principalmente por la foliación, en las que las discontinuidades tienen aberturas entre 10 y 30 mm (o mayores). Durante la excavación de estos sectores se identificó la foliación con una tendencia 15°-35°/080°-110°.

Subyacente al horizonte IIA se encuentra el horizonte IIB, identificado en la excavación de la galería de drenaje, este horizonte se caracteriza por una roca poco meteorizada, con un grado de fracturamiento alto a moderado, con evidencias de oxidación y otras alteraciones minerales visibles sobre los planos de discontinuidades y fracturas de cizallas.

#### 4) Helipuerto (Villa Luz)

Gneis cuarzo feldespático con plano de foliación 15°-20°/100°-110°, moderadamente meteorizado y fracturado. Alcanza valores de GSI 60, UCS de 70 MPa. Estructuras con persistencias mayores a 20 m con orientaciones desfavorables con la dirección de la ladera, las cuales forman planos de deslizamiento para los bloques de roca.

#### 5) km 0+900

El sector está compuesto por depósitos de origen mixto. Depósitos de flujo y coluviales provenientes de los horizontes IC-IIA y IIA del macizo, los cuales han perdido matriz por el lavado de agua de escorrentía, dejando bloques aislados sobre la ladera, formando depósitos tipo talus. De acuerdo con lo que se ha observado en perforaciones y en afloramientos, estos, pueden reposar sobre horizontes de roca IIA y IIB, con GSI's que normalmente varían desde 60 hasta 80, aunque localmente asociado a zonas de debilidad, pueden variar entre 20 y 40.

#### 6) La Honda

El sector de la Honda se localiza en los alrededores del km 18+300 de la Vía Puerto Valdivia - Presa, sobre la margen derecha de la quebrada del mismo nombre donde prevalecen desde la etapa de construcción de la vía, continuos desprendimientos de suelo y roca involucrando los horizontes de meteorización IC-IIA y IIA, mostrando actualmente un talud expuesto en roca, con depósitos remanentes reposando sobre la ladera.

La ladera está conformada por cuatro tipos de materiales; rocas sueltas en la superficie, un depósito de vertiente colgado en la parte alta, configurado por bloques de roca sin matriz y ligera a moderadamente meteorizados, con tamaños entre 0,5 m a 2,0 m, y ocasionalmente alcanzando hasta los 10,0 m de arista; en los sectores donde conserva la matriz, se caracteriza por ser color crema, areno-limosa, compuesta por cuarzo y micas principalmente, de compacidad baja; y los horizontes de transición suelo-roca (IC-IIA) y IIA de roca moderadamente meteorizada y fracturada derivados de gneises cuarzo feldespáticos.

#### 7) El Cocal

El tramo comprendido entre el km 16+055 y el puente El Cocal de la VPVP, presenta un fenómeno de inestabilidad remontante caracterizado por el continuo desprendimiento de

bloques de roca sobredimensionados, a partir de planos de debilidad que tienen orientaciones desfavorables al corte de la vía, de alta persistencia y espaciamiento.

La unidad litológica actualmente aflorando, corresponde principalmente a un macizo rocoso donde prevalece un horizonte de meteorización IIB de gneis cuarzo-feldespático con biotita, localmente intruido por diques basálticos de 0,20 m a 0,30 m. Sobre este, en el momento de construcción de la vía se identificaron los horizontes IC-IIA y IIA, los cuales han sido erodados a lo largo de la evolución del proceso que actualmente gobierna la estabilidad del sitio.

#### 2.2.4.3.3 Análisis y evaluación de la amenaza por movimiento en masa

##### A. Zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala regional

Para la zonificación de amenaza por movimientos en masa en el área de análisis definida, se implementó la metodología para los análisis regionales. La caracterización geológico-geotécnica de las diferentes unidades litológicas presentes en el área de estudio definida para los análisis regionales, se realizó con base en información primaria y secundaria como los estudios técnicos ejecutados en el marco de factibilidad, diseños, construcción y actividades socio-ambientales del PHI, e información bibliográfica a diferentes escalas del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

La definición detallada de los parámetros de resistencia de los suelos y las características de los factores detonantes (lluvia y sismo) para cada periodo de retorno, pueden ser consultados en los informes técnicos generados para la atención Numeral 2 del Artículo 2 de la Auto 2292 del 15 de mayo del 2018 de la ANLA, al igual que los resultados obtenidos para los diferentes escenarios analizados (Integral S.A., 2018; Integral S.A., 2019). Ver documentos “0090007\_Auto2292\_Art2\_N2\_Rev01” y “0090007\_Auto2292\_Art2\_N2\_Info3\_Rev1” en Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A4).

En el presente estudio se retomaron dos escenarios de la zonificación de amenaza por movimientos en masa en términos de probabilidad de falla, los cuales corresponden al análisis de un evento de precipitación con Tr de 50 años y a un sismo con Tr de 475 años. La evaluación de la probabilidad de falla anual para estos dos escenarios se llevó a cabo por medio de la aplicación del MEP, utilizando los momentos estadísticos de la cohesión (C), ángulo de fricción ( $\varphi$ ) y permeabilidad (K) de cada unidad litológica, como variables independientes para estimar los momentos de los FS resultantes de la aplicación del modelo de Liao y otros (2010) y asumidos como las variables dependientes.

En la Figura 2-14 se presenta la zonificación de amenaza regional para un escenario del factor detonante lluvia (Tr de 50 años), donde ya se incluyeron los resultados de los análisis de estabilidad estáticos (en el marco de análisis locales) tanto cuantitativos como cualitativos, los cuales se detallan en los siguientes numerales del presente documento (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-MMP-G-010).

En términos generales, según la clasificación propuesta para la zonificación de la probabilidad de falla anual para el factor detonante lluvia, se observa un predominio de valores dentro de



las categorías Baja y Media – baja, lo que indica que para las laderas delimitadas dentro del área de análisis existe una probabilidad menor al 2% de que se materialice la ocurrencia de un movimiento en masa en un periodo de tiempo de un año, bajo las condiciones de precipitación para un periodo de retorno de 50 años.

En la Figura 2-15 se presenta la zonificación de amenaza regional para el escenario del factor detonante sismo (Tr de 475 años), donde ya se incluyeron los resultados de los análisis de estabilidad pseudo-estáticos (en el marco de análisis locales) tanto cuantitativos como cualitativos, los cuales se detallan en los siguientes numerales del presente documento (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-MMS-G-010).

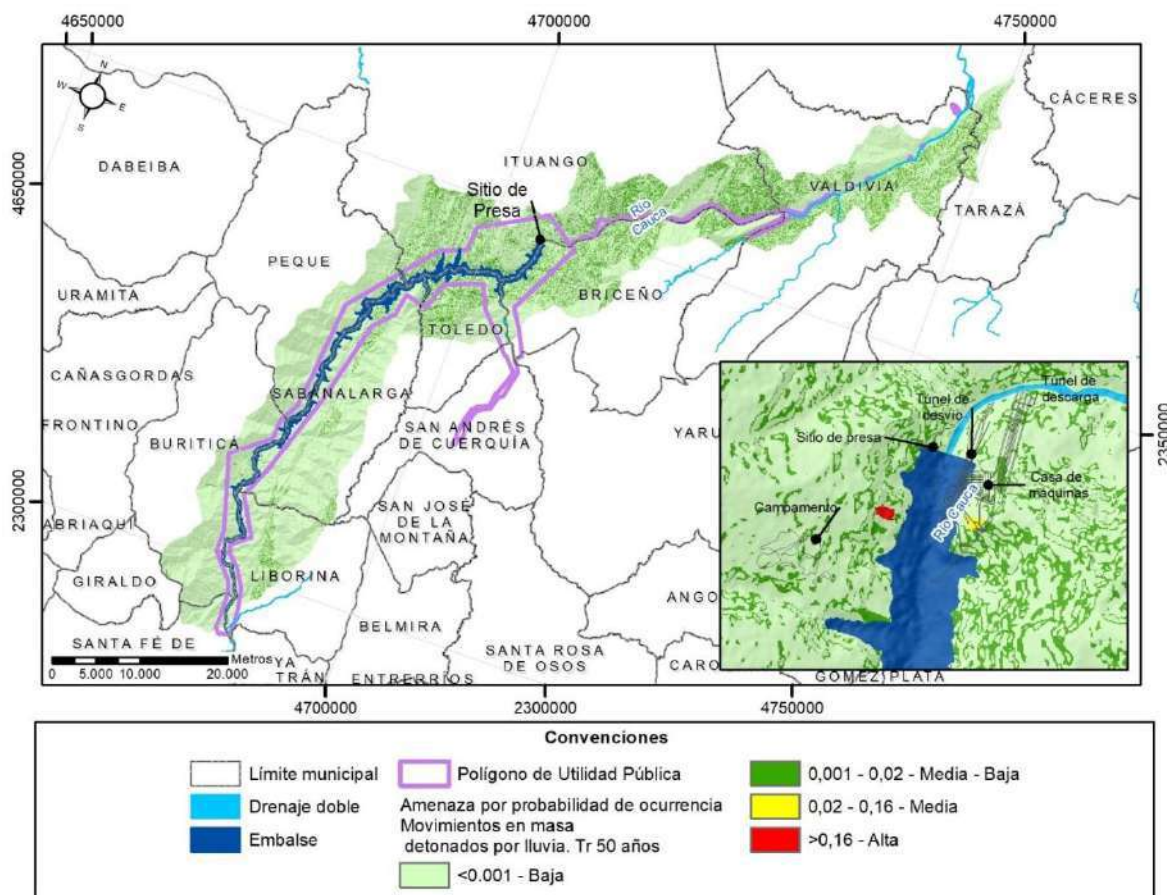


Figura 2-14 Zonificación de amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para el Tr: 50 años.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

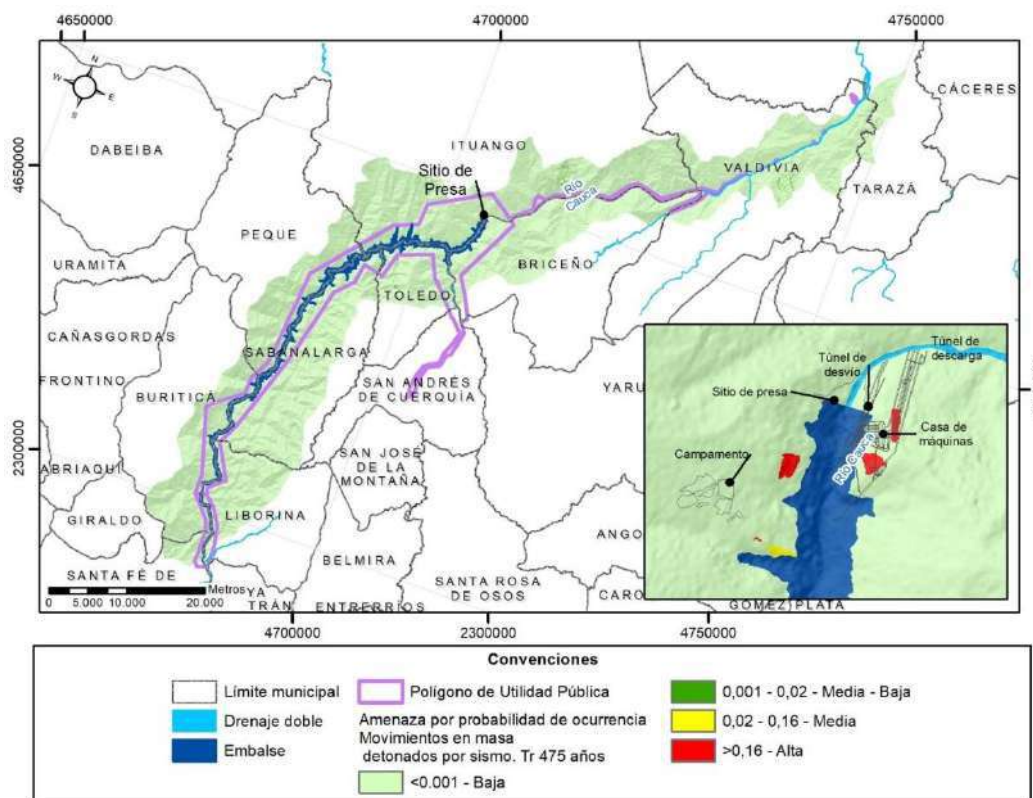


Figura 2-15 Zonificación de amenaza por movimientos en masa detonados por sismo para el Tr: 475 años.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

### B. Análisis de estabilidad y resultados para sitios puntuales

A continuación, se presentan los resultados de estabilidad obtenidos a partir de los análisis efectuados en cada uno de los sitios de interés, los cuales se realizaron considerando una superficie de falla “semicircular” en el talud, bajo dos condiciones: estática y pseudo-estática, es decir, sismo con periodo de retorno de 475 años.

Para algunos sectores de los sitios de interés se definieron las probabilidades de falla de manera semicuantitativa con base en los informes de monitoreo satelital y los análisis geomorfológicos del área.

La Tabla 2-11 muestra el resumen compilado de los resultados para los diferentes sitios de análisis y las probabilidades de falla asociadas.

Tabla 2-11 Resumen – Resultados análisis de estabilidad y probabilidades de falla para los sitios de interés.

Sitio	Sección	Área susceptible	F.S. Estático	Prob. Falla [%]	F.S. Sismo (Tr = 475 años)	Prob. Falla [%]
-------	---------	------------------	---------------	-----------------	----------------------------	-----------------

Deslizamiento Desviaciones	A	A-2	2.8	0.00	1.9	0.00
	B	A-2	1.7	0.00	1.3	0.00
	C	A-2	1.2	3.90	0.90	91.00
	D	A-3 y A-4	1.4	0.13	1.00	37.70
Romerito	A	A-1	1.63	0.00	1.20	0.00
	B	A-1	2.00	0.00	1.60	0.00
	C	A-1	1.50	2.80	1.12	27.50
Sitio 7	1	A-1	1.19	12.30	0.95	73.20
	2	A-1	1.52	0.10	1.12	23.000
Villa Luz (Helipuerto)	D		1.33	1.00	1.05	39.20
	A	A-2	6.30	0.00	1.86	0.00
	Sección Semicuantitativa	A-3	N/A	N/A	N/A	N/A
km 0+900	1	Norte	1.01	49.20	1.10*	4.40*
	2	Sur	1.07	1.90	1.13*	0.20*
	3	Centro	1.27	5.90E-03	1.10*	8,5*
La Honda	A	Zona 1	1.1	34.40	1.10*	28.50*
	D	Zona 4	1.4	1.00	2.00*	0.00*
El Cocal	Sección Única (Semicuantitativa)	A-1	N/A	N/A	N/A	N/A

**\*Nota:** Los valores de FS y PF en condición pseudo-estática presentados para los sitios de km0+900 y La Honda, corresponden a los valores resultantes de los análisis de estabilidad contemplando medidas de estabilización, dado que estos dos sitios no cumplen con los FS mínimos requeridos en el escenario de condición estática actual

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

En los siguientes numerales se presentan los resultados particulares para los sitios de interés mostrados en la Tabla 2-11, los cuales se obtuvieron de manera cualitativa o semicuantitativa, según la información disponible; teniendo en cuenta que para aquellos sitios de los cuales se tiene información de caracterización geológico-geotécnica suficiente; los análisis se realizaron por medio del método de estabilidad de equilibrio límite usando el software *Slide* de la firma *Rocscience*.

**Nota:** Para aquellos sitios en los cuales se realizaron análisis de equilibrio límite probabilísticos, los resultados corresponden a los factores de seguridad (FS) y probabilidades de falla (PF) asociadas a la superficie de falla crítica en cada sector; sin embargo, dichas superficies no necesariamente representan un comportamiento global y generalizado de toda el área de interés en los sitios de análisis, sino de un sector particular de estos. No obstante, para efectos prácticos y de manera conservadora, se aplicó el resultado puntual de PR y FS de cada sitio al área de interés completa, esto con el fin facilitar el proceso de zonificación de amenaza en cada sitio objeto de análisis.

#### 1) Talud de las desviaciones

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de la estabilidad de la ladera del portal entrada de las Desviaciones de acuerdo con los resultados de la actualización de la amenaza sísmica del proyecto. Esta ladera, dada su magnitud, se analizó a través de cuatro ejes como se muestra en la Figura 2-16, donde se presenta una planta con su localización. En la

Figura 2-17 se presenta el perfil estratigráfico típico, allí se pueden observar los materiales existentes en el sitio de análisis, mientras que en la Tabla 2-12 se muestran los parámetros de resistencia de dichos materiales.

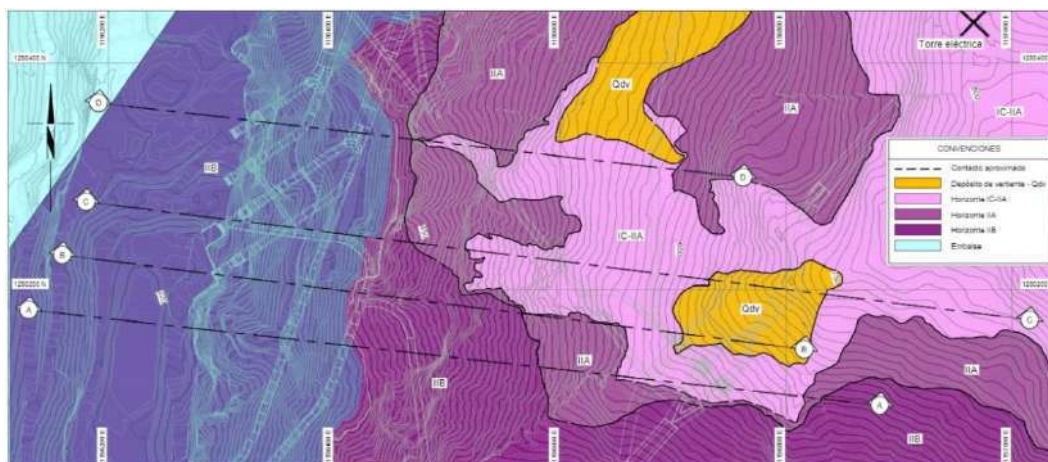


Figura 2-16 Planta localización ejes analizados – Talud PE desviaciones.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



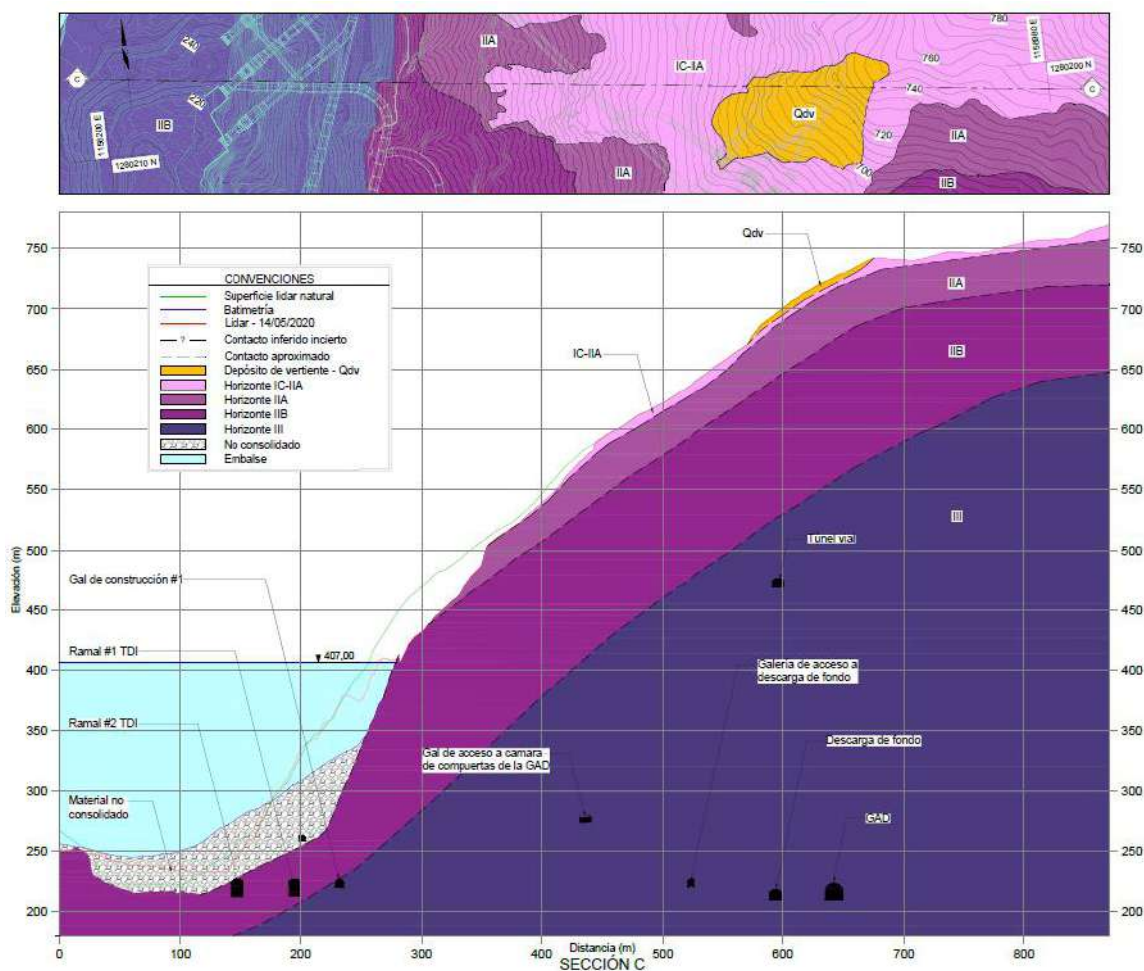


Figura 2-17 Perfil estratigráfico típico - Talud PE (C) desviación.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Tabla 2-12 Parámetros de resistencia – Talud PE desviación.

Material	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Criterio	Cohesión (kPa)	Phi (°)	UCS (MPa)	GSI
Qdv	20+/-1	Mohr-Coulomb	30+/- 9	30 +/-9	--	--
IC-IIA	19+/-1	Mohr-Coulomb	20 +/- 8	35 +/-10	--	--
IIA	24+/-1	Hoek-Brown	--	--	70 +/-10	50+/-10
IIB	26+/-1	Hoek-Brown	--	--	90 +/- 10	55 +/-10

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Los resultados se muestran desde la Figura 2-18 hasta la Figura 2-29.

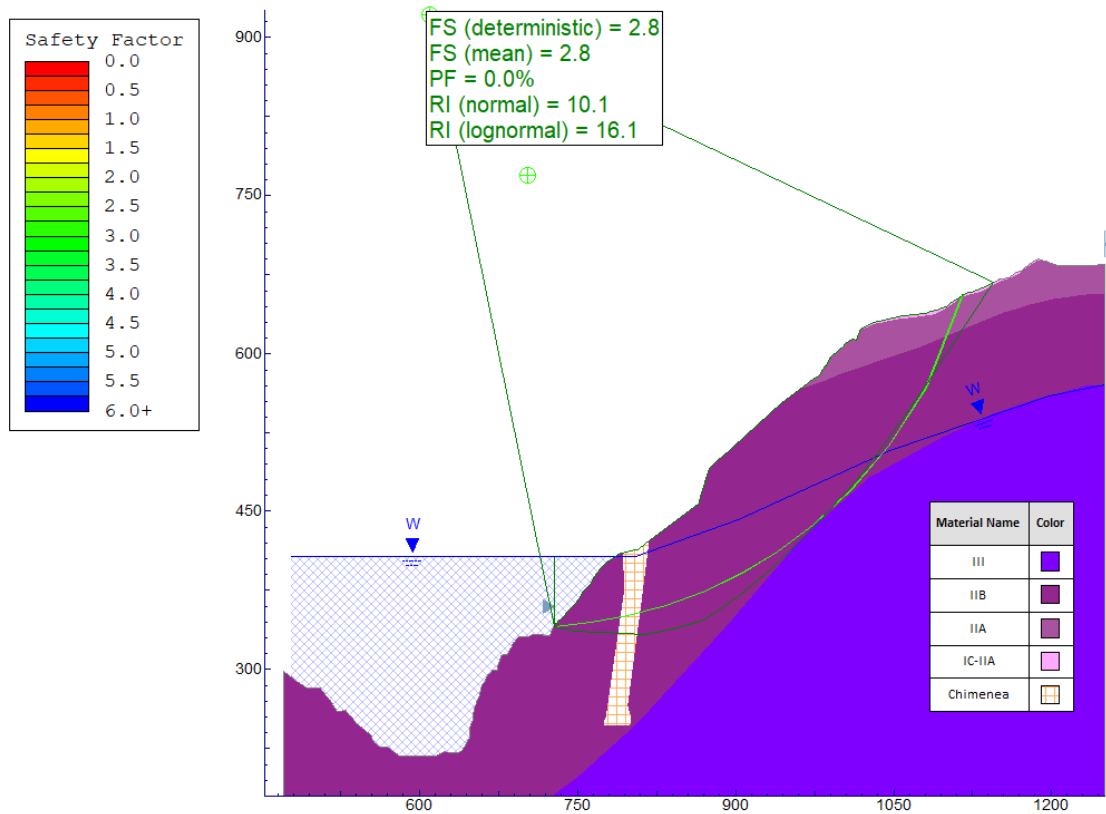


Figura 2-18 Resultados análisis de estabilidad en condición estática – Desviaciones, Sección A. FS (medio)=2,8 y PF=2,8x10<sup>-22</sup>%.  
 Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



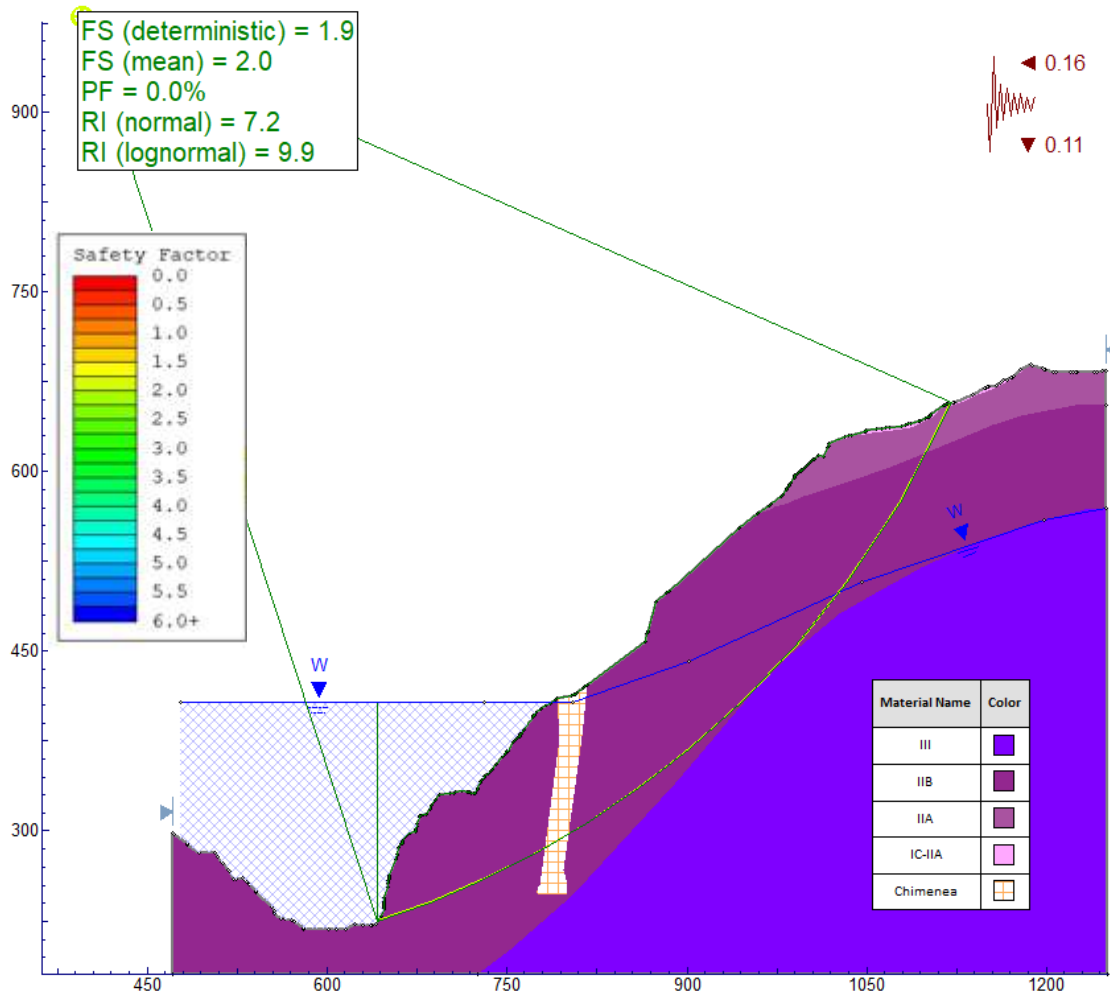


Figura 2-19 Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección A – Tr 475 años (Sismo vertical hacia abajo). FS (medio)=1,9 y PF=6,2x10<sup>-14</sup>%.  
 Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

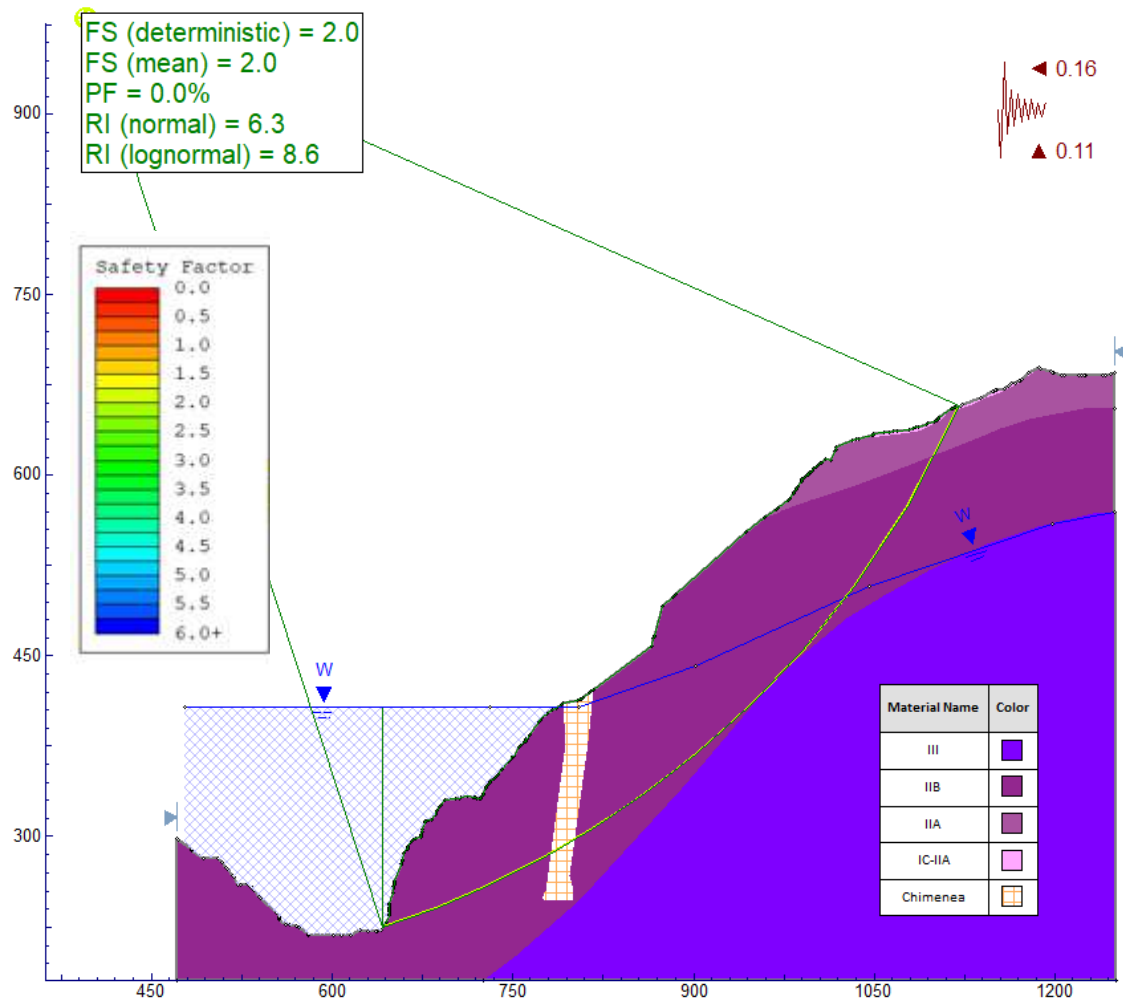


Figura 2-20 Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones,  
 Sección A – Tr 475 años (Sismo vertical hacia arriba FS (medio)=2,0 y  $PF=1,5 \times 10^{-12}\%$ ).  
 Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

De acuerdo con los resultados anteriores, en la sección A se puede observar que para la condición estática el talud evaluado a través de la sección es estable obteniendo un factor de seguridad por encima de 2,0. bajo la condición pseudo-estática se presenta una condición similar

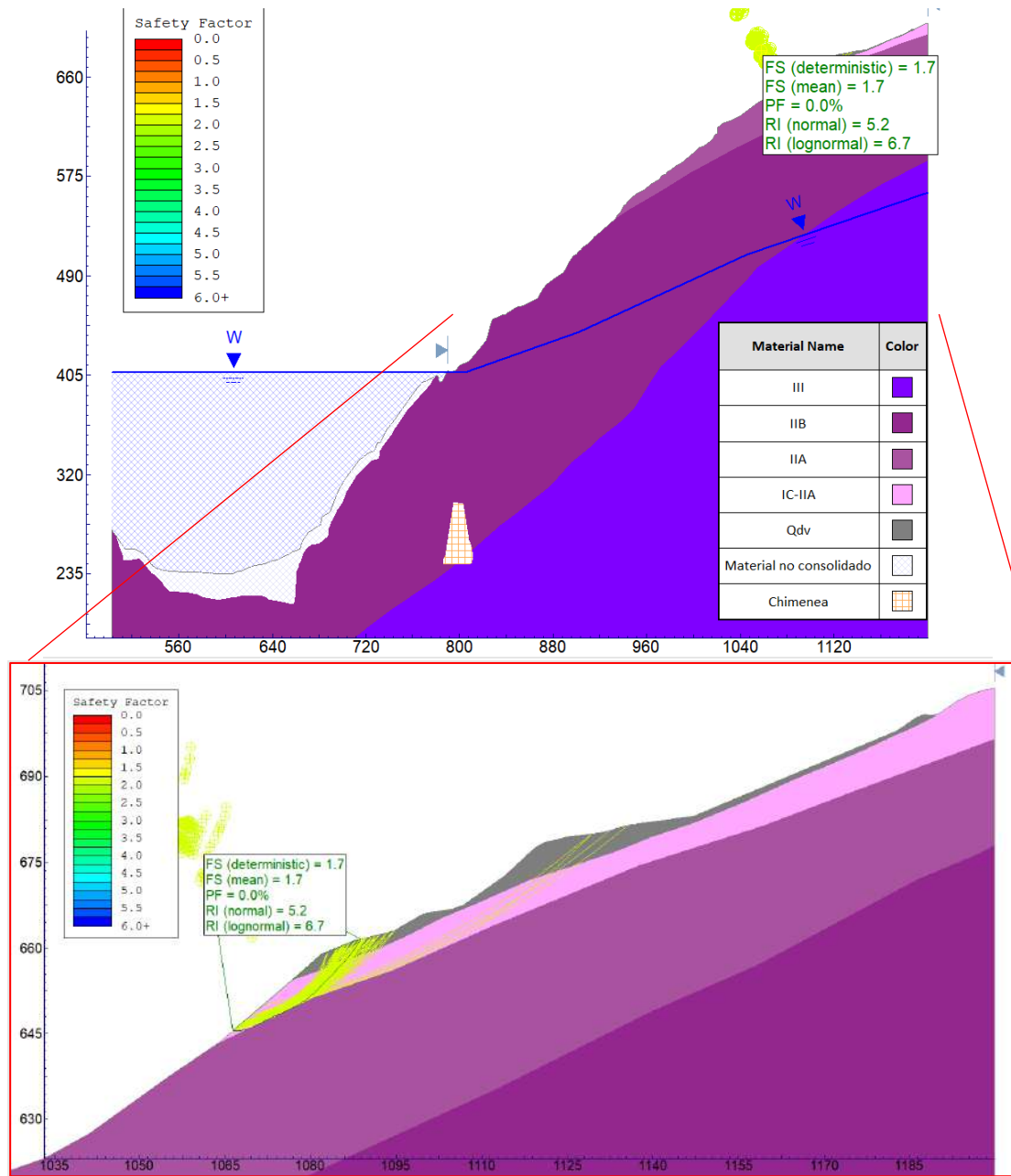


Figura 2-21 Resultados análisis de estabilidad condición estática Desviaciones, Sección B. FS (medio)=1,7 y PF=1,0x10<sup>-05</sup>%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

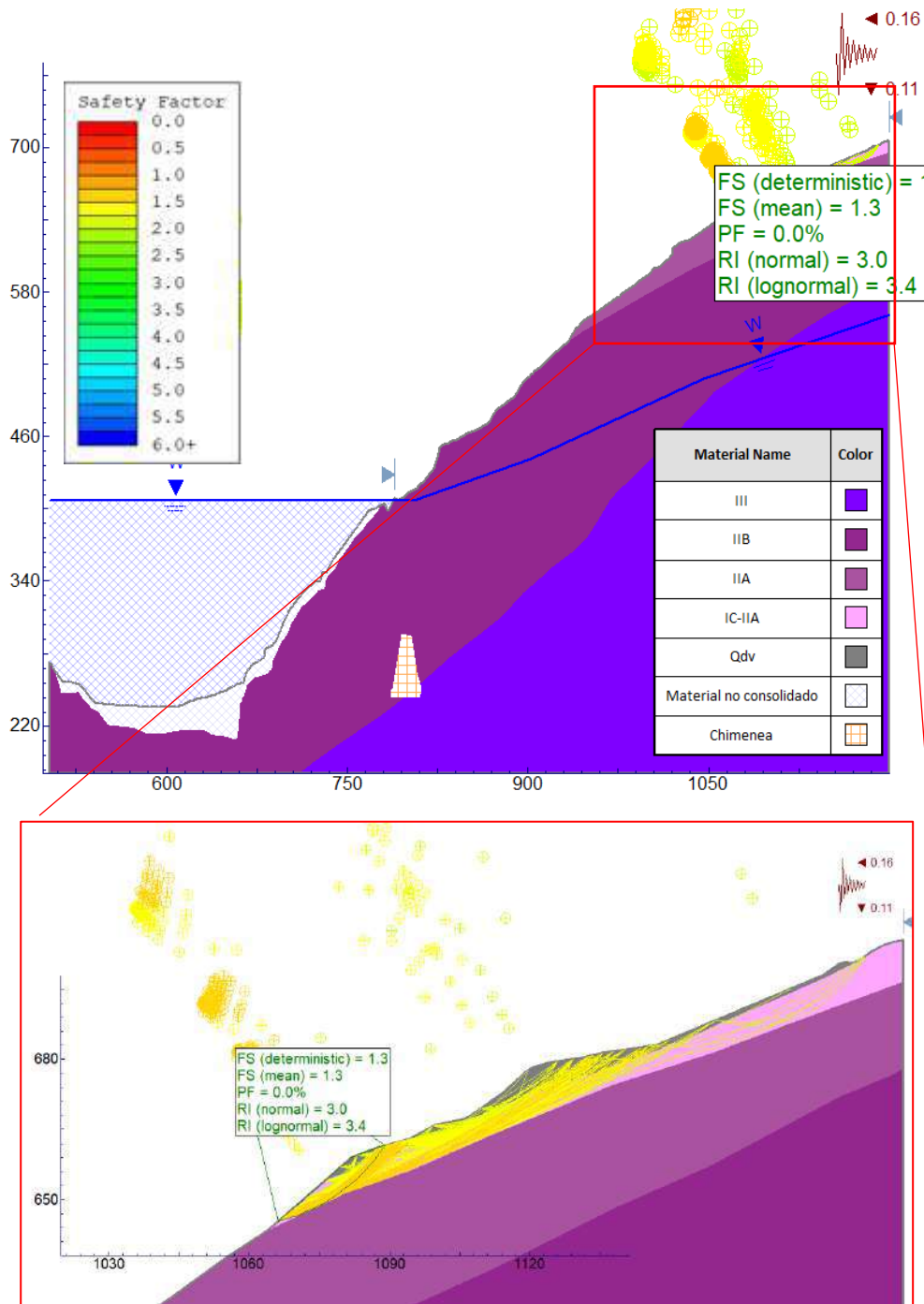


Figura 2-22 Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección B – Tr 475 años (Sismo vertical hacia abajo). FS (medio)=1,3 y PF=0,001%. Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

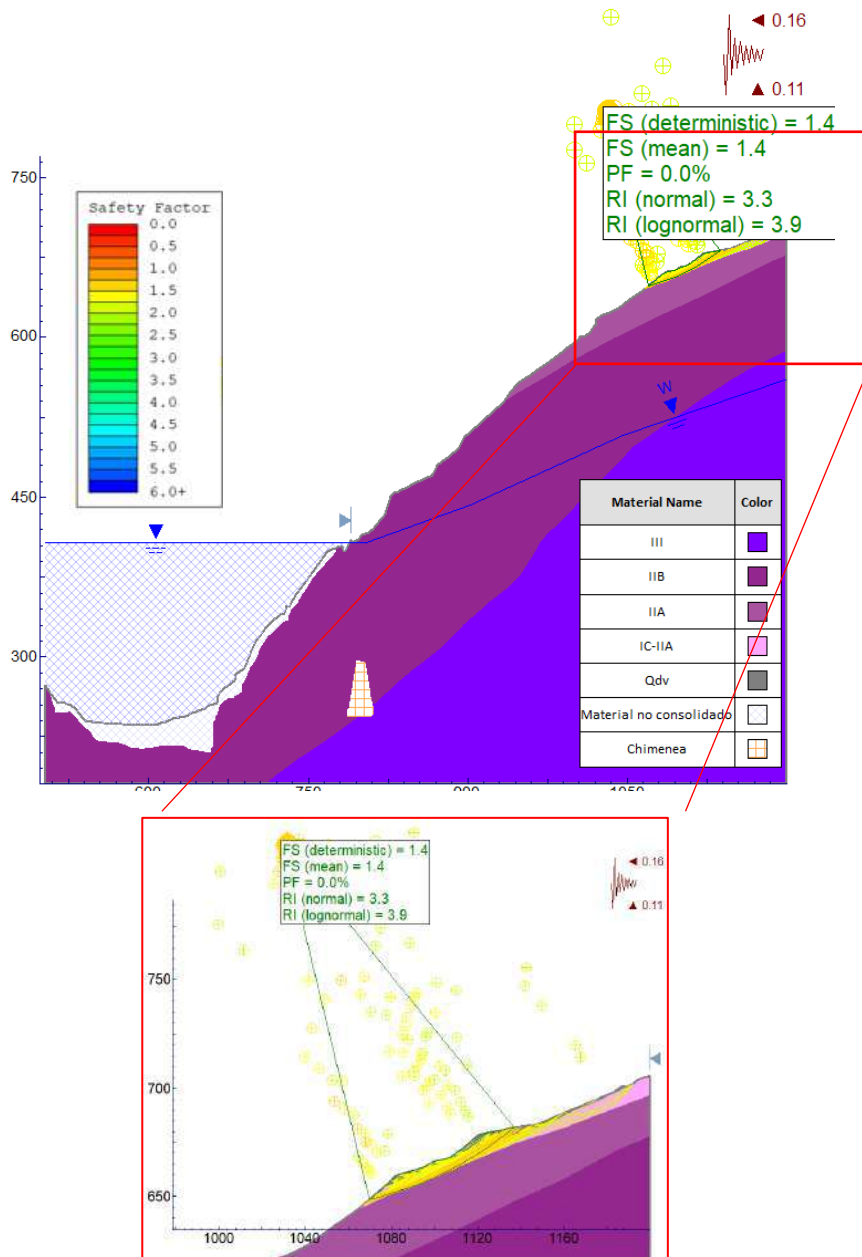


Figura 2-23 Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección B – Tr 475 años (Sismo vertical hacia arriba). FS (medio)=1,4 y PF=0,34%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Similar a los resultados obtenidos en la primera sección, los resultados a través de la sección B arrojaron que para la condición estática y para el periodo de retorno de 457 años, el talud permanecería estable

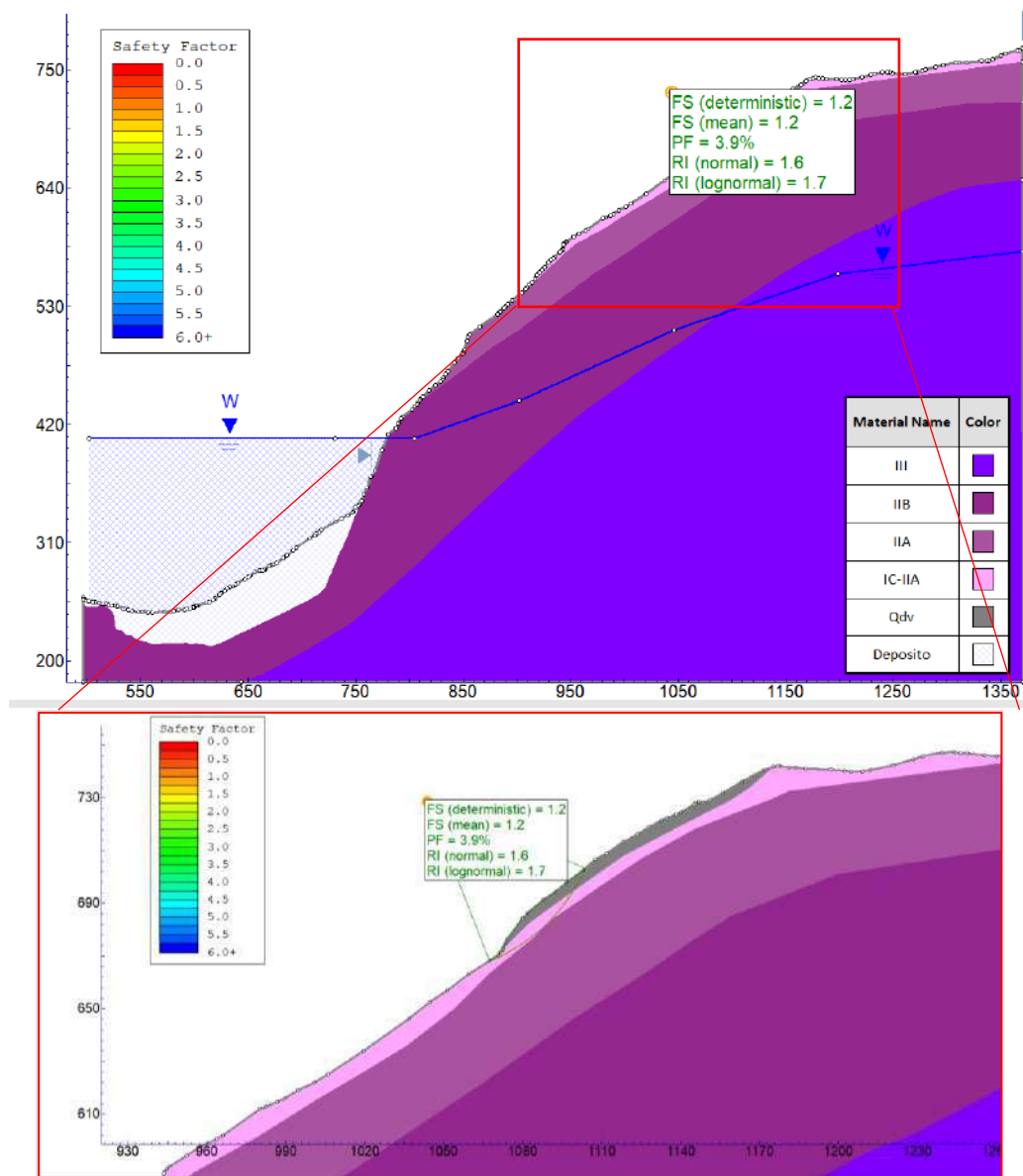


Figura 2-24 Resultados análisis de estabilidad condición estática, Desviaciones, Sección C - FS (medio)=1,2 y PF=3,9%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



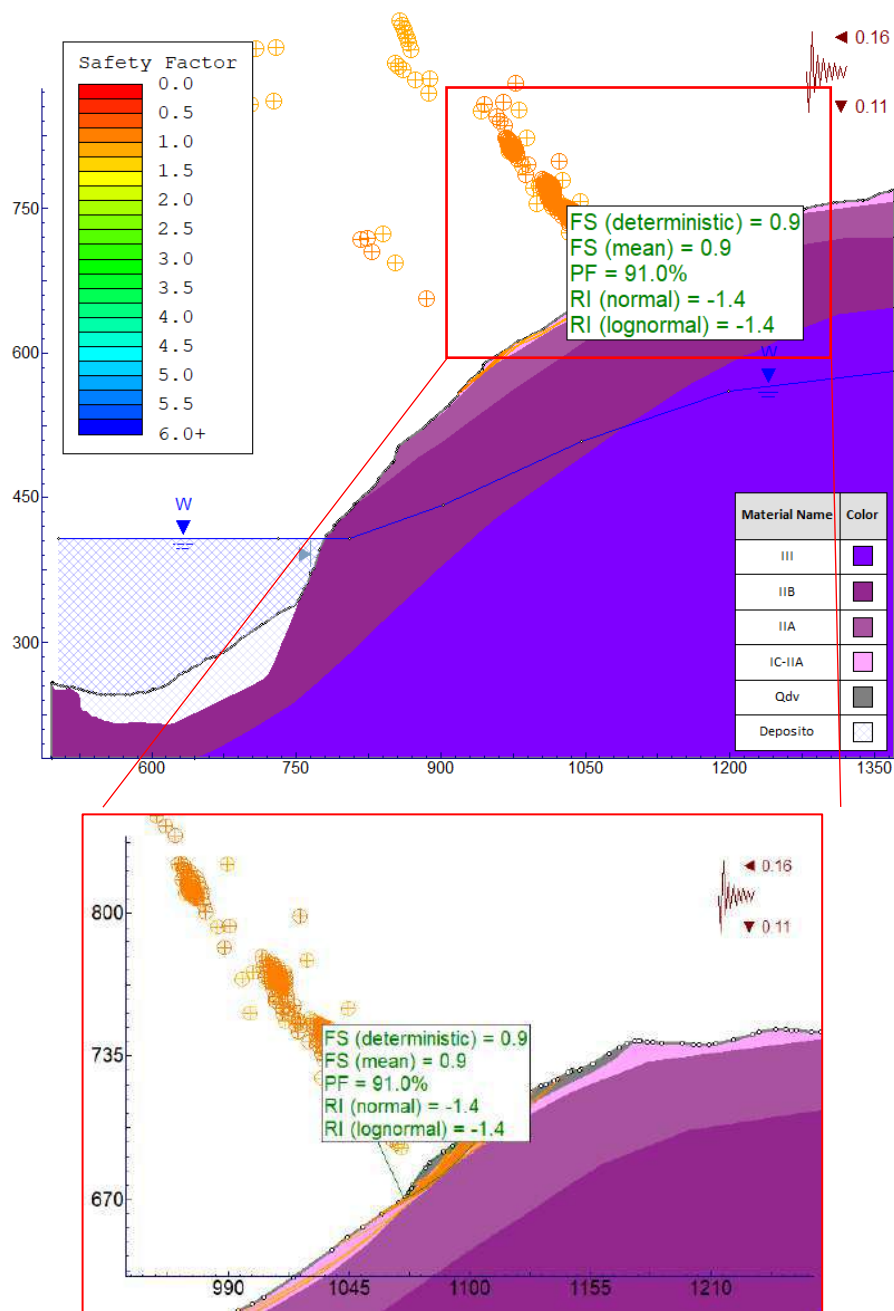


Figura 2-25 Resultados análisis de estabilidad condición pseudo-estática Desviaciones, Sección C – Tr 475 años (Sismo vertical hacia abajo). FS (medio)=0,9 y PF=91,0%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

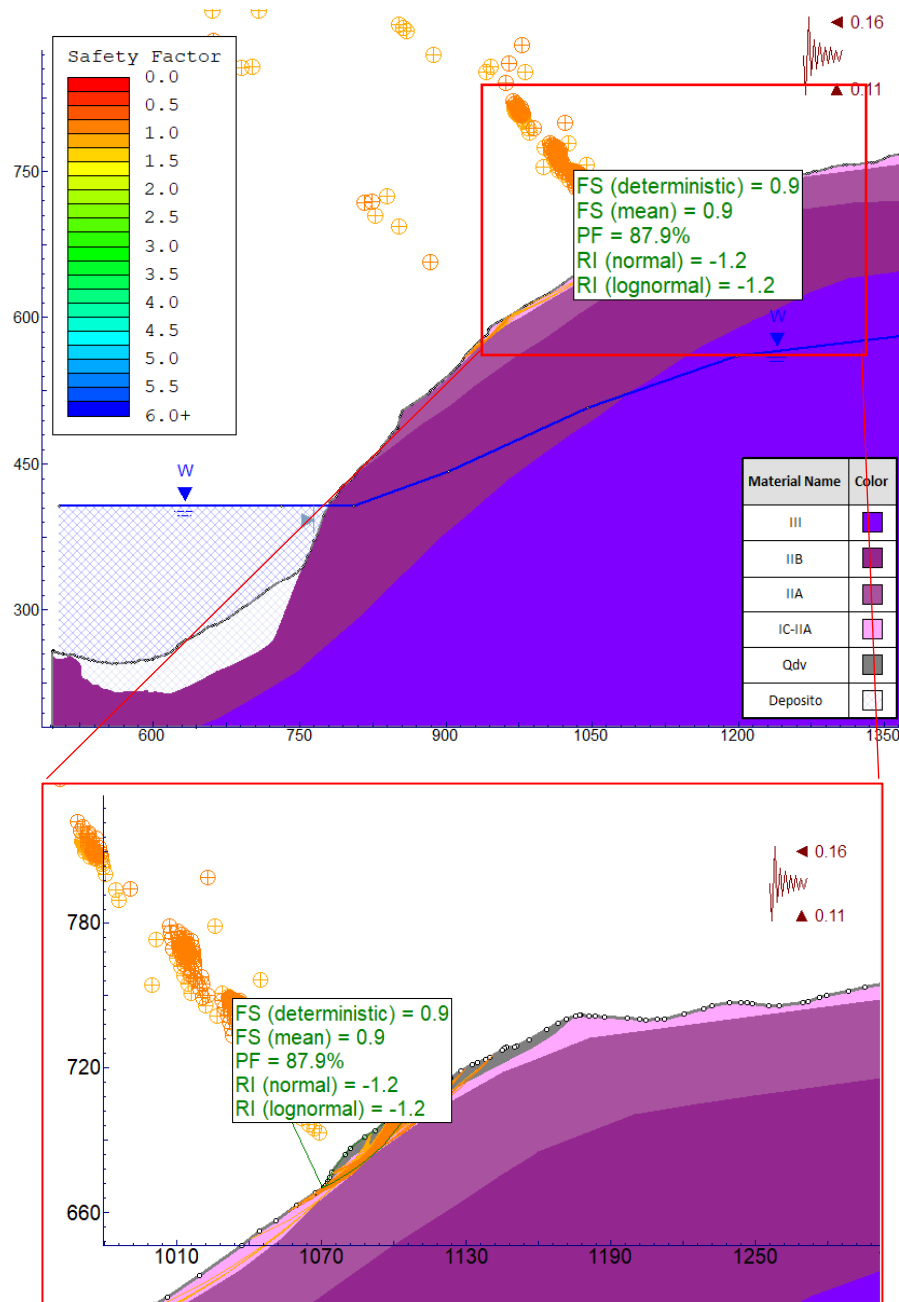


Figura 2-26 Resultados análisis de estabilidad condición pseudo-estática Desviaciones, Sección C – Tr 475 años (Sismo vertical hacia arriba). FS (medio)=0,9 y PF=87,9%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Los resultados de la evaluación de la estabilidad a través de la sección C arrojaron como resultados que para la condición estática si bien es estable, el factor de seguridad es menor al mínimo recomendado de 1,5. Adicionalmente, el talud se torna inestable para el sismo analizado por lo que es de esperarse que se presente un evento de inestabilidad ante la ocurrencia de este. Aun así, las superficies de falla se forman sobre el depósito de vertiente y la

transición suelo roca, por lo que se esperaría que el deslizamiento ocurra solo en la parte superior del talud y la porción rocosa permanezca estable.

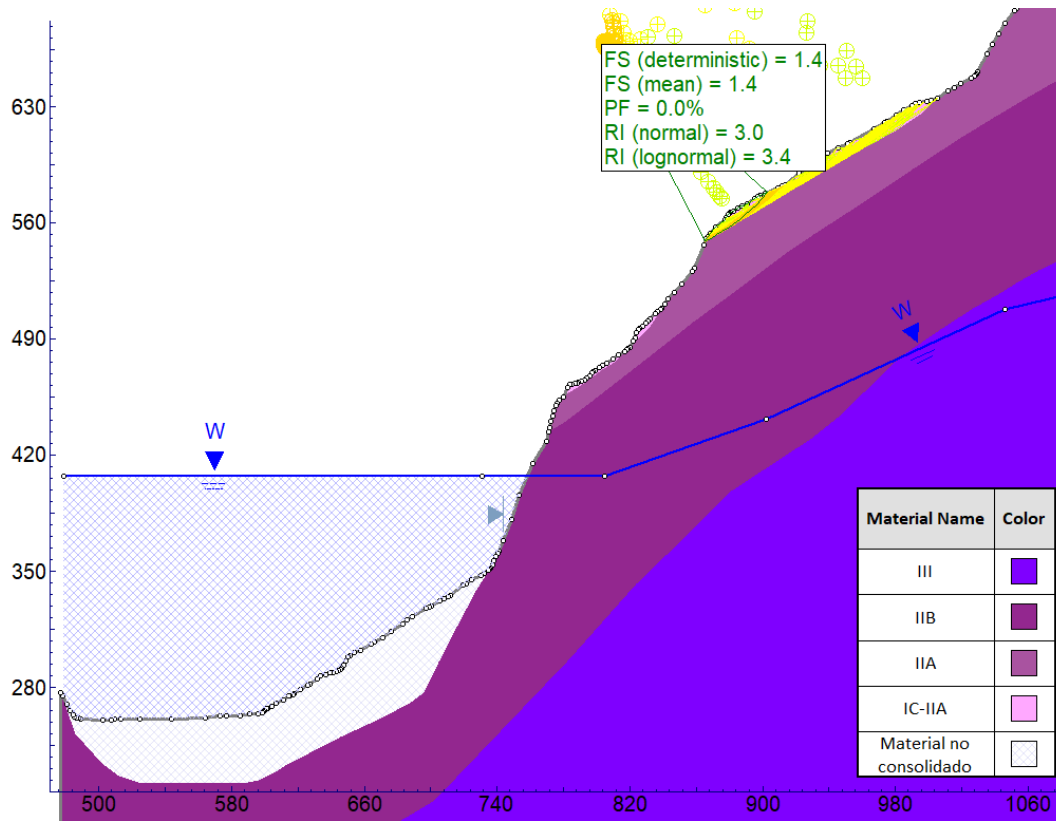


Figura 2-27 Resultados análisis de estabilidad condición estática – Desviaciones, Sección D FS (medio)=1,4 y PF=0,13%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

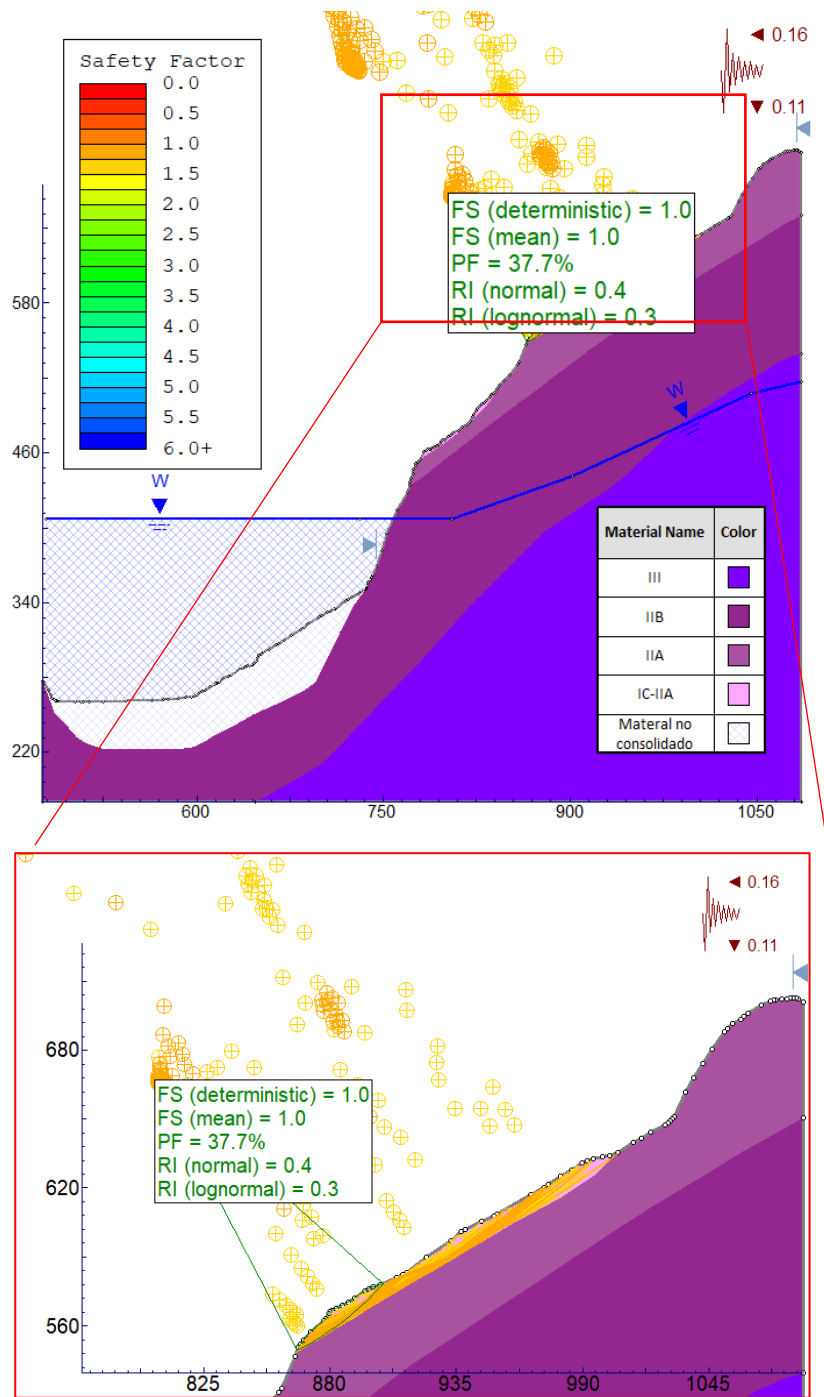


Figura 2-28 Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección D – Tr 475 años (Sismo vertical hacia abajo). FS (medio)=1,0 y PF=37,7%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

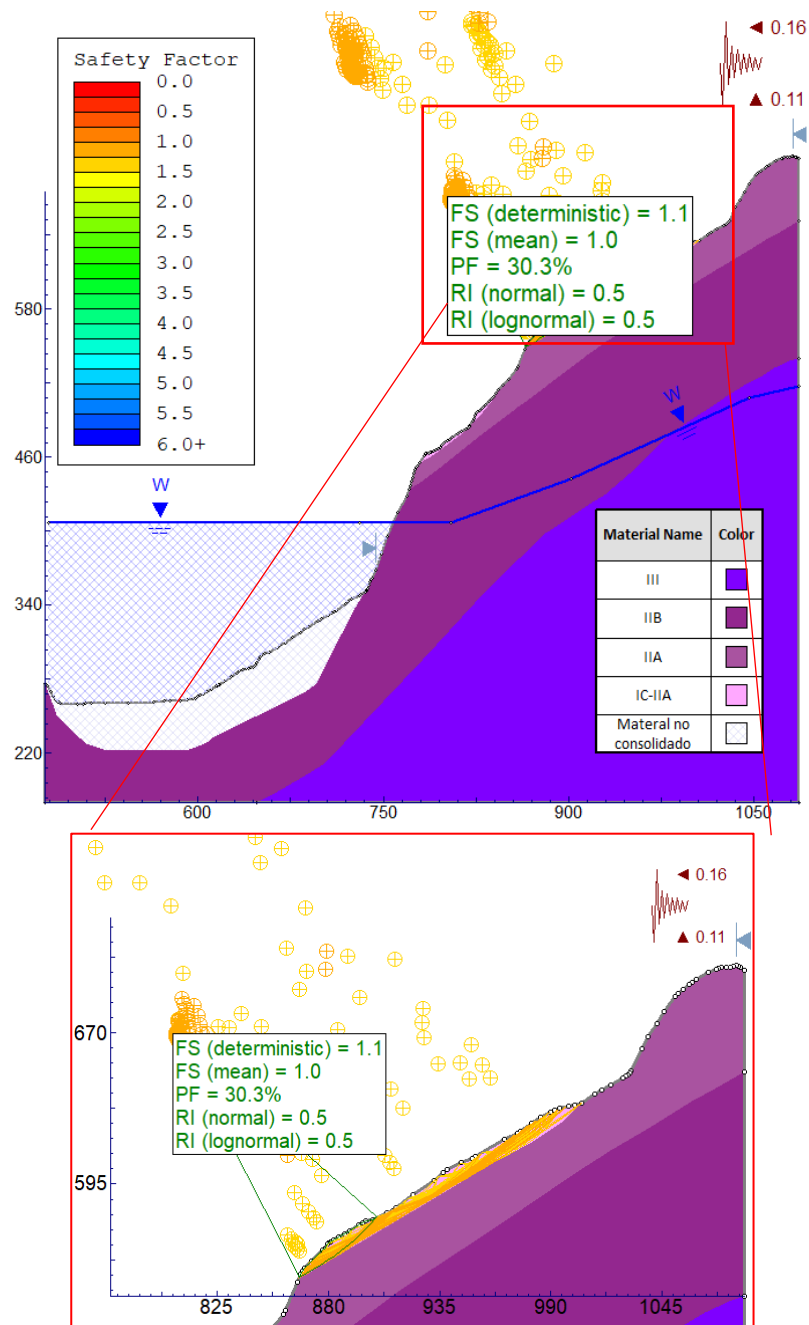


Figura 2-29 Resultados análisis de estabilidad en condición pseudo-estática Desviaciones, Sección D – Tr 475 años (Sismo vertical hacia arriba). FS (medio)=1,1 y PF=30,3%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Finalmente, los resultados a través de la sección D muestran nuevamente una condición de estabilidad favorable para el caso de evaluación estática y el valor obtenido es cercano a 1,5 asociado a una probabilidad de falla de 0,0%. Para el caso de la condición pseudo-estática, se obtiene que se espera un fallo en el talud en la porción de suelo.

Las Figura 2-30 y Figura 2-46 muestran la localización general del Talud de las Desviaciones con sus áreas de análisis y el resultado de zonificación de amenaza por movimiento en masa obtenido.

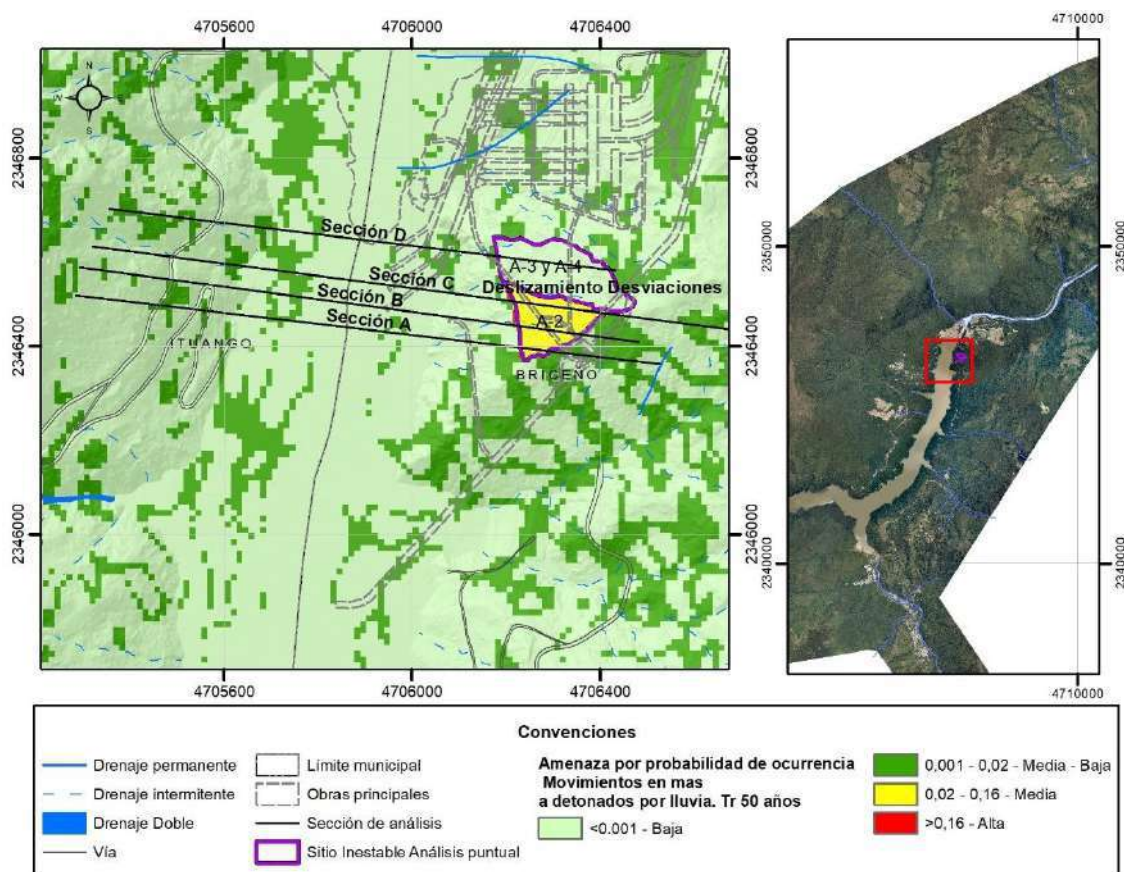


Figura 2-30 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – Talud de las Desviaciones.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

## 2) Romerito

A continuación, se presenta la evaluación de la estabilidad de los taludes para la excavación de la plazuela de compuertas incluyendo la parte alta, denominada como Romerito. En la Figura 2-31 se presenta la planta donde se indica las secciones de análisis y de la Figura 2-32 a la Figura 2-33 se presentan los perfiles correspondientes a las secciones A, B, y C con sus respectivos horizontes de meteorización. En la Tabla 2-13 se muestran los parámetros de resistencia de los materiales.

El análisis pseudo-estáticos se realizó para un sismo con Tr de 475. Para dicho análisis, se consideró un coeficiente sísmico horizontal igual a  $K_{sth} = 0.8 * PGA * I * Fa$ , además de un coeficiente sísmico vertical de 0,7 veces el coeficiente sísmico horizontal.



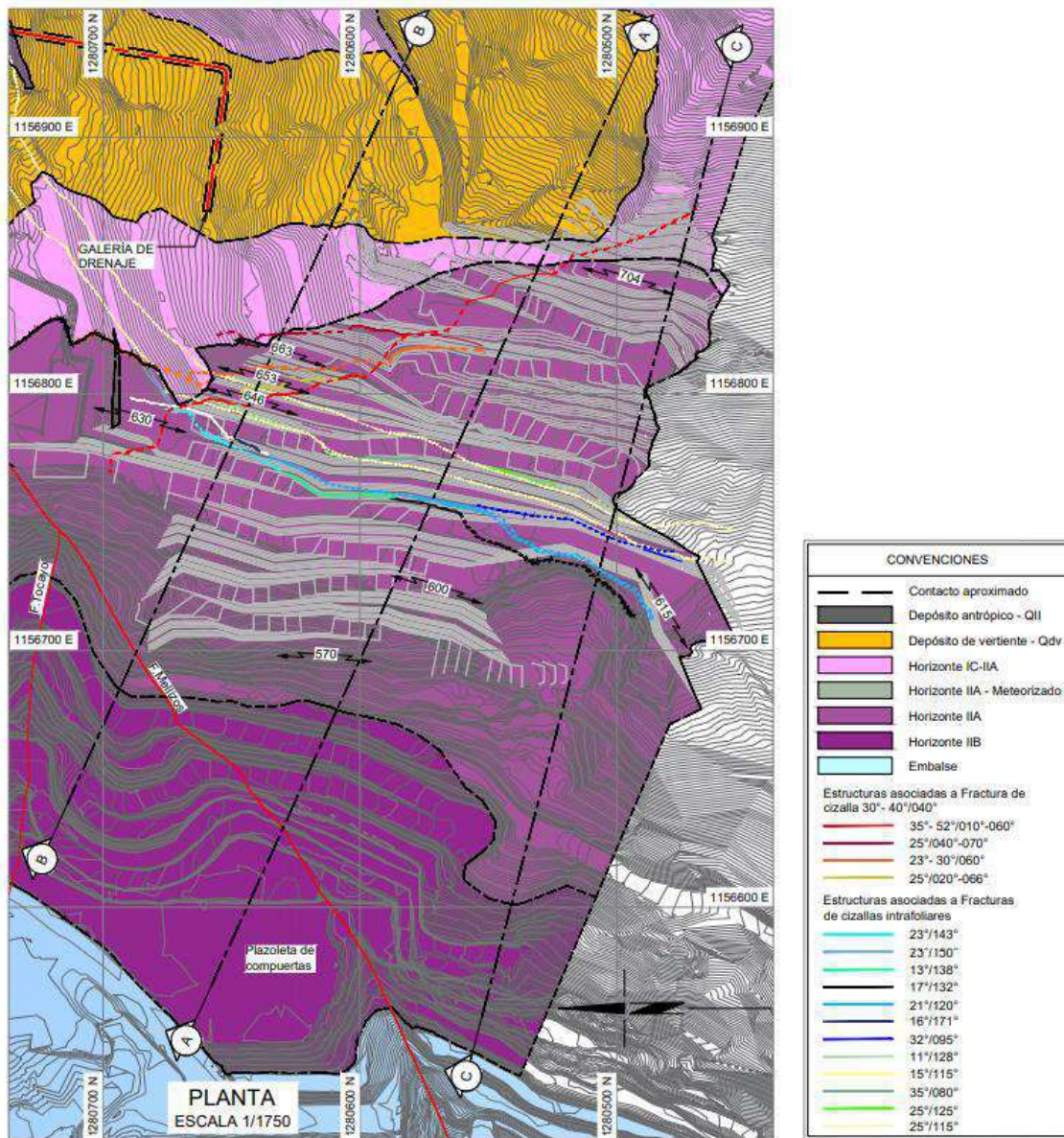


Figura 2-31 Planta VNMD- Romerito.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

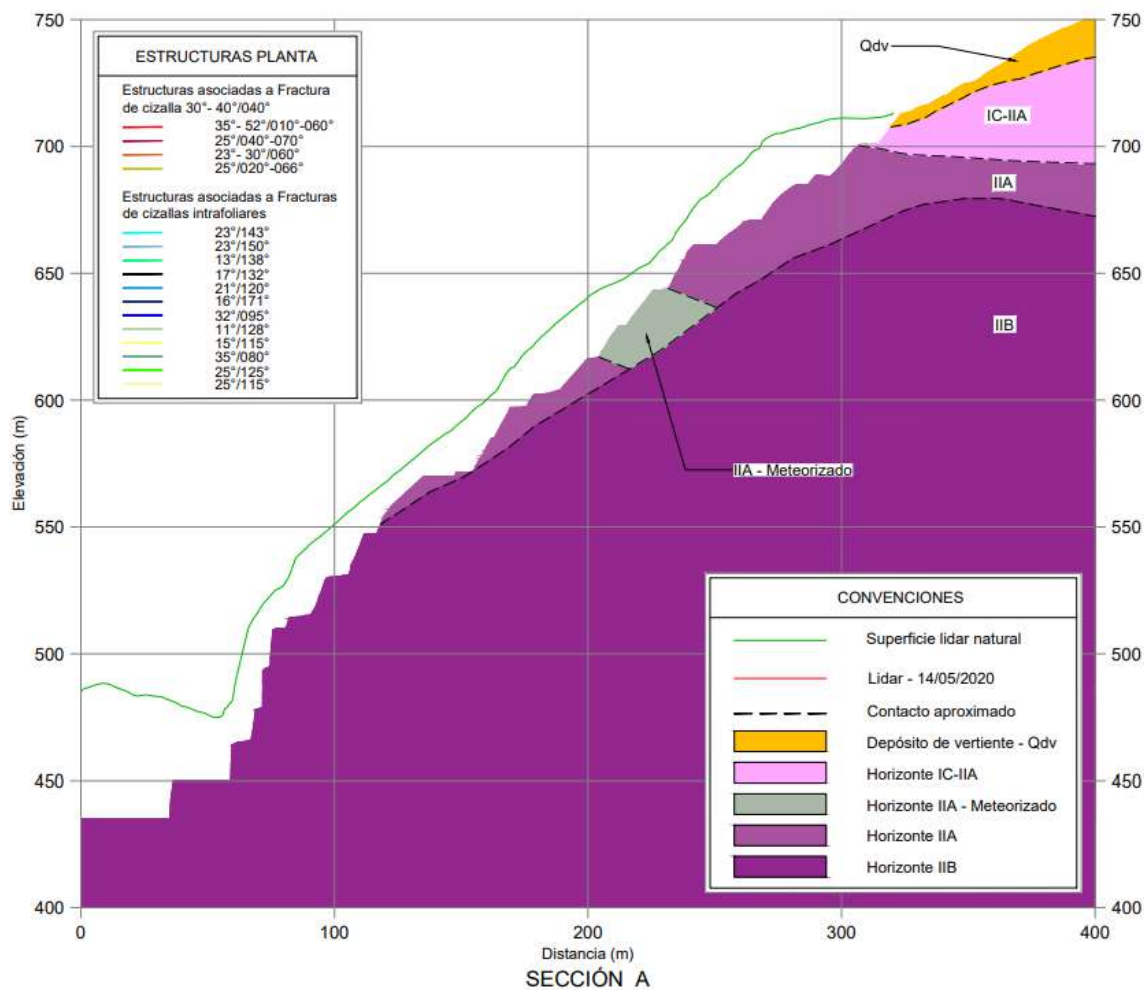


Figura 2-32 Sección de Análisis A-A, Excavación parte alta de pozos de compuertas.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

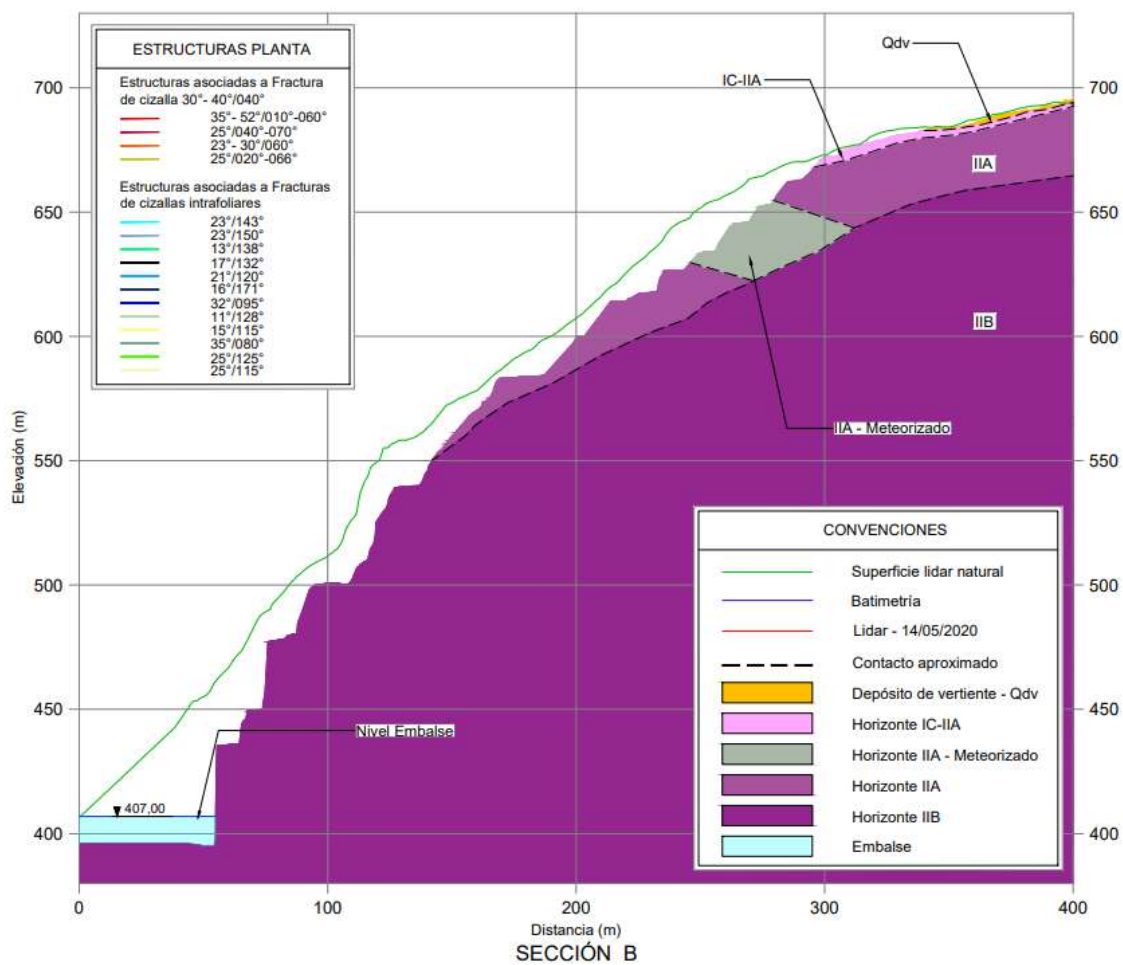


Figura 2-33 Sección de Análisis B-B, Excavación parte alta de pozos de compuertas.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

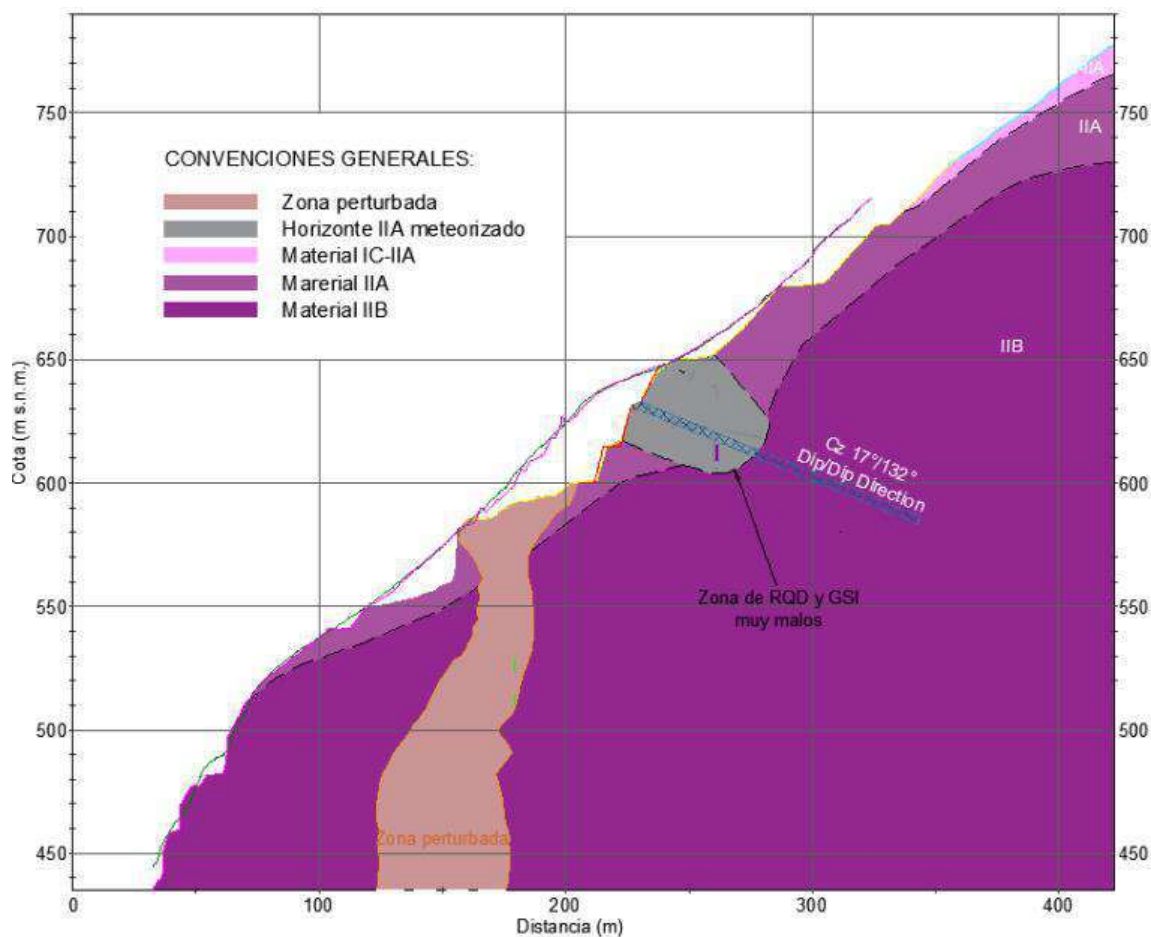


Figura 2-34 Sección de Análisis C-C, Excavación parte alta de pozos de compuertas.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Tabla 2-13 Parámetros geomecánicos de los materiales Romerito.

Material	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	Phi (°)	UCS (MN/m <sup>2</sup> )	GSI	mi
Qv	18	20 +/-5	30 +/-10	-	-	-
IC-IIA	19	35 +/- 15	35 +/-10	-	-	-
IIA	24	-	-	70 +/-10	50 +/-10	28
IIA Meteorizada	24	-	-	70 +/-10	20 + 10	28
IIA Relajado (Sección C)	24	-	-	70 +/-10	35 +/-5	28
IIB	26	-	-	90 +/-10	60 +/-10	28
Plano 17_132	19	20 +/-6	30 +/-5	-	-	-

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

A continuación, se presentan los resultados de los análisis de estabilidad, considerando las propiedades geomecánicas de los materiales del sitio y la geometría de corte.



Se procede a mostrar los resultados obtenidos, del talud sección de análisis A-A, tanto para la condición estática como pseudo-estática. En la condición pseudo-estática se presenta para la componente vertical hacia arriba y hacia abajo. En la Figura 2-35 se presenta el análisis en condición estática mientras que en la Figura 2-36 y Figura 2-37 se muestran los resultados obtenidos para la sección A en condición pseudo-estática con un Tr de 475 años. Para los casos analizados, los valores de factor de seguridad obtenidos son mayores a los mínimos requeridos.

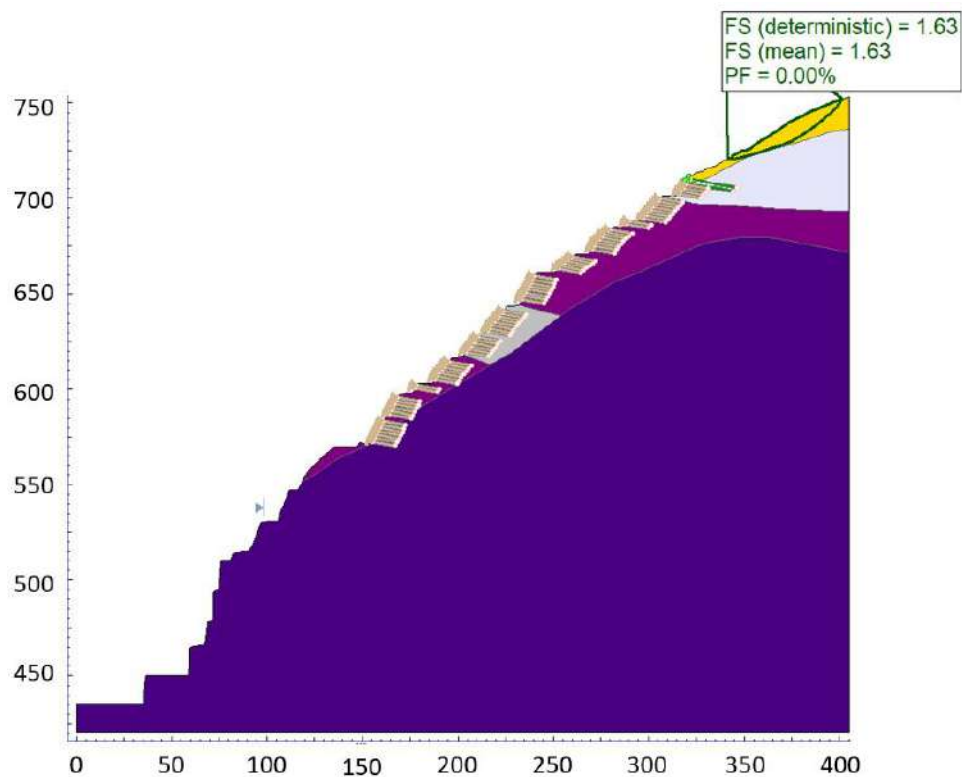


Figura 2-35 Análisis estático– Sección A-A. FS (promedio)=1,63; PF=0,0%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

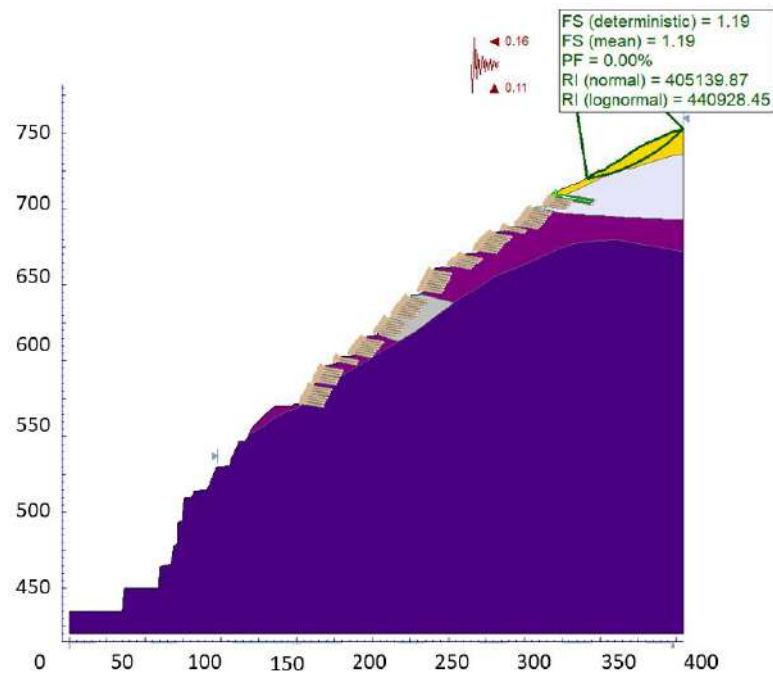


Figura 2-36 Análisis pseudo-estático – Sección A-A, coeficiente sísmico vertical hacia arriba con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,2; PF=0,0%.  
 Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

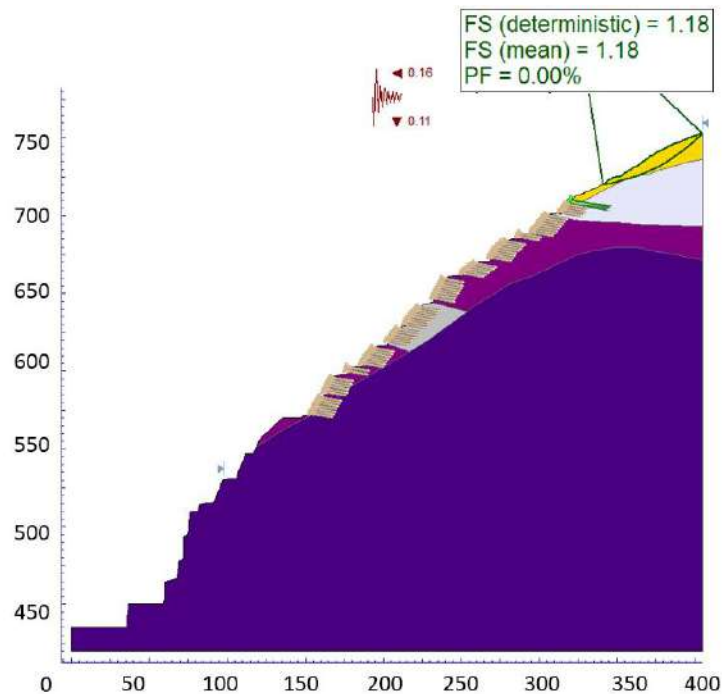




Figura 2-37 Análisis pseudo-estático – Sección A-A, coeficiente sísmico vertical hacia abajo con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,2; PF=0,0%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Para la sección B-B, en la Figura 2-38 se presenta el factor de seguridad mínimo para el caso estático. Los análisis pseudo-estáticos para un período de retorno de 475 años con la aceleración vertical hacia arriba y hacia abajo se observan en la Figura 2-39 y la Figura 2-40.

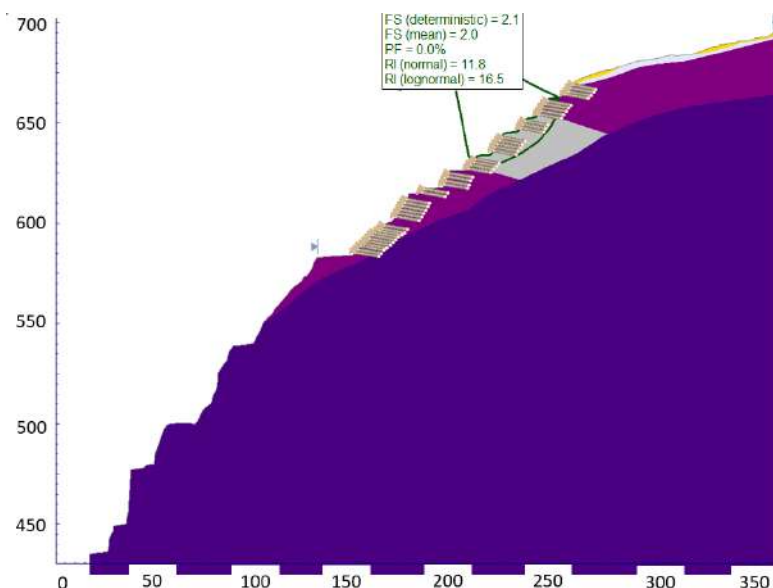


Figura 2-38 Análisis estático– Sección B-B. FS (promedio)=2,00; PF=0,00%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

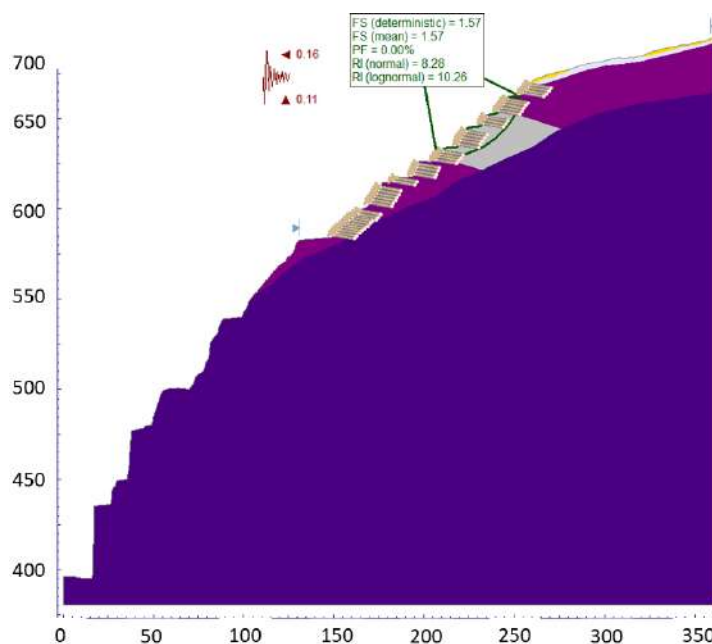


Figura 2-39 Análisis pseudo-estático – Sección B-B, coeficiente sísmico vertical hacia arriba con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,6; PF=0,0%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

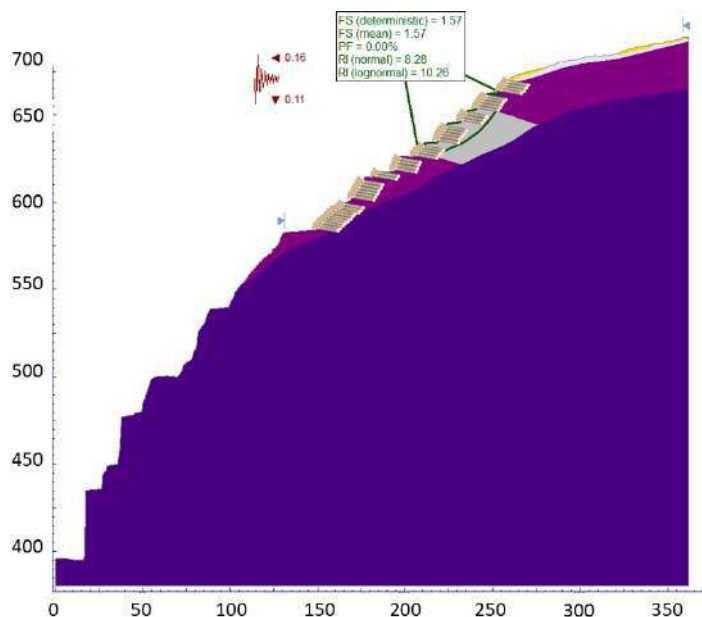


Figura 2-40 Análisis pseudo-estático – Sección B-B, coeficiente sísmico vertical hacia abajo con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,6; PF=0,0%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Para la sección C-C, en la Figura 2-41 se presenta el factor de seguridad mínimo para el caso estático. Los análisis pseudo-estáticos para un período de retorno de 475 años con la aceleración vertical hacia arriba y hacia abajo se observan en la Figura 2-42 y la Figura 2-43.

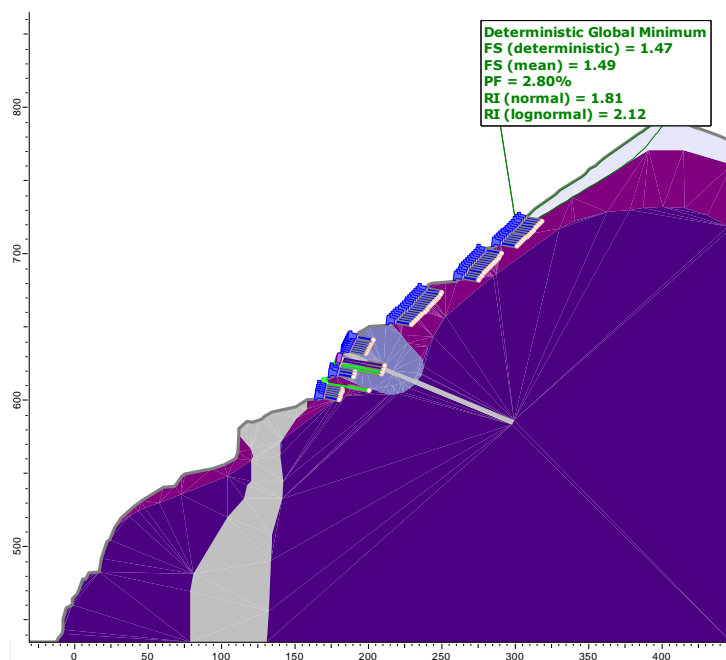


Figura 2-41 Análisis estático – Sección C-C.·FS (promedio)=1,5; PF=2,80%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

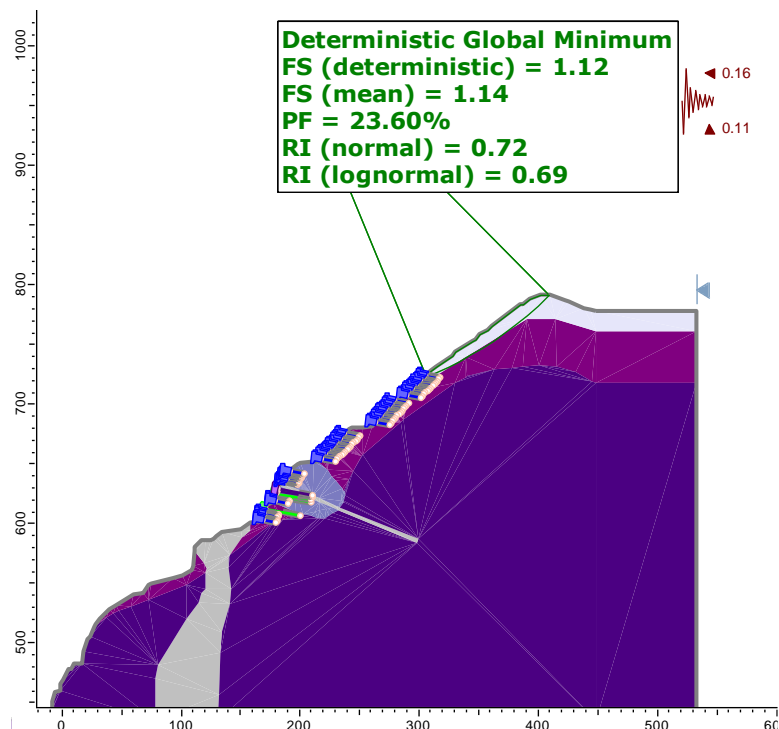


Figura 2-42 Análisis pseudo-estático – Sección C-C, coeficiente sísmico vertical hacia arriba con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,1; PF=23,6%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

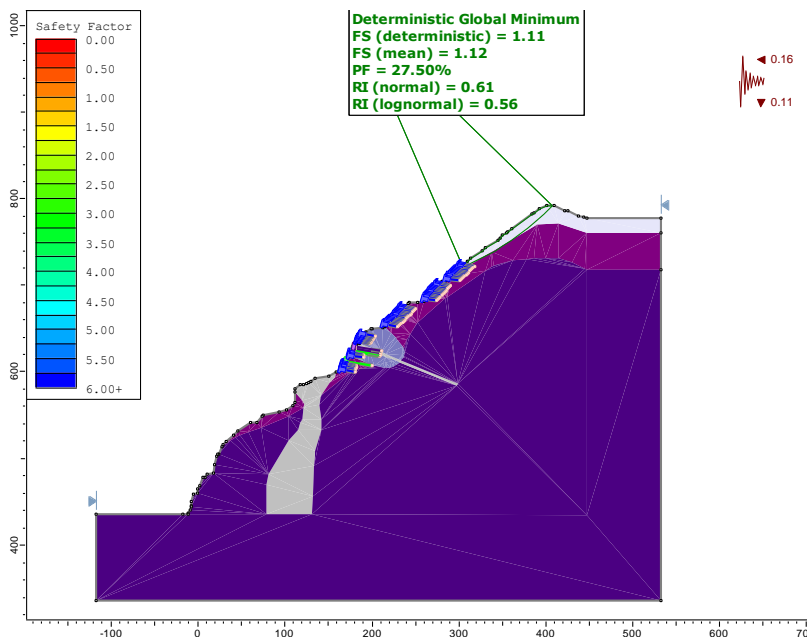


Figura 2-43 Análisis pseudo-estático – Sección C-C, coeficiente sísmico vertical hacia abajo con Tr de 475 años. FS (promedio)=1,12; PF=27,5%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Teniendo en cuenta que el factor de seguridad mínimo para el caso estático es de 1,5 y para el caso pseudo-estático es de 1,05 (para un tr de 475 años), se concluye que las 3 secciones de análisis cumplen con esta premisa para los casos estáticos y para el sismo con un período de retorno de 475 años

La Figura 2-44 a la Figura 2-46 muestra la localización general del sector conocido como Romerito con sus áreas de análisis y el resultado de zonificación de amenaza por movimiento en masa obtenido.

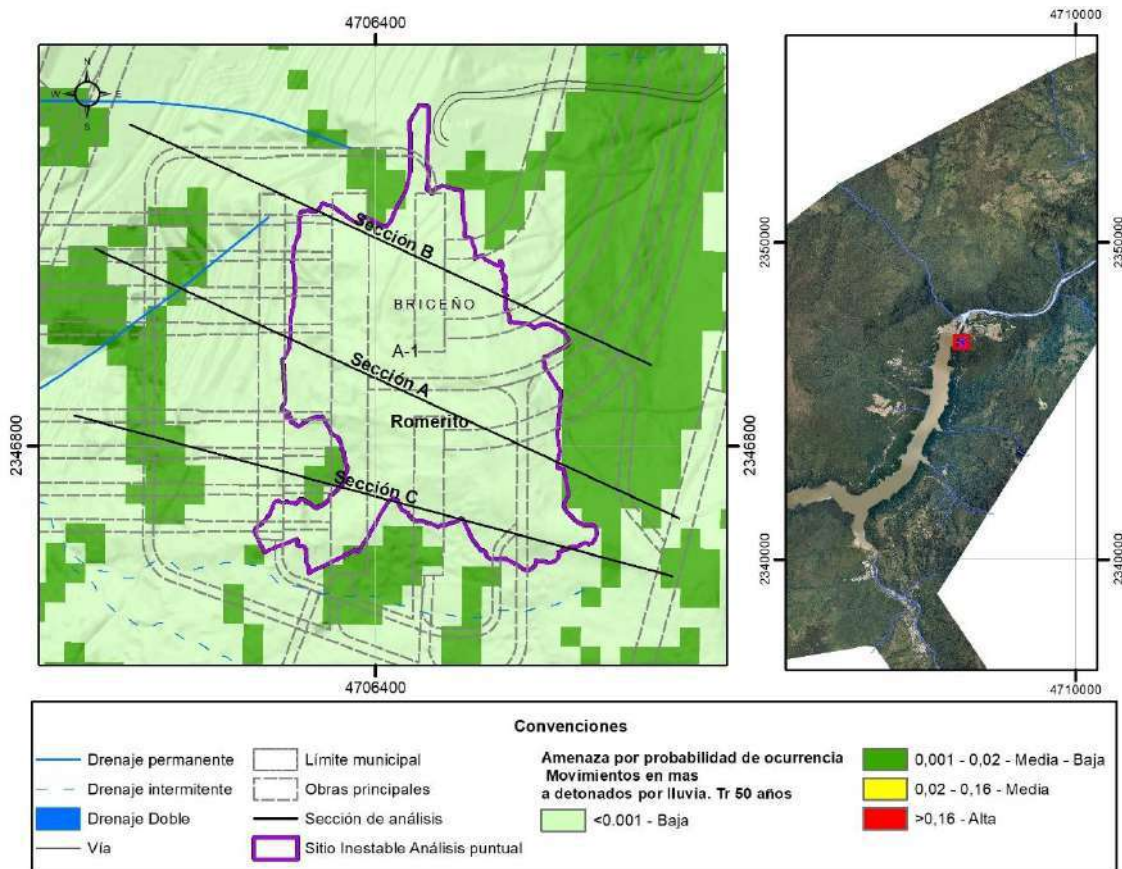


Figura 2-44 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – Romerito.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

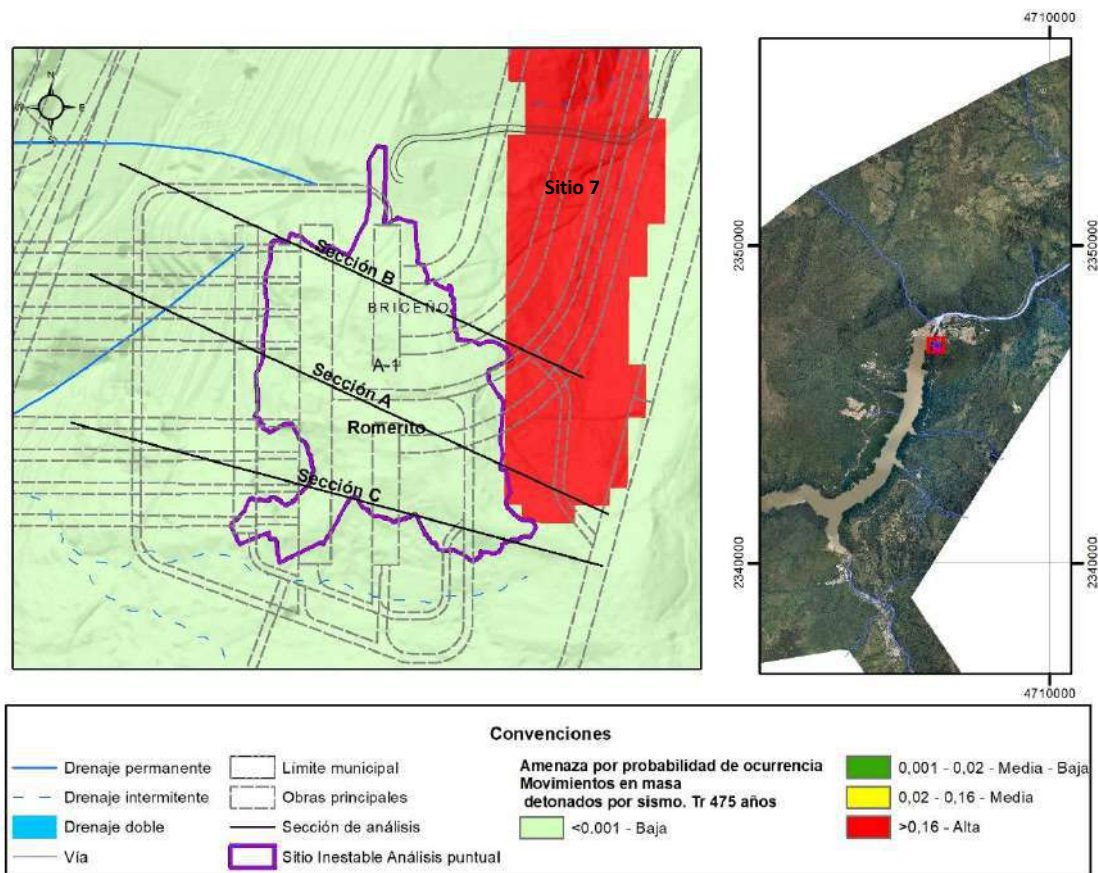


Figura 2-45 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – Romerito.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



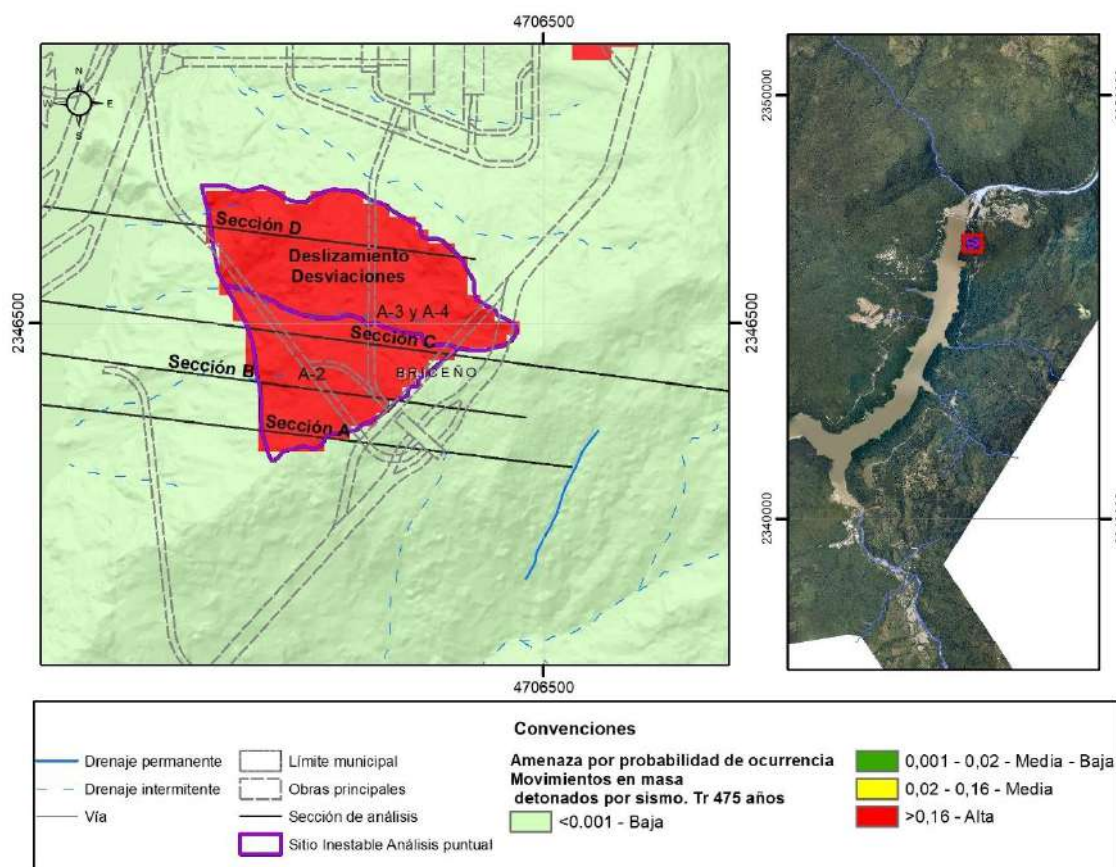


Figura 2-46 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – Talud de las Desviaciones.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

### 3) Vertiente norte Margen Derecha (Sitio 7)

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de la estabilidad del talud conocido como la vertiente norte de margen derecha (Sitio 7), de acuerdo con los resultados de la actualización de la amenaza sísmica del proyecto. En la Figura 2-47 se presenta la planta donde se indica las secciones de análisis. En la Figura 2-48 y la Figura 2-49 presentan los perfiles 1 y 2 con sus respectivos horizontes de meteorización, y en la Tabla 2-14 los parámetros de resistencia de los materiales.

El análisis pseudo-estáticos se realizó para un sismo con periodo de retorno de 475 años. Para dicho análisis, se considera un coeficiente sísmico horizontal igual a  $K_{sth} = 0.8 * PGA * I * Fa$ , además de un coeficiente sísmico vertical de 0,7 veces el coeficiente sísmico horizontal.

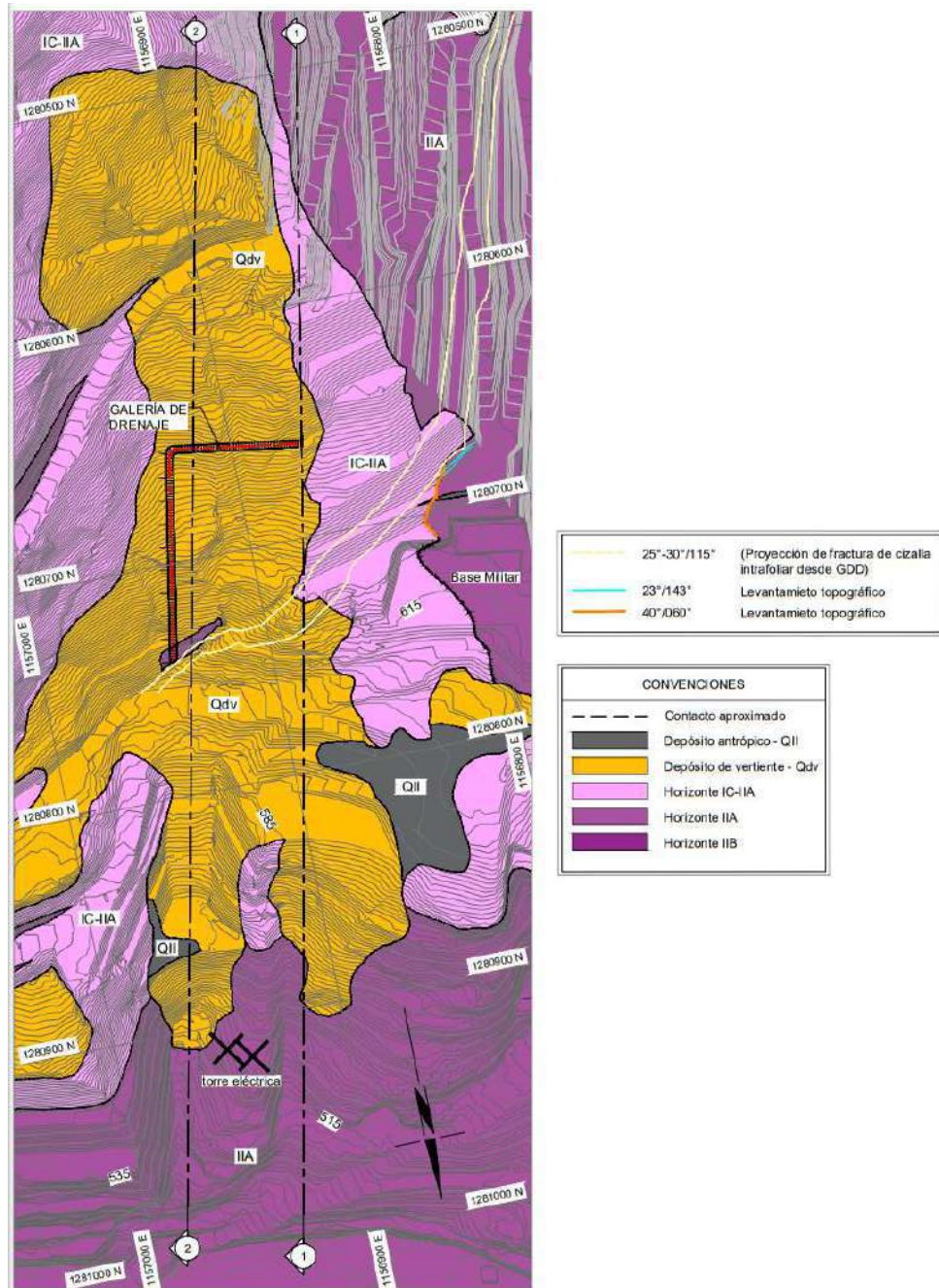


Figura 2-47 Planta VNMD-Sitio 7.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

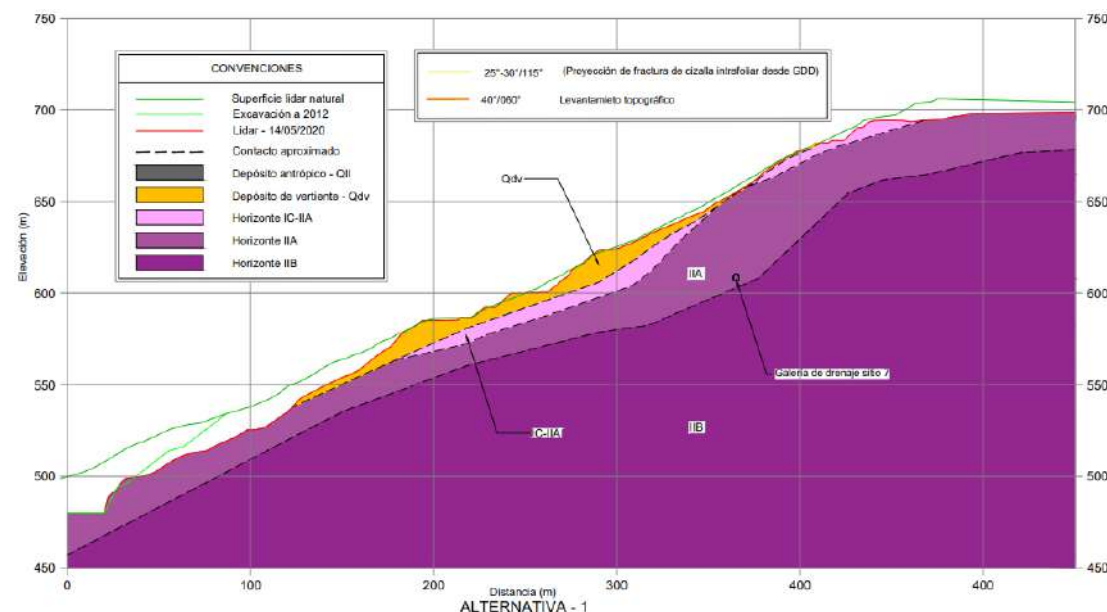


Figura 2-48 Sección de Análisis 1-1 VNMD-Sitio 7.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

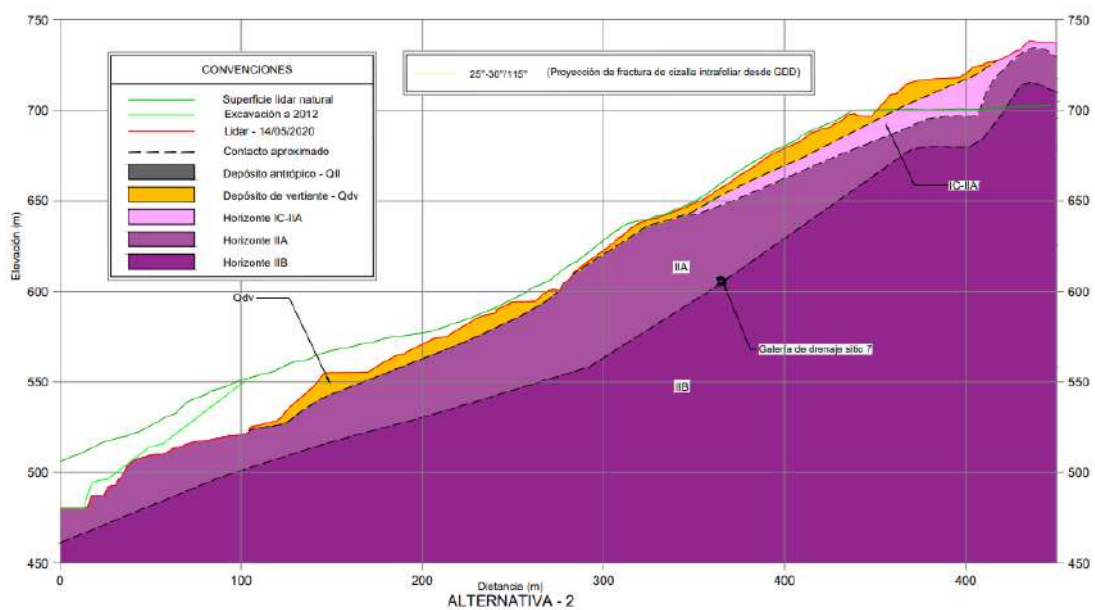


Figura 2-49 Sección de Análisis 2-2 VNMD-Sitio 7.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Tabla 2-14 Parámetros geomecánicos VNMD-Sitio 7

Material	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kPa)	Phi (°)	UCS (MPa)	GSI	mi
Qdv	18	20 +/-5	30 +/-10	-	-	-
IC-IIA	19	35 +/- 15	35 +/-10	-	-	-

Material	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kPa)	Phi (°)	UCS (MPa)	GSI	mi
IIA	24	-	-	70 +/-10	50 +/-10	28
IIB	26	-	-	90 +/-10	60 +/-10	28

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

A continuación, se presentan los resultados de estabilidad para las secciones de interés. Se procede a mostrar los resultados obtenidos, tanto para la condición estática como pseudo-estática. En la condición pseudo-estática se presenta para la componente vertical hacia arriba y hacia abajo.

En la Figura 2-50 se muestra el análisis estático para Sección 1-1, mientras que en la Figura 2-51 y Figura 2-52 se muestran los resultados obtenidos para el análisis pseudo-estático.

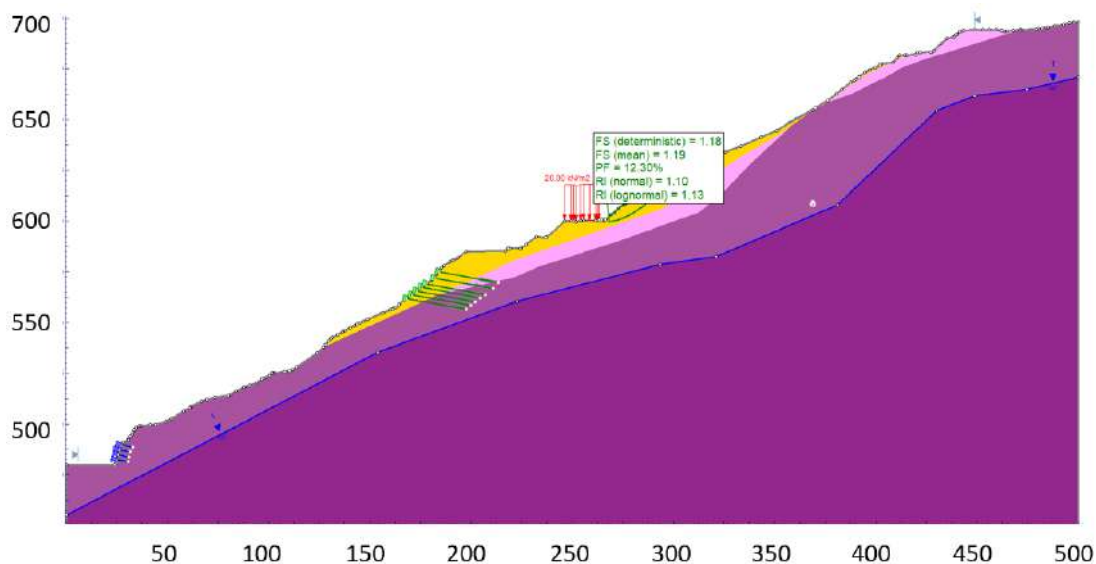


Figura 2-50 Sección 1-1. Análisis condición estática. FS (promedio)=1,19; PF=12,30%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



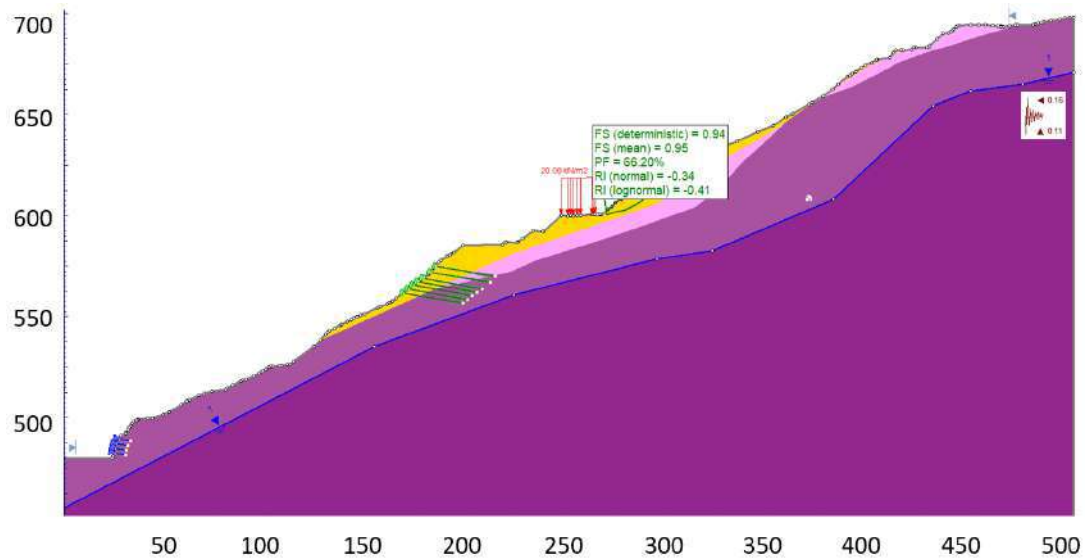


Figura 2-51 Sección 1-1. Análisis pseudo-estático. Coeficiente sísmico vertical hacia arriba con Tr de 475 años. FS (promedio)=0,95; PF=73,20%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

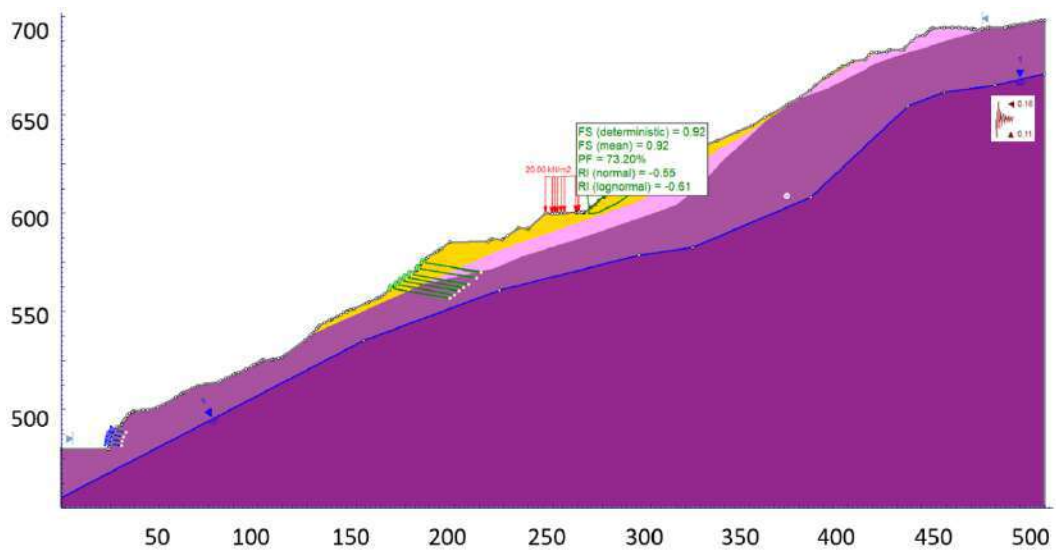


Figura 2-52 Sección 1-1. Análisis pseudo-estático. Coeficiente sísmico vertical hacia abajo con Tr de 475 años. FS (promedio)=0,92-; PF=66,20%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Dando continuidad al análisis, se procede con la evaluación de estabilidad para la sección 2-2, los cuales se muestran de la para Figura 2-53 la condición estática y en la Figura 2-54 y Figura 2-55 se muestran los resultados para la condición pseudo-estática.

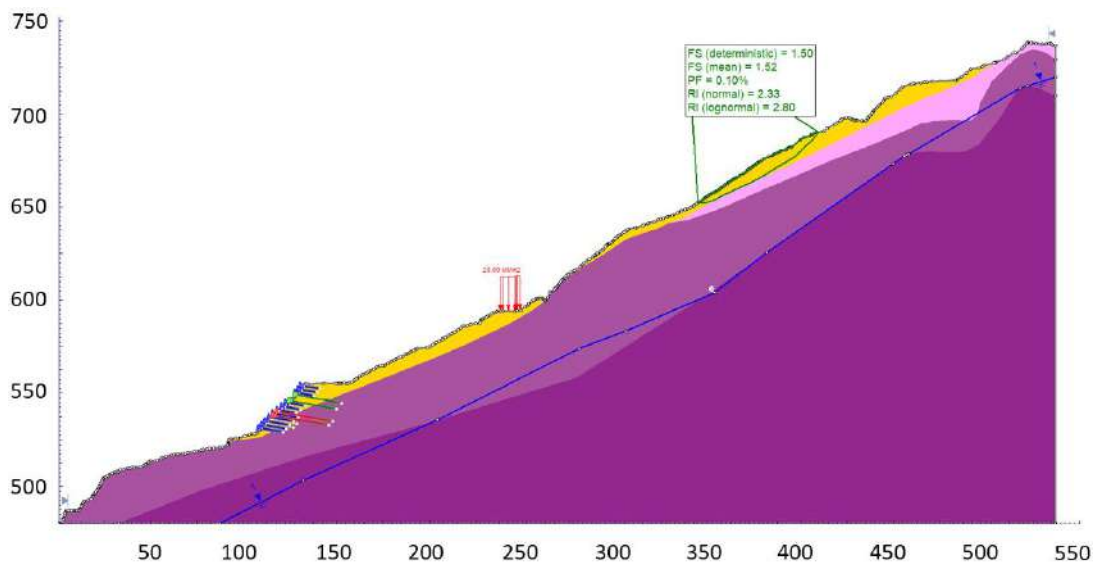


Figura 2-53 Sección 2-2. Análisis condición estática. FS (promedio)=1,52; PF=0,10%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

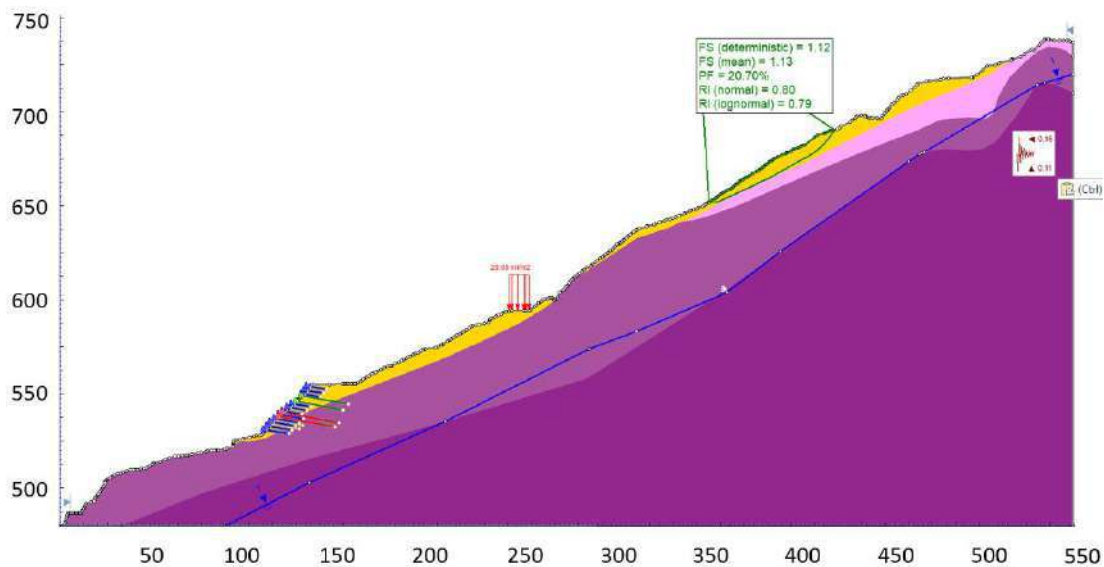


Figura 2-54 Sección 2-2. Análisis pseudo-estático con Tr de 475 años. Coeficiente sísmico vertical hacia arriba. FS (promedio)=1,13; PF=20,70%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



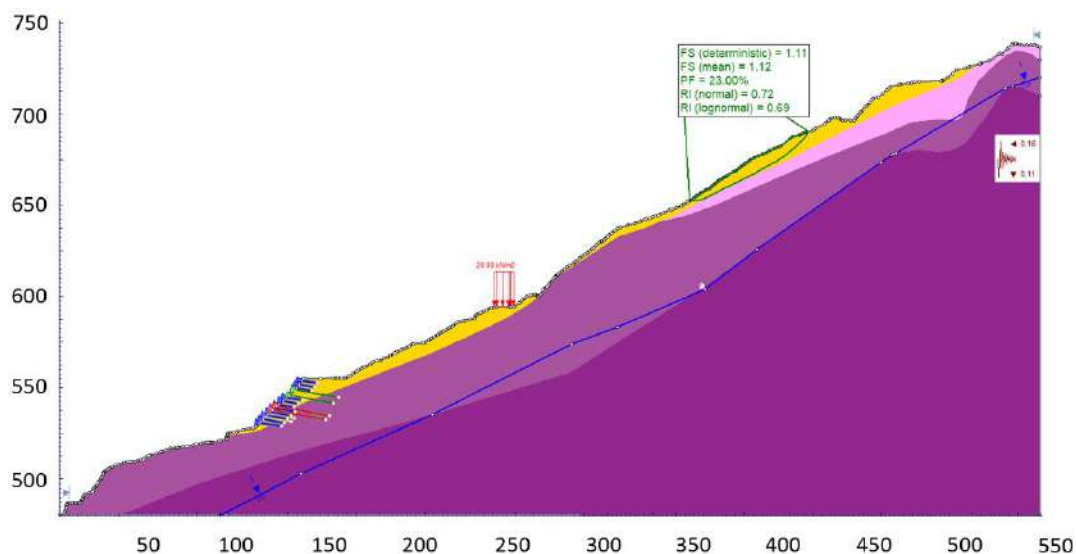


Figura 2-55 Sección 2-2. Análisis pseudo-estático con  $T_r$  de 475 años. Coeficiente sísmico vertical hacia abajo. FS (promedio)=1,12; PF=23,00%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

De acuerdo con los análisis de estabilidad realizados, se obtuvieron factores de seguridad mayores a los mínimos requeridos para la sección de análisis 2-2. Sin embargo, para la sección de análisis 1-1, no se cumplen con los factores de estabilidad mínimos requeridos. El sector donde no se cumplen con los factores de seguridad, se encuentra en la vía de acceso a las instalaciones de seguridad “Capitanes”. Para este, se están realizando los análisis de estabilidad encaminados definir medidas adicionales tendientes a reducir el riesgo de falla, es decir, aumentar los factores de seguridad hasta cumplir con los valores mínimos requeridos. Cabe anotar que se trata de una zona puntual que no compromete la subestación o base militar, y la ladera general es estable.

La Figura 2-56 y Figura 2-57 muestra la localización general del sector conocido como Sitio 7 con su área de análisis y el resultado de zonificación de amenaza por movimiento en masa obtenido.

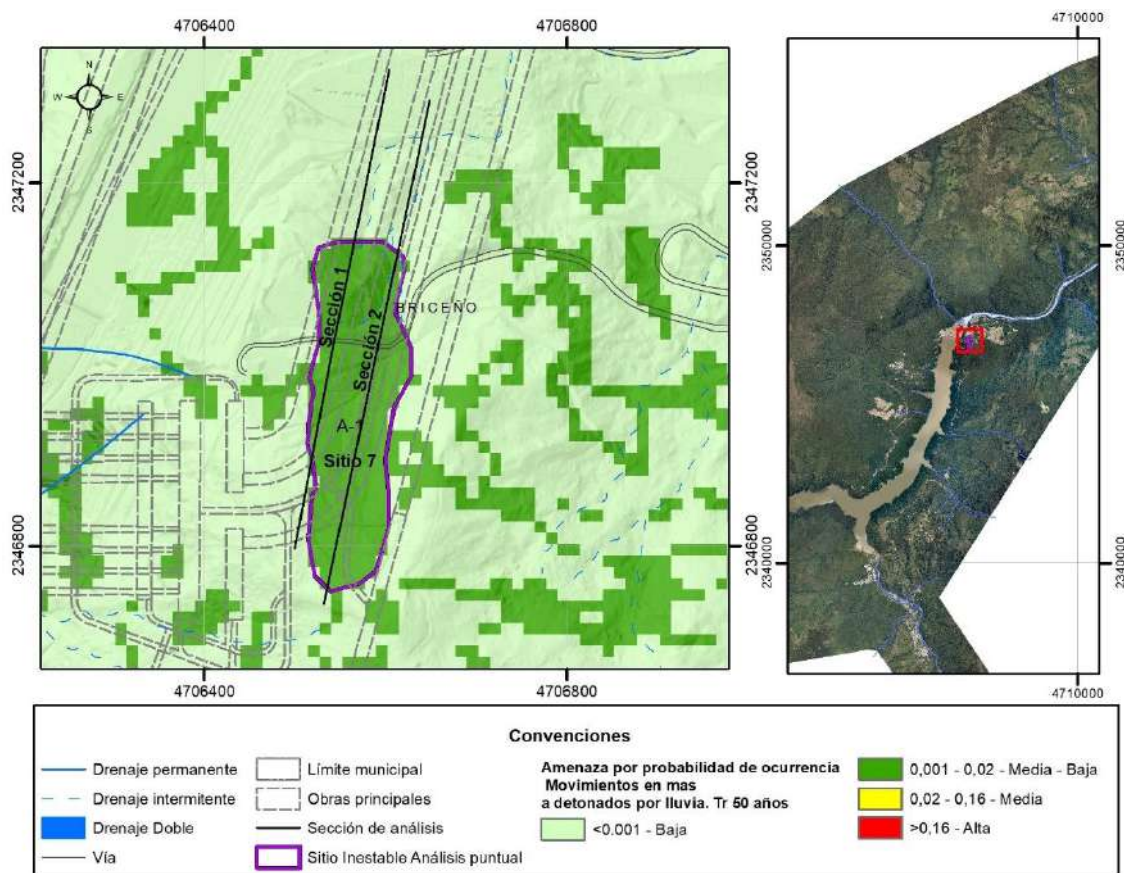


Figura 2-56 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – Sitio 7.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

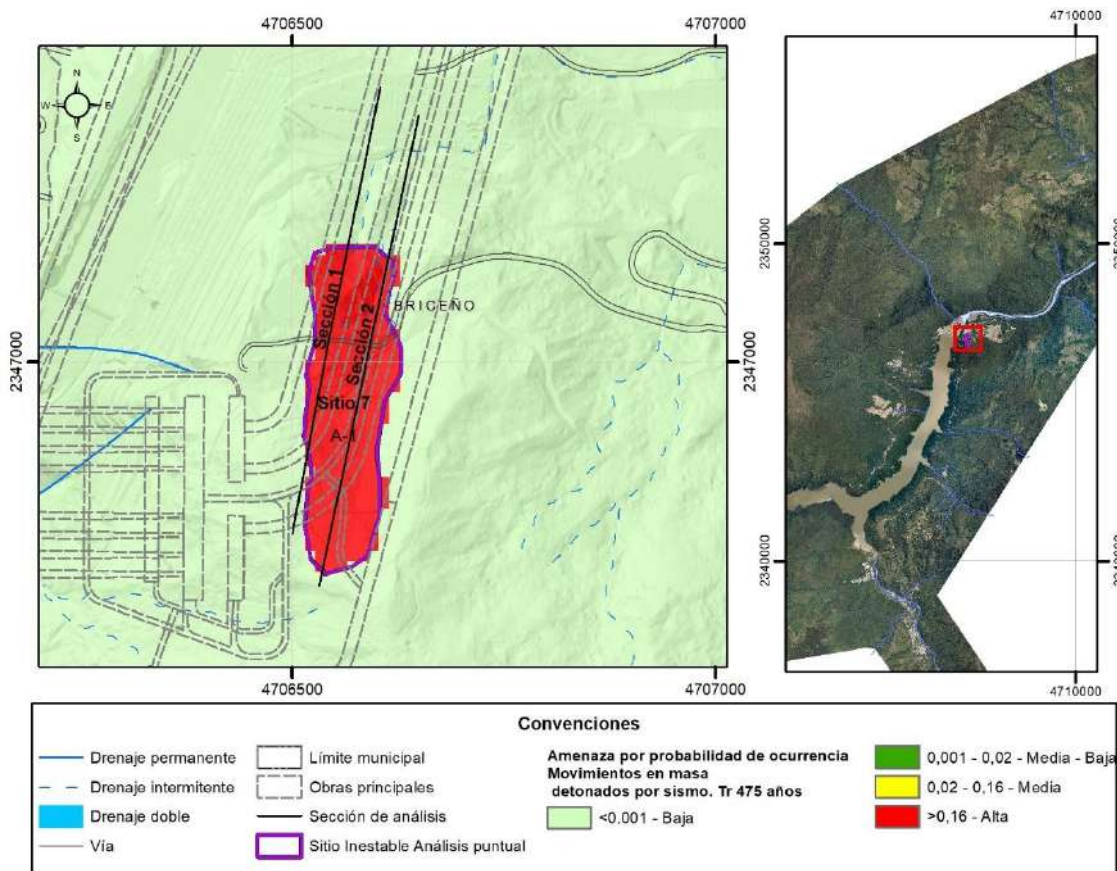


Figura 2-57 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – Sitio 7.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

#### 4) Helipuerto (Villa Luz)

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de la estabilidad del talud del helipuerto Villa Luz, el cual se encuentra ubicado sobre el km 2+550 de la vía Sustitutiva Presa – Ituango, de acuerdo con los resultados de la actualización de la amenaza sísmica del proyecto. El análisis se realizó a través de dos secciones representativas, la sección A atraviesa el deslizamiento por su parte media y se extiende hasta la vía de acceso al campamento del contratista CCCI, con una dirección norte-sur y una sección D, la cual se encuentra orientada este-oeste y atraviesa el remanente de lleno existente en la zona.

En la Figura 2-58 se muestra una planta donde se presenta la ubicación de las secciones de análisis, en la Figura 2-59 y Figura 2-60 se presentan los perfiles estratigráficos y en la Tabla 2-15 los parámetros de resistencia de los materiales involucrados en el análisis.



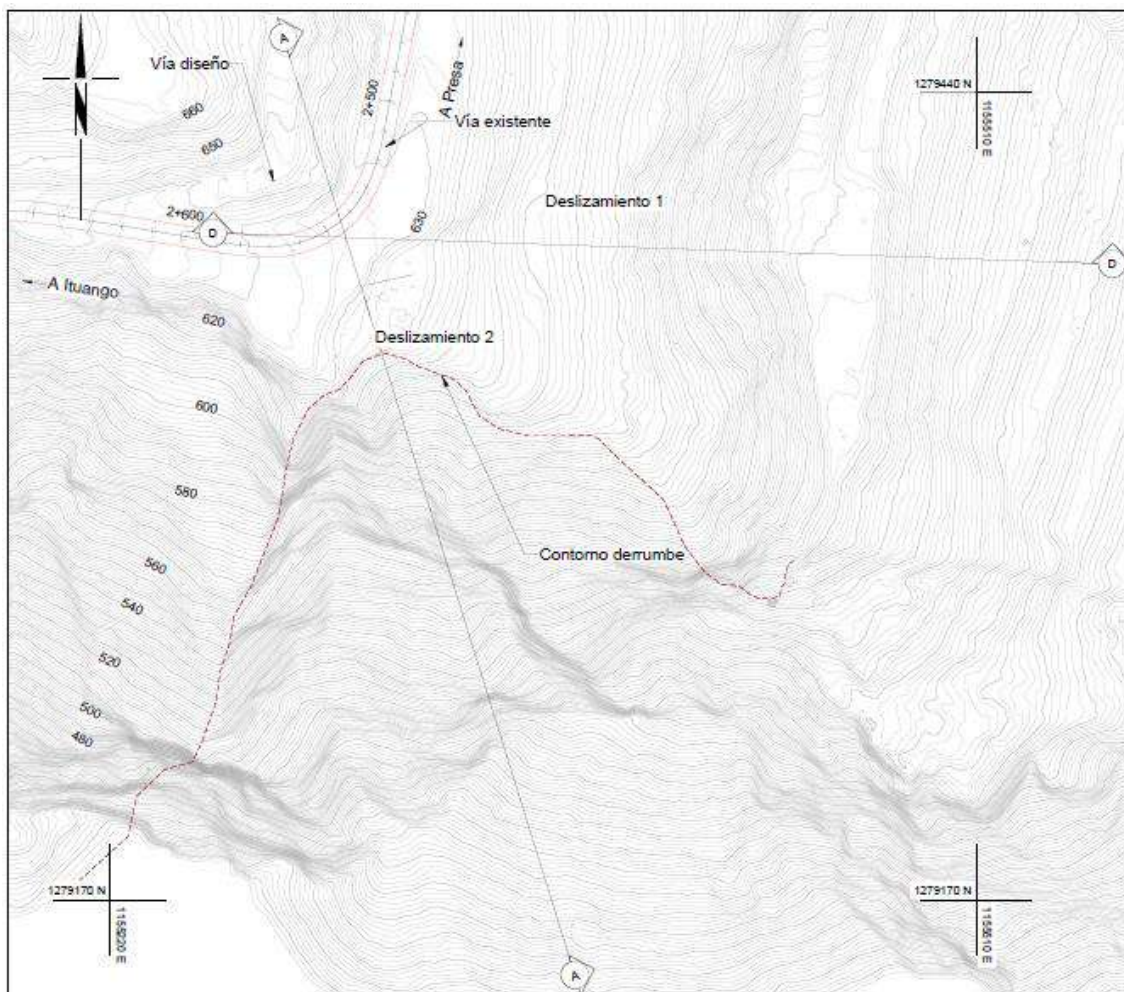


Figura 2-58 Planta helipuerto Villa Luz, ubicación de secciones de análisis.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

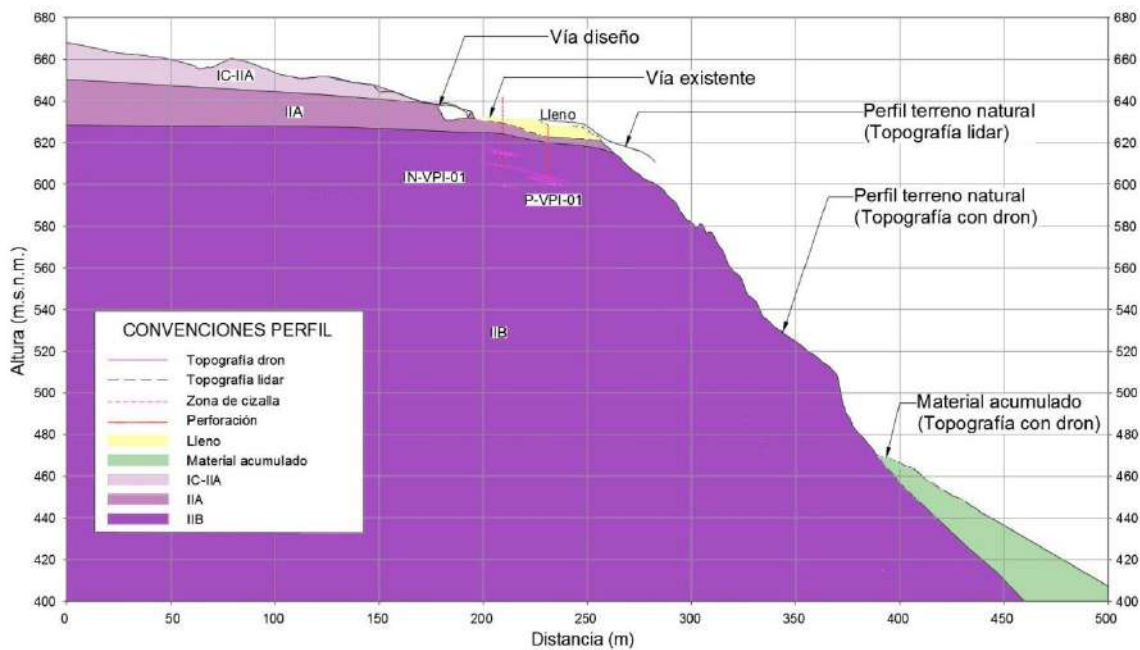


Figura 2-59 Perfil estratigráfico sección A de análisis.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

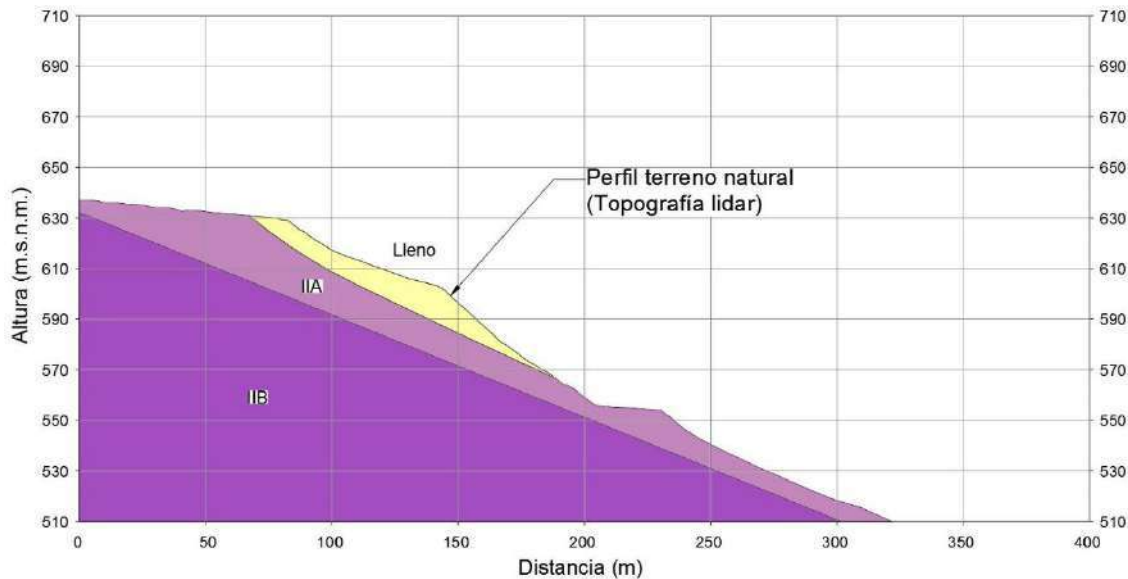


Figura 2-60 Perfil estratigráfico sección D de análisis.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Tabla 2-15 Parámetros de resistencia de los materiales involucrados en el análisis.

Material	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Criterio	Cohesión (kPa)	Phi (°)	UCS (MPa)	GSI	mi
IC-IIA	19	Mohr-	35 +/-7	35 +/-5	-	-	-

Material	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Criterio	Cohesión (kPa)	Phi (°)	UCS (MPa)	GSI	mi
		Coulomb					
IIA	24	Hoek-Brown	-	-	70 +/-10	50 +/-10	28
IIB	26	Hoek-Brown	-	-	90 +/-10	70 +/-10	28
QII	20	Mohr-Coulomb	15 +/-2	37 +/-5	-	-	

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Para este talud se realiza el análisis en condiciones pseudo-estáticas para sismos con periodos de retorno de 475 y 10.000 años, teniendo en cuenta los coeficientes de aceleración de horizontal para cada periodo de retorno.

El coeficiente de aceleración horizontal para un sismo de 475 años de periodo de retorno se calculó como:  $K_{ST} = 0,8 * PGA * I * Fa = 0,14$ , siendo  $PGA = 0,17$ ,  $I = 1$ ,  $Fa = 1$ , mientras que para el coeficiente de aceleración vertical se utiliza 0,7 veces el coeficiente horizontal, es decir  $K_{ST\ vertical} = 0,10$ .

Por otra parte, para el coeficiente de aceleración horizontal con un sismo de 10.000 años de periodo de retorno se utiliza  $Ah = 0,5 * PGA = 0,30$ , siendo  $PGA = 0,6$ , mientras que para el coeficiente de aceleración vertical se utiliza 0,77 veces el coeficiente horizontal, es decir  $Av = 0,23$ . Cabe resaltar que se presentan los análisis con el coeficiente de aceleración vertical hacia arriba y hacia abajo, tomando como factor de seguridad el más desfavorable de ambos. Los resultados se muestran de la Figura 2-61 a la Figura 2-66.

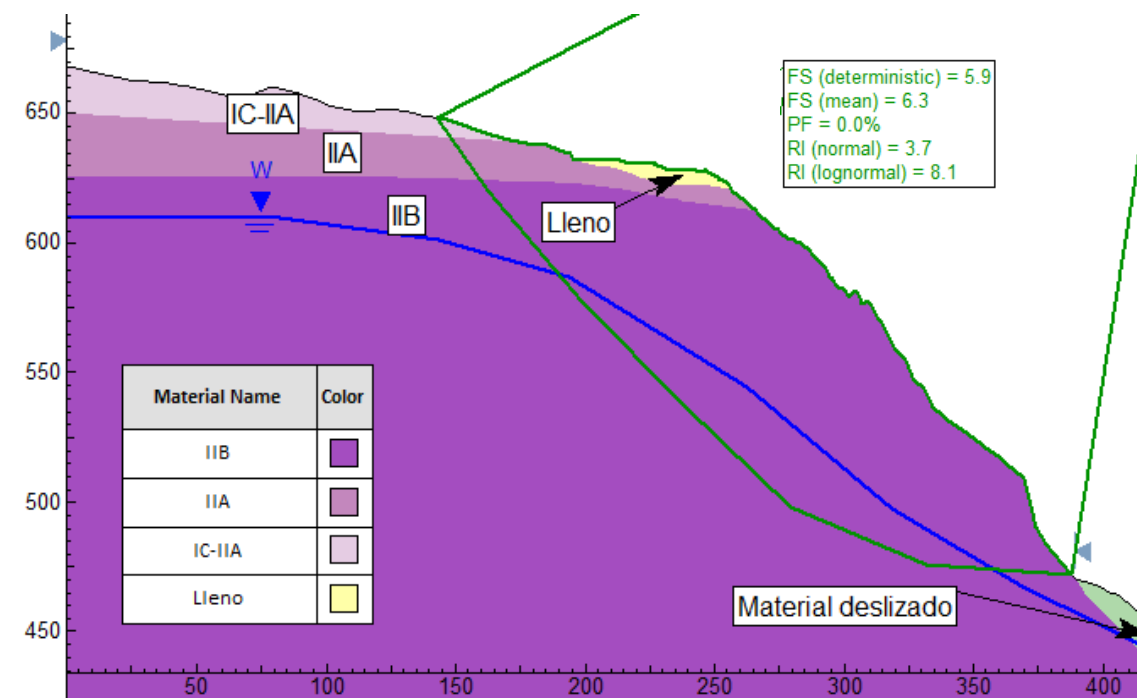




Figura 2-61 Análisis de estabilidad estático sección A – FS=6,3 PF=0,0%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

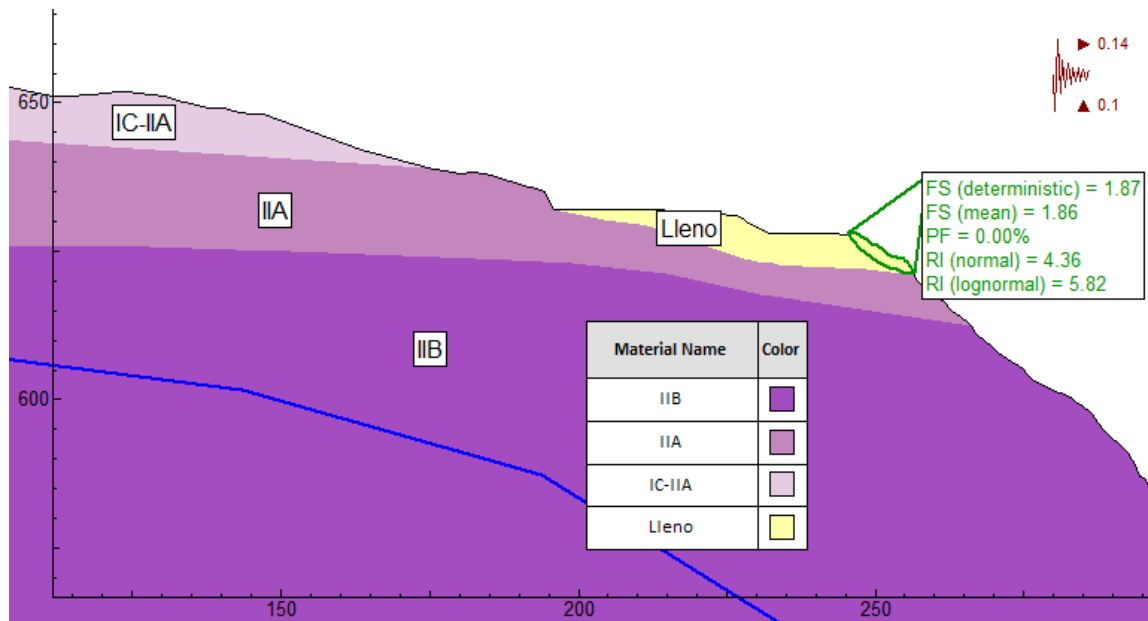


Figura 2-62 Análisis de estabilidad pseudo-estático para un Tr=475 años, sección A, Av hacia arriba – FS=1,86 y PF=0,0%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

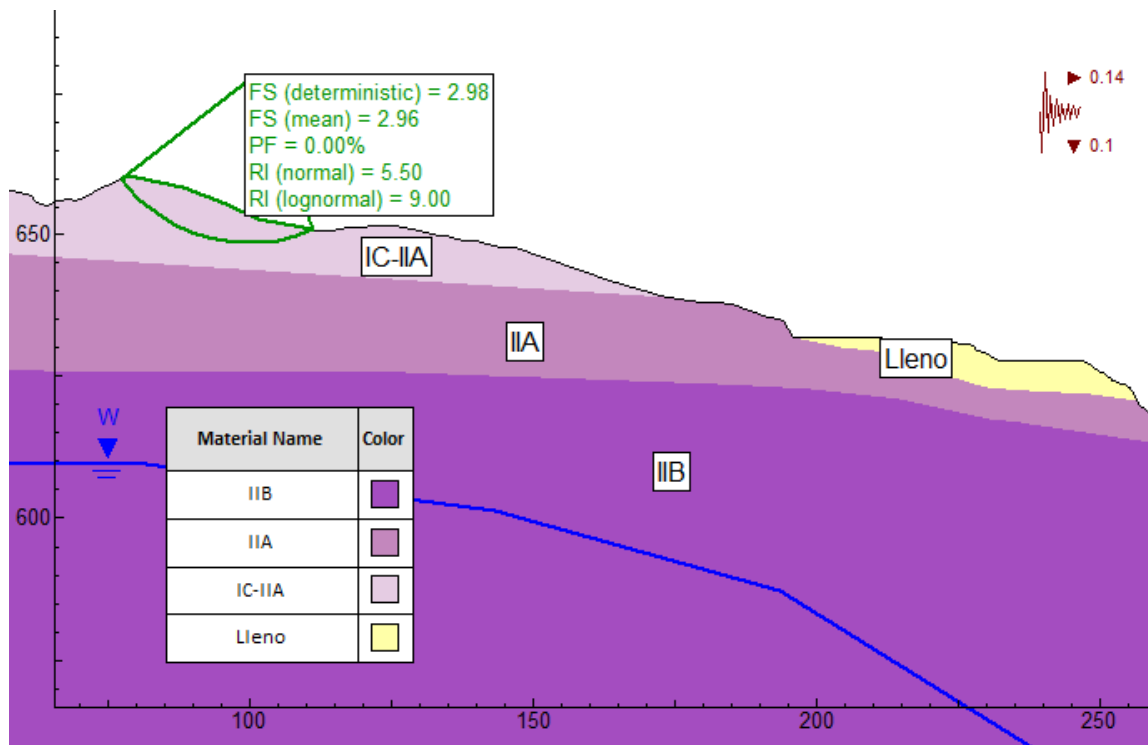


Figura 2-63 Análisis de estabilidad pseudo-estático para un  $T_r=475$  años, sección A, Av hacia abajo –  $FS=2,96$  y  $PF=0,0\%$ .

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Los factores de seguridad tanto para el escenario estático, como pseudo-estático, en lados sección de análisis A, cumplen con los mínimos requeridos.

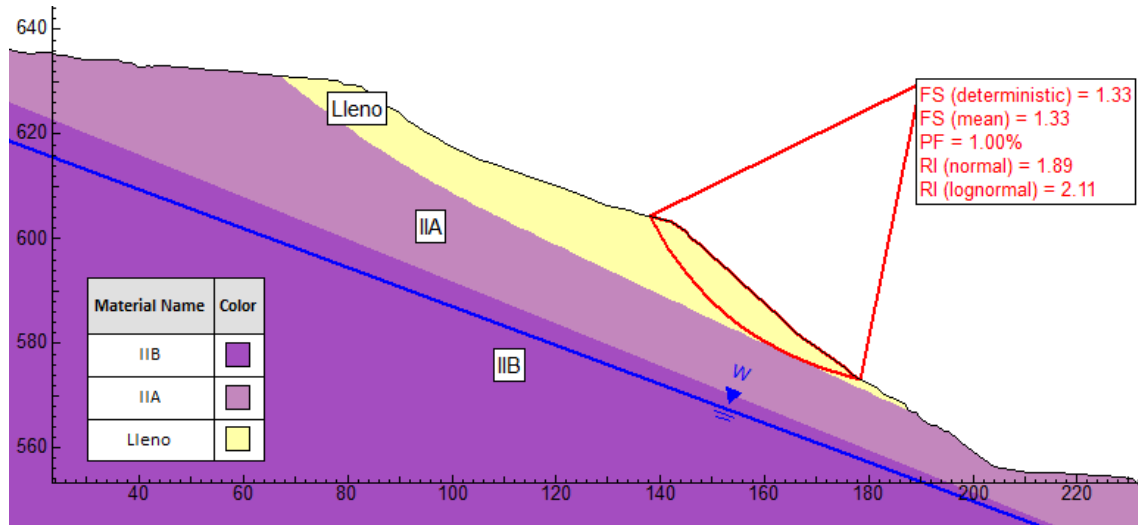


Figura 2-64 Análisis de estabilidad estático sección D –  $FS=1,3$  y  $PF=1,0\%$ .

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

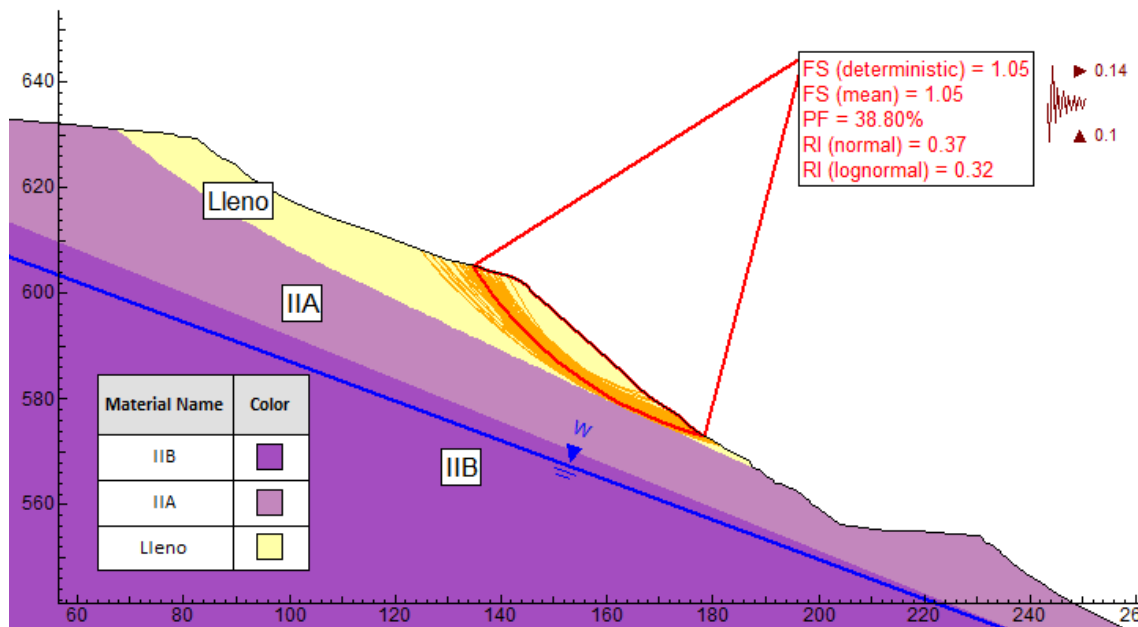


Figura 2-65 Análisis de estabilidad pseudo-estático para un  $T_r=475$  años, sección D, Av hacia arriba –  $FS=1,05$  y  $PF=38,8\%$ .

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

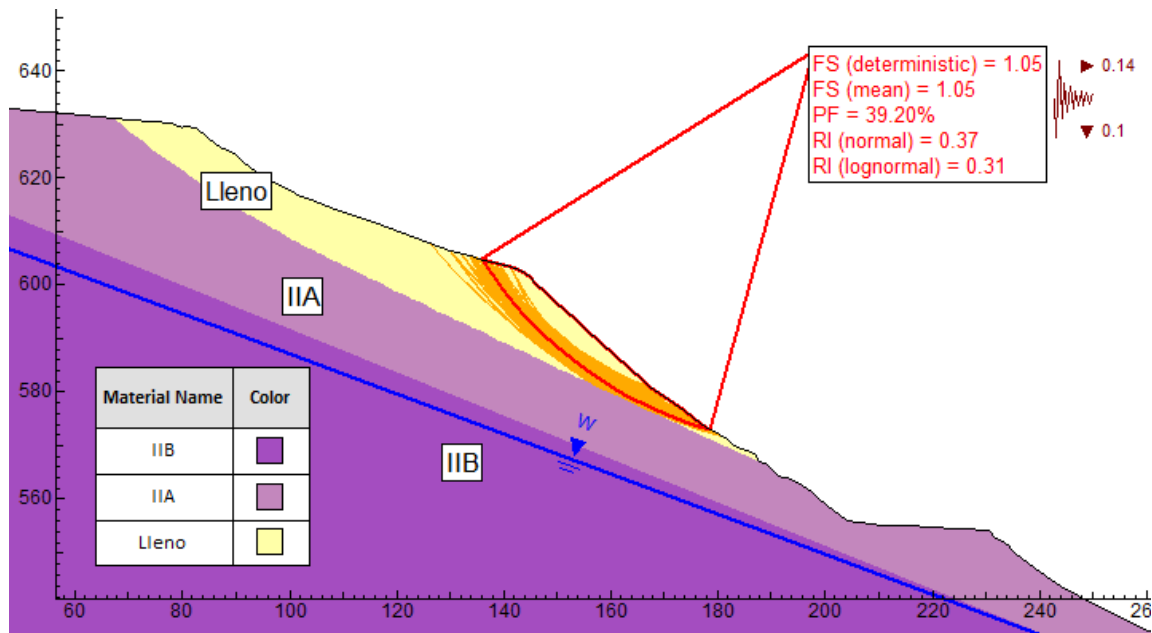


Figura 2-66 Análisis de estabilidad pseudo-estático para un  $T_r=475$  años sección D, Av hacia abajo –  $FS=1,05$  y  $PF=39,2\%$ .

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Respecto a la sección de análisis, los factores de seguridad tanto para el escenario estático, como pseudo-estático, no cumplen los valores mínimos requeridos por lo que se estudiarán las alternativas encaminadas a mejorar las condiciones de estabilidad del sector.

La Figura 2-67 y Figura 2-68 muestra la localización general del talud Villa Luz (Helipuerto) con sus áreas de análisis y el resultado de zonificación de amenaza por movimiento en masa obtenido. El área A-3 fue evaluada de manera cualitativa.

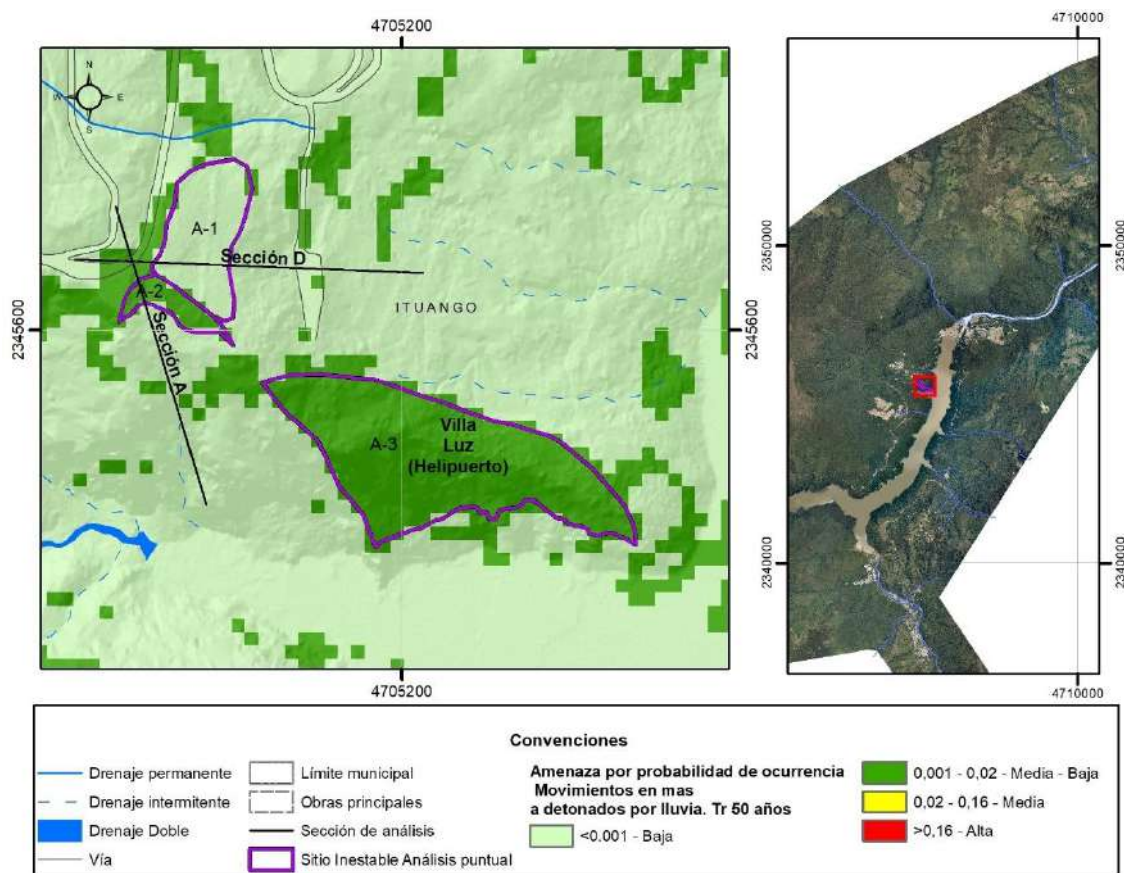


Figura 2-67 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – Villa Luz (Helipuerto).

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

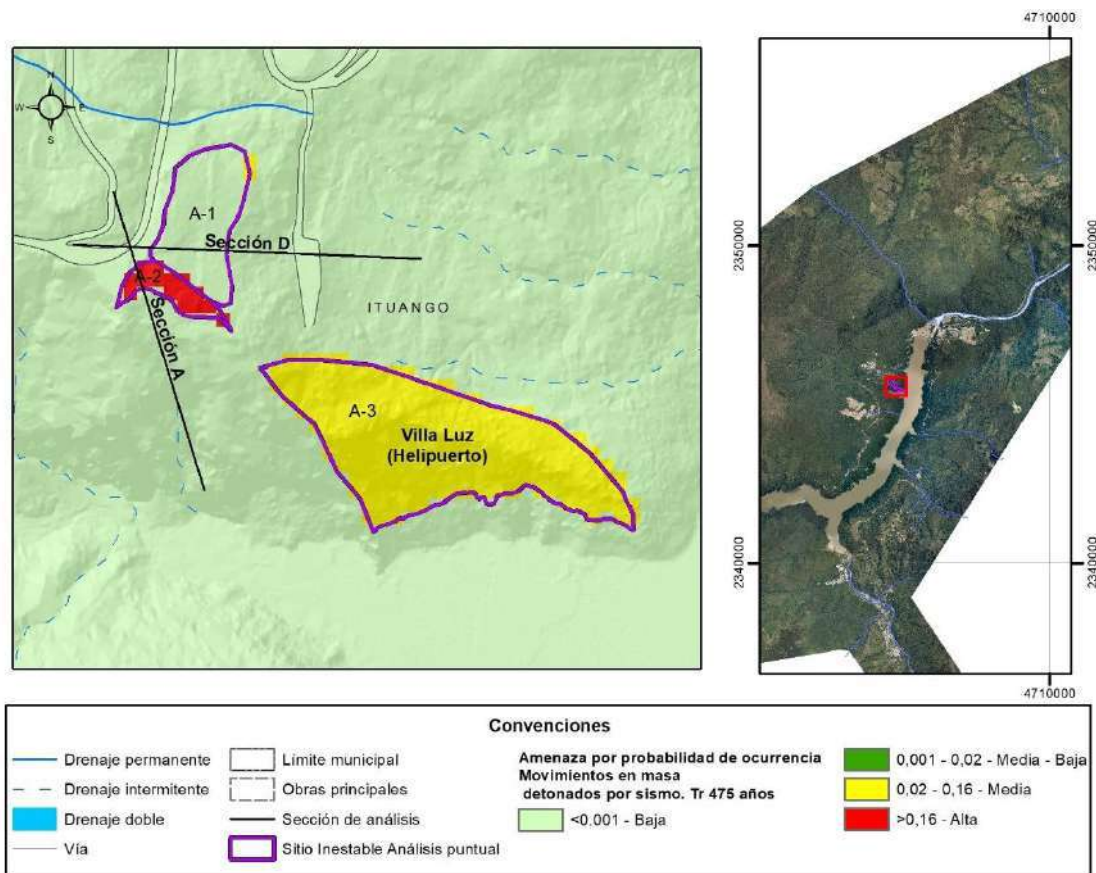


Figura 2-68 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – Villa Luz (Helipuerto).

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

#### 5) km 0+900

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de las condiciones de estabilidad del sector denominado como km 0+900, el cual se encuentra ubicado sobre la margen izquierda en el km 0+900 de la vía Sustitutiva Presa – Ituango, considerando los resultados de la actualización del estudio de amenaza sísmica del proyecto.

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de las condiciones de estabilidad del sector denominado como km 0+900, el cual se encuentra ubicado sobre la margen izquierda en el km 0+900 de la vía Sustitutiva Presa – Ituango, considerando los resultados de la actualización del estudio de amenaza sísmica del proyecto.

El sitio se analizó a través de tres secciones representativas, que han mostrado posible movimiento de acuerdo con la instrumentación y el monitoreo satelital. Los perfiles geológicos se realizaron con base en la instrumentación ejecutada en la vía sustitutiva Presa – Ituango, a la altura del tramo comprendido entre las abscisas km 0+900 a km 1+250, correspondientes a las perforaciones IN-SPI-08, IN-SPI-09, IN-SPI-09-02, IN-SPI-10, IN-SPI-11, IN-SPI-12, PTA-VPI-01 y

PTA-VPI-02, las cuales fueron realizadas con el fin de instalar instrumentación profunda para monitorear el comportamiento del movimiento registrado en el sector conocido como km 0+900.

En la Figura 2-69 se muestra una planta donde se presenta la ubicación de las secciones de análisis, en la Figura 2-70, Figura 2-71 y Figura 2-72 se presentan los perfiles geológicos, y en la Tabla 2-16 los parámetros de resistencia de los materiales involucrados en el análisis.

Los parámetros de los materiales involucrados en el análisis que conforman la ladera objeto de análisis en el sector del km 0+900, fueron tomados inicialmente del informe de la contingencia, pero posteriormente se realizó un proceso de retroanálisis y calibración de estos buscando simular el comportamiento registrado por la instrumentación profunda disponible en el sitio (inclinómetros) y, así mismo, teniendo en cuenta el análisis geológico de las estructuras y los materiales recuperados de las perforaciones; llegando finalmente a los parámetros e índices de variación que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2-16 Parámetros materiales existentes en el sector del km 0+900.

Material	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Criterio	Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	Phi	UCS (MN/m <sup>2</sup> )	GSI
Sup. Falla (ET)	18	Undrained (Phi=0)	150+/-5			
Sup. Falla (EE)	18	Mohr-Coulomb	15+/-5	25+/-5		
Qdv	20	Mohr-Coulomb	20+/-5	40+/-5		
IC-IIA	19	Mohr-Coulomb	35+/-14	35 +/-10		
Zona de debilidad (transición Qdv-IIA)	19	Hoek-Brown			50	25
IIA	24	Hoek-Brown			70+/-10	40+/-10
IIB	27	Hoek-Brown			90+/-10	60+/-10

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



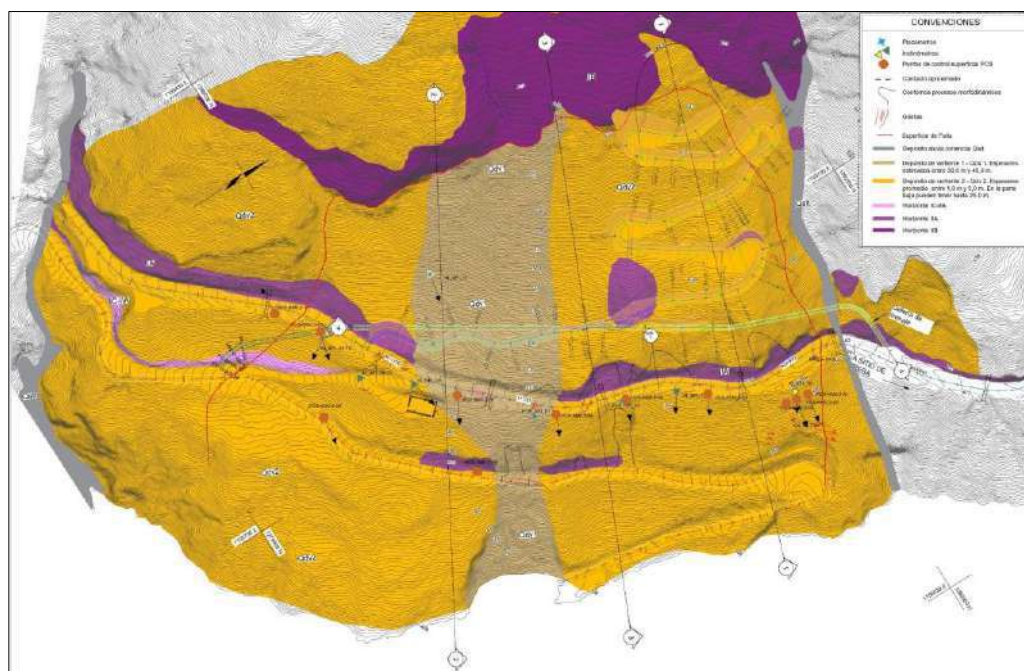


Figura 2-69 Planta con unidades geológicas en el km 0+900, ubicación de secciones de análisis.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

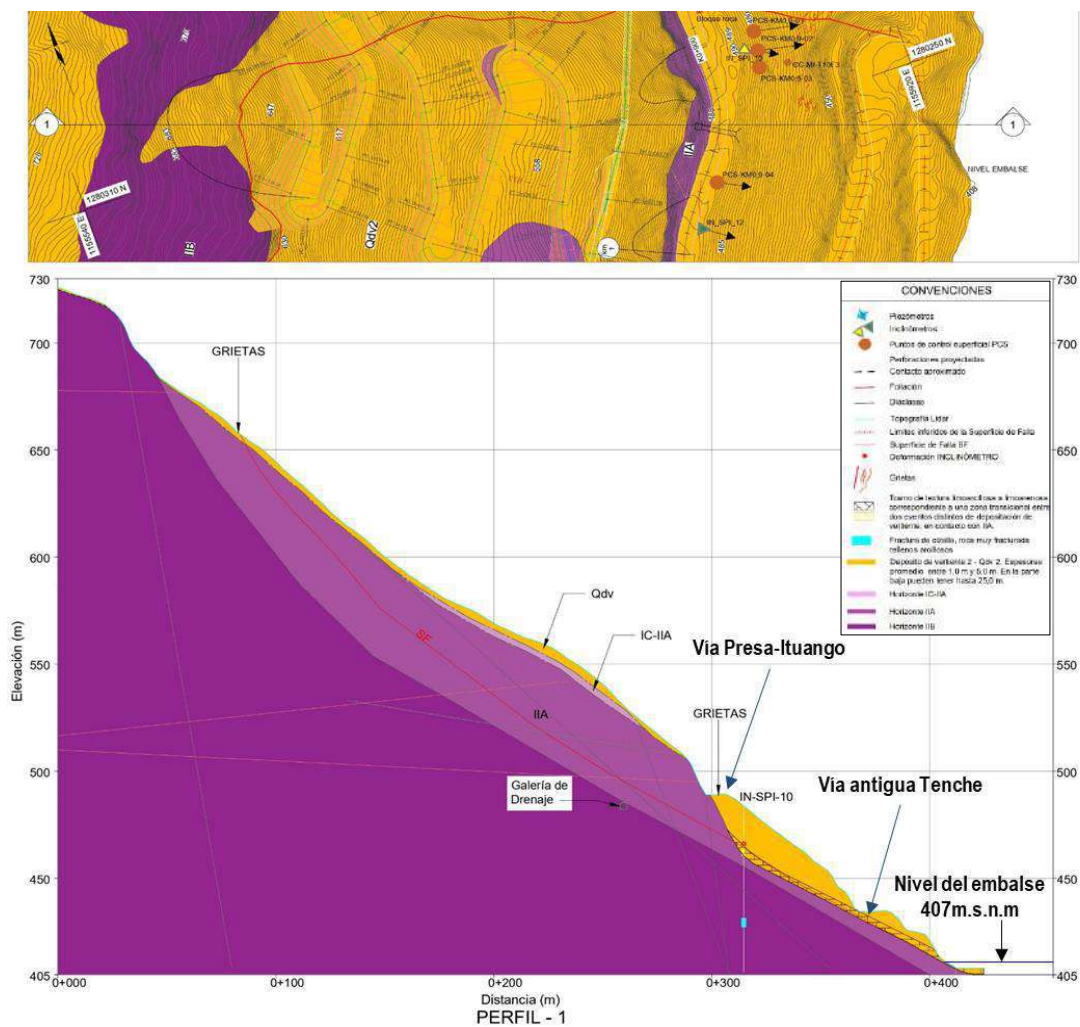


Figura 2-70 Perfil geológico proyectado Sector Norte (Perfil 1).

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

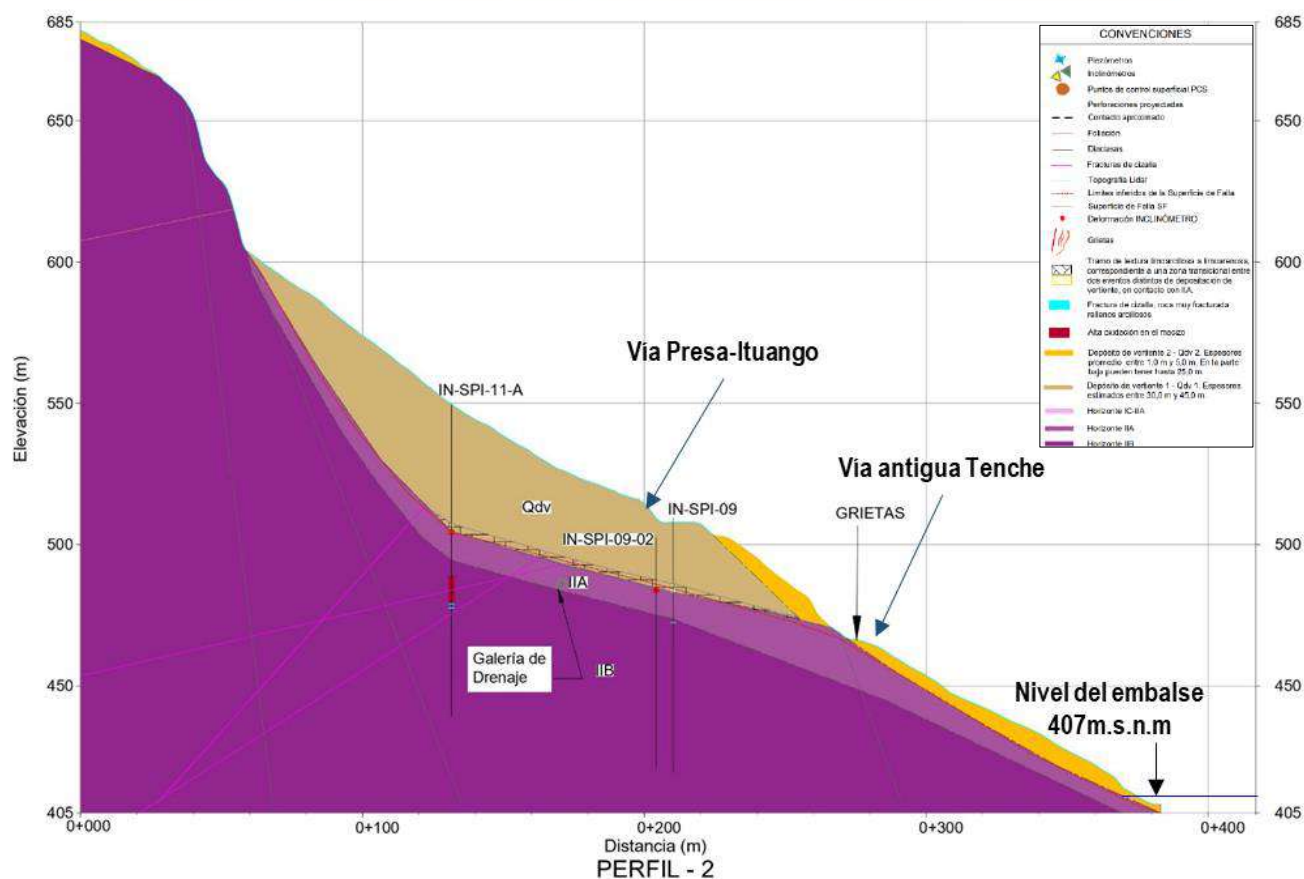
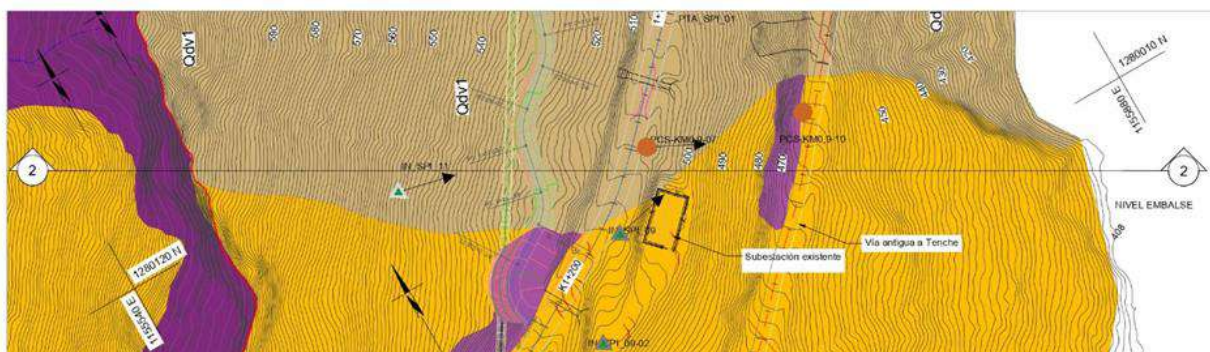


Figura 2-71 Perfil geológico proyectado Sector Sur (Perfil 2).  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



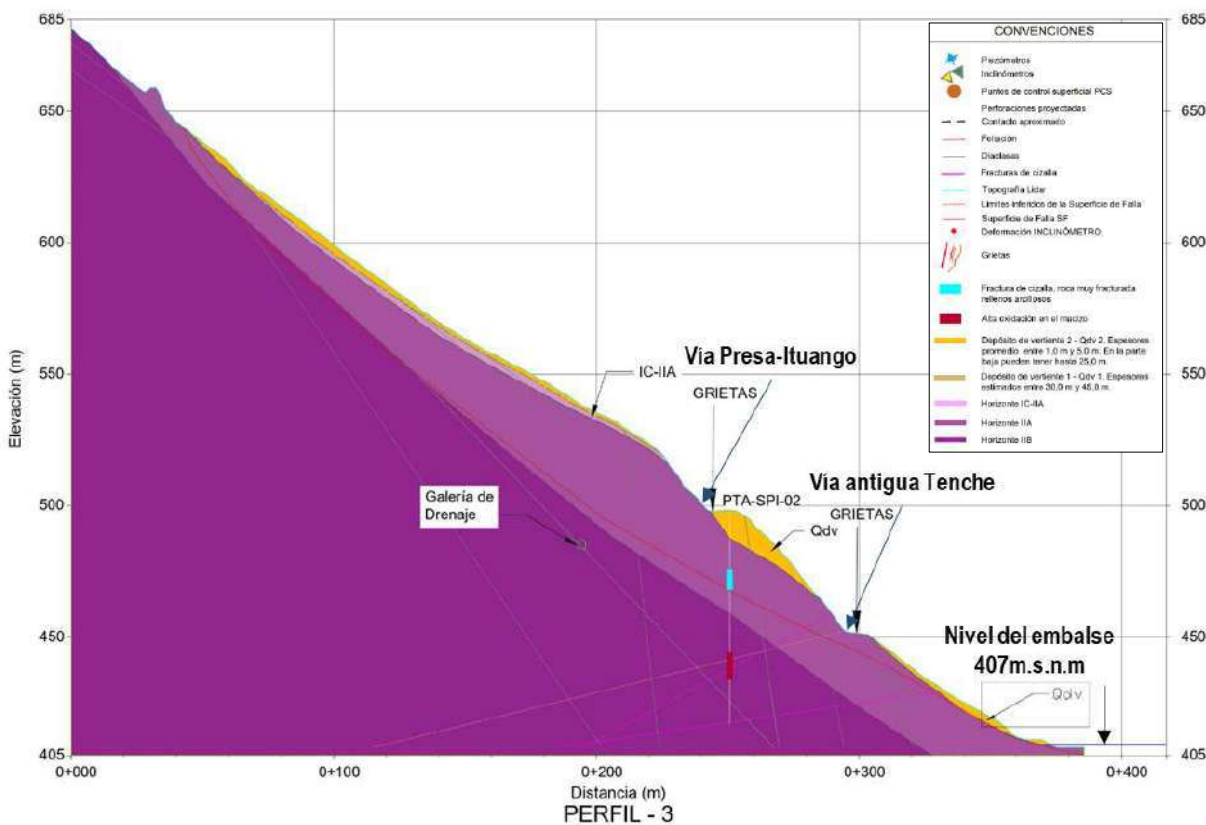


Figura 2-72 Perfil geológico proyectado Sector Central (Perfil 3).

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

En la Figura 2-73, se representan los resultados obtenidos en condición estática para la condición inicial de la sección A y, análogamente, en la Figura 2-74 y Figura 2-75 se presentan los resultados obtenidos para la sección B y C respectivamente. Del análisis realizado se indica que, para el caso estático en la condición inicial de calibración de las zonas Norte, Sur y Central del km 0+900, presentan en general superficies de falla críticas que involucra el macizo rocoso (Horizonte IIA) y parte del coluvión (Qdv); en el caso del sector norte, por ejemplo, con un factor de seguridad de 1,01 y una probabilidad de falla equivalente a 49,20%, es decir, la ladera en su condición inicial representa la condición de estabilidad actual, representando el movimiento registrado por los inclinómetros.

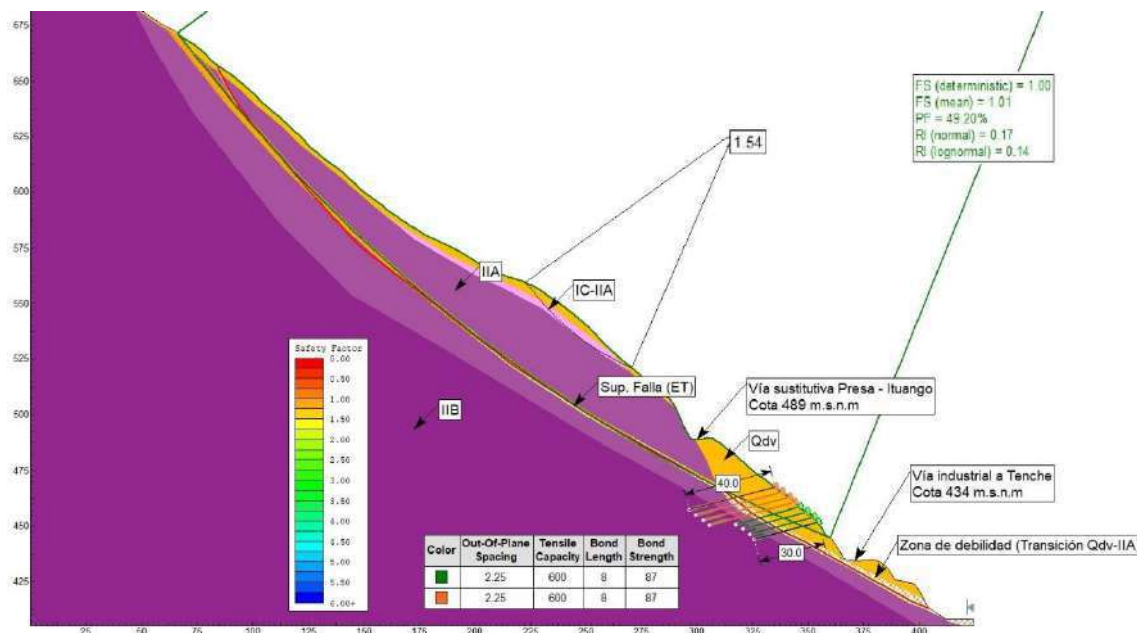


Figura 2-73 Resultados análisis de estabilidad condición actual (calibración) Sección A (Perfil 1 – Zona Norte), Condición estática – FS (medio) = 1,01 y PF = 49,20%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

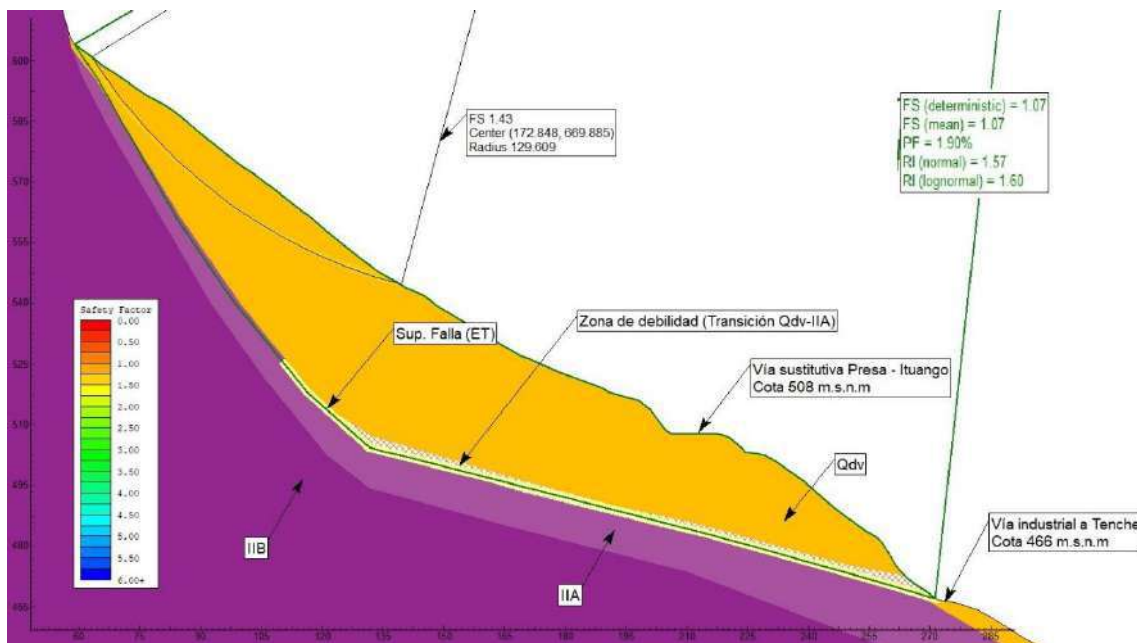


Figura 2-74 Resultados análisis de estabilidad condición actual (calibración) Sección B (Perfil 2 – Zona Sur), Condición estática – FS (medio) = 1,07 y PF = 1,90%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

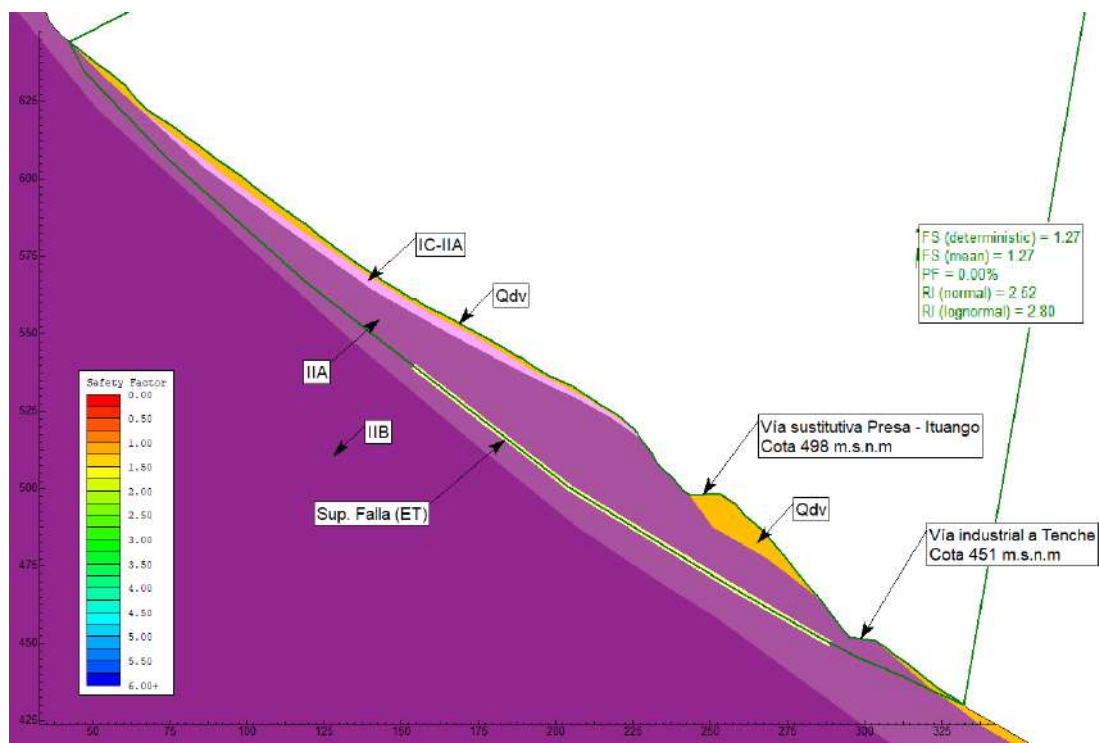


Figura 2-75 Resultados análisis de estabilidad condición actual (calibración) Sección C (Perfil 3 – Zona Central), Condición estática – FS (medio) = 1,27 y PF = 5,9E-03%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

En la Figura 2-76 se representan los resultados obtenidos para un escenario con tratamientos de estabilización en condición estática para la sección 1 y, análogamente, en la Figura 2-77 y Figura 2-78 se presentan los resultados obtenidos para la sección 2 y 3 respectivamente. El análisis realizado para el escenario con tratamientos, indica que para el caso estático la superficie de falla crítica en el sector norte presenta un factor de seguridad de 1,6 y una probabilidad de falla equivalente a 3,3E-05%, es decir, se tiene una condición estable equivalente a un factor de seguridad que satisface los criterios de diseño.



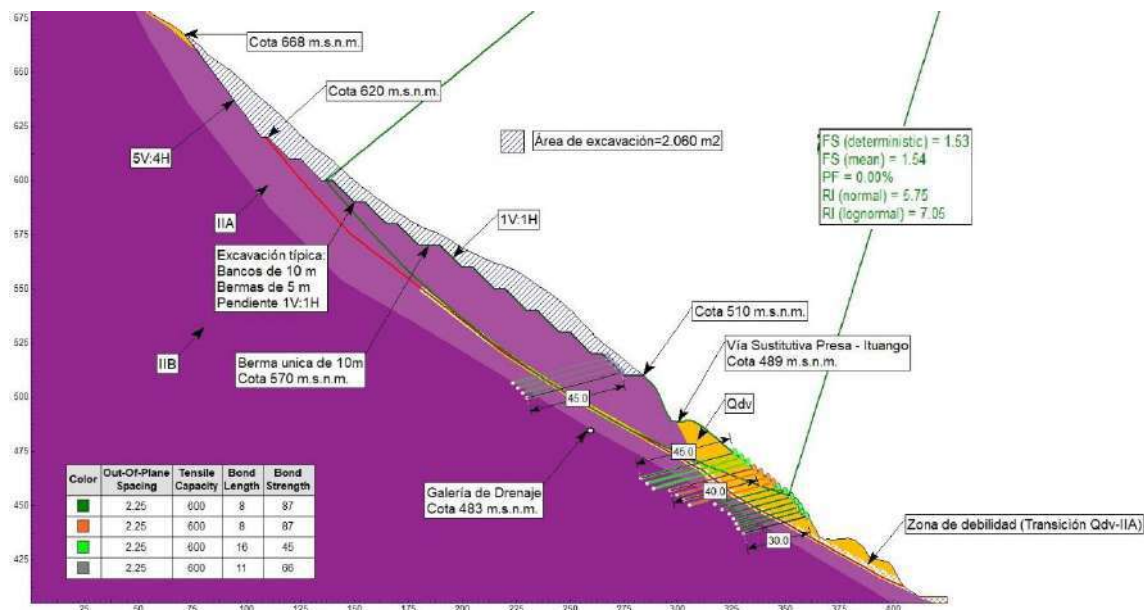


Figura 2-76 Resultados análisis de estabilidad Sección A (Perfil 1 – Zona Norte) con tratamientos, condición estática – FS (medio)=1,54 y PF=4,5E-09%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

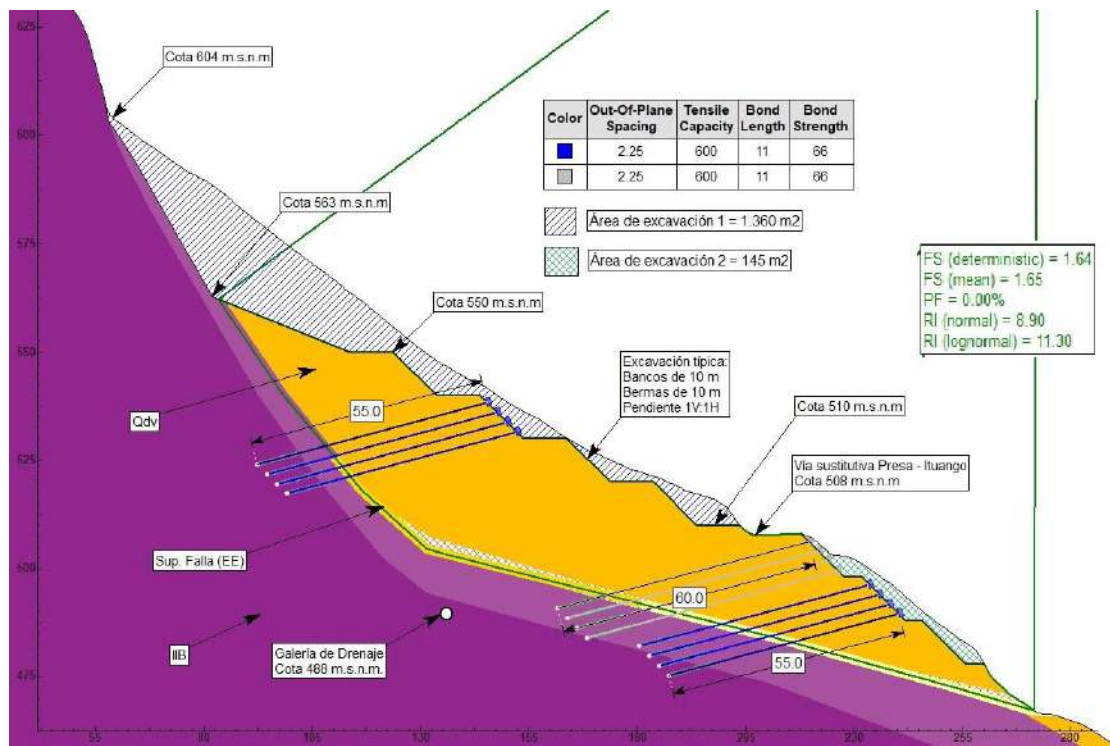


Figura 2-77 Resultados análisis de estabilidad Sección B (Perfil 2 – Zona Sur) con tratamientos, condición estática – FS (medio)=1,65 y PF=2,8E-19%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

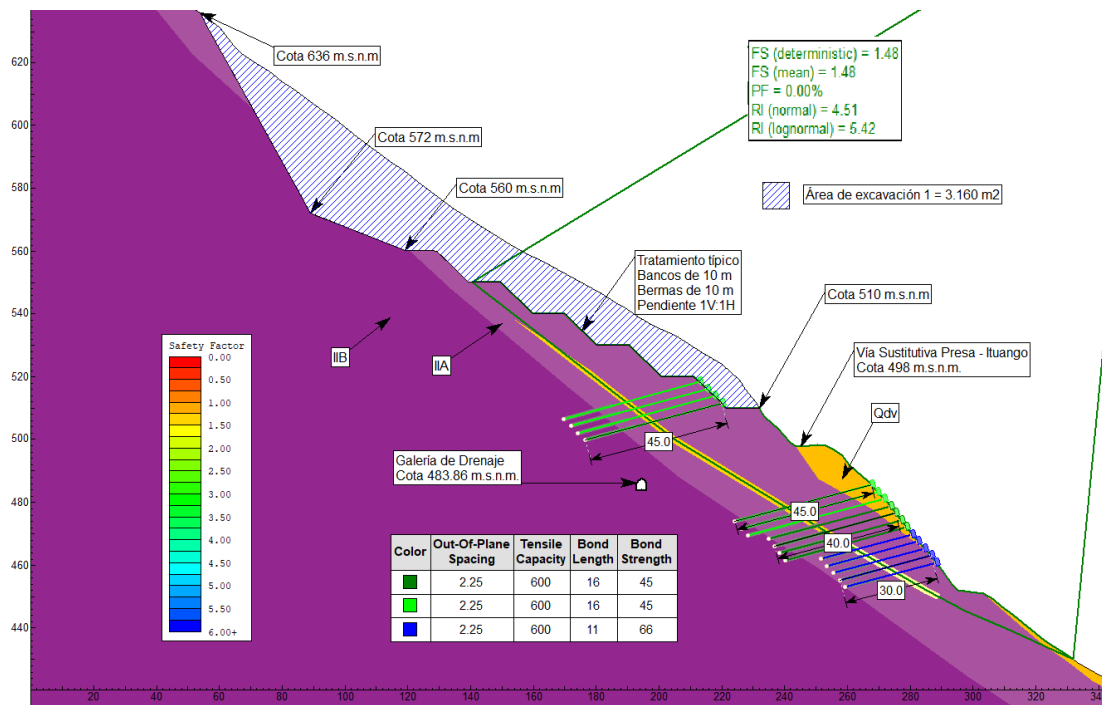


Figura 2-78 Resultados análisis de estabilidad Sección C (Perfil 3 – Zona Central) con tratamientos, condición estática – FS (medio)=1,48 y PF=3,2E-06%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

En la Figura 2-79 se representan los resultados obtenidos escenario con tratamientos de estabilización en condición pseudo-estática para la sección 1 y, análogamente, en la Figura 2-80 y Figura 2-81 se presentan los resultados obtenidos para la sección 2 y 3 respectivamente. El análisis realizado para el escenario con tratamientos, indica que para el caso pseudo-estático la superficie de falla crítica presenta un factor de seguridad de 1,6 y una probabilidad de falla equivalente a 3,3E-05%, es decir, se tiene una condición estable equivalente a un factor de seguridad que satisface los criterios de diseño.

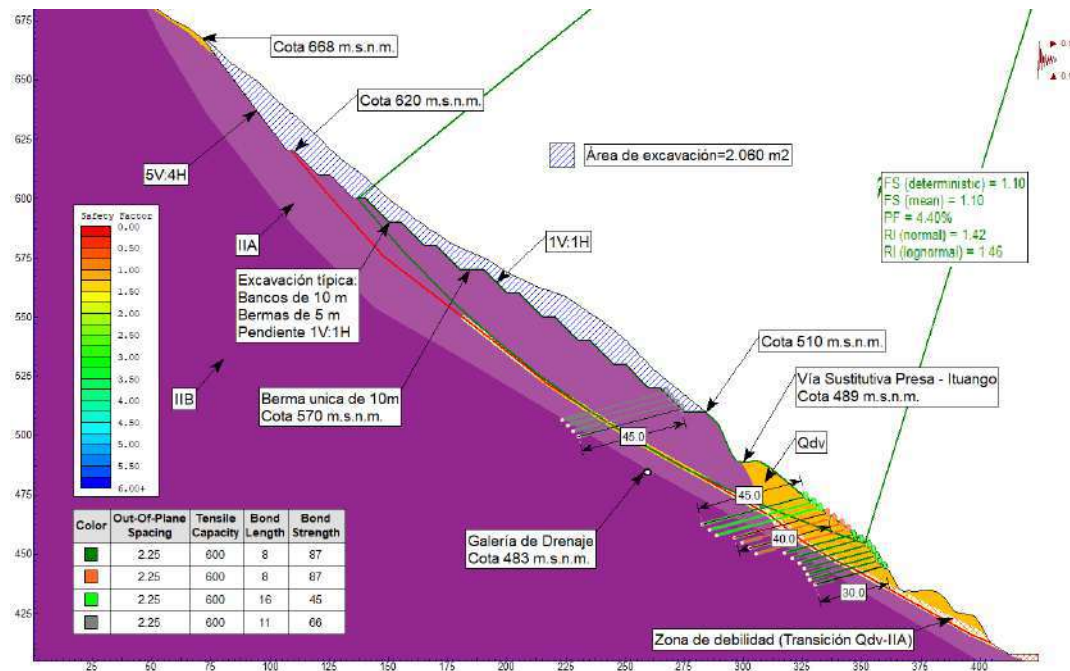


Figura 2-79 Resultados análisis de estabilidad Sección A (Perfil 1 – Zona Norte) con tratamientos, condición pseudo-estática – FS (medio)=1,1 y PF=4,4%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

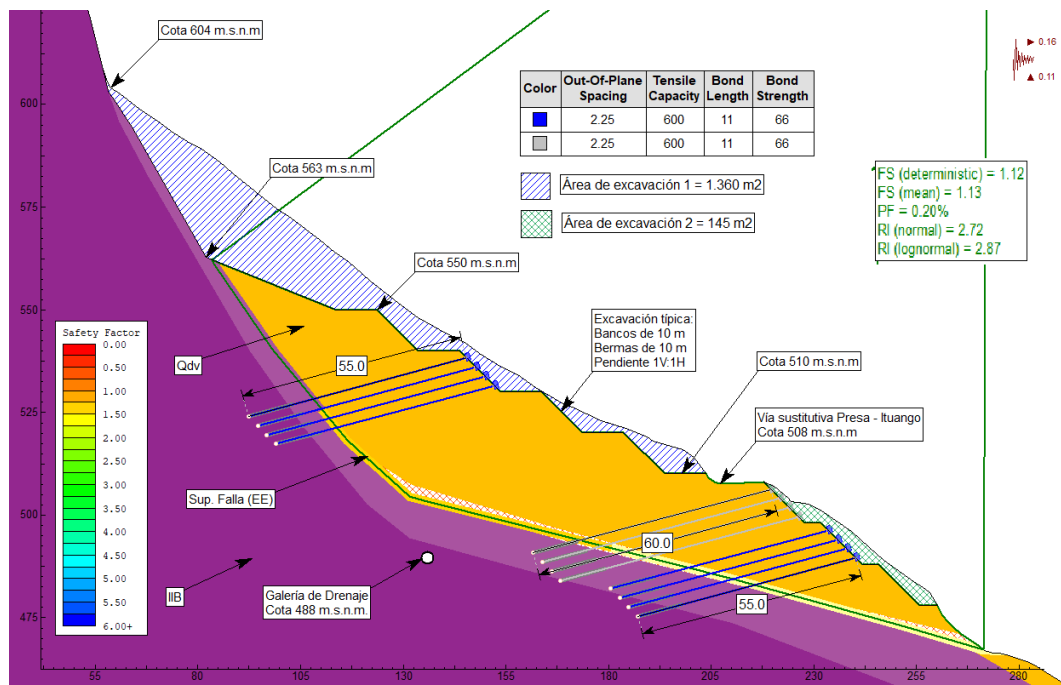


Figura 2-80 Resultados análisis de estabilidad Sección B (Perfil 2 – Zona Sur) con tratamientos, condición pseudo-estática – FS (medio)=1,13 y PF=0,2%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

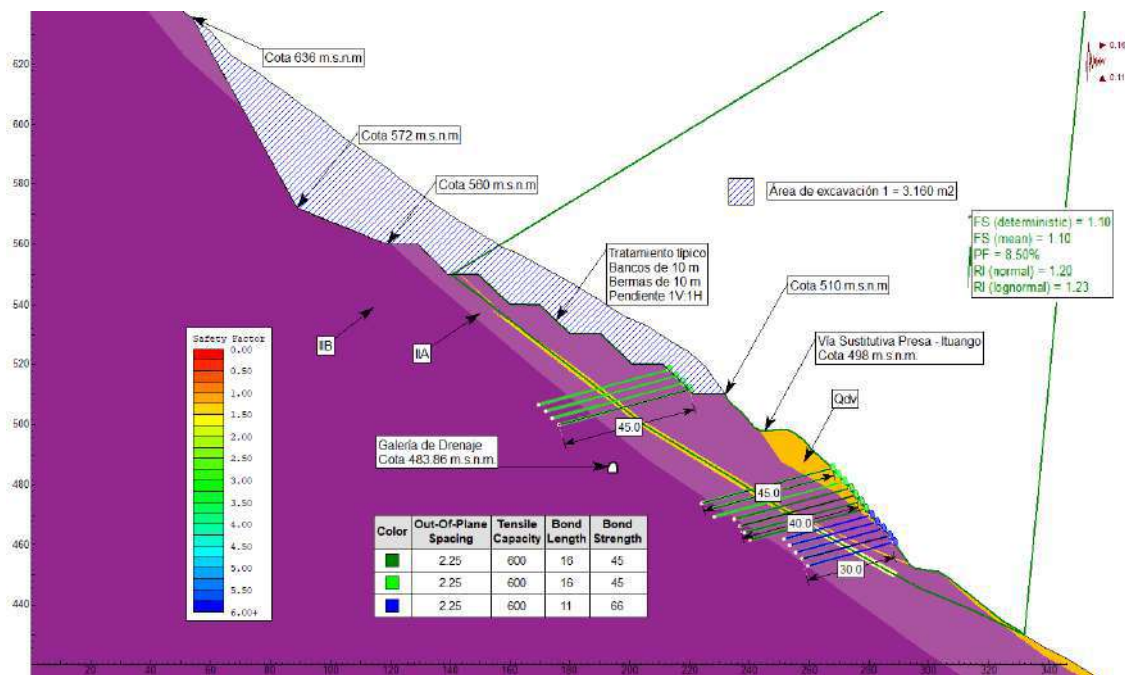


Figura 2-81 Resultados análisis de estabilidad Sección C (Perfil 3 – Zona Central) con tratamientos, condición pseudo-estática – FS (medio)=1,10 y PF=8,5%.  
 Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

En relación con lo anterior, se aclara que las medidas de estabilización planteadas en este documento se presentan como alternativas que están en un proceso continuo de evaluación y están sujetas a modificaciones de acuerdo con las necesidades de estabilización del sitio.

La Figura 2-82 y Figura 2-83 muestran la localización general del sector conocido como km 0+900 con sus áreas de análisis y el resultado de zonificación de amenaza por movimiento en masa obtenido.



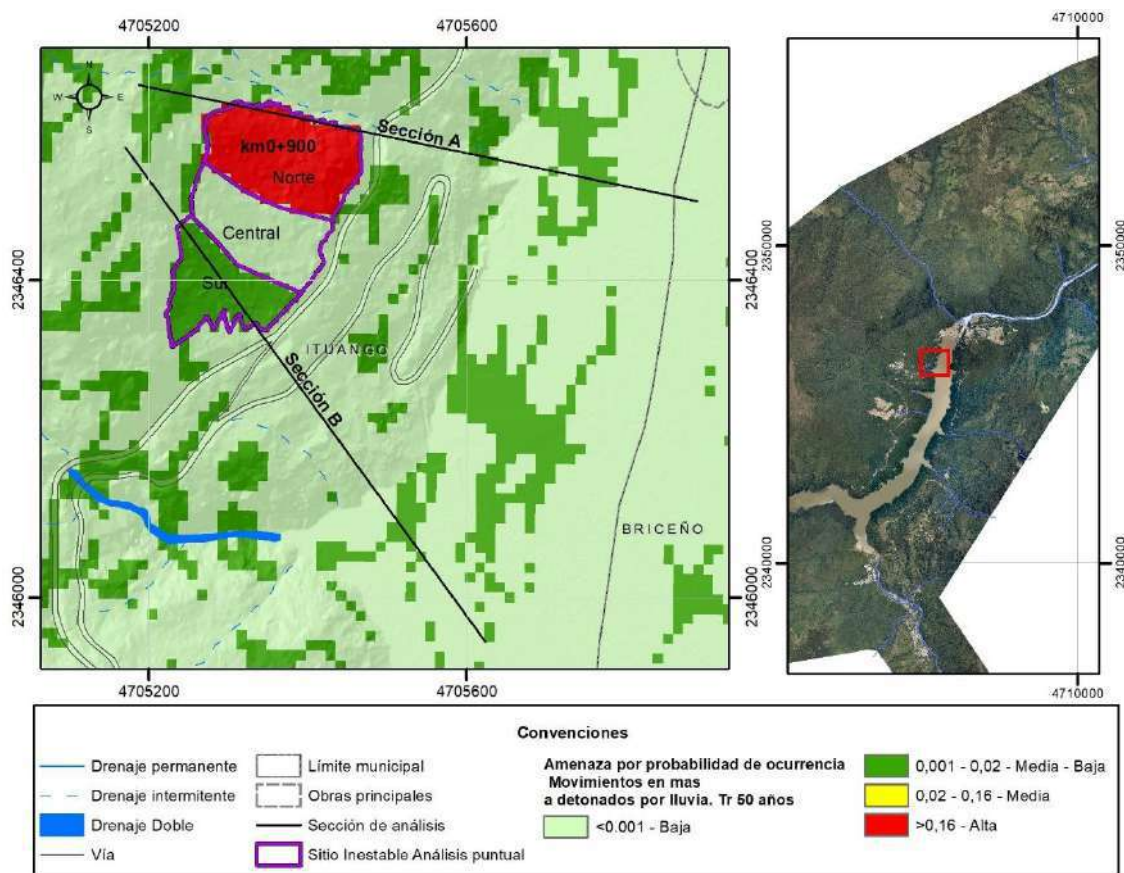


Figura 2-82 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – km 0+900.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



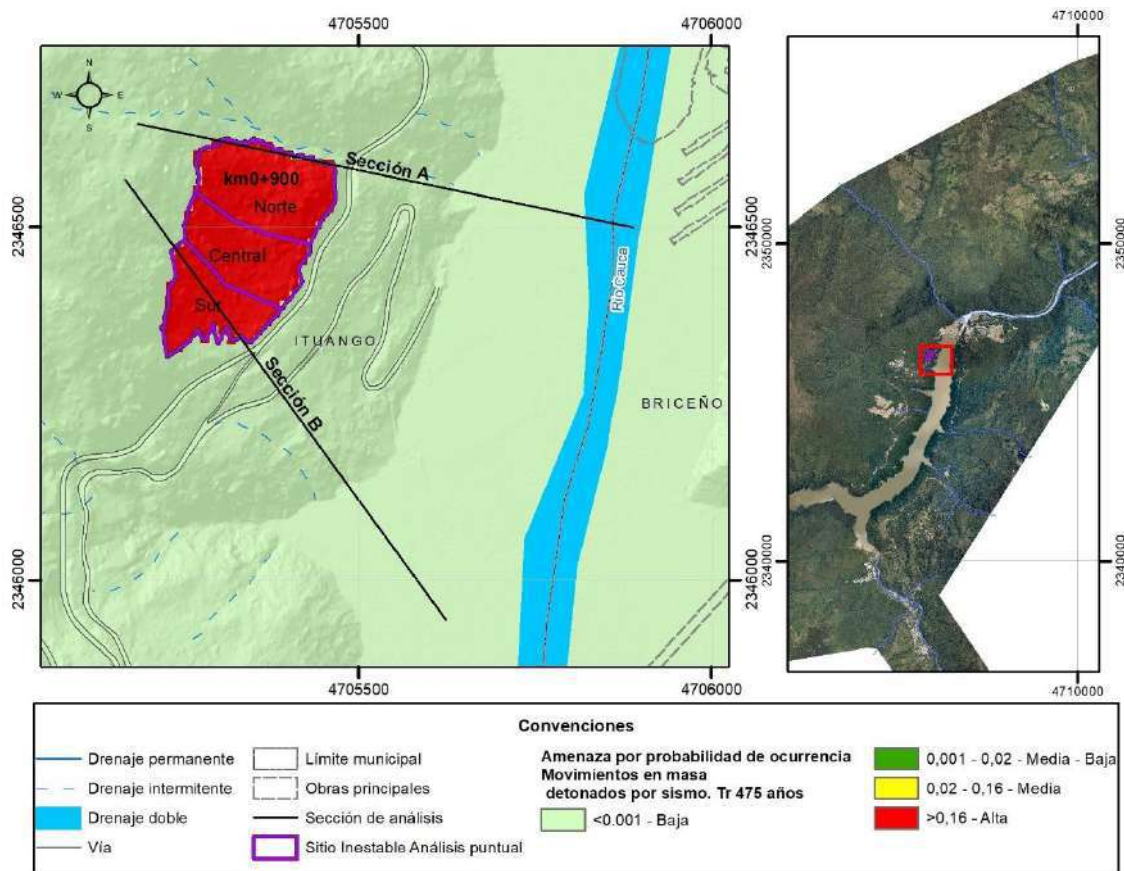


Figura 2-83 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – km 0+900.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

## 6) La Honda

El sitio denominado como “La Honda” corresponde al talud superior de la vía sustitutiva Puerto Valdivia -Sitio de Presa, ubicado en el km 18+300 sobre la margen derecha de la Quebrada la Honda.

En la Figura 2-84 se presenta la vista en planta con las unidades geológicas identificadas en el sitio de interés. Mientras que en la Figura 2-85, Figura 2-86 y Figura 2-87 se presentan los perfiles estratigráficos más representativos, trazados en las zonas norte, central y sur del talud respectivamente.



Figura 2-84 Geología en planta - Sitio La Honda.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

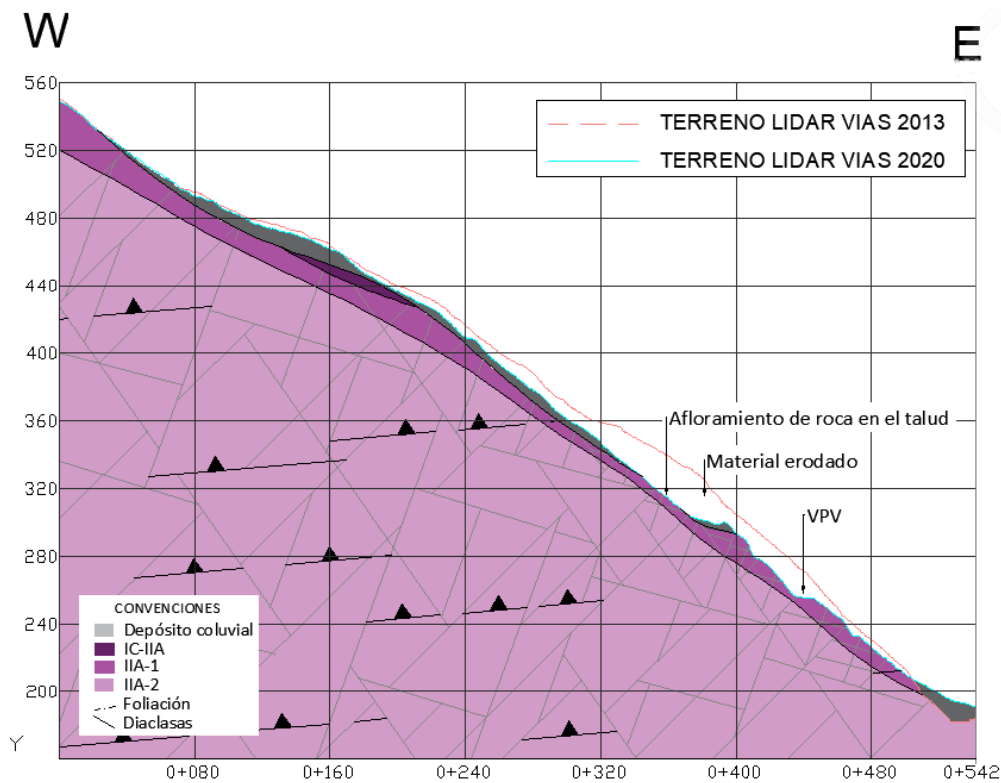


Figura 2-85 Perfil geológico (Sección 1) – La Honda.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

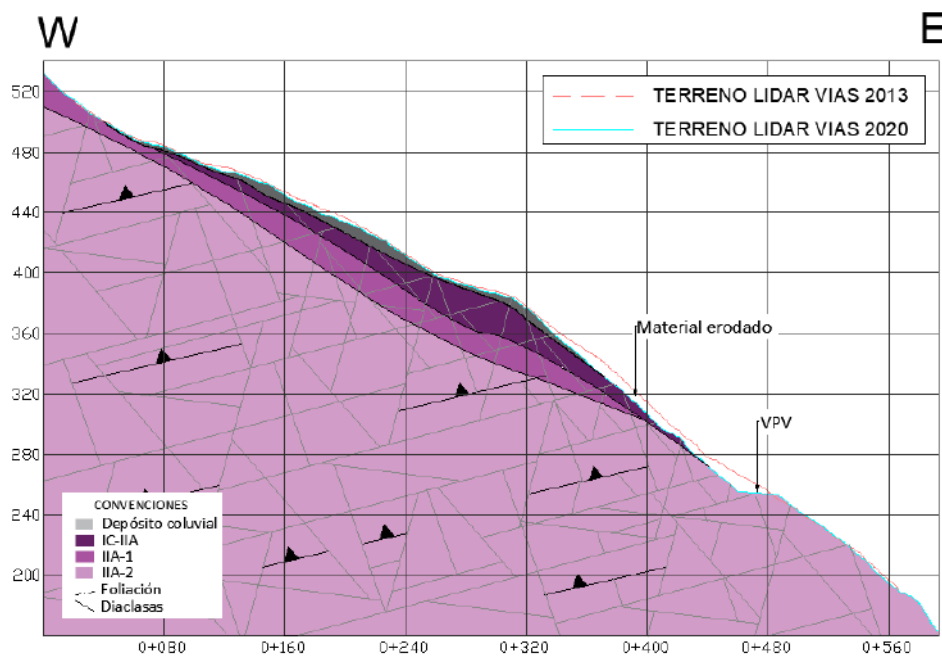


Figura 2-86 Perfil geológico (Sección 2) – La Honda.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

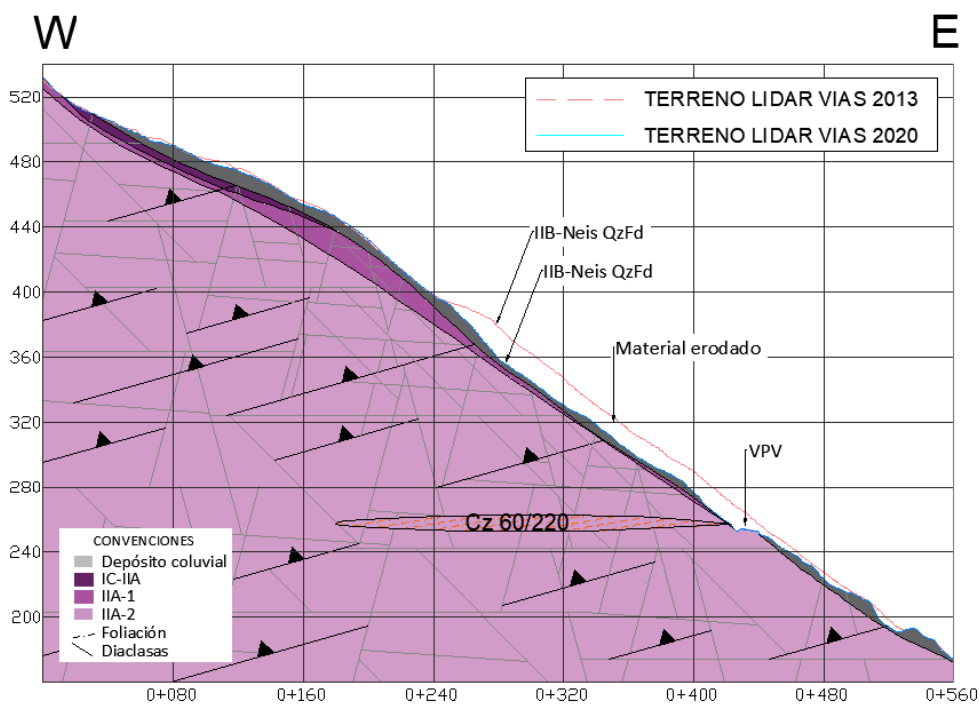


Figura 2-87 Perfil geológico (Sección 2) – La Honda.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



Para los análisis de estabilidad se contemplaron escenarios bajo condición estática y pseudo-estática, las cuales deben cumplir con factores de seguridad de 1,5 y 1,1 respectivamente para taludes definitivos. Dado que la zona de análisis presenta una amplitud considerable y, teniendo en cuenta la evolución del fenómeno erosivo sobre la superficie de esta, se realizó una sectorización del talud, ya que se identificaron algunas particularidades que requieren de un análisis individual. En la Figura 2-88 se presenta la división por zonas del talud analizado.

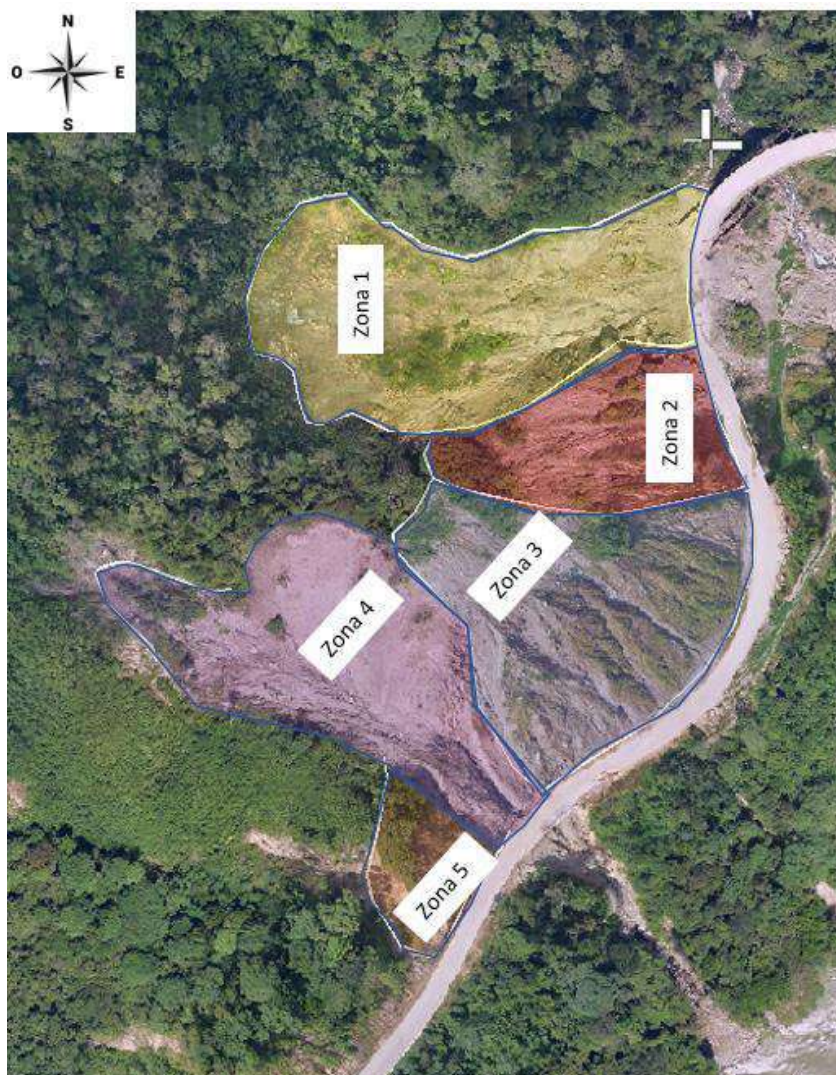


Figura 2-88 Zonificación talud La Honda.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Se tomaron secciones representativas de las zonas que han presentado desprendimientos, que son las zonas 1 y 4, integrando la estratigrafía estimada y la topografía levantada para la condición más actual mediante tecnología LIDAR y que se tiene disponible a la fecha del presente documento. En la Figura 2-89 se puede observar la disposición de las secciones analizadas.

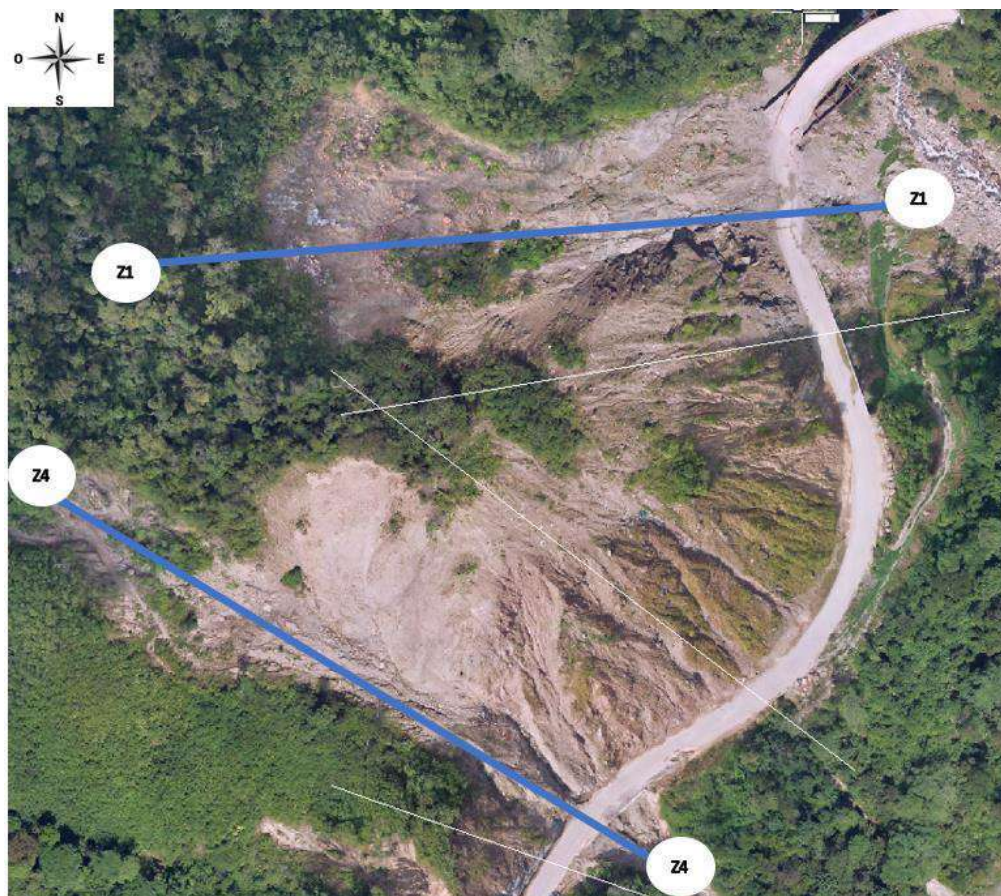


Figura 2-89 Vista en planta de las secciones analizadas en el talud La Honda.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

En la Figura 2-90 y Figura 2-91 se puede observar el resultado del análisis de estabilidad realizado mediante el software *Slide 6.0* de la casa *Rocscience* para las zonas anteriormente mencionadas. Se obtuvo factores de seguridad de 1,1 y 1,4 respectivamente bajo condiciones estáticas, lo cual no satisface los lineamientos para taludes definitivos, en los cuales se busca alcanzar factores de seguridad de 1,5 bajo condición estática y 1,1 bajo condiciones pseudo estática.



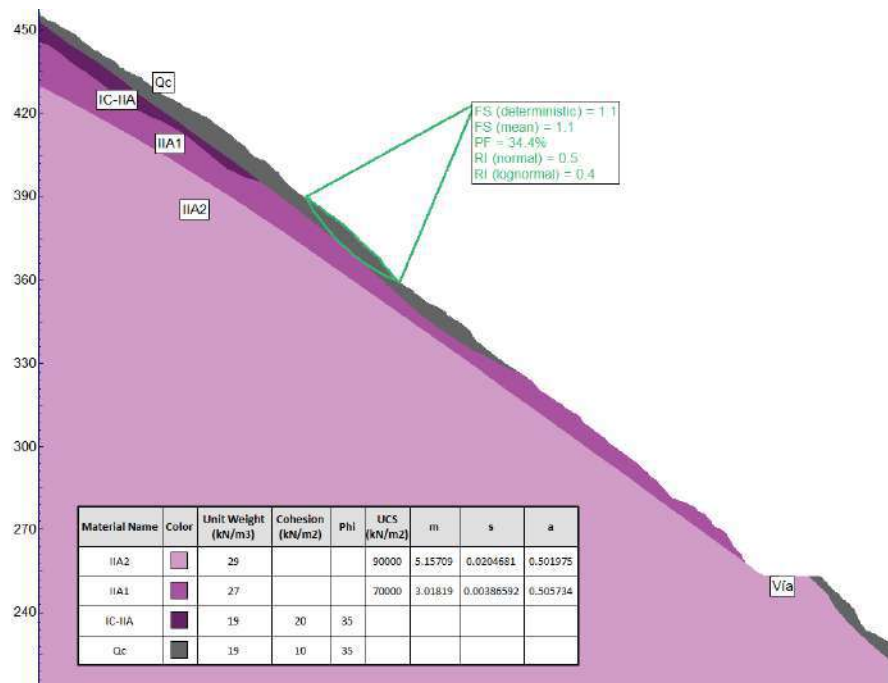


Figura 2-90 Análisis de estabilidad para la zona 1, condición estática. FS=1,1, PF=34,4%  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

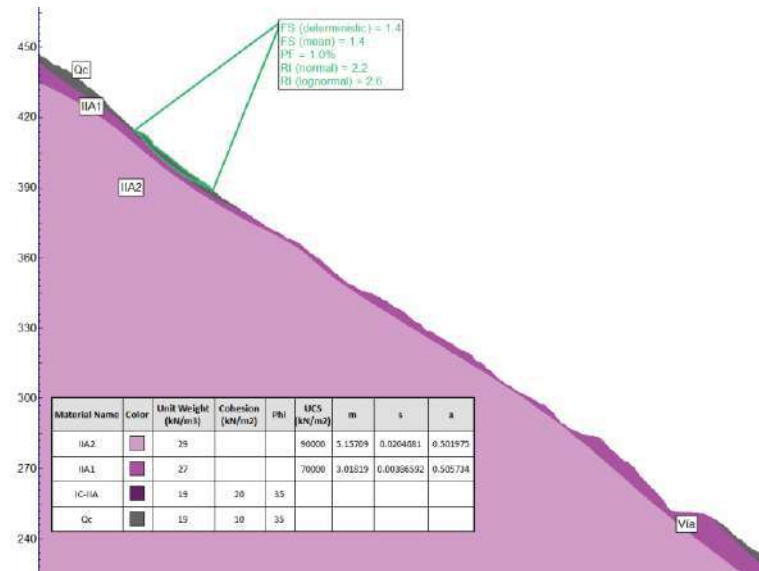


Figura 2-91 Análisis de estabilidad para la zona 4, condición estática. FS=1,4, PF=1,0%  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Dados los resultados obtenidos con factores de seguridad por debajo de 1,5, fue necesario plantear medidas para mejorar la estabilización del talud en ambas zonas. En relación con lo anterior, se aclara que las medidas de estabilización planteadas en este documento se

presentan como alternativas que están en un proceso continuo de evaluación y están sujetas a modificaciones de acuerdo con las necesidades de estabilización del sitio.

En la Zona 1 se identificaron fenómenos de erosión y procesos de inestabilidad traslacionales. El tratamiento planteado en esta zona consiste en lo siguiente:

- Entre las cotas 343 y 407 m s.n.m. aproximadamente, implementar sistema de confinamiento mediante malla (tipo TECCO G65/3 o similar) anclada con pernos BAL8 de 9,0 m de longitud, inclinados a 10° respecto a la horizontal, distribuidos al tresbolillo y espaciados cada 2,5 m.

El tratamiento de pernos fue modelado en el *software Slide 6.0* de la casa *Rocscience* para verificar la condición de estabilidad. Dicho análisis arrojó factores de seguridad FS=1,5 bajo condición estática y FS=1,1 bajo condición seudoestática para un sismo con periodo de retorno de 475 años, satisfaciendo los criterios para dichas condiciones. Los resultados se pueden observar en la Figura 2-92 y Figura 2-93 respectivamente.

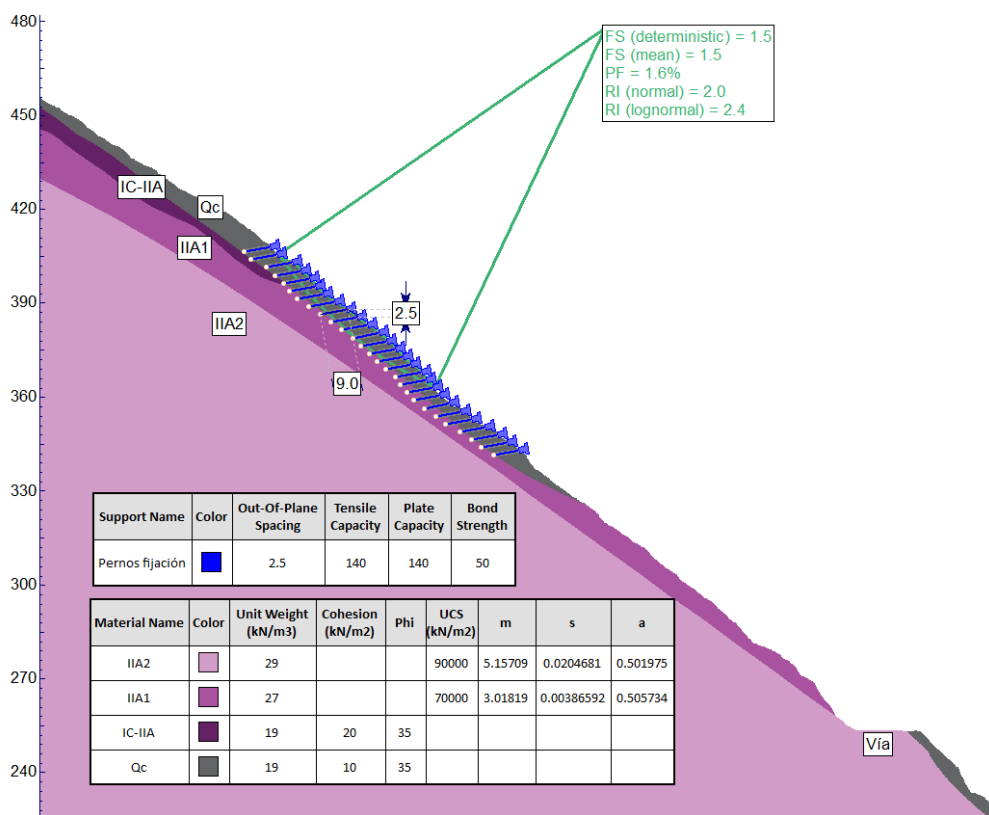


Figura 2-92 Análisis de estabilidad implementando sistema de soporte de pernos en la zona 1 bajo condición estática, FS=1,5, PF=1,6%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

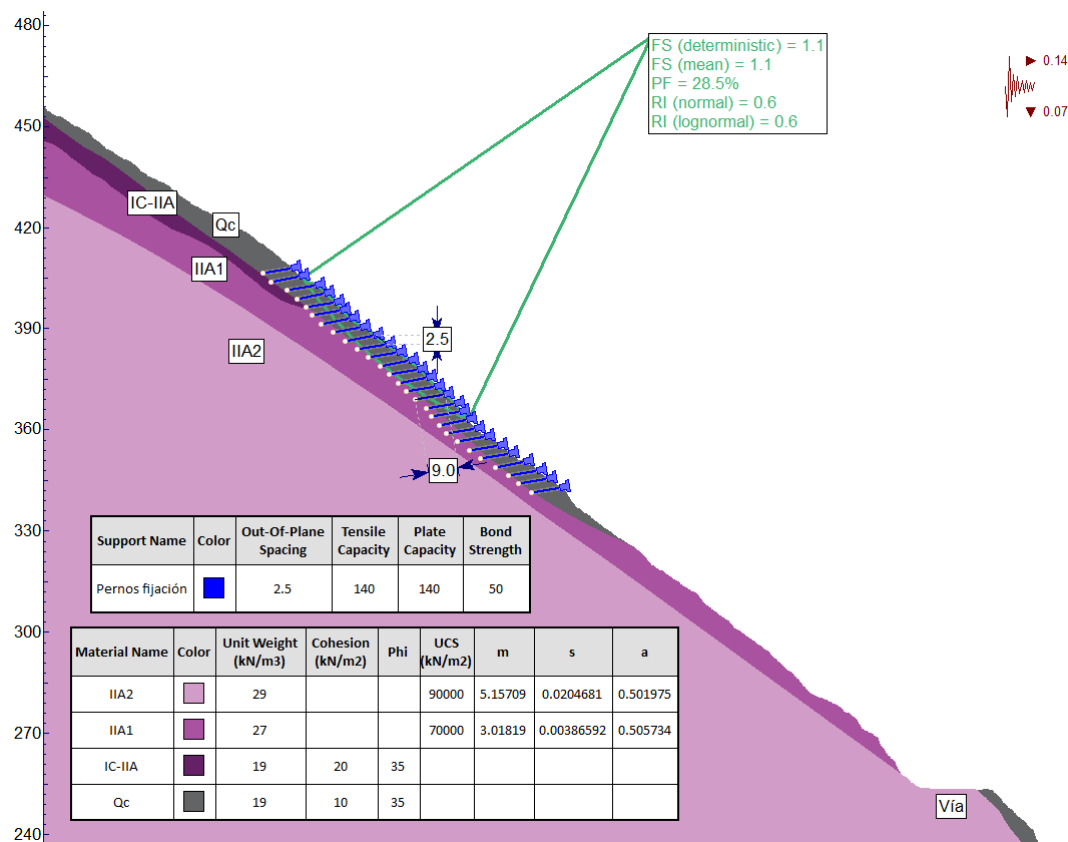


Figura 2-93 Análisis de estabilidad implementando sistema de soporte de pernos en la zona 1 bajo condición pseudo-estática, FS=1,1, PF=28,5%.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

En la zona se identificaron fenómenos de erosión y procesos de inestabilidad traslacionales. Dado lo anterior, el tratamiento planteado en esta zona comprende lo siguiente:

- Entre las cotas 385 y 416 m.s.n.m. aproximadamente, implementar sistema de confinamiento mediante malla (tipo TECCO G65/3 o similar) anclada con pernos BAL8 de 9,0 m de longitud, inclinados a 10° respecto a la horizontal, distribuidos al tresbolillo y espaciados cada 2,5 m.

El tratamiento de pernos fue modelado en el *software Slide 6.0* de la casa *Rocscience* para verificar la condición de estabilidad a partir de las secciones. Dicho análisis arrojó factores de seguridad FS=2,8 bajo condición estática y FS=2,0 bajo condición pseudoestática para un periodo de retorno de 475 años, satisfaciendo los criterios para dichas condiciones. Los resultados se pueden observar en la Figura 2-94 y Figura 2-95 respectivamente.

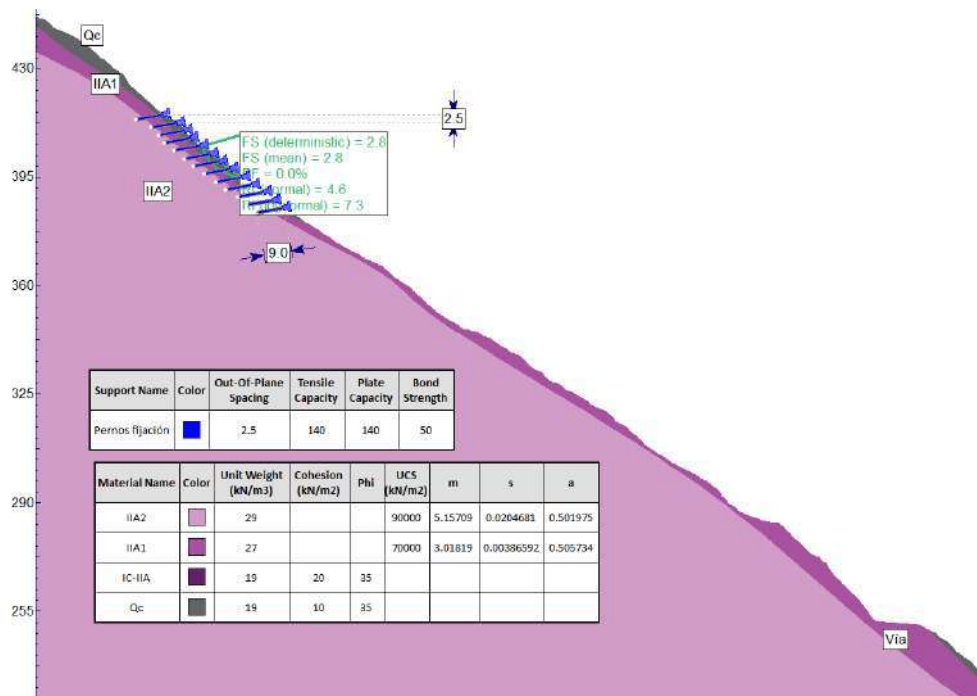


Figura 2-94 Análisis de estabilidad implementando sistema de soporte de pernos en la zona 4 bajo condición estática, FS=2,8, PF=0,0%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

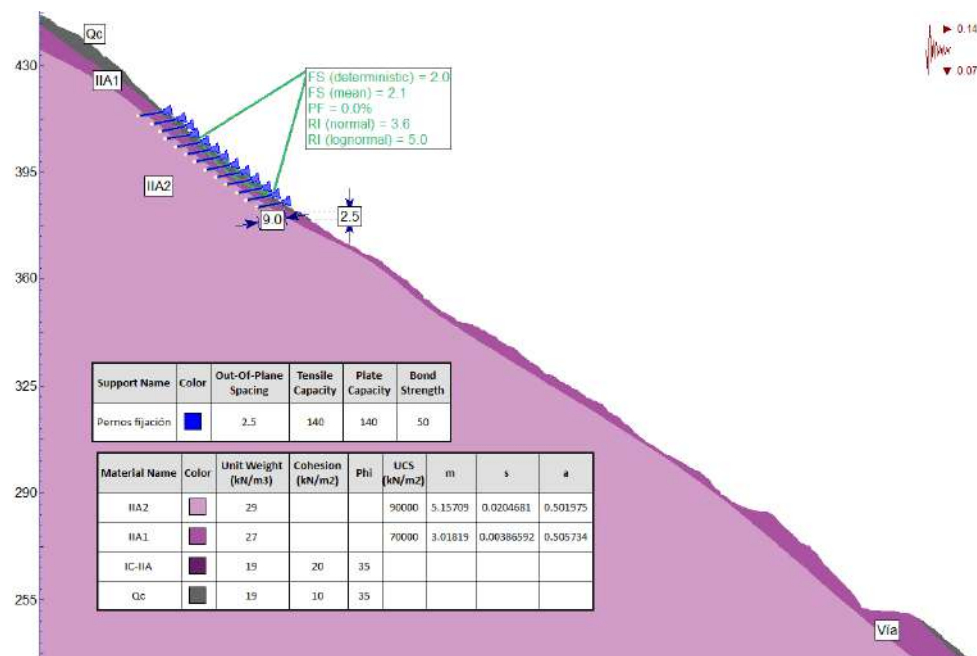


Figura 2-95 Análisis de estabilidad implementando sistema de soporte de pernos en la zona 4 bajo condición pseudoestática, FS=2,0, PF=0,0%.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

La Figura 2-96 y Figura 2-97 muestra la localización general del sector conocido como La Honda con sus áreas de análisis y el resultado de zonificación de amenaza por movimiento en masa obtenido.

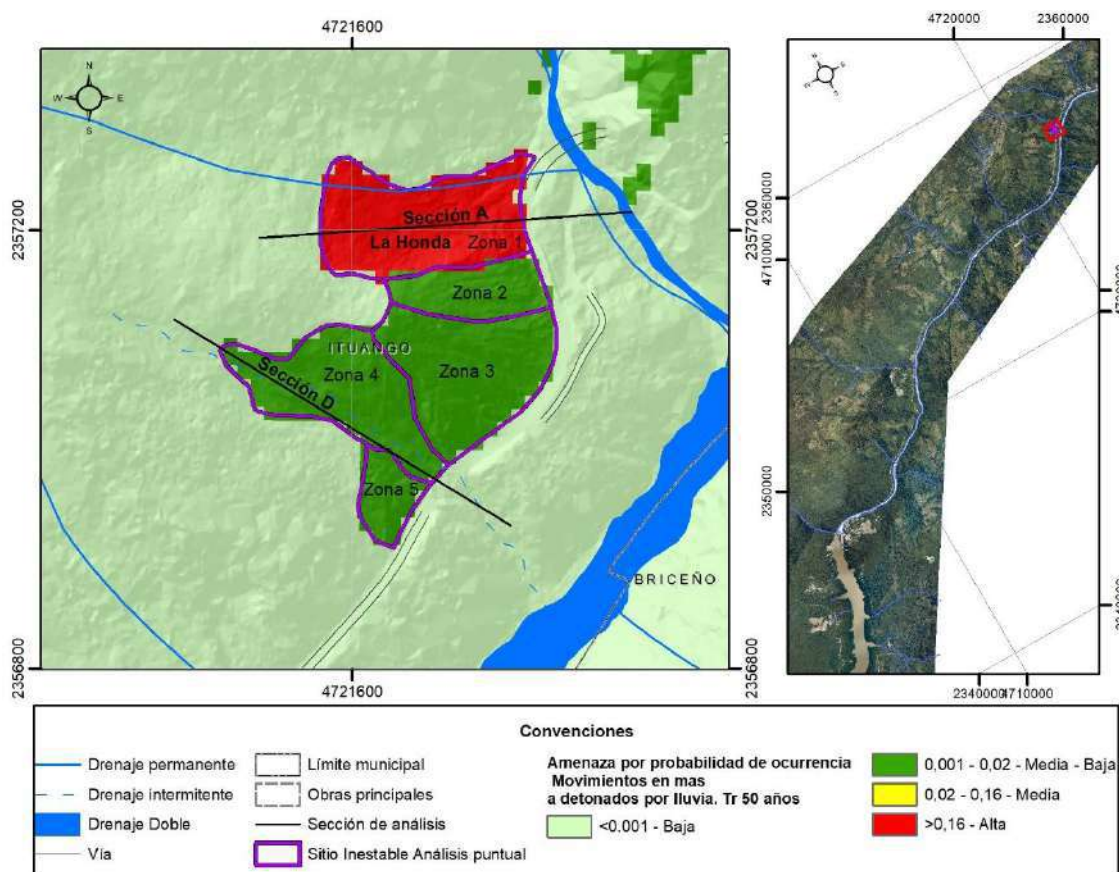


Figura 2-96 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – La Honda.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



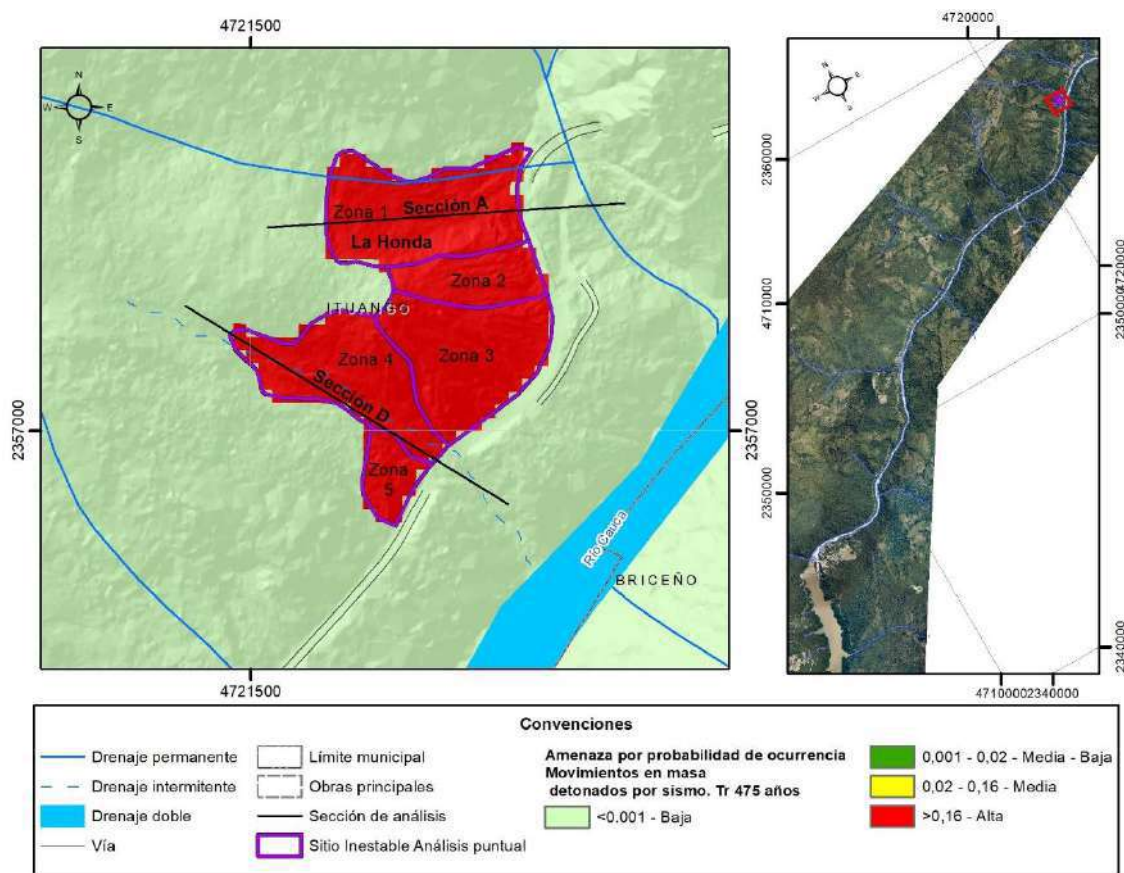


Figura 2-97 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – La Honda.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

## 7) El Cocal

Para el talud del sector denominado como El Cocal, de acuerdo con los análisis geomorfológicos del sitio y la información disponible de las perforaciones y resultados de la instrumentación, se definió y analizó la probabilidad de falla del área de manera semicualitativa.

La Figura 2-98 y Figura 2-99 muestra la localización general del sector conocido como El Cocal con sus áreas de análisis y el resultado de zonificación de amenaza por movimiento en masa obtenido.

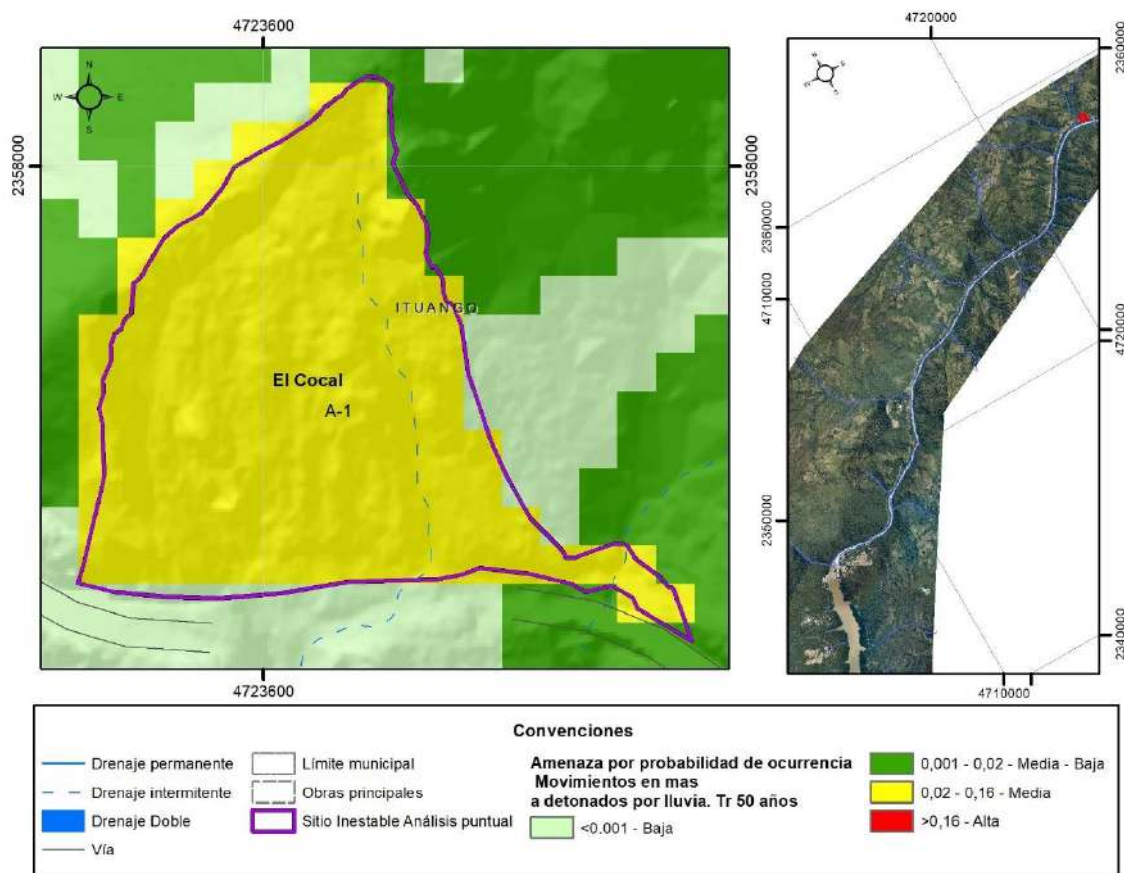


Figura 2-98 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por lluvia Tr de 50 años – El Cocal.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

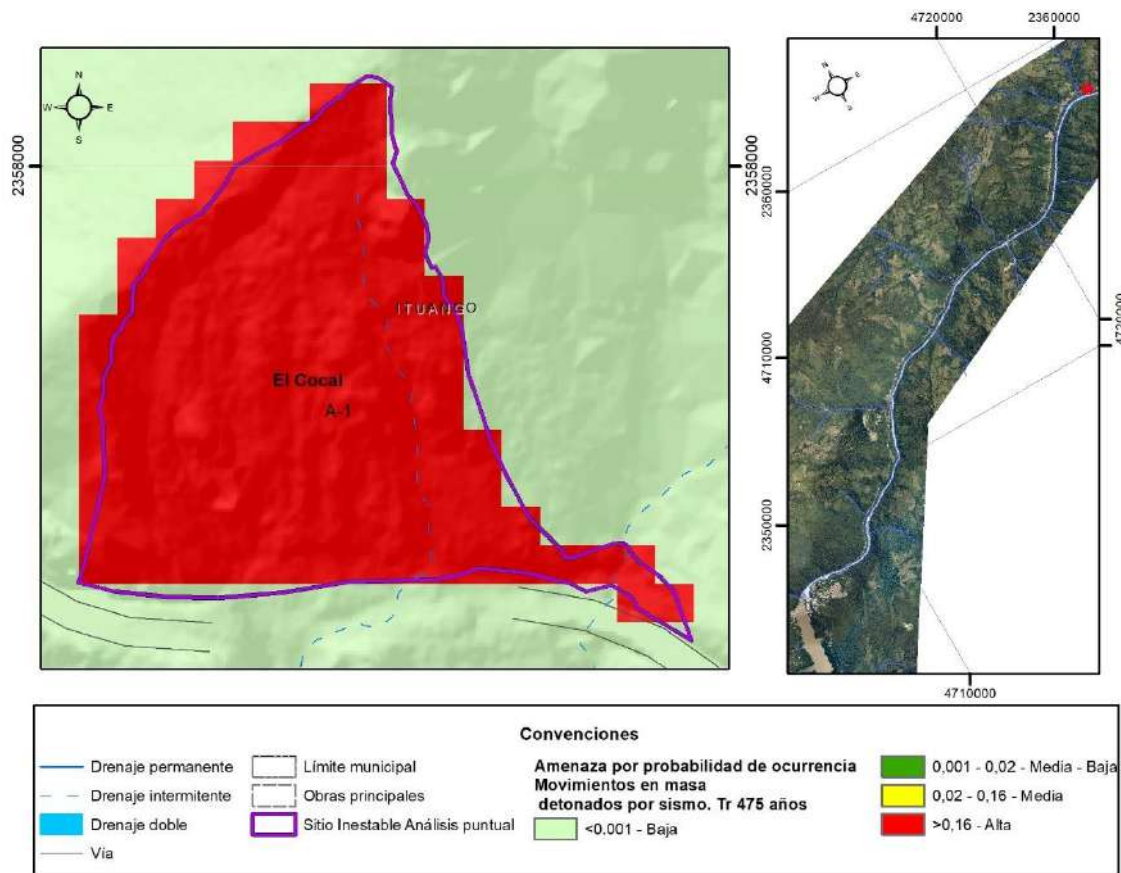


Figura 2-99 Localización y resultado de sectorización de amenaza en términos de probabilidad de falla detonada por sismo Tr de 475 años – El Cocal.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

#### 2.2.4.3.4 Conclusiones

A continuación, la Tabla 2-17 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los análisis de estabilidad para los diferentes sitios de interés, los factores de seguridad resultantes, las probabilidades de falla asociadas y la categoría de amenaza.

Tabla 2-17 Resumen – Resultados análisis de estabilidad y probabilidades de falla para los sitios de interés.

Sitio	Sección	Área susceptible	F.S. Estático	Prob. Falla [%]	F.S. Sismo (Tr = 475 años)	Prob. Falla [%]
Deslizamiento Desviaciones	A	A-2	2.8	0.00	1.9	0.00
	B	A-2	1.7	0.00	1.3	0.00
	C	A-2	1.2	3.90	0.90	91.00
	D	A-3 y A-4	1.4	0.13	1.00	37.70
Romerito	A	A-1	1.63	0.00	1.20	0.00
	B	A-1	2.00	0.00	1.60	0.00
	C	A-1	1.50	2.80	1.12	27.50

Sitio	Sección	Área susceptible	F.S. Estático	Prob. Falla [%]	F.S. Sismo (Tr = 475 años)	Prob. Falla [%]
Sitio 7	1	A-1	1.19	12.30	0.95	73.20
	2	A-1	1.52	0.10	1.12	23.000
Villa Luz (Helipuerto)	D		1.33	1.00	1.05	39.20
	A	A-2	6.30	0.00	1.86	0.00
	Sección Semicuantitativa	A-3	N/A	N/A	N/A	N/A
km 0+900	1	Norte	1.01	49.20	1.10*	4.40*
	2	Sur	1.07	1.90	1.13*	0.20*
	3	Centro	1.27	5.90E-03	1,10*	8,5*
La Honda	A	Zona 1	1.1	34.40	1.10*	28.50*
	D	Zona 4	1.4	1.00	2.00*	0.00*
El Cocal	Sección Única (Semicuantitativa)	A-1	N/A	N/A	N/A	N/A

**\*Nota:** Los valores de FS y PF en condición pseudo-estática presentados para los sitios de km0+900 y La Honda, corresponden a los valores resultantes de los análisis de estabilidad contemplando medidas de estabilización, dado que estos dos sitios no cumplen con los FS mínimos requeridos en el escenario de condición estática actual

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

De acuerdo con los resultados que se muestran en la tabla anterior, se puede concluir lo siguiente:

- Para aquellos sitios en los cuales se realizaron análisis de equilibrio límite probabilísticos, los resultados corresponden a los factores de seguridad y probabilidades de falla asociadas a las superficies de falla crítica en cada sector, lo cual puede no representar el comportamiento global de los sitios (áreas) de interés sino de un sector particular de este. No obstante, para efectos prácticos y de manera conservadora, se aplicó el resultado puntual al área de interés completa para facilitar el proceso de zonificación de amenaza.
- En términos generales, con excepción de un sector del talud de La Honda, en condición estática los sitios presentan una amenaza Baja, Media y Media-Baja, de acuerdo con las categorías de amenaza.
- Para los sitios inestables del km0+900 y La Honda, se presentan valores de FS y PF en condición pseudo-estática que corresponden a los resultantes de los análisis de estabilidad contemplando medidas de estabilización, dado que estos dos sitios no cumplen con los FS mínimos requeridos en el escenario de condición estática actual. En relación con lo anterior, se aclara que las medidas de estabilización planteadas en este documento, se presentan como alternativas que están en un proceso continuo de evaluación y están sujetas a modificaciones de acuerdo con las necesidades de estabilización del sitio.

- En el caso de las secciones de los sitios que se evaluaron de manera semicuantitativa de acuerdo con la información disponible, muestran que en condición estática la probabilidad de falla se estimó en categoría media – baja o media.
- En el caso de aquellos sitios que para la condición pseudo-estática (sismo) muestran factores de seguridad  $FS < 1,1$  o que de manera semicuantitativa se categorizaron como de probabilidad alta de falla; se vienen planificando y recomendando acciones de intervención encaminadas a mejorar los factores de seguridad globales y de estabilidad de los sitios de interés y, en consecuencia, mitigar la amenaza y disminuir los niveles de riesgo.

#### 2.2.4.3.5 Seguimiento a las amenazas

Una vez identificados los factores que pueden contribuir a la amenaza por movimientos en masa, EPM procedió a escoger o reunir aquellos factores de mayor relevancia sobre los cuales se fundamenta el plan de contingencia operativa (Tabla 2-18), para las afectaciones que surjan tras la materialización de un movimiento en masa.

Este plan está orientado -como es mencionado antes - a los factores más críticos que contribuyen a la amenaza de movimientos en masa de manera generalizada, tanto para la zona del embalse y en los taludes viales, y a la identificación de las variables que permitirían emitir alertas tempranas (sin importar el origen de la amenaza o el tipo de factor detonante, etc.). Vale la pena mencionar que se están elaborando planes de acción enfocados a sitios inestables específicos.

Tabla 2-18 Seguimiento a los principales factores que contribuyen a la amenaza por movimientos en masa.

CAUSAS DEL ESCENARIO DE RIESGO	NIVEL DE ALERTAS Y UMBRALES				EVENTO MATERIALIZADO
<b>Desembalse rápido</b>					
Tasa de desembalse (m/día)	< 0,9	0,9 - 1,2	1,2 - 1,4	1,4 - 1,8	> 1,8
<b>Sismo (magnitud superior a 4,0)</b>					
Aceleración (PGA)	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	> 0,6
Intensidad en el sitio del proyecto (escala Mercalli)	VI/Leve	VII/Moderado	VIII/Moderado-Crítico	IX/Crítico	IX/Crítico-Devastador
<b>Precipitación</b>					
Duración (min)	En evaluación				
Lluvia crítica Intensidad (mm/hr)					
<b>Incremento nivel del embalse (Aumento saturación)</b>					
Cota del embalse (m.s.n.m)	< 420	420 - 425	425 - 430	430 - 432.9	> 432.9
<b>Indicador general de contornos de</b>					



CAUSAS DEL ESCENARIO DE RIESGO	NIVEL DE ALERTAS Y UMBRALES				EVENTO MATERIALIZADO
<b>deformación (Monitoreo Satelital)</b>					
Magnitud contornos de deformación (cm)	< 5	5 - 15	15 - 30	30 - 50	> 50
<b>Contribuyentes antropogénicos</b>					
Obras de drenaje	Drenajes limpios y funcionales. No hay alteraciones en el talud.	Drenajes con obstáculos, funcionamiento deficiente; erosión menor.	Drenajes con afectaciones (grietas y juntas), erosión moderada.	Obra de drenaje dañada, deterioro de talud y posibilidad de inestabilidad latente por erosión.	Inestabilidad por mal funcionamiento de obras de drenaje
Minería	No hay presencia de mineros	Minería artesanal (métodos de extracción manual)	Minería con extracción mecanizada (retroexcavadora, bombas, etc.)	Minería con extracción mecanizada (retroexcavadora, bombas, dragas, etc.) con intervenciones en la ladera	Inestabilidad de la ladera por actividades mineras
Deforestación o ausencia de vegetación	Vegetación densa, no se identifica alteraciones en la ladera.	Vegetación moderada, pérdida de cobertura vegetal leve; no se identifican señales de inestabilidad.	Vegetación pobre en talud, pérdida de cobertura vegetal moderada y se observan afectaciones menores (desgarres, reptación, etc.).	Ausencia de vegetación, se identifican señales de inestabilidad latente y desprendimientos de material localizados.	Inestabilidad de talud por pérdida de cobertura vegetal

ALERTA	ACTIVIDAD	ACCIONES A IMPLEMENTAR
Normalidad en	1. Monitoreo.	Monitoreo y reporte quincenal de todas las variables asociadas con la estabilidad de

ALERTA	ACTIVIDAD	ACCIONES A IMPLEMENTAR
las actividades		los taludes en el vaso del Embalse. Esto de acuerdo con el monitoreo satelital.
	2. Verificaciones.	Verificaciones de la estabilidad de los taludes (sector embalse) con base en los resultados de la instrumentación. Verificaciones particulares: Se ha alcanzado o está previsto alcanzar el nivel máximo normal de operación?; se ha alcanzado o está previsto que se alcance el caudal máximo vertido registrado en la vida de la presa, sin que se prevean riesgos para su seguridad?, con el nivel normal se esperan crecientes que no superan la capacidad del proyecto? no se registran sismos o los registrados no superan una magnitud de 4,0 en la escala de Richter?
	3. Inspecciones de campo	Inspecciones de campo de los taludes (sector embalse-EPM debe informar con qué frecuencia está realizando estos reportes)
Preparación para la respuesta	1. Monitoreo.	Intensificar el reporte del comportamiento de la instrumentación instalada en los taludes (sector embalse), a una frecuencia semanal, para validar hipótesis de comportamiento anómalo o establecer medidas remediales
	2. Verificaciones.	Verificaciones de la estabilidad de los taludes con base en los resultados de la instrumentación. Se emiten diagnósticos puntuales y se preparan las acciones requeridas para el control del comportamiento anómalo detectado. Verificaciones particulares: Con el nivel máximo normal en el embalse, se espera una creciente que supera la máxima pero no la extrema del proyecto y se tienen las previsiones junto con medidas de explotación y reducción del nivel del embalse para su control?; se ha sentido en el sector del talud o en sus proximidades un sismo con magnitud superior a 4 en la escala de Richter, el sismo es superior al mayor soportado previamente por el sector y para el cual no se han esperado daños?
	3. Inspección de campo	Inspecciones de campo de los taludes (sector embalse). Se intensifica frecuencia a 1 por semana. En las inspecciones de campo realizar una caracterización del sitio en términos de: localización, litología involucrada, edad relativa o temporalidad (en años indicando si es reciente, antiguo relicto u otro), actividad del movimiento (inactivo, activo, reactivado, estabilizado), clasificación del movimiento (tipo traslacional, rotacional, caídas, volcamiento, flujo de tierras, flujo de lodo, reptación, etc), morfometría (ancho, longitud, altura de escarpe, etc.), causas del movimiento, tipo de erosión, magnitud, etc.
	4. Intervenciones	Se deben aplicar los mantenimientos correctivos con miras a controlar evento indeseable en el corto plazo; la situación puede manejarse mediante la aplicación de medidas tales como: obras de control de erosión, obras de drenaje superficial y subsuperficial, perfilado mecánico o manual del talud, sellado de grietas, entre otras
Alistamiento	1. Monitoreo.	Se intensifica monitoreo y reporte a una frecuencia diaria para vigilar evolución de comportamiento anómalo
	2. Verificaciones.	Verificaciones de la estabilidad de los taludes con base en los resultados de la instrumentación. Se emiten diagnósticos puntuales y se preparan las acciones requeridas para el control del comportamiento anómalo detectado. Verificaciones particulares: Con el nivel máximo normal en el embalse, se espera una creciente que supera la máxima pero no la extrema del proyecto y se tienen las previsiones junto con medidas de explotación y reducción del nivel del embalse para su control?; se ha sentido en el sector del talud o en sus proximidades un sismo con magnitud superior a 4 en la escala de Richter, el sismo es superior al mayor soportado previamente por el sector y para el cual no se han esperado daños? Establecer la altura de la ola que se genera en caso de que se produzca el deslizamiento y se estima el riesgo de que esta cause run-up. Adicionalmente, validar si el sitio presenta riesgo de afectación a personas, vías, obras de infraestructura o para el proyecto en general. Se continúa con los análisis de estabilidad con base en la instrumentación y se definen las medidas correctivas para aplicar en el corto plazo.
	3. Inspección de campo	Se intensifica la frecuencia de las inspecciones de campo y la emisión de los reportes sobre la misma (1 por día).

ALERTA	ACTIVIDAD	ACCIONES A IMPLEMENTAR
	<b>4. Intervenciones</b>	Dependiendo de las consecuencias se aísla la zona que se pueda ver afectada. Esta puede ser limitar área de navegación en el embalse, colocar controles o cierres viales, aislar zonas en las obras principales. Estas medidas de aislamiento se definen según el tipo y magnitud del problema. Mientras se entra a aplicar las medidas de estabilización se continua con las medidas de mitigación.
<b>Inicio de las acciones de respuesta</b>	<b>1. Monitoreo.</b>	Se intensifica monitoreo y reporte a una frecuencia a dos reportes diarios para vigilar evolución de comportamiento anómalo
	<b>2. Verificaciones.</b>	Verificaciones de la estabilidad de los taludes con base en los resultados de la instrumentación. Se emiten diagnósticos puntuales y se preparan las acciones requeridas para el control del comportamiento anómalo detectado. Verificaciones particulares: Con el nivel máximo normal en el embalse, se espera una creciente que supera la máxima pero no la extrema del proyecto y se tienen las previsiones junto con medidas de explotación y reducción del nivel del embalse para su control?; se ha sentido en el sector del talud o en sus proximidades un sismo con magnitud superior a 4 en la escala de Richter, el sismo es superior al mayor soportado previamente por el sector y para el cual no se han esperado daños? Establecer la altura de la ola que se genera en caso de que se produzca el deslizamiento y se estima el riesgo de que esta cause run-up. Adicionalmente, validar si el sitio presenta riesgo de afectación a personas, vías, obras de infraestructura o para el proyecto en general. Se continua con los análisis de estabilidad con base en la instrumentación y se definen las medidas correctivas para aplicar en el corto plazo.
	<b>3. Inspección de campo</b>	Se intensifica la frecuencia de las inspecciones de campo y la emisión de los reportes sobre la misma a 2 diarios (si es posible acceder al sitio o usando elementos remotos tales como drones, cámaras)
	<b>4. Intervenciones y emisión de alarmas sonoras</b>	Dependiendo del origen del fenómeno se aplican las diferentes medidas para estabilizar el terreno. En caso de que sea necesario se evalúa la pertinencia de disminuir el nivel del embalse hasta la cota mínima posible. Las obras de estabilización se definen de los análisis previos y dependen de la magnitud del problema y la accesibilidad al sitio. Acelerar los trabajos y/o actividades de intervención de mantenimiento preventivo, correctivo o de estabilización para disminuir el riesgo de materialización de deslizamiento. Se requiere activación de alertas tempranas tales como alarmas sonoras activadas por boyas en el sitio de presa, que avisen de restricciones en la movilidad sobre la presa y en el transporte fluvial en el embalse, por oleaje y/o pérdida de borde libre (se deben preparar las acciones para proporcionar la movilidad de la comunidad usando otras vías y medios de transporte en caso de que se vea afectada alguna de las vías).
<b>Activación Plan de Continuidad (Materialización del evento)</b>	<b>1. Monitoreo.</b>	Se intensifica monitoreo y reporte a una frecuencia a cuatro diarios para vigilar evolución de la materialización del riesgo
	<b>2. Verificaciones.</b>	Se realizan las verificaciones que se juzgen necesarias para determinar el impacto sobre comunidades, infraestructura y ambiente, por la materialización del riesgo
	<b>3. Inspección de campo</b>	Se intensifica la frecuencia de las inspecciones de campo y la emisión de los reportes sobre la misma a 4 diarios (si es posible acceder al sitio o usando elementos remotos tales como drones, cámaras)
	<b>4. Activación PEC.</b>	Activación del Plan de Emergencias y Contingencias para el desalojo inmediato de las comunidades aguas abajo.
	<b>5. Activación PADEC.</b>	Informar al equipo de EPM (alta gerencia de la Empresa) para la activación del Protocolo de Atención de Eventos y Crisis.
Este reporte es un compendio de información desarrollada por EPM y Contratistas. El objetivo de este instrumento, es disponer de una herramienta sencilla y práctica, la cual permita responder eficaz y oportunamente mediante el uso de los recursos necesarios para sobreponerse ante eventos contingentes, los cuales pudiesen comprometer la continuidad y objetivos del Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Mayores detalles pueden ser consultados en el Plan de Contingencia Operativo ante eventos amenazantes que puedan generar falla o rotura de los taludes localizados en el vaso del Embalse.		

Fuente: CGI, 2021.

#### 2.2.4.4 Caracterización de amenaza por subsidencia o hundimiento

La subsidencia es un proceso de carácter físico que se desarrolla en el tiempo, y se define como el hundimiento o deformaciones verticales que pueden variar desde pocos milímetros hasta varios metros en la superficie del terreno o con poco o ningún movimiento lateral.

Dicho proceso se genera a partir de cavidades de origen natural o antrópicas que se desarrollan a profundidad, por numerosas causas como la disolución de materiales, la construcción de obras subterráneas o de galerías mineras, la erosión del terreno en profundidad, el flujo lateral del suelo, la compactación de los materiales que constituyen el terreno o la actividad tectónica; tiende a ser discontinua y asimétrica alrededor de la cavidad principal y está controlado por las estructuras geológicas, la calidad del macizo rocoso o suelo y los efectos topográficos.

La zona de subsidencia representa el límite externo en el cual se pueden medir las deformaciones superficiales. El borde exterior puede contener sólo pequeñas grietas y deformaciones que se extienden y crecen a medida que se avanza hacia el interior, mientras que en el centro se presentan los mayores desplazamientos y material afectado (ejemplo, roca completamente fracturada). La Figura 2-100 representa las diferentes zonas de expresión geomorfológica asociadas a la subsidencia.

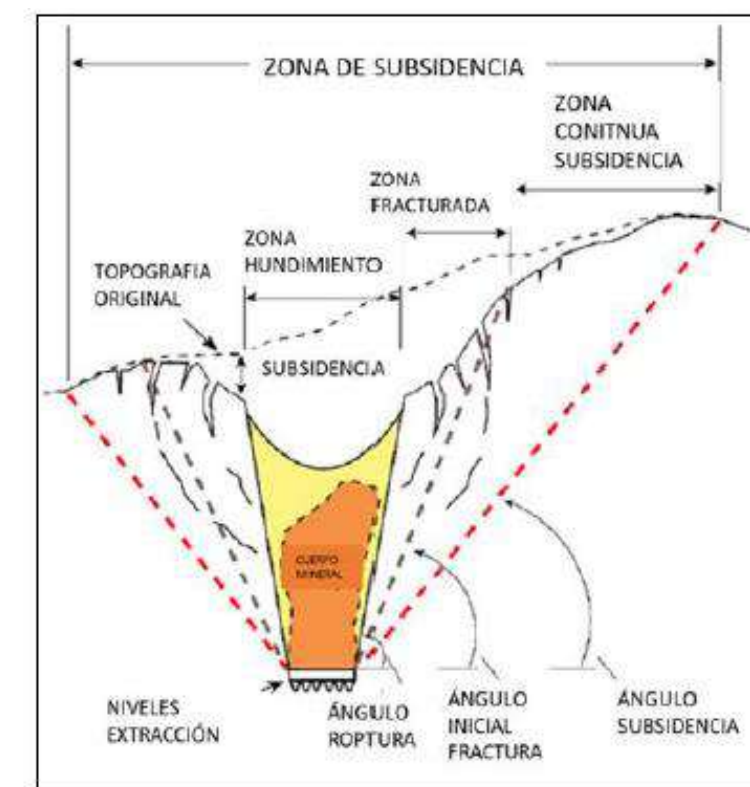


Figura 2-100 Zonas de deformación asociadas a la Subsidencia.

Fuente: Tomado de (Cheng, 2016)

La Figura 2-100 representa de manera conceptual la zona de subsidencia y sus tres zonas principales de expresión geomorfológica definidas como:

- Zona de hundimiento: Se localiza directamente sobre la cavidad, caracterizada por presentar la mayor perturbación y estar llena de bloques irregulares.
- Zona de fracturamiento: Adyacente a la zona de hundimiento, caracterizada por la aparición de fracturas radiales que generan volcamiento de bloques hacia el centro de la cavidad.
- Zona de Subsistencia continua: Enmarcada por el límite externo al hundimiento en el cual se pueden detectar las deformaciones medibles en superficie.

Ahora bien, este fenómeno se puede presentar superficialmente donde se tiene material de bajas características geomecánicas, soporte insuficiente y bajo nivel de confinamiento, principalmente durante el procedimiento de excavación, o en excavaciones profundas con altos esfuerzos *in situ* y en macizos rocosos competentes donde se generan excavaciones de gran magnitud o se inducen solicitaciones suficientes para provocar el fallo de la roca y su extensión hasta la superficie.

En condición de baja cobertura el hundimiento ocurre como resultado de la gravedad y los esfuerzos inducidos en el contorno del área libre, si los esfuerzos compresivos inducidos en dicho nivel son bajos, los bloques o material deberán caer de manera libre bajo la acción de la gravedad o deslizarse sobre discontinuidades según su inclinación o superficies de falla; dicha condición ocurre cuando la magnitud de los esfuerzos o resistencia horizontal es baja o cuando se tiene disipación y redistribución de los esfuerzos por previas excavaciones subterráneas o en la cara del túnel cuando se tiene poco o nulo refuerzo y esfuerzos existentes en el frente durante el proceso de excavación (Brady, 2005).

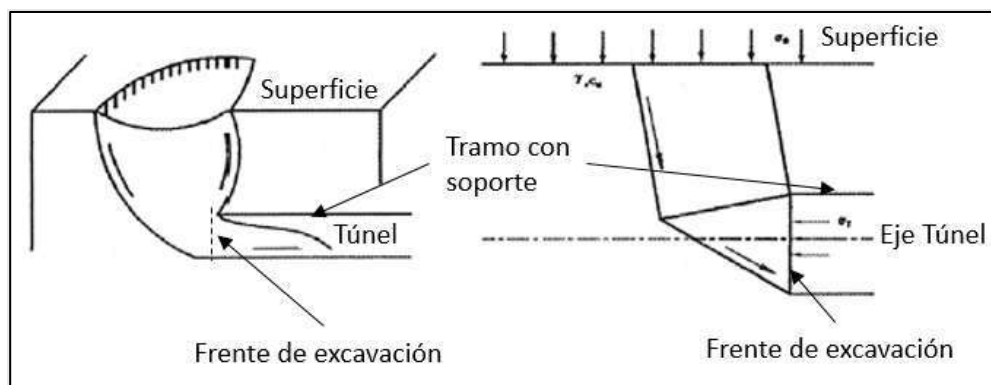


Figura 2-101 Colapso en el frente de excavación. Diagrama típico en suelo. La extensión hasta la superficie se presenta comúnmente cuando la relación diámetro túnel/cobertura es menor a 2,5.

Fuente: Modificado de (Leca, 2007)

Para condiciones de alta cobertura, la magnitud de los esfuerzos compresivos *in situ* y los esfuerzos inducidos en la zona de excavación son suficientemente altos, y se generarán



concentraciones de tensiones que actuarán como arco auto soportado que inhibirá la capacidad de los bloques para caer bajo la acción de la gravedad (Brady, 2005). Sin embargo, según el área libre que se tenga en subterráneo, se podrá generar una posible ruptura del arco generado en el techo y progresión del fallo. Este tipo de situaciones son comúnmente evaluadas en un ambiente minero donde se tienen grandes áreas de explotación y que, según el método de extracción, se puede buscar precisamente que se genere hundimiento, ya que en general las dimensiones de la huella del cuerpo mineral exceden el radio hidráulico mínimo requerido para generar el hundimiento del macizo rocoso (Laubscher, 1994). (Brady, 2005)

La Figura 2-102, muestra un modelo conceptual del mecanismo de propagación del hundimiento en zonas de alta cobertura, así como las zonas asociadas y el comportamiento mecánico de éstas (Cárcamo Bernt, 2016).

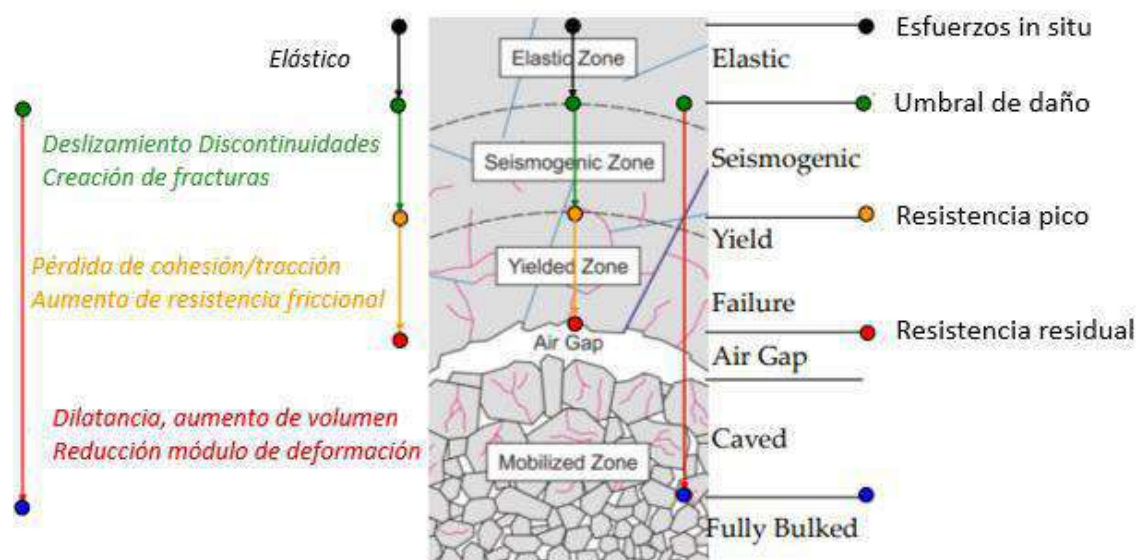


Figura 2-102 Modelo conceptual de esfuerzos para la propagación del hundimiento.  
Fuente: (Cárcamo Bernt, 2016)

En la Figura 2-102, se describen las siguientes zonas asociadas al hundimiento:

- Zona elástica: presenta un comportamiento lineal-elástico. La condición de esfuerzos es menor al umbral de daño, por lo tanto, el macizo rocoso se conserva intacto.
- Zona sísmica: El macizo rocoso se degrada debido al deslizamiento entre discontinuidades existentes y la propagación de nuevas fracturas, provocando actividad sísmica, a partir de esta zona, los esfuerzos superan el umbral de daño.
- Zona de fluencia: El macizo rocoso alcanza un comportamiento plástico como resultado de la redistribución de los esfuerzos, produciendo una pérdida parcial o total de su resistencia.
- Vacío de aire: En función de las condiciones geométricas y magnitud del desprendimiento, así como conexiones con otras excavaciones, se puede generar una

zona vacía creada que aumenta según la tasa de extracción, existe solo si el macizo rocoso en la zona de fluencia todavía tiene algo de resistencia y permite la formación de esta zona bajo un área de roca suspendida sobre ella.

- Zona hundida: zona formada por los bloques caídos durante el proceso de avance del hundimiento. Estos bloques a su vez, producen un soporte a las paredes de la cavidad.

La propagación del hundimiento cambia la forma del techo de la cavidad, curvándolo, produciendo un ascenso del volumen activo y genera una nueva distribución de esfuerzos en el contorno de la cavidad, la cual demarca dos zonas activas asociadas a procesos de degradación del material, así como de fluencia del mismo (Karzulovic, 2002).

#### 2.2.4.4.1 Evaluación de subsidencia por el método empírico Laubscher (1990) para el Proyecto Ituango

Para la evaluación y análisis de potencial subsidencia asociada a las excavaciones subterráneas del PHI, se asumieron las siguientes consideraciones:

- La zona asociada al área libre, se considera individual para cada una de las excavaciones del proyecto, donde se incluyen galerías, túneles y cavernas.
- El método considera excavaciones sin soporte de construcción, por lo cual lo indicado en este capítulo es una condición conservadora teniendo en cuenta que casi el 100% de las excavaciones cuenta con medidas suficientes de soporte para cumplir con las condiciones de estabilidad.
- No se consideran excavaciones con profundidades mayores a 400 m.
- El macizo rocoso es considerado competente (Aceptable a Bueno) en el contorno de cada una de las excavaciones
- No se tienen en cuenta fuerzas externas en el contorno de excavaciones debido al proceso de excavación.
- Se realizó la evaluación mediante la utilización de los resultados de clasificación geomecánica RMR, obtenidos durante construcción y ajustados para el tipo de roca presente en el proyecto (gneis), acorde con las condiciones de meteorización, orientación de las estructuras y efectos de voladuras inducidos por el proceso de excavación para definir el MRMR (Laubscher, 1994).

La obtención del MRMR para el proyecto se hizo de forma generalizada para todo el macizo rocoso a partir del modelo de bloques de RMR generado para la zona de estudio; dicho modelo incorpora las variables obtenidas de los levantamientos de macizo rocoso realizados durante la etapa de construcción. La Figura 2-103 muestra la distribución del valor RMR de todos los levantamientos en el sector de margen izquierda, así como su evaluación estadística mostrando valores medios, máximos cuartiles etc.

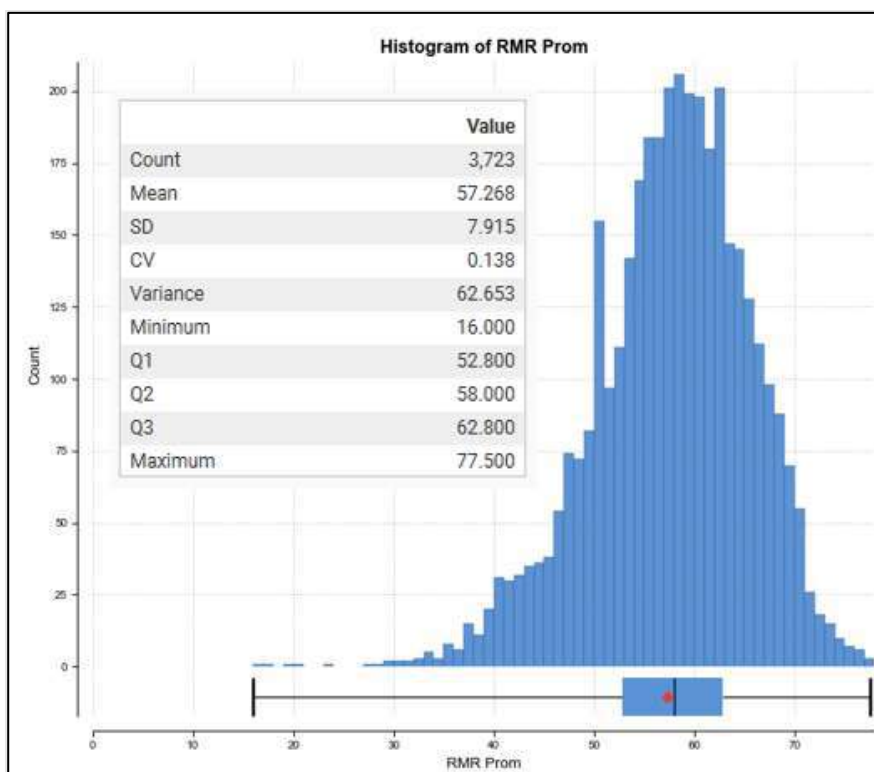


Figura 2-103 RMR promedio obtenidos a partir de la información recopilada de los levantamientos geológicos efectuados durante construcción.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

De la anterior figura se aprecia que, el macizo rocoso del proyecto se puede clasificar entre aceptable y bueno, teniendo en cuenta que la existencia de estructuras de debilidad como fallas y cizallas a lo largo de las excavaciones, algunas más persistentes que otras pero que son controladas. Adicionalmente, se aprecia presencia de valores del RMR bajos, que se asocian de manera general a condiciones puntuales donde en el frente de excavación presenta algunas estructuras de debilidad o cizallas, y que no son continuas o no se extienden de manera que afecten de forma global el comportamiento de una excavación.

La clasificación general del macizo rocoso RMR fue ajustada por efectos de meteorización, esfuerzos *in situ*, orientación de las estructuras y efectos asociados al agua y al proceso de voladura, y se determinó la Clasificación Minera del Macizo Rocos, MRMR (Mining Rock Mass Rating).

El ajuste por meteorización se realiza de manera generalizada e instantánea y comprende una reducción del 5% en el valor del RMR, es decir un factor de ajuste igual a 0,95; dicho ajuste se considera conservador ya que las zonas donde se localizan las excavaciones no presentan condiciones adversas que potencien la meteorización y se presenta un macizo rocoso competente. Este 5% se incluye por el cambio del régimen hidrogeológico del macizo rocoso

debido a la presencia del embalse que se toma para la cota de operación máxima (420 m s.n.m.)

El ajuste por orientación de las estructuras se asume con un factor igual al 1, teniendo en cuenta que este fue considerado en los cálculos para el RMR. Adicionalmente, prácticamente el 100% de las obras se encuentran construidas y cada una de ellas cuenta con un soporte suficiente para contener la influencia de las estructuras en la estabilidad de las excavaciones.

El ajuste por efectos de voladura y agua no se considera en la aplicación de la metodología (Laubscher, 1994) debido a que estos efectos se establecen en un contorno inmediato de las excavaciones y los efectos del agua son considerados únicamente en el nivel de meteorización.

Para el ajuste por esfuerzos *in situ*, se establece que, para las condiciones del macizo rocoso ante las áreas libres producto de las excavaciones, la redistribución de esfuerzos no genera un efecto ni positivo ni negativo en el valor del RMR, lo que sería una condición conservadora teniendo en cuenta que el macizo rocoso de manera general cuenta con un alto valor de esfuerzos en la componente horizontal<sup>1</sup> (lo que genera confinamiento ante procesos de deslizamiento de cuñas y propagación de hundimiento) y adicionalmente, se presenta una condición favorable de la orientación de los esfuerzos respecto a las estructuras geológicas principales correspondientes a la foliación (20°/100°) y a la diaclasa con disposición 70°/270°. Esto se verifica a través de modelaciones numéricas utilizando como excavaciones las cavernas de la central, las cuales corresponden al sector con mayores esfuerzos inducidos producto de la excavación y con mayores áreas en planta como se muestra en la Figura 2-104.

A partir de estos resultados, se observa que los esfuerzos inducidos son menores a la resistencia de la roca lo que impide que se genere el fallo del material. Se adopta entonces para este ajuste con un valor de 100%.

---

<sup>1</sup> Ver documento I-M-2194-060-GYG-01

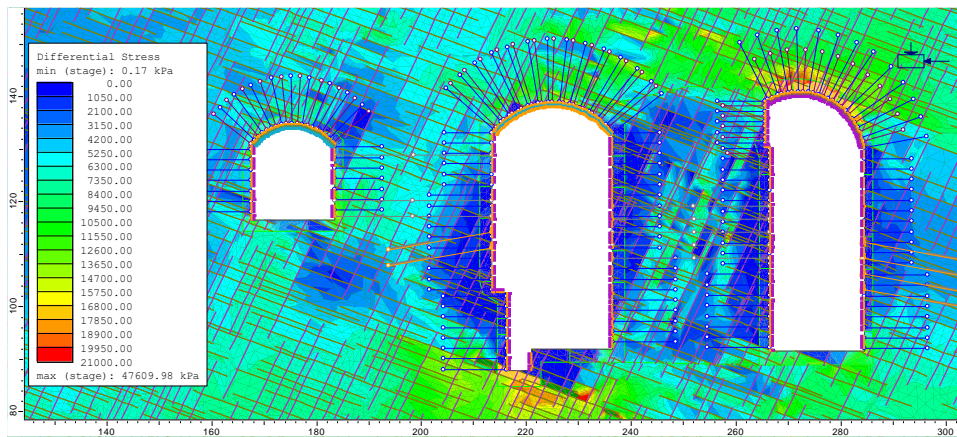


Figura 2-104 Resultados esfuerzos desviadores para las cavernas de la central. (Esfuerzo en kPa).

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

La anterior condición se explica tomando el esquema indicado en la Figura 2-100 añadiendo la trayectoria de esfuerzos para una situación donde se presenta hundimiento y para otra donde no se logra una magnitud tal que la relación esfuerzos/resistencia permita la propagación del hundimiento. En la Figura 2-105 se ilustra en el punto “b” la situación que aplica para el PHI, teniendo en cuenta que esta es la premisa de diseño para el soporte de las excavaciones, donde se busca reforzar el material de excavación de manera que este tenga la capacidad de auto-soportarse.

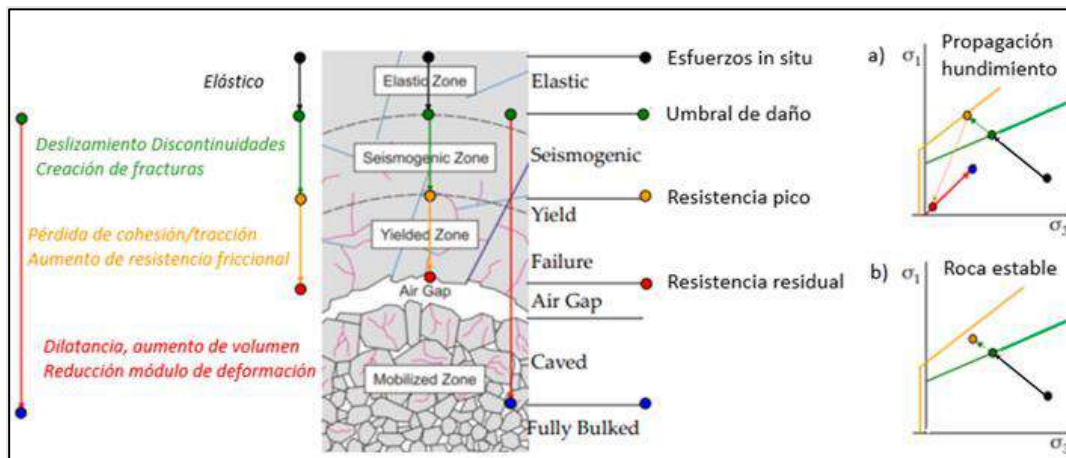


Figura 2-105 Trayectorias de esfuerzos para la generación o detención de hundimiento.

Fuente: Modificado de Duplancic and Brady, 1999

En la Figura 2-103.

Tabla 2-19 se presentan los valores para el MRMR de acuerdo con los ajustes establecidos para cada ítem, utilizando valores representativos del RMR según lo presentado en la Figura 2-103.

Tabla 2-19 Cálculo del MRMR general del proyecto Ituango.



Cálculo MRMR							
Caso	RMR	Meteorización	Orientación	Voladura	Esfuerzos	MRMR	Clase MRMR
Valor inferior	40	95	100	100	100	38	IV
Valor intermedio	50	95	100	100	100	48	III
Percentil mayor	63	95	100	100	100	60	III

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Finalmente, se utiliza el gráfico propuesto por Laubscher para los valores límites de la Figura 2-103.

Tabla 2-19 y los radios hidráulicos indicados en la Figura 2-106. Estos radios hidráulicos abarcan todas las excavaciones subterráneas del proyecto, incluyendo galerías, túneles y cavernas, siendo estas últimas las de mayor dimensión alcanzando áreas en planta de hasta 5.800 m<sup>2</sup> resultando en un radio hidráulico de aproximadamente 11.

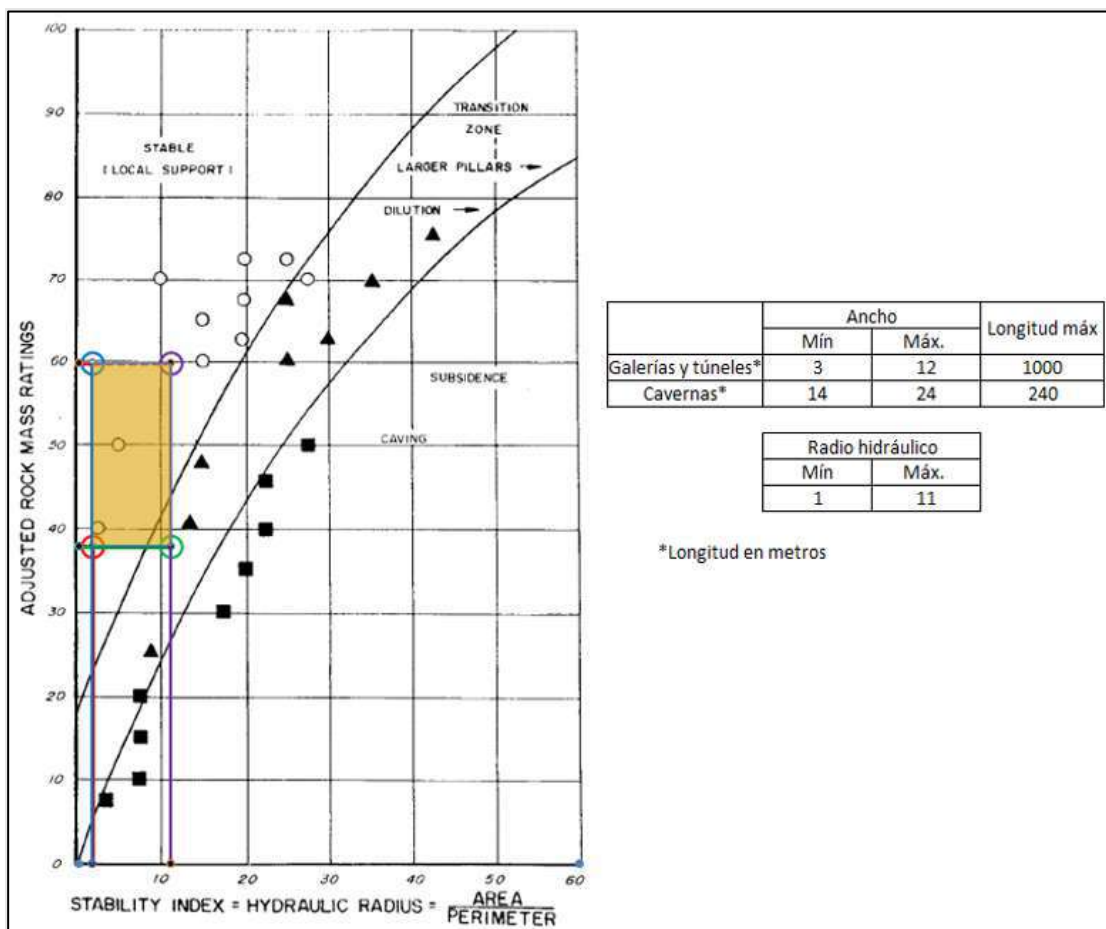


Figura 2-106 Área de dominio a la susceptibilidad de subsidencia en el proyecto hidroeléctrico Ituango.

Fuente: Modificado de (Laubscher, 1994).

El anterior ejercicio se ha realizado de manera particular para cada uno de los frentes de excavación subterráneos en el proyecto (ver Figura 2-107), que incluye las cavernas, túneles con diámetros mayores a 7 m, galerías medianas con diámetros entre 4 y 6 m y galerías menores con diámetros menores a 4 m.

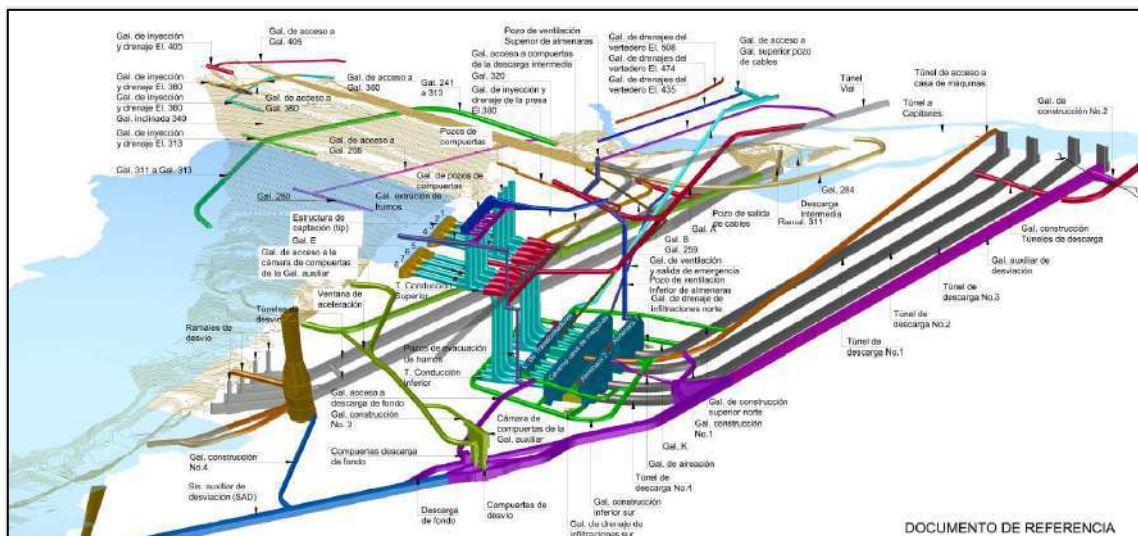


Figura 2-107 Isométrico general de obras subterráneas PHI.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Para cada uno de los frentes se obtuvo el registro de levantamientos geológicos y valores de calidad del macizo rocoso a partir del RMR, y se consideraron los valores promedios. Por otro lado, se considera que, los frentes con valores de RMR por debajo de 20, corresponden normalmente a los levantamientos de estructuras de debilidad como cizallas o fallas que no son continuas en la extensión de la excavación, sino en sitios puntuales.

En la Tabla 2-20, Tabla 2-21, Tabla 2-22 y Tabla 2-23 se describen las obras consideradas para el análisis y las características requeridas para usar la metodología expuesta. Para cada frente se describe la longitud de la excavación el ancho en planta, el valor de MRMR y radio hidráulico, con estos estos dos últimos valores se obtiene el gráfico propuesto por Laubscher. (Ver Figura 2-108).

Tabla 2-20 Frentes de Cavernas PHI y sus características de calidad y radio hidráulico.

FRENTE	LONGITUD [m]	ANCHO [m]	MRMR	RH [m]
Caverna Casa de Maquinas	240	23,0	53	10,5
Almenara 2	100	18,0	49	7,6
Almenara 1	100	18,0	59	7,6
Caverna de Transformadores	218	16,0	59	7,5

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Tabla 2-21 Frentes de túneles mayores PHI y sus características de calidad y radio hidráulico.

FRENTE	LONGITUD [m]	ANCHO [m]	MRMR	RH [m]
Túneles de desviación principales	2012	14,5	48	7,2

Galería de pozos de compuertas	119	13,5	54	6,1
Túneles de descarga (Túneles 1, 2 y 3)	2975	12,8	52	6,4
Pozos de compuertas	132	11,2	55	5,2
Túnel de Aspiración 1 a 8 Datos por cada una de las aspiraciones	30	10,9	55	4,0
Ramales 1 a 8 - Galería de construcción D	338	8,8	53	4,3
Túnel descarga intermedia - aguas abajo	394	8,6	44	4,2
Túnel descarga intermedia - aguas arriba	472	8,2	46	4,0
Galería Superior De Pozo de Cables	95	8,2	50	3,8
Túnel de Acceso Casa de Maquinas	950	7,5	55	3,7
Galería de conexión presa - vertedero de cota 284	548	7,5	53	3,7
Ramal auxiliar galería 284	107	7,5	56	3,5
Galería de Comunicación Entre Almenaras	41	7,0	48	3,0
Galería de acceso a la cámara de compuertas	639	7,0	55	3,5

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Tabla 2-22 Frentes de galerías medianas PHI y sus características de calidad y radio hidráulico.

FRENTE	LONGITUD [m]	ANCHO [m]	MRMR	RH [m]
Galería de construcción No. 2	50	6,4	48	2,8
Galería de Construcción Inferior sur a norte	883	6,4	49	3,2
Túnel de Conducción Inferior 1 a 8+ zona codo + ramal de construcción	109	6,4	50	3,0
Galería de construcción A	631	6,4	51	3,2
Galería de construcción B	120	6,4	50	3,0
Galería de construcción D	202	6,4	54	3,1
Galería de acceso a cámara de la descarga de fondo	196	6,4	53	3,1
Galería de Construcción Túneles de Conducción Inferior 1-4	67	6,4	60	2,9
Galería auxiliar de Acceso Almenara 1 por TACM	17	6,4	56	2,3
Galería auxiliar de Acceso Almenara 2 por TACM	17	6,4	63	2,3
Galería de construcción No. 1	158	6,4	58	3,1
Galería Inferior Pozo de Ventilación por Almenara 1	18	6,4	65	2,3
Túnel de la cámara de la descarga de fondo	296	6,3	56	3,1
Galería superior de humos	159	6,0	54	2,9
Galería de comunicación entre pozos	114	6,0	49	2,8
Galería intermedia de humos	22	6,0	55	2,4
Galería de Construcción superior sur	237	5,0	49	2,4
Galería de construcción C	90	5,0	48	2,4
Galería de construcción No. 3	99	5,0	53	2,4
Galería de construcción de cota 405	38	5,0	49	2,2
Galería de construcción E	155	5,0	54	2,4
Galería de Construcción superior Norte	275	5,0	62	2,5
Galería de construcción F	41	5,0	59	2,2
Galería de Barras 1 a 8	30	5,0	62	2,1
Pozo Salida de Cables	336	4,9	57	2,4
Galería de construcción 474 a Gal superior. de pozo de cables	33	4,8	57	2,1
Galería de Ventilación y Evacuación	334	4,0	58	2,0
Túneles de conducción superior	588	3,8	32	1,9

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Tabla 2-23 Frentes de galerías menores PHI y sus características de calidad y radio hidráulico.

<b>FRENTE</b>	<b>LONGITUD [m]</b>	<b>ANCHO [m]</b>	<b>MRMR</b>	<b>RH [m]</b>
<i>Galería de drenaje 508</i>	241	3,0	41	1,5
<i>Galería de Inyección y Drenaje de cota 250</i>	120	3,0	42	1,5
<i>Galería de Inyección y Drenaje de cota 380</i>	71	3,0	46	1,4
<i>Galería de drenaje 515</i>	71	3,0	38	1,4
<i>Galería exploratoria a la cota 357</i>	66	3,0	42	1,4
<i>Galería de acceso a la cota 313</i>	871	3,0	52	1,5
<i>Galería de inyección y drenaje cota 380</i>	153	3,0	54	1,5
<i>Galería de drenaje 435</i>	421	3,0	57	1,5
<i>Galería de drenaje 474</i>	306	3,0	60	1,5
<i>Galería de inyección y drenaje cota 320</i>	184	3,0	53	1,5
<i>Galería de Inyección y Drenaje de cota 313</i>	100	3,0	54	1,5
<i>Galería de Interconexión de tuberías</i>	32	3,0	58	1,4
<i>Galería de inyección y drenaje cota 265</i>	116	3,0	60	1,5
<i>Galería de acceso a cota 405</i>	214	2,5	41	1,2
<i>Galería de acceso a la cota 380 y Bypass</i>	190	2,5	45	1,2
<i>Galería de acceso a la cota 357</i>	118	2,5	50	1,2
<i>Galería de acceso a la cota 250</i>	390	2,5	57	1,2
<i>Galería de Inyección y Drenaje sitio 7</i>	149	3,0	35	1,5

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

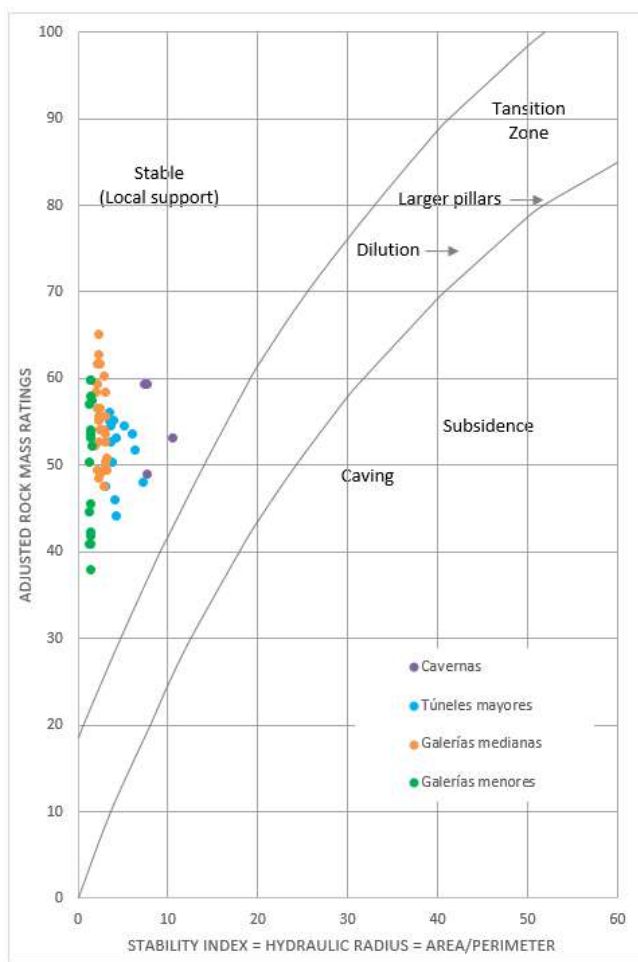


Figura 2-108 Análisis de subsidencia para las diferentes excavaciones subterráneas PHI.

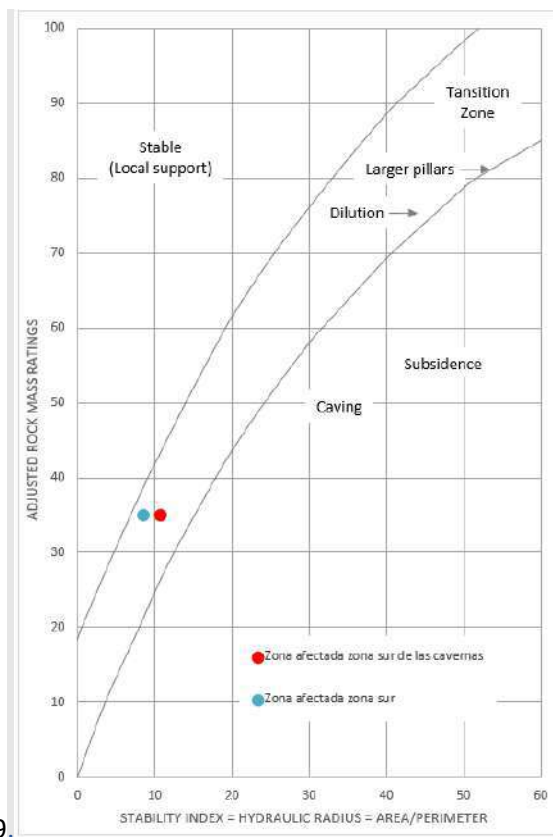
Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Del análisis anterior, no se evidencia potencial subsidencia en las obras subterráneas bajo las premisas definidas para el proyecto Ituango; es de resaltar que se tiene un factor adicional de seguridad correspondiente al hecho que las obras se encuentran soportadas en su totalidad y el método expuesto no contempla este.

De manera particular, se ha realizado el análisis para la zona de afectación del sector sur del complejo de las cavernas (ver Figura 2-109); este análisis se realiza teniendo en cuenta que, pese a no ser una excavación, se presenta un alto nivel de desconfinamiento y afectación del macizo rocoso, producto de la contingencia y que genera un sector de debilidad para la estabilidad global de la margen derecha. Para el análisis se toma la sección y área en planta de la zona, delimitada por exploración directa y acceso a través de la rehabilitación de las galerías. Los parámetros tenidos en cuenta para el análisis corresponden a los descritos en la Figura 2-109.



El valor de calidad del macizo rocoso ha sido definido conforme las evidencias y seguimiento realizado en sitio, para el sector se adoptó un valor de RMR de 40. Los resultados obtenidos



para el análisis se muestran en la Figura 2-109.

Figura 2-109 Zona de afectación del macizo rocoso en sector sur de las cavernas y análisis de subsidencia.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

#### 2.2.4.4.2 Evaluación de subsidencia por el método de Anagnostou y Kovari (1994)

Teniendo en cuenta las consideraciones del análisis de subsidencia a partir del método de (Anagnostou & Kovari, 1994) aplicadas para las excavaciones en fase construcción. Para el PHI, aplicaría para las galerías que se encuentran en diseño y que están proyectadas para mejorar las condiciones de estabilidad de algunos taludes de las vías de acceso del proyecto. Estas galerías tienen como propósito el de servir como sistema de drenaje principal de las aguas retenidas en los taludes y aliviar las presiones generadas al interior del suelo que tienden a alterar la estabilidad del sitio. Dichas galerías se caracterizan por tener una sección máxima de 3,0 m x 3,5 m.

Para la galería de drenaje en fase de diseño en el sitio de depósito de materiales Humagá 2, cuya localización se muestra en la Figura 2-110, se consideran los parámetros para la evaluación que corresponden a los valores mínimos obtenidos de una serie de ensayos realizados para este material, los cuales se resumen a continuación:



Figura 2-110 Localización y alineamiento preliminar galería de drenaje Humagá 2.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

En el sector se encuentra predominancia de esquistos, rocas metamórficas con estructura esquistosa de color negro con bandas blancas, y en ocasiones texturas miloníticas evidenciado en la presencia de porfidoblastos, compuesta por grafito, cuarzo paralelo a la foliación y cantidades menores de sulfuros. Esta unidad es la más representativa del área de estudio y se observa sobre la margen derecha de la quebrada del puente 57, margen izquierda del puente 56, margen izquierda del río Cauca, vía al depósito de Humagá y vía a la vereda San Antonio. En ocasiones los esquistos se presentan altamente deformados, interpretación que se hace por el cambio constante en la dirección y ángulo de buzamiento de su foliación, así como por la presencia de zonas plegadas. Es importante anotar que los esquistos que son afectados por estructuras regionales y planos de cizalla intrafoliares, pueden alcanzar tamaños de arcilla con consistencia muy blanda y alta plasticidad.

Sobre esta unidad se encuentran depósitos de flujo de detritos, cuyos espesores pueden llegar hasta 52,0 m. Estos se constituyen por un 80% de bloques de formas angulosas a subredondeadas, de esfericidad media a baja con tamaños entre los 0,15 a 4,0 m, constituidos mayormente por rocas metamórficas, principalmente esquistos cloríticos, y gneises cuarzo feldespáticos, envueltos por una matriz arenosa con fracciones limosas de color amarillo claro.

Eventualmente los esquistos pueden estar cubiertos por depósitos de vertiente más recientes, matriz soportados, con espesores identificados de hasta 13,8 m.

Para el diseño de la galería se realizaron perforaciones exploratorias con recuperación de testigos para mejor caracterización del sitio; se extrajeron muestras para ensayos en suelo y roca en laboratorio, para los primeros, se obtuvo los resultados descritos en la Tabla 2-24.

Tabla 2-24 Resultados de ensayos de compresión de muestras de suelos (Humagá 2).

ID	21-168-01	21-168-04	21-168-11
----	-----------	-----------	-----------

ID	21-168-01	21-168-04	21-168-11
Descripción	Arcilla arenosa de baja plasticidad color beige con presencia de gravas.	Arena limo arcillosa color beige con presencia de pocas gravas.	Grava y arena limo arcillosa color beige
Profundidad (m)	70,83 - 70,99	30,20 - 30,36	69,91 - 70,07
Esfuerzo máximo $q_u$ (kPa)	1479	442	739
Def. al instante de la falla (%)	2	1,8	1,8
Resistencia al Corte $S_u$ (kPa)	739,3	221,2	369,6
Densidad Húmeda ( $kN/m^3$ )	21,47	24,74	21,39
Densidad Seca ( $kN/m^3$ )	21,36	24,66	21,3
Clasificación USCS	Arcilla de baja plasticidad	Arena limo-arcillosa	Grava limo-arcillosa
Clasificación AASHTO	Suelo limoso	Suelo limoso	Suelo limoso
% gravas	18,6	20	31,7
% arenas	22,8	36,1	26,6
% finos	58,6	43,9	41,7

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, para el análisis de subsidencia se tienen en cuenta las siguientes premisas:

- Se considera una sección de 3,0 m x 3,5 m
- Se toman los valores mínimos de los ensayos de laboratorio
- Se considera la ecuación para el empuje S variando el ángulo  $\omega$  el cual define la geometría de la cuña.
- finalmente se considera una cobertura de 45 m en suelo siendo esta la máxima y la que genera mayor peso en el prisma.

Los parámetros considerados se describen en la Figura 2-111.

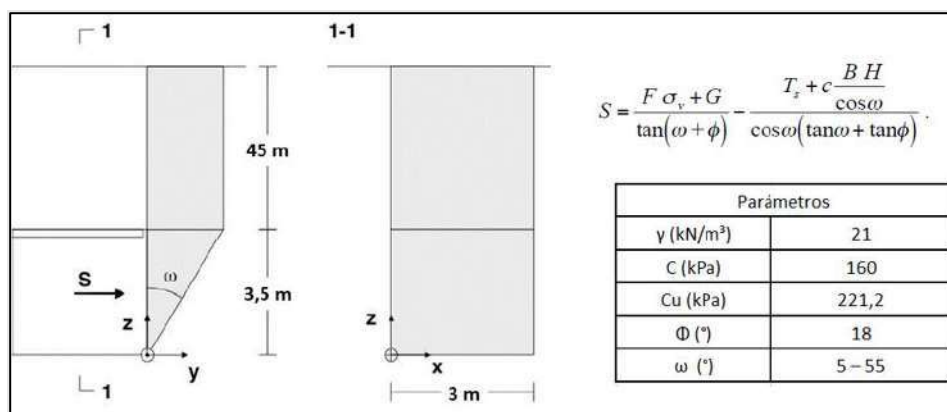


Figura 2-111 Geometría y parámetros de análisis en frente de excavación.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

El resultado del anterior ejercicio se presenta en la Figura 2-112, donde se evidencia que utilizando factores de seguridad de 1, 1,5 y 2, se obtienen valores negativos del empuje S, lo que indica que la condición del frente para los parámetros definidos es estable y no se requiere

la aplicación de soporte para evitar desplazamientos que generen procesos de subsidencia. Es de resaltar que la sección de excavación favorece la estabilidad del frente, y no se hace necesario evaluar de manera detallada las condiciones de cobertura de la galería.

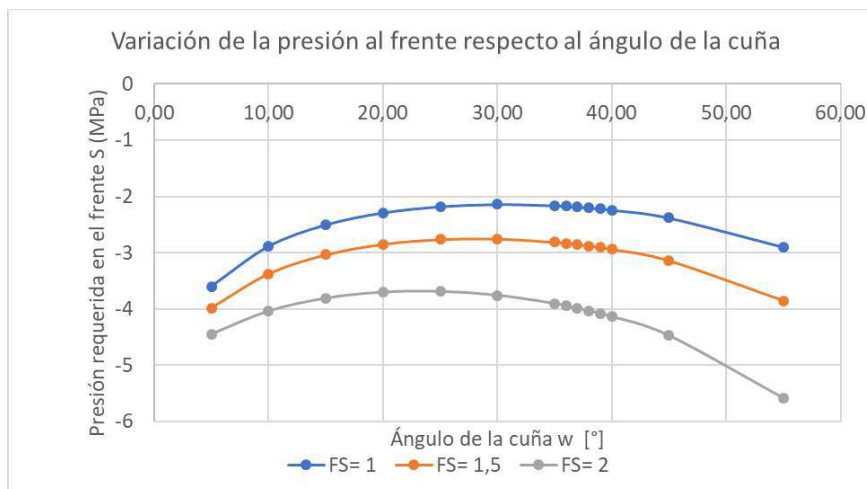


Figura 2-112 Resultados del empuje S para diferentes ángulos de cuña.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

#### 2.2.4.4.3 Conclusiones

- Para el análisis de subsidencia mostrados en este documento se tuvo en cuenta las siguientes premisas:
  - Los factores generadores de una subsidencia son múltiples, no obstante, para el análisis se consideran solo los efectos por excavación en profundidad en macizo rocoso y suelo.
  - Se tienen en cuenta dos metodologías de análisis: subsidencia para obras de baja cobertura método de (Anagnostou & Kovari, 1994) y para excavaciones en coberturas mayores método de (Laubscher, 1994).
  - Se realizó el análisis de subsidencia a bajo el método de (Laubscher, 1994) de manera global cubriendo la sección mayor en excavación que se tiene en el proyecto que es la caverna de casa de máquinas, de manera más específica para cada uno de los frentes de excavación subterránea y de forma particularizada para la zona afectada de macizo rocoso en el sector sur de las cavernas; para los análisis de subsidencia en bajas coberturas se enfocó el análisis en obras durante construcción por la metodología aplicada, por lo que se particularizó para la galería de drenaje en el depósito de Humagá 2 (en diseño), por presentar tramos en suelo.
  - Las metodologías están basadas en excavaciones sin soporte, por lo que no se tiene previsto influencia en el fallo del soporte con el tiempo.
- De los análisis se obtiene que para ningún sector o frente subterráneo del proyecto se tiene probabilidad de subsidencia.

#### **2.2.4.5 Caracterización de amenaza por modos de falla de la presa**

La identificación de los posibles modos de fallo siguió las directrices de la Comisión Federal Reguladora de la Energía (FERC) de Estados Unidos sobre el análisis de los posibles modos de fallo. Estas directrices se presentan en las “Directrices de Ingeniería para la Evaluación de Proyectos Hidroeléctricos”, Capítulo 14, Sección 14.3.3 (FERC, 2017). El proceso realizado para Ituango, al estilo de la FERC permitió al equipo reunido realizar una lluvia de ideas sobre los PFM aplicables a la presa.

El propósito específico del PFMA, en lo que concierne a la presa y a la evaluación estricta de la amenaza, es:

- Identificar los modos probables de falla o factores que pueden contribuir a la materializar la amenaza de falla de la presa, relacionados con la operación del proyecto hidroeléctrico.
- Considerar las amenazas que pueden indirectamente afectar la presa (por ejemplo los asociados con taludes adenaños, etc.,).
- Identificar los modos probables de falla estructurales, considerando las características propias del cuerpo de la presa
- Mejorar el programa de monitoreo e inspección visual de la presa.
- Ayudar a identificar las medidas de mitigación del riesgo más efectivas, incluyendo los planes de emergencia.

En el caso específico de la presa de Ituango, la información técnica revisada correspondió a:

- Características generales del proyecto
- Procedimientos de operación
- Geología y riesgo sísmico
- Hidrología/hidráulica
- Revisión del plan de monitoreo e instrumentación
- Análisis de estabilidad de la estructura
- Características de las estructuras de descarga
- Identificación de las deficiencias
- Evaluación de los modos probables de falla e identificación de los modos potenciales

##### **2.2.4.5.1 Análisis y evaluación de la amenaza**

Los PFM se documentaron en tablas que constan en Hatch (2021). Las PFM se organizaron además en cada tabla en función de las condiciones operativas: normales “N”, hidrológicas “H” y sísmicas/post-sísmicas “S”.

De acuerdo con las directrices de la FERC, cada modo de fallo se clasificó como categoría I, II, III o IV:



- Categoría I - Modo de fallo potencial - Destacado. Esto significa que se consideran potenciales por la ocurrencia, magnitud de las consecuencias y probabilidad de respuesta adversa (físicamente posible, condiciones razonables y creíbles)
- Categoría II - Modo de fallo potencial - Considerado, pero no destacado. Quiere decir que son de menor significancia y probabilidad de ocurrencia que la categoría I.
- Categoría III - Se necesita más información o análisis para clasificar. Es decir, que se ha identificado información faltante para un juicio confiable (la información debe ser reunida para identificar si se requieren medidas)
- Categoría IV - Modo de fallo potencial – Descartado. En otras palabras, puede ser que la posibilidad física no exista, la información existente permite eliminar las preocupaciones o no son razonables o no creíbles.

Además de las cuatro categorías, cada modo de fallo se clasificó en función del tiempo disponible para responder al evento:

- A - Tiempo de respuesta limitado (de minutos a horas).
- B - Tiempo de respuesta corto (de días a semanas).
- C - Tiempo de respuesta largo (de semanas a meses o incluso años).

La calificación de la probabilidad de ocurrencia de cada factor contribuyente se hizo sobre una base cualitativa utilizando el juicio de los expertos a partir de la experiencia de EPM y del grupo en su conjunto. Las probabilidades de ocurrencia de cada PFMA se clasificaron cualitativamente como muy bajas/remotas “VL” (very low), bajas “L” (low), moderadas/medias “M” (medium), altas “H” (high) o extremas “E” (extreme), basándose en la clasificación de presas de la Asociación Canadiense de Presas (CDA) y en el juicio de expertos, teniendo en cuenta el árbol de eventos que conduce al PFM, respectivamente. Estas calificaciones están basadas en las matrices sugeridas por Vick, *The Use and Abuse of Risk Analysis* (2014).

El resumen de la calificación de todos los factores contribuyentes para la amenaza de fallo de la presa se presenta en la Tabla 2-25 y Tabla 2-26, teniendo en cuenta sus aspectos estructurales y otros factores externos. Como se observa en dichas tablas, sólo son asignados valores de probabilidad a los riesgos tipo I y II que son los de mayor importancia, tal y como explicado antes.

Tabla 2-25 PFM o factores que contribuyen la amenaza de falla de la presa (asociados con la estructura y el funcionamiento de los órganos de descarga).

Código del PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
D-N-1	Seepage through the core under the cement bentonite wall that cause piping at the core / rock fill interface causing downstream slope failure	Filtración a través del núcleo, por debajo de la pantalla CB, lo cual provoca la formación de tubificaciones (erosión) en la interfaz entre el núcleo y el enrocado, y esto a su vez provoca la falla del talud aguas abajo	IV	
D-N-2	Upstream inclined clay liner pipes into rock fill due to	El núcleo inclinado del lleno prioritario de aguas arriba tubifica (erosiona)	IIC	L

Código del PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
	defect in the CB wall creates a void and causes upstream slope instability	hacia el interior del enrocado debido a un defecto en la pantalla CB, lo cual a su vez crea un vacío y causa inestabilidad en el talud aguas arriba		
D-N-3	Inefficiency of cut-off wall due to construction sequencing and potential defects	Ineficiencia de la pantalla CB debido a la secuencia de construcción y posibles defectos constructivos	IV	
D-N-4	Right abutment seepage through the rock due to "windows" in the grout curtain and localized geological conditions leading to piping of the core into the abutment	Filtración en el estribo derecho a través de la roca debido a "ventanas"/espacios en la cortina de inyección y condiciones geológicas localizadas, lo cual lleva a tubificaciones (erosión) del núcleo.	II C	L
D-N-5	Seepage through right abutment embankment core contact with the concrete wall between El. 418 and El. 433 due to inadequate compaction of the 1A fill (core) material allowing seepage along contact leading to piping, settlement of the crest and overtopping	Filtración a través del contacto del núcleo en el estribo derecho con el muro de hormigón entre El. 418 y El. 433. Esto debido a la compactación inadecuada del material de relleno 1A (núcleo) que permite la filtración a lo largo del contacto, lo cual lleva posteriormente a tubificaciones (erosión), al asentamiento de la cresta y al desbordamiento	IV	
D-N-6	Left abutment seepage through gaps in the "secant" concrete wall leading to erosion of the shear zone in the left abutment rock leading to downstream slope failure	Filtración por el estribo izquierdo a través de espacios en el muro de pilas secantes, lo cual conduce a la erosión de las zonas de cizallas presentes en el macizo de dicho sector, provocando así la falla del talud aguas abajo	IV	
D-N-7	Unmonitored piping/excessive seepage in the lower half of the dam, where instrumentation was not installed.	Tubificaciones (erosión) no monitoreadas/filtraciones excesivas en la mitad inferior de la presa, donde no se instaló instrumentación.	II C	VL
D-N-8	Seepage through right abutment embankment core contact with the concrete wall between El. 418 and El. 433 due to settlement of the dam and shearing along the contact allowing seepage leading to piping, settlement of the crest and overtopping	Filtración a través del contacto del núcleo en el estribo derecho con el muro de hormigón entre El. 418 y El. 433 debido al asentamiento de la presa y a la cortante a lo largo del contacto, permitiendo que a partir de las filtraciones se generen tubificaciones (erosión), asentamiento de la cresta y el desbordamiento	IV	

Código del PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
D-N-9	Rock fill settles and creates a tear in the cement-bentonite wall, excessive seepage results in piping of inclined core materials occurs leading to upstream slope failure	El enrocado se asienta y crea un desgarro en la pantalla CB, la filtración excesiva da como resultado la tubificación (erosión) del núcleo inclinado del lleno prioritario, lo cual conlleva a la falla del talud aguas arriba	II B	L
D-N-10	Seepage increases on the left abutment contact around gallery at El. 250 due to unfinished consolidation grout curtain.	La filtración aumenta en el contacto por el estribo izquierdo, alrededor de la galería en El. 250, debido a trabajos inconclusos de la cortina de inyecciones	II C	VL
D-N-11	Gates fail in open position, rapid draw down occurs, El. 420 to El. 401, causing upstream slope failure	Las compuertas del vertedero fallan en la posición abierta lo que produce un desembalse rápido entre El. 420 a El. 401, causando la falla del talud aguas arriba	IV	
D-N-12	Failure of right diversion tunnel plug leads to an uncontrolled release down to El. 210	La falla del tapón natural del túnel de desviación derecho lleva a un desembalse descontrolado hacia El. 210	I A	L
D-N-13	Left abutment old landslide is activated and debris loads the upstream slope and crest causing a local failure of the dam and overtopping	Antiguo deslizamiento presente en la margen izquierda se activa y como consecuencia, los escombros resultantes de dicha inestabilidad cargan el talud aguas arriba y la cresta, lo cual provoca posteriormente una falla local de la presa y el desbordamiento	II B	VL
D-N-14	Left abutment roadway tunnel at El. 313 collapses causes damage to the core due to hydro jacking	El túnel vial del estribo izquierdo en El. 313 se derrumba, provocando así daños en el núcleo debido al levantamiento hidráulico (hidrogateo)	IV	
D-H-1	Seepage through the core under the cement bentonite wall that cause piping at the core / rock fill interface causing downstream slope under a flood event.	Filtración a través del núcleo, por debajo de la pantalla CB, lo cual provoca la formación de tubificaciones (erosión) en la interfaz entre el núcleo y el enrocado, y esto a su vez provoca la falla del talud aguas abajo	IV	
D-H-2	Upstream inclined clay liner pipes into rock fill due to defect in the CB wall creates a void and causes upstream slope instability during a flood event.	El núcleo inclinado del lleno prioritario de aguas arriba tubifica (erosiona) hacia el interior del enrocado debido a un defecto en la pantalla CB, lo cual a su vez crea un vacío y causa inestabilidad en el talud aguas arriba durante un evento de creciente	II B	VL

Código del PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
D-H-3	Inefficiency of cut-off wall due to construction sequencing and potential defects during flood event results in excess of seepage.	Ineficiencia de la pantalla CB debido a la secuencia de construcción y posibles defectos constructivos, durante un evento de creciente, lo cual resulta en exceso de filtraciones	IV	
D-H-4	Right abutment seepage through the rock due to "windows" in the grout curtain and localized geological conditions leading to piping of the core into the abutment under flood conditions.	Filtración en el estribo derecho a través de la roca debido a "ventanas"/espacios en la cortina de inyección y condiciones geológicas localizadas, lo cual lleva a tubificaciones (erosión) del núcleo durante un evento de creciente	II C	VL
D-H-5	Seepage through right abutment embankment core contact with the concrete wall between El. 418 and El. 433 due to inadequate compaction of the 1A fill (core) material allowing seepage along contact leading to piping, settlement of the crest and overtopping during a flood event.	Filtración a través del contacto del núcleo en el estribo derecho con el muro de hormigón entre El. 418 y El. 433. Esto debido a la compactación inadecuada del material de relleno 1A (núcleo) que permite la filtración a lo largo del contacto, lo cual lleva posteriormente a tubificaciones (erosión), al asentamiento de la cresta y al desbordamiento, durante un evento de creciente	IV	
D-H-6	Left abutment seepage through gaps in the "secant" concrete wall between elevations 330 and 408m leading to erosion of the shear zone in the left abutment rock leading to downstream slope failure	Filtración por el estribo izquierdo a través de espacios en el muro de pilas secantes entre elevaciones 330 y 408, lo cual conduce a la erosión de las zonas de cizallas presentes en el macizo de dicho sector, provocando así la falla del talud aguas abajo, durante un evento de creciente	II C	L
D-H-7	Unmonitored piping/excessive seepage in the lower half of the dam, where instrumentation was not installed.	Tubificaciones (erosión) no monitoreadas/filtraciones excesivas en la mitad inferior de la presa, donde no se instaló instrumentación, durante un evento de creciente	II C	VL
D-H-8	Seepage through right abutment embankment core contact with the concrete wall between El. 418 and El. 433 due to settlement of the dam and shearing along the contact allowing seepage leading to	Filtración a través del contacto del núcleo en el estribo derecho con el muro de hormigón entre El. 418 y El. 433 debido al asentamiento de la presa y a la cortante a lo largo del contacto, permitiendo que a partir de las filtraciones se generen tubificaciones (erosión), asentamiento de la cresta y	II C	VL

Código del PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
	pipng, settlement of the crest and overtopping during a flood event.	el desbordamiento, durante un evento de creciente		
D-H-9	Rock fill settles and creates a tear in the cement-bentonite wall, excessive seepage results in piping of inclined core materials occurs leading to upstream slope failure during a flood event.	El enrocado se asienta y crea un desgarro en la pantalla CB, la filtración excesiva da como resultado la tubificación (erosión) del núcleo inclinado del lleno prioritario, lo cual conlleva a la falla del talud aguas arriba, durante un evento de crecientes	II C	VL
D-H-10	Seepage increases on the left abutment contact around gallery at El. 250 due to defects in consolidation grout curtain.	La filtración aumenta en el contacto por el estribo izquierdo, alrededor de la galería en El. 250, debido a trabajos inconclusos de la cortina de inyecciones, durante un evento de crecientes	II C	L
D-H-11	Gates fail in open position, rapid draw down occurs, El. 420 to El. 401, causing upstream slope failure	Las compuertas del vertedero fallan en la posición abierta lo que produce un desembalse rápido entre El. 420 a El. 401, causando la falla del talud aguas arriba, durante un evento de crecientes	IV	
D-H-12	Left abutment old landslide is activated and debris loads the upstream slope and crest causing a local failure of the dam and overtopping	Antiguo deslizamiento presente en la margen izquierda se activa y como consecuencia, los escombros resultantes de dicha inestabilidad cargan el talud aguas arriba y la cresta, lo cual provoca posteriormente una falla local de la presa y el desbordamiento, durante un evento de creciente	IV	
D-H-13	Left abutment roadway tunnel at El. 313 collapses causes damage to the core due to hydro jacking	El túnel vial del estribo izquierdo en El. 313 se derrumba, provocando así daños en el núcleo debido al levantamiento hidráulico (hidrogateo), durante un evento de creciente	IV	
D-H-14	Settlement of the rockfill causes tearing CB wall at the upper end and resulting in piping of the core.	El asentamiento del enrocado provoca el desgarro de la pantalla CB en el extremo superior y provoca la formación de tubificaciones (erosión) en el núcleo, durante un evento de creciente	II B	VL
D-H-15	Failure of right diversion tunnel plug leads to an uncontrolled release down	La falla del tapón natural del túnel de desviación derecho lleva a un desembalse descontrolado hacia El.	I A	VL



Código del PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
	to El. 210	210, durante un evento de creciente		
D-S-1	Seepage through the core under the cement bentonite wall that cause piping at the core / rock fill interface causing downstream slope under a seismic event.	Filtración a través del núcleo, por debajo de la pantalla CB, lo cual provoca la formación de tubificaciones (erosión) en la interfaz entre el núcleo y el enrocado, y esto a su vez provoca la falla del talud aguas abajo, durante un evento sísmico	IV	
D-S-2	Upstream inclined clay liner pipes into rock fill due to defect in the CB wall creates a void and causes upstream slope instability during a seismic event.	El núcleo inclinado del lleno prioritario de aguas arriba tubifica (erosiona) hacia el interior del enrocado debido a un defecto en la pantalla CB, lo cual a su vez crea un vacío y causa inestabilidad en el talud aguas arriba, durante un evento sísmico	II B	L
D-S-3	Deficiency of cut-off wall due to construction sequencing and potential defects during seismic event results in excess of seepage.	Ineficiencia de la pantalla CB debido a la secuencia de construcción y posibles defectos constructivos, durante un evento sísmico	IV	
D-S-4	Right abutment seepage through the rock due to "windows" in the grout curtain and localized geological conditions leading to piping of the core into the abutment under seismic conditions.	Filtración en el estribo derecho a través de la roca debido a "ventanas"/espacios en la cortina de inyección y condiciones geológicas localizadas, lo cual lleva a tubificaciones (erosión) del núcleo, durante un evento sísmico	II C	L
D-S-5	Seepage through right abutment embankment core contact with the concrete wall between El. 418 and El. 433 due to inadequate compaction of the 1A fill (core) material allowing seepage along contact leading to piping, settlement of the crest and overtopping during a seismic event.	Filtración a través del contacto del núcleo en el estribo derecho con el muro de hormigón entre El. 418 y El. 433. Esto debido a la compactación inadecuada del material de relleno 1A (núcleo) que permite la filtración a lo largo del contacto, lo cual lleva posteriormente a tubificaciones (erosión), al asentamiento de la cresta y al desbordamiento, durante un evento sísmico	IV	
D-S-6	Left abutment seepage through gaps in the "secant" concrete wall between elevations 330 and 408m leading to erosion of the shear zone in the left abutment rock	Filtración por el estribo izquierdo a través de espacios en el muro de pilas secantes, lo cual conduce a la erosión de las zonas de cizallas presentes en el macizo de dicho sector, provocando así la falla del talud aguas abajo, durante un evento sísmico	II C	L

Código del PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
	leading to downstream slope failure			
D-S-7	Unmonitored piping/excessive seepage in the lower half of the dam, where instrumentation was not installed.	Tubificaciones (erosión) no monitoreadas/filtraciones excesivas en la mitad inferior de la presa, donde no se instaló instrumentación, durante un evento sísmico	II C	VL
D-S-8	Seepage through right abutment embankment core contact with the concrete wall between El. 418 and El. 433 due to settlement of the dam and shearing along the contact allowing seepage leading to piping, settlement of the crest and overtopping during a seismic event.	Filtración a través del contacto del núcleo en el estribo derecho con el muro de hormigón entre El. 418 y El. 433 debido al asentamiento de la presa y a la cortante a lo largo del contacto, permitiendo que a partir de las filtraciones se generen tubificaciones (erosión), asentamiento de la cresta y el desbordamiento, durante un evento sísmico	IV	
D-S-9	Rock fill settles and creates a tear in the cement-bentonite wall, excessive seepage results in piping of inclined core materials occurs leading to upstream slope failure during a seismic event.	El enrocado se asienta y crea un desgarro en la pantalla CB, la filtración excesiva da como resultado la tubificación (erosión) del núcleo inclinado del lleno prioritario, lo cual conlleva a la falla del talud aguas arriba, durante un evento sísmico	II C	L
D-S-10	Seepage increases on the left abutment contact around gallery at El. 250 due to defects in consolidation grout curtain.	La filtración aumenta en el contacto por el estribo izquierdo, alrededor de la galería en El. 250, debido a trabajos inconclusos de la cortina de inyecciones, durante un evento sísmico	II C	L
DS-11	Gates fail in open position, rapid draw down occurs, El. 420 to El. 401, causing upstream slope failure	Las compuertas del vertedero fallan en la posición abierta lo que produce un desembalse rápido entre El. 420 a El. 401, causando la falla del talud aguas arriba, durante un evento sísmico	IV	
D-S-12	Failure of right diversion tunnel plug leads to an uncontrolled release down to El. 210	La falla del tapón natural del túnel de desviación derecho lleva a un desembalse descontrolado hacia El. 210, durante un evento sísmico	I A	VL

Código del PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
D-S-13	Left abutment old landslide is activated and debris loads the upstream slope and crest causing a local failure of the dam and overtopping	Antiguo deslizamiento presente en la margen izquierda se activa y como consecuencia, los escombros resultantes de dicha inestabilidad cargan el talud aguas arriba y la cresta, lo cual provoca posteriormente una falla local de la presa y el desbordamiento, durante un evento sísmico	II B	L
D-S-14	Left abutment roadway tunnel at El. 313 collapses causes damage to the core due to hydro jacking	El túnel vial del estribo izquierdo en El. 313 se derrumba, provocando así daños en el núcleo debido al levantamiento hidráulico (hidrogateo), durante un evento sísmico	IV	
D-S-15	Downstream slope failure during earthquake	Talud aguas abajo falla durante un evento sísmico	IV	

Fuente: (Hatch, 2021).

Tabla 2-26 PFM o factores que contribuyen la amenaza de falla de la presa (asociados con los taludes del embalse).

Código de PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
R-N-1	Landslides create overtopping wave	Deslizamientos crean una ola que sobrepasa la presa (desbordamiento)	IV	
R-N-2	Overtopping wave from landslide coincides with damage or settlement to dam	Ola de sobrepaso provocada por deslizamientos, coincide con daño o asentamiento de la presa	IV	
R-N-3	Seiche wave due to landslide overtops the dam	Olas de Seiche (ola estacionaria) debida a deslizamientos sobre pasa la presa	IV	
R-N-4	Floating debris enters the reservoir, accumulates at the spillway, and blocks the spillway entrance, reservoir level increases and overtops the dam during normal spillway operation	Escombros flotantes entran en el embalse, acumulándose en el vertedero y bloqueando su entrada, por consiguiente, el nivel del embalse se incrementa y sobrepasa a la presa durante una condición de operación normal	IV	
R-H-1	Seiche wave due to landslide overtops the dam during flood event	Olas de Seiche (ola estacionaria) debida a deslizamientos sobre pasa la presa, durante un evento de creciente	IA	VL
R-H-2	Wind generated wave overtops dam causes erosion and failure of dam	Olas generadas por viento sobrepasan la presa, causando su erosión y falla, durante un evento de creciente	IV	

Código de PFM	Descripción del modo probable de falla (en inglés, del texto original)	Descripción del modo probable de falla (traducción al español)	Categoría & Clase	Probabilidad
R-H-3	Floating debris enters the reservoir, accumulates at the spillway, and blocks the spillway entrance, reservoir level increases and overtops the dam during flood spillway operation	Escombros flotantes entran en el embalse, acumulándose en el vertedero y bloqueando su entrada, por consiguiente, el nivel del embalse se incrementa y sobrepasa a la presa durante un evento de creciente	IV	
R-H-4	PMF is underestimated and dam is overtopped	Máxima creciente probable CMP es subestimada y sobre pasa la presa, durante un evento de creciente	IIIA	
R-S-1	Reservoir induced seismicity	Sismicidad inducida por el embalse	IV	
R-S-2	Landslides create overtopping wave during seismic event weakening the dam fills	Deslizamientos crean olas de sobrepaso durante un evento sísmico, debilitando posteriormente a los llenos de la presa	IV	
R-S-3	Seiche wave due to seismic event	Olas Seiche (olas estacionarias) debido a un evento sísmico	IV	
R-S-4	Seiche wave due to landslide overtops the dam following seismic event	Olas Seiche (olas estacionarias) debido a deslizamientos sobrepasan la presa, después de un evento sísmico	IV	
voR-S-5	Right abutment rock slope above and/or upstream of spillway fails during a seismic event blocking spillway chute	Talud de roca en el estribo derecho arriba o aguas arriba del vertedero, durante un evento sísmico, bloqueando el canal del vertedero	IV	

Fuente: (Hatch, 2021).

El método cualitativo, tal y como mencionado en Vick, *Government of Alberta* (2017) es apropiado para el análisis individual de una presa, son consideraciones relativas y obedecen en una jerarquización de las probabilidades como es el caso de Ituango. Sin embargo, para la atención de este requerimiento, donde las probabilidades de cada factor que contribuye a la amenaza por fallo de la presa son clasificadas mediante la escala de EPM, se presenta a continuación una propuesta de equivalencias considerando estadísticas mundiales de fallas anuales, que permiten la comparación entre otras presas. Esta propuesta se base en información presentada en referencias tales como *Government of Alberta* (2021).

Descriptor <sup>117</sup>	Definition of Likelihood	Likelihood Rating
Very High ( $\geq 10^{-2}$ AFL)	There is direct evidence or substantial indirect evidence to suggest that failure has initiated or is very likely to occur.	5
High ( $10^{-4}$ to $< 10^{-2}$ AFL)	The fundamental condition or defect is known to exist; indirect evidence suggests it is plausible; and key evidence is weighted more heavily toward "more likely" than "less likely."	4
Medium ( $10^{-5}$ to $< 10^{-4}$ AFL)	The fundamental condition or defect is known to exist; indirect evidence suggests it is plausible; and key evidence is weighted more heavily toward "less likely" than "more likely."	3
Low ( $< 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$ AFL)	The possibility cannot be ruled out, the fundamental condition or defect is postulated. Evidence indicates it is very unlikely.	2
Remote ( $< 10^{-6}$ AFL)	Several events must occur concurrently or in series to cause failure, and most, if not all, have negligible likelihood such that the failure likelihood is negligible.	1
Not Possible	Failure modes ruled out because the physical possibility does not exist; or information came to light which eliminated the concern that had generated the development of the failure mode; or the required load and subsequent structural response is considered so remote as to be non-credible or not reasonable to postulate.	0

<sup>117</sup> AFL = Annual Failure Likelihood. Where AFL is not known, the descriptors are to be used to determine the rating.

Figura 2-113 Propuesta de equivalencias entre el método cualitativo y cuantitativo para la escala de probabilidades.

Fuente: Imagen tomada de Governen of Alberta (2021).

Así, considerando lo presentado en la Figura 2-113, observamos que los factores que contribuyen la amenaza por fallo de la presa de Ituango están en la escala de probabilidad muy baja (remota) a baja, cuyo límite para probabilidad anual de ocurrencia es del orden de  $10^{-5}$  (según la equivalencia asumida). En síntesis, considerando los resultados del análisis PFMA donde se han identificado todos los factores que contribuyen, concluimos que la probabilidad de falla de dicha estructura es baja. Ajustando lo anteriormente descrito a los criterios de calificación de probabilidad de ocurrencia de las amenazas de la Guía Metodológica para la Gestión Integral de Riesgos de finida por EPM (2020), dicha probabilidad se categoriza como "Muy baja", determinada por un evento que ocurre en forma excepcional o es muy difícil que ocurra. En los anexos, ver mapas de amenaza por falla de presa y efectos aguas abajo (M-PHI-111-TRA-MFP-G-010 y M-PHI-111-TRA-MFA-G-010).



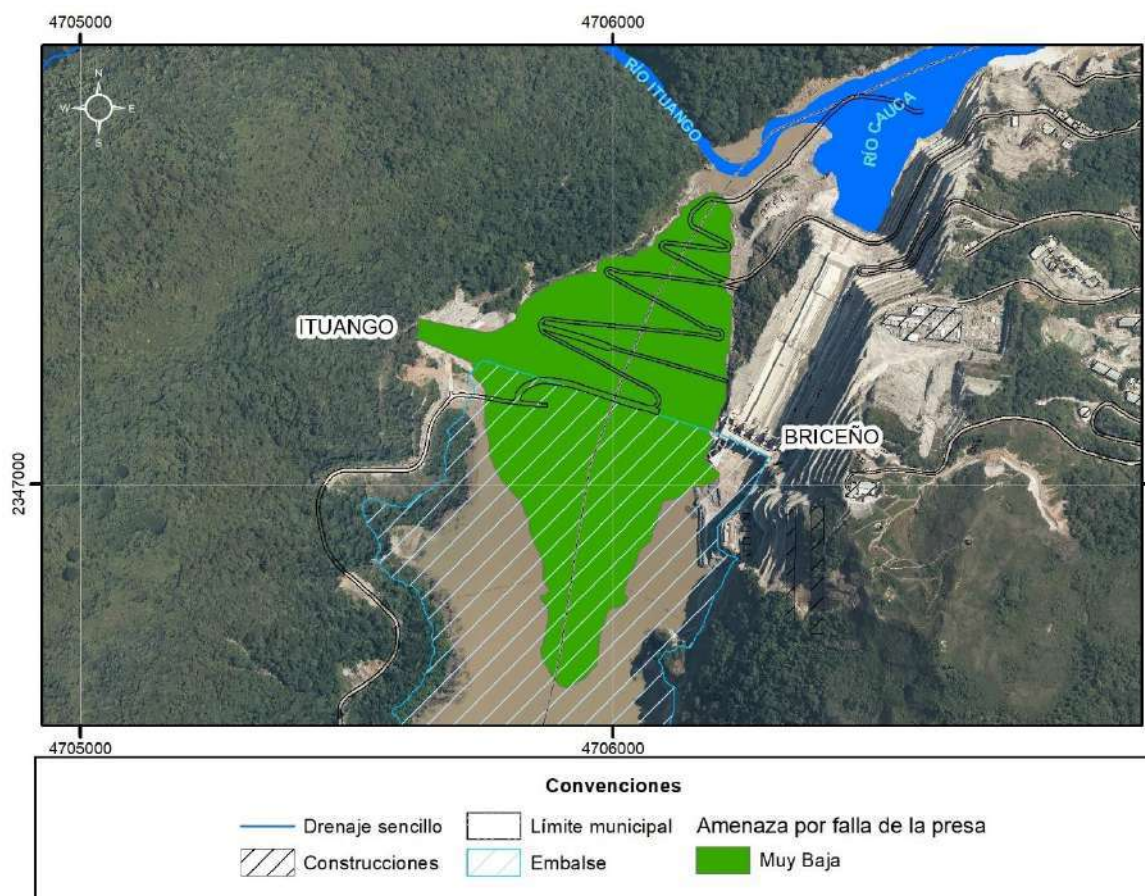


Figura 2-114 Amenaza por falla de la presa del PHI.

Fuente: CGI, 2021.

#### 2.2.4.5.2 Seguimiento a las amenazas

Una vez identificados todos los factores que pueden contribuir a la amenaza por falla de la presa, EPM procedió a escoger o reunir a aquellos factores de mayor relevancia sobre los cuales se fundamenta el plan de contingencia operativa, para las afectaciones a la presa.

Este plan está orientado -como mencionado antes - a los factores más críticos que contribuyen a la amenaza de falla en la presa y a la identificación de las variables que permitirían emitir alertas tempranas (sin importar el origen de la amenaza o el tipo de factor detonante, etc.). No obstante, el monitoreo periódico de la presa deberá seguir comprendiendo todos los instrumentos que permitan medir el estado de esfuerzos deformación, presiones de poros, presiones totales etc., de todos los llenos de la presa, la fundación, los estribos y taludes, así como el registro de aceleraciones sísmicas.

Primero se presenta un resumen de cómo se agruparon los factores contribuyentes a la amenaza por falla de la presa, y luego, en la Tabla 2-27 se presenta como se hace el seguimiento a cada uno de estos grupos.

### A. Overtopping

El factor de overtopping (o sobrepaso en español) está asociado a la pérdida de borde libre, es decir, a la disminución de la distancia vertical entre la superficie del agua hasta la cresta, lo que provocaría un vertimiento del flujo sobre la cara aguas abajo (algo para lo cual no están diseñadas las presas de enrocado).

Para su seguimiento se fija el nivel de operación normal como aquel que fue estipulado por diseño, es decir, la cota 420 m.s.n.m. Por otro lado, la cota 432,9 m.s.n.m corresponde al nivel estimado para la máxima creciente probable CMP. Así, los valores de referencia dados a continuación para este riesgo, se dan considerando los aspectos señalados en la Figura 2-115.

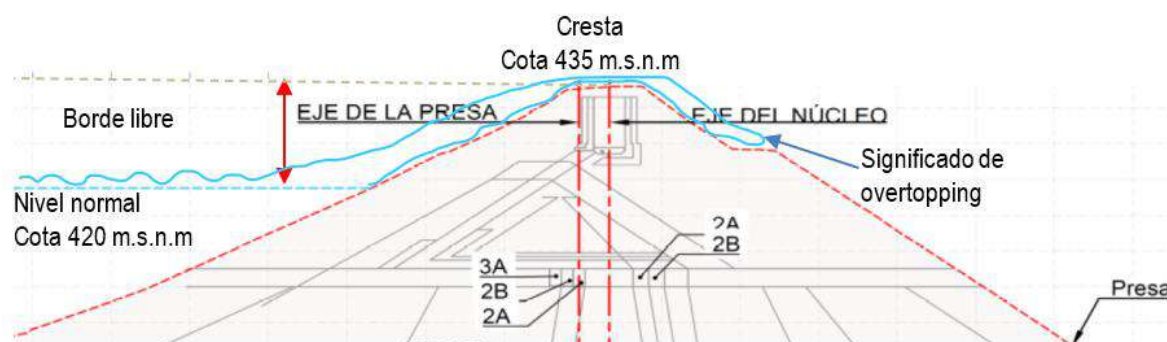


Figura 2-115 Definición de borde libre para el riesgo de overtopping.

Fuente: CGI, 2021.

### B. Fallo del núcleo inclinado 1A del lleno prioritario, en la zona aguas arriba entre cotas 385 y 418

Este factor está asociado a la falla del manto impermeable inclinado que fue dispuesto en la cara aguas arriba de la porción conocida como lleno prioritario, entre las cotas 385 msnm y 418 msnm. Dicha falla provocaría la inestabilidad del talud aguas arriba, expresada en deslizamientos, superficiales o profundos, con desplazamientos y/o fisuras.

Los signos de afectación al talud aguas arriba por una falla en el manto inclinado del lleno prioritario, se controlan principalmente mediante el seguimiento a los desplazamientos horizontales y asentamientos verticales medibles sobre dicho talud (ver Figura 2-116):

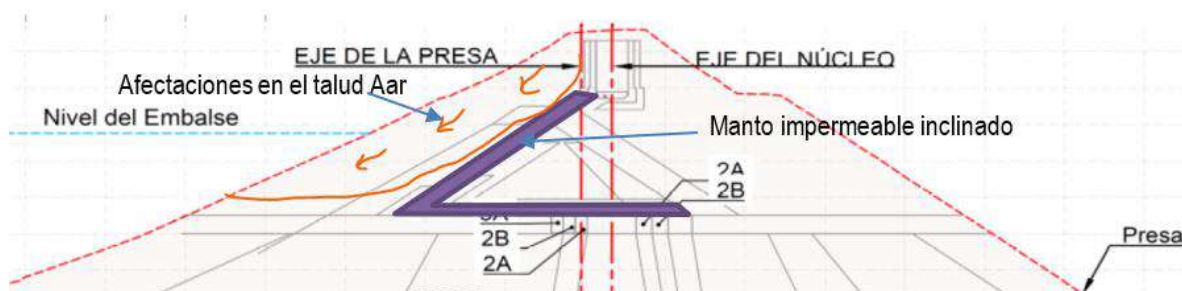


Figura 2-116 Deformaciones en el talud aguas arriba frente a un eventual fallo del manto impermeable inclinado dispuesto en el lleno prioritario.

Fuente: CGI, 2021.

### C. Fallo por los estribos de la presa

Esto puede expresarse por medio de procesos de erosión interna en el macizo rocoso, cortina de inyección profunda, pantalla corta flujo en concreto de margen izquierda, o por las galerías de inyección y drenaje, con el riesgo de que dichos procesos puedan propagarse hacia los taludes en superficie. Por lo tanto, dos variables que pueden alertar rápidamente de esta condición, antes que se exprese en superficie, son los niveles piezométricos en los estribos y los caudales de infiltración en las galerías de inyección y drenaje de la presa.

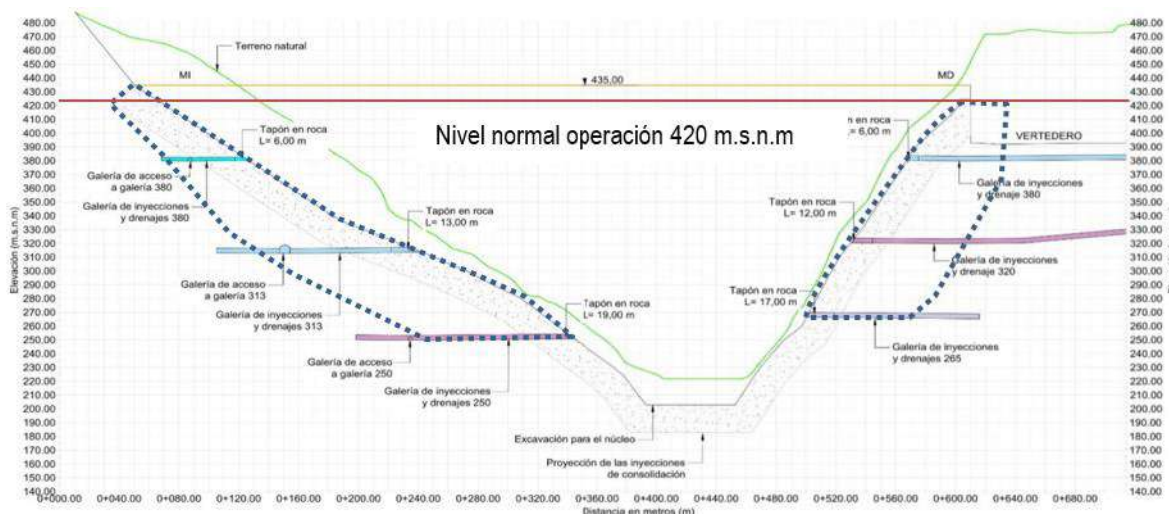


Figura 2-117 Zona de interés para el riesgo de fallo por los estribos

Fuente: CGI, 2021.

### D. Agrietamiento o erosión interna en el núcleo

Para el factor de agrietamiento o erosión interna del núcleo, que está localizado entre la fundación y la cota 385 msnm, se define como medida de alerta temprana el caudal de infiltraciones totales que será recolectado por el medidor de infiltraciones localizado en la pata de la presa.

Adicional a los niveles de alerta temprana aquí reportados, el análisis de una situación anómala también debe incluir la verificación del comportamiento mostrado por las celdas de asentamiento operativas y confiables, las celdas de presión, y los piezómetros localizados en el núcleo. En las fases más críticas, este riesgo podría expresarse en superficie a través de desplazamientos, fisuras, etc., razón por la cual dentro de los análisis complementarios también deberá considerarse las medidas de desplazamiento y asentamientos superficiales del talud aguas abajo.

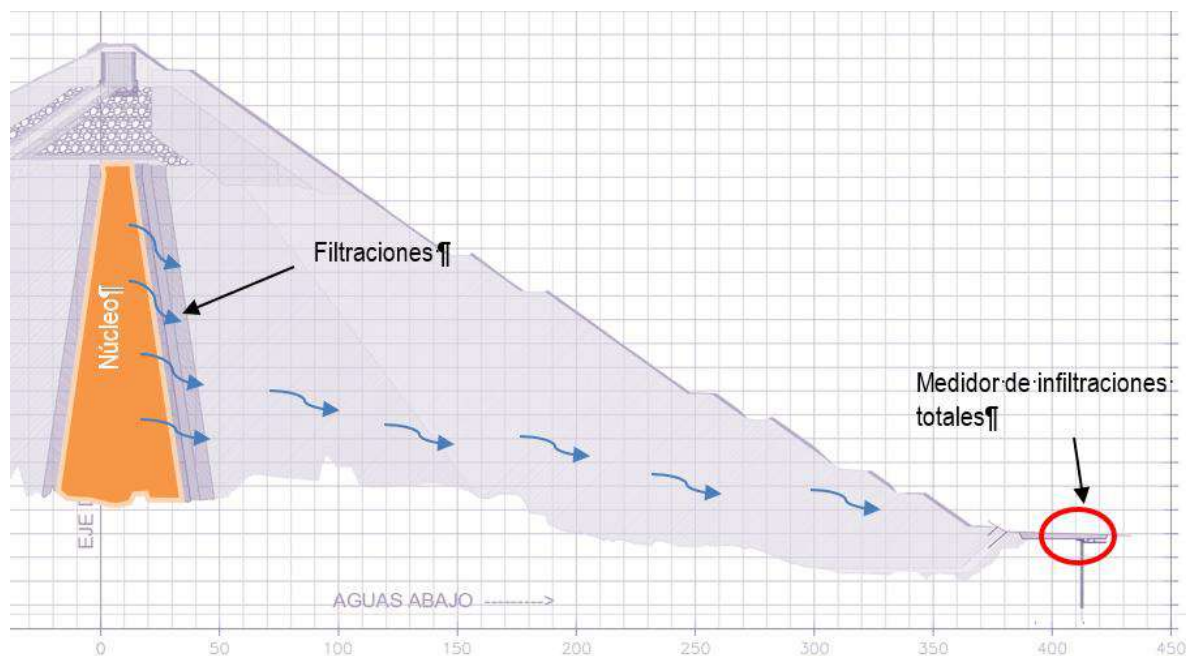


Figura 2-118 Filtraciones producto de un agrietamiento o erosión en el núcleo  
Fuente: CGI, 2021.

#### E. Fallo de la pantalla bentonítica

Cualquier fisuración y/o agrietamiento importante en la pantalla de cemento bentonita representará un eventual aumento de su permeabilidad, lo que se traduce en un aumento en el nivel piezométrico del lado aguas abajo y de los caudales medibles en el espaldón aguas abajo. Adicionalmente, esto puede ser detectado por los asentamientos verticales diferenciales que ocurren a lo largo del cuerpo de esta y que son medidos mediante los extensómetros magnéticos.



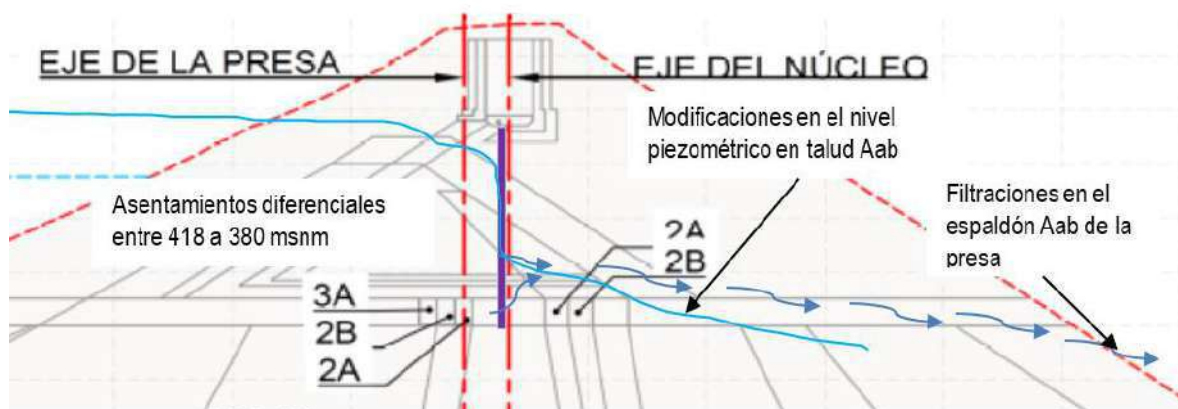


Figura 2-119 Efectos de un fallo en la pantalla plástica (entre cotas 380 msnm y 418 msnm)

Fuente: CGI, 2021.

#### F. Desembalse (m/día)

La mayor amenaza para el desembalse en Ituango está relacionada principalmente con un eventual destaponamiento del Túnel de Desviación Derecho. No obstante, independiente del origen de esta amenaza, un desembalse es detectado mediante la modificación en los niveles de la superficie del agua y su correspondiente variación en el tiempo (expresada en tasa diaria).

En el informe I-2194-PHI-041-GEO-IFP-001 se evaluó como tasa máxima de desembalse 1,4 m/día considerando únicamente la estabilidad de la presa. No obstante, un desembalse no sólo puede afectar la presa, sino también los taludes aledaños, razón por la cual los niveles de alerta presentado a continuación hacen referencia a valores que han sido estudiados en otros proyectos considerando la condición de los taludes localizados en el vaso del embalse (US Department of Interior, 2019).

Un desembalse rápido puede ocasionar afectaciones en el talud aguas arriba del embalse, también puede ocasionar fallas en los taludes del vaso del embalse. El fallo de los taludes en el vaso del embalse también está relacionado con el overtopping ya que grandes volúmenes de deslizamiento pueden provocar olas en el sitio de presa. Ambos fenómenos ya fueron explicados gráficamente en la Figura 2-115 y Figura 2-116.

Tabla 2-27 Seguimiento a los principales factores que contribuyen a la amenaza por fallo de la presa.

CAUSAS DEL ESCENARIO DE RIESGO E INSTRUMENTACIÓN PRINCIPAL	NIVEL DE ALERTAS Y UMBRALES				EVENTO MATERIALIZADO
<b>Overtopping</b>					
Nivel del embalse (msnm)	420<	420-422	422-430	430-432,9	>432,9
Borde libre	>15	15-10	10-5	5-2,1	2,1<



CAUSAS DEL ESCENARIO DE RIESGO E INSTRUMENTACIÓN PRINCIPAL	NIVEL DE ALERTAS Y UMBRALES				EVENTO MATERIALIZADO
correspondiente (m)					
<b>Fallo del material 1A, zona aguas arriba entre cotas 385 y 418</b>					
Desplazamiento horizontal-Talud Aar (cm)	55<	55-60	60-65	65-70	>70
Asentamiento vertical-Talud Aar (cm)	110<	110-115	115-120	120-130	>130
<b>Fallo en los estribos de la presa</b>					
Nivel piezométrico (m.c.a). PCV_PRE_1E a 7E	Umbral 2 (nivel 420)+1 mca	Umbral 2 +1-3 mca	Umbral 2 +3-5 mca	Umbral 2 +5-10 mca	Umbral 2 +10 mca
Galerías de inyección y drenaje (lt/seg)	Umbral 2 (nivel 420)+5 lt/seg	Umbral 2 (nivel 420)+5-10 lt/seg	Umbral 2 (nivel 420)+10-15 lt/seg	Umbral 2 (nivel 420)+15-20 lt/seg	Umbral 2 (nivel 420)+20 lt/seg
<b>Agrietamiento o erosión interna en el núcleo</b>					
Filtraciones totales (lt/seg)	200<	200-400	400-1000	1000-2000	>2000
<b>Fallo de la pantalla bentonítica</b>					
Asentamiento diferencial 418 a 380 msnm (cm)	57<	57-114	114-228	228-380	>380
Nivel piezométrico Aab (m.c.a)	1	1-10	10-20	20-30	>30
Aforos en el espaldón cerca a la cota 370 msnm (l/seg)	<28	28-35	35-40	40-45	>45
<b>Tasa de desembalse (m/día)</b>	0,9<	0,9-1,2	1,2-1,4	1,4-1,8	>1,8
<b>Condición general</b>					

CAUSAS DEL ESCENARIO DE RIESGO E INSTRUMENTACIÓN PRINCIPAL	NIVEL DE ALERTAS Y UMBRALES				EVENTO MATERIALIZADO
Evaluación cualitativa basada en registro del formato de inspecciones visuales de campo	<p>Cuando las anomalías encontradas o la influencia de eventos externos a la presa no comprometan su seguridad. Dada la importancia de la obra, se debe mantener monitoreo a lo largo del tiempo.</p>	<p>Cuando las anomalías encontradas no comprometan la seguridad de la presa en el corto plazo, pero que deban ser controladas, monitoreadas o reparadas para evitar evolución de estas.</p>	<p>Cuando las anomalías encontradas representan un riesgo para la presa, debiendo ser tomadas acciones rápidas/en el corto plazo para la eliminación del problema.</p>	<p>Cuando las anomalías encontradas o la influencia de eventos externos presenten riesgos de ruptura inminente, debiendo ser tomadas las medidas para la prevención y reducción de los daños materiales y humanos.</p>	<p>Cuando se deben aplicar los planes de emergencia para reducir la afectación a personas, infraestructura, ambiente, por la materialización de un riesgo</p>

ALERTA	ACTIVIDAD	ACCIONES A IMPLEMENTAR
Normalidad en las actividades	<b>1. Monitoreo.</b>	Monitoreo y reporte quincenal de todas las variables asociadas con la estabilidad de la Presa
	<b>2. Verificaciones.</b>	Verificaciones de la estabilidad de la presa con base en los resultados de la instrumentación. Verificaciones particulares: Se ha alcanzado o está previsto alcanzar el nivel máximo normal de operación?; se ha alcanzado o está previsto que se alcance el caudal máximo vertido registrado en la vida de la presa, sin que se prevean riesgos para su seguridad?, con el nivel normal se esperan crecientes que no superan la capacidad del proyecto? no se registran sismos o los registrados no superan una magnitud de 4,0 en la escala de Richter?
	<b>3. Inspecciones de campo</b>	Inspecciones de campo de la presa en periodos quincenales
Preparación para la respuesta	<b>1. Monitoreo.</b>	Intensificar el reporte del comportamiento instalada en la presa, a una frecuencia semanal, para validar hipótesis de comportamiento anómalo o establecer medidas
	<b>2. Verificaciones.</b>	Verificaciones de la estabilidad de la presa con base en los resultados de la instrumentación. Se emiten diagnósticos puntuales y se preparan las acciones requeridas para el control del comportamiento anómalo detectado. Verificaciones particulares: Con el nivel máximo normal en el embalse, se espera una creciente que supera la máxima pero no la extrema del proyecto y se tienen las previsiones junto con medidas de explotación y reducción del nivel del embalse para su control?; se ha sentido en la presa o en sus proximidades un sismo con

ALERTA	ACTIVIDAD	ACCIONES A IMPLEMENTAR
		magnitud superior a 4 en la escala de Richter, el sismo es superior al mayor soportado previamente por la presa y para el cual no se han esperado daños?
	<b>3. Inspección de campo</b>	Inspecciones de campo de la presa. Se intensifica frecuencia a 1 por semana
	<b>4. Intervenciones</b>	Se deben aplicar los mantenimientos correctivos con miras a controlar evento indeseable en el corto plazo (de no aplicarse medidas de corrección, podrían ocasionar peligro de avería grave o de rotura de la presa; la situación puede solventarse con seguridad mediante la aplicación de las medidas previstas y de los medios disponibles)
<b>Aislamiento</b>	<b>1. Monitoreo.</b>	Se intensifica monitoreo y reporte a una frecuencia diaria para vigilar evolución de comportamiento anómalo
	<b>2. Verificaciones.</b>	Se continua con las verificaciones de estabilidad con base en la instrumentación y se definen las intervenciones correctivas para aplicar en el corto plazo. Verificaciones particulares: Se acerca una creciente que es igual o superior a la extrema y se puede asegurar que se tienen todas las previsiones suficientes para controlarla? Se ha registrado un sismo en la presa o en sus proximidades cuya aceleración es superior al 50% del sismo que es capaz de soportar ésta en condiciones de seguridad la presa? Se ha registrado un sismo en la presa o en sus proximidades y la inspección visual inmediata de la presa permite determinar desórdenes graves en los órganos vitales (pérdida no controlada de agua del embalse, descenso no justificable, movimiento de taludes, asentamientos importantes, aparición de nuevas salidas concentradas de agua, presencia de turbidez en las filtraciones, etc.)?
	<b>3. Inspección de campo</b>	Se intensifica la frecuencia de las inspecciones de campo y la emisión de los reportes sobre la misma (1 por día)
	<b>4. Intervenciones</b>	Dependiendo del origen del fenómeno se pueden aplicar diferentes medidas tales como disminuir el nivel del embalse hasta la cota mínima posible, estabilizar taludes aguas arriba del vaso del embalse, obras de rehabilitación a definir según el tipo y magnitud del problema (alzado de la cresta, ejecución de bermas estabilizadoras, confinamiento de espaldones, obras de impermeabilización, obras de drenaje, intervenciones en la impermeabilización del concreto en las galerías, refuerzos estructurales en las galerías, sustitución de ductos dañados, tratamientos en la fundación a través de inyecciones, reposiciones de la cota de la cresta y estado de la corona), entre otras
<b>Inicio de las acciones de respuesta</b>	<b>1. Monitoreo.</b>	Se intensifica monitoreo y reporte a una frecuencia a dos reportes diarios para vigilar evolución de comportamiento anómalo
	<b>2. Verificaciones.</b>	Se continúa con las verificaciones de estabilidad con base en la instrumentación y se definen las intervenciones correctivas para aplicar de manera inmediata. Verificaciones particulares: se acerca una creciente que es igual o superior a la extrema y

ALERTA	ACTIVIDAD	ACCIONES A IMPLEMENTAR
		no se puede asegurar que se tienen todas las previsiones suficientes para controlarla? Se ha registrado o producido un sismo y la inspección visual inmediata de la presa indica síntomas de rotura estructural inminente?
	<b>3. Inspección de campo</b>	Se intensifica la frecuencia de las inspecciones de campo y la emisión de los reportes sobre la misma a 2 diarios (si es posible acceder al sitio o usando elementos remotos tales como drones, cámaras)
	<b>4. Intervenciones y emisión de alarmas sonoras</b>	Dependiendo del origen del fenómeno se pueden aplicar diferentes medidas tales como disminuir el nivel del embalse hasta la cota mínima posible, estabilizar taludes aguas arriba del vaso del embalse, obras de rehabilitación a definir según el tipo y magnitud del problema (alzado de la cresta, ejecución de bermas estabilizadoras, confinamiento de espaldones, obras de impermeabilización, obras de drenaje, intervenciones en la impermeabilización del concreto en las galerías, refuerzos estructurales en las galerías, sustitución de ductos dañados, tratamientos en la fundación a través de inyecciones, reposiciones de la cota de la cresta y estado de la corona, et.). Se requiere activación de alertas tempranas tales como alarmas sonoras activadas por boyas en el sitio de presa, que avisen de restricciones en la movilidad sobre la presa y en el transporte fluvial en el embalse, por oleaje y/o pérdida de borde libre (se deben preparar las acciones para proporcionar la movilidad de la comunidad usando otras vías y medios de transporte)
<b>Activación Plan de Continuidad (Materialización del evento)</b>	<b>1. Monitoreo.</b>	Se intensifica monitoreo y reporte a una frecuencia a cuatro diarios para vigilar evolución de la materialización del riesgo
	<b>2. Verificaciones.</b>	Se realizan las verificaciones que se juzguen necesarias para determinar el impacto sobre comunidades, infraestructura y ambiente, por la materialización del riesgo
	<b>3. Inspección de campo</b>	Se intensifica la frecuencia de las inspecciones de campo y la emisión de los reportes sobre la misma a 4 diarios (si es posible acceder al sitio o usando elementos remotos tales como drones, cámaras)
	<b>4. Activación PEC.</b>	Activación del Plan de Emergencias y Contingencias para el desalojo inmediato de las comunidades aguas abajo.
	<b>5. Activación PADEC.</b>	Informar al equipo de alta gerencia de EPM para la activación del Protocolo de Atención de Eventos y Crisis.
Este reporte es un compendio de información desarrollada por EPM y Contratistas. El objetivo de este instrumento es disponer de una herramienta sencilla y práctica, la cual permita responder eficaz y oportunamente mediante el uso de los recursos necesarios para sobreponerse ante eventos contingentes, los cuales pudiesen comprometer la continuidad y objetivos del Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Mayores detalles pueden ser consultados en el <b>Plan de Contingencia Operativo ante eventos amenazantes que puedan generar falla o rotura de la presa</b> y sus anexos.		

Fuente: CGI, 2021.

#### 2.2.4.5.3 Materialización de un evento por falla de presa aguas abajo

Es importante anotar que, aunque la amenaza por falla de la presa es de categoría baja, en caso que se materializara generaría múltiples afectaciones. Por ello, con base en los resultados

obtenidos en las modelaciones del análisis de tránsito hidráulico de las crecientes generadas por una posible falla de la presa, se determinó la magnitud de las crecientes producidas por los diferentes escenarios de rotura de presa y se delimitaron las zonas que eventualmente pueden tener una afectación en términos de extensión. El modelo construido considera tanto la presa del proyecto, como los aportes de caudales y sedimentos realizados por los principales afluentes del río Cauca en la zona de estudio (sitio de presa Ituango – Margento). Se destacan los ríos: Ituango, Sinitavé, Valdivia, Pescado, Taraza, Tamaná y Man. Los diferentes escenarios modelados se encuentran consignados en el Estudio Hidráulico de Contingencia.

En la Figura 2-120 se puede observar los diferentes casos modelados, de los cuales se seleccionó el caso de mayor envergadura, que a pesar de ser un evento con una probabilidad de ocurrencia muy baja, es el que contempla una magnitud mayor y cubre todos los posibles escenarios de rompimiento de presa que han sido modelados.

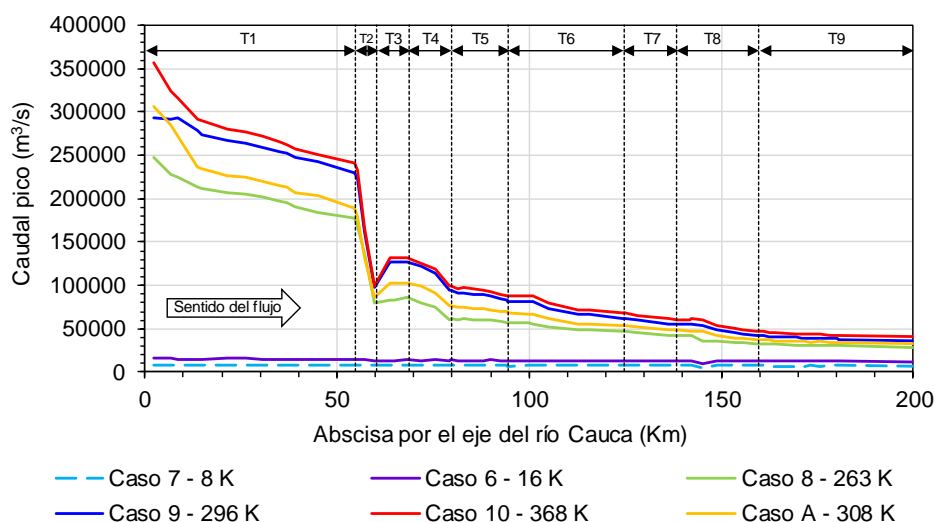


Figura 2-120 Caudal a lo largo del tramo de estudio para los casos analizados.  
Fuente: Integral S.A, 2018

Por tanto, el escenario más crítico para la contingencia y en etapa de operación del proyecto, corresponde con la falla de la presa por sobrepaso de la creciente máxima probable, y a su vez, la no operación de las cuatro compuertas del vertedero, lo que desencadenaría un caudal de 320.000 m<sup>3</sup>/s, el cual mayorado con sedimentos (sedimentos propios de la presa y los aportados por desprendimientos de laderas) corresponde a un caudal de 368.000 m<sup>3</sup>/s, considerando la cota de la presa en la 435 msnm y un nivel del embalse en la 420 msnm. (Ver M-PHI-111-TRA-MFA-G-010).

La mancha de inundación para el escenario de falla de presa presenta unas velocidades y profundidades que podrían ocasionar afectaciones a los elementos físicos, bióticos, sociales y económicos del área de estudio. Lo anterior, con mayor relevancia en la zona más cercana a la represa de la Hidroeléctrica Ituango, y por todo el cañón asociado al río Cauca hasta llegar a las



planicies de inundación asociadas a las ciénagas presentes en el núcleo de La Mojana y a las planicies de inundación del río San Jorge. En este sentido, el tramo aguas abajo al sitio de presa hasta aproximadamente 60km, que corresponde con la zona más encañonada, sería fuertemente afectado ante un escenario de inundación, ya que en esta zona se generaría una especie de avalancha, en donde la severidad del flujo alcanzaría la categoría de mayor amenaza y el flujo de agua, transportaría también escombros, rocas, sedimentos, entre otros.

#### **2.2.4.6 Caracterización de amenaza por socavación y procesos erosivos**

Para la inclusión del análisis de los escenarios de riesgos asociados a procesos de socavación y erosión, inicialmente se presenta la identificación y caracterización de la amenaza asociada a estos, partiendo de los estudios técnicos con los que ya cuenta el Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI):

- Análisis riesgos del talud en la margen izquierda frente al vertedero. Atención al Requerimiento del 43 del Acta 103 del 09 de agosto del 2019 de la ANLA (Consortio Generación Ituango, 2019).
- Análisis de erosión del Cuenco del Vertedero. Informe I-2194-PHI-042-GEO-AECV-001. Atención al Requerimiento 25 del Acta 101 del 19 junio de 2020 de la ANLA. (Consortio Generación Ituango, 2020).
- Análisis multitemporal en el talud margen izquierda al frente del vertedero del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI). Informes de seguimiento periódico desde abril de 2020 hasta febrero de 2021. Atención al Requerimiento 19 del Acta 101 del 19 junio de 2020 de la ANLA (Consortio Generación Ituango, 2021).
- Seguimiento a acciones propuestas para el talud margen izquierda al frente del vertedero. Atención al Requerimiento 20 del Acta 101 del 19 junio de 2020 de la ANLA (Consortio Generación Ituango, 2020)

La identificación de la amenaza por erosión y socavación parte de las condiciones que generan susceptibilidad a dichos procesos de inestabilidad, por lo que a continuación se presenta la caracterización geológica y geotécnica de los sitios que han sido objeto de estudios previos (cuenco del vertedero, talud al frente del vertedero en margen izquierda y zona entre la salida de las descargas y el Puente El Beso).

##### 2.2.4.6.1 Cuenco del vertedero

###### A. Geología local

El cuenco del vertedero se emplaza sobre neises cuarzo-feldespáticos, cuya estructura puede cambiar localmente a milonítica y/o esquistosa; variando texturalmente en distancias muy cortas tanto horizontal como verticalmente. Geomorfológicamente, las altas pendientes que presentan las laderas del cañón del río Cauca han permitido el desprendimiento de diversos materiales en superficie y han expuesto al macizo rocoso a una variación en su calidad a diferentes niveles, la cual está representada por el perfil de meteorización de la roca y las condiciones de las discontinuidades que componen dicho macizo.

## 1) Rocas metamórficas

Corresponden a neis cuarzo – feldespático, duro, foliado, con una tendencia principal  $20^{\circ}/080^{\circ}$ , lo que representa el basamento rocoso a lo largo de todo el diseño del cuenco del vertedero.

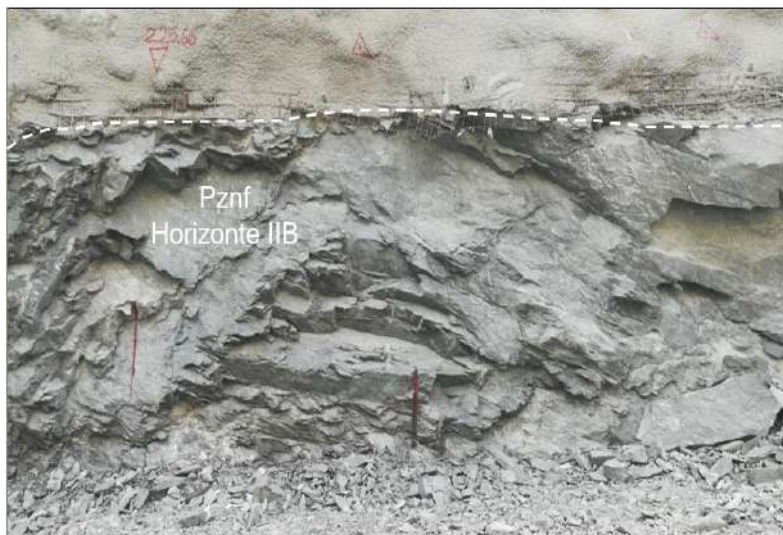


Figura 2-121 Horizonte IIB típico al margen derecho del cuenco del vertedero. Talud de corte entre cotas 222,0 a 226,4 m.s.n.m., abscisas 640,0 a 694,00, ordenadas -35,49 a -45,70.

Fuente: CGI, 2021.

Estas rocas presentan diferentes grados de meteorización a lo largo del proyecto; sin embargo, en el sector que comprende la margen derecha se encuentra homogéneamente en un Horizonte IIB, siendo una roca poco meteorizada, y ligera a moderadamente fracturada, caso contrario a lo que se observa en la margen izquierda del río Cauca, sobre la desembocadura del río Ituango donde aparece un horizonte de roca moderadamente meteorizada y moderadamente a altamente fracturada (Horizonte IIA). Estos grados de meteorización se clasifican a partir de lo propuesto por Deere & Patton (1971).

## 2) Estructuras

Los levantamientos de macizo rocoso realizados durante la excavación del cuenco del vertedero permitieron identificar 3 estructuras de cizalla que toman gran importancia debido a su alta persistencia a lo largo de dicha obra. En la Tabla 2-28 se muestran las estructuras de cizalla identificadas con su correspondiente tendencia estructural.

Tabla 2-28 Principales fracturas de cizalla identificadas en el cuenco del vertedero.

ID	ESTRUCTURA	DIP / DIP DIR
Cz1	Fractura de cizalla	20 / 100
Cz2	Fractura de cizalla	35-40 / 130
Cz3	Fractura de cizalla	50 / 160
Cz4	Fractura de cizalla	60/340

Fuente: CGI, 2021.

### Fractura de cizalla Cz1

Fractura de cizalla con tendencia estructural hacia el SE y dato estructural de aproximadamente 20/100 (Dip/Dip Dir). Dicho plano de debilidad presenta una persistencia baja en el rumbo (1 a 3 m) y persistencia moderada (3 a 10 m) en el buzamiento entre las cotas 239,40 a 244,8 m.s.n.m., abscisas 562,30 a 575,0 y ordenadas -59,40 a -59,66 (Figura 2-122). La discontinuidad se desarrolla sobre superficies onduladas rugosas, poco meteorizadas, con una abertura entre 0,1 y 0,25 mm, rellenas por un material de resistencia consistente compuesto por fragmentos de roca triturada con un espesor de 100 mm en una condición seca.

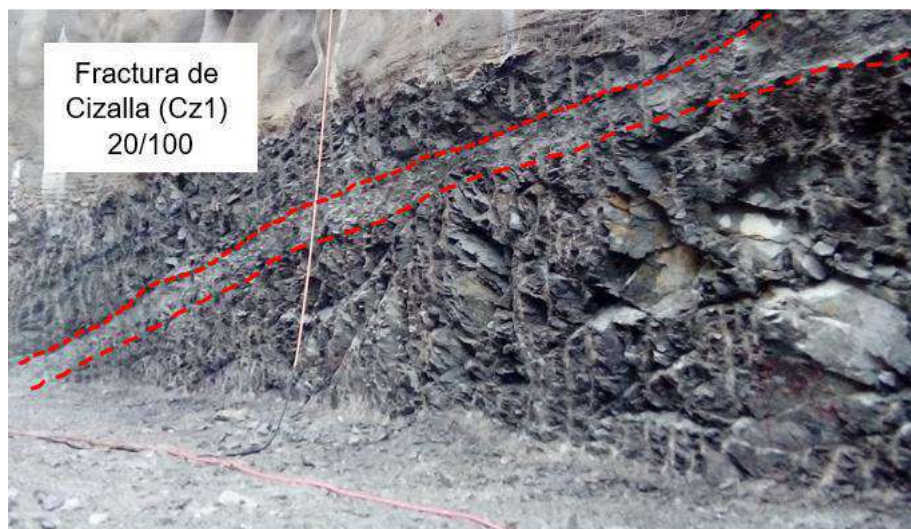


Figura 2-122 Fractura de cizalla Cz1 (20/100) identificada en las Cotas 239.4 a 244,8 (m.s.n.m.), abscisas 562,30 a 575,0; ordenadas -59,40 a -59,66.

Fuente: CGI, 2021.

### Fractura de cizalla Cz2

Fractura de cizalla con tendencia estructural hacia el SE y dato estructural de aproximadamente 40/130 (Dip/Dip Dir). Presenta una persistencia muy alta, mayor a 20 metros tanto en el rumbo como en el buzamiento, según lo observado entre las cotas 216,20 a 223,0 m.s.n.m., abscisas 559,0 a 570,0 y ordenadas -20,0 a -40,0 (Figura 2-123). La abertura de la discontinuidad es ancha mayor a diez milímetros (>10mm), con superficies onduladas lisas moderadamente meteorizadas, con relleno blando compuesto por fragmentos de roca y arcilla gris con un espesor mayor a cinco milímetros (>5 mm).





Figura 2-123 Fractura de cizalla Cz2 (40/130) identificada en las Cotas 216,20 a 223,0 Abscisas 559,0 a 570,0; ordenadas -20,0 a -40,0  
Fuente: CGI, 2021.

#### Fractura de cizalla Cz3

Fractura de cizalla con tendencia estructural hacia el SE y dato estructural de aproximadamente 50/160 (Dip/Dip Dir). Presenta una persistencia alta, de 10 a 20 metros tanto en el rumbo como en el buzamiento, según lo observado entre las cotas 259,9 a 265,7 m.s.n.m., abscisas 543,50 a 544,40 y ordenadas -60,0 a -91,0 (Figura 2-124). La discontinuidad se encuentra parcialmente abierta con una abertura entre 0,25 y 0,5 mm, con superficies onduladas rugosas poco meteorizadas, rellenas de arena limosa de color gris con un espesor de 0,50 metros en una condición seca.



Figura 2-124 Fractura de cizalla Cz3 (50/160); Cotas 259,9 a 265.7 (m.s.n.m.); Abscisas 543,50 a 544,40 Ordenadas -60,0 a -91,0.

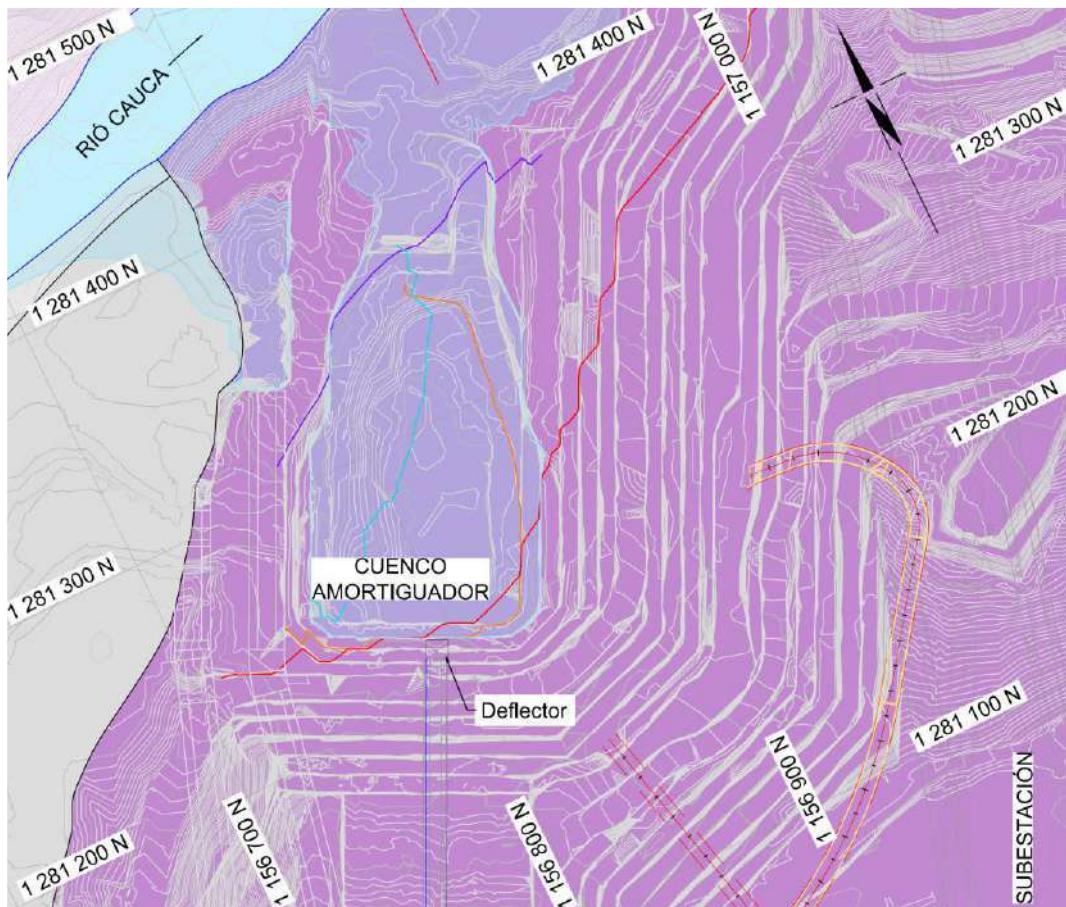
Fuente: CGI, 2021.

#### Fractura de cizalla Cz4

Fractura de cizalla con tendencia estructural hacia el NE y dato estructural de aproximadamente 60/340 (Dip/Dip Dir). Presenta una persistencia alta, de 10 a 20 metros, tanto en el rumbo como en el buzamiento, según lo observado entre las cotas 240,0 a 245,75 m.s.n.m., abscisas 620,0 a 636,0 y ordenadas -55,2 a -59,6. La discontinuidad se encuentra abierta con una abertura entre 2,5 y 10,0 mm, con superficies onduladas rugosas poco meteorizadas, rellenas de roca altamente fracturada con un espesor mayor a 5 mm en una condición seca.

En la Figura 2-125 se muestra en planta las unidades geológicas y las estructuras de cizalla anteriormente descritas.





LEYENDA LITOLÓGICA		CONVENCIONES	
Neis	Qal Depósito Aluvial	— Cizalla 20/100	— Contacto geológico
Cuarzo-	Qalt Depósito Aluvio-torrencial	— Cizalla 40/130	— Lecho Rio Cauca
Feldespático	IIA Perfil de meteorización IIA	— Cizalla 50/160	— Curvas intermedias
Pzmf	IIB Perfil de meteorización IIB	— Cizalla 50/340	— Curvas redondas

Figura 2-125 Unidades geológicas y estructuras de cizalla en el cuenco del vertedero

Fuente: CGI, 2021.

## B. Caracterización geológica y estructural

La caracterización geológica-estructural del macizo rocoso en el cuenco del vertedero se realiza a partir de la información geológica recopilada en los levantamientos geológicos (LMR) realizados durante su excavación, teniendo en cuenta principalmente, el tamaño de los bloques para definir el grado de fracturamiento, la resistencia de la matriz rocosa, el grado de meteorización y las condiciones hidrogeológicas.



Figura 2-126 Macizo rocoso correspondiente a neis cuarzo-feldespático (Horizonte IIB) en la cota 211,0 m.s.n.m. y la abscisa 652,0 en el cuenco del vertedero.

Fuente: CGI, 2021.

Dicha información permitió caracterizar el macizo rocoso que comprende el cuenco del vertedero como una roca masiva, dura (50 – 100 MPa), poco meteorizada, correspondiente al horizonte IIB del perfil de meteorización asociado a neis cuarzo-feldespático, con alteración ocasional restringida a las paredes de las discontinuidades, con pátinas de óxidos que generalmente aparecen como rellenos duros. El grado de fracturamiento del macizo rocoso es bajo a moderado, generando bloques principalmente medios, controlado por varios sistemas de discontinuidades producto de la intersección entre los planos de foliación y cinco familias de diaclasas.

#### 1) Caracterización geomecánica de las discontinuidades

La información geológica recopilada para cada uno de los diferentes sistemas de discontinuidades que componen el macizo rocoso consistió en la toma de datos estructurales y de sus características geomecánicas, teniendo en cuenta principalmente, parámetros como la persistencia, la abertura, la rugosidad, y el grado de alteración, definidos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981) para el análisis geomecánico de las rocas.

El análisis estadístico se realiza con el fin de definir las propiedades geomecánicas que caracterizan el macizo rocoso. Las discontinuidades identificadas están definidas por la foliación, principales familias de diaclasas, y algunas estructuras de cizalla que aparecen cortando a la foliación generalmente, y en otros casos particulares son intrafoliales.

Teniendo en cuenta que a pesar de que en el macizo se presentan estructuras de gran persistencia como las discontinuidades tipo Roldán, los resultados estadísticos muestran que para la mayoría de las diferentes familias de diaclasas observadas en el macizo la persistencia es principalmente moderada (3 a 10 metros) a baja (1 a 3 metros), tanto en el rumbo como en

el buzamiento, mientras que para los planos de foliación y las cizallas las persistencias tienden a ser moderadas a altas (10 a 20 metros) (Ver Figura 2-127 y Figura 2-128).

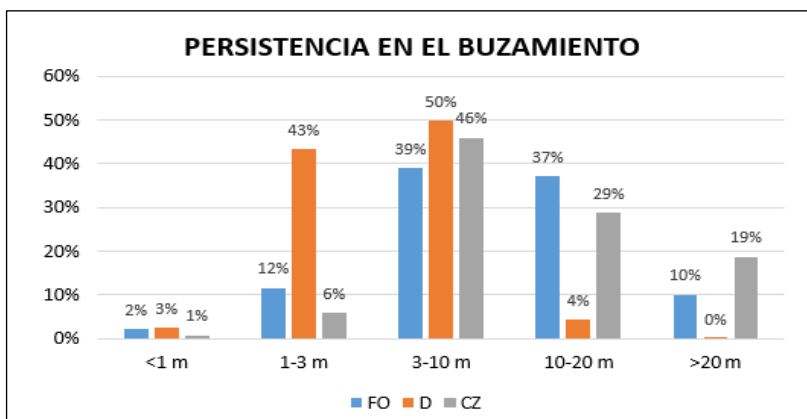


Figura 2-127 Persistencia en el buzamiento de las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero. FO: Foliación, D: diaclasa y CZ: Cizalla.

Fuente: CGI, 2021.

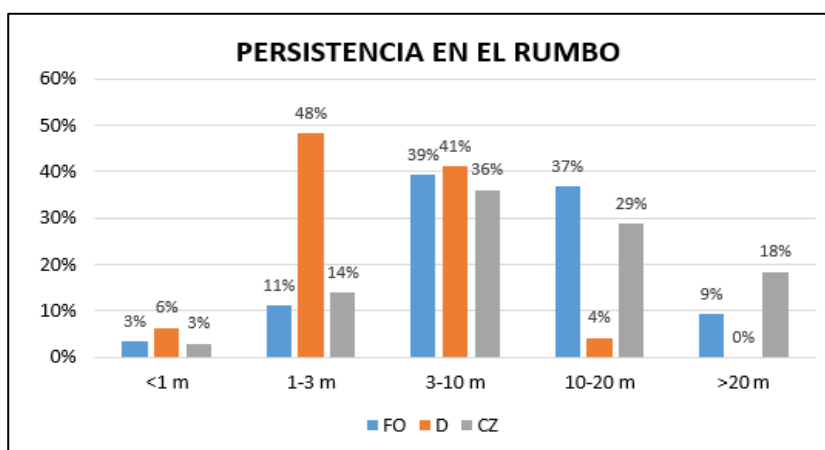


Figura 2-128 Persistencia en el buzamiento de las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero. FO: Foliación, D: diaclasa y CZ: Cizalla.

Fuente: CGI, 2021.

Las aberturas generalmente en los planos de foliación son moderadamente abiertas (0,5 a 2,5 mm), pero también pueden encontrarse parcialmente abiertas (0,25 a 0,5 mm) a cerradas (0,1 a 0,25 mm); caso similar ocurre con las diaclasas, con el 40% de estructuras abiertas, mientras que las cizallas si presentan una abertura muy ancha (10 a 100 mm) en el 57% de los casos (Figura 2-129).

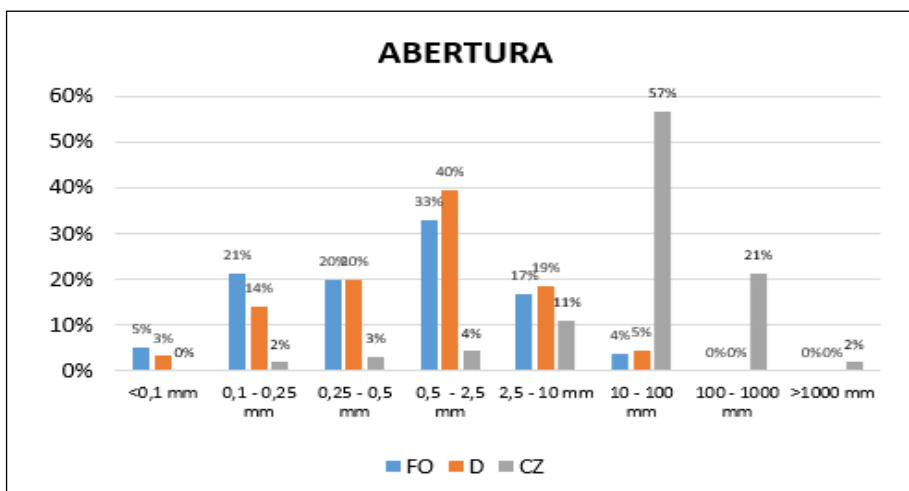


Figura 2-129 Abertura de las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero.

Fuente: CGI, 2021.

El análisis de la rugosidad en las discontinuidades evidencia que las diaclasas presentan principalmente superficies planas rugosas, siendo el 50% de los casos (Figura 2-130), la cual varía en el 29% de las veces a ondulada rugosa. En los planos de foliación la rugosidad se observa un poco más distribuida, con superficies que pueden variar de planas a onduladas, y de rugosas a lisas, mientras que, para las cizallas por su parte, presentan en su mayoría superficies onduladas tipo slickenside.

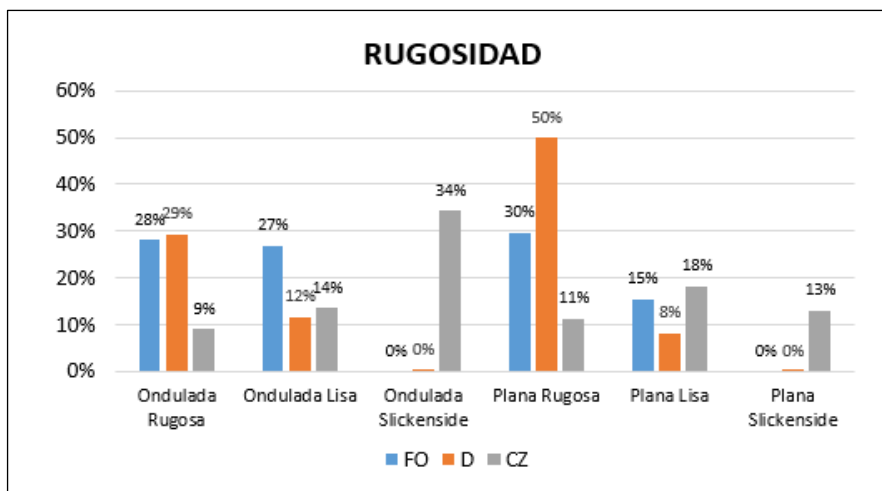


Figura 2-130 Rugosidad de las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero.

Fuente: CGI, 2021.

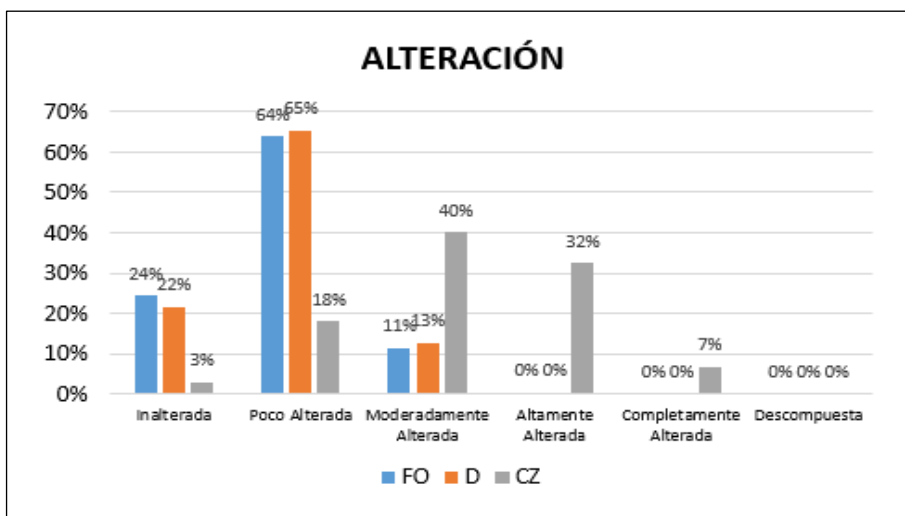


Figura 2-131 Alteración en las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero.  
Fuente: CGI, 2021.

La mayor parte de los planos de foliación y de diaclasas observadas se encuentran ligeramente alteradas a inalteradas (Figura 2-131). Presentando oxidación y/o pátinas de óxidos ocasionales que suelen ser rellenos duros, mientras que las paredes de los planos de cizalla se encuentran de moderada a altamente alterados, presentando rellenos blandos arcillosos en su mayoría (Figura 2-132).

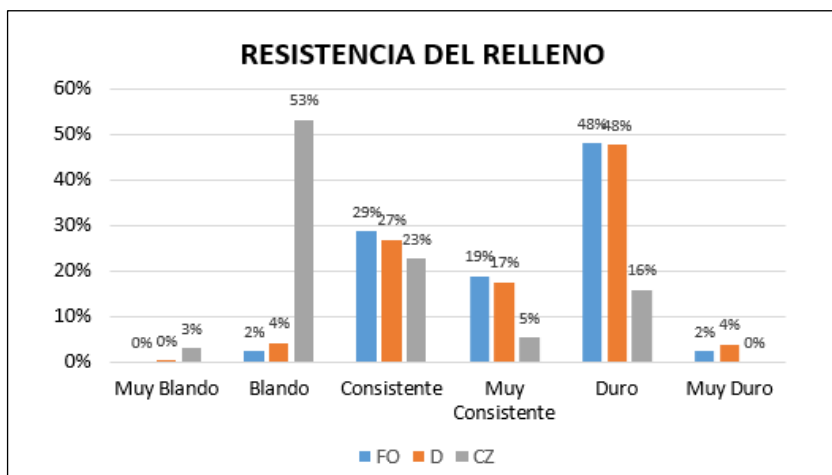


Figura 2-132 Resistencia de los rellenos identificados en las discontinuidades geológicas en el cuenco del vertedero.  
Fuente: CGI, 2021.

## 2) Tendencias estructurales

Una vez realizado el análisis estadístico de los parámetros geomecánicos de las discontinuidades del macizo rocoso en el cuenco del vertedero, se identifican las principales



tendencias estructurales de las discontinuidades que lo componen representadas a través de estereogramas o diagramas de polos, donde se observa una tendencia predominante de foliación (Figura 2-133), cinco familias de diaclasas principales (Figura 2-134) cuatro sistemas de fracturas de cizallas (Figura 2-135), tal y como se muestran en la Tabla 2-29.

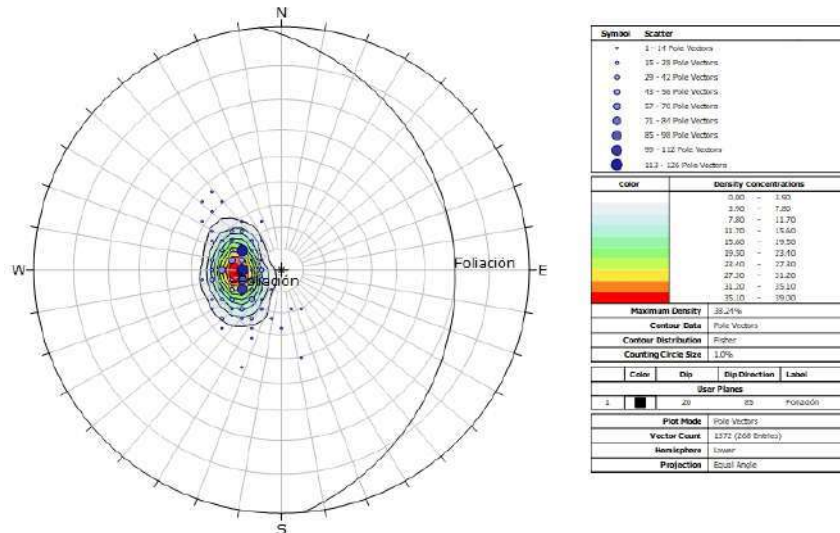


Figura 2-133 Estereograma de la foliación en el cuenco del vertedero (268 datos).

Fuente: CGI, 2021.

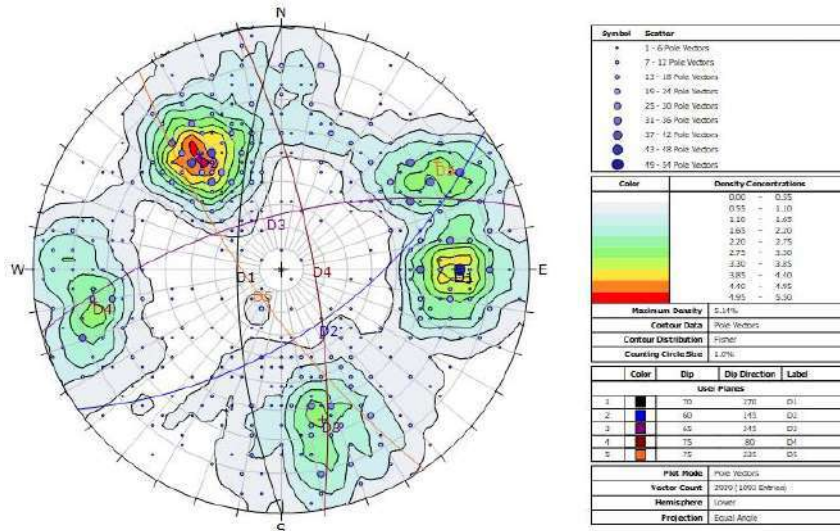


Figura 2-134 Estereograma de las diaclasas en el cuenco del vertedero (1093 datos).

Fuente: CGI, 2021.

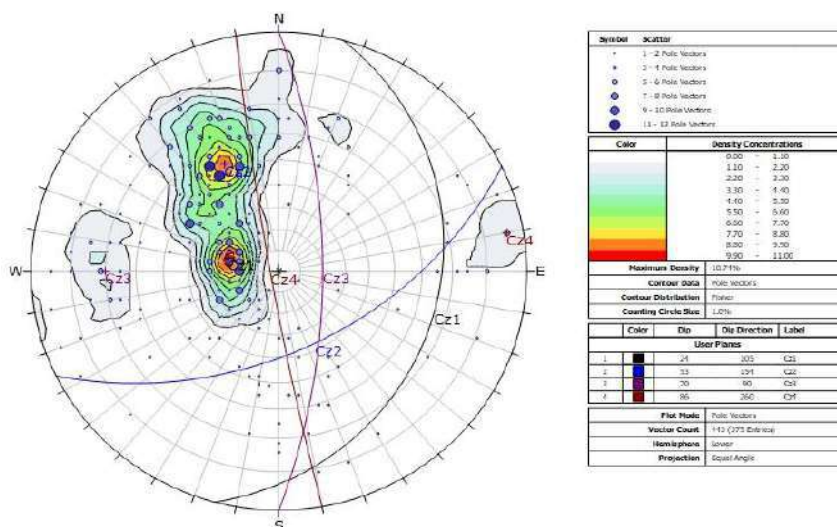


Figura 2-135 Estereograma de las cizallas en el cuenco del vertedero (375 datos)  
Fuente: CGI, 2021.

Tabla 2-29 Tendencias estructurales del macizo rocoso en el cuenco del vertedero.

TENDENCIAS ESTRUCTURALES			
N°	ID	TIPO ESTRUCTURA	DIP / DIP DIR
1	Fo	Foliación	20°/080°
2	D1	Diaclasa	70°/270°
3	D2	Diaclasa	60°/145°
4	D3	Diaclasa	65°/345°
5	D4	Diaclasa	75°/80°
6	D5	Diaclasa	75°/235°
7	Cz1	Fractura de cizalla	25°/105°
8	Cz2	Fractura de cizalla	55°/155°
9	Cz3	Fractura de cizalla	70°/90°
10	Cz4	Fractura de cizalla	60°/340°

Fuente: CGI, 2021.

### 3) Caracterización de la calidad del macizo rocoso

El macizo rocoso es el conjunto conformado por matriz rocosa y discontinuidades, que presenta un carácter heterogéneo, con comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo; por ese motivo, su caracterización y clasificación física y geomecánica es de gran importancia para garantizar la estabilidad de las obras.

#### Designación de la calidad de la roca (RQD)

El índice RQD desarrollado por Deere en 1967, se define como el porcentaje de la suma de recuperación de testigos de más de 10 centímetros de longitud (en su eje) con respecto a la longitud total del avance de perforación que se está evaluando, sin tener en cuenta las

fracturas frescas (mecánicas) que generan el proceso de rotación durante las perforaciones y afectan los núcleos de roca.

La estimación de los valores RQD para el cuenco del vertedero se determinaron a partir de los levantamientos geológico-estructurales en función del número de fracturas por metro cúbico (Jv/m<sup>3</sup>), según Deere (1967). La Tabla 2-30 muestra la clasificación de la calidad del macizo rocoso según el porcentaje de RQD estimado en dichos levantamientos.

Tabla 2-30 Clasificación de la calidad del macizo rocoso a partir de los valores RQD

CALIDAD MACIZO ROCOSO	% RANGO RQD
Muy Mala	0% ≤ RQD ≤ 25%
Mala	25% < RQD ≤ 50%
Regular	50% < RQD ≤ 75%
Buena	75% < RQD ≤ 90%
Muy Buena	90% < RQD ≤ 100%

Fuente: CGI, 2021.

El análisis estadístico de los levantamientos geológicos muestra que los valores RQD promedio estimados para el cuenco del vertedero en su mayoría clasifican con un 56% para una calidad de roca regular, con valores RQD entre el 50% y el 75%, seguido de un 29% con roca de calidad buena con valores RQD entre el 75% y el 90%, tal y como se muestra en la Figura 2-136.

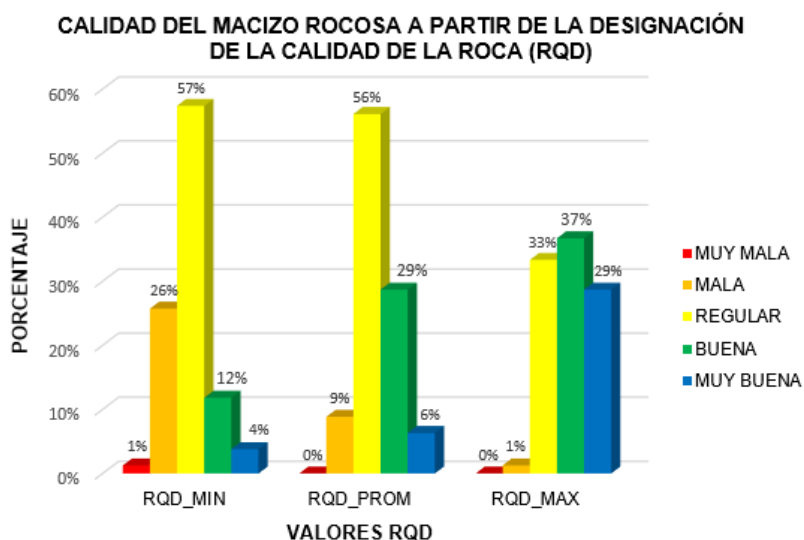


Figura 2-136 Calidad del macizo rocoso a partir de valores RQD en el cuenco del vertedero.

Fuente: CGI, 2021.

### Índice de resistencia geológica (GSI)

Hoek et al. 1995; propuso un índice de resistencia geológica, GSI (*geological strenght index*), que evalúa la calidad del macizo rocoso en función del grado y características de

fracturamiento, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades.

Para la clasificación del macizo rocoso del cuenco del vertedero se utilizaron los valores de GSI obtenidos a partir de los levantamientos geológicos realizados durante su excavación, los cuales son estimados del análisis de los bloques y la condición de las discontinuidades que lo conforman, utilizando la carta para evaluar el índice de resistencia geológica (GSI) en macizos rocosos fracturados presentada por Marinis & Hoek (2000) (Ver Figura 2-137).

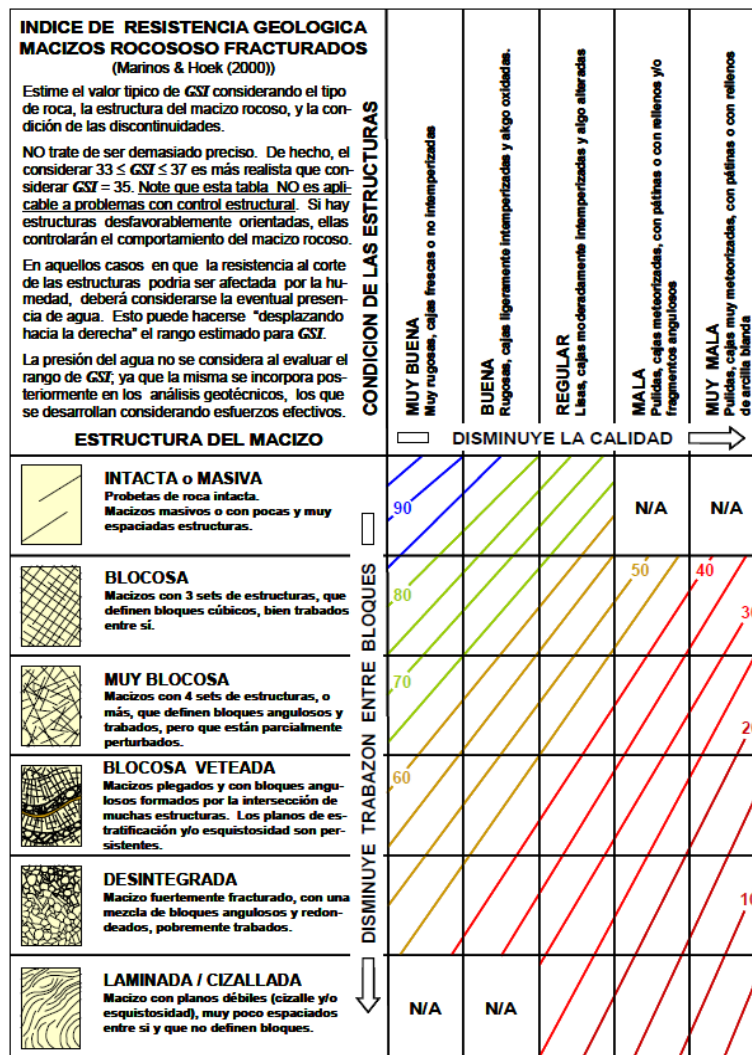


Figura 2-137 Carta para evaluar el índice de resistencia geológica (GSI) en macizos rocosos fracturados.

Fuente: Marinis & Hoek (2000).

Para efectos de categorización de la calidad del macizo rocoso, el índice GSI varía en valores de uno (1) a cien (100), lo que permite definir cinco (5) clases de macizos rocosos, como se



muestra en la Figura 2-138 y la Tabla 2-31. A continuación, se presentan en planta los valores estimados de GSI para el cuenco del vertedero:

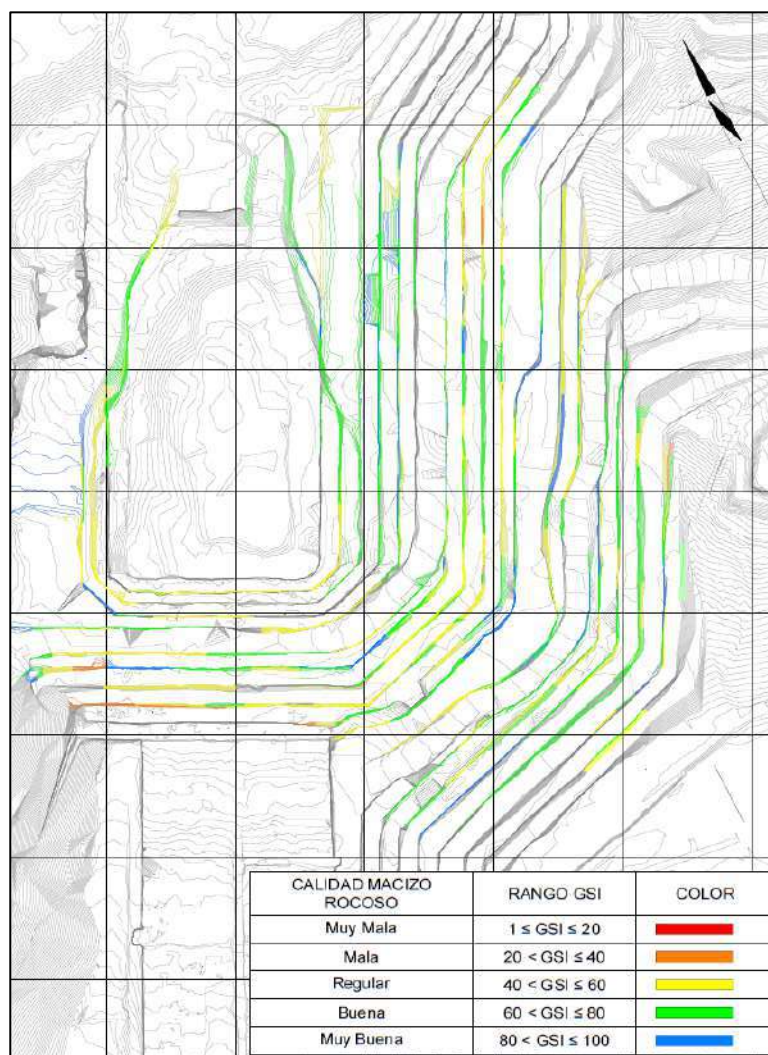


Figura 2-138 Valores estimados de GSI para el cuenco del vertedero.

Fuente: CGI, 2021.

Tabla 2-31 Clasificación de la calidad del macizo rocoso según los valores de GSI

CALIDAD MACIZO ROCOSO	RANGO GSI
Muy Mala	$1 \leq \text{GSI} \leq 20$
Mala	$20 < \text{GSI} \leq 40$
Regular	$40 < \text{GSI} \leq 60$
Buena	$60 < \text{GSI} \leq 80$
Muy Buena	$80 < \text{GSI} \leq 100$

Fuente: CGI, 2021.



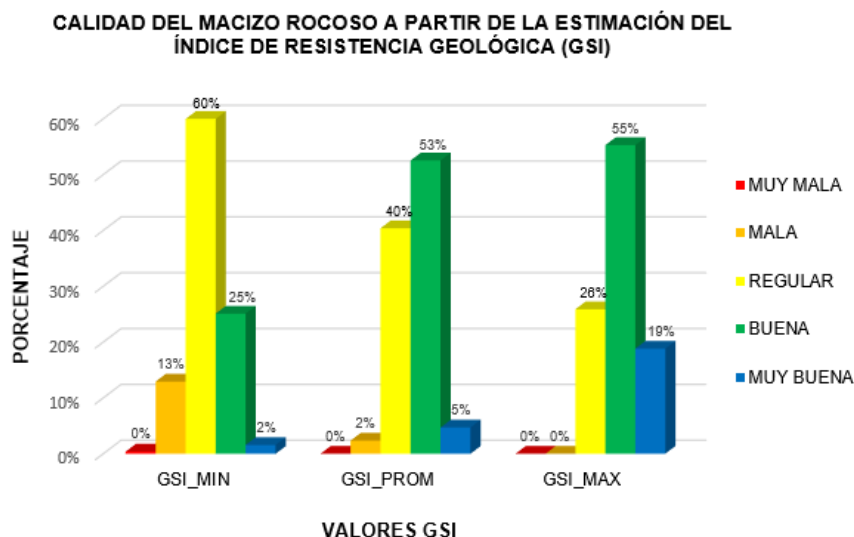


Figura 2-139 Calidad del macizo rocoso a partir de valores GSI en el cuenco del vertedero.  
Fuente: CGI, 2021.

El análisis estadístico de los valores GSI promedio estimados para el macizo rocoso del cuenco del vertedero evidencia que el 58% de los levantamientos geológicos muestran un macizo de calidad buena a muy buena (Ver Figura 2-139), presentando valores GSI promedio que varían entre 63 y 88, donde la estructura de la roca está configurada generalmente por la intersección de tres (3) a cuatro (4) sistemas de discontinuidades, los cuales generan bloques pequeños a medios, angulares a cúbicos, con superficies rugosas a suaves, ligeramente a moderadamente alteradas con oxidación ocasional, a excepción de los casos donde se identificaron algunos planos de debilidad, observados principalmente en zonas de fractura cizalla donde la calidad del macizo disminuye de calidad regular (40%) a mala (2%), con valores GSI promedio que varían entre 40 y 60, y donde el macizo se observa altamente fracturado generando bloques muy pequeños, incluso con sectores donde la roca se encuentra triturada a desintegrada por el fuerte cizallamiento, presentando superficies lisas muy alteradas con patinas de óxidos y rellenas de fragmentos de roca con material blando generalmente arcilloso.

#### 4) Calidad del macizo rocoso por tipos de GSI

Teniendo en cuenta la carta para determinación del índice GSI propuesta por Hoek, se definieron tres (3) rangos de calidad del macizo rocoso, según lo mostrado en la Figura 2-140, establecidos en el diseño de la obra para la asignación de soporte durante excavación, teniendo en cuenta la caracterización geológica estructural expuesta en este documento.

Teniendo en cuenta estos tipos de GSI, se evaluaron las condiciones geomecánicas que los definen, basados además en la guía para la identificación del macizo rocoso que se establece en la carta como la condición de las discontinuidades y el tamaño de los bloques, conforme a los hallazgos durante la excavación de los taludes del cuenco.











<b>CONVENCIONES</b> 		<b>GSI</b>	<b>ESTRUCTURA</b>	<b>DISCONTINUIDADES</b>				
				<b>MUY BUENA:</b> Muy rugoso, superficies frescas y sin meteorización	<b>BUENA:</b> Rugosas, superficies ligeramente meteorizadas y algo oxidadas	<b>REGULAR:</b> Lisas, superficies moderadamente meteorizadas o alteradas	<b>POBRE:</b> Lisos, altamente meteorizadas, con pátinas compactas y/o rellenos con fragmentos angulares	<b>MUY POBRE:</b> Lisos, superficies altamente meteorizadas con rellenos o pátinas de arcilla suave
	<b>MASIVA:</b> Macizos masivos e inalterados formado por bloques con menos de tres familias de discontinuidades muy espaciadas. Espaciamientos de juntas > 100cm			80				
	<b>FRACTURADA:</b> Macizos masivos e inalterados formados por tres sets de discontinuidades que forman bloques cúbicos. Espaciamiento de juntas 30-100 cm			70				
	<b>MUY FRACTURADA:</b> Macizos parcialmente alterados con 4 sets de estructuras, o más. Espaciamiento de juntas 3-10 cm			60				
	<b>FRACTURADA - ALTERADA:</b> Macizos plegados con bloques agulares formados por la intersección de muchas estructuras. Los planos de estratificación y/o esquistocidad son persistentes. Espaciamientos de juntas < 3 cm				50			
	<b>FOLIADA/CIZALLADA:</b> Macizos con planos debiles (cizalla y/on esquistocidad), muy poco espaciados entre si y que no definen bloques. Espaciamientos de juntas < 1cm					40		
	<b>DESINTEGRADA:</b> Macizo fuertemente fracturado, con una mezcla de bloques angulosos y redondeados pobremente trabados						30	
	<b>FOLIADA/CIZALLADA:</b> Macizos con planos debiles (cizalla y/on esquistocidad), muy poco espaciados entre si y que no definen bloques. Espaciamientos de juntas < 1cm							20
	<b>FOLIADA/CIZALLADA:</b> Macizos con planos debiles (cizalla y/on esquistocidad), muy poco espaciados entre si y que no definen bloques. Espaciamientos de juntas < 1cm							10
	<b>FOLIADA/CIZALLADA:</b> Macizos con planos debiles (cizalla y/on esquistocidad), muy poco espaciados entre si y que no definen bloques. Espaciamientos de juntas < 1cm							5

Figura 2-140 Tipos de GSI y rangos de ocurrencia, 1085 datos (tomado de Plano para construcción D-PHI-042-VER-EX-C-050).

Fuente: CGI, 2021.

#### 2.2.4.6.2 Talud margen izquierda (MI) al frente del vertedero

##### A. Geología local

Este talud al inicio de la operación del vertedero presentó una pérdida de aproximadamente 20,0 m<sup>3</sup> entre cobertura vegetal, parte del horizonte IC-IIA y IIA-fracturado; este deterioro evolucionó hasta la cota 360 m.s.n.m., siendo que la base del talud-lecho del río se encuentra

en la cota 230 m.s.n.m. aproximadamente. En la pared descubierta, se observa un escarpe en un horizonte de meteorización IC-IIA y IIA-fracturado, siendo este último caracterizado por un GSI del orden de 35 y un espesor del orden de 20 m a 30 m. La determinación de las estructuras geológicas se hizo mediante un levantamiento con ayuda de imágenes obtenidas con Dron (Figura 2-141 y Figura 2-142), con esta información se ha podido establecer el perfil de meteorización y las estructuras o discontinuidades dominantes.

En la parte inferior del talud se observa la acumulación de bloques que han caído desde la parte superior, formando lo que es denominado un depósito tipo Talus. En otras partes por la acción del río no se observa la presencia de materiales como suelo, quedando expuesta la roca y reflejando así un horizonte de meteorización tipo IIB.

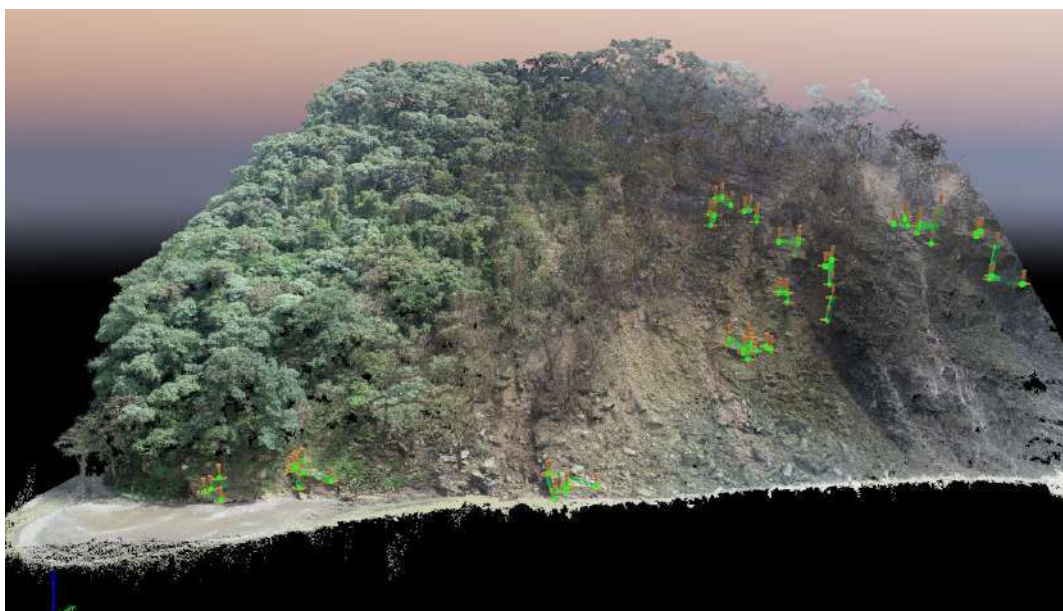


Figura 2-141 Base para la definición de estructuras geológicas dominantes.

Fuente: CGI, 2019.

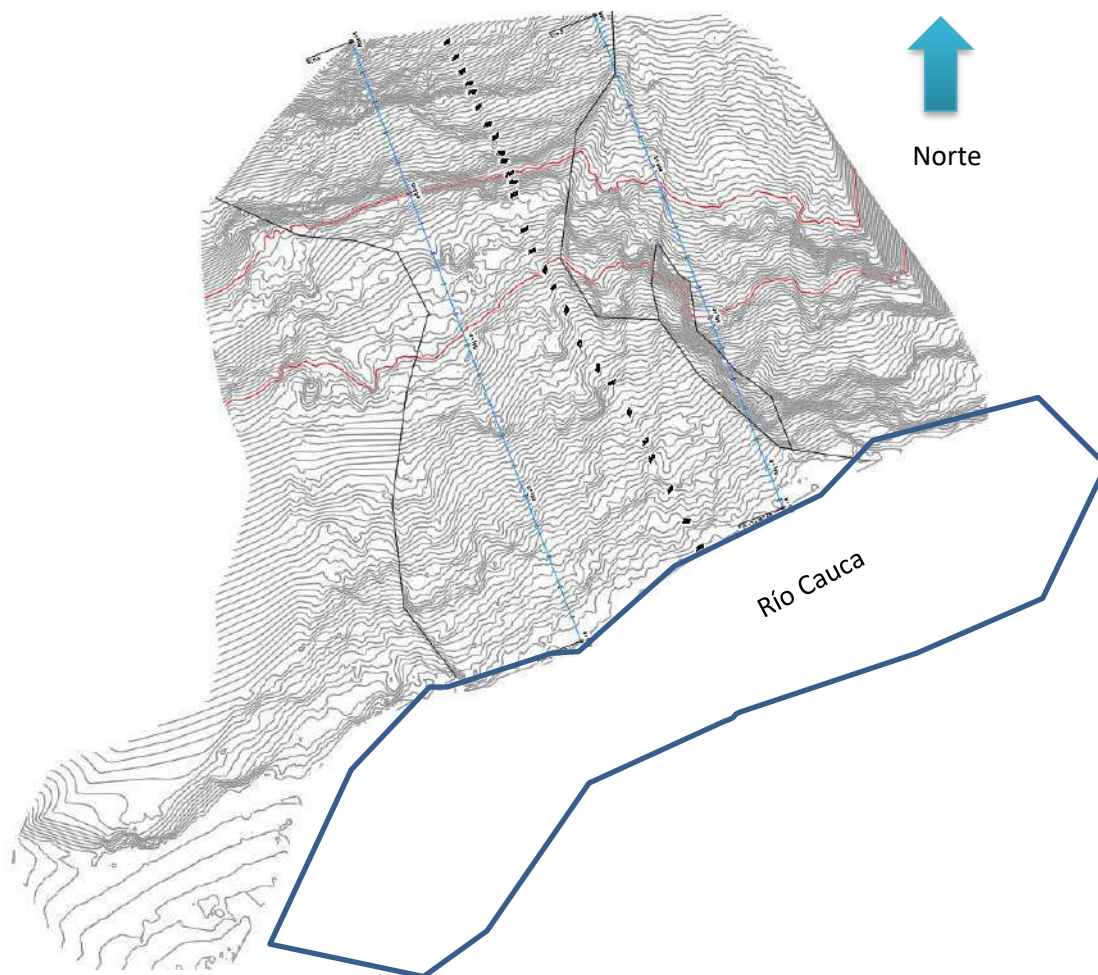


Figura 2-142 Zona de estudio MI talud al frente del vertedero.  
Fuente: CGI, 2021.





Figura 2-143. Presencia de depósito de vertiente Talus en la parte inferior del talud (noviembre de 2020).

Fuente: CGI, 2020.



Figura 2-144 Presencia de roca con horizonte de meteorización IIB en la parte media y baja del talud (noviembre 2020).

Fuente: CGI, 2020.



Como se mencionó anteriormente, debido a las dificultades de acceso en este sitio se realizó la caracterización estructural a partir de sobre vuelos con dron. El resultado del levantamiento se muestra en la Tabla 2-32 y la Figura 2-145 donde se puede observar la presencia de cinco sistemas de diaclasa incluyendo la foliación.

Tabla 2-32 Discontinuidades en el talud de margen izquierda, frente al vertedero.

Punto	Z	Discontinuidad	DIP	DIP Direccion	Persistencia (m)	Espaciamiento (m)
1	233,04	<b>Fo</b>	15	97	14,90	0,76
2	234,98					
3	231,85					
4	229,23	<b>D</b>	86	49	9,36	3,24
5	233,57					
6	229,58					
7	234,20	<b>Fo</b>	27	138	9,33	1,16
8	233,80					
9	234,09					
10	230,08	<b>D</b>	72	161	6,06	4,07
11	229,57					
12	231,50					
13	230,59	<b>D</b>	82	204	6,14	2,40
14	234,81					
15	235,14					
16	262,00	<b>Fo</b>	32	145	8,90	0,90
17	261,88					
18	262,27					
19	262,19	<b>D</b>	81	253	7,10	4,10
20	258,77					
21	259,34					
22	259,89	<b>D</b>	76	166	5,70	1,50
23	259,07					
24	260,84					
25	272,42	<b>D</b>	84	273	8,80	--
26	274,47					
27	275,80					
28	284,87	<b>D</b>	82	257	10,02	1,60
29	285,86					
30	285,19					
31	310,32	<b>Fo</b>	35	155	8,00	1,20
32	310,57					
33	310,14					
34	304,89	<b>D</b>	81	270	6,00	1,70
35	301,48					
36	304,53					
37	303,40	<b>D</b>	57	225	2,60	2,40
38	304,70					
39	304,94					
40	295,67	<b>D</b>	76	256	8,10	8,00
41	295,44					
42	296,10					

Punto	Z	Discontinuidad	DIP	DIP Direction	Persistencia (m)	Espaciamiento (m)
43	276,36	D	89	65	3,90	2,80
44	278,31					
45	274,86					
46	304,64	Fo	28	117	6,90	1,70
47	304,67					
48	304,11					
49	305,08	D	84	277	15,00	6,70
50	303,33					
51	301,76					
52	300,46	D	86	274	12,10	10,60
53	294,61					
54	291,62					
55	301,74	Fo	28	172	2,30	0,80
56	301,64					
57	301,80					

Fuente: CGI, 2021.

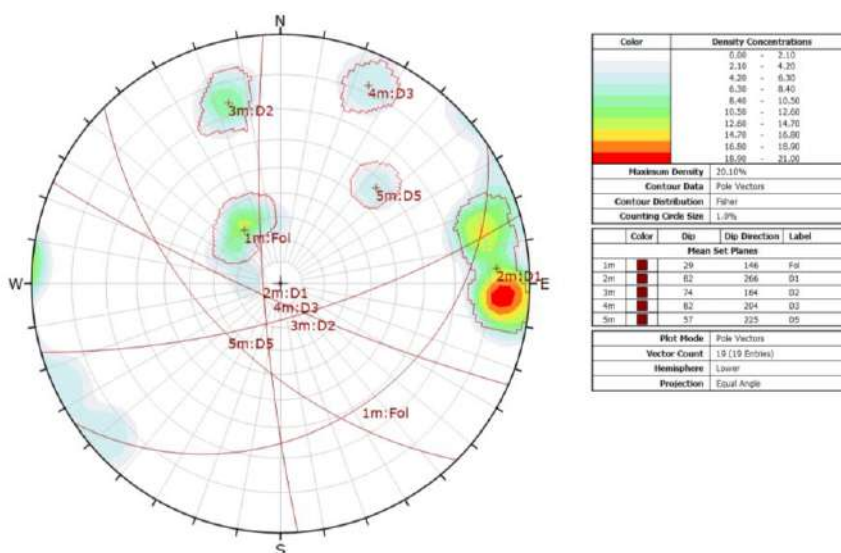


Figura 2-145 Estereograma talud MI al frente del vertedero

Fuente: CGI, 2021.

### 2.2.4.6.3 Zona entre salidas de las descargas y el Puente del Beso

#### A. Geología local

La zona de estudio se emplaza sobre gneises cuarzo-feldespáticos, cuya estructura puede cambiar localmente a milonítica y/o esquistosa; los cuales varían texturalmente en distancias muy cortas tanto horizontal como verticalmente. En múltiples sectores los paquetes rocosos se encuentran cubiertos por depósitos recientes tipo coluvión y flujos y/o por depósitos aluviales o fluviotorrenciales que en el sitio particular ubicado frente a la desembocadura del río Ituango se encontró en su mayor espesor.

Las geoformas que presentan las laderas del río Cauca permitieron la acumulación de algunos geomateriales en superficie y/o el desarrollo de las condiciones geológicas de estas desde los niveles más someros de las laderas hasta el lecho del río Cauca, exponiendo una variación de la calidad del macizo rocoso a diferentes niveles, la cual es representada por el perfil de meteorización de la roca y las condiciones de las discontinuidades que componen el macizo rocoso de la zona. A continuación, se describe el perfil estratigráfico del sector:

#### B. Perfil estratigráfico

El sector entre las salidas de los túneles de Descarga y el puente El Beso se encuentra enmarcado en una secuencia de rocas metamórficas tipo gneis cuarzo-feldespático que texturalmente varía de manera local y presenta esquistosidad, recubierto en algunos sectores por depósitos recientes de espesores y características variables.

##### 1) Roca perfil de meteorización

Superficialmente, desde el borde de la capa de agua y unos 20 m en promedio por encima de esta se presenta la roca poco meteorizada (horizonte IIB), dura, con alteración restringida a las paredes de las discontinuidades, representada por pátinas de óxidos principalmente (Fotografía 2-1). Por encima de ésta se presenta la roca moderadamente meteorizada (horizonte IIA), caracterizada por la elevada oxidación y rellenos de suelos limosos o arenosos entre las paredes de las discontinuidades (Fotografía 2-2).



Fotografía 2-1 Horizonte IIB en la ladera izquierda del río Cauca, sector de descarga de la Central, tomada en octubre de 2019.

Fuente: CGI, 2019.



Fotografía 2-2 Horizonte IIA en la margen derecha del río Cauca, vía Puerto Valdivia – Sitio de Presa, sector quebrada Ticuitá, tomada en octubre de 2019.

Fuente: CGI, 2019.

En ese mismo orden, se encuentra suprayaciendo al horizonte IIA, la transición suelo-roca (horizonte IC-IIA), que se caracteriza por ser un horizonte en extremo heterogéneo, correspondiente a abundantes bloques de roca, angulosos y de hasta 0,6 m de diámetro en medio de una limitada matriz de suelos limo-arenosos amarillento a gris amarillento, con espesores máximos hacia la margen izquierda que oscilan entre los 8,0 m y 10,0 m de profundidad (Fotografía 2-3). Sin embargo, la continuidad lateral de este horizonte es irregular, pudiendo estar ausente en algunos sectores. Finalmente, el perfil de meteorización en ambas márgenes del río Cauca, en especial hacia la margen izquierda, está compuesto localmente por un horizonte residual (I-C), de carácter limoso a limo-arenoso, de color amarillento o gris amarillento con tonalidades rojizas, poco plástico y de blando a firme, el cual se restringe a la parte superior del perfil, con espesores de no más de un metro de profundidad y en gran parte de las vertientes puede estar ausente.





Fotografía 2-3 Horizonte IC-IIA en la margen derecha del río Cauca, vía Puerto Valdivia – Sitio de Presa, sector quebrada Ticuitá, tomada en octubre de 2019.

Fuente: CGI, 2019.

## 2) Depósitos recientes

El típico paisaje de montaña que caracteriza el sitio de estudio es favorable para la generación de fenómenos de vertiente donde se combinan la gravedad y el agua e incluso la depositación de materiales arrastrados por el río Cauca y sus afluentes. En ese sentido se pueden clasificar en dos grupos principales según los procesos que los origina, gravitacionales y erosivos. Por lo anterior, es común la ocurrencia de depósitos coluviales, flujos de escombros y/o lodos, depósitos aluviales y/o aluviotorrenciales los cuales están constituidos por una mezcla heterogénea de bloques de roca angulosos o subredondeados respectivamente, de diversos tamaños que por lo general se encuentran envueltos en una matriz también heterogénea.

### a) Depósitos de vertiente (Qdv)

Estos depósitos son el producto de fenómenos de inestabilidad o movimientos en masa ocurridos en los terrenos inclinados o de vertiente, generados por una combinación de factores tales como la gravedad y el agua, entre otras, pudiendo haber sido detonados en algunas ocasiones por movimientos telúricos o aguaceros torrenciales. Su identificación y delimitación se facilita porque generalmente están asociados a los lugares de las vertientes donde se observan condiciones de baja pendiente y topografía suave o irregular, coronada por una zona de pendiente alta en forma semicircular, desde donde se generaron los materiales que los componen.

La composición de estos depósitos consta principalmente de bloques y cantos de roca gnéisica, subangulares, moderadamente alterados y generalmente menores de un metro, aunque aguas abajo del eje de la presa pueden encontrarse bloques de roca sueltos, de más de 1,0 m de



diámetro. Los espesores de estos cuerpos dependen de las características de la zona donde se encuentren, es decir, la dimensión particular de cada depósito puede ser tan diversa en extensión y profundidad como la topografía lo permita (Fotografía 2-4):



Fotografía 2-4 Depósito de vertiente en la margen derecha del río Cauca, sector quebrada Ticuitá, tomada en octubre de 2019.

Fuente: CGI, 2019.

#### b) Depósitos aluviales (Qalt)

Los depósitos aluviales están conformados por secuencias de materiales arenosos intercalados con bloques y cantos, embebidos en una matriz gravo – arenosa. Generalmente presentan espesor variable entre 10 y 30 m, bajo grado de consolidación y muy permeables. Este tipo de depósitos se identificaron localmente como terrazas colgadas en ambas márgenes del río Cauca y hacia la confluencia de algunas quebradas con este mismo río hacia la margen izquierda principalmente, distribuidos de manera aleatoria, donde las condiciones geomorfológicas permitieron su acumulación (Fotografía 2-5).



Fotografía 2-5 Depósito aluvial en la margen derecha del río Cauca, vía Puerto Valdivia – Sitio de Presa, sector quebrada Ticuitá, tomada en octubre de 2019.

Fuente: CGI, 2019.

c) Depósitos fluvioaluviales o aluvioaluviales (Qal)

Los depósitos fluvioaluviales están normalmente conformados por bloques y cantos que alcanzan órdenes métricos, embebidos en matriz arenosa a limo-arenosa, con un grado de consolidación bajo a medio que envuelve bloques rocosos heterométricos, con tamaños hasta de 3,0 m, y gran variedad litológica, registrándose la presencia de basaltos, serpentinitas, gneises y esquistos, entre los más recurrentes. Su génesis está asociada a la influencia de la gravedad y el agua, cuya generación es favorecida por el típico paisaje de montaña escarpada que caracteriza la región. Dentro de este tipo de depósitos debe resaltarse el depósito aluvioaluvial localizado al frente de la desembocadura del río Ituango, de influencia en el diseño y removido parcialmente por las obras de los portales de salida de los túneles de desviación (Fotografía 2-6), del pozo de disipación del vertedero y de los portales de salida de los túneles de descarga donde se pudo constatar una presencia remanente del material acumulado por arrastre.



Fotografía 2-6 Conformación de taludes en material aluviotorrencial a la salida de los túneles de desviación, tomada en febrero de 2012.

Fuente: CGI, 2012.

d) Llenos antrópicos

Son el producto de la acumulación heterogénea de materiales gruesos y finogranulares o de algún tamaño en particular, sobrante de las excavaciones en el contexto del proyecto; los cuales se han dispuesto en los sitios que requerían adecuación para ganar espacios en ciertas obras o instalaciones. En ese sentido, se encuentran en cercanías de las obras como vías y plazoletas del proyecto, por encima del nivel del río y generalmente por debajo de la vía a la plazoleta de descargas (Fotografía 2-7) y/o la vía Puerto Valdivia – Sitio de Presa.



Fotografía 2-7 Lleno antrópico en la margen derecha del río Cauca, sector de descarga de la Central, tomada en octubre de 2019.

Fuente: CGI, 2019.



### C. Análisis estructural

Para el análisis estructural se tomaron los datos colectados durante las excavaciones de los taludes de la estructura de descargas, por ser la margen derecha la ladera que presenta mayor aferencia superficial de afloramientos rocosos. El procesamiento de los datos mostró un dominio de los planos de foliación en ambos casos, con orientación predominante 25°/075° (buzamiento/dirección de buzamiento), como se puede ver en la Figura 2-146.

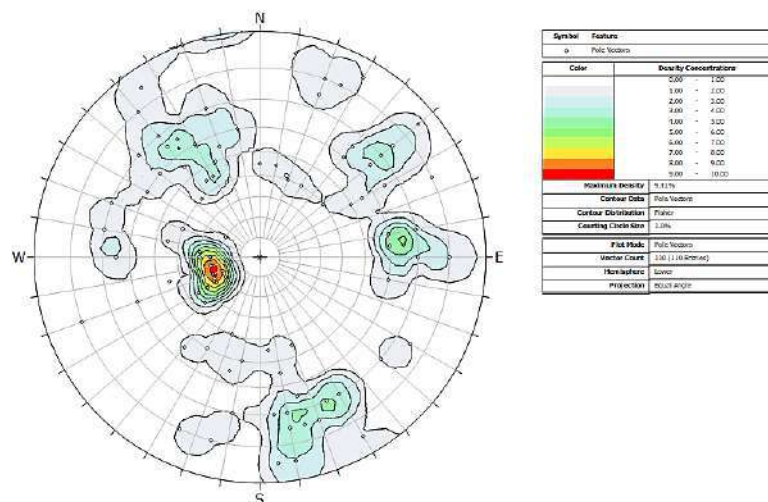


Figura 2-146 Diagramas de polos general para las estructuras de salida de las descargas de la central subterránea, 110 datos.

Fuente: CGI, 2021.

El complemento del arreglo estructural estuvo marcado por la presencia de unas siete familias de diaclasas encontradas en general en la excavación de los taludes de la plazoleta de descargas y los taludes de los canales de salida (Figura 2-147). En general se encontraron como orientaciones promedio predominantes los planos con tendencias 60°/145°, 75°/340°, 65°/265°, 70°/230°, 65°/095°, 40°/195° y 50°/010°. Este último de gran importancia para el control estructural de la estabilidad global de la ladera.

En términos generales se encontraron planos con persistencias moderadas (3,0 m – 10,0 m) a bajas (1,0 m – 3,0 m), de superficies rugosas a ligeramente rugosas, parcialmente abiertas a cerradas, con predominio de aberturas entre 0,1 mm y 2,5 mm, rellenas con materiales generalmente consistentes a duros y paredes entre ligeramente alteradas a poco alteradas.

De igual forma se registraron algunas zonas de debilidad tipo cizallas de espesores y persistencias variables, siendo los planos de continuidades moderadas los más frecuentes, con paredes generalmente abiertas (0,5 mm – >10,0 mm), de superficies lisas, generalmente muy alteradas y rellenas con materiales blandos arcillosos. Estas estructuras se encontraron siguiendo las orientaciones preferenciales 45°/145° y 30°-65°/060°-100°, siendo las de menor ángulo de buzamiento las asociadas a los planos de foliación, en la Figura 2-147 se muestran las

tendencias polares de las estructuras de debilidad encontradas durante la excavación de los taludes de la estructura de salida de los túneles de Descarga.

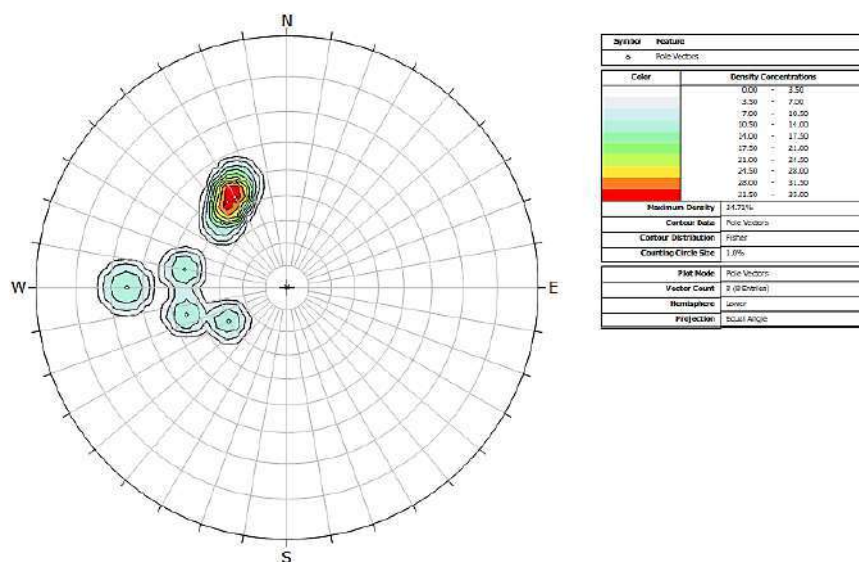


Figura 2-147 Diagramas de polos general para las estructuras de salida de las descargas de la central subterránea, 8 datos.

Fuente: CGI, 2021.

#### 2.2.4.6.4 Sectorización geológica

Los resultados de la sectorización se muestran desde la Figura 2-148 a Figura 2-150, para los tres sitios de este estudio, es decir, Talud MI al frente del vertedero y taludes entre la salida de las descargas y el puente El Beso.



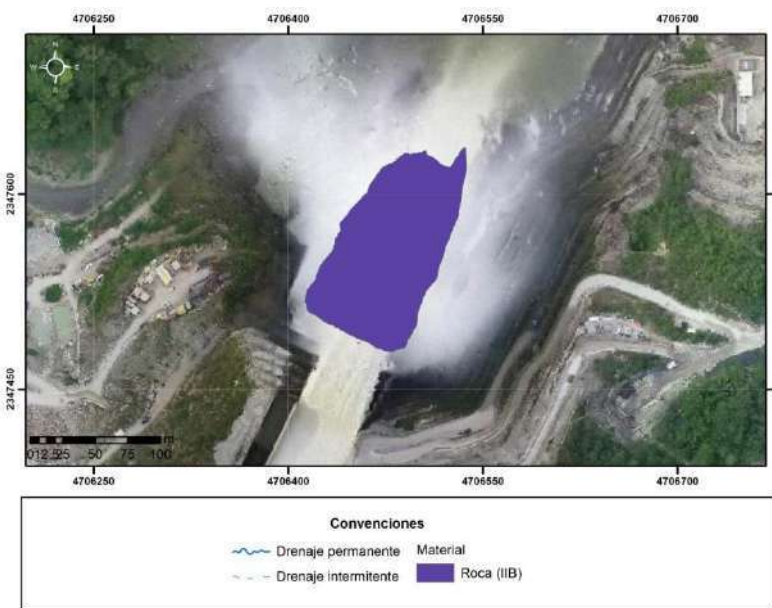


Figura 2-148 Sectorización geológica Cuenco de amortiguamiento del vertedero  
Fuente: CGI, 2021.

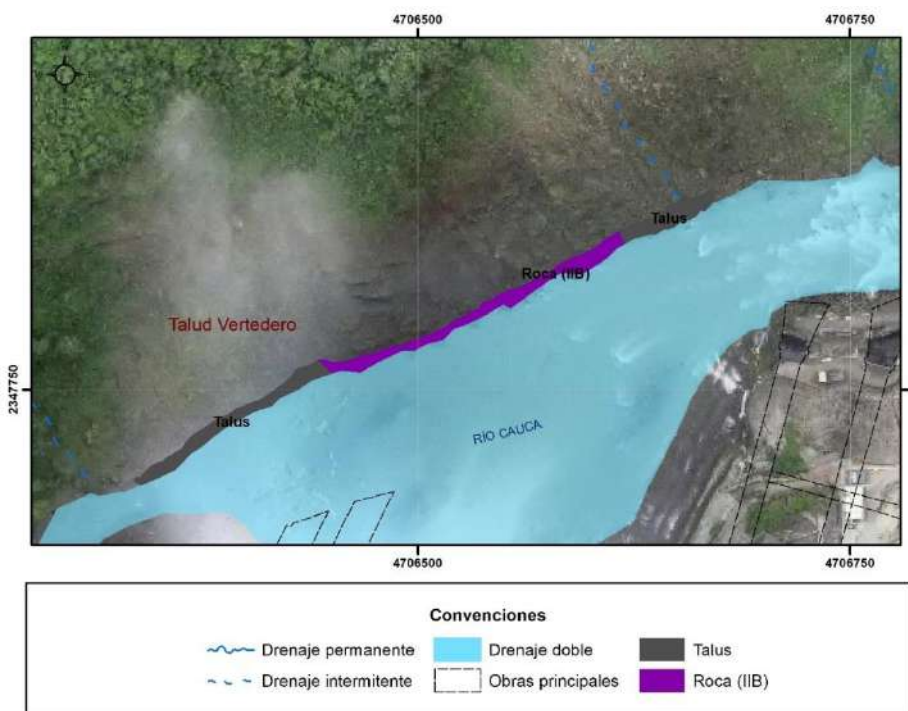


Figura 2-149 Sectorización geológica Talud MI al frente del vertedero.  
Fuente: CGI, 2021.

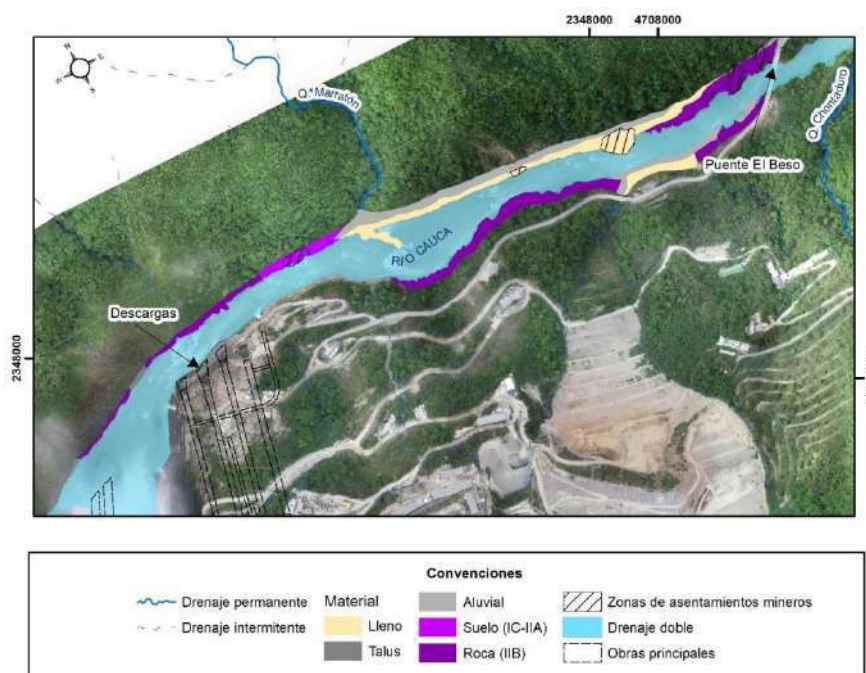


Figura 2-150 Sectorización geológica zona entre las salidas de las descargas y el puente El Besos.

Fuente: CGI, 2021.

En las figuras anteriores se muestran los sectores para cada ladera, con la presencia de materiales con mejores características geomecánicas hacia la margen derecha respecto a la margen izquierda. Hacia la margen derecha se encontraron afloramientos de roca ligeramente meteorizadas, correspondientes al horizonte IIB, cubiertos parcialmente por materiales sueltos generados por los cortes de las vías, mientras que hacia la margen izquierda este tipo material (horizonte IIB) se evidenció en los sectores donde la erosión de los horizontes de suelo permitió su afloramiento, mostrando una mayor cantidad de materiales con alto contenido de suelo como son los depósitos recientes y la transición suelo-roca, comparativamente con la margen derecha.

#### 2.2.4.6.5 Análisis y evaluación de la amenaza

A continuación, se presenta la evaluación de la amenaza asociada a procesos erosivos y de socavación, con su respectiva zonificación en términos de probabilidad de ocurrencia, que representa un insumo base para la estimación y valoración del riesgo.

##### A. Cuenco del vertedero – Índice de erodabilidad “K”

Teniendo en cuenta las propiedades geomecánicas fue posible evaluar los índices de erodabilidad K para el cuenco del vertedero, según los tipos de GSI de diseño y la determinación de los subíndices mostrados en la Tabla 2-33 y la Tabla 2-34, cuya variación se

presenta en la Figura 2-151 con respecto al tipo de estructura y el tipo de terreno en el cual se encuentran.

Tabla 2-33 Determinación de los subíndices Ms, Kb y Kd por tipos de terreno.

PARÁMETRO	TIPO DE GSI			
	I	II	III	IV
UCS	127	90	70	46
<b>Ms</b>	<b>124,71</b>	<b>88,38</b>	<b>68,74</b>	<b>45,17</b>
RQD	90	75	50	35
Jn	2,73	3,34	4,09	5
<b>Kb</b>	<b>32,97</b>	<b>22,46</b>	<b>12,22</b>	<b>7,00</b>
Jr	3	2	1,5	1
Ja	1	2	3	4
<b>Kd</b>	<b>3,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,50</b>	<b>0,25</b>

Fuente: CGI, 2021.

Tabla 2-34 Determinación del subíndice Js, según tipo de estructura y dirección del flujo.

Tipo de estructura	Buzamiento (°)	Dirección de buzamiento (°)	Dirección del flujo (030°)	Js
Foliación	20	80	Contra el flujo	<b>0,66</b>
Diaclasa 1	70	270	Contra el flujo	<b>0,91</b>
Diaclasa 2	60	145	Contra el flujo	<b>0,71</b>
Diaclasa 3	65	345	Contra el flujo	<b>0,71</b>
Diaclasa 4	70	80	Contra el flujo	<b>0,97</b>
Diaclasa 5	75	235	Contra el flujo	<b>0,91</b>
Fracturas de cizalla	45	125	Contra el flujo	<b>0,55</b>

Fuente: CGI, 2021.

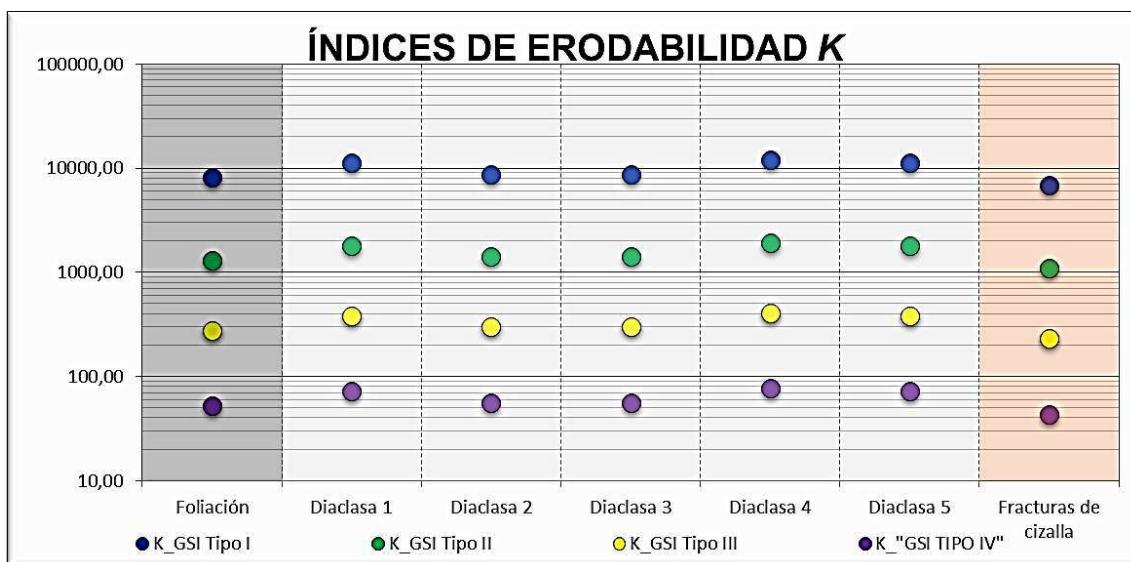


Figura 2-151 Valores de los índices de erodabilidad K en el cuenco del vertedero por tipo de estructura y tipo de GSI.

Fuente: CGI, 2021.

De los índices K mostrados en la Figura 2-151 se puede establecer que, la menor resistencia del macizo rocoso a la erosión está dada por la baja calidad que representan los valores de GSI tipo IV, en este caso se debe tener en cuenta que estos valores se incluyeron en este estudio a modo ilustrativo, con el fin de exponer las condiciones de un macizo rocoso altamente meteorizado y de muy mala calidad que no fue excavado en el cuenco del vertedero. Asimismo, los mayores índices corresponderían a un macizo rocoso de terreno tipo I. Dentro de las variaciones en un mismo tipo de terreno se puede apreciar una menor resistencia de las fracturas de cizalla, seguida por las diaclasas de foliación y finalmente otras diaclasas que estarían con valores de resistencia a la erosión superiores a las discontinuidades anteriormente mencionadas.

Por otra parte, los valores de GSI tomados para el macizo rocoso promedio (GSI 58%, tipo II) presentan una susceptibilidad a la erosión baja para los períodos de retorno de 2,33 a 50 años en todas las cotas evaluadas.

En la cota 200 m s.n.m. donde quedó la excavación, la probabilidad de erosión es moderada para la creciente con período de retorno de 500 años. Si el cuenco se socava y alcanza la cota 190 m s.n.m., la probabilidad de socavación es baja para la misma creciente y si se alcanza la cota 170 m s.n.m. la probabilidad de socavación será baja.

Estos resultados se muestran en la Figura 2-152.

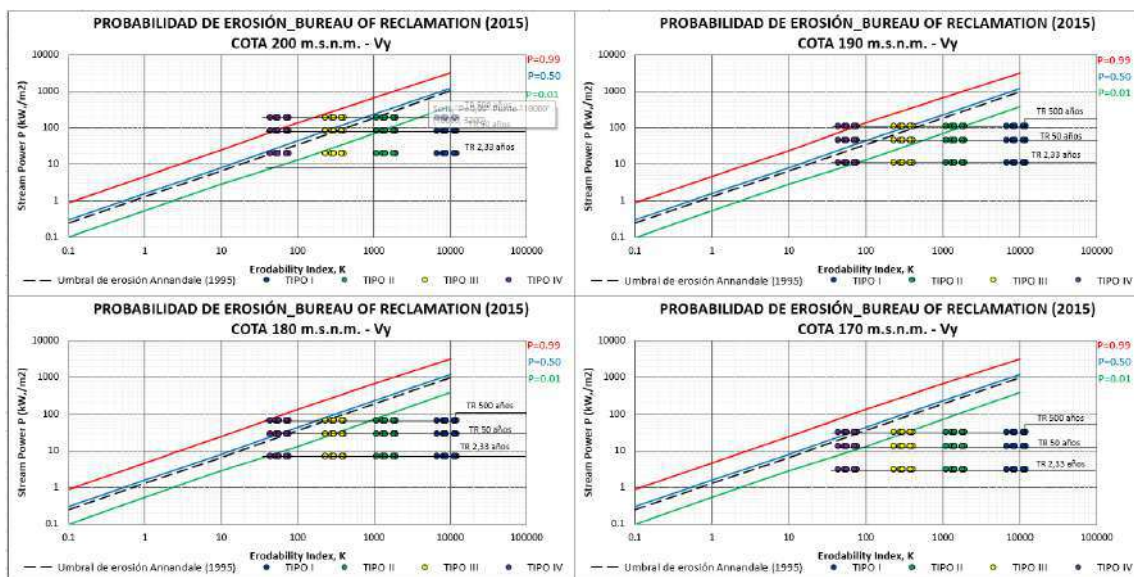


Figura 2-152 Probabilidad de erosión en el cuenco por cota y tipo de GSI para diferentes crecientes de diseño.

Fuente: CGI, 2021.

La evaluación del potencial de erosión en el cuenco usando la metodología de Annandale y el *Bureau of Reclamation* (2015), y teniendo en cuenta tanto el estimativo de la potencia erosiva como las principales variables hidrodinámicas sobre el pozo amortiguador que imprimen al macizo rocoso el tramo vertical del “chorro”, así como la resistencia a la erosión impuesta por el macizo rocoso en sí, permitieron establecer que:

- I. Para cualquier creciente de diseño, la probabilidad de que se presente erosión o socavación del macizo rocoso clasificado con GSI tipo I es nula.
- II. En sectores clasificados como GSI tipo II, la probabilidad de erosión para la creciente de diseño con periodo de retorno de 500 años, va de moderada para la cota 200 m s.n.m. a poco probable para las 200 a 170 m s.n.m.)
- III. En los sectores clasificados con GSI tipo III la socavación varía en las elevaciones de los 200 a 170 m s.n.m. para la creciente de diseño de 500 años de período de retorno, entre moderada alta a muy poco probable.

Lo indicado anteriormente se muestra tabulado en la Tabla 2-35.

Tabla 2-35 Probabilidad de erosión del cuenco por cota y tipo de GSI para diferentes crecientes de diseño.

PROBABILIDAD DE EROSIÓN CUENCO				
CRECIENTE DE DISEÑO (años)	COTA m.s.n.m.	TIPO GSI		
		I	II	III
500	200	Muy baja	Moderada	Alta
	190		Muy baja	Moderada

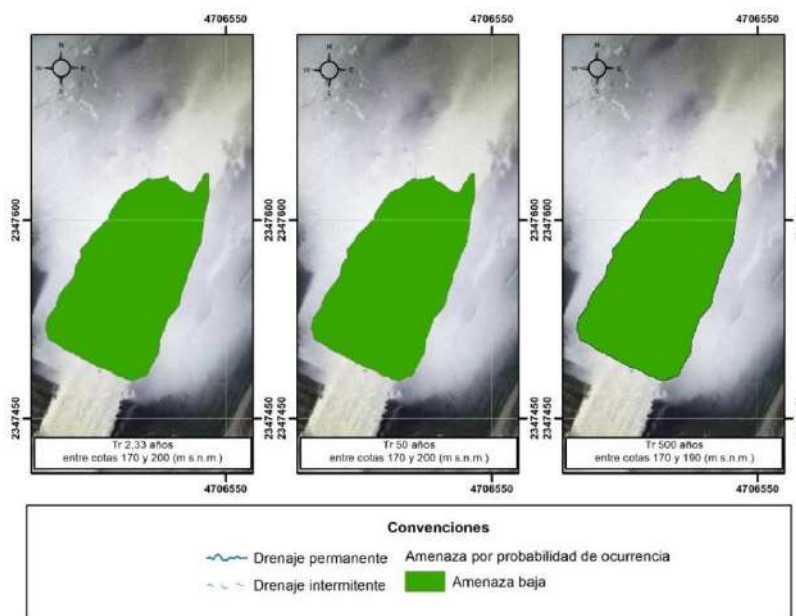


PROBABILIDAD DE EROSIÓN CUENCO				
CRECIENTE DE DISEÑO	COTA	TIPO GSI		
(años)	m.s.n.m.	I	II	III
50	180			Baja
	170			Muy Baja
	200			Moderada
	190			Moderada
	180			Muy Baja
	170			Muy Baja
2,33	200			Muy Baja
	190			Muy Baja
	180			
	170			

Notas: Probabilidad de Erosión (P.E.)  
P.E. Muy alta: > 99%  
P.E. Alta: 75% - 99%  
P.E. Moderada: 25% - 75%  
P.E. Baja: 1% - 25%

Fuente: CGI, 2021.

Con los resultados anteriores se realizaron los mapas de amenaza por probabilidad de ocurrencia para el GSI promedio (Tipo II) los cuales se centran en la zona de impacto del chorro (Figura 2-153 y Figura 2-154). En los mapas de amenaza anexos M-PHI-111-TRA-SCV-G-010 y M-PHI-111-TRA-SPE-G-010 se encuentran los escenarios de riesgo relacionados a socavación del cuenco y socavación procesos erosivos.



Muy Baja

Figura 2-153. Probabilidad de Erosión y socavación del cuenco Tr 2,33 Tr 50 entre cotas 170 a 200 m s.n.m y Tr 500 entre cotas 170 a 190 m s.n.m. (Amenaza por probabilidad de ocurrencia baja – GSI tipo II)

Fuente: CGI, 2021.

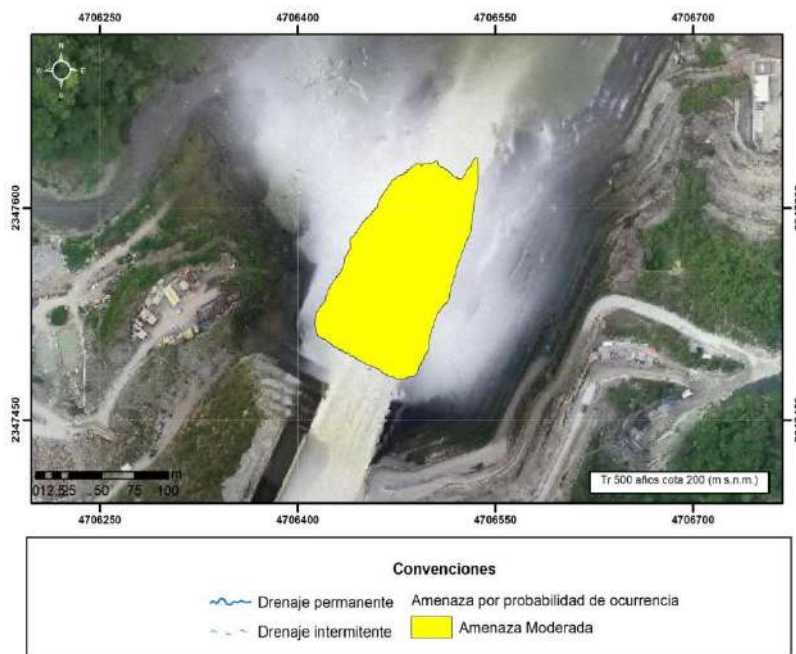


Figura 2-154 Probabilidad de Erosión y socavación del cuenco Tr 500 cotas 200 m s.n.m. (Amenaza por probabilidad de ocurrencia moderada – GSI tipo II)

Fuente: CGI, 2021.

## B. Talud MI al frente del Vertedero - Índices de erodabilidad “K”

Para evaluar el índice de erodabilidad de los materiales existentes en esta zona se utilizó la metodología de Annandale (1995) mostrada anteriormente. Como se expuso en la sectorización presentada en la Figura 2-149, se cuenta con la presencia de dos materiales, el primero corresponde a bloques de roca que se han acumulado en la orilla del cauce provenientes de la parte superior del talud, y el segundo material corresponde a macizo rocoso con horizonte de meteorización IIB. Finalmente, en un tercer tramo, se observa nuevamente la acumulación de bloques del primer material formando un depósito tipo talus.

De acuerdo con la metodología debido al cierre de la Compuerta de Captación N°1 el pasado 5 de febrero de 2019, se puso fin a la descarga de caudal por el sistema de obras subterráneas del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI), lo que generó un incremento en el nivel del embalse, iniciándose la actual descarga continua de caudal por el vertedero. Este suceso, además, imposibilitó la culminación de la excavación del cuenco de amortiguamiento hasta su cota diseño (190 m s.n.m.) quedando la excavación actual sobre la cota 200 m s.n.m.

Teniendo en cuenta lo anterior y puesto que se hace necesaria la operación continua del vertedero hasta el año 2023, se han realizado análisis de erosión y socavación para diferentes escenarios para caudales de diferentes periodos de retorno y cotas de socavación que podría generar el poder erosivo del chorro de impacto. Dichos análisis se entregaron a la Autoridad Ambiental como respuesta al Requerimiento 25 del Acta 101 del 19 junio de 2020 (ver documento “Rta\_Rto\_25\_Acta101(ANLA)” en Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A7).

La caída del chorro de agua sobre el cuenco de amortiguamiento genera una bruma que avanza hasta el talud localizado en la margen izquierda al frente del vertedero, lo que ha estado generando una pérdida de vegetación y un proceso erosivo sobre el talud. Para mitigar y controlar este fenómeno se presentaron algunas recomendaciones a considerar en el informe de análisis de riesgo entregado al ANLA en atención del Requerimiento del 43 del Acta 103 del 09 de agosto del 2019 (ver carpeta anexa “Req 43 Acta 103”)

Para la inclusión del análisis de los escenarios de riesgos asociados a procesos de socavación y erosión, inicialmente se presenta la identificación y caracterización de la amenaza asociada a estos, partiendo de los estudios técnicos con los que ya cuenta el Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI):

- Análisis riesgos del talud en la margen izquierda frente al vertedero. Atención al Requerimiento del 43 del Acta 103 del 09 de agosto del 2019 de la ANLA (Consortio Generación Ituango, 2019).
- Análisis de erosión del Cuenco del Vertedero. Informe I-2194-PHI-042-GEO-AECV-001. Atención al Requerimiento 25 del Acta 101 del 19 junio de 2020 de la ANLA. (Consortio Generación Ituango, 2020).
- Análisis multitemporal en el talud margen izquierda al frente del vertedero del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI). Informes de seguimiento periódico desde abril de 2020 hasta

febrero de 2021. Atención al Requerimiento 19 del Acta 101 del 19 junio de 2020 de la ANLA (Consortio Generación Ituango, 2021).

- Seguimiento a acciones propuestas para el talud margen izquierda al frente del vertedero. Atención al Requerimiento 20 del Acta 101 del 19 junio de 2020 de la ANLA (Consortio Generación Ituango, 2020).

El número de resistencia del macizo o de la masa estaría entre 35 a 70, dado que el UCS varía entre 70 MPa y 90 MPa para los horizontes IIA y IIB, siendo que los bloques que conforman el talus, son bloques que se desprendieron del horizonte IIA.

Con respecto al RQD y al  $J_n$  para el cálculo de  $K_b$ , de acuerdo con la caracterización geológica, el IIB es un macizo medianamente fracturado con más de tres familias de discontinuidades, por lo que el valor obtenido varía entre 3,34 y 5, asumiendo este último valor para las zonas de acumulación de bloques (talus) que corresponde a un RQD entre 25 y 50.

Con respecto al parámetros  $K_d$ , se asumió una rugosidad de las discontinuidades (se aclara que se asumió de acuerdo con la experiencia y conocimiento que se tiene del macizo rocoso en el proyecto, dado que el levantamiento realizado fue con dron por la imposibilidad del acceso) ondulada rugosa a plana rugosa, obteniendo valores de  $J_r$  de 3,0 y 1,5 respectivamente. Para el valor de  $J_a$  se asumió que las discontinuidades varían entre ligeramente alteradas sin relleno arcilloso a ligeramente alteradas con relleno no cohesivo, lo que implica un valor entre 2,0 y 3,0 respectivamente.

Finalmente, para el valor del  $J_s$  se tomó la mayor concentración de polos, en este caso corresponden a las familias de diaclasas D1 (foliación) y D5 (Roldán) del estereograma mostrado en la Figura 2-145. La diaclasa D1 tiene un ángulo de buzamiento en dirección del flujo de  $50^\circ$  y es un buzamiento hacia abajo en la dirección del flujo, por lo que el valor de  $J_s$  varía entre 0,50 a 0,40, mientras que la diaclasa D5 tiene un ángulo de buzamiento con respecto al flujo de  $60^\circ$  hacia abajo en dirección del flujo, obteniendo un  $J_s$  que varía entre 0,56 a 0,43. Estos valores se resumen en la Tabla 2-36 donde se muestra el resultado del índice de erodabilidad K y en la Tabla 2-37 donde se muestran los valores de pérdida de cabeza (Head loss) para los diferentes períodos de retorno evaluados, los cuales también se pueden ver graficados en la Figura 2-155.

Tabla 2-36 Resumen parámetros para el cálculo del índice de erodabilidad – Talud MI al frente del vertedero.

Material	Abscisa	$M_s$	$K_b$	$K_d$	$J_s$	Índice de erodabilidad K
Talus	k0+140-k0+260	35.00	5.00	0.50	0.45	39.38
IIB	k0+260-k0+460	70.00	14.97	3.00	0.50	1571.86
Talus	k0+460-k0+530	35.00	5.00	0.50	0.45	39.38

Fuente: CGI, 2021.

Con el resultado del índice de erodabilidad y la pérdida de energía entre las abscisas correspondientes a cada material (Tabla 2-36 y Tabla 2-37) se trazó la Figura 2-155, en la cual se puede observar que todos los resultados se encuentran por debajo del umbral de erodabilidad establecido por Annandale, para los tres períodos de retorno evaluados de 2,33, 50 y 500 años, lo que, de acuerdo con el autor, la probabilidad de erodarse es muy baja.

De acuerdo con el resultado anterior, en la Tabla 2-37 se muestra el resultado de la evaluación de la probabilidad de erosión en cada tramo para cada período de retorno.

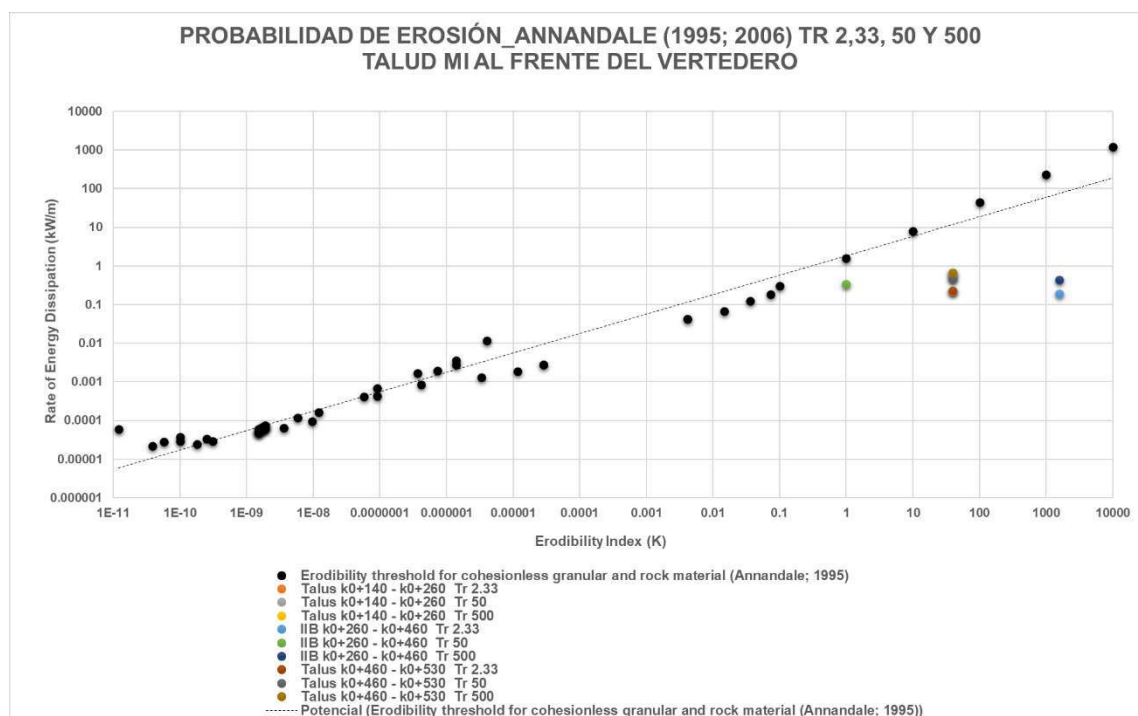


Figura 2-155 Índice de Erodabilidad K – Talud MI al frente del vertedero.

Fuente: CGI, 2021.

Tabla 2-37 Resultados probabilidad de erosión para los períodos de retorno de 2,33, 50 y 500 - Talud MI al frente del vertedero.

Material	Abscisa	Head loss- PE			Índice de erodabilidad K	Probabilidad		
		Tr 2.33	Tr 50	Tr 500		Tr 2,33	Tr 50	Tr 500
Talus	k0+140 - k0+260	0,22	0,50	0,65	39,38	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
IIB	k0+260 - k0+460	0,19	0,34	0,44	1571,86	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
Talus	k0+460 - k0+530	0,23	0,46	0,67	39,38	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja

Fuente: CGI, 2021.



Finalmente, con los resultados anteriores en la Figura 2-156 se muestran el mapa de amenaza por probabilidad de ocurrencia para cada uno de los materiales evaluados.

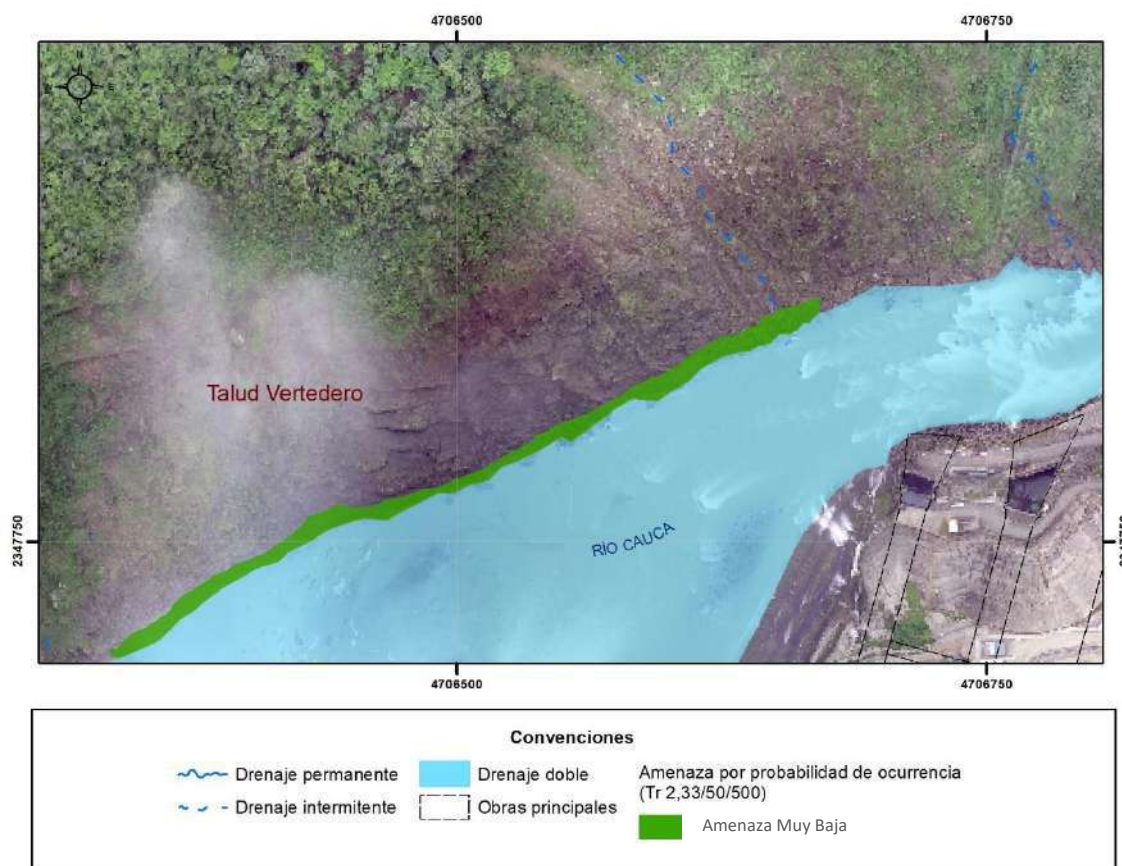


Figura 2-156 Probabilidad de Erosión y socavación talud margen izquierda al frente del vertedero para los Tr de 2,33, 50 y 500 años.

Fuente: CGI, 2021.

### C. Zona descargas puente El Beso (mi y md) – Índice de erodabilidad “K”

Similar los sitios anteriores, a partir de la metodología de Annandale (1995) para evaluar el potencial de erosión de suelos y rocas, se analizó el potencial de erosión de los sectores entre la estructura de salida de los túneles de descarga y el puente sobre el río Cauca, denominado El Beso. Para la evaluación del potencial de erosión de los sectores compuestos por suelos, se tuvieron en cuenta las variables hidráulicas particulares presentes en cada uno de ellos, así como los parámetros geomecánicos de los materiales que las componen y que definen la resistencia a la erosión.

El potencial de erosión viene dado por la relación entre la pérdida de energía del flujo de agua y el índice de erodabilidad. La pérdida de energía (Pe) se calcula a razón de la potencia del flujo

en una determinada longitud del canal y se expresa en kW/m; mientras que el índice de erodabilidad (K) representa una medida de la resistencia de un material terreo a la erosión.

Se calcularon cada una de las variables necesarias para determinar el índice de erodabilidad a cada uno de los materiales identificados en la sectorización de acuerdo a su origen, es decir, roca con un horizonte de meteorización IIB, un horizonte IC-IIA que corresponde a una transición suelo-roca con una proporción de roca mayor a la de la matriz, y algunos llenos antrópicos que, en la margen izquierda corresponde a los llenos realizados para la construcción de la vía que servirá para la realización del dragado del río, mientras que en la margen derecha corresponden al Jarillón para proteger las descargas y el lleno de la vía. Finalmente, se observan depósitos aluviales en ambas márgenes del río.

- **Roca (IIB) y Suelo (IC-IIA)**

El número de resistencia del macizo  $M_s$  se encuentra entre 35 a 70, dado que el UCS del macizo varía entre 70 MPa y 90 MPa para los horizontes IIA y IIB, mientras que para el horizonte IC-IIA, dado que la proporción de los bloques de roca es superior al 80% (sobre la matriz de suelo), se analizó como un macizo rocoso altamente meteorizado, para esto el  $M_s$  varía entre 3,95 a 8,39.

De acuerdo con la caracterización estructural de la roca, el macizo tiene más de más de tres familias de discontinuidades, por lo que el  $J_n$  varía entre 3,34 y 5, asumiendo este último valor el horizonte IC-IIA. Por su parte, el RQD varía entre 25 y 50 de acuerdo con la caracterización geológica. De la caracterización estructural se determinó que las discontinuidades tienen superficies rugosas a ligeramente rugosas, rellenas con materiales generalmente consistentes a duros y paredes entre ligeramente alteradas a poco alteradas, por lo que el parámetro  $K_d$  varía con un  $J_r$  de 3,0 y 1,5 respectivamente (IIB y IC-IIA) y el valor de  $J_a$  varía entre 2,0 y 3,0 respectivamente.

Finalmente, para determinar el valor del  $J_s$  se analizaron las mayores concentraciones de polos, dando como resultado la foliación, la diaclasa Roldan y dos familias más de discontinuidades. Estas discontinuidades tienen una variación del ángulo de buzamiento en dirección del flujo entre 30 y 50°, y su buzamiento varía hacia abajo en la dirección del flujo y hacia arriba en la dirección del flujo, por lo que el valor de  $J_s$  varía entre 0,49 a 9,63. El resumen de estos parámetros se muestra en la Tabla 2-38 junto con el resultado del cálculo del índice de erodabilidad K.

- **Aluvial (Qal) y Llenos antrópicos (QII)**

El valor del número de resistencia de la masa para estos materiales, como es de esperarse dado su origen, es altamente variable. El depósito aluvial tiene una matriz que varía desde materiales arenosos hasta cantos y bloques, embebidos en una matriz gravo-arenosa; el de la margen derecha se encontró con una mayor consolidación que el de la margen izquierda, tornándolo más susceptible, asumiendo valores de  $M_s$  de 0,04 y 3,95 respectivamente.

Para el caso de los llenos, la condición es muy parecida, es decir, el lleno de la salida de las descargas es un lleno estructural con alta compactación y densidad, el de la vía de la margen izquierda es un lleno bien compactado para el paso de los vehículos, mientras que el lleno de la margen derecha, que, si bien se encuentra compactado, presenta menor grado de compactación que los dos anteriores. Los valores de  $M_s$  asignados corresponden a 3,35 (margen izquierda), 8,39 (salida de las descargas) y 0,14 para el lleno del k1+630 de la margen derecha.

Para los materiales granulares, la variable  $K_b$  está en función del tamaño de partícula dada por el D50 del análisis granulométrico. Para esto se analizaron resultados de ensayos de granulometría disponibles en el sitio (ver “Resultados ensayos granulometría” en Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A7). El D50 del aluvial de la margen izquierda obtenido fue de 0,05 mm, mientras que para la margen derecha este tamaño de partícula alcanzó valores de D50 de 0,15. Para el caso de los llenos, en el lleno de la margen izquierda (vía) se obtuvieron valores de D50 de 0,25. Para el enrocado de protección de las salidas de las descargas, el tamaño promedio de los bloques fue de 0,50 m por lo que asumió este valor como D50. Finalmente, para el lleno del k1+630 de la margen derecha, el D50 obtenido fue de 0,15 m.

Para el cálculo del  $K_d$ , que está en función del ángulo de fricción residual entre las partículas, se asumieron valores de 20° para el aluvial y el lleno, a excepción del lleno que protege las descargas, que dado el tamaño de los bloques se asumió un valor de 30°. Finalmente, por tratarse de suelos granulares, de acuerdo con la metodología la variable  $J_s$ , se adopta un valor de 1.

El resumen de cada uno de los valores mencionados anteriormente, especificados por material y por zona se resume en la Tabla 2-38.

Tabla 2-38 Resumen parámetros para el cálculo del índice de erodabilidad – Márgenes del río entre la salida de las descargas y el puente El Beso.

Material	Abscisa	$M_s$	$K_b$	$K_d$	$J_s$	Índice de erodabilidad K
IIB_MI	k0+530 - k0+800	70,00	14,97	3,00	0,63	1980,54
IC-IIA_MI	k0+800 - k0+980	35,00	5,00	0,50	0,53	46,38
QaI_MI	k0+980 - k1+820	0,04	0,13	0,36	1,00	0,002
QII_MI	k0+990 - k1+925	3,95	15,63	0,58	1,00	35,63
IIB_MI	k1+700 - k2+072	70,00	14,97	3,00	0,63	1980,54
QII_MD	k0+540 - k1+100	8,39	125,00	0,84	1,00	880,01
IIB_MD	k1+100 - k1+630	70,00	14,97	3,00	0,63	1980,54
QaI_MD	k1+630 - k1+830	3,95	15,63	0,58	1,00	35,63
QII_MD	k1+630 - k1+790	0,14	3,38	0,58	1,00	0,27
IIB_MD	k1+790 - k1+985	70,00	14,97	3,00	0,63	1980,54
QaI_MD	k1+900 - k1+970	3,95	15,63	0,58	1,00	35,63

Fuente: CGI, 2021.

Con los valores del índice de erodabilidad K y la variación de la pérdida de energía se trazó la gráfica mostrada en la Figura 2-157, donde es posible observar que hay varios puntos por encima del umbral de erodabilidad, estos corresponden al depósito aluvial de la margen izquierda y el lleno antrópico de la margen derecha sobre el tramo de la abscisa k1+630 a k1+790. Esto significa que, en caso de presentarse alguna de las crecientes evaluadas estos materiales podría presentar erosión.

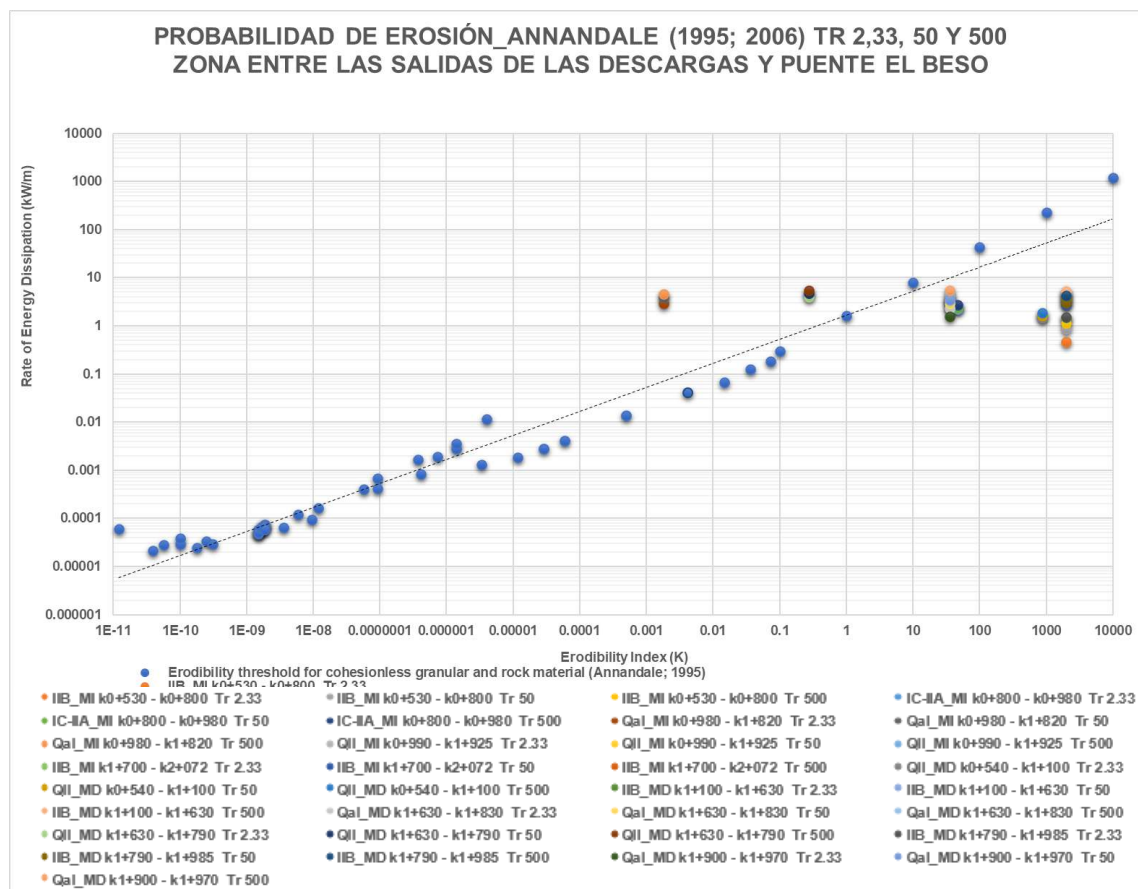


Figura 2-157 Índice de Erodabilidad K – Zona entre salidas de las descargas y puente El Beso.  
Fuente: CGI, 2021.

A partir de los resultados anteriores, en la Tabla 2-39 se presentan los resultados de los índices de erodabilidad y su probabilidad de erosión en función de los períodos de retorno, con los cuales se trazó el mapa de amenaza por probabilidad de ocurrencia para cada uno de los materiales evaluados y cuyo resultado se encuentra en la Figura 2-158.

Tabla 2-39 Probabilidad de erosión – Zona entre salidas de las descargas y puente El Beso.

Material	Abscisa	Tasa de disipación de energía (kW/m)			Índice de erodabilidad K	Probabilidad		
		Tr 2.33	Tr 50	Tr 500		Tr 2.33	Tr 50	Tr 500
IIB_MI	k0+530 - k0+800	0,47	0,86	1,16	1980,53	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
IC-IIA_MI	k0+800 - k0+980	2,2	2,39	2,74	46,37	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja



Material	Abscisa	Tasa de disipación de energía (kW/m)			Índice de erosión K	Probabilidad		
		Tr 2.33	Tr 50	Tr 500		Tr 2.33	Tr 50	Tr 500
QaI_MI	k0+980 - k1+820	2,87	3,85	4,56	0,0018	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
QII_MI	k0+990 - k1+925	2,4	3,48	4,28	35,63	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
IIB_MI	k1+700 - k2+072	1,44	2,75	3,79	1980,53	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
QII_MD	k0+540 - k1+100	1,48	1,6	1,84	880,00	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
IIB_MD	k1+100 - k1+630	3,36	4,51	5,31	1980,53	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
QaI_MD	k1+630 - k1+830	2,32	2,97	3,35	35,63	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
QII_MD	k1+630 - k1+790	4,02	4,68	5,53	0,27	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
IIB_MD	k1+790 - k1+985	1,51	3,0	4,27	1980,53	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
QaI_MD	k1+900 - k1+970	1,59	3,48	5,51	35,63	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja

Fuente: CGI, 2021.

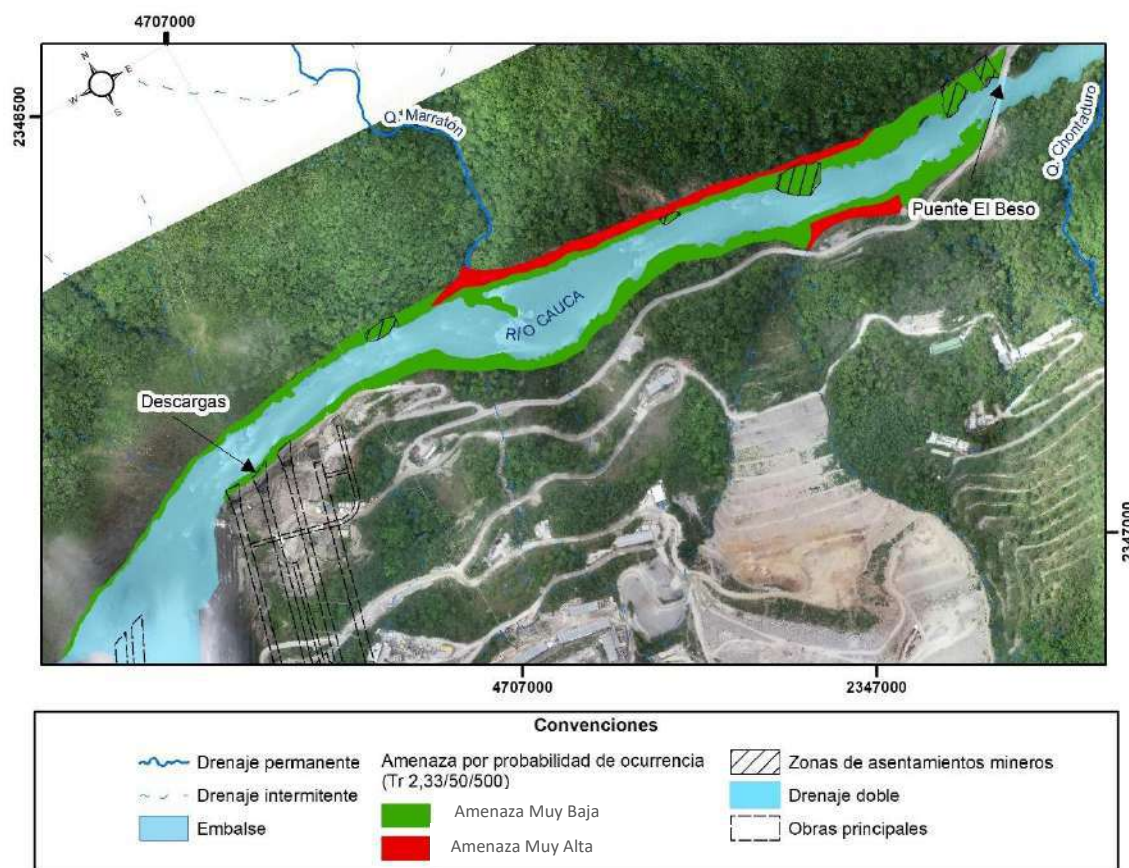


Figura 2-158 Probabilidad de Erosión y socavación entre la salida de las descargas y el puente El Beso para los Tr de 2,33, 50 y 500 años.

Fuente: CGI, 2021.

#### 2.2.4.6.6 Conclusiones



- La determinación de la probabilidad de erosión por medio de la metodología de Annandale y el Bureau of Reclamation (2015) para el cuenco del vertedero, fue realizada para cuatro tipos de terreno (terreno tipo I a tipo IV) con el objetivo de ilustrar la probabilidad de erosión que tiene cada uno de estos materiales. Sin embargo, el cuenco del vertedero fue excavado principalmente en terreno tipo II (58%) y tanto el terreno tipo I como el tipo IV no fueron encontrados durante el proceso de excavación.
- La probabilidad de erosión también se evaluó para diferentes crecientes con períodos de retorno de 2,33, 50 y 500 años. Adicionalmente, se evaluó el potencial erosivo para diferentes escenarios de profundidad del lecho del cuenco, bajo la cota 200 m s.n.m. que representa la condición de inicio de su operación, la cota 190 m s.n.m. que corresponde a la cota de diseño y las cotas 180 m s.n.m. y 170 m s.n.m. que corresponden a escenarios desfavorables bajo el supuesto de que la socavación avance hasta dichas profundidades.
- La evaluación de la probabilidad de erosión para el terreno tipo II arrojó como resultado que, para el período de retorno de 2,33 y 50 años, en cada una de las cotas analizadas, tiene probabilidad de ocurrencia muy baja, mientras que, para la creciente con período de retorno de 500 años, la probabilidad de erosión es baja en las cotas 170, 180 y 190 m s.n.m. Para la cota 200 m s.n.m. la probabilidad de erosión es moderada. El resumen de las probabilidades obtenidas de muestran en la Tabla 2-40.

Tabla 2-40 Probabilidad de erosión del cuenco por cota y GSI tipo II para diferentes crecientes de diseño.

PROBABILIDAD DE EROSIÓN CUENCO		
CRECIENTE DE DISEÑO	COTA	TIPO GSI
(años)	m.s.n.m.	II
500	200	Moderada
	190	Muy Baja
	180	
	170	
50	200	
	190	
	180	
	170	
2,33	200	
	190	
	180	
	170	

Fuente: CGI, 2021.

- En función del resultado anterior, de presentarse la erosión en el cuenco del vertedero para la cota 200 m.s.n.m. con el período de retorno de 500 años, el resultado del análisis de estabilidad con los taludes socavados, mostraron que permanecerían estables, tal como se indicó en el informe entregado al ALNA en atención al requerimiento 25.
- A partir de la información anterior, se trazaron los mapas de amenaza por probabilidad de ocurrencia (Figura 2-154, Figura 2-156 y Figura 2-158).
- Similar a los cálculos anteriores, para el talud de la margen izquierda al frente del vertedero se determinó la probabilidad de erosión desde el nivel del río hasta la cota 230 m s.n.m. dado que, hasta esta cota se estima que se eleve el río en caso de presentarse la creciente de 500 años. La probabilidad se evaluó para cada uno de los materiales encontrados de acuerdo con la sectorización geológica realizada. De forma análoga, la probabilidad de erosión se evaluó para las crecientes con período de retorno de 2,33, 50 y 500 años.
- Como resultado, se obtuvo que para cada uno de los materiales encontrados y para cada una de las crecientes evaluadas, dada la naturaleza de estos materiales (roca con horizonte de meteorización IIB y depósito tipo talus con bloques de tamaño decimétrico a métrico) la probabilidad de erosión es muy baja. El resumen de los resultados se muestra en Tabla 2-41.

Tabla 2-41 Probabilidad de erosión para los períodos de retorno de 2,33, 50 y 500 - Talud MI al frente del vertedero.

Material	Abscisa	Probabilidad		
		Tr 2,33	Tr 50	Tr 500
Talus	k0+140 - k0+260	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
IIB	k0+260 - k0+460	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
Talus	k0+460 - k0+530	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja

Fuente: CGI, 2021.

- Lo anterior implica que no es necesario una intervención en este talud para los efectos de socavación del río dado que las probabilidades de ocurrencia son muy bajas.
- A partir de la sectorización geológica y las probabilidades de erosión mostradas en la tabla anterior, se trazaron los mapas de amenaza por probabilidad de ocurrencia mostrado en la Figura 2-156.
- Finalmente, para las márgenes del río entre la salida de las descargas y el puente El Beso, se determinó la probabilidad de erosión para cada uno de los materiales identificados y mostrados en la sectorización geológica (Figura 2-150) y las crecientes de 2,33, 50 y 500 años de período de retorno.

- En este tramo, en ambos márgenes del río se encontraron diferentes materiales como lo son roca con un horizonte de meteorización IIB, transición suelo roca IC-IIA, depósitos aluviales (Qal) y llenos antrópicos (QII). Cada uno de estos materiales fueron caracterizados de acuerdo con la metodología de Annandale. El resumen de los parámetros evaluados se presenta en la Tabla 2-38.
- Como resultado de la evaluación de la probabilidad de erosión se obtuvo que para cada una de las crecientes evaluadas, los materiales tiene una probabilidad muy baja con excepción del material aluvial de la margen izquierda entre las abscisas k0+980 a k1+820 y el lleno antrópico de la margen derecha sobre las abscisas k1+630 a k1+970, cuya probabilidad es muy alta dado que superaron el umbral de erodabilidad de la metodología de Annandale, es decir, que estos materiales podrían erodarse en caso de presentarse las crecientes evaluadas. El resumen de estos resultados se presenta en la Tabla 2-42.

Tabla 2-42 Probabilidad de erosión – Zona entre salidas de las descargas y puente I Beso.

Material	Abscisa	Probabilidad		
		Tr 2,33	Tr 50	Tr 500
IIB_MI	k0+530 - k0+800	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
IC-IIA_MI	k0+800 - k0+980	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
Qal_MI	k0+980 - k1+820	Muy alta	Muy Alta	Muy alta
QII_MI	k0+990 - k1+925	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
IIB_MI	k1+700 - k2+072	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
QII_MD	k0+540 - k1+100	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
IIB_MD	k1+100 - k1+630	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
Qal_MD	k1+630 - k1+830	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
QII_MD	k1+630 - k1+790	Muy alta	Muy Alta	Muy alta
IIB_MD	k1+790 - k1+985	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
Qal_MD	k1+900 - k1+970	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja

Fuente: CGI, 2021.

- Si bien para el aluvial de la margen izquierda se obtiene que la probabilidad de erosión es muy alta, de presentarse este fenómeno no se esperan afectaciones sobre la ladera dado que este depósito aluvial es de bajo espesor y la roca IIB en la margen derecha aflora rápidamente como se puede observar en la sectorización geológica presentada.
- Con respecto al lleno de la margen derecha, en caso de presentarse la socavación se espera un efecto similar, dado que este lleno, de acuerdo a lo encontrado con los recorridos de campo es debajo espesor y está depositado por el horizonte de roca IIB, por lo que no se afectaría la vía que comunica con Puerto Valdivia.
- Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos, no se hace necesario la implementación de obras o medidas de mitigación para combatir el efecto de la erosión o socavación en los tres sitios evaluados.

#### 2.2.4.6.7 Seguimiento a las amenazas

Una vez identificados los factores que pueden contribuir a la amenaza por erosión y socavación, EPM procedió a escoger o reunir aquellos factores de mayor relevancia sobre los cuales se fundamenta el plan de contingencia operativa (Tabla 2-43), para las afectaciones al vertedero como frente prioritario.

Este plan está orientado -como mencionado antes - a los factores más críticos que contribuyen a la amenaza de erosión y socavación, y a la identificación de las variables que permitirían emitir alertas tempranas (sin importar el origen de la amenaza o el tipo de factor detonante, etc.).

Tabla 2-43 Seguimiento a los principales factores que contribuyen a la amenaza por socavación y erosión en la estructura del vertedero.

CAUSAS DEL ESCENARIO DE RIESGO	NIVEL DE ALERTAS Y UMBRALES				EVENTO MATERIALIZADO
<b>Erosión mayor de lo esperado y afectación de los taludes del cuenco</b>					
Caudal evacuado por el vertedero (m <sup>3</sup> /s)	< 2660	2660 > 4700	> 4700	N/A	N/A
Caudal (q l/s) a través de las perforaciones desde Descarga 1 vs nivel del cuenco (x)	q = 0,0333x - 7,3333	q = 0,3667x - 82,467	q = 0,6x - 134,9	q = 0,9161x - 205,78	
Relación de la velocidad Vs. Aceleración (R2)	R2 menor que 0,80	0,80 < R2 < 0,85	0,80 < R2 < 0,85	0,85 < R2 < 090	Fallo inminente
<b>Deterioro de las bermas del talud sur bajo el deflector</b>					
Caudal evacuado por el canal derecho (m <sup>3</sup> /s)	> 550	500 > 550	450 > 500	450 >	
Caudal evacuado por el canal izquierdo (m <sup>3</sup> /s)	> 200	150 > 200	100 > 150	100 >	
Inspección visual de las bermas	E (Estable)	DM (Deterioro menor)	DMA (Deterioro mayor)	IN (Inestable)	IN (Inestable)
Tiempo durante cambios de canal (minutos)	< 15	15 > 30	30 > 60	> 60	
Relación de la velocidad Vs. Aceleración (R2)	R2 menor que 0,80	0,80 < R2 < 0,85	0,80 < R2 < 0,85	0,85 < R2 < 090	Fallo inminente
<b>Daños en obras civiles (pilas, casetas, losa, muros)</b>					

CAUSAS DEL ESCENARIO DE RIESGO	NIVEL DE ALERTAS Y UMBRALES				EVENTO MATERIALIZADO
<i>Inspección visual de las bermas</i>					
Inspección visual del flujo con dron	Flujo normal	Anomalía puntual en el flujo	Anomalía zonal en el flujo		Cavitación
Inspección de recorrido rutinario	E (Estable)	DM (Deterioro menor)	DMA (Deterioro mayor)	IN (Inestable)	IN (Inestable)
<i>Galerías de drenaje (filtraciones)</i>					
Resultados última inspección técnica	Seco	Con humedad	Afloramiento menor	Flujo abundante	
Tiempo desde última inspección (días)	< 8	8 > 20	> 30	N/A	
Concretos del canal izquierdo					
Resultados última inspección técnica	E (Estable)	DM (Deterioro menor)	DMA (Deterioro mayor)	IN (Inestable)	IN (Inestable)
Tiempo desde última inspección (meses)	< 6	6 > 12	> 12	N/A	
Concretos del canal derecho					
Resultados última inspección técnica	E (Estable)	DM (Deterioro menor)	DMA (Deterioro mayor)	IN (Inestable)	IN (Inestable)
Tiempo desde última inspección (meses)	< 6	6 > 12	> 12	N/A	
Daños en obras civiles (pilas, casetas, otros)					
Resultados última inspección técnica	E (Estable)	DM (Deterioro menor)	DMA (Deterioro mayor)	IN (Inestable)	IN (Inestable)
Tiempo desde última inspección (mes)	< 1	1 > 3	> 3	N/A	
<b>Equipos electromecánicos.</b>					
Inspecciones periódicas según lineamientos documento 300000092-MP-0802					



CAUSAS DEL ESCENARIO DE RIESGO	NIVEL DE ALERTAS Y UMBRALES				EVENTO MATERIALIZADO
Inspecciones semanales	Cumplimiento en plazo <=9 días	9 días < Cumplimiento en plazo <= 18 días	18 días < Cumplimiento en plazo <30 días		
Inspecciones semestrales	Cumplimiento en plazo <=7 meses	7 meses < Cumplimiento en plazo <= 8 meses	8 meses < Cumplimiento en plazo <9 meses		
Inspecciones anuales	Cumplimiento en plazo <=13 meses	13 meses < Cumplimiento en plazo <= 15 meses	15 meses < Cumplimiento en plazo <18 meses		
Verificación de aspectos técnicos					
Vibraciones	Sin vibraciones/ Vibraciones menores	Aumento de nivel de vibraciones conocidos para % de apertura específico / Modos acoplados de vibraciones			
Corrosión	Sin corrosión/ Corrosión superficial en zonas no críticas	Corrosión en juntas o elementos de unión / Detección de corrosión en zonas críticas / Deterioro de recubrimientos	Pérdida significativa de espesor por corrosión		
Fracturas	Sin fracturas	Fracturas menores a dimensión crítica en elementos redundantes	Fracturas menores a dimensión crítica en elementos críticos	Fracturas de igual o mayor dimensión a dimensión crítica en elementos críticos	
Deformaciones en elementos estructurales	Sin deformación	Deformaciones menores o golpes en elementos no críticos	Deformaciones o pandeo en elementos estructurales		
Fugas					
En compuertas	Sin fugas / Fugas menores a las admisibles	Aumento en niveles de fugas			
	Sin fugas	Presencia de fugas			

CAUSAS DEL ESCENARIO DE RIESGO	NIVEL DE ALERTAS Y UMBRALES				EVENTO MATERIALIZADO
En los sistemas óleo-hidráulicos					
Fuerzas de operación (presión en los circuitos hidráulicos de los servomotores)	Normales según diseño	Aumento de presión en sistema óleo-hidráulico durante operación			
Integridad de conexiones pernadas	Libres de corrosión/ Sin elementos flojos	Corrosión leve en los componentes de la unión/ Pocos pernos flojos	Corrosión generalizada / Cantidad significativa de pernos sueltos / Pérdida de elementos de sujeción		
Estado del fluido hidráulico	Análisis de propiedades físico-químicas aceptables/200 Oh de trabajo	Detección de envejecimiento o pérdida de propiedades/presencia de partículas superior a límites admisibles/2500h de trabajo			

ALERTA	ACTIVIDAD	ACCIONES A IMPLEMENTAR
Normalidad en las actividades	<b>1.1, 2.1, 2.2, 2.4. Monitoreo.</b> <b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Inspección periódica.</b>	Monitoreo habitual de variables y videos de dron con reporte diario.
	<b>4.2.1 Monitoreo y registro de niveles de vibraciones</b>	Realizar registro tabulado de niveles de vibraciones en diferentes porcentajes de apertura para generar línea base de comportamiento dinámico normal de las compuertas
Preparación para la respuesta	<b>1.1, 2.1, 2.2, 2.4. Aumentar la frecuencia de monitoreo.</b>	Se intensifica la frecuencia del monitoreo al doble de la periodicidad definida (dos reportes diarios).
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Enfoque puntual en inspecciones.</b>	Identificar la anomalía presentada y acotarla para determinar sus implicaciones y enfocar las inspecciones a dicho sector.
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Modificar la regla de operación del vertedero.</b>	Ajustar la apertura de las compuertas sin modificar los niveles normales de operación del embalse.
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Notificación del cambio de escenario</b>	Informar del cambio de escenario.
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Diagnóstico de la situación</b>	Diagnóstico de la problemática con base en la información disponible. En este punto se determina la necesidad de instrumentación adicional

ALERTA	ACTIVIDAD	ACCIONES A IMPLEMENTAR
	4.1. Cumplir con actividades de mantenimiento pendientes	
	4.2. Aumentar frecuencia de inspecciones	
	4.2. Diagnóstico de la situación	Determinar y realizar métodos adicionales (especializados) de inspección (END's) Realizar evaluación de datos mediante estudios complementarios (análisis computacionales, mecánica de fracturas, cálculos de vida útil remanente)
	4.2.5.2. Reparación de la fuga	Implementación de cualquier acción requerida para detener la fuga (ajuste, cambio de sellos, reemplazo de piezas) Reposición de aceite hasta niveles normales
	4.2.2, 4.2.3 y 4.2.7. Intervenir zonas de recubrimientos que presentan fallas y reparar	
Alistamiento	1.1, 2.1, 2.2, 2.4. Aumentar la frecuencia de monitoreo.	Se intensifica la frecuencia del monitoreo al triple de la periodicidad definida.
	2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Enfoque zonal en inspecciones.	Identificar la anomalía presentada y acotarla para determinar las implicaciones que esto pueda tener y enfocarse las inspecciones a dicho sector .
	2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 Modificar la regla de operación del vertedero.	Ajustar la apertura de las compuertas y/o modificar los niveles normales de operación del embalse.
	2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 Buscar alternativa de inspección en seco	
	5. Instrumentación adicional	Instalación de instrumentación adicional en caso de requerirse
	2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 Alistamiento Previo Interventoría.	Informar a todas las partes sobre el aislamiento de la zona y donde aplique evaluar las alternativas de movilización en caso de afectar el transporte público y/o interno de los contratistas
	2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 Alistamiento General Contratistas.	
	2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 Informe a otros equipos de soporte de EPM.	
	2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 Concepto técnico	A partir del diagnóstico del problema se emite el concepto técnico con las posibles medidas de remediación y/o mitigación enfocadas a evitar que se excedan los límites actuales
	2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 Cumplir con actividades de mantenimiento pendientes	
	2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Aumentar la frecuencia de monitoreo.	

ALERTA	ACTIVIDAD	ACCIONES A IMPLEMENTAR
	<b>4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.6 y 4.2.7 Evaluación de datos</b>	Determinar mediante estudios complementarios (análisis computacionales, de mecánica de fractura, cálculos de vida útil remanente) la criticidad de la situación detectada y acciones necesarias
	<b>4.2.2 y 4.2.7 Definición de intervenciones</b>	Reparar zonas de recubrimientos que presentan fallas y mantener monitoreo especial en la zona
<b>Inicio de las acciones de respuesta</b>	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Modificar la regla de operación del vertedero.</b>	Cierre de compuertas del canal a inspeccionar y/o aumentar el nivel normal de operación del embalse.
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Movilizar cuadrillas de reparaciones.</b>	
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Realización de las reparaciones requeridas.</b>	
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Se anuncia a entidades externos.</b>	
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Generación de reporte de las reparaciones realizadas.</b>	
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Ejecución de trabajo para el manejo de la situación</b>	Ejecución de trabajos y obras requeridas para el manejo de la inestabilidad parcial o total
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Implementar planes de contingencia</b>	
	<b>4.1. Evualar mediante análisis especializado necesidad de cierre de la compuerta para reparación inmediata</b>	
<b>Activación Plan de Continuidad (Materialización del evento)</b>	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Cambio en la operación del vertedero.</b>	Cierre de compuertas del canal en reparación y/o aumentar el nivel normal de operación del embalse según el caudal de entrada.
	<b>2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Ejecución de acciones correctivas.</b>	Reuniones técnicas acordes a los daños presentados para definición de acciones correctivas inmediatas.
	<b>3. Activación PEC.</b>	
	<b>4. Activación PADEC.</b>	
Este reporte es un compendio de información desarrollada por EPM y Contratistas. El objetivo de este instrumento es disponer de una herramienta sencilla y práctica, la cual permita responder eficaz y oportunamente mediante el uso de los recursos necesarios para sobreponerse ante eventos contingentes, los cuales pudiesen comprometer la continuidad y objetivos del Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Mayores detalles pueden ser consultados en el <b>Plan de Contingencia Operativo ante eventos amenazantes que puedan generar afectaciones al sistema del vertedero</b> y sus anexos.		

Fuente: CGI, 2021.

### 2.2.4.7 Caracterización de la amenaza por derrames de sustancias peligrosas

A continuación, se realiza la caracterización de 14 puntos en el área del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI) con presencia de sustancias peligrosas, cuyo derrame podría causar afectaciones al medio ambiente. La caracterización de los puntos de almacenamiento de sustancias se realizó a partir de un recorrido de campo. Para los diferentes sitios se establecieron los tipos de sustancias almacenadas, su volumen y se analizó, además, si los sistemas de contención implementados podrían contener el volumen de las sustancias almacenadas.

Con base en la información de recorrido de campo, se pudo identificar que el derrame más crítico corresponde al sitio de la estación de combustible, ya que por sus condiciones, es susceptible de generar afectaciones sobre las fuentes hídricas cercanas. Teniendo en cuenta esta información, se realiza un análisis de la capacidad de asimilación del río Cauca, aguas abajo del sitio presa del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI), ante la posibilidad de ocurrencia de un derrame de sustancias contaminantes. Particularmente, en el posible ingreso de 132,48 m<sup>3</sup> de hidrocarburo tipo Diesel al río Cauca.

El diésel (también denominado gasóleo o gasoil), es un hidrocarburo líquido de densidad sobre 850 kg/m<sup>3</sup>, compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en calefacción y en motores diésel. Está compuesto aproximadamente de un 75% de hidrocarburos saturados (principalmente parafinas incluyendo isoparafinas y cicloparafinas) y un 25% de hidrocarburos aromáticos (incluyendo naftalenos y alcalobencenos).

Con el propósito de estimar la capacidad de asimilación del río Cauca en el tramo de estudio, se implementó el modelo HEC-RAS, en su versión 5.0.7. Para la modelación se analizó un escenario de contingencia, en el cual la totalidad del volumen derramado ingrese de manera instantánea al río Cauca en un único punto (sección 212.976), considerando condiciones hidrológicas máximas, medias y mínimas.

A partir de los resultados obtenidos, se buscó determinar la longitud a partir de la cual la concentración pico de este contaminante estuviera por debajo del 1% de la concentración pico inicial, es decir, al momento de ocurrir el derrame e ingresar de manera instantánea al río Cauca.

#### 2.2.4.7.1 Caracterización de las sustancias contaminantes

En este numeral se presenta la caracterización de las sustancias contaminantes objeto de análisis. En primer lugar, se realizó un recorrido en campo donde se identificaron los diferentes lugares con posibilidad de llegar a presentar un derrame. Los puntos identificados con susceptibilidad a generar derrames, y que pudieran afectar las fuentes hídricas cercanas, se listan a continuación. En la Figura 2-159 se presenta la ubicación general de estos puntos.

- Casa de Máquinas. Caverna de transformadores.
- Talleres ATB.
- Base militar San Juan de Rodas.
- Campamento Villa Luz.
- Subestación 44 kVA – Villa Luz.



- Subestación principal 500 kVA.
- Planta diésel campamento Tacui – Cuni.
- Estación de combustible CCCI.
- Taller industrial.
- Taller de mantenimiento.
- Subestación de construcción de 44 kVA.
- Planta diésel en el portal de acceso a la central.
- Laboratorio de calidad. Almacenamiento de resina.
- Planta de concretos. Almacenamiento de aditivos.

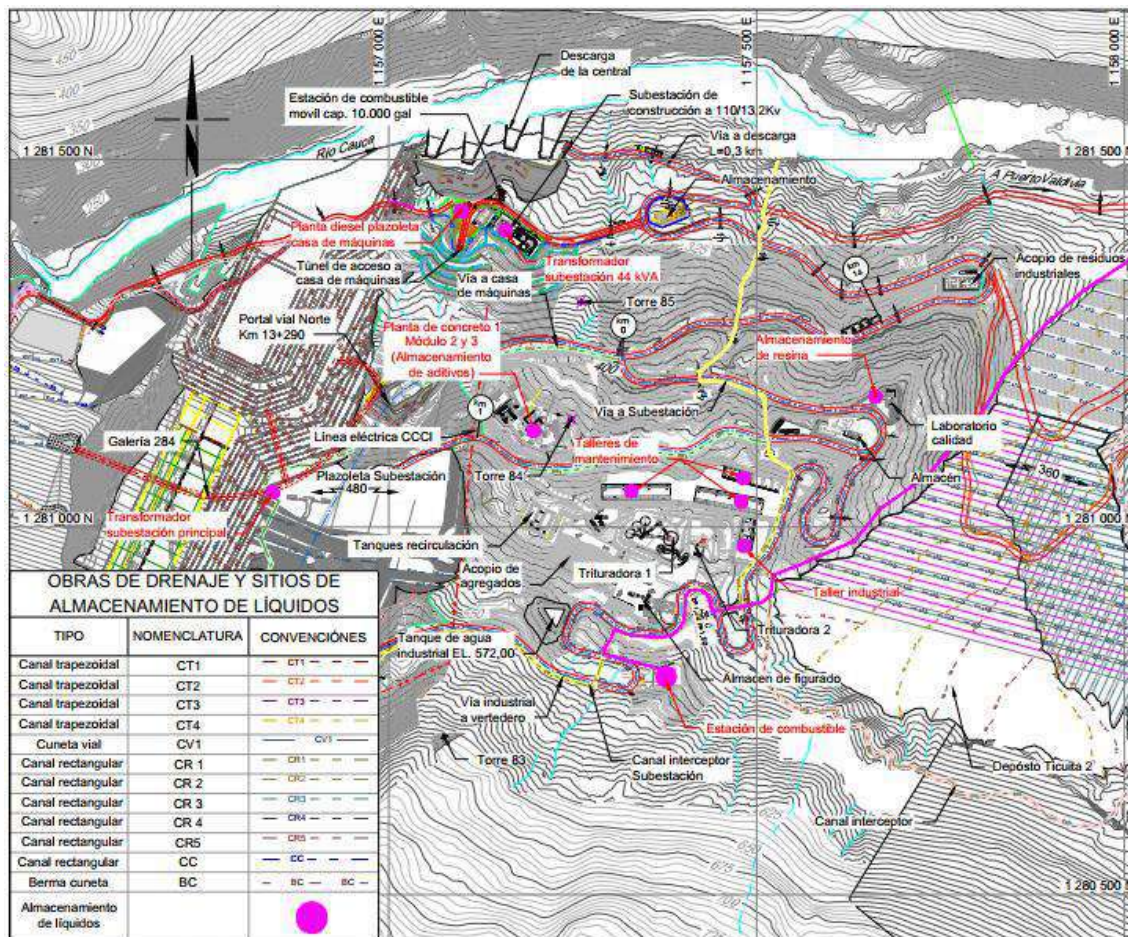


Figura 2-159 Localización general los puntos de interés.  
Fuente: Integral S.A., 2021.

## A. Descripción de sitios identificados

### 1) Casa de Máquinas – Caverna de Transformadores

En la zona norte de la caverna de transformadores se almacenará de forma temporal (hasta la puesta en servicio de los transformadores) 2 tipos de aceite dieléctrico que cuentan con las características físicas y químicas descritas en la Tabla 2-44. El almacenamiento se llevará a cabo en un tanque confinado con capacidad de 30.000 litros mientras se realiza el proceso de ensamble de transformadores en cada una de las 24 celdas dispuestas para ello. Adicionalmente, se tendrá en reserva máximo 130 canecas cilíndricas de aceite de capacidad de 55 galones que corresponde a la cantidad necesaria para un transformador, por lo tanto, en total se almacenarán 57.065,7 litros de aceite en la zona (Fotografía 2-8 y Fotografía 2-9).

Tabla 2-44 Características de los aceites almacenados.

Característica	KunLun K145X Transformer Oil	Nyro Orion 1
Forma	Líquido viscoso	
Color	<0.5, amarillo claro pálido	
Olor	Inoloro	
Punto de fusión	-42°C	-60°C
Densidad	883 kg/m <sup>3</sup> a 20°C	885 kg/m <sup>3</sup> a 15°C
Solubilidad en agua	Insoluble	
Solubilidad en solventes orgánicos	Soluble	
Viscosidad a 40°C	9.0 cSt	9.7 mm <sup>2</sup> /s

Fuente: Integral S.A., 2021.



Fotografía 2-8 Tanque de almacenamiento de 30.000 litros.



Fotografía 2-9 Almacenamiento de canecas de aceite.

La zona se encuentra provista con los siguientes componentes, los cuales, permiten un adecuado desarrollo de la actividad y sirven como sistema de contención de derrames, o en su defecto, evitan la generación de este tipo de eventos:

- Cárcamos perimetrales: Cada una de las 24 celdas para los transformadores cuenta con un cárcamo perimetral, los cuales conectan internamente por medio de tubería y conducen los eventuales derrames a unas piscinas donde se realiza el tratamiento y separación de aceite (Fotografía 2-10).

- Estibas contenedoras: Se tiene alrededor de 15 estibas contenedoras para transportar los bidones de aceite hacia el tanque de almacenamiento, las cuales permiten recoger algún tipo de derrame ocasionado en esta actividad (Fotografía 2-11).
- Kit de derrames: Se cuenta con 3 kits de derrames compuestos por material absorbente granulado, pala antichispa, bolsas, guantes (Fotografía 2-12).
- Máquina de tratamiento para la separación de aceite: En caso de que se presenten derrames menores de aceite que lleguen a los cárcamos antes de conectar con las piscinas de tratamiento, estos se recogen y se tratan en una en una máquina con capacidad de 5000 litros, con el fin de recuperar el producto para su reutilización (Fotografía 2-13).
- Acoples grafados en las mangueras para evitar que se revienten.
- Sistema de cierre rápido en las mangueras.
- Flautas en las válvulas.



Fotografía 2-10 Cárcamos perimetrales.



Fotografía 2-11 Estibas contenedoras.





Fotografía 2-12 Kit de derrames.



Fotografía 2-13 Máquina para recuperación de aceite.

Aunque se cuenta con las medidas para la mitigación de derrames, se evidencia el riesgo de afectación al recurso hídrico (aguas de infiltración) en caso de un derrame de gran magnitud. Además, se puede observar que posterior a la zona de almacenamiento de aceite, se encuentra una cuneta con pendiente de 0,5% para el drenaje de infiltraciones como se observa en la Figura 2-160, esta conduce, hacia un foso de bombeo localizado en la casa de máquinas, donde de ser necesario, se implantaría un sistema de recolección (desnatado) y manejo de bombeo, con el fin de evitar que los aceites digan afectando la zona aguas abajo del sitio de bombeo.



Figura 2-160 Redes para infiltraciones en la zona norte de la caverna de transformadores (Plano D-PHI-060-GRL-DR-P-015).

Fuente: Integral S.A., 2021.

## 2) Talleres ATB

El taller ATB se encuentra ubicado sobre la explanación ubicada en la margen derecha de la vía hacia el municipio de Ituango, sector el Palmar. Se encuentra provisto de una losa en concreto sobre la cual se ubican todas las instalaciones del taller. Este sitio cuenta con una zona cubierta, en la cual se tiene un acopio para el almacenamiento de aproximadamente 1,45 m<sup>3</sup> de pinturas y anticorrosivos para el uso en los procesos de fabricación que se llevan a cabo en el sitio. Estas sustancias se encuentran agrupadas sobre un dique de contención para derrames, elaborado en lámina de acero. El dique cuenta con dimensiones de 4,4 m de largo, 3,20 m de ancho y 0,20 m de altura, indicando una capacidad igual a 2,80 m<sup>3</sup> y además, tiene un punto de drenaje

y una válvula de paso, las cuales permiten recoger las sustancias en caso de que se genere algún derrame sobre el dique de contención (Fotografía 2-14).

En la zona exterior al taller, se cuenta con un acopio de aceites industriales y grasas lubricantes en una cantidad aproximada de 0,83 m<sup>3</sup>, usados para la maquinaria presente en el taller (*telehandler* y grúa). Estos aceites están ubicados dentro de un dique de contención para derrames con dimensiones de 1,80 m de ancho, 1,60 m largo y una altura de 0,80 m, teniendo una capacidad de 2,30 m<sup>3</sup>. El dique está construido en bloques de concreto y malla eslabonada (Fotografía 2-15), y además, cuenta con un punto de drenaje el cual conduce el flujo a una trampa de aceites elaborada en concreto con capacidad de 0,036 m<sup>3</sup>.

En la zona del taller también se encuentra una subestación con 2 transformadores los cuales almacenan 441 litros de aceite cada uno, para su funcionamiento. Estos transformadores se encuentran ubicados dentro de su respectivo foso de recolección de aceites y la trampa para la retención de los aceites cuenta con dimensiones de 2,4 m de largo, 1,7 m de ancho y una profundidad de 0,3 m, obteniendo una capacidad de retención de los líquidos de aproximadamente 1,22 m<sup>3</sup>, en caso de que se presente algún derrame.

En el taller se cuenta adicionalmente con 2 kits de derrames compuestos por material absorbente granulado, pala antichispa, bolsas, guantes (Fotografía 2-17).



Fotografía 2-14 Dique de contención zona interna



Fotografía 2-15 Dique de contención zona externa





Fotografía 2-16 Transformadores Taller ATB.



Fotografía 2-17 kit de derrames.

Los elementos que componen la zona descrita permiten dar un buen manejo a las sustancias que se utilizan dentro de esta, constituyendo un sistema de contención adecuado contra derrames para la cantidad y el tipo de sustancia empleadas en el taller, por lo cual, se tiene una probabilidad nula de afectación al recurso hídrico en la zona.

### 3) Base Militar San Juan de Rodas

En la base militar se tiene un tanque de combustible Diésel de 60 galones, como sustancia química propensa a derrame, la cual es utilizada como combustible para la planta de generación de energía que respalda el suministro eléctrico en caso de que el servicio convencional presente cortes (Fotografía 2-18).

La planta esta acondicionada con los siguientes elementos, los cuales se implementan con el fin de contener cualquier tipo de derrame que se genere en el sitio en cuestión:

- Dique de contención: el tanque de combustible de 60 galones cuenta con un dique de contención de derrames de dimensiones 1,0 m x 1,0 m con una profundidad de 0,5 m, el cual es capaz de contener un volumen 2 veces mayor al volumen contenido en el tanque de combustible.
- Cárcamo perimetral: la planta diésel está delimitada por un cárcamo perimetral el cual recolecta y direcciona los posibles derrames hacia la trampa de aceites.



Fotografía 2-18 Planta diésel y tanque de almacenamiento.

Las instalaciones implementadas en el sitio en cuestión permiten el correcto manejo de las sustancias empleadas, evitando generar cualquier riesgo de derrame de estas sustancias y con ello la nula afectación de las fuentes hídricas cercanas a la zona.

#### 4) Campamento Villa Luz

En el campamento Villa luz se identificaron 3 acopios para el almacenamiento de sustancias químicas:

- El primero de estos acopios se encuentra cercano al casino del campamento, sitio donde se tiene almacenado pinturas y anticorrosivos implementados en las labores de mantenimiento locativo del campamento. Este acopio tiene almacenado aproximadamente  $0,15 \text{ m}^3$  de estas sustancias y está dotado con un dique de contención con una capacidad de almacenamiento de  $0,22 \text{ m}^3$ , lo que indica una condición segura al momento de contener un eventual derrame en el sitio, evitando de esta manera el desplazamiento de estas sustancias hacia las fuentes hídricas cercanas (Fotografía 2-19).



Fotografía 2-19 Dique de contención zona casino.

- El segundo sitio se encuentra ubicado en la parte superior del campamento, sobre el costado derecho de la vía en sentido ascendente. El sitio está dotado por un dique de contención de derrames construido en bloques de concreto y encerrado en malla eslabonada, con una capacidad máxima de almacenamiento de  $0,84 \text{ m}^3$ , y además, cuenta con una trampa de aceites con capacidad de  $0,032 \text{ m}^3$ , lo cual, permite la recolección de algún tipo de sustancia en caso de un eventual derrame sobre el dique. En este punto se encuentran almacenado varios tipos de pintura, esmalte y limpiavidrios, en una cantidad aproximada de  $0,66 \text{ m}^3$ ; volumen inferior a la capacidad máxima del dique, lo cual garantiza que las sustancias almacenadas quedaran contenidas en caso de un derrame masivo en el sitio, evitando de esta manera que se afecten las fuentes hídricas cercanas al sitio (Fotografía 2-20).



Fotografía 2-20 Dique de contención, zona superior del campamento.

- El tercer acopio, también se encuentra ubicado en la parte superior del campamento, contiguo al segundo acopio. En este, se tienen almacenado productos de limpieza y aseo como: soda caustica, detergentes, desinfectantes, cloro, ácido paracetico, glicerina y ácido

sulfónico, para el suministro de todo el campamento. Este sitio cuenta con diques de contención para cada sustancia almacenada (Fotografía 2-21).



Fotografía 2-21 Dique de contención, productos de aseo y limpieza

Los 3 sitios mencionados cuentan con un kit antiderrames compuestos por material absorbente granulado, pala antichispa, bolsas y guantes. Estos puntos de acopio se consideran dotados de las condiciones suficientes para el buen manejo de las sustancias almacenadas, por lo tanto, no se verán afectadas las fuentes hídricas cercanas al sitio, en caso de que se genere un eventual derrame.

#### 5) Subestación 44 kVA – Villa Luz

En la subestación Villa Luz se tiene 1 transformador reductor en operación, el cual almacena 3.337 litros de aceite inhibido (dieléctrico) para su funcionamiento (Fotografía 2-22). Este transformador se encuentra ubicado dentro de su respectivo foso de recolección de aceites y cuenta con una trampa para la retención de los aceites en caso de un eventual derrame de este aceite. El sistema de retención tiene una capacidad de almacenamiento de 10,19 m<sup>3</sup>, lo cual supera ampliamente el volumen de aceite que se emplea en el sitio (Figura 2-161). La zona circundante a la subestación se encuentra dotada de una cuneta perimetral, la cual recoge las aguas de esorrentía del sitio en cuestión.



Fotografía 2-22 Transformador reductor.

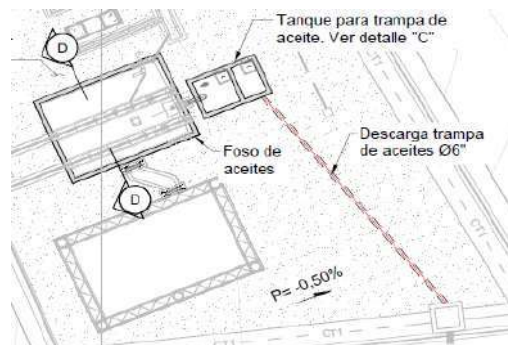


Figura 2-161 Foso de aceites, trampa de aceites (plano DC-PHI-025-SUB-HS-P-005).

El foso de recolección y la trampa de aceites permiten un correcto manejo de las sustancias químicas empleadas en la subestación, lo que garantiza la no afectación de las fuentes de recurso hídrico cercanas al sitio.

#### 6) Subestación Principal 500 kVA

Para este sitio se identificaron 2 puntos propensos a derrames. El primero se asocia a un transformador de potencia, el cual almacena 29.000 litros de aceite nafténico. Este transformador está ubicado dentro de su respectivo foso, el cual, tiene como función, la recolección de aceite en caso de que se genere algún derrame, además, tiene incluida una trampa de aceite que cuenta con una capacidad de 32,26 m<sup>3</sup> (Fotografía 2-23), por lo tanto, se tiene una capacidad de retención superior al volumen almacenado, permitiendo retener la totalidad de la sustancia sin ningún inconveniente y evitando la afectación de las fuentes hídricas cercanas a la zona. El segundo punto, corresponde a una planta Diesel de respaldo, para el suministro de energía en caso de que se genere un corte en el suministro convencional. La planta cuenta con un tanque para el suministro del combustible de 300 galones, el cual, está ubicado en un dique de contención de derrames con su respectiva trampa de aceites con capacidad de 0,96 m<sup>3</sup> (Fotografía 2-24 y Fotografía 2-25).





Fotografía 2-23  
Transformador de  
potencia.



Fotografía 2-24 Tanque de  
almacenamiento de diésel.



Fotografía 2-25 Planta diésel.

#### 7) Planta Diésel Campamento Tacui- Cuni

El campamento Tacui- Cuni cuenta con una planta para la generación de energía, la cual es utilizada como respaldo al momento de que el suministro de energía eléctrica presente cortes o fallas en su operación. La planta está provista con un tanque para el almacenamiento y suministro de diésel, dicho tanque se encuentra embebido en el suelo con una capacidad de almacenamiento máxima de 10.000 galones, capacidad de la cual solo se dispone del 50%. El tanque cuenta con un cárcamo perimetral en la losa superior, el cual se encarga de recolectar y direccionar cualquier tipo de derrame generado en el momento de llenado del tanque, dirigiendo la sustancia hacia la trampa de aceites dispuesta para esto.



Fotografía 2-26 Planta diésel campamento Tacuí-Cuní.



Fotografía 2-27 Tanque de almacenamiento diésel.

#### 8) Estación de Combustible CCC

Para la estación de combustible se tiene tres tanques para el almacenamiento y distribución de diésel, dos de estos tanques tienen una capacidad de 12.500 galones y el tercer tanque cuenta con una capacidad de 10.000 galones, para un total de 35.000 galones (Fotografía 2-28). Los tanques están rodeados por un cárcamo perimetral, el cual conduce el flujo de un posible derrame hacia tres trampas para aceites, las cuales tienen capacidad de 1,0 m<sup>3</sup> cada una; adicionalmente se cuenta con un dique para el almacenamiento de los residuos retenidos en las trampas de aceite, en caso de que las trampas estén al límite de su capacidad de almacenamiento (Fotografía 2-29).



Fotografía 2-28 Estación de combustible, tanques de almacenamiento.



Fotografía 2-29 Trampas de aceite.

Las posibles causas que pueden dar origen a un derrame en la estación de combustible están asociadas a: proceso de llenado de los tanques, errores operativos en el suministro del combustible, deterioro en los tanques de almacenamiento y tuberías de conducción, falta de

monitoreo y vigilancia al sistema, y eventualmente afectaciones a los tanques de almacenamiento por inestabilidad del terreno de soporte y/o taludes aledaños.

La zona circundante a la estación de combustible cuenta con un sistema de drenaje de aguas de escorrentía, la cual, es muy factible que llegue al combustible contenido en los tanques, en caso de que ocurra un derrame de gran magnitud, contaminando las fuentes hídricas asociadas a este sistema de drenaje.

Considerando lo anterior, se recomienda realizar un chequeo del plan de manejo ambiental de la estación de combustibles del Contratista, y revisar si las barreras de contención actuales son suficientes para contener el mayor evento de derrame que se pueda generar en el sector, con el objetivo de evitar afectar fuentes hídricas cercanas.

#### 9) Taller Industrial

El taller industrial cuenta con dos puntos de acopio para el almacenamiento de pinturas, anticorrosivos, disolventes y catalizadores, los cuales son utilizados para las piezas y elementos fabricados en este taller. Cada uno de estos acopios se encuentra ubicado sobre un dique de contención de derrames construido en bloques de concreto y malla eslabonada.

- El primer sitio de acopio dispone de un dique para la contención de derrames, con un volumen de almacenamiento máximo de 1,22 m<sup>3</sup> y las sustancias almacenadas en esa zona, cuentan con un volumen aproximado de 0,66 m<sup>3</sup>, indicando que el dique tiene la capacidad suficiente para la contención de un derrame masivo. El sitio cuenta adicionalmente con su respectivo kit antiderrames compuesto de material absorbente granulado, pala antichispa, bolsas y guantes (Fotografía 2-30).



Fotografía 2-30 Dique de contención, acopio 1.

- El segundo punto de acopio cuenta con un dique para la contención de derrames con un volumen de almacenamiento máximo de 2,76 m<sup>3</sup>, y el volumen de las sustancias almacenadas en el sitio es de aproximadamente 0,77 m<sup>3</sup>, indicando que el dique tiene la capacidad suficiente para la contención de las sustancias en caso de que se genere un eventual derrame en forma masiva. También se cuenta con un kit antiderrames compuesto de material absorbente granulado, pala antichispa, bolsas y guantes (Fotografía 2-31).





Fotografía 2-31 Dique de contención, acopio 2.

Las condiciones por las cuales se encuentran dotados los puntos de acopio permiten un correcto manejo de las sustancias almacenadas durante el desarrollo de las actividades diarias en el sitio, lo cual indica que las fuentes de recurso hídrico cercanas al sitio no se verán afectadas.

#### 10) Taller de Mantenimiento

El taller de mantenimiento se divide en dos sectores: en el primer sector se realiza la reparación y mantenimiento de toda la maquinaria de línea amarilla y en el segundo sector la maquinaria línea blanca (contratista), la cual abarca todos los vehículos para el transporte del personal. Este sitio cuenta con cuatro sitios para el almacenamiento de sustancias empleadas en las labores que allí se ejecutan diariamente.

- El primer punto para el almacenamiento se encuentra sobre un dique que permite la contención de derrames, el cual, es construido por bloques de concreto y tiene una capacidad de 3,53 m<sup>3</sup>. Adicionalmente, cuenta con una trampa de grasas para la retención de líquidos en caso de un derrame en el sitio. En este lugar, se almacenan sustancias como: pinturas en aerosol y líquidas, esmaltes, disolventes, y resina, en una cantidad aproximadamente de 2,27 m<sup>3</sup> (Fotografía 2-32).



Fotografía 2-32 Acopio de pinturas, esmaltes, disolventes y resina.

- El segundo punto, se encuentra sobre un dique de contención de derrames, construido en concreto, el cual cuenta con una capacidad de almacenamiento de 60 m<sup>3</sup>. Adicionalmente,

tiene una trampa de grasas para la recolección de aceites. En este sitio, se almacenan aceites y lubricantes industriales, mobil nuto68, mobil 424, mobil 80w90, mobil 10w, mobil 85w140, mobil HD30, mobil HD50, mobil 15w40 y mobil 80w140, en una cantidad aproximada de 52,67 m<sup>3</sup> (Fotografía 2-33).



Fotografía 2-33 Acopio de aceites y lubricantes.

- El tercer punto, tiene almacenado: shampo para vehículos, limpiador de concreto y desengrasante industrial, en una cantidad aproximada igual a 0,60 m<sup>3</sup>, los cuales, son empleados para el mantenimiento y limpieza de toda la maquinaria. Estas sustancias cuentan con un dique para la contención de derrames, con una capacidad aproximada de 1,58 m<sup>3</sup>, superando el volumen almacenado en el sitio, por lo cual se considera una probabilidad nula de afectación al recurso hídrico en la zona (Fotografía 2-34).





Fotografía 2-34 Acopio de shampoo, limpiador de concreto y desengrasante.

- En el cuarto acopio se tienen dos tanques con capacidad de almacenamiento de 11,1 m<sup>3</sup> y 10,1 m<sup>3</sup> para disponer los aceites usados que se generan en el sitio. Estos tanques se encuentran sobre un dique de contención de derrames con capacidad de 32,7 m<sup>3</sup>, volumen suficiente para anular posibles afectaciones al recurso hídrico en la zona (Fotografía 2-35).



Fotografía 2-35 Acopio de aceites usados.

#### 11) Subestación 44 KVA – Plazoleta Casa de Máquinas

La subestación que se encuentra en la plazoleta de ingreso a casa de máquinas cuenta con un transformador trifásico en aceite con 9.600 litros de esta sustancia para su funcionamiento. Este transformador se encuentra ubicado dentro de un foso de recolección de aceite con su respectiva trampa para la retención de estos aceites, la cual cuenta con capacidad suficiente para anular posibles afectaciones al recurso hídrico en la zona en caso de que se genere algún derrame (Fotografía 2-36). El sitio cuenta además con un cárcamo perimetral para la recolección de aguas de escurrentía.



Fotografía 2-36 Transformador trifásico.

## 12) Planta Diésel plazoleta Casa de Máquinas

En la plazoleta de ingreso a casa de máquinas se encuentran instaladas dos plantas Diésel para la generación de energía, las cuales funcionan como respaldo para el suministro eléctrico en caso de que el servicio convencional presente cortes o fallas en su operación (Fotografía 2-37). Estas dos plantas tienen un tanque para el almacenamiento y suministro de diésel embebido en el suelo, con una capacidad máxima de 10.000 galones. El tanque se opera normalmente con el 50% de la capacidad. Además esta zona cuenta con un cárcamo perimetral en la losa superior, el cual tiene como función la recolección y direccionamiento de cualquier tipo de derrame generado en el momento de llenado del tanque, dirigiendo la sustancia hacia la trampa de aceites dispuesta para esto (Fotografía 2-38).



Fotografía 2-37 Plantas diésel.

Fotografía 2-38 Tanque de almacenamiento.

## 13) Laboratorio de Calidad - Almacén de Resinas

En el laboratorio de calidad, se identifica un punto de acopio para el almacenamiento de sustancias, el cual cuenta con un dique de contención de derrames con una capacidad de almacenamiento de 0,52 m<sup>3</sup>. En el sitio se encuentra almacenado separol (desmoldante de concreto) y sikaplast (superplastificante utilizado para la producción de concreto) en una cantidad de aproximadamente 0,20 m<sup>3</sup> (Fotografía 2-39). Adicionalmente, se cuenta con una trampa para la recolección de las sustancias en caso de que se presente un derrame en el sitio, y un kit antiderrame compuesto por material absorbente granulado, pala antichispa, bolsas y guantes (Fotografía 2-40).



Fotografía 2-39 Acopio de sustancias (Separol y sikaplast).



Fotografía 2-40 Kit de derrames.

En el almacén de resinas, se identificaron 3 tanques para el almacenamiento de resina master roc 160. El primer y segundo tanque tienen una capacidad de almacenamiento de 8.000 litros cada uno, los cuales, se encuentran ubicados dentro de su respectivo dique para contención de derrames con una capacidad de 17,28 m<sup>3</sup>. El tercer tanque, tiene una capacidad de 6.000 litros, para el cual, se dispuso de un dique para la contención de los posibles derrames con una capacidad aproximada de 7,37 m<sup>3</sup>. Los diques cuentan con la capacidad suficiente para anular posibles afectaciones al recurso hídrico en la zona, en caso de que se genere algún derrame en el sitio (Fotografía 2-41).

También se identificó un acopio para el almacenamiento de varias sustancias como pinturas, grasa, aditivos para el concreto y grasa industrial en una cantidad aproximada de 3,85 m<sup>3</sup> (Fotografía 2-42), este acopio también cuenta con su respectivo dique de contención de posibles derrames con una capacidad aproximada de 6,40 m<sup>3</sup>.





Fotografía 2-41 Tanques de almacenamiento de resina.



Fotografía 2-42 Acopio de almacenamiento general.

#### 14) Planta de Concretos

En la planta de concreto se encuentran almacenados aditivos para el concreto (sikastabilizar, sikaplast, sikatard, visocrete y eucomp 100). La cantidad almacenada de estas sustancias es de aproximadamente 63 m<sup>3</sup>, las cuales se encuentran almacenadas en silos con capacidad de 10.000 litros cada uno. Los silos se encuentran dentro de un dique principal de contención de derrames, el cual tiene una capacidad aproximada de 66,5 m<sup>3</sup> (Fotografía 2-43). Realizando una comparación entre el volumen de las sustancias almacenadas (63 m<sup>3</sup>) y la capacidad del dique (66,5 m<sup>3</sup>), se concluye que el dique cuenta con la capacidad suficiente de retención de las sustancias en caso de que se presente algún derrame masivo en el sitio y anulando las posibles afectaciones al recurso hídrico en la zona.



Fotografía 2-43 Dique de contención aditivos.

La planta de concreto cuenta además con un sistema de drenaje perimetral, el cual se encarga de recoger todas las aguas que discurren en la zona y dirigir las hacia un tanque sedimentador (Fotografía 2-44) donde son almacenadas, y luego bombeadas al tanque de aguas industriales para ser reutilizadas en los procesos industriales de la planta.



Fotografía 2-44 Tanque sedimentador planta de concretos.

#### B. Selección de puntos para modelaciones de derrames

La información recopilada en campo permitió identificar todos los puntos en el área del proyecto, con posibilidad de generar alguna afectación por derrames de sustancias. Sin embargo, el punto asociado a la estación de combustible se definió como el único que podría llegar a generar una real afectación, y que no presenta medidas de contención apropiadas para controlar todo el volumen almacenado. La Tabla 2-45 presenta un resumen de los puntos identificados en campo con posibilidad de generación de derrames. En el mismo sentido, se muestra la ubicación del punto de derrame en la estación de combustible, en la Figura 2-162.





Figura 2-162 Ubicación del punto de derrame analizado.  
Fuente: Integral S.A., 2021.

Tabla 2-45 Resumen de los sitios identificados susceptibles a generar derrames de contaminantes.

Sitios de Almacenamiento	Sustancias Almacenadas	Vol. Total (m³)	Sistemas de Contención	Capacidad Contención (m³)	¿Afecta Recurso Hídrico?
Casa de Máquinas – Caverna de Transformadores	Aceite dieléctrico	57,1	Cárcamos perimetrales, Estibas contenedoras, Kit de derrames, Máquina de tratamiento para la separación de aceite, Acoples grafados en las mangueras, Sistema de cierre rápido en las mangueras, Flautas en las válvulas	5	Sí
Talleres ATB	Pinturas, Anticorrosivos, Aceites industriales, Grasa lubricante, Aceite dieléctrico	3,16	Diques de contención de derrames Trampa de aceites, Kits de derrames	7,54	No
Base Militar Campamento Villa Luz	Combustible Diésel	0,23	Dique de contención de derrames, Cárcamo perimetral	132,1	No
Campamento Villa Luz	Pinturas, Anticorrosivos, Esmalte, Limpiavidrios, Soda cáustica, Cloro, Ácido paracético, Ácido sulfónico	0,81	Diques de contención de derrames, Trampa de aceites	1,06	No
Subestación 44 kVA – Villa Luz	Aceite dieléctrico	3,34	Foso de recolección de aceite, Trampa de aceites, Cuneta perimetral	10,19	No
Subestación 500 kVA	Aceite nafténico, Combustible diésel	29	Foso de recolección de aceite, Trampa de aceites, Dique de contención de derrames	32,26	No
Planta diésel campamento Tacui-Cuni	Combustible diésel	18,93	Cárcamo perimetral, Trampa de aceites	37,85	No
Estación de combustible CCC	Combustible diésel	132,48	Cárcamo perimetral, Trampas de aceites	3	Sí
Taller industrial	Pinturas, Anticorrosivos, Disolventes, Catalizadores	1,43	Diques de contención de derrames, Kits antiderrames	3,98	Sí
Taller de mantenimiento	Pinturas, Esmaltes, Disolventes, Resina, Aceites y lubricantes, Desengrasante industrial, Aceites usados	76,74	Diques de contención de derrames, Trampas de recolección	97,81	No
Subestación 44 KVA – Plazoleta Casa de Máquinas	Aceite dieléctrico	9,6	Foso de recolección de aceite, Cárcamo perimetral		No
Planta Diésel plazoleta Casa de Máquinas	Combustible diésel	18,93	Cárcamo perimetral, Trampas de aceites	37,85	No
Laboratorio de Calidad - Almacén de Resinas	Desmoldante de concreto, Superplastificante, Resina, Pinturas, Grasa, Aditivos para concreto, Grasa industrial	26,05	Diques de contención de derrames, Trampa de recolección, Kit antiderrames	31,57	No
Planta de Concretos	Aditivos para concreto	63	Dique de contención de derrames	66,5	No

Fuente: Integral S.A., 2021.

Tal y como se describió previamente, en el presente estudio se analizará un derrame puntual asociado a 132,48 m<sup>3</sup> de combustible tipo Diésel.

El diésel (también denominado gasóleo o gasoil), es un hidrocarburo líquido de densidad sobre 850 kg/m<sup>3</sup>, compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en calefacción y en motores diésel. Está compuesto aproximadamente de un 75% de hidrocarburos saturados (principalmente parafinas incluyendo isoparafinas y cicloparafinas) y un 25% de hidrocarburos aromáticos (incluyendo naftalenos y alcalobencenos).

Para el análisis de la capacidad de asimilación del río Cauca (cuerpo de agua de análisis para este caso), se consideró el ingreso de todo el volumen de este hidrocarburo de manera instantánea. Esto se realizó mediante la implementación del módulo de calidad del agua del modelo HEC-RAS, como se mostrará adelante. De manera más precisa, se analizó el derrame de esta sustancia como una “Inyección Masiva”, por lo que resultó necesaria la estimación de la masa asociada al volumen total de Diesel, en función de la densidad de este. La Tabla 2-46 presenta las características principales de la sustancia contaminante analizada.

Tabla 2-46 Características principales de la sustancia contaminante analizada.

Sitios	Sustancias Almacenadas	Volumen Total (m <sup>3</sup> )	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Masa Total (kg)
Estación de Combustible	Combustible Diesel	132,48	850	112.608

Fuente: Integral S.A., 2021.

#### 2.2.4.7.2 Probabilidad de ocurrencia de la amenaza

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento, se utilizará la metodología planteada en la Guía técnica GTC 45. En esta, se propone la estimación de la probabilidad de ocurrencia de un evento a partir de la siguiente expresión:

$$NP = ND \times NE$$

Ecuación 1 Nivel de Probabilidad.

Donde,

*NP*: Nivel de probabilidad.

*ND*: Nivel de deficiencia.

*NE*: Nivel de exposición.

Según lo presentado en la Tabla 2-45, para la mayoría de los puntos identificados con posibilidad de ocurrencia de derrames se tienen implementados sistemas de contención con capacidad de recibir la totalidad del volumen almacenado en cada sitio. Para el único punto donde el sistema de contención no es suficiente, se tiene identificado el tipo de sustancia almacenada, y el trazado de los sistemas de drenaje darían cuenta de que la sustancia derramada alcanzaría el río Cauca.

En este sentido, para la determinación del Nivel de Deficiencia (ND), se utilizan los valores establecidos en la Tabla 2-47 presentada a continuación.

Tabla 2-47 Determinación del Nivel de Deficiencia (ND).

Nivel de Deficiencia	Valor ND	Significado
Muy Alto (MA)	10	Se ha(n) detectado peligro(s) que determina(n) como posible la generación de incidentes o consecuencias muy significativas, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes respecto al riesgo es nula o no existe, o ambos.
Alto (A)	6	Se ha(n) detectado alguno(s) peligro(s) que pueden dar lugar a consecuencias significativa(s), o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es baja, o ambos.
Medio (M)	2	Se han detectado peligro que pueden dar lugar a consecuencias poco significativas o de menor importancia, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es moderada, o ambos.
Bajo (B)	No se Asigna Valor	No se ha detectado consecuencia alguna, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es alta, o ambos. El riesgo está controlado.

Fuente: Modificado de Guía Técnica Colombiana GTC 45.

*Nota: fila resaltada en color verde corresponde al valor seleccionado para el estudio.*

Con base en la anterior tabla, y según la visita realizada en campo, la determinación de los volúmenes almacenados de las diferentes sustancias y de la capacidad de retención de los sistemas de contención, se establece un ND igual a 2. Esto da cuenta de un Nivel de Deficiencia Medio. Este valor se fundamenta, principalmente, en que actualmente existe una sustancia que no lograría ser controlada por sistemas de contención. Si se establece un sistema de contención suficiente para controlar un eventual derrame en la estación de combustible, el Nivel de Deficiencia podría establecerse como Bajo, porque la totalidad de los puntos con potencial de derrame de sustancias peligrosas estarían cubiertos por sistemas de retención.

Ahora, para la determinación del Nivel de Exposición (NE), se utilizan los valores establecidos en la Tabla 2-48.

Tabla 2-48 Determinación del Nivel de Exposición (NE).

Nivel de Exposición	Valor NE	Significado
Continua (EC)	4	La situación de exposición se presenta sin interrupción o varias veces con tiempo prolongado durante la jornada laboral.
Frecuente (EF)	3	La situación de exposición se presenta varias veces durante la jornada laboral por tiempos cortos.
Ocasional (EO)	2	La situación de exposición se presenta alguna vez durante la jornada laboral y por un periodo de tiempo corto.
Esporádica (EE)	1	La situación de exposición se presenta de manera eventual.

Fuente: Modificado de Guía Técnica Colombiana GTC 45.

*Nota: fila resaltada en color verde corresponde al valor seleccionado para el estudio.*

Para este caso, el Nivel de Exposición se considera Esporádico; es decir, con un valor NE de 1. Esto debido a que el derrame de sustancias peligrosas no es un evento, primero que todo, con una recurrencia alta, y segundo que todo, del que se tengan registros.

Finalmente, para la determinación del Nivel de Probabilidad (NP), se utilizan la información presentada en la Tabla 2-49.

Tabla 2-49 Determinación del Nivel de Probabilidad (NP).

Nivel de Probabilidad		Nivel de Exposición (NE)			
		4	3	2	1
Nivel de Deficiencia (ND)	10	MA-40	MA-30	A-20	A-10
	6	MA-24	A-18	A-12	M-6
	2	M-8	M-6	B-4	B-2

Fuente: Modificado de Guía Técnica Colombiana GTC 45.

*Nota: celda resaltada en color verde corresponde al valor seleccionado para el estudio.*

Al cruzar el valor ND definido de 2, con el valor NE definido de 1, se obtiene un Nivel de Probabilidad B-2. En la GTC-45 se define un Nivel de Probabilidad B-2 como “Situación mejorable con exposición ocasional o esporádica, o situación sin anomalía destacable con cualquier nivel de exposición. No es esperable que se materialice el riesgo, aunque puede ser concebible”.

#### 2.2.4.7.3 Modelo hidráulico y de calidad del agua

Para el procesamiento de la información y para determinar los perfiles de flujo, así como los demás parámetros hidráulicos asociados a los diferentes escenarios de simulación, se utilizó el programa de computación HEC-RAS, versión 5.0.7, desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers*, (USACE, 2010) que resuelve las ecuaciones de energía y momentum, por el método estándar de pasos. Se muestra en la Figura 2-163 la vista en planta del tramo de estudio para el río Cauca. En la Figura 2-164 se muestra un isométrico del modelo.



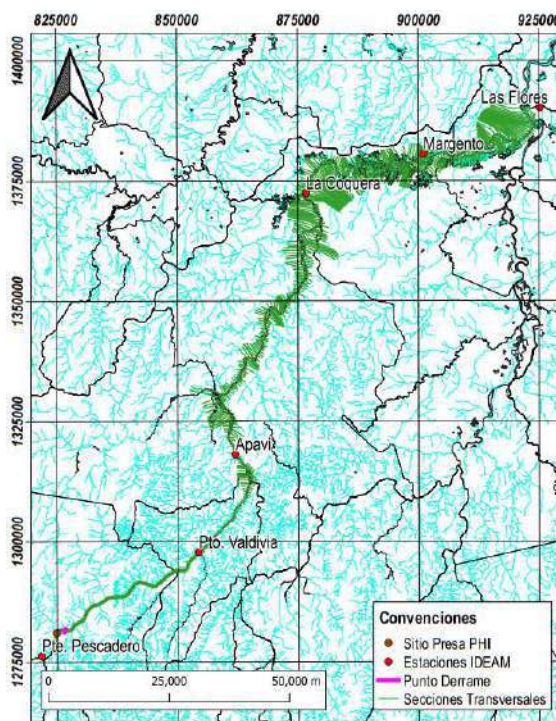


Figura 2-163 Tramo modelado del río Cauca.

Fuente: Integral S.A., 2021.

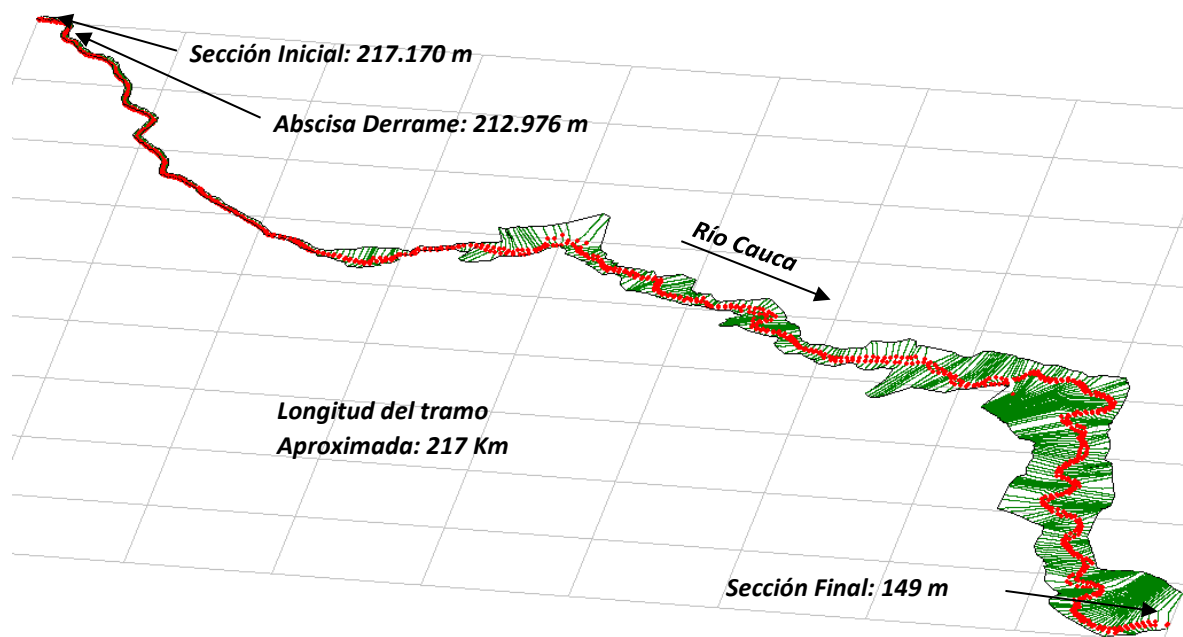


Figura 2-164 Isométrico del modelo hidráulico del río Cauca.

Fuente: Integral S.A., 2021.

El tramo de estudio consideró aproximadamente 217 km de longitud. A lo largo del tramo analizado se evidencian variaciones considerables a nivel topográfico, pasando de zonas con fuertes estrechamientos de sección, hasta zonas con amplias llanuras inundables. Estas llanuras están compuestas principalmente de pastos altos, arbustos grandes y en algunas zonas cobertura boscosa. Por esto, sobre ambas márgenes del río se consideró un coeficiente de rugosidad de 0,065, que corresponde a un coeficiente de rugosidad con bancas con pastos altos y cultivos. Para el cauce, y considerando el material del lecho, se determinó un coeficiente de rugosidad de Manning igual a 0,035 en todas las secciones analizadas.

#### A. Generalidades del modelo hidráulico

El modelo hidráulico está conformado por un total de 509 secciones transversales. Las condiciones de frontera del modelo hidráulico son necesarias para establecer el nivel de lámina de agua inicio y fin del tramo analizado; información con la que el programa itera hasta encontrar una solución a los cálculos. Las condiciones de frontera que se pueden seleccionar en el HEC-RAS son: Lámina de agua conocida, profundidad crítica, profundidad normal, y curva de calibración. En la Tabla 2-50 se presentan las condiciones de frontera del modelo hidráulico.

Tabla 2-50 Condiciones de frontera para la modelación hidráulica.

Cauce	Tramo	Condición de frontera	
		Agua Arriba	Agua abajo
Río Cauca	Cauca	Profundidad Crítica	Profundidad Normal Pendiente: 0,00024

Fuente: Integral S.A., 2021.

Los perfiles de flujo se calcularon contemplando flujo permanente gradualmente variado para las condiciones subcríticas y supercríticas. Esto con el fin de identificar apropiadamente el tipo de régimen hidráulico y evitar falsos forzamientos.

Los coeficientes de contracción/expansión asumidos fueron 0,10 para contracción y 0,30 para expansión. En los tramos de análisis se evidencian transiciones graduales sección a sección. Los coeficientes de contracción y expansión del flujo se dan por la variación de la geometría de dos secciones, causando pérdida de energía locales debido a estructuras tales como, puentes, estribos y pilas (ver Tabla 2-51).

Tabla 2-51 Coeficientes de contracción y expansión.

Descripción	Coefficiente de contracción	Coefficiente de expansión
Ningún tipo de pérdida	0,0	0,0
Transiciones graduales	0,1	0,3
Secciones típicas de puentes	0,3*	0,5*
Transiciones abruptas	0,6	0,8

Fuente: Integral S.A., 2021.

\*Valores seleccionados.

La Tabla 2-52 presenta los caudales para las condiciones hidrológicas máximas, medias y mínimas sobre el río Cauca. Cabe resaltar que se consideraron caudales con periodo de retorno

de 1,01 y 2,33 años para el análisis realizado. Estos caudales fueron los utilizados en la modelación hidráulica.

Tabla 2-52 Caudales utilizados en la modelación.

Cauce	Ubicación	Sección	Caudal (m <sup>3</sup> /s)				
			Max 2,33	Max 1,01	Medio	Min 1,01	Min 2,33
Río Cauca	Sitio Presa	217170	2748	1579	1038*	890,5*	404,5*
Río Cauca	Valdivia	197226	2865	1588	1082	957	424
Río Cauca	Apaví	149153	2914	1608	1201	1002	437
Río Cauca	Coquera	75493	2986	1829	1429	1241	499
Río Cauca	Margento	32706	2986	1846	1510	1283	509

Fuente: Integral S.A., 2021.

*\*Valores promediados entre Pte. Pescadero y Valdivia, porque no se encontraron en los estudios previos revisados.*

## B. Generalidades de la modelación de calidad del agua

Para la modelación hidráulica y de calidad del agua se analizó un escenario de contingencia, en el cual la totalidad del volumen derramado en la Estación de Combustible (132,48 m<sup>3</sup>) ingrese de manera instantánea al río Cauca, considerando condiciones hidrológicas máximas, medias y mínimas.

Como se mostró en el numeral anterior, el modelo hidráulico seleccionado fue el HEC - RAS 5.0.7, ya que considera geometrías irregulares en lecho, bancas, llanuras, estructuras hidráulicas, por lo que representa apropiadamente la dinámica hidráulica. Esta misma herramienta se utilizó para la modelación de calidad de aguas, ya que considera el tipo de determinantes de calidad requeridos para el análisis, y se acopla directamente con el modelo hidráulico, sin tener que realizar migraciones.

En este caso, se ingresa el volumen total de Diésel como un constituyente arbitrario de tipo conservativo. Para el presente análisis, se consideran condiciones críticas para el tránsito de este contaminante, al asumir el volumen total como una sustancia conservativa. La totalidad del volumen se ingresa como una “Inyección Masiva” en la sección transversal 212,976, ubicada a unos 2,1 km aproximadamente aguas abajo del sitio presa. Esta sección representa el punto de llegada al río Cauca, donde escurriría el derrame desde la estación de combustible.

### • Características Generales del Modelo Numérico Seleccionado

En este numeral se describen las ventajas, limitaciones y suposiciones del modelo HEC-RAS 5.0.7, seleccionado para la modelación de calidad de aguas. Se indican a continuación las generalidades del modelo. En particular, dadas las consideraciones de la plataforma para la simulación de calidad de aguas en HEC-RAS 5.0.7 y las características de los insumos, existen algunas limitaciones.

- Se modeló para flujo permanente. El caudal entrante y saliente en cada uno de los tramos simulados (elemento computacional) es constante a través del tiempo.

- Es un modelo unidimensional (1D), dado el comportamiento unidireccional predominante del flujo a lo largo del cauce analizado.
- Se asume que se presenta mezcla lateral y vertical completa en cada una de las secciones transversales del modelo.
- El modelo simula la temperatura del agua, el transporte de constituyentes arbitrarios conservativos (como metales pesados) y no conservativos, nutrientes asociados al ciclo del nitrógeno y fósforo, algas, DBO y oxígeno disuelto.

Entre las ventajas del modelo seleccionado, se encuentra que:

- El modelo HEC RAS 5.0.7. es cuasi 2D, debido a que el programa dentro de su hidráulica resuelve las ecuaciones de transporte con las velocidades promediadas en la vertical.
- La hidráulica se ajusta a las condiciones reales del río, pendientes, cambios de geometría entre secciones.
- Permite hacer múltiples corridas de los escenarios planteados de forma versátil y rápida.
- Acople y rápida integración de la información hidráulica y climática.
- Ingreso de tributarios y vertimientos con una geometría detallada, de tal forma que puede analizarse el comportamiento hidráulico y de calidad de aguas en cada uno de estos.
- El tamaño de las celdas de calidad de aguas puede ser diferente al espaciamiento entre las abscisas contempladas para el modelo hidráulico, de esta manera se facilita el ajuste de este parámetro en caso de inestabilidad numérica.
- Permite realizar la modelación en el periodo de tiempo deseado (segundos, horas, días, semanas o meses). Por lo tanto, si son ingresadas series climáticas y de calidad de aguas (cuerpo de agua receptor y vertimiento), podría modelarse el comportamiento de los determinantes a la resolución de interés, obteniendo resultados diferentes inclusive cada segundo.

Por otro lado, el modelo seleccionado también presenta algunas limitaciones, como son:

- El módulo de calidad de aguas presenta una limitante en la modelación de los procesos de sedimentación y posterior transporte de contaminantes en el material de fondo del cauce.

Finalmente, entre las suposiciones consideradas para este estudio se encuentra que:

- El módulo de calidad de aguas no modela directamente hidrocarburos. Sin embargo, estas sustancias se ingresan al modelo como constituyentes arbitrarios conservativos.

#### 2.2.4.7.4 Resultados y análisis

En este numeral se presentan los resultados obtenidos del modelo hidráulico y de calidad del agua. A partir de los resultados obtenidos, se buscó determinar la longitud a partir de la cual la

concentración pico de este contaminante estuviera por debajo del 1% de la concentración pico inicial, es decir, al momento de ocurrir el derrame e ingresar de manera instantánea al río Cauca. Esta condición garantiza, además, concentraciones admisibles para diferentes actividades en la Resolución 0631 de 2015 (casi de manera general por debajo de los 10 mg/L).

A continuación, de la Figura 2-165 la Figura 2-169 se presentan los resultados obtenidos en el análisis asociado a la determinación de la longitud de asimilación del río Cauca ante un derrame puntual e instantáneo de 132,48 m<sup>3</sup> (112.608 kg) de combustible tipo Diésel. Cada figura da cuenta de una condición hidrológica particular. Los resultados tabulados se presentan de la Tabla 2-53 a la Tabla 2-57.

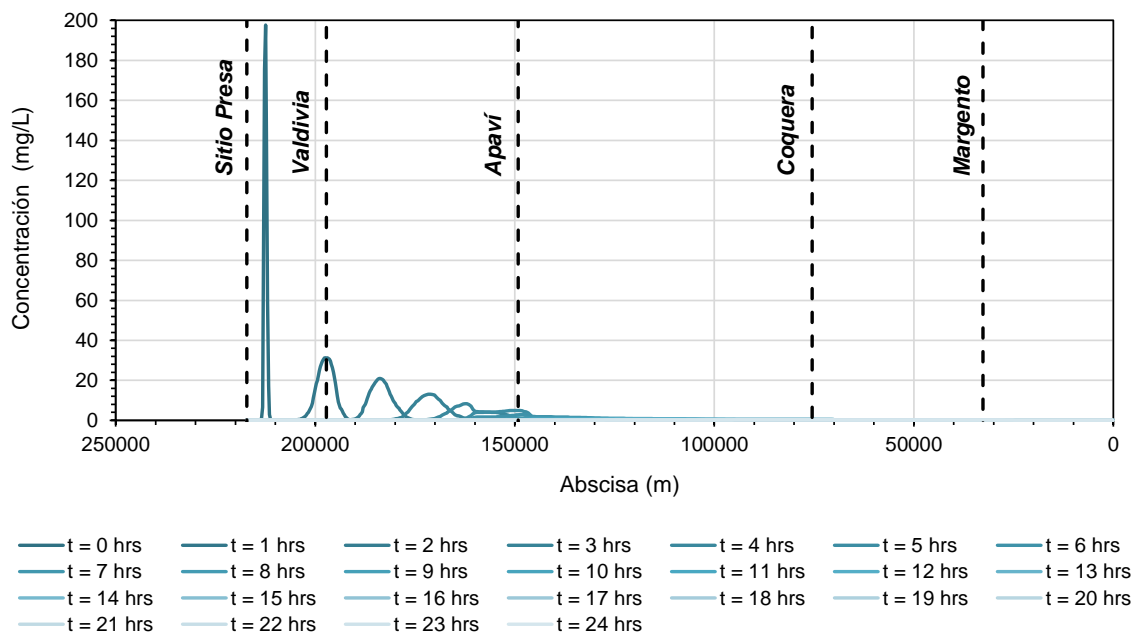


Figura 2-165 Asimilación del derrame para caudal máximo de 2,33 años.

Fuente: Integral S.A., 2021.



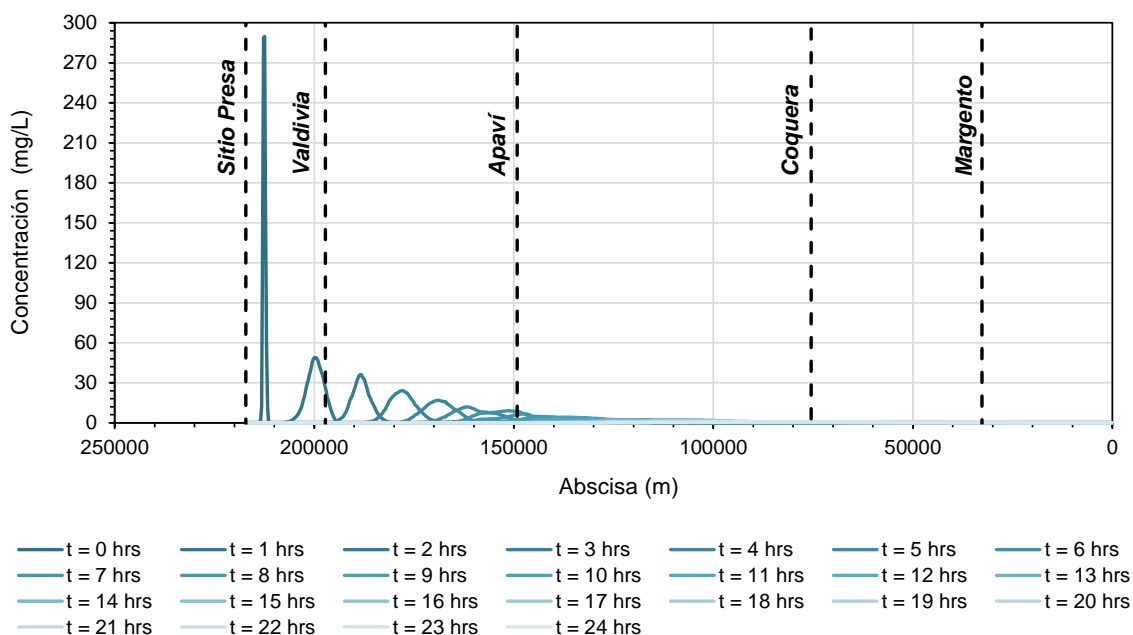


Figura 2-166 Asimilación del derrame para caudal máximo de 1,01 años.

Fuente: Integral S.A., 2021.

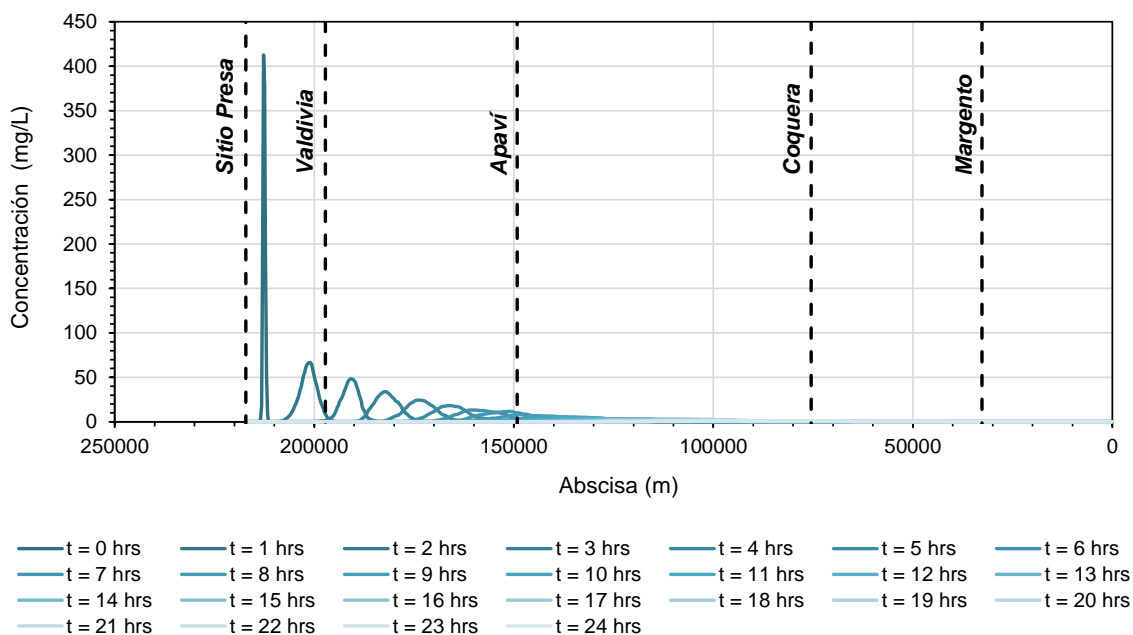


Figura 2-167 Asimilación del derrame para caudal medio.

Fuente: Integral S.A., 2021.

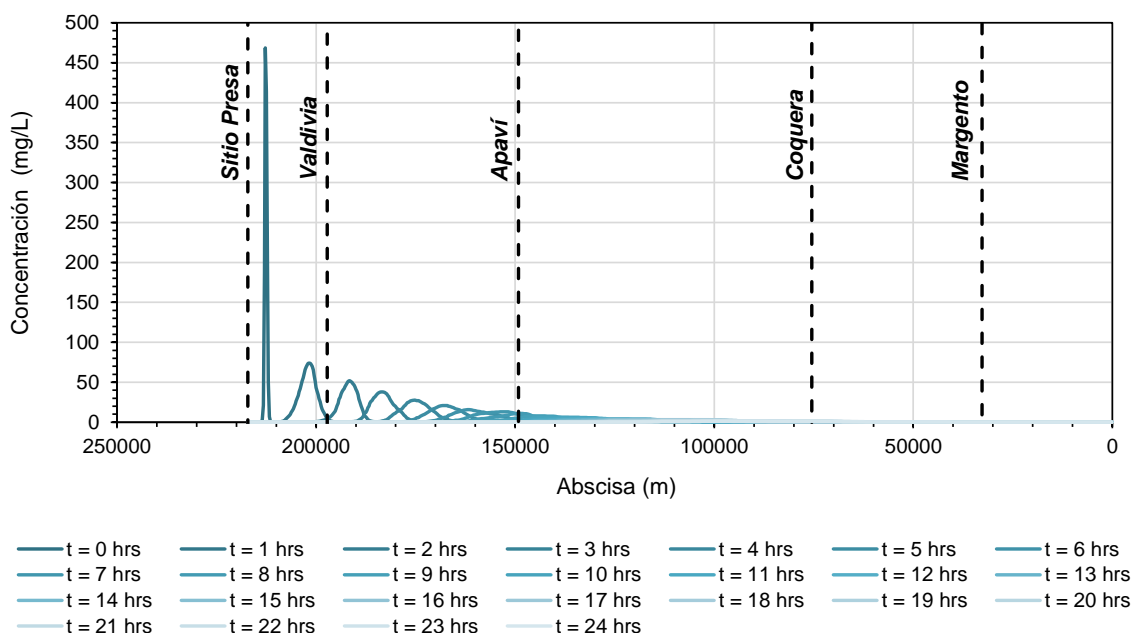


Figura 2-168 Asimilación del derrame para caudales mínimos de 1,01 años de periodo de retorno

Fuente: Integral S.A., 2021.

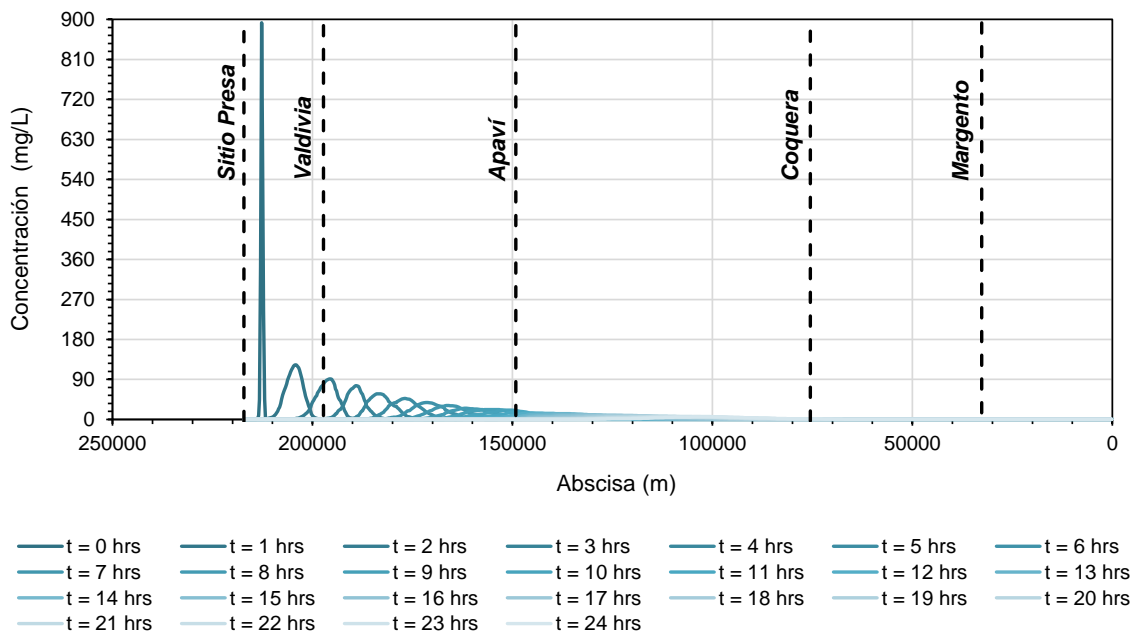


Figura 2-169 Asimilación del derrame para caudal mínimo de 2,33 años

Fuente: Integral S.A., 2021.

Evidentemente, las condiciones asociadas a caudales bajos (caudales mínimos) presentan resultados de menor asimilación del contaminante. Pueden observarse, incluso aguas abajo de

Apaví (a 70 km aproximadamente del punto de ingreso del contaminante), concentraciones del hidrocarburo que podrían seguir generando alguna afectación, al encontrarse por encima de límites permisibles en la normatividad (10 mg/L).

Cabe resaltar que de la Tabla 2-53 a la Tabla 2-57. se muestran las distancias necesarias para alcanzar concentraciones pico iguales o inferiores al 1%, respecto a la concentración pico inicial; es decir, al momento del ingreso del contaminante al río Cauca.

Tabla 2-53 Concentración de Diesel para caudales máximos con Tr de 2,33 años.

Tiempo (h)	t=0 h	t=2 h	t=4 h	t=6 h	t=8 h
Distancia (km)	0,0	28,8	50,0	64,8	72,7
Concentración (mg/L)	197,7	20,9	8,4	3,1	1,2
Concentración Pico (%)	100,0	10,6	4,2	1,6	0,6

Fuente: Integral S.A., 2021.

Tabla 2-54 Concentración de Diesel para caudales máximos con Tr de 1,01 años.

Tiempo (h)	t=0 h	t=2 h	t=4 h	t=6 h	t=8 h	t=10 h
Distancia (km)	0.0	24.0	43.3	61.3	71.6	82.6
Concentración (mg/L)	289.8	36.1	16.8	9.0	4.3	2.9
Concentración Pico (%)	100.0	12.5	5.8	3.1	1.5	1.0

Fuente: Integral S.A., 2021.

La condición hidrológica asociada a caudales máximos con un periodo de retorno de 2,33 años muestra que se alcanzan concentraciones por debajo del 1% respecto al pico inicial, aproximadamente a las 8 horas de ingresar el contaminante al río Cauca, y a una distancia de 72,7 km del sitio de ingreso del hidrocarburo. En este caso, la concentración asociada fue de 1,2 mg/L.

Para la condición hidrológica asociada a caudales máximos con un periodo de retorno de 1,01 años se alcanzan concentraciones por debajo del 1% respecto al pico inicial, aproximadamente a las 10 horas de ingresar el contaminante al río Cauca, y a una distancia de 82,6 km del sitio de ingreso del hidrocarburo. Para esta condición hidrológica, la concentración asociada fue de 2,9 mg/L.

Tabla 2-55 Concentración de Diesel para caudales medios.

Tiempo (h)	t=0 h	t=2 h	t=4 h	t=6 h	t=8 h	t=10 h	t=12 h
Distancia (km)	0.0	22.0	39.0	52.3	65.0	78.2	85.5
Concentración (mg/L)	412.7	48.2	24.4	13.3	8.6	5.2	3.5
Concentración Pico (%)	100.0	11.7	5.9	3.2	2.1	1.3	0.8

Fuente: Integral S.A., 2021.

Tabla 2-56 Concentración de Diesel para caudales mínimos con Tr de 1,01 años.

Tiempo (h)	t=0 h	t=2 h	t=4 h	t=6 h	t=8 h	t=10 h	t=12 h
Distancia (km)	0.0	21.0	37.6	50.8	64.6	74.5	83.3
Concentración (mg/L)	468.4	51.9	27.6	15.8	11.0	6.4	4.6
Concentración Pico (%)	100.0	11.1	5.9	3.4	2.4	1.4	1.0

Fuente: Integral S.A., 2021.

Tanto para caudales medios, como para caudales mínimos con periodo de retorno de 1,01 años, los resultados muestran que se alcanzan concentraciones por debajo del 1% respecto al pico inicial, aproximadamente a las 12 horas de ingresar el contaminante al río Cauca. Las distancias asociadas fueron de 85,5 km y 83,3 km, respectivamente. Por su parte, las concentraciones fueron de 3,5 mg/L y 4,6 mg/L, respectivamente.

Tabla 2-57 Concentración de Diesel para caudales mínimos con Tr de 2,33 años.

Tiempo (h)	t=0 h	t=2h	t=4h	t=6h	t=8h	t=10h	t=12h	t=14h	t=16h	t=18h
Distancia (km)	0.0	17.3	29.3	41.6	50.8	61.5	67.6	78.6	85.0	94.4
Concentración (mg/L)	892.4	91.3	58.0	37.9	25.2	21.2	14.4	11.9	9.5	8.4
Conc. Pico (%)	100.0	10.2	6.5	4.3	2.8	2.4	1.6	1.3	1.1	0.9

Fuente: Integral S.A., 2021.

En todos los casos analizados, se alcanzaron porcentajes de concentración pico iguales o menores al 1%, con valores de concentración por debajo de los 10 mg/L. las condiciones hidrológicas asociadas a caudales altos favorecieron la aparición de concentraciones más bajas en una menor distancia del tramo analizado.

Finalmente, la situación más desfavorable (entre los escenarios analizados) se da para la condición hidrológica asociada a caudales mínimos con un periodo de retorno de 2,33 años. En esa situación se alcanzan concentraciones por debajo del 1% respecto al pico inicial, aproximadamente a las 18 horas de ingresar el contaminante al río Cauca, y a una distancia de 94,4 km del sitio de ingreso del hidrocarburo. Para esta condición hidrológica, la concentración asociada fue de 8,4 mg/L. A continuación, la Figura 2-170 presenta la espacialización de la amenaza asociada al derrame del combustible, según los resultados obtenidos en la modelación hidráulica y de calidad del agua. Se considera un nivel de amenaza muy alta en el tramo comprendido entre el punto de ocurrencia del derrame, hasta su llegada al río cauca. Por otro lado, se determina una amenaza alta en el tramo de río con concentraciones superiores al 10%. Entre el 10% y el 1% de concentración, se considera un nivel de amenaza medio. Por debajo del 1% de concentración, se considera un nivel de amenaza bajo. En el M-PHI-111-TRA-DER-P-010 se puede ver la espacialización de esta amenaza.

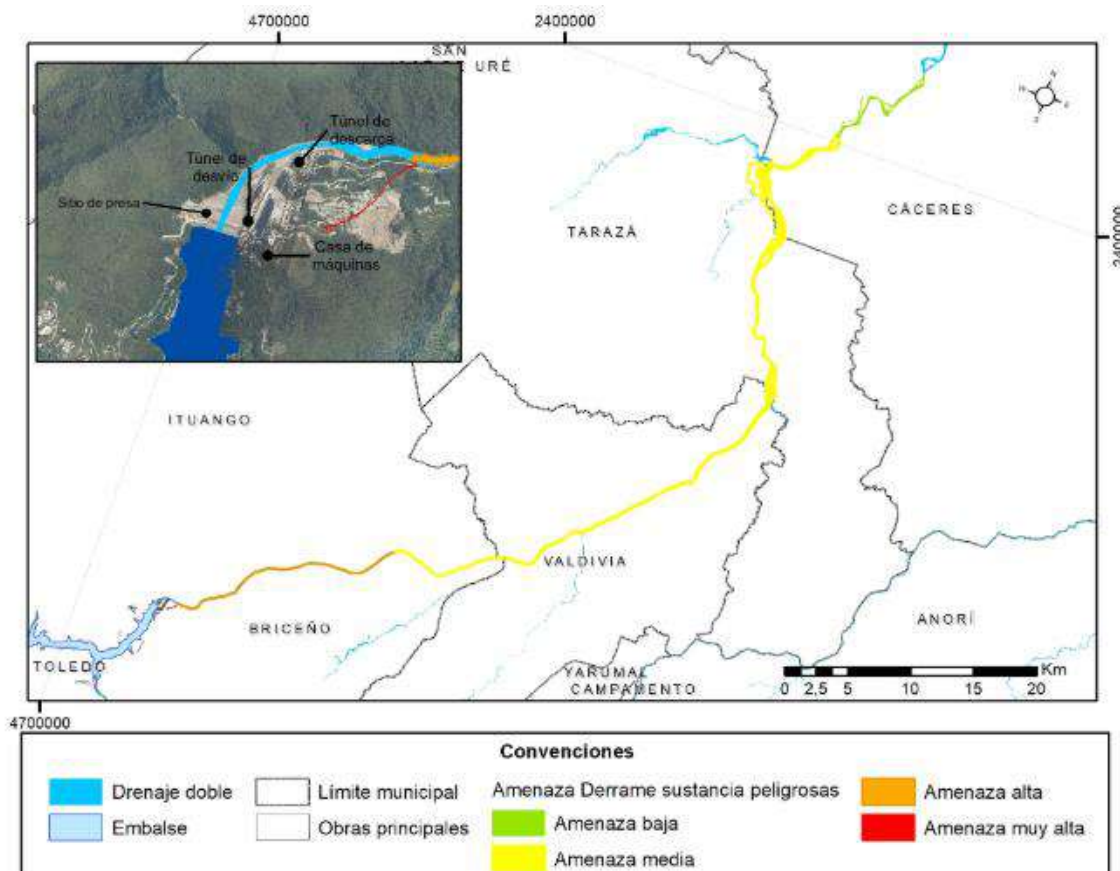


Figura 2-170 Amenaza por derrame de hidrocarburo tipo Diésel en estación de combustible.  
Fuente: Integral S.A., 2021.

#### 2.2.4.7.5 Conclusiones

Este estudio, se enfocó inicialmente en tipificar, caracterizar y georreferenciar el almacenamiento de sustancias que pueden causar derrames que afecten el medio. En total, se identificaron 14 puntos en el área del proyecto, con posibilidad de generar alguna afectación por derrames de sustancias, y en cada uno de estos, se estableció cuáles eran los tipos de sustancias almacenadas, su volumen y los sistemas implementados para el control de derrames.

Realizando un análisis de todos los puntos en el área, se estableció que el punto asociado a la Estación de combustible CCC es el único punto, que podría llegar a generar una real afectación ya que no presenta las medidas de contención apropiadas para controlar todo el volumen almacenado.

Posteriormente, se analizó la asimilación del río Cauca, aguas abajo del sitio presa del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI), ante la posibilidad de ocurrencia de un derrame de sustancias



contaminantes. Particularmente, el análisis se enfocó en el posible ingreso de 132,48 m<sup>3</sup> de hidrocarburo tipo Diésel al río Cauca, provenientes de la estación de combustibles.

Para la simulación a lo largo del río Cauca se utilizaron los caudales estimados en estudios previos, y se analizaron condiciones hidrológicas medias, y máximas y mínimas recurrentes con el fin de caracterizar condiciones húmedas y de verano, respectivamente. Esto con el fin de analizar la variabilidad en términos de la capacidad de asimilación del río Cauca en función de la condición climática.

Las condiciones asociadas a caudales más bajos presentan resultados en donde la asimilación del contaminante es más lenta. Pueden observarse, incluso aguas abajo de Apaví (a 70 km aproximadamente del punto de ingreso del contaminante), concentraciones del hidrocarburo que podrían seguir generando alguna afectación, al encontrarse por encima de límites permisibles en la normatividad (10 mg/L).

En todos los casos analizados, se alcanzaron porcentajes de concentración pico iguales o menores al 1%, con valores de concentración por debajo de los 10 mg/L. Las condiciones hidrológicas asociadas a caudales altos favorecieron la aparición de concentraciones más bajas en una menor distancia del tramo analizado.

La condición hidrológica asociada a caudales máximos con un periodo de retorno de 2,33 años muestra que se alcanzan concentraciones por debajo del 1% respecto al pico inicial, aproximadamente a las 8 horas de ingresar el contaminante al río Cauca, y a una distancia de 72,7 km del sitio de ingreso del hidrocarburo. En este caso, la concentración asociada fue de 1,2 mg/L.

Para la condición hidrológica asociada a caudales máximos con un periodo de retorno de 1,01 años se alcanzan concentraciones por debajo del 1% respecto al pico inicial, aproximadamente a las 10 horas de ingresar el contaminante al río Cauca, y a una distancia de 82,6 km del sitio de ingreso del hidrocarburo. Para esta condición hidrológica, la concentración asociada fue de 2,9 mg/L.

Tanto para caudales medios, como para caudales mínimos con periodo de retorno de 1,01 años, los resultados muestran que se alcanzan concentraciones por debajo del 1% respecto al pico inicial, aproximadamente a las 12 horas de ingresar el contaminante al río Cauca. Las distancias asociadas fueron de 85,5 km y 83,3 km, respectivamente. Por su parte, las concentraciones fueron de 3,5 mg/L y 4,6 mg/L, respectivamente.

Finalmente, la situación más desfavorable (entre los escenarios analizados) se da para la condición hidrológica asociada a caudales mínimos con un periodo de retorno de 2,33 años. En se alcanzan concentraciones por debajo del 1% respecto al pico inicial, aproximadamente a las 18 horas de ingresar el contaminante al río Cauca, y a una distancia de 94,4 km del sitio de ingreso del hidrocarburo. Para esta condición hidrológica, la concentración asociada fue de 8,4 mg/L.

#### **2.2.4.8 Caracterización de amenaza por avenidas torrenciales**

### 2.2.4.8.1 Caracterización del área de análisis

A continuación, se describe la delimitación de área que presenta una amenaza ante eventos de avenidas torrenciales. Para esta zonificación se delimitó un área de análisis de acuerdo con la ubicación de las obras principales del PHI, el embalse y un tramo aguas abajo del sitio de presa, teniendo en cuenta aspectos fisiográficos importantes, como la conformación topográfica y orientación de las vertientes aledañas al cañón del río Cauca para la zona del proyecto.

El área de análisis abarcó la zona del embalse desde su cola, localizada en el departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Buriticá (corregimiento La Angelina), Liborina (veredas La Sucia y Llano Grande) y Santa Fe de Antioquia (vereda Cativo), hasta aguas abajo del sitio de presa (hacia el norte por el eje del río Cauca), en las inmediaciones del corregimiento El Doce del municipio de Tarazá (Antioquia). También se extendió hasta las divisorias de agua de las laderas que, según su orientación, disposición fisiográfica y estructural, y morfología, conforman el cañón del río, donde los procesos de inestabilidad y su propagación inciden directamente en el área de influencia del proyecto (Figura 2-171).

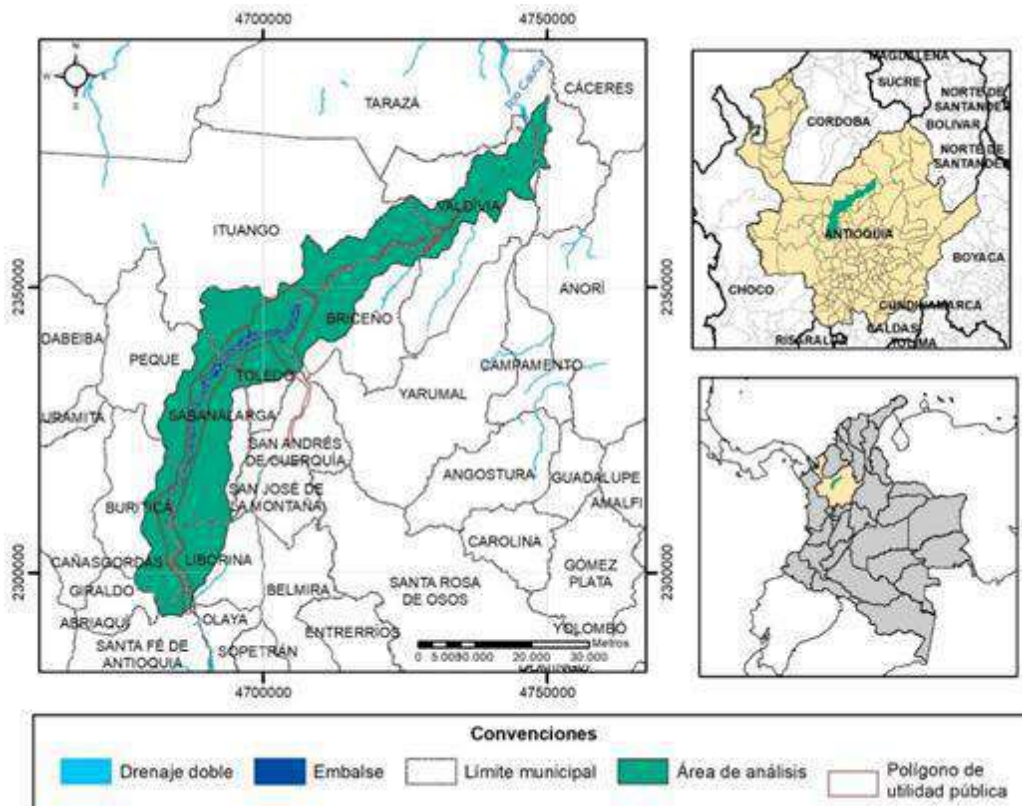


Figura 2-171 Localización general del área de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2022.

En el área de estudio se presentan en general pendientes altas con valores entre  $19,29^\circ$  y  $36,87^\circ$  (35% y 75%), siendo muy dominantes pendientes mayores a los  $36,87^\circ$  (75%) en aquellas

zonas donde se ubican las corrientes principales. La Figura 2-172 muestra la distribución de las pendientes en el área de estudio.

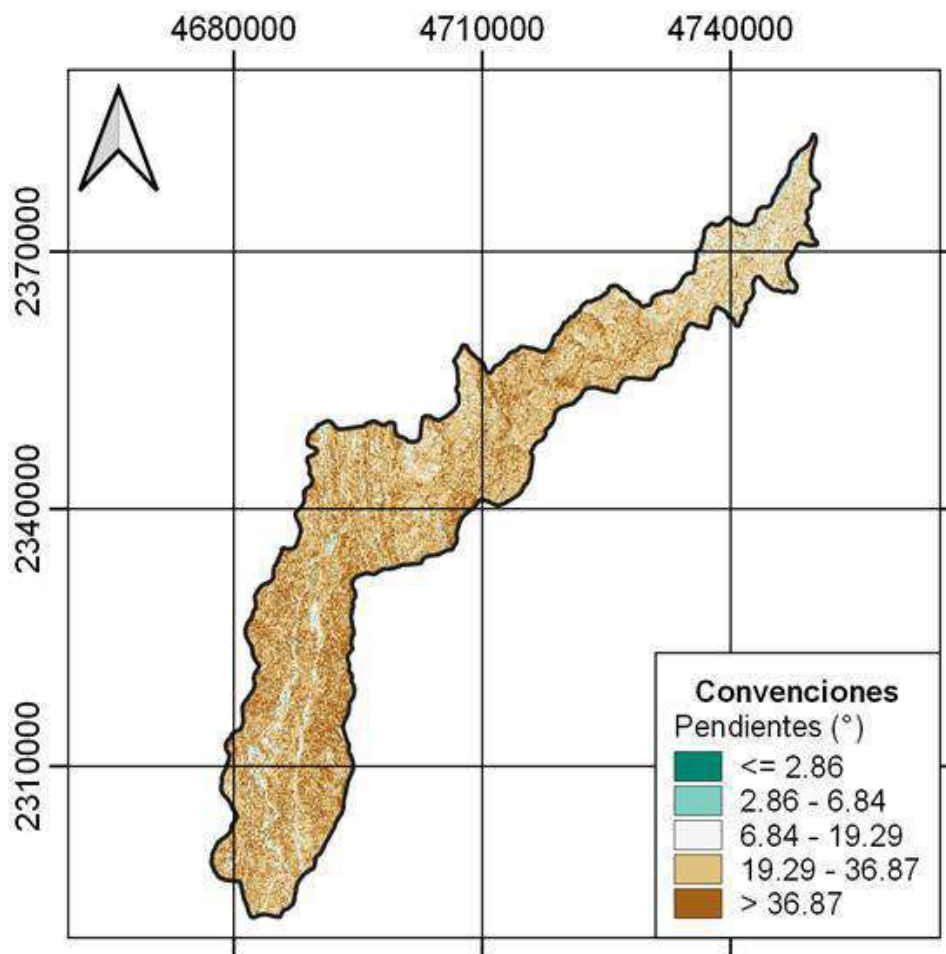


Figura 2-172 Distribución de las pendientes sobre el área de estudio

Fuente: Integral S.A., 2021

En la Figura 2-173 la precipitación en la zona de estudio. Según lo observado, en el área de estudio se presentan generalmente precipitaciones que varían entre 1665 mm y 3792 mm. En el costado nororiental se alcanzan valores que están por encima de 3792 mm anuales, mientras que en el suroccidente las precipitaciones disminuyen, alcanzado valores por debajo de 1665 mm anuales.

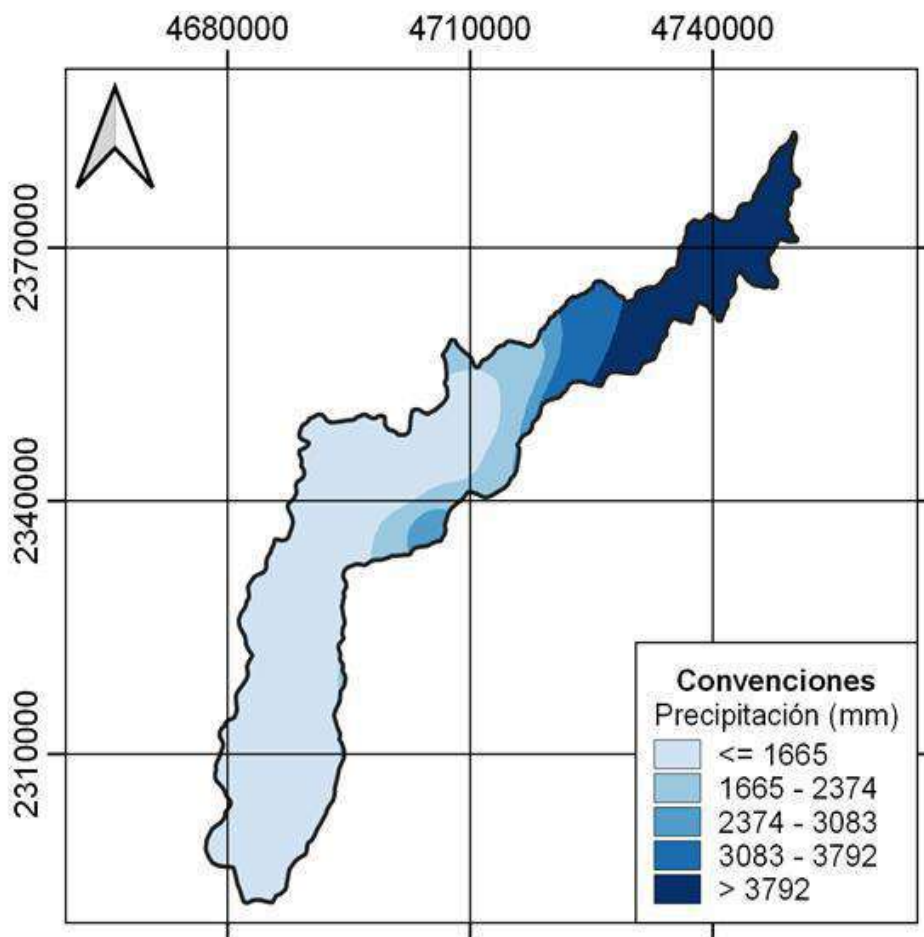


Figura 2-173 Precipitación zona de análisis.

Fuente: modificado de Integral S.A, 2018.

De igual forma, para el caso del presente estudio, se utilizó información asociada a las coberturas del suelo levantada por el cliente, con una escala de hasta de 1:5.000, la cual fue complementada con información de levantada por Corantioquia a escala de 1:25.000 e información levantada por CartoAntioquia a escala de 1:100.000 para cubrir la zona de análisis en su totalidad. La Figura 2-174 muestra la distribución de las coberturas del suelo para el área de estudio.

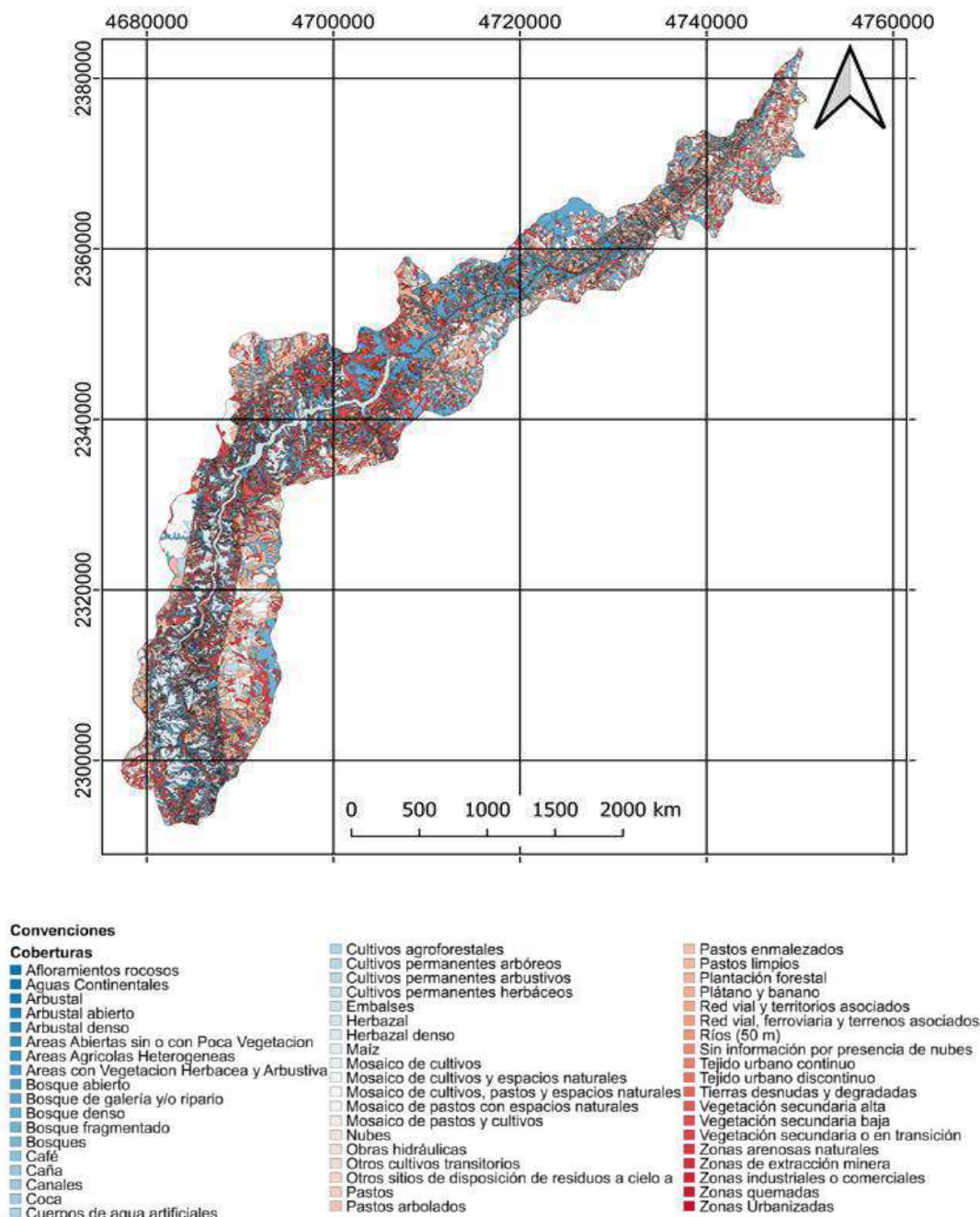
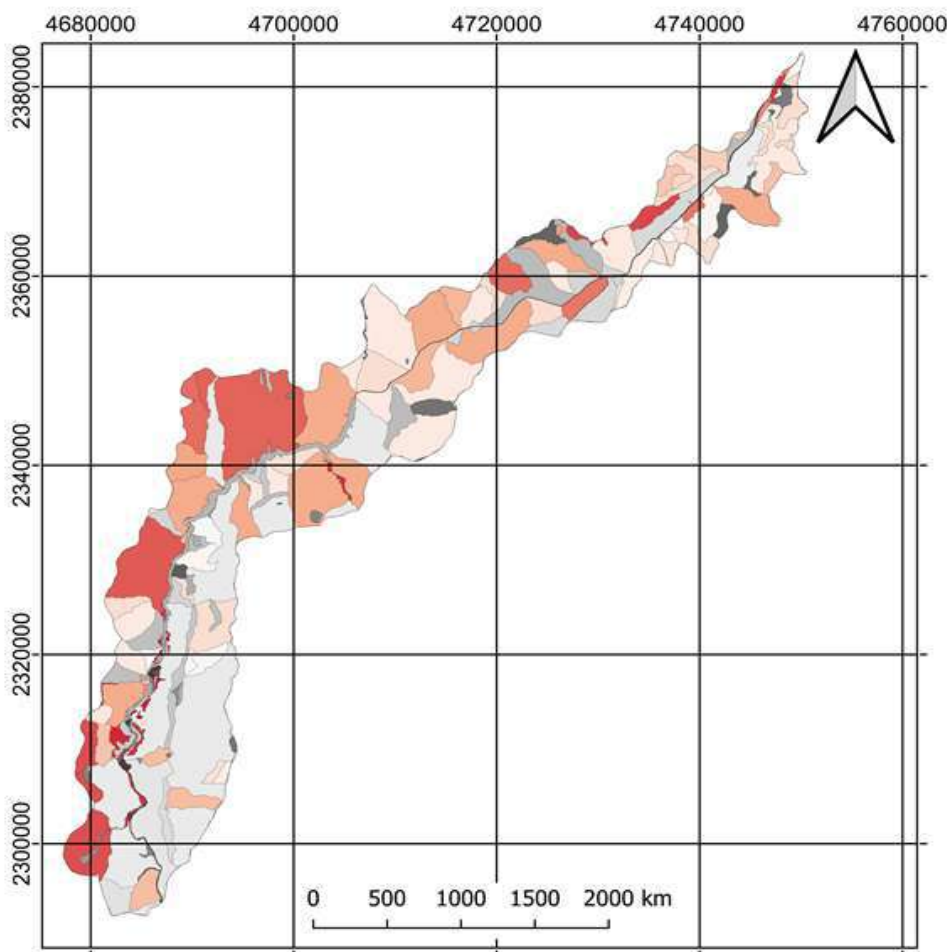


Figura 2-174 Coberturas del suelo de la zona de análisis.

Fuente: Integral S.A., 2022.

La geomorfología que compone la zona de estudio se obtuvo del Servicio Geológico Colombiano. La información obtenida se muestra en la Figura 2-175.





**Convenciones**

<b>Unidades Geomorfológicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Abanico aluvial</li> <li>■ Barra longitudinal</li> <li>■ Barra puntual</li> <li>■ Cauce aluvial</li> <li>■ Cerro remanente o relicto</li> <li>■ Cerro residual</li> <li>■ Cima</li> <li>■ Colina residual</li> <li>■ Colina residual de altiplano</li> <li>■ Cono de deslizamiento indiferenciado</li> <li>■ Cono de deyección</li> <li>■ Cono flujos de detritos</li> <li>■ Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión</li> <li>■ Cono o lóbulo de flujo de detritos</li> <li>■ Cono o lóbulo de flujo de lodo</li> <li>■ Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión</li> <li>■ Embalses</li> <li>■ Escarpe de erosión mayor</li> <li>■ Escarpe de erosión menor</li> <li>■ Escarpe de línea de falla</li> <li>■ Escarpe de línea de falla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Escarpe de terraza de acumulación</li> <li>■ Escarpe de terraza de erosión</li> <li>■ Escarpe faceteado</li> <li>■ Espolón faceteado</li> <li>■ Espolón faceteado bajo de longitud corta</li> <li>■ Espolón faceteado bajo de longitud larga</li> <li>■ Espolón faceteado bajo de longitud media</li> <li>■ Espolón faceteado moderado de longitud larga</li> <li>■ Espolón faceteado moderado de longitud media</li> <li>■ Espolón festoneado bajo de longitud larga</li> <li>■ Espolón moderado de longitud larga</li> <li>■ Espolón moderado de longitud media</li> <li>■ Explotación minera</li> <li>■ Faceta triangular</li> <li>■ Gancho de flexión</li> <li>■ Ladera contrapendiente</li> <li>■ Ladera erosiva</li> <li>■ Ladera estructural</li> <li>■ Ladera ondulada</li> <li>■ Loma denudada</li> <li>■ Lomeríos disectados</li> <li>■ Lomeríos disectados de altiplano</li> <li>■ Lomeríos poco disectados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lomo de falla</li> <li>■ Lomo de obturación</li> <li>■ Lomo denudado alto de longitud larga</li> <li>■ Lomo denudado bajo de longitud larga</li> <li>■ Lomo denudado moderado de longitud larga</li> <li>■ Lomo denudado moderado de longitud media</li> <li>■ Lomo residual de altiplano</li> <li>■ Planicie y delta lacustrino</li> <li>■ Plano o llanura de inundación</li> <li>■ Sierra</li> <li>■ Sierra de barras estructurales</li> <li>■ Sierra denudada</li> <li>■ Sierra homoclinal</li> <li>■ Sierra residual</li> <li>■ Sierras y lomos de presión</li> <li>■ Superficie de erosión o aplanamiento</li> <li>■ Terraza de acumulación</li> <li>■ Terraza de acumulación</li> <li>■ Terraza de acumulación antigua</li> <li>■ Terraza de acumulación sub-reciente</li> <li>■ Terraza de erosión</li> <li>■ Terrazas sobreelevadas o colgadas</li> </ul>
---------------------------------	---	--	--

Figura 2-175 Geomorfología de la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2022.

Los materiales superficiales que subdividen la zona de estudio se muestran en la Figura 2-176, y se puede observar que no hay unidades predominantes debido a la gran cantidad de unidades geológicas que se presentan en la zona de estudio. Cabe resaltar que esta información fue obtenida del Servicio Geológico Colombiano.

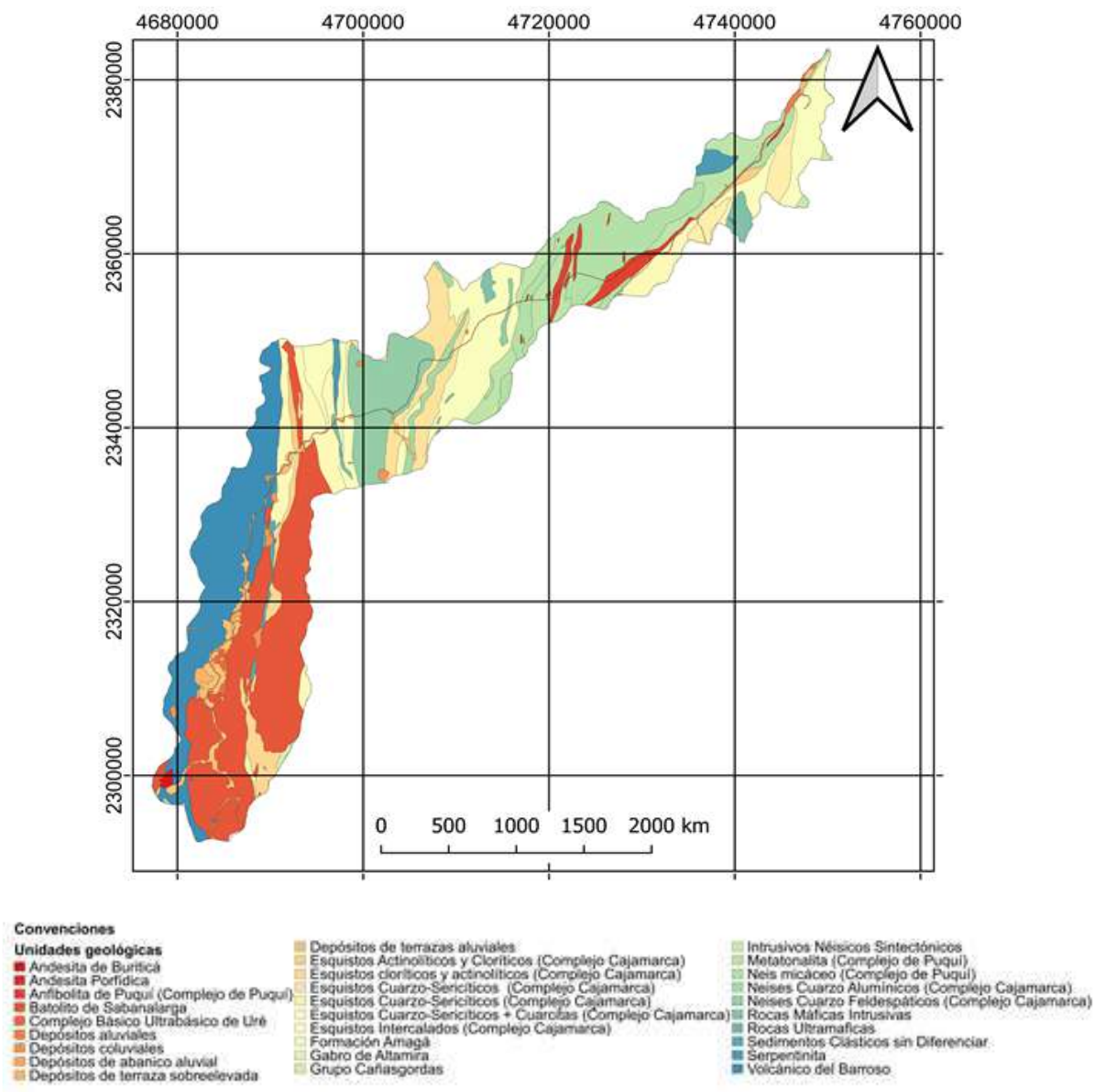


Figura 2-176 Materiales superficiales de la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2022.

#### 2.2.4.8.2 Resultados y análisis

En la Figura 2-177 se muestran las cuencas que subdividen la zona de estudio, en donde se puede observar que la mayor parte del área de estudio presenta valores hasta 1,846.

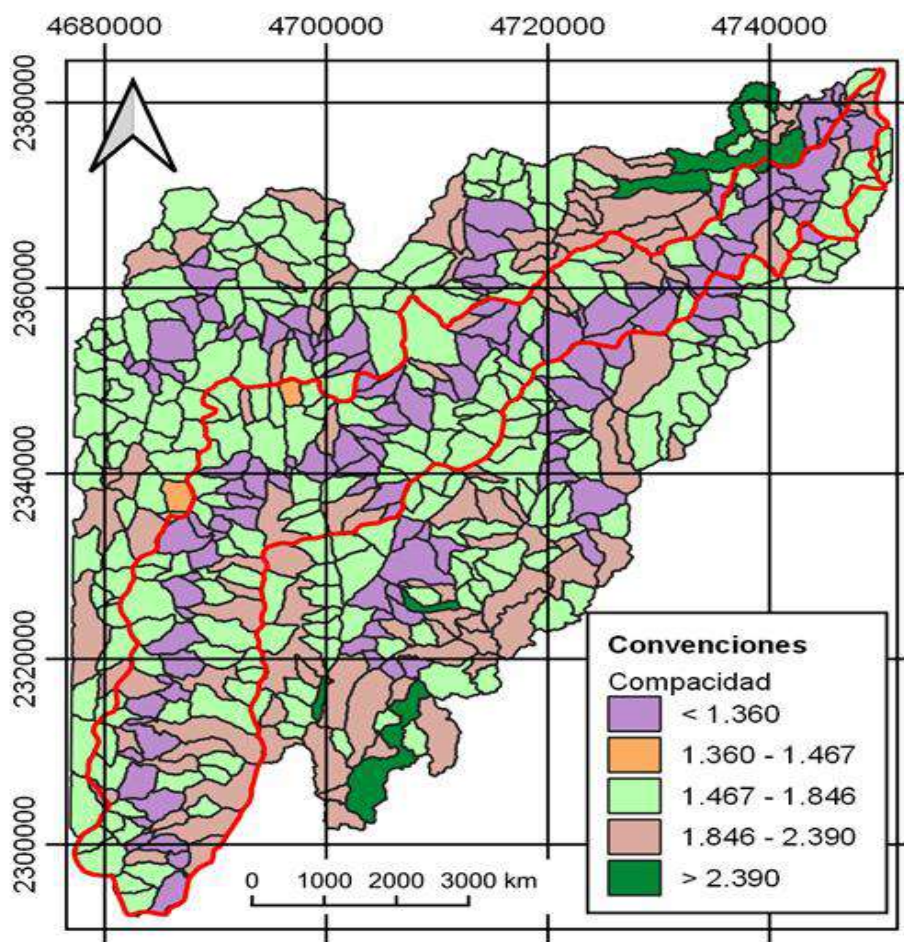


Figura 2-177 Delimitación morfométrica por tramos en la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2022.

Por otra parte, en la Figura 2-178 se presenta la distribución del coeficiente de compacidad con los valores clasificados en base a la clasificación propuesta por CORNARE y en donde se puede observar que, la mayoría de estas se clasifican como Bajo, Media y Alta.

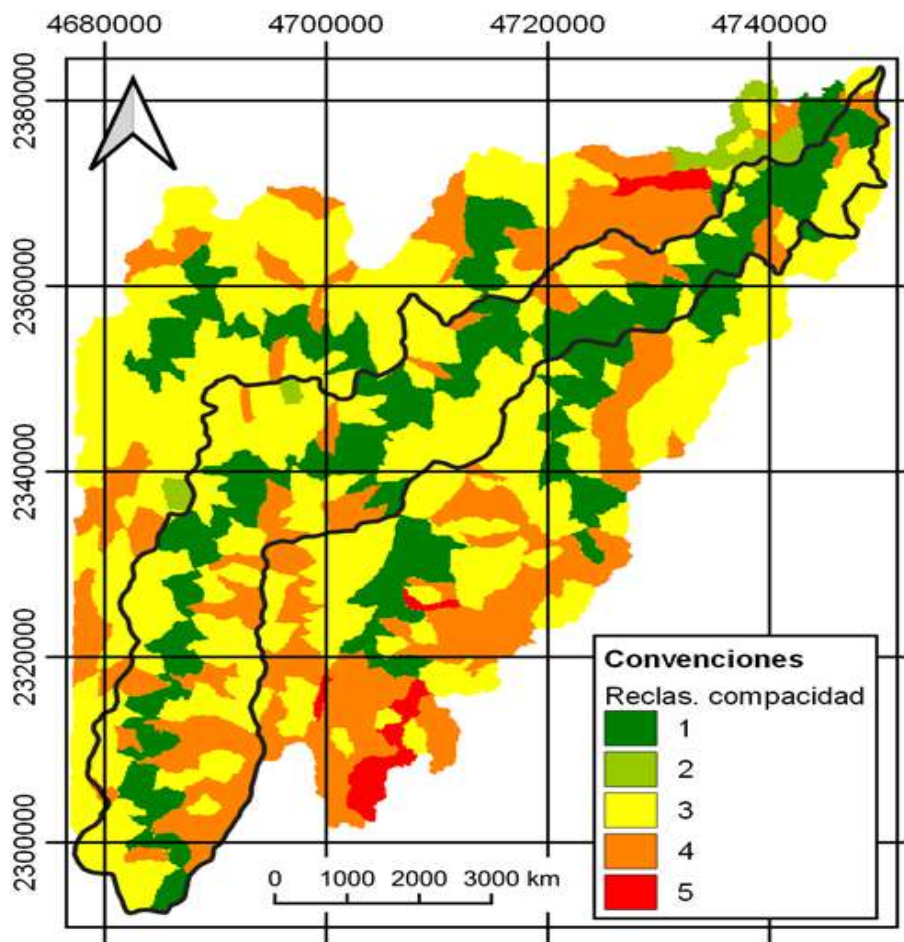


Figura 2-178 Clasificación del Coeficiente de Compacidad.

Fuente: Integral S.A., 2022.

En la Figura 2-179 se muestra la reclasificación de las pendientes con base a la metodología implementada. Se puede observar que la mayoría de la zona de estudio presenta una clasificación de 4 y 5, es decir, pendientes mayores a 35%, lo cual corresponde a pendientes mayores a  $19,29^\circ$ , lo que, además, las clasifica como cuencas de alta montaña.



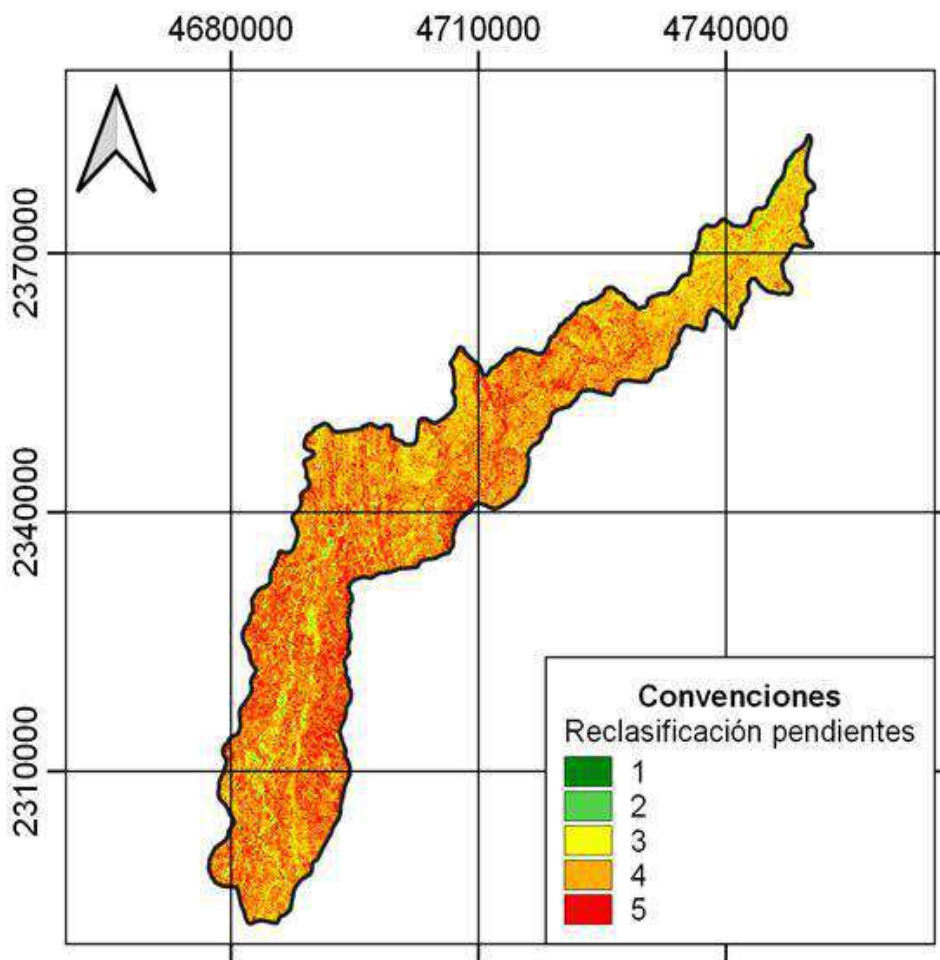


Figura 2-179 Reclasificación de las pendientes.

Fuente: Integral S.A., 2022.

De acuerdo con la Figura 2-173, se realizó la reclasificación de la precipitación, presentada en la Figura 2-180. Se puede observar que la zona de estudio presenta una clasificación en un rango de 1 a 3 hacia la parte sur del área, lo que significa que la precipitación presenta valores hasta 3083 mm, aproximadamente. Hacia el norte la clasificación corresponde a valores entre 3 y 5, lo que da cuenta de precipitaciones mayores a 3083 mm.



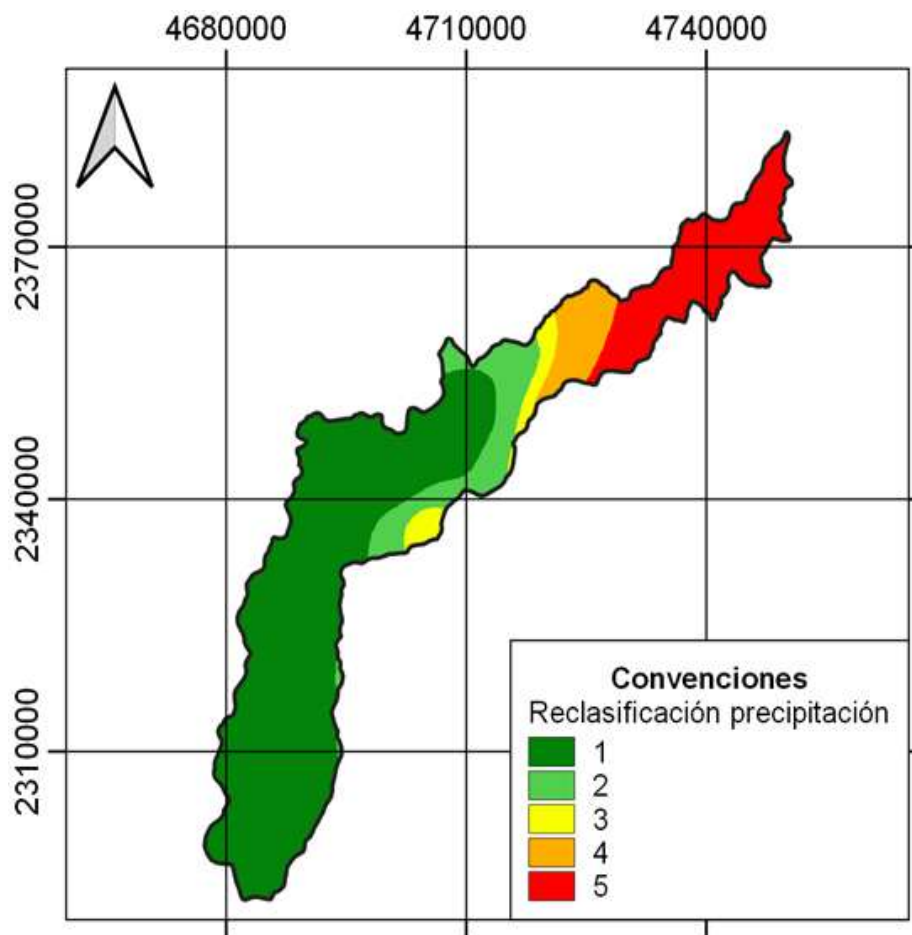


Figura 2-180 Reclasificación de la precipitación.

Fuente: Integral S.A., 2022.

La reclasificación obtenida para la cobertura vegetal se puede ver en la Figura 2-181. Se puede observar que una gran porción de la zona de estudio se encuentra clasificada en el valor de 2 y 3, es decir, son Áreas deportivas, Aeropuertos, Arbustal, Arbustal abierto, Arbustal denso, Arbustos matorrales, Cítricos, Caña, Café, Canales, Coca, Cultivos agroforestales, Cultivos permanentes arbóreos, Cultivos permanentes arbustivos, Cultivos permanentes herbáceos, Herbazal, Herbazal denso, Maíz - Obras hidráulicas, Otros cultivos transitorios, Papaya, Parques cementerios, Plátano y banano, Red vial y territorios asociados, Red vial, ferroviaria y terrenos asociados, Tejido urbano continuo, Tejido urbano discontinuo, Tubérculos, Vegetación esclerófila, Zonas de extracción minera, Zonas industriales o comerciales, Coníferas, Mosaico de cultivos, Mosaico de cultivos y espacios naturales, Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, Mosaico de pastos con espacios naturales, Mosaico de pastos y cultivos, otros cultivos permanentes, otros cultivos transitorios, Pastos arbolados, Pastos enmalezados, Pastos enrastrajados, Pastos limpios, Pastos Limpios manejados y Pastos no manejados, Plantación forestal.

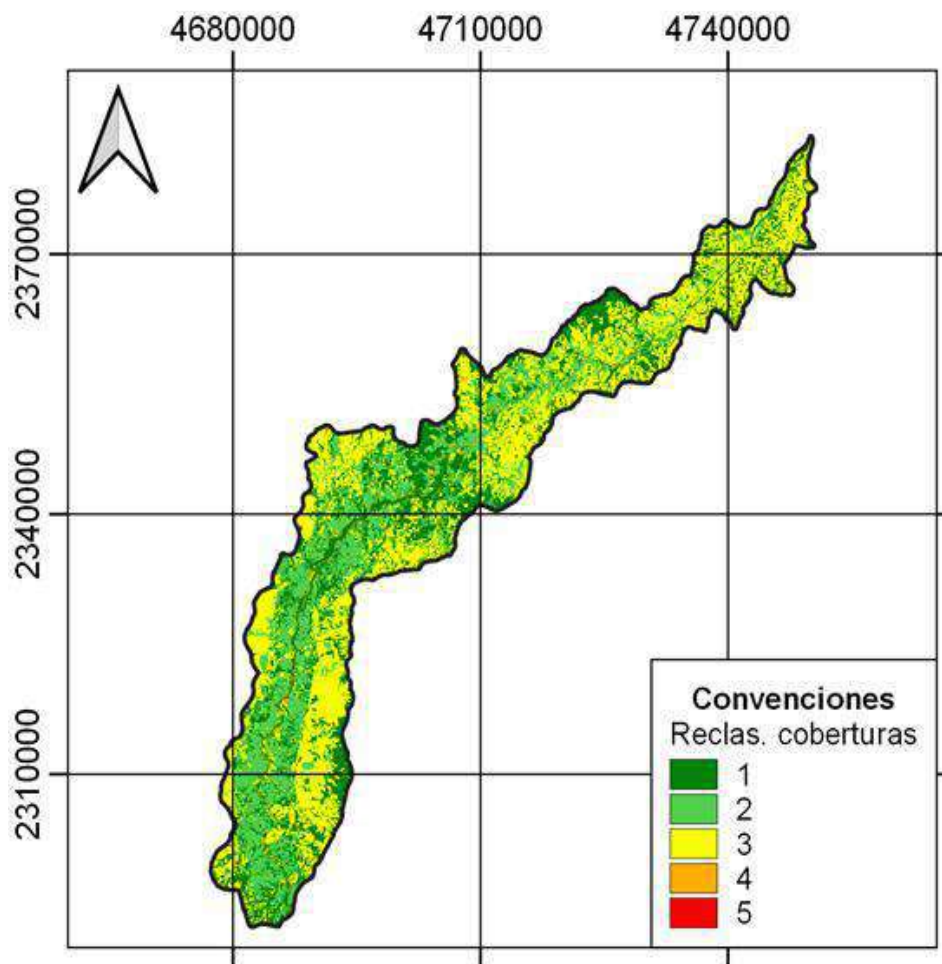


Figura 2-181 Reclasificación de las coberturas vegetales.

Fuente: Integral S.A., 2022

La Figura 2-182 corresponde al mapa de la reclasificación de las unidades geomorfológicas en la zona de estudio.

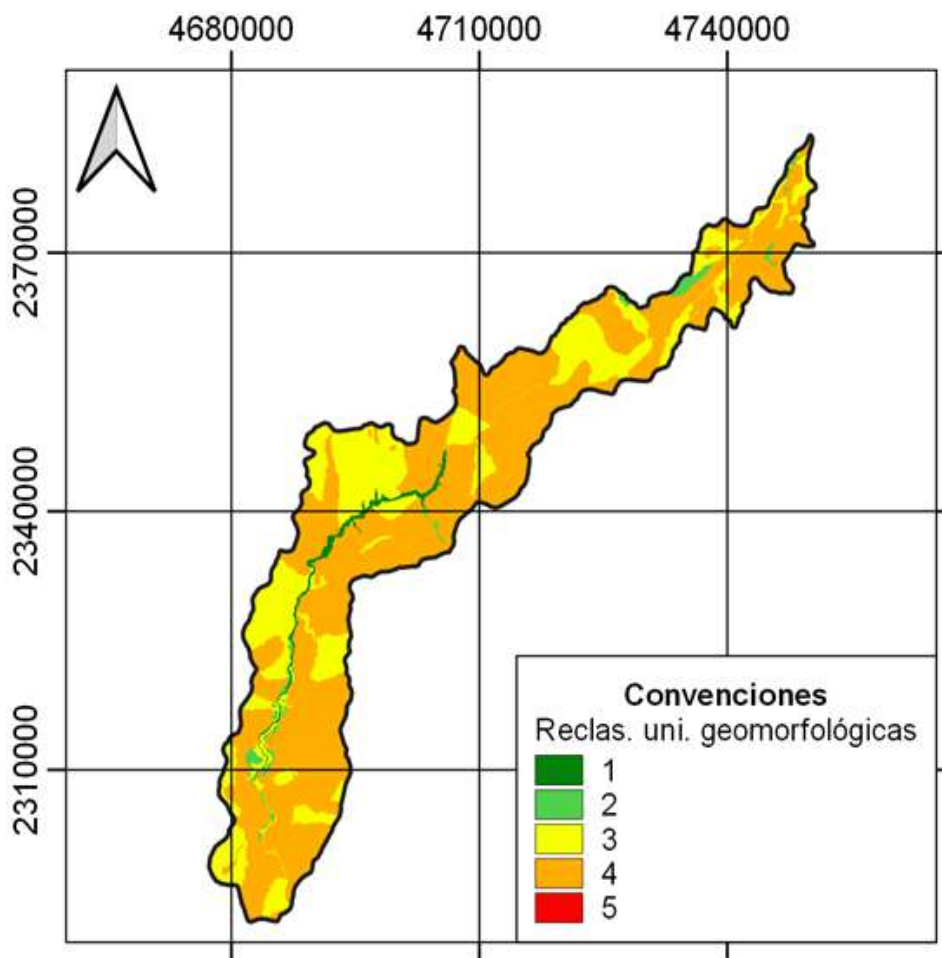


Figura 2-182 Reclasificación de las unidades geomorfológicas.

Fuente: Integral S.A., 2022

Los resultados asociados a la reclasificación de los materiales superficiales se muestran en la Figura 2-183. En este caso se evidencia que el territorio no presenta una clasificación predominante. Esto se debe a la gran cantidad de unidades geológicas que se presentan en la zona de estudio.

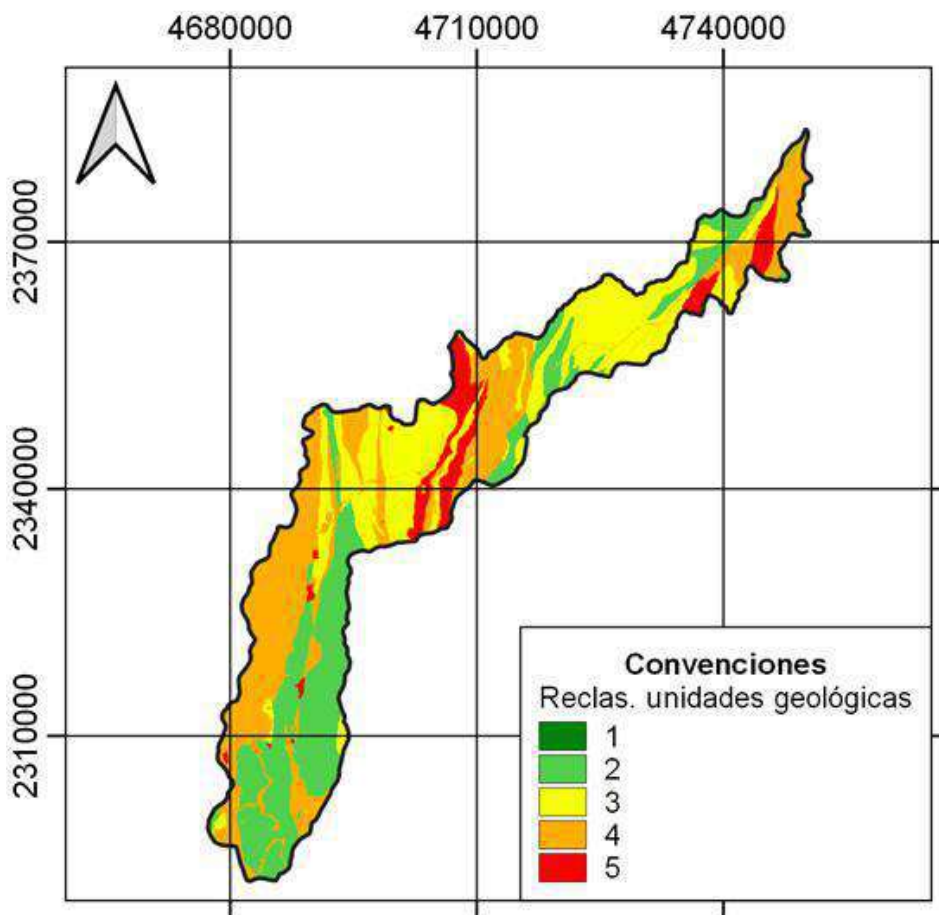


Figura 2-183 Reclasificación de los materiales superficiales.

Fuente: Integral S.A., 2022

Finalmente, los resultados asociados a la espacialización de la amenaza se pueden observar en la Figura 2-184 y en el mapa M-PHI-111-TRA-AT-P-010 anexo, en donde se muestra que las amenazas por avenida torrencial sobre el área objeto de estudio presentan un color entre amarillo (medio) y naranja (alto).

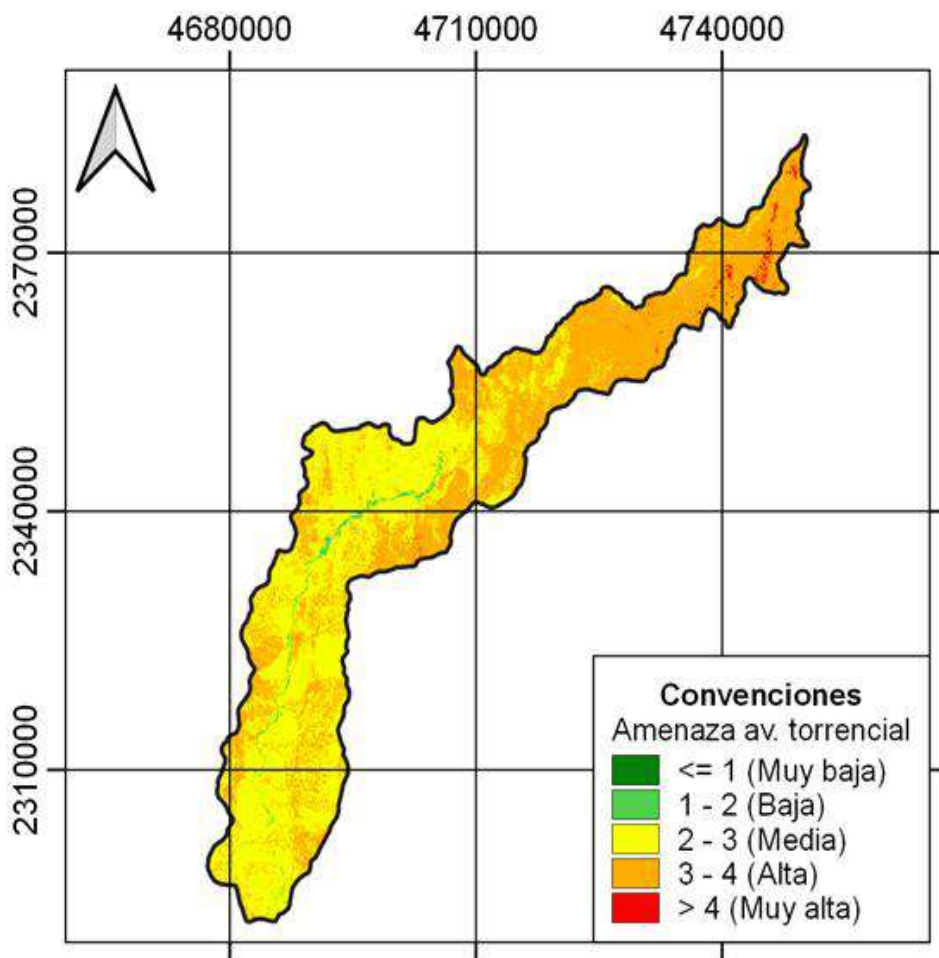


Figura 2-184 Amenaza por avenida torrencial en la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2022

Finalmente, como se puede analizar en el mapa de amenaza por avenidas torrenciales en la zona de estudio (ver Figura 2-185), la mayoría del territorio se encuentra en un rango de amenaza por avenida torrencial entre Media – Alto.

Adicionalmente, se recomienda tener un especial cuidado en las zonas que presentan depósitos aluviales (ver zonas de color magenta en la Figura 2-185), ya que las zonas donde se acumulan o depositan materiales producto de movimientos de masa o sedimentos transportados son más susceptible a generar avenidas torrenciales.



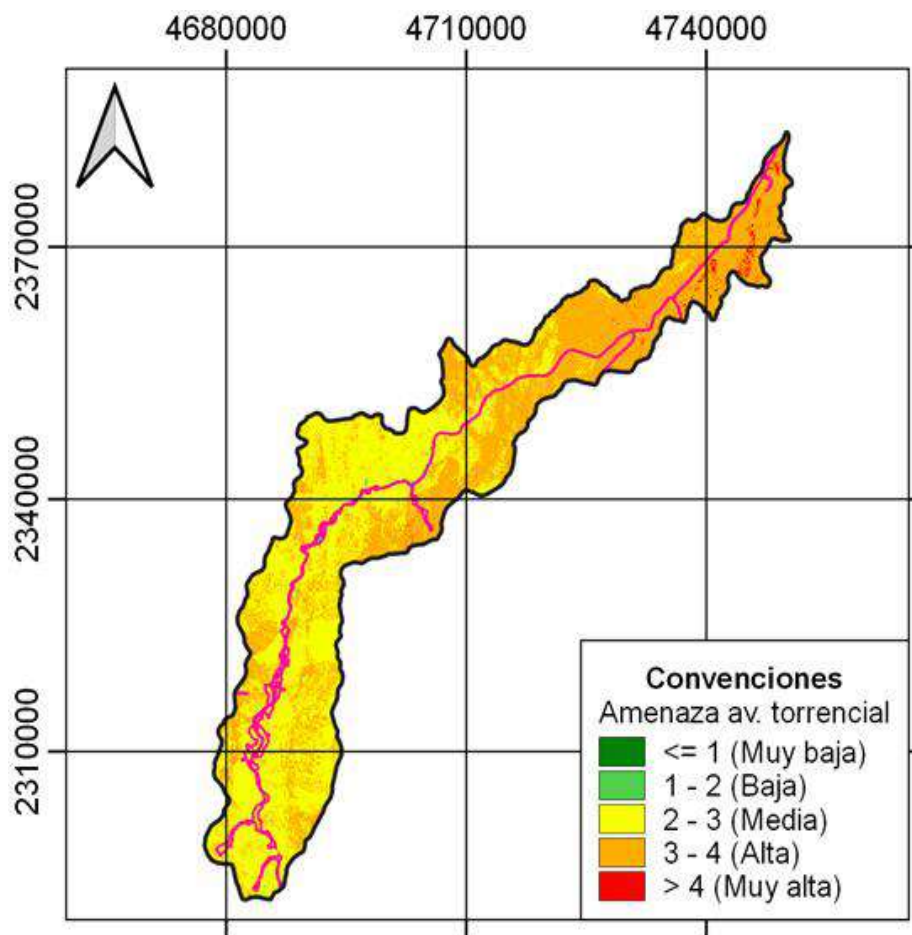


Figura 2-185 Amenaza ante avenidas torrenciales en las zonas de depósitos aluviales.

Fuente: Integral S.A., 2022

#### 2.2.4.8.3 Conclusiones

El presente estudio tuvo como finalidad identificar las zonas con mayor amenaza por eventos de avenidas torrenciales en respuesta a eventos hidrometeorológicos, geológicos y geomorfológicos en el área de análisis, la cual abarcó la zona del embalse desde su cola, localizada en el departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Buriticá (corregimiento La Angelina), Liborina (veredas La Sucia y Llano Grande) y Santa Fe de Antioquia (vereda Cativo), hasta aguas abajo del sitio de presa (hacia el norte por el eje del río Cauca), en las inmediaciones del corregimiento El Doce del municipio de Tarazá (Antioquia).

Se implementó la metodología propuesta en el documento “*Evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento en procesos erosivos en el municipio de Cocorná*” de la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los ríos Negro – Nare (CORNARE) para el análisis de amenazas por avenidas torrenciales.

Con la metodología aplicada se realizó una ponderación de cinco mapas. El primero asociado a la morfometría de la zona, donde se ven involucrados el coeficiente de compacidad (factor de forma de una cuenca) y la pendiente de la zona. El segundo mapa está asociado a la precipitación media total multianual de zona. El tercer mapa corresponde a las coberturas vegetales, en el cual se observa que zonas pueden ser más propensas a un evento de movimiento en masa. El cuarto mapa hace referencia a las unidades geológicas o materiales superficiales de la zona, este al igual que el anterior analiza que zonas pueden ser más propensas a un evento de movimiento en masa. El quinto corresponde al mapa de unidades geomorfológicas o también llamado relieve regional, ya que, como se mencionó a lo largo del informe, el fenómeno de avenida torrencial está asociado a las zonas montañosas.

Por otro lado, se pudo observar con el mapa de pendientes que, en casi toda su totalidad de las cuencas presentes en el área de análisis, se encuentran por encima de los  $19,29^\circ$ , lo cual las clasifica como cuencas de alta montaña, y que además es una de las características de una cuenca torrencial. Adicionalmente después de realizar la reclasificación de las pendientes medias, se evidencio que el área de estudio se encuentra catalogado en un rango entre medio a muy alto.

Se observó que el coeficiente de compacidad estimado para las cuencas que subdividen el área analizada en el estudio presenta un valor por debajo de 1,846, teniendo en cuenta la clasificación propuesta por CORNARE, estas se clasifican como Bajo, Media y Alta.

Como se mencionó a lo largo de este estudio la variable precipitación también juega un rol muy importante dentro del análisis de torrencialidad y de ahí su porcentaje en la ponderación realizada. Dentro de los análisis realizados se observó que en el área objeto de estudio la precipitación se encuentra entre 1665 mm y 3792 mm aproximadamente, lo cual combinado con algunas condiciones desfavorables puede presentar una amenaza ante avenidas torrenciales.

Por otra parte, la variable de coberturas vegetales se clasifica en función de que tan propensas son a una ocurrencia de movimientos en masas, se puede concluir que en el área analizada esta variable se encuentra clasificada en un rango entre 2 y 3, lo que quiere decir que presenta una amenaza entre baja a media ante eventos de movimientos en masa y avenidas torrenciales.

Por su parte, los materiales superficiales o unidades geológicas también se clasifican en función de que tan propensas son a una ocurrencia de movimientos en masas, sin embargo, con esta variable no se observó una clasificación predominante en el área estudiada.

En cambio, el parámetro de unidades geomorfológicas presento en la mayoría del área una clasificación en 3 y 4, lo que quiere decir que presenta una amenaza entre media a alta ante eventos de movimientos en masa y avenidas torrenciales.

Después de realizar la ponderación de las variables, se observa que, la zona ubicada hacia la parte norte del área objeto de estudio, es donde se encuentra una mayor amenaza ante

fenómenos de avenidas torrenciales, la cual se debe a que, las variables de precipitación y materiales superficiales presentaron una clasificación de alta a muy alta sobre esta zona.

Se concluye que, las variables de coberturas vegetales y coeficiente de compacidad no tuvieron mucha influencia sobre los estimativos, ya que, el comportamiento o clasificación que estas tienen, no se parecen en nada a los resultados obtenidos para la amenaza ante eventos de avenidas torrenciales.

Caso contrario al que observo con las variables de precipitación y materiales superficiales o unidades geológicas, las cuales tienden a tener un comportamiento similar al resultado obtenido por amenazas ante eventos de avenidas torrenciales, en los cuales se aprecia una clasificación más alta hacia la zona norte y una clasificación más baja hacia la zona sur del área analizada.

Finalmente, luego de analizar el mapa de amenaza ante avenidas torrenciales en el área analizada, se pudo observar que en su mayoría el área analizada se encuentra en un rango entre medio a alto. Además, se recomienda tener un especial cuidado en las zonas que presentan depósitos aluviales, ya que, en las zonas donde se acumulan o depositan materiales producto de movimientos en masa o sedimentos transportados son más susceptibles a avenidas torrenciales.

Adicionalmente, se puede observar que, en el espejo de agua del embalse del proyecto hidroeléctrico Ituango, se observa una clasificación baja ante fenómenos de avenidas torrenciales, esto se debe a que, en las variables de unidades geomorfológicas, coberturas vegetales y las pendientes su clasificación fue baja.

#### **2.2.4.9 Caracterización de amenaza por modificaciones extremas de caudales por riesgo tecnológico**

Durante la operación normal del proyecto, así como durante el estado de contingencia, pueden presentarse fallas en los equipos electromecánicos en alguna de las estructuras que permite realizar regulaciones del agua que entra el embalse y que, finalmente, es descargada aguas abajo del proyecto. En caso de presentarse fallas técnicas y operativas de las diferentes compuertas de las estructuras de evacuación de agua del embalse, ya sea impidiendo la evacuación de esta o descargando un caudal mayor al esperado o al que naturalmente se presenta en el río, se pueden presentar diferentes afectaciones tanto aguas arriba como aguas abajo del embalse.

El proceso de instalación de estos equipos contempló desde las etapas de diseño todos los criterios necesarios de seguridad de la normatividad aplicable, y además se cuenta con el CMT (Centro de Monitoreo Técnico) que sigue de forma permanente el estado general de estas estructuras; sin embargo, no se puede descartar la probabilidad de ocurrencia de estos eventos.

Para el análisis de esta amenaza de falla en los equipos electromecánicos que puedan generar afectaciones a las poblaciones y/o al medio ambiente, se analizan principalmente las

estructuras: Vertedero, Descarga Intermedia, Túneles de Desviación (Túnel de Desviación Derecho – TDD – y la Galería Auxiliar de Desviación – GAD –) y el cierre de los stop-logs en la Descarga 3 para la protección de la Casa de Máquinas, durante época de contingencia (estado actual del proyecto) y en operación, puesto que las afectaciones pueden variar en cada uno de estos, en cuanto a que el nivel del embalse es distinto (cota 407,7 m.s.n.m. para el estado actual del proyecto y cota 420,0 m.s.n.m. durante operación).

#### 2.2.4.9.1 Descarga intermedia

La Descarga Intermedia (DI) del P.H. Ituango está compuesta por un túnel de sección en semi-bóveda con dimensiones de 8 m x 8 m (ancho y alto, respectivamente). El túnel se mantiene con esa sección constante hasta la abscisa 464,14 en donde se inicia la transición hacia la zona de compuertas. Hacia aguas abajo, en una distancia exacta de 9 m, se encuentra una pila, la cual se encarga de dividir en el flujo en dos vanos de sección que varían la sección hasta llegar a una sección rectangular de 3 m de ancho por 3,9 m de alto en la zona donde se ubican las compuertas. En la Figura 2-186 se muestra la localización general del túnel.

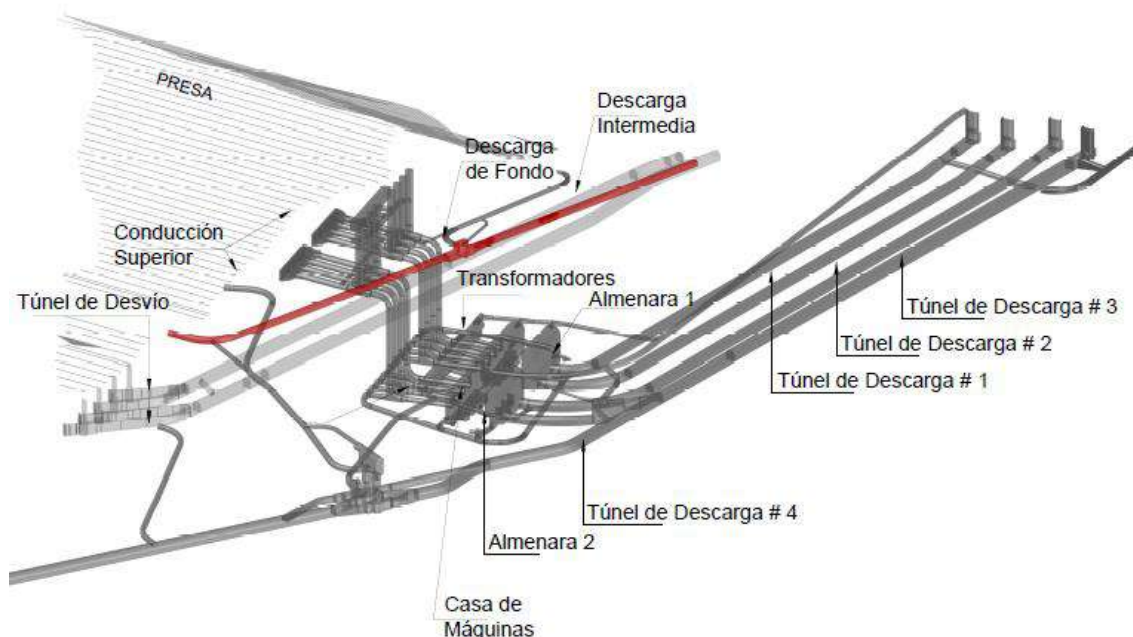


Figura 2-186 Localización general túnel Descarga Intermedia.

Fuente: Integral S.A.

Actualmente no se cuenta con el túnel de la DI dado que, tanto aguas arriba como aguas abajo, el túnel se encuentra intervenido con obras contingentes: para el cierre definitivo de la GAD se encuentra todo el sistema de *By-Pass* donde – aguas abajo de las compuertas de la DI – se descarga el flujo desde las tuberías hasta el canal a flujo libre, que tiene por ancho la mitad de la sección del túnel; para el cierre definitivo del TDD se están ejecutando todas las actividades relacionadas con el pretapón 2. En ese sentido, en este capítulo solo se hablará del túnel teniendo en cuenta su funcionamiento durante la operación del P.H. Ituango.

En operación, el túnel de la DI se usará solo en casos contingentes cuando el nivel del embalse de encuentre por debajo del nivel de operación del vertedero (cota 405 m.s.n.m.) y además no se pueda descargar por la unidades de generación, por un fallo que impida la generación de todas las unidades; en cuya circunstancia será la DI la que debe garantizar un caudal ambiental aguas abajo del proyecto. Debido al estado de las obras al inicio de la contingencia fue requerida la instalación de un tapón en concreto de unos 10 m de longitud, denominado “tapón N°12”, que se ubica unos 40 m aguas abajo del portal de entrada de la DI, y cuya función es proteger el desarrollo de los trabajos que se implementan al interior del túnel. Adicionalmente, como uno de los sucesos generados al inicio de la contingencia, un derrumbe taponó la entrada a la DI, aguas arriba del tapón construido. Durante este tiempo se ha instalado el sistema de compuertas de control, dejando la posibilidad de volverla operativa si se conecta de nuevo con el embalse, así como la ejecución de unos tratamientos complementarios en el túnel con objeto de repotenciarlo y adecuarlo a las condiciones no previstas en las cuales se encuentra debido a la contingencia.

Para efectos de recuperar el túnel de la DI y permitir el paso del flujo por esta, inicialmente se analizó la posibilidad de demoler el tapón indicado (tapón N°12) y reparar el portal y la aducción para retomar la función inicial de conducir y descargar de manera controlada el caudal. No obstante, luego de estudios técnicos y al analizar las posibilidades y riesgos asociados a la rehabilitación del portal de entrada original y demolición del tapón, y acatando las recomendaciones de los asesores de EPM, se decidió abandonar esta posibilidad y orientar los análisis hacia alternativas que permitieran captar al agua desde otras estructuras que conectaran con el corredor de la DI entre el tapón y la zona de compuertas. Es así como se plantea un sistema que contempla la derivación del caudal ecológico hacia la estructura de control del túnel desde las conducciones superiores a presión (ver Figura 2-187).

Tomando como base lo descrito anteriormente, y teniendo como referencia el plan de ejecución del proyecto, el sistema planteado operaría para aquellos casos en condiciones normales de operación en los cuales el embalse se encuentre por debajo de la cota 405 m.s.n.m. y se requiera evacuar un caudal remanente por la DI, frente a la imposibilidad de evacuar este caudal por el sistema de conducciones, garantizando siempre un caudal continuo en el río Cauca aguas abajo del proyecto. El sistema planteado consiste en conectar los codos superiores de los pozos de presión de las conducciones N°3 y N°4 de la central con el túnel de la Descarga Intermedia aguas arriba de la cámara de compuertas; esto se haría mediante un pozo vertical construido por detrás de los codos superiores de los pozos de presión, con una longitud aproximada de 60 m. En su zona inferior, el pozo contempla un codo vertical que se orienta hacia el túnel de la DI y conectando ambas estructuras a través de una galería con pendiente descendente de unos 190 m de longitud aproximadamente. El empalme con las conducciones se hará en la zona de los codos superiores.

Para garantizar la estabilidad del pozo y en general de todo el sistema de conexión durante el paso del agua, todo el ducto de conducción será blindado con lámina metálica, desde su



intersección con los codos superiores de las conducciones N°3 y N°4, incluyendo el tramo final sobre la DI que empalma con el blindaje existente de la zona de compuertas.

Ahora bien, las prioridades del proyecto están enfocadas en rehabilitar las unidades de generación para tener - en el menor tiempo posible - otro sistema de descarga adicional al vertedero en las condiciones actuales. El sistema previsto para garantizar el caudal ecológico requiere de la excavación de nuevas galerías y unos pozos que hoy no existen. Es de precisar que este sistema se ejecutaría en dos fases: en la primera, que se haría antes de poner a operar las unidades N°3 y N°4, se dejarán las provisiones para que en el futuro se pueda hacer la conexión del sistema del caudal ecológico con las conducciones superiores y se excavarán unos 50 m de la galería inferior, antes de presurizar el Túnel de Desviación Derecho (TDD); en la segunda fase se procedería a excavar el resto de galería y el pozo y la instalación del revestimiento metálico a lo largo de esas estructuras.

A la fecha, se tiene diseñado, oficializado y en proceso de implementación, la conexión de los blindajes que derivan el caudal hacia la DI desde las conducciones superiores N°3 y N°4; se tiene instalado el sistema de compuertas de la DI y construido el tramo desde las compuertas hasta los taludes del vertedero, donde la DI descargará al cuenco de disipación del vertedero, faltando por hacer algunos ajustes, una vez se dejen de operar el *By-Pass* de la GAD y del TDD hacia la DI.

Para efectos de obtener los diseños de las dos fases indicadas, se desarrollan análisis hidráulicos y estructurales para establecer el mejor arreglo en términos de dimensiones de las obras, velocidades del flujo y operación de las compuertas. Así las cosas, los diseños definitivos del sistema aún no se tienen y consecuentemente no existe un presupuesto real para estas obras. Vale la pena aclarar que, mientras el nivel del embalse se mantenga por encima de la cota 405 m.s.n.m., se garantiza que el caudal ecológico sea evacuado por el vertedero; por lo que este nivel de embalse podría permanecer por encima de la cresta del vertedero, incluso estando las 8 unidades de generación operando.

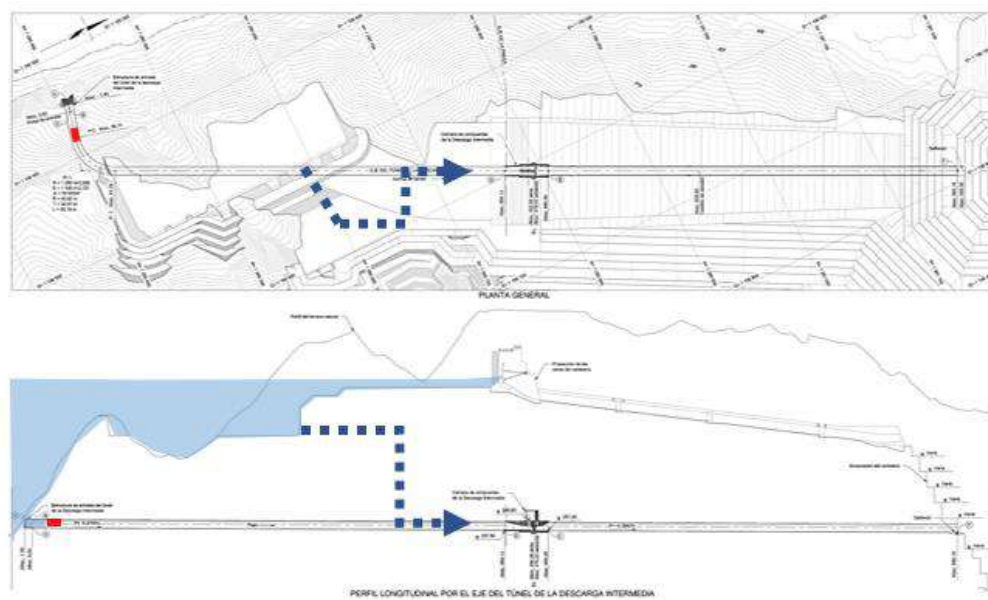


Figura 2-187 Diseño original y bosquejo del Sistema de Caudal Remanente (SQR).  
Fuente: Integral S.A.

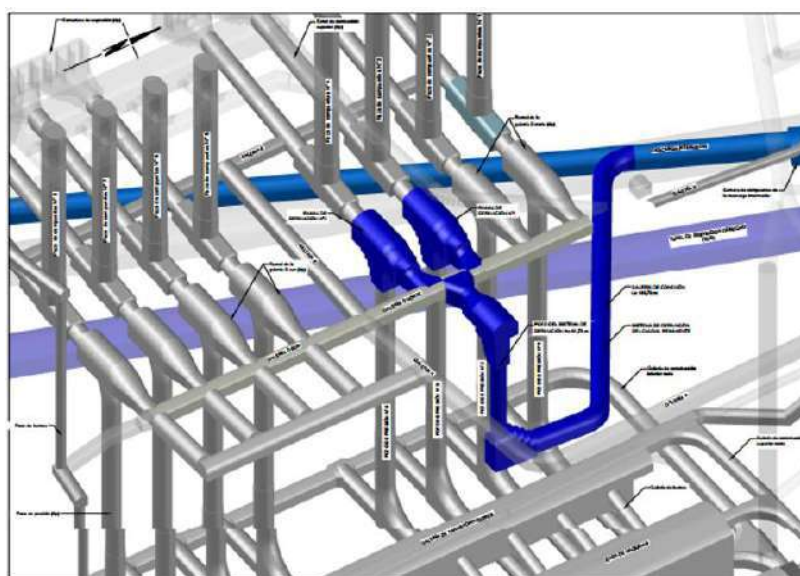


Figura 2-188 Pozo vertical detrás de los codos superiores de los pozos de presión desde las conducciones superiores N°3 y N°4 para garantizar la continuidad del flujo en el río Cauca aguas abajo del proyecto cuando el embalse se encuentre por debajo de la cota 405 m.s.n.m.  
Fuente: Integral S.A.

#### A. Casos de análisis

Según lo mencionado, actualmente no se encuentra en funcionamiento el túnel de la DI, por lo que el caso analizado se presenta durante la operación del proyecto. Durante la operación

normal del proyecto pueden presentarse fallas en los equipos de generación. En caso de presentarse fallas técnicas u operativas de las diferentes estructuras de evacuación de agua del embalse a través del sistema de generación, pudiese generar una sequía en el río aguas abajo del proyecto si no se abre en el momento adecuado la compuerta de la DI, cuando el embalse se encuentre por debajo de la cota 405 m.s.n.m. y no sea posible generar (daño en la central).

Para definir la probabilidad de que el embalse se encuentre por debajo de la cota 405 m.s.n.m. se realizó una operación aislada del embalse, empleando un enfoque probabilístico donde se determina inicialmente una política de operación óptima del embalse empleando Programación Dinámica Estocástica (PDE) y, una vez obtenida, se realiza la simulación a partir de la serie histórica de caudales. Para la obtención de la política de extracciones o caudales turbinados óptimo a partir de la PDE se dividió el volumen útil en 18 estados, las probabilidades (independientes) se obtuvieron a partir de los registros históricos, se consideró un caudal mínimo de aproximadamente 300 m<sup>3</sup>/s y para considerar la capacidad de regulación del embalse, las etapas consideradas corresponden a semanas. Asimismo, para tratar de reflejar la operación comercial, en la función objetivo se multiplicó la generación por el comportamiento adimensional de los precios promedios de bolsa semanales.

Si se impone una restricción tipo curva guía mínima (mitad del volumen útil o cota 406) y, por lo tanto, se penaliza cuando el embalse se baje de este nivel, priorizando la operación en niveles altos (aunque con mayores vertimientos y una menor capacidad de incrementar generación en las semanas de mayor precio), se logra mantener frecuentemente el embalse por encima de la cota mínima establecida; sin embargo, el embalse en una condición de verano, como la presentada en el periodo 2015 – 2016, se seguiría bajando a la cota mínima, manteniéndose en este nivel por aproximadamente 13 semanas; es decir que, con base en los análisis de frecuencia realizados de la operación del embalse, se presentarían niveles por debajo de la cota 405 m.s.n.m. con un período de retorno de 13,33 años, que equivale a una probabilidad de 8% del tiempo.

Ahora, para la evaluación de la amenaza por fallas operativas en las compuertas del túnel de la DI se tiene en cuenta un evento de inoperatividad de las compuertas, ya sea por consecuencia directa del error humano en su operación, fallas eléctricas, entre otros, o por el colapso de la estructura de dicho sistema, se tienen en cuenta los efectos que esto tendría aguas abajo del proyecto. En ese sentido, se evalúa una sequía ocasionada por la inoperatividad de las compuertas cuando el embalse se encuentra por debajo de la cota 405 m.s.n.m.; es decir, no se pueda operar la DI cuando se requiera y por tanto quede el río con escasez de flujo aguas abajo.

Es importante resaltar que, el proceso de instalación de estos equipos contempló, desde las etapas de diseño, todos los criterios necesarios de seguridad de la normatividad aplicable, y además se cuenta con el CMT (Centro de Monitoreo Técnico) que sigue de forma permanente el estado general de estas estructuras; sin embargo, no se puede descartar la probabilidad de ocurrencia de estos eventos.

Para la evaluación de este escenario se tiene en cuenta el modelo realizado para caudales mínimos durante contingencia, en el cual se realizó el análisis hidráulico a lo largo del río Cauca en que se cierran las compuertas de la Casa de Máquinas (conducciones N°1 y N°2) para dar continuidad a la descarga del flujo por el vertedero y poder iniciar todas las actividades relacionadas con la recuperación del proyecto. A continuación, se presenta – a grandes rasgos – la información utilizada para la modelación hidráulica realizada en el documento; no obstante, en el documento *VEC-A05\_I-009007-AC-PHI-AH-CCACM-R0* (ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A10) con el análisis hidráulico a lo largo del río Cauca para la fase de cierre de compuertas de la casa de máquinas del P. H. Ituango, se encuentra toda información de manera detallada.

Para el análisis, se tuvo en cuenta el caudal remanente ante el cierre de las dos compuertas de casa de máquinas en una cota inferior a la del vertedero, que simularía las condiciones de disminución del flujo durante una inoperatividad de las compuertas de la DI y la central.

#### B. Probabilidad de falla en las compuertas del túnel de la DI

Para que se materialice la amenaza de que por el proyecto no se realice evacuación de agua aguas abajo (que el río se quede seco desde el proyecto) se deben cumplir tres condiciones particularmente: (1) que el nivel del embalse se encuentre por debajo de la cota de operación del vertedero (405 m.s.n.m.), siendo esta situación consistente en condición de un verano fuerte; (2) que todas las unidades de generación se encuentren en condiciones de inoperatividad; y (3) que, bajo las dos condiciones anteriores, no se puedan operar adecuadamente las compuertas de la DI, teniendo en cuenta que la operatividad del túnel se tendría para estas situaciones excepcionales.

Para que esta última condición se presente, a continuación, se analizan las probabilidades o posibilidades de falla de las compuertas de la DI con el propósito de identificar, a su vez, eventos o consecuencias de estas sobre el proyecto o en zonas aguas abajo de la presa.

Para el análisis de estos temas se ha considerado conveniente clasificar las posibles fallas de la siguiente manera:

- Fallas de tipo estructural.
- Fallas de tipo operacional.
- Fallas por condiciones excepcionales.
- Fallas por suministro de energía eléctrica

#### 1) Descripción de los tipos de falla

##### a) Fallas de tipo estructural

Este tipo de falla en las compuertas, en general, se refieren a eventuales fallas que pudieran presentarse en sus componentes estructurales, tales como el cuerpo mismo de la compuerta principal u órgano de cierre en sus vigas principales o en su membrana, o en sus brazos de soporte como en el caso de las compuertas radiales; o en sus muñones, o en sus vástagos de

operación, o en sus mecanismos de rodadura como en el caso de las compuertas de ruedas por bloqueo o desprendimiento. Algunas de estas fallas de tipo estructural, en caso de presentarse, podrían causar desastres significativos ya sea por la imposibilidad de operar la compuerta o por la rotura o desprendimiento de partes importantes que lleven a un colapso de la estructura misma.

En el caso de las compuertas deslizantes de la descarga intermedia (ver Figura 2-189), una falla de tipo estructural podría ser la falla del cuerpo mismo de la compuerta u obturador o la rotura o el desprendimiento del vástago de accionamiento (de muy bajas probabilidades) o el atascamiento de la compuerta con consecuencias difíciles de precisar, según la magnitud del daño mismo.

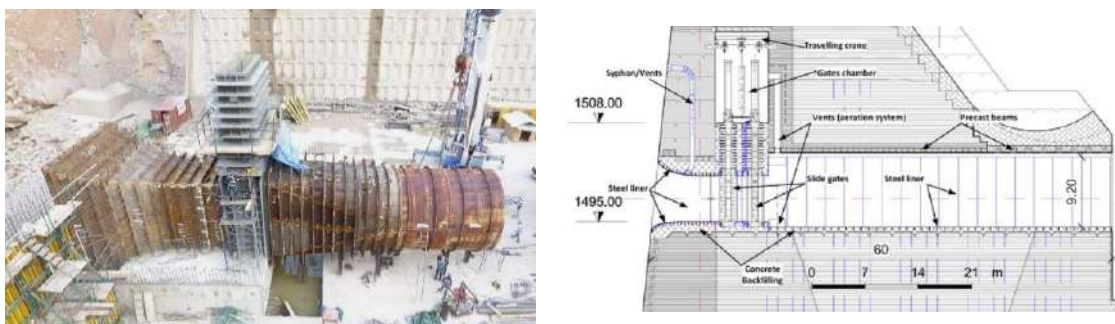


Figura 2-189 Configuración general de una estructura con compuertas de fondo deslizantes.  
Fuente: Integral S.A.

Dados los requerimientos de diseño y de fabricación de estas compuertas, así como de las condiciones de operación previstas, se considera que la probabilidad de falla de tipo estructural en este tipo de compuertas es *muy baja*, teniendo en cuenta que los diseños utilizados por los fabricantes han sido ya probados con base a experiencias previas adquiridas durante muchos años. No obstante, algunas de estas fallas deben prevenirse o evitarse ya que las consecuencias podrían ser catastróficas.

#### b) Fallas de tipo operacional

Una falla de tipo operacional se refiere, en general, a una falla de algunos de los sistemas de operación y control de las compuertas tales como una falla en los servomotores de accionamiento, o una falla en las unidades de aceite a presión o en alguno de sus componentes como las bombas, motores o válvulas de control, o una falla en las tuberías de suministro y/o retorno de aceite a presión, o una falla en los tableros o sistemas eléctricos o de instrumentación y control (ver Figura 2-205). Se asume que no hay roturas o daños graves de elementos (aunque podrían presentarse eventualmente por causas externas) y que se puede disponer normalmente de partes de repuesto suficientes para atender cualquier necesidad.

Este tipo de falla puede ser de mayor probabilidad de ocurrencia (*media baja*) que una falla de tipo estructural, aunque la mayoría de estas fallas pueden resolverse mediante la acción o



reacción oportuna del personal de operación y mantenimiento, y no necesariamente son la causa de un desastre, a menos que no se actúe oportunamente (por descuido) o que la falla perdure por mucho tiempo. En muchos casos, es posible recurrir a diferentes opciones de acción que permitan controlar la situación, las cuales deben identificarse con anticipación, y deben estar previstas en los respectivos manuales de operación y mantenimiento.

c) Fallas del suministro de energía eléctrica

Desde el punto de vista de la disponibilidad permanente de alimentación eléctrica y de los sistemas de operación y control de las compuertas del vertedero y de la descarga intermedia, el proyecto cuenta con un sistema robusto, además de redundante, que hace que la probabilidad de que las compuertas no puedan ser accionadas por fallas en estos sistemas son muy bajas. A continuación, se describen en detalle los sistemas y principales y sus correspondientes previsiones de redundancia.

Los equipos de los sistemas eléctricos del vertedero, la captación y la descarga intermedia son alimentados desde el sistema eléctrico de los servicios auxiliares de la central el cual está conectado a varias fuentes de energía así: un alimentador principal a través de un transformador de 10 MVA que se conecta a la subestación de 500 kV que hace parte del SIN y al cual se conectan las unidades generadoras del proyecto, un alimentador de respaldo conectado a la subestación de construcción del sistema de distribución de EPM y un alimentador de emergencia alimentado desde dos plantas de Diesel, en caso de falla del alimentador principal, mediante un sistema de transferencias automático, los equipos de los servicios auxiliares serán conectados al circuito de respaldo y en caso de falla de este al circuito de emergencia con las plantas Diesel, hasta que se restablezcan las condiciones normales del alimentador fallado.

La subestación de servicios auxiliares para el vertedero del proyecto hidroeléctrico Ituango, desde la cual se alimentan los equipos electromecánicos de las compuertas del vertedero, de la captación y los equipos de los sistemas eléctricos complementarios de la zona, tiene un alimentador principal conectado a un circuito aéreo a 13,2 kV, proveniente de los tableros de distribución de los servicios auxiliares de la central, que se conecta a un transformador de 160 kVA, 13,2 kV-480/277 V, el secundario del transformador se conecta al tablero de distribución de baja tensión a través de un interruptor con una transferencia automática. Como fuente de respaldo el tablero de distribución tiene otro alimentador independiente, derivado de una planta Diesel la cual se conecta al tablero por medio de un interruptor del tipo de caja moldeada y la transferencia automática, este alimentador se considera como alimentador de emergencia. En caso de falla del alimentador principal la transferencia automática realizará el arranque y conexión de la planta Diesel al barraje del tablero de distribución para garantizar la continuidad del servicio hasta que se restablezcan las condiciones normales de operación del alimentador principal. Para el sistema de control de los equipos electromecánicos, eléctricos y de comunicaciones instalados en las casetas del vertedero se tiene un sistema de corriente continua conformado por dos cargadores y un banco de baterías a 125 Vcc.

Los equipos electromecánicos de las compuertas de la captación son alimentados desde el tablero de distribución a 480 Vca del vertedero, de donde se derivan los alimentadores para conectar los tableros de distribución para la conexión de los equipos electromecánicos de las compuertas, un tablero de distribución por cada dos unidades oleohidráulicas de accionamiento de las compuertas. En este caso se tiene el mismo respaldo de energía que proporciona el tablero de distribución eléctrica del vertedero. Para el sistema de control de los equipos electromecánicos, eléctricos y de comunicaciones instalados en la galería de compuertas de la captación se tiene un sistema de corriente continua conformado por dos cargadores y un banco de baterías a 125 Vcc.

La subestación de servicios auxiliares para la zona de la descarga intermedia del proyecto hidroeléctrico Ituango, desde la cual se alimentan los equipos electromecánicos de las compuertas de la descarga intermedia y los equipos de los sistemas eléctricos complementarios de la zona, tiene un alimentador principal conectado a un circuito aéreo a 13,2 kV, proveniente de los tableros de distribución de los servicios auxiliares de la central, que se conecta a un transformador de 112,5 kVA, 13,2 kV-480/277 V, el secundario del transformador se conecta al tablero de distribución de baja tensión a través de un interruptor con una transferencia automática. Como fuente de respaldo el tablero de distribución tiene otro alimentador independiente, derivado de una planta Diesel la cual se conecta al tablero por medio de un interruptor del tipo de caja moldeada y la transferencia automática, este alimentador se considera como alimentador de emergencia. En caso de falla del alimentador principal la transferencia automática realizará el arranque y conexión de la planta Diesel al barraje del tablero de distribución para garantizar la continuidad del servicio hasta que se restablezcan las condiciones normales de operación del alimentador principal. Para el sistema de control de los equipos electromecánicos, eléctricos y de comunicaciones instalados en la caseta de la descarga intermedia se tiene un sistema de corriente continua conformado por dos cargadores y un banco de baterías a 48 Vcc.

### **Supervisión de los equipos eléctricos y mecánicos de la captación y la Descarga Intermedia**

Desde el sistema de control de la central se tiene prevista la integración de todos los equipos que conforman el proyecto, para lo cual se tienen equipos distribuidos por cada frente de obra interconectados por medio de conexiones redundantes en fibra óptica para mejorar su confiabilidad. Como parte del sistema de control se tiene una sala de control dentro de la casa de máquinas donde hay dos estaciones de operación con operadores disponibles continuamente durante el funcionamiento de la central.

En el sistema de control se supervisan todos los parámetros de operación de los equipos eléctricos y mecánicos de la central entre los cuales están los instalados en el vertedero, la captación y la descarga de fondo, igualmente se realizará el control de la operación de las compuertas. En el sistema de control se tendrán las alarmas correspondientes a las fallas que se puedan presentar en la operación de los equipos mecánicos y eléctricos y la posición de las compuertas, de forma tal que el operador de la central pueda activar los procesos previstos para la atención de las fallas en estos equipos

d) Fallas en las compuertas de la Descarga Intermedia

En el caso de las compuertas de la Descarga Intermedia, las condiciones de operación son muy diferentes como, también, las consecuencias serían igualmente muy diferentes a las de Vertedero, ya que los caudales son mucho menores y esta estructura puede ser considerada como un sistema más complejo.

Según los diseños que se adelantan actualmente, la descarga del caudal remanente o caudal ecológico no se tomará directamente del embalse como se había proyectado originalmente, sino que se tomará a través de sendas derivaciones de las conducciones 3 y 4, y se llevará a través de un pozo vertical de 5,4 metros de diámetro y unos túneles auxiliares que se conectarán con el túnel de la descarga intermedia, en una zona aguas abajo del tapón de cierre que fue construido para cancelar la toma original.

La capacidad máxima de este túnel será de 450 m<sup>3</sup>/s, mucho menor que la capacidad máxima del vertedero (y menor que el caudal promedio del río); por lo cual, los efectos de esta descarga aguas abajo de la central (en cuanto a aumentos súbitos de caudal) serán mínimos en comparación con los efectos que puede producir la descarga de una creciente a través del vertedero. Además, se ha previsto que la Descarga Intermedia sólo podría operar cuando el nivel del embalse se encuentre por debajo del nivel del azud del vertedero y en caso de que varias turbinas se encuentren fuera de servicio y sea necesario permitir el paso del caudal ecológico. En cualquier caso, el caudal descargado por este túnel sería menor que el caudal de tres turbinas cuando operan a plena capacidad.

Por otra parte, en caso de falla de las compuertas radiales, esta estructura cuenta con compuertas de respaldo del tipo deslizante, con capacidad de cierre con flujo en caso de emergencia. Adicionalmente, en caso necesario, las compuertas de la aducción de las conducciones 3 y 4 podrían cerrarse, con lo cual se cancelaría totalmente el paso del agua a través de la descarga intermedia, si fuese necesario.

e) Fallas en las compuertas de ruedas de la aducción

Cada una de las conducciones de las unidades está provista con una compuerta principal de ruedas, con capacidad de cierre con flujo y una compuerta de guarda o auxiliar prevista para operaciones de inspección y mantenimiento de la compuerta principal.

Las compuertas en las conducciones 1 y 2 permanecieron abiertas durante todo el tiempo que el agua estuvo pasando por la casa de máquinas después de la contingencia para evitar que el embalse se llenara y pudiera producirse el paso del agua por el vertedero o la presa antes de que se terminaran los trabajos.

Después de la terminación de las obras de la presa y el vertedero, estas compuertas pudieron cerrarse con máximo flujo, incluso con un flujo mayor que el previsto para las condiciones de diseño, y su desempeño fue completamente satisfactorio. Esta decisión de cierre se tomó con mucha prudencia después de que se hubieran hecho estudios y simulaciones complementarias que permitieron comprobar que la operación podía efectuarse sin mayores riesgos.

Con base en estos resultados, se considera que las compuertas de la aducción son elementos de protección que ofrecen una gran seguridad y confiabilidad. No se espera que problemas en la operación de estas compuertas puedan producir efectos en las zonas aguas abajo del proyecto.

## 2) Acciones preventivas para evitar fallas de las compuertas

### a) Montaje y puesta en servicio

Deberían revisarse los protocolos (o informes) de montaje y de puesta en servicio de estos equipos para verificar si todas las actividades relacionadas se terminaron completamente y si, eventualmente, algunas de estas actividades quedaron pendientes para ejecución posterior y si tales actividades fueron concluidas finalmente o aún siguen pendientes.

### b) Inspección y mantenimiento de los equipos

Otro de los factores que más pueden incidir en el correcto funcionamiento de los equipos y componentes asociados es la ejecución oportuna de las diferentes actividades de inspección y mantenimiento de estos. Por lo tanto, se recomienda hacer una verificación del cumplimiento de estas tareas.

Dentro de estas tareas, se recomienda hacer verificaciones de los sistemas eléctricos y de instrumentación y control (suministro normal de energía y fuentes de respaldo) como, también, la verificación operacional de las unidades de aceite a presión, motores y bombas, niveles y presiones de aceite, cambios de aceite, estado de las tuberías de aceite (detectar eventuales fugas de aceite), vibraciones, entre otros. Téngase en cuenta que mediante estas actividades es posible identificar oportunamente algunas fallas operativas que pudieran presentarse.

### c) Operación de los equipos

Verificar el estado de operación de los equipos y componentes asociados, como actividades complementarias a las de inspección y mantenimiento. Esta verificación periódica comprende la observación cuidadosa de su correcto funcionamiento.

### d) Factores claves

Los componentes de las compuertas y equipos asociados podrían clasificarse de la siguiente manera:

- Parte estructural y sistemas de anclaje o fijación, o sistemas de pivote para rotación como los muñones.
- Unidades de aceite a presión para accionamiento de las compuertas.
- Sistemas de sello y estanqueidad

- Equipos eléctricos, de instrumentación y control (incluidos los sistemas de suministro de energía).

Cada uno de estos componentes pueden ser revisados periódicamente de diversas formas, de acuerdo con sus características particulares y según las recomendaciones de los manuales de operación y mantenimiento. Dentro de las estructuras, por ejemplo, puede verificarse el estado de las uniones pernadas y soldadas, el estado de los recubrimientos de pintura para evitar problemas de corrosión, entre otros. También se pueden verificar los niveles de vibración en algunos puntos y los pivotes o muñones.

### C. Análisis de resultados

#### 1) A partir del análisis de la información secundaria disponible

Al evaluar las condiciones hidráulicas para los casos considerados para el cierre de casa de máquinas, con el cierre de dos compuertas, sin alcanzar la cota del vertedero, y que sería una situación que se repetiría en el caso contingente que la Descarga Intermedia no opere para el momento en que se requiera, se pudo estimar que las condiciones extremas, en las que los valores exhibidos por el río Cauca son superiores a las de un evento mínimo correspondiente a un periodo de retorno de 50 años (ver Figura 2-190).

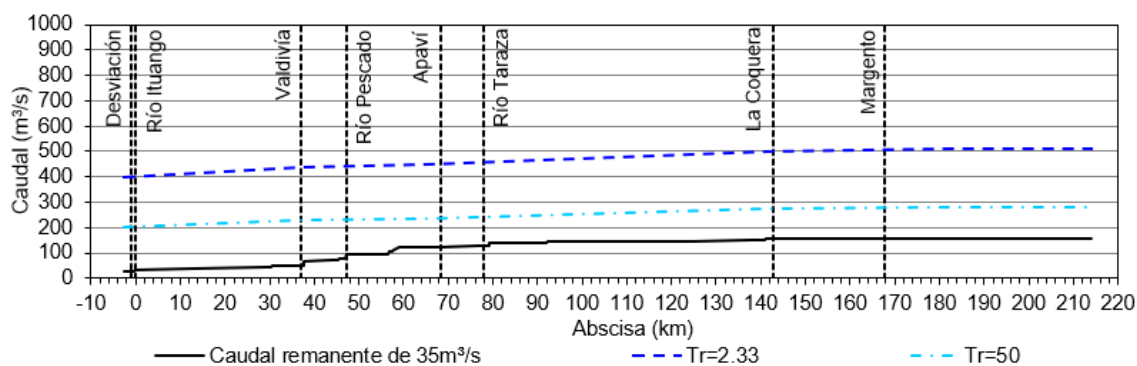


Figura 2-190 Resultados de la caracterización hidráulica, perfiles de la variación de los caudales en la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2019.

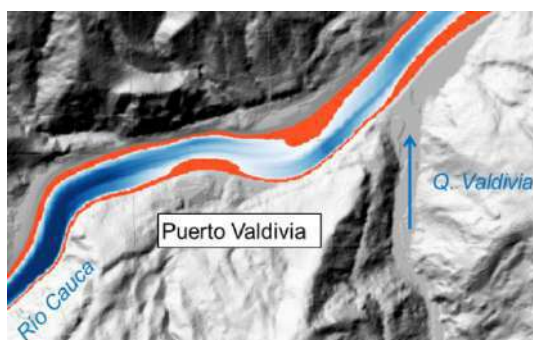
De esta forma, se pudo observar que el tramo 1 sería el más afectado, mientras que para el tramo 2 se identifica el inicio de un proceso de recuperación hídrica, el cual se debe a la “recarga” realizada por los principales tributarios del Cauca en el tramo de estudio.

Al analizar las magnitudes de flujo se pudo concluir que, para algunos tramos, los valores obtenidos son inferiores a los esperados para una época de estiaje extrema (evento mínimo con un periodo de retorno de 50 años), por lo que se puede inferir que el río Cauca se verá restringido a fluir por su cauce principal, lo que ocasionaría que la mayoría de sus brazos desaparecerán (temporalmente) y que, visualmente, el mayor impacto se encontrará en el

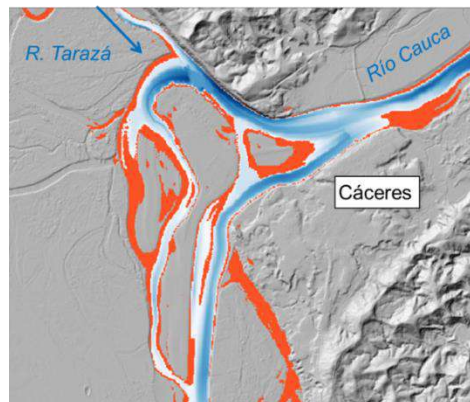


tramo 9 (zona donde el río posee un comportamiento trezado – múltiples cauces y madres viejas –).

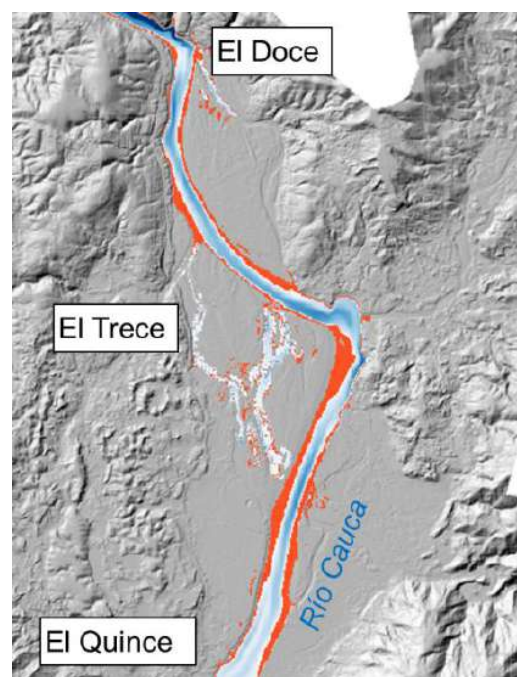
A continuación, se presentan los resultados obtenidos del modelo bidimensional, en cuanto al perfil de lámina de agua de los escenarios: (1) caudal de 450 m<sup>3</sup>/s y (2) caudal de 35 m<sup>3</sup>/s, siendo este último el de interés para las afectaciones ocasionadas por una posible sequía desde el proyecto. En la Figura 2-191 del literal (a) al (f), se presenta de forma esquemática el espejo de agua dentro del río Cauca para ambos escenarios, en color naranja la mancha el primer escenario y de escala de azules el segundo escenario, para los sitios: Puerto Valdivia, el tramo entre El Quince -Doce, Cáceres, Puerto Antioquia, Caucasia y el tramo Nuevo Mundo (Margento -Nechí), respectivamente.



(a)



(c)



(b)

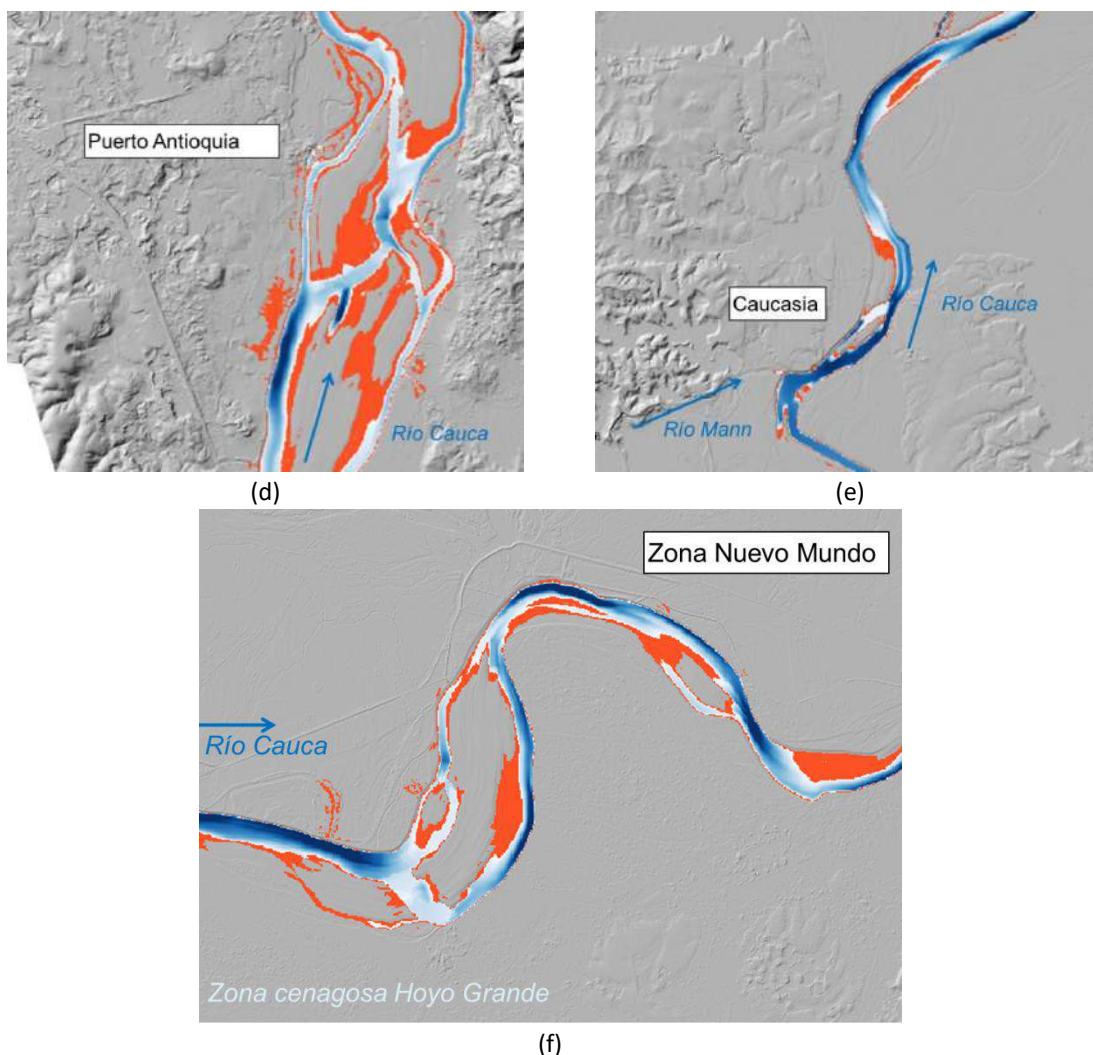


Figura 2-191 Comparativo de espejos de agua entre un caudal de  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  (naranja) y el caudal de  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  (escala azul) para los sitios: Puerto Valdivia, El Quince -Doce, Cáceres, Puerto Antioquia, Caucasia y Nuevo Mundo (Hacia Nechí)

Fuente Integral S.A. 2019.

De las anteriores figuras se apreció una variación espacial, de profundidades, del ancho hidráulico de la sección del Río Cauca, reduciendo de esta manera el perímetro y área mojada de la misma y el consecuente incremento del área de las islas y barras existentes del río, tal y como se detalló en el análisis del modelo unidimensional.

Con el objetivo de evaluar algunos de los impactos adicionales que podría ocasionar una sequía del P.H. Ituango, se procedió a verificar si, producto de dicho evento (inoperatividad de las compuertas del túnel de la DI en el momento requerido), podrían generarse desconexiones de los sistemas río – ciénagas presentes en el área de influencia. En total fueron caracterizadas un total de *12 complejos cenagosos*, correspondiendo a 29 ciénagas. A continuación, en la Figura 2-192 se presentan los cuerpos de agua caracterizados para la zona de estudio.

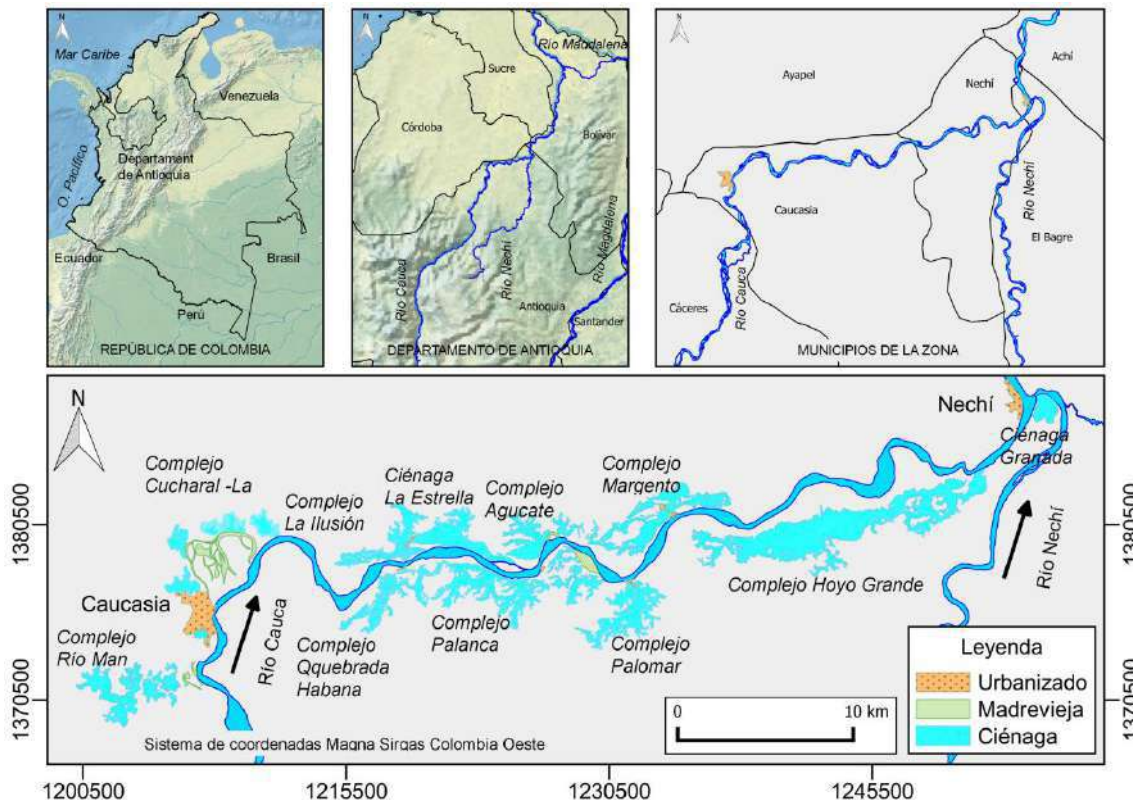


Figura 2-192 Principales ciénagas caracterizadas para la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A. 2.016.

Para esto se recurrió a la información recopilada en los anteriores estudios orientados al cambio del caudal remanente de llenado del embalse y su efecto sobre los complejos cenagosos. De esta forma fue retomada la caracterización de ciénagas en la que fueron estimadas las cotas y los caudales para los cuales cada uno de los complejos se conecta y desconecta del río Cauca.

Con esta información, y haciendo uso de los perfiles de flujo simulados para cada uno de los escenarios y casos de estudio, se pudo evaluar cuáles cuerpos y sistemas lénticos se verían afectados.

Para la condición de que no se realizan descargas hacia aguas abajo, se puede llegar a producir la desconexión de todos los complejos. Este evento corresponde a un hecho que, basados en las tasas de llenado del embalse, podría llegar a tener una duración aproximada de una semana (hasta que el nivel del agua alcance el vertedero), considerando una condición de estiaje en que el embalse se encuentre en la cota 390 m.s.n.m. (nivel mínimo de operación del embalse). Por lo anterior, se afirma que el impacto que podrían tener las ciénagas ubicadas en la zona de influencia del proyecto es de carácter temporal y transitorio. No obstante, basados en los



resultados y lo anteriormente expuesto. se presume que habrá desconexiones de los sistemas río – ciénaga, razón por la que existirán impactos sobre los ecosistemas allí presentes.

Con base en las simulaciones realizadas, se debe resaltar que el río Cauca en el tramo comprendido entre las confluencias del río Ituango y el río Nechí, posee la capacidad de recuperar parcialmente sus características hidráulicas; dado que los tributarios en la zona de estudio poseen las condiciones como para recargar el sistema hídrico principal. Ante esta eventualidad planteada, se pudo inferir que el río Cauca no permanecería seco por completo. Sin embargo, sí corresponderá a una situación similar a la que se pudo presentar entre el 5 y 8 de febrero del 2.019 cuando se cerraron las compuertas de captación para eliminar el paso de agua por la Casa de Máquinas y realizar la descarga por la estructura del Vertedero.

Adicionalmente, se observó que las características del río garantizarían profundidades de flujo superiores a 1 m para la gran mayoría del tramo de análisis, lo que permite concluir que, ante estas condiciones, se podría navegar sobre el río Cauca en los tramos en los que históricamente se ha podido realizar esta práctica. Así mismo, lo demás parámetros hidráulicos dan evidencia que el río Cauca se verá restringido a fluir por su cauce principal, por lo que se prevé que la mayoría de sus brazos desaparecerán (temporalmente) y que, visualmente, el mayor impacto será apreciado en el tramo 9 (final del área de influencia del proyecto).

La condición analizada con descarga nula de agua desde el proyecto y considerando solo los aportes de los tributarios aguas abajo del proyecto, se contrastó con caudales mínimos del río Cauca con Tr de 2,33 años y Tr de 50 años; por lo que, adicionalmente, se llevó a cabo la estimación de las métricas hidráulicas del IIH, partiendo de las condiciones medias de las variables hidráulicas asociadas a cada tramo.

Según lo analizado, las calificaciones obtenidas bajo la metodología original *no van de la mano con lo esperado*. Esta idea se basa en que, bajo un criterio estrictamente hidráulico, se está presentando que las calificaciones asociadas a los menores caudales presentan *mejoras* en el IIH, mientras que las calificaciones para los mayores caudales no se ven igualmente favorecidas. Incluso, se están presentando disminuciones en la calificación del IIH asociadas a los caudales remanentes más altos (tramo 9). Toda la información detallada, asociada con este análisis, se encuentra en el el documento *VEC-A05\_I-009007-AC-PHI-AH-CCACM-R0* (ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A10). Lo esperado es que las calificaciones favorezcan los caudales remanentes altos; sin embargo, se estaría favoreciendo una mayor variabilidad. Esto se tradujo en que, *caudales remanentes más bajos, y por ende más diferentes a los caudales naturales, presentan mejores calificaciones*.

En ese sentido, se planteó entonces una metodología alternativa en la que se establecieron rangos de variabilidad para los valores obtenidos en cada métrica hidráulica, y a partir de estos rangos se establecieron las puntuaciones y posteriores calificaciones del IIH, tanto para la condición sin proyecto como para la condición de estudio.

A continuación, la Tabla 2-58 da cuenta de las calificaciones para los puntajes obtenidos en las condiciones sin proyecto (como consecuencia de las sequías naturales del río Cauca) y de estudio, utilizando la metodología alternativa mencionada.

Tabla 2-58 Calificaciones para los puntajes obtenidos en las condiciones sin proyecto y de inoperatividad de las compuertas de la DI – Metodología alternativa.

Calificaciones para condición sin proyecto	Tramos 1, 3, 6, 7, 8 y 9 con predominio de puntuaciones asociadas a una baja integridad de hábitat.
	Tramo 4 con predominio de puntuaciones correspondientes a una pobre integridad del hábitat.
	Tramos 2 y 5 con calificaciones distribuidas entre baja y pobre integridad del hábitat.
Calificaciones para condición de cierre de compuertas	Tramos 1, 6, 7 y 8 con totalidad de puntuaciones relacionadas a una baja integridad de hábitat.
	Tramos 2 y 4 con predominio de puntuaciones relacionadas a una pobre integridad de hábitat.
	Tramos 3, 5 y 9 con predominio de puntuaciones asociadas a una baja integridad de hábitat.

Fuente: Integral S.A., 2.018.

Con la metodología alternativa, las calificaciones obtenidas para todas las puntuaciones fluctuaron entre baja y de pobre integridad de hábitat.

A continuación, la Tabla 2-59 da cuenta de las diferencias entre las calificaciones obtenidas con la condición de análisis respecto a la condición sin proyecto utilizando la metodología alternativa propuesta.

Tabla 2-59 Diferencia entre las calificaciones obtenidas con la condición de cierre de compuertas respecto a la condición sin proyecto – Metodología alternativa.

Tramo	Cambio de Calificación
1	No se presentaron modificaciones en las calificaciones.
2	IIH empeora para los caudales bajos asociados al periodo neutro. Calificaciones para caudales correspondientes al periodo cálido del ENSO no cambian con la condición de análisis.
3	Mejora calificación asociada a caudal de 450 m <sup>3</sup> /s para periodo cálido del ENSO y disminuye la calificación para caudal de 35 m <sup>3</sup> /s en periodo neutro.
4	Disminuye el IIH para caudales de 450 m <sup>3</sup> /s durante periodo cálido del ENSO. Para el periodo neutro, caudal de 450 m <sup>3</sup> /s mejora su calificación. Demás puntuaciones del IIH no se modifican con el caso analizado.
5	Mejoran calificaciones del IIH para caudales de 450 m <sup>3</sup> /s en periodo cálido del ENSO. Demás calificaciones permanecen iguales.
6	No se presentaron modificaciones en las calificaciones.
7	No se presentaron modificaciones en las calificaciones.
8	No se presentaron modificaciones en las calificaciones.
9	No se presentaron modificaciones en las calificaciones.

Fuente: Integral S.A., 2.018.

Con el anterior planteamiento, las calificaciones asociadas a caudales remanentes bajos se vieron desfavorecidas con la condición de estudio, y los primeros tramos fueron los que presentaron la mayor cantidad de puntuaciones que disminuyeron. Sin embargo, el tramo 1 no presentó ninguna alteración con los caudales seleccionados.



En la metodología original, la variación negativa en la calificación se presentaba en el último tramo. Bajo este planteamiento, las principales afectaciones se presentan más cerca del sitio del proyecto, lo cual parece tener más sentido; pues se espera que, a medida que se avanza hacia aguas abajo del embalse, el río Cauca logre recuperar sus condiciones naturales y atenuar la afectación generada por la presencia del proyecto.

2) Para el caso concreto en que la DI no opere cuando sea requerida

Donde se presente una falla en la operación de la Descarga Intermedia en el momento en que esta sea requerida (situación que se da si el nivel del embalse está debajo de la cota 405 m.s.n.m. y todas las unidades de generación dejen de operar), se presentará una reducción súbita del caudal del río Cauca aguas abajo del proyecto, donde el único flujo que quedaría, serían los aportes de los afluentes que, de una u otra medida, favorecerían a la recuperación de las condiciones hidráulicas del río Cauca, en una situación similar a la que se presentó entre el 5 y el 8 de febrero del año 2.019 a raíz del cierre de las compuertas de captación que interrumpió el paso del agua por la Casa de Máquinas y el río permaneció con caudales reducidos mientras el embalse alcanzaba la cresta del vertedero y empezaba su vertimiento.

En la situación más crítica, considerando que el evento contingente en la operación de las 8 unidades de generación se diera cuando el embalse se encuentre en su nivel mínimo de operación (cota 390 m.s.n.m.) y que el río apenas tenga un caudal de condiciones de estiaje (del orden de 500 m<sup>3</sup>/s), el tiempo que tardaría el embalse en alcanzar la cresta del vertedero sería del orden de una semana. Ahora bien, lo más seguro es que antes de ese tiempo el evento contingente se hubiera superado y por tanto esta situación se supere en un menor tiempo.

Evidentemente, los impactos que se generan por falta de flujo descargado desde el proyecto son más notorios en las zonas más cercanas al proyecto y se van diluyendo un poco hacia aguas abajo con los aportes de los afluentes, según los análisis del índice de integridad del hábitat presentados anteriormente, en que se presenta esta situación crítica y se tendrían consecuencias similares a las presentadas en febrero del 2.019, con el cierre de las conducciones de Casa de Máquinas.

Ahora bien, las probabilidades de que esta situación se presente y se deje el cauce seco por no operar la DI son muy remotas, pues esta situación como tal necesita de tres situaciones, según lo ya mencionado. La primera consiste en que el embalse se encuentre por debajo de la cota de operación del vertedero (405 m.s.n.m.), cuya probabilidad de ocurrencia de tan solo 2,5 % del tiempo o con un período de retoro de unos 40 años (teniendo en cuenta una operación aislada del embalse, empleando un enfoque probabilístico donde se determina inicialmente una política de operación óptima del embalse empleando Programación Dinámica Estocástica); la segunda situación es que ninguna de las unidades de generación puedan descargar agua, lo que se considera un evento de tipo contingente (y de muy baja probabilidad de ocurrencia); y la tercera situación consiste en que, dada las dos condiciones anteriores, las compuertas o el sistema de la DI no opere, lo que sería otra situación de tipo contingente. En conclusión, deben

coincidir dos eventos contingentes de manera simultánea con una situación de baja probabilidad (nivel mínimo de operación del embalse), lo que hace que este riesgo de tipo operativo sea demasiado bajo.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito y los análisis realizados del IIH para caudales alrededor de 30 m<sup>3</sup>/s descargados desde el proyecto, a continuación, se presenta el mapa de amenaza aguas abajo del proyecto (ver Figura 2-193 y mapa anexo M-PHI-111-TRA-DI-P-010), teniendo en cuenta el IIH en los tramos del río Cauca analizados y la categorización definida en la Tabla 2-58 con base en los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 2-59.

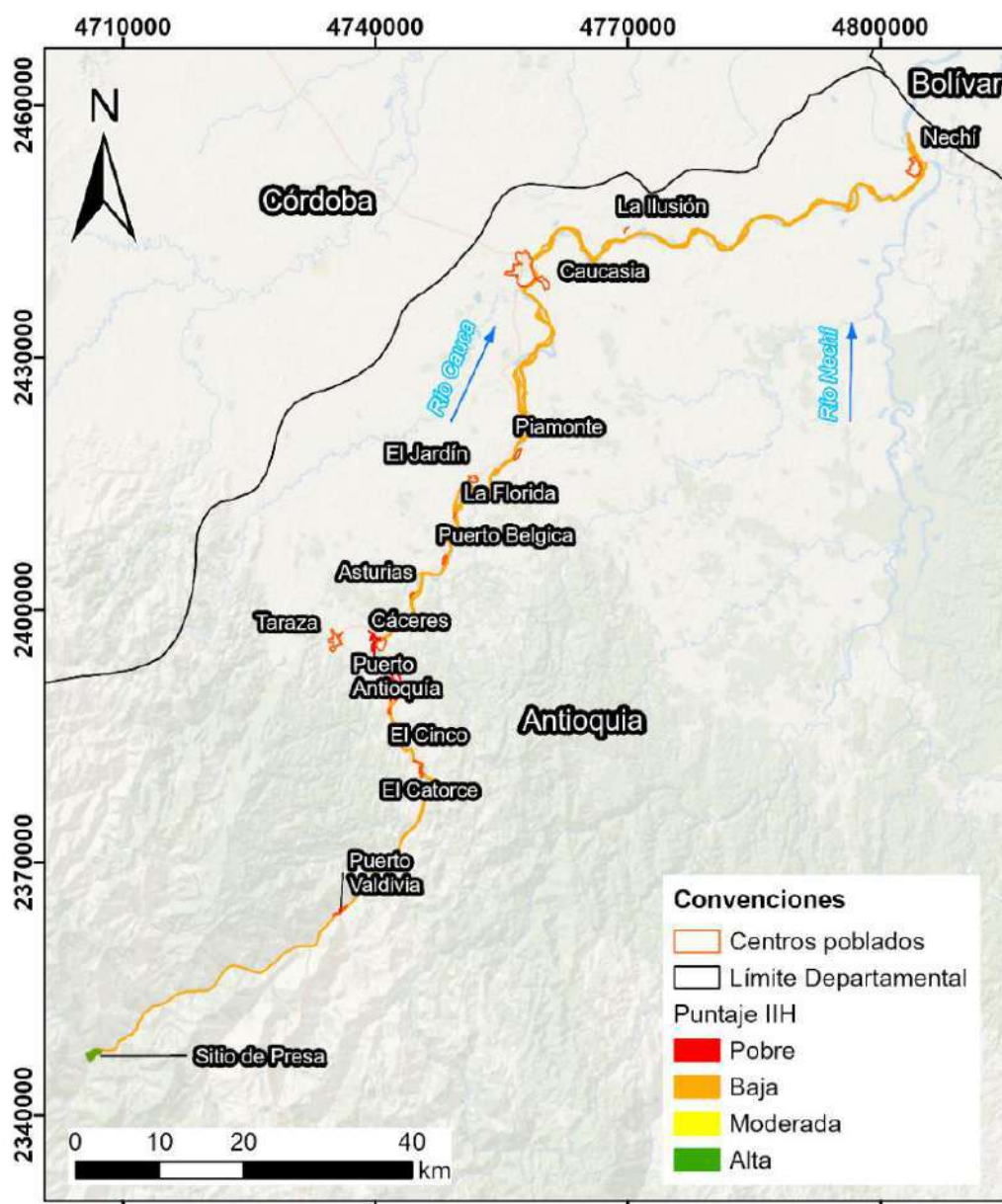


Figura 2-193 Calificaciones para los puntajes obtenidos en las condiciones de inoperatividad de las compuertas de la DI (caudal de 35 m<sup>3</sup>/s) – Metodología alternativa.

Fuente: Integral, S.A., 2.022

#### 2.2.4.9.2 Destaponamiento del TDD y la GAD

Una amenaza en consideración que puede afectar las comunidades aguas abajo es un descenso rápido del nivel del embalse a causa de un destaponamiento, ya sea del Túnel de Desviación Derecho (TDD) o la Galería Auxiliar de Desviación (GAD). La materialización de esta amenaza está relacionada con la falla de los tapones naturales que bloquean el paso del embalse por ambos túneles. Es importante resaltar que esta amenaza se considera durante la situación actual del proyecto, dado que cuando este entre en operación ambos túneles se encontrarían con sus tapones definitivos lo cual removería la materialización de esta amenaza.

Actualmente, el destaponamiento súbito de estas estructuras se puede presentar por el aumento de la cabeza de columna de agua, lo cual aumenta la presión que deban soportar las mismas. Esto comprometería los ecosistemas, la infraestructura social, comunitaria y civil y las comunidades localizados aguas abajo de la presa.

#### Túnel de Desviación Derecho

Con el inicio de la emergencia registrada desde el 28 de abril del 2018 en el P.H. Ituango, se presentó un proceso de inestabilidad geotécnica hacia el portal entrada de los Túneles Desviación. Dicha inestabilidad comenzó el 07 de mayo de 2018 con un deslizamiento hacia el portal de entrada del Túnel de Desviación Derecho (TDD) y el talud de acceso a la Galería 1 (G1) y presentándose diferentes eventos hasta que, finalmente, el 12 de mayo de 2018, al ocurrir un destaponamiento del TDD con un caudal aproximada de 5500 m<sup>3</sup>/s, se generó un deslizamiento cerrando dichos túneles.

El material arrastrado por el derrumbe conformó el tapón natural del túnel TDD, el cual con el tiempo ha hecho que las filtraciones a través de este disminuyan pasando de unos 100 m<sup>3</sup>/s a unos 10 m<sup>3</sup>/s. Actualmente persisten algunas infiltraciones a través de del tapón natural, sin mostrar indicios de una eventual destaponamiento; sin embargo, como mecanismo de gestión del riesgo, las comunidades ubicadas en las riberas del río Cauca, aguas abajo del proyecto, se encuentran en diferentes niveles de alerta.

El nivel de alerta del TDD para las comunidades aguas abajo se monitorea con base en los siguientes elementos:

- Medidas del nivel piezométrico en el TDD, sobre la abscisa km0+390 aproximadamente (en la proyección del cruce de este túnel con la galería 285).
- Medidas de velocidad del flujo de agua en la abscisa km1+085 aproximadamente del TDD.
- Medida de presión en el TDD a partir de cuatro perforaciones. En cada perforación se mantienen instalados piezómetros, estando estos puntos ubicados en las abscisas km0+687, km0+858, km0+91+5 y km1+085.

El hecho de que el flujo por el túnel se haya mantenido bajo (inferior a 10 m<sup>3</sup>/s) por un largo período, con una cabeza hidráulica significativa, que no se observe arrastre de sedimentos y que el material al interior sea grueso granular, indica que no existe un proceso erosivo que esté removiendo el material depositado; por lo tanto, no se considera probable un destaponamiento súbito del túnel. Sin embargo, para una mayor justificación técnica de que este destaponamiento no debe ser súbito, en el numeral B se presenta documentación que de manera teórica sustenta este hecho. En la Figura 2-194 se presenta de manera esquemática el TDD, con su grado de obstrucción y las perforaciones por las cuales se realiza monitoreo continuo del túnel.

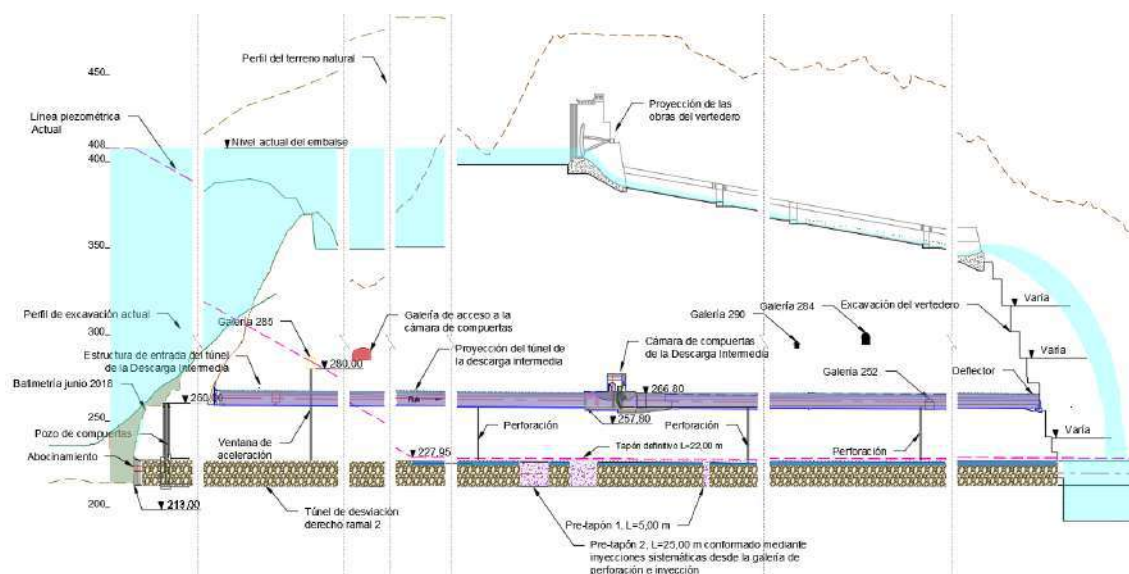


Figura 2-194 Grado de obstrucción en el túnel de desviación.

Fuente: Integral S.A., 2.018.

Según lo mencionado, actualmente se está monitoreando, en tiempo real, el caudal que está pasando por este túnel de dos formas: la primera consiste en la relación que hay entre el caudal evacuado por el vertedero y el río Ituango, con el caudal reportado por la estación “Descarga Hidroituango”, ya que al restar estos dos valores se inferiría un cambio en el caudal descargado por el TDD que pueda significar un eventual destaponamiento; la segunda forma consiste en el monitoreo de sensores de presión y velocidad que, al generar una variación, darían una señal de advertencia. Es de señalar que, desde que empezó el monitoreo de las variables del TDD, tanto las velocidades como las presiones han permanecido estables; las variaciones puntuales que han registrado los equipos se han justificado y hasta ahora las lecturas no dan indicios de un destaponamiento de la Desviación Derecha.

### Galería Auxiliar de Desviación

La GAD continúa obstruida desde el 30 de abril del 2.018; y al igual que el TDD, ha estado sometida a presiones de más de 200 m.c.a. sin presentar indicios de destaponamiento.

Según las investigaciones realizadas con ROV – desde el embalse –, la geofísica – desde la superficie del terreno – y con base en los trabajos que se adelantan en la zona de compuertas de la GAD, se pudo constatar que, además del tramo inicial que está totalmente taponado, el resto del túnel de la GAD presenta una obstrucción de más del 50% de su sección, donde se encuentran materiales de más de un metro de diámetro esparcidos a lo largo del túnel.

Ambas compuertas del túnel se encuentran cerradas; la primera (compuerta izquierda) el 29 de mayo de 2.018 y la segunda (compuerta derecha) el 18 de diciembre de 2.019. Con el cierre de ambas compuertas se activó el funcionamiento del *By-Pass* directo de la GAD (el cual permitía que el agua pasara de un lado a otro de las compuertas). No obstante, el 19 de diciembre de 2.021 se realizó la maniobra de cierre del *By-Pass* directo de la GAD e inicio del funcionamiento del *By-Pass* entre la GAD y la Descarga Intermedia, permitiendo que por este último túnel se descarguen las filtraciones de la GAD.

Ambos tapones naturales – el del TDD y la GAD – han estado sometidos a una carga o niveles altos del embalse por varios meses; adicionalmente, en ambos casos se cuenta con sistemas de monitoreo que permiten alertar, con antelación, cualquier cambio en los síntomas de destaponamiento.

Es importante resaltar que, por la mayor longitud que tiene la GAD – y por el hecho de haber cerrado las compuertas –, un destaponamiento de este túnel generaría un menor caudal que el que se presentaría si se destapara el TDD. Como se ha previsto desde la Circular 042, que reemplazó en su momento la Circular 035 y en la que se consideró destaponamiento simultáneo de la GAD y el TDD – dando como resultado un caudal nominal de simulación de 16.000 m<sup>3</sup>/s – es poco probable esperar una falla simultánea en ambos túneles, pues ambos sistemas son independientes y por tanto los mecanismos de erosión que se dan ante un eventual destaponamiento en cada uno de estos túneles también lo serían. No obstante, siendo este el caso más crítico, también se tendrá en cuenta para la evaluación de la amenaza por destaponamiento.

#### A. Casos de análisis

Para la evaluación de la amenaza por destaponamiento de los túneles de desviación TDD y la GAD, se hace uso de la información presentada para dar cumplimiento a la Resolución 720 del 16 mayo de 2018, Art. Primero, Numero 1, Literal I, en donde se presentan los resultados asociados al análisis del tránsito hidráulico de las crecientes generadas por la descarga no controlada de ambos túneles de desviación, con vertimiento inicial por el vertedero y caudal descargado cuatro conducciones desde la casa de máquinas y la descarga no controlada del TDD, con vertimiento inicial por el vertedero y caudal descargado cuatro conducciones desde la casa de máquinas. A continuación, se presenta – a grandes rasgos – la información utilizada para la modelación hidráulica realizada en el documento; no obstante, en el Anexo VEC-A01\_AnexoInformeHidraulico\_Contingencia (ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A10) se encuentra toda información de manera detallada.



Es importante resaltar que, desde el CMT se cuenta con monitoreo permanente y en “tiempo real” que permite evidenciar cualquier anomalía que se pueda evidenciar en los túneles y – según lo mencionado – hasta el momento no se ha evidenciado que la situación de ambos haya cambiado; sin embargo, no se puede descartar la probabilidad de ocurrencia de estos eventos. Adicionalmente, y como se verá a continuación, la probabilidad de destaponamiento de estos túneles se considera baja debido a que para obtener un factor de seguridad de uno (1), la longitud del tapón debe ser de 100 m, pero la longitud más probable es de 450 m por lo cual el factor de seguridad es mucho mayor a uno. Si hay un cambio del nivel del embalse (de la cota 407 a la 420 m.s.n.m.), el cambio en el factor de seguridad es muy pequeño ya que la mayor carga es la que se tiene actualmente y el aumento de nivel genera un incremento menor.

En la Tabla 2-60 se presentan los dos casos evaluados por la amenaza de destaponamiento súbito de los túneles de desviación, siendo el máximo evaluado el destaponamiento de ambos túneles (caudal pico de 16.000 m<sup>3</sup>/s) y el destaponamiento del TDD (8.100 m<sup>3</sup>/s).

Tabla 2-60 Casos evaluados para el cálculo de la amenaza por destaponamiento de los túneles de desviación.

Caso	Descripción	Situación actual	
		Nivel (m.s.n.m.)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	Descarga no controlada de ambos túneles de desviación, con vertimiento inicial por el vertedero y caudal descargado cuatro conducciones desde la casa de máquinas. Este es el caso máximo de descarga de los túneles.	407,70	16.000
2	Descarga no controlada del túnel derecho, con vertimiento inicial por el vertedero y caudal descargado cuatro conducciones desde la casa de máquinas.	407,70	8.100

Fuente: Integral S.A., 2018.

## B. Probabilidad de destaponamiento de los túneles de desviación

A continuación, se describe la probabilidad de destaponamiento de los túneles de desviación:

### 1) Túnel de desviación derecho

La definición de la probabilidad de destaponamiento del TDD fue actualizada en el documento Probabilidad de falla del Túnel de Desviación Derecho realizado en mayo de 2.020. En el Anexo VEC-A06\_I-2194-PHI-031-PFTD-001 se encuentra toda la información detallada de los análisis realizados para el cálculo de la probabilidad del túnel y a continuación se resaltan algunos de sus resultados (ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A10).

Los análisis realizados para la revisión del nivel de riesgo del tapón natural existente en el TDD, considerando la información actualizada a mayo de 2.020, se basan en: 1) los hallazgos derivados de las perforaciones ejecutadas desde la Descarga Intermedia y galerías aledañas (galería 285, etc.) hacia el túnel en cuestión; 2) los registros de instrumentación del sector reportados por el CMT de EPM; y 3) el conocimiento adquirido a lo largo del desarrollo de las obras para el taponamiento definitivo de la Desviación derecha. Con lo anterior para actualizar el modelo de comportamiento del tapón natural, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad

sobre su grado de estabilidad, probabilidades de falla y se presentan las estimaciones del tiempo de destaponamiento.

Para estimar el tiempo de destaponamiento se utilizó la misma metodología empleada en la generación de la Circular 032 del 26 de Julio de 2019, emitida por la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Esta metodología se basó en la premisa de destaponamiento por tubificación (Piping) del tapón natural, cuya evolución en el tiempo sería sensible a factores como el gradiente de presiones antes y después de la sección obstruida (línea de energía), la geometría de la sección y los parámetros geotécnicos del material que compone el tapón natural. Los análisis reportados en la Circular 032 del 26 de Julio de 2019 se fundamentaron en consideraciones conservadoras, tanto en aspectos hidráulicos como el escenario hidrológico, los cuales continúan en gran medida para el desarrollo de este análisis.

Las incertidumbres asociadas al análisis de destaponamiento pueden ser combinadas en un modelo de probabilidad de falla para posteriormente estudiar desde este punto de vista, los escenarios creíbles de longitudes y definir el nivel de riesgo del destaponamiento. Las incertidumbres actuales se resumen a continuación:

- Irregularidades en la sección transversal del túnel producto de sobre excavaciones durante construcción, así mismo, sobre excavaciones como consecuencia del poder erosivo del flujo durante el destaponamiento registrado al inicio de la contingencia (5.500 m<sup>3</sup>/s en el mes de mayo de 2.018).
- Según levantamientos topográficos de la Interventoría y estadísticas calculadas cada 5,0 m, las sobre excavaciones en el TDD en la etapa de construcción pudieron alcanzar hasta 15% sobre el área teórica.
- Por otro lado, de acuerdo con información extraída de las perforaciones, por lo menos en la zona del Pretapón 2 (abscisa km 0+735), las socavaciones durante el destaponamiento de mayo de 2.018 se concentraron en la solera, con una profundidad cercana a los 4,0 m.
- Variación en las características de los materiales que conforman en el tapón (gradación, porcentaje de finos, grado de compactación, permeabilidad, pesos unitarios, permeabilidades).
- Variación en las longitudes efectivas del tapón ya que se desconoce la porción real que abate la mayor parte de la cabeza actuante.

Considerando que el tapón no ha mostrado signos de inestabilidad (lo cual implica factores de seguridad por encima de uno) ni se ha presentado la falla (lo cual implica probabilidades de falla bajas, inferiores al 5%), tanto por el mecanismo de deslizamiento como por gradiente hidráulico, la longitud del tapón natural debe estar entre 120 y 200 m.

Bajo la evidencia obtenida mediante las exploraciones ejecutadas hacia el TDD, se considera entonces que los parámetros asumidos al inicio de la contingencia fueron conservadores y

basados en el escenario actualizado, se tiene una probabilidad de falla inferior al 5% que se clasifica como muy baja dentro de la escala de riesgo de EPM.

## 2) Galería auxiliar de desviación

La definición de la probabilidad de destapamiento del TDD, fue actualizada en el documento Probabilidad de falla del Túnel de Desviación Derecho realizado en mayo de 2.020. En el Anexo VEC-A07\_I-2194-PHI-030-GEO-PFT-001 se encuentra toda la información detallada de los análisis realizados para el cálculo de la probabilidad del túnel (ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A10).

Partiendo de la base que no se han evidenciado procesos de inestabilidad del tapón natural de la GAD para un nivel máximo de 408 m.s.n.m. y que dicha situación se ha mantenido en el tiempo, se concluye que dicho tapón natural es suficiente para abatir el gradiente hidráulico proveniente de la carga del embalse. A partir de esta hipótesis se plantean las siguientes características del tapón.

- Dependiendo de la magnitud de los caudales, la permeabilidad podría variar entre  $1e-4$  m/s y  $5e-2$  m/s. El rango obtenido de permeabilidades, teniendo en cuenta los datos reales de caudal de infiltración, podría asociarse con materiales granulares gruesos lo cual ha podido ser constatado con el material dragado durante la reparación de las compuertas.
- Teniendo en cuenta ese rango y alturas de lámina inferiores a 6,0 m en la cámara de compuertas, el caudal límite para no sobrepasar el gradiente admisible sería del orden de **18 m<sup>3</sup>/s**.
- Siendo coherentes con el orden de permeabilidades, los ángulos de fricción podrían variar entre 25° y 35° para representar sedimentos con tamaños de gravas las cuales pueden contener mayor o menor presencia de finos.
- Usando las fórmulas de FS para deslizamiento parcial, el tapón natural en la GAD podría alcanzar como mínimo 175 m aproximadamente para cumplir con el criterio de deslizamiento (FS 1.1), teniendo como única resistencia la fuerza por fricción desarrollada en solera y hastiales. Para el caso de que se desarrolle la fuerza de fricción en toda la sección la longitud podría ser 64 m.
- En síntesis, las longitudes pueden variar entre 62 m y 175 m considerando condiciones límites para ambos mecanismos de falla analizados, es decir, gradiente y deslizamiento (parcial y total). El dato final de longitud se escoge dentro de dicho rango de variación y siendo coherente también con la proyección geométrica de la chimenea. Como consecuencia, la estimación del factor de seguridad se mantiene igual a las previsiones iniciales, es decir 1,5 con una probabilidad de falla de 0,7 %.

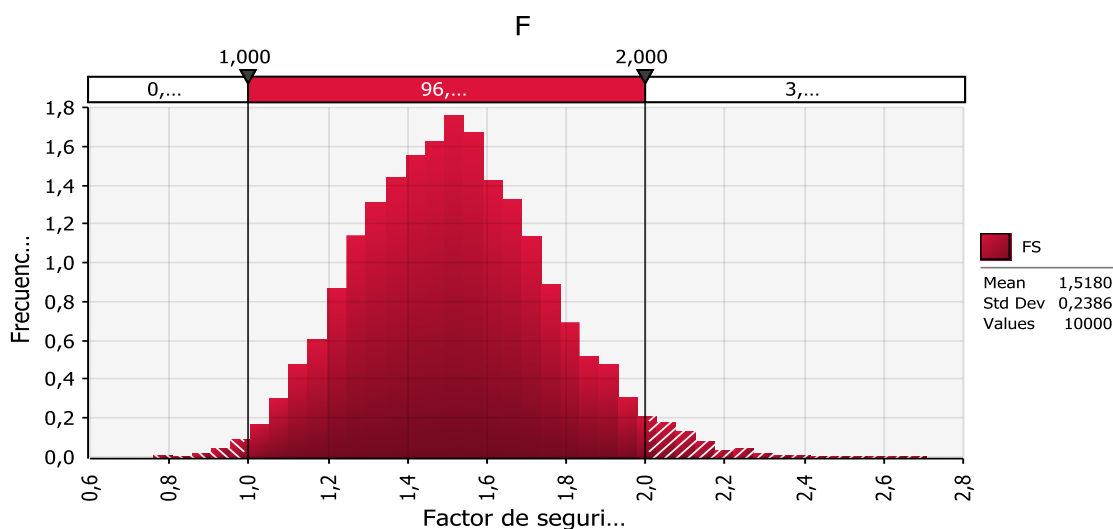


Figura 2-195 Cálculo de la probabilidad de falla GAD, función de densidad del FS por deslizamiento.

Fuente: Integral S.A., 2.019.

### C. Análisis de resultados y caracterización de la amenaza

En este capítulo, se presentan los análisis de resultados de los escenarios de destaponamiento de (1) los dos túneles de desviación (GAD y TDD) de manera simultánea y (2) del TDD, según lo presentado en la Tabla 2-60.

Para todos los casos se analizan las manchas de inundación, velocidades, profundidades y caracterización de la amenaza.

#### **Caso 1. Destaponamiento de los túneles de desviación de manera simultánea, caudal pico 16.000 m<sup>3</sup>/s**

Según lo mencionado, en este caso se tiene en cuenta la descarga no controlada de ambos túneles de desviación, con vertimiento inicial por el vertedero y caudal descargado cuatro conducciones desde la casa de máquinas. Con un caudal pico de 16.000 m<sup>3</sup>/s, este es el caso máximo de descarga de los túneles.

A continuación, la Figura 2-196 muestra el tránsito de la hidrógrafa generada por la desobstrucción de 2 túneles. Para este caso se presenta un amortiguamiento del caudal cercano al 30%, pasando de 16.290 m<sup>3</sup>/s, inmediatamente aguas abajo de sitio presa, a 11.481 m<sup>3</sup>/s en la sección de control ubicada en Nechí.

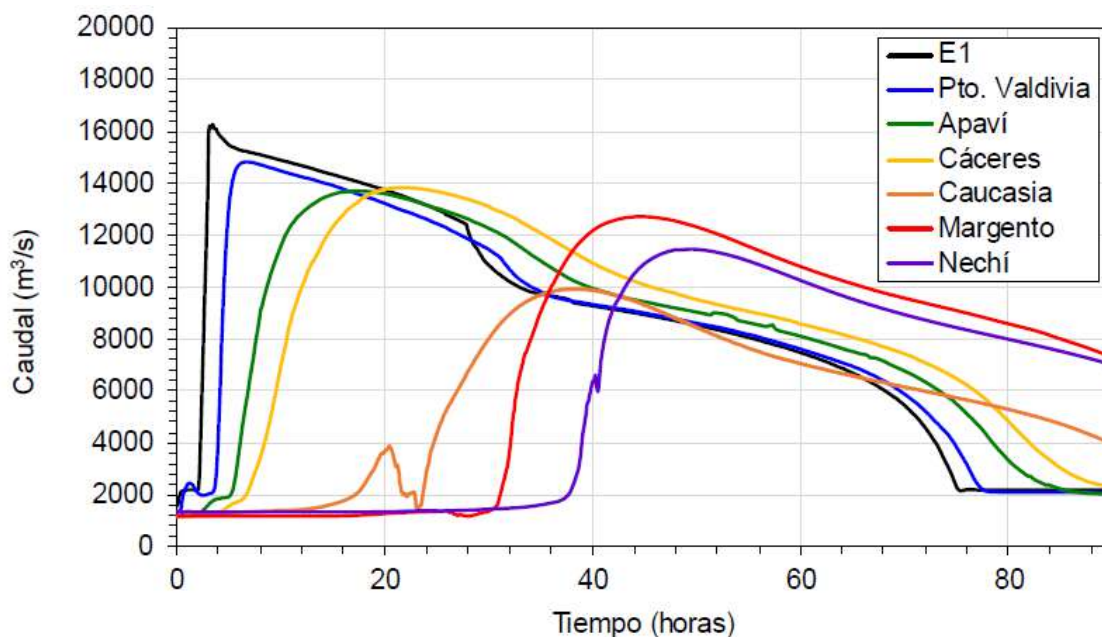


Figura 2-196 Hidrógrafa de destaponamiento transitada – caudal pico de 16.000 m<sup>3</sup>/s.  
Fuente: Integral S.A., 2.018.

A continuación, la Figura 2-198 da cuenta de los valores de profundidad (mapa ubicado en el costado izquierdo) y velocidad máxima (mapa ubicado en el costado izquierdo). Finalmente, en la Figura 2-197 se puede apreciar de manera espacial la amenaza por Inundación en Puerto Valdivia y otras localidades. La amenaza es, de forma general, Extrema (con gran parte del de área inundada respecto al casco urbano) en Puerto Valdivia, de Bajo a Alto en Puerto Antioquia, Cáceres y Nechí, mientras que de Bajo a Extremo en Caucasia (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-DSB-P-010).



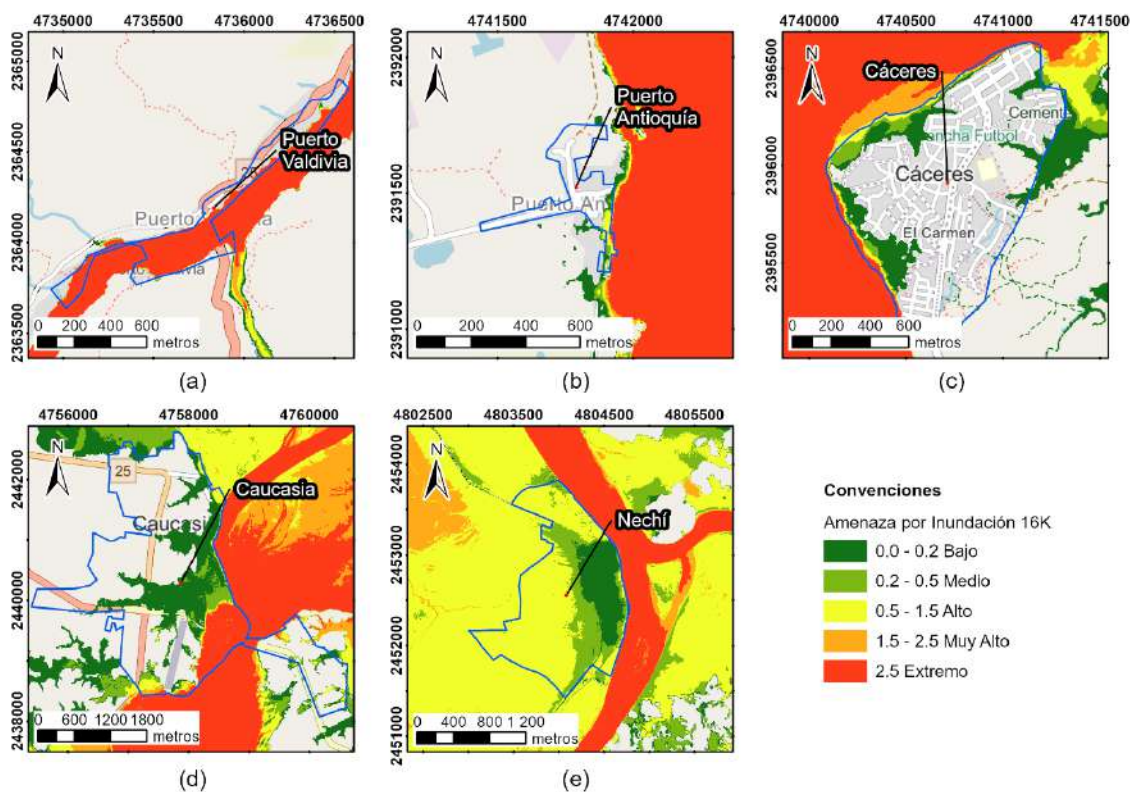


Figura 2-197 Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés.  
(a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí.

Fuente: Integral S.A., 2.018

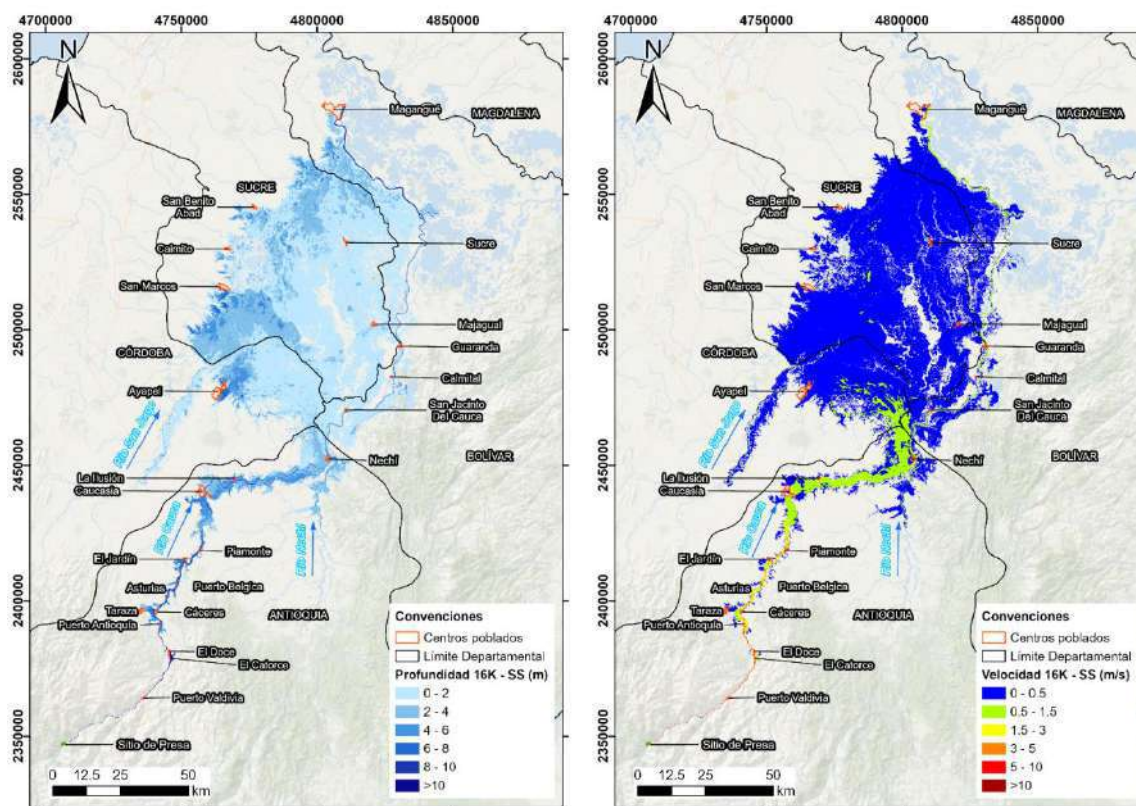


Figura 2-198 Mancha de inundación generada con caudal pico de 16.000 m<sup>3</sup>/s (desobstrucción de dos túneles). Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha). No se consideran aportes de sedimentos para este caso (SS).

Fuente: Integral S.A., 2.018

### Caso 2. Destaponamiento del TDD, caudal pico de 8.100 m<sup>3</sup>/s

Según lo mencionado, en este caso se tiene en cuenta la descarga no controlada del túnel derecho, con vertimiento inicial por el vertedero y caudal descargado cuatro conducciones desde la casa de máquinas, con un caudal pico de 8.100 m<sup>3</sup>/s.

A continuación, la Figura 2-199 muestra el tránsito de la hidrógrafa generada por la desobstrucción de 1 túnel, asociada a un caudal pico de 8.100 m<sup>3</sup>/s. Para este caso se presenta un amortiguamiento del caudal cercano al 14%, pasando de 8.096 m<sup>3</sup>/s, inmediatamente aguas abajo de sitio presa, a 6.991 m<sup>3</sup>/s en la sección de control ubicada en Nechí.

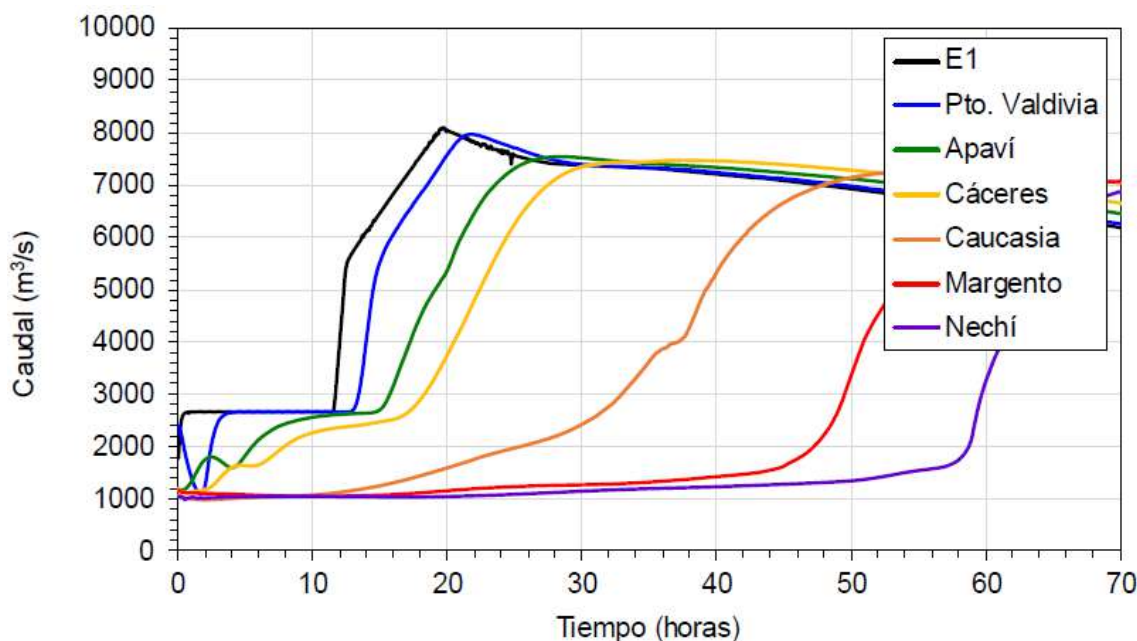


Figura 2-199 Hidrógrafa de destaponamiento transitada – caudal pico de 8.100 m<sup>3</sup>/s.

Fuente: Integral S.A., 2.018.

A continuación, la Figura 2-200 da cuenta de los valores de profundidad (mapa ubicado en el costado izquierdo) y velocidad máxima (mapa ubicado en el costado izquierdo). Finalmente, en la Figura 2-201 se puede apreciar de manera espacial la amenaza por Inundación en Puerto Valdivia. La amenaza es, de forma general, Extrema (con el 100% de área inundada respecto al casco urbano) en Puerto Valdivia, de Alto a Extremo en Puerto Antioquia (con el 2% de área inundada respecto al casco urbano), mientras que de Bajo a Alto en Cáceres y Caucasia y Entre Bajo y Medio en Nechí (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-DSA-P-010).



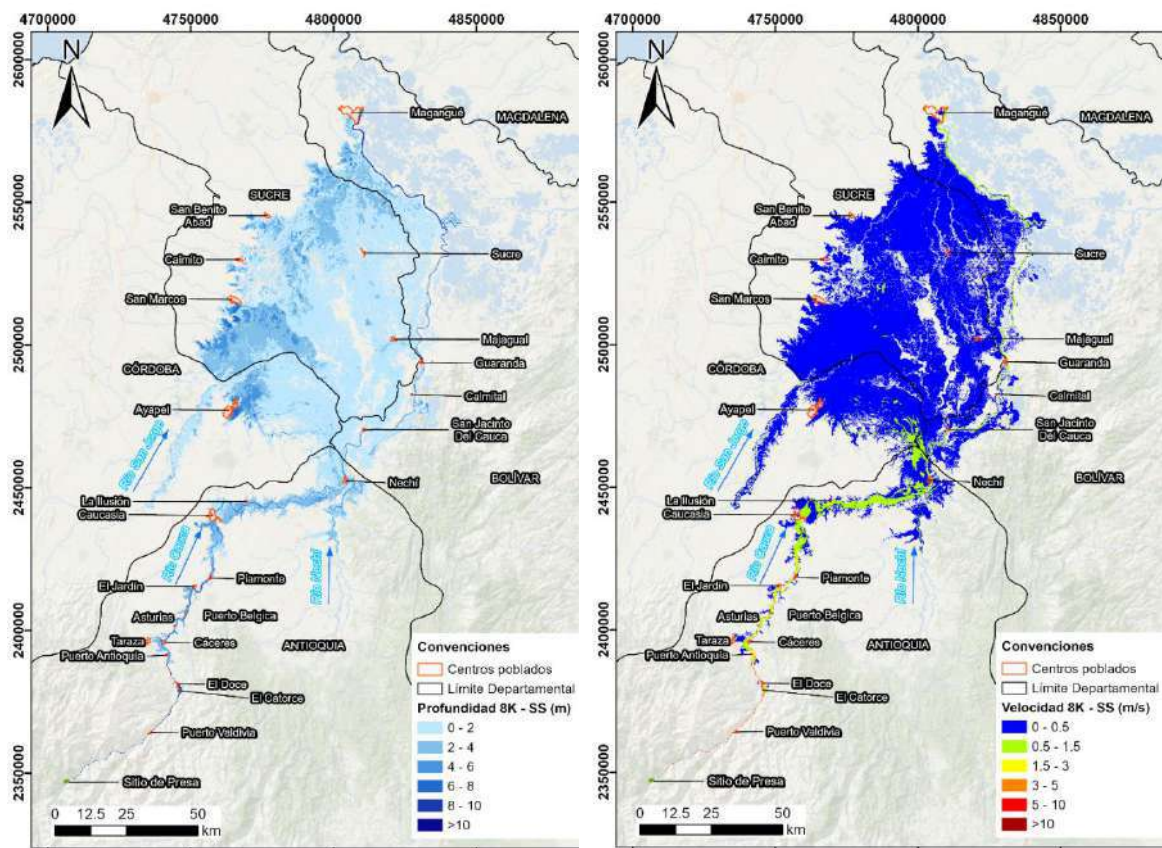


Figura 2-200 Mancha de inundación generada con caudal pico de 8.100 m<sup>3</sup>/s (desobstrucción de un túnel). Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha). No se consideran aportes de sedimentos para este caso (SS).

Fuente: Integral S.A., 2.018

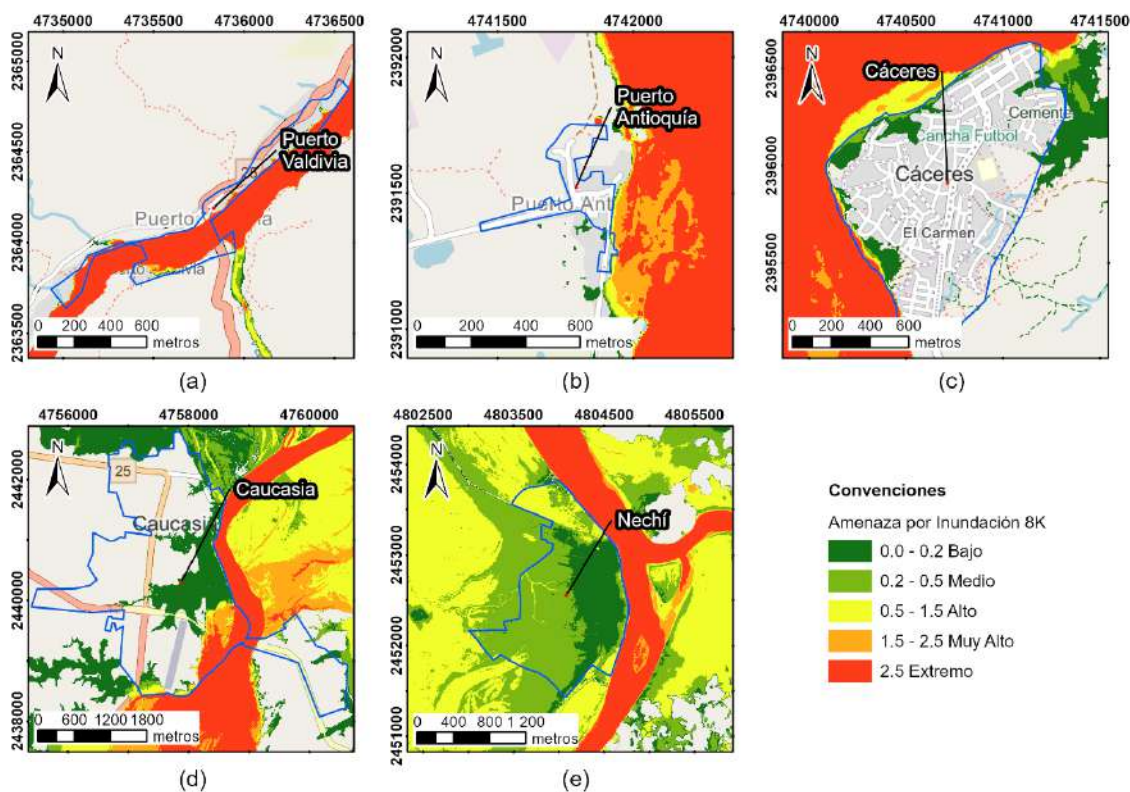


Figura 2-201 Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés. (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí.

Fuente: Integral S.A., 2.018.

### 2.2.4.9.3 Vertedero

El vertedero del P.H. Ituango consta de cuatro compuertas radiales que permiten controlar el nivel del embalse, de tal manera que se mantenga próximo al nivel máximo normal definido para la etapa de operación o cualquier otro nivel que se considere conveniente mientras pasa la contingencia (situación actual).

En la Tabla 2-61 y en la Figura 2-202, se presentan la configuración general de una compuerta del vertedero en cuanto a las dimensiones y algunos aspectos técnicos relacionados con la operación normal establecida (cuando el proyecto esté generando), según lo previsto en los diseños del proyecto.

La capacidad de descarga del vertedero depende del nivel del embalse y de la apertura de las compuertas. En la Figura 2-203 se presenta la curva de capacidad de descarga del vertedero en función del nivel del embalse para diferentes aperturas de las compuertas radiales o para las condiciones de apertura total (lo que representa el paso a flujo libre).



Tabla 2-61 Condiciones originales de diseño y operación.

Nivel máximo normal de operación	420,00 m.s.n.m.
Nivel del muñón	410,90 m.s.n.m.
Nivel del extremo superior de la compuerta	421,69 m.s.n.m.
Nivel del umbral de la compuerta	400,08 m.s.n.m.
Cresta del vertedero	401,00 m.s.n.m.
Nivel máximo de inundación (CMP)	432,90 m.s.n.m.
Altura del agua desde el umbral de la compuerta	19,92 m
Altura de compuerta	21,50 m
Ancho de compuerta	16,50 m
Radio de la membrana	26,00 m
Nivel del pivote de la solapa	418,585 m.s.n.m.
Delta de nivel del embalse que genera un paso o maniobra en las compuertas	0,04 m

Fuente: Integral S.A.

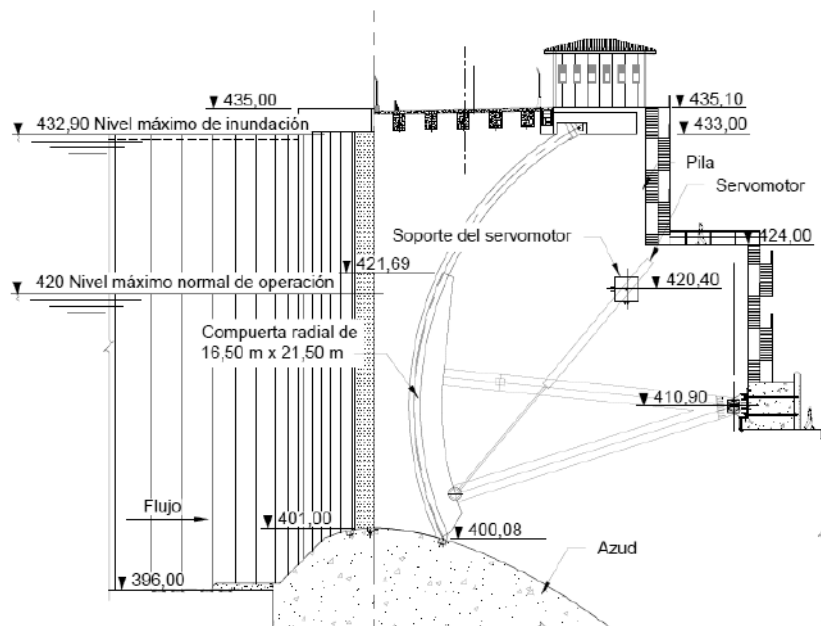
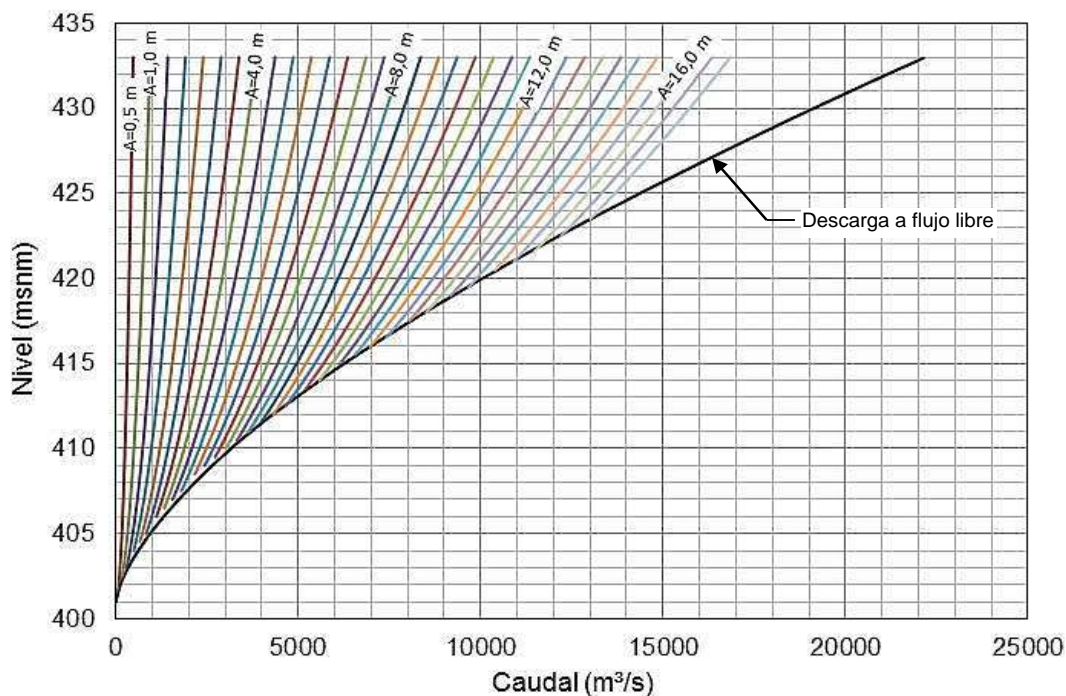


Figura 2-202 Configuración general de una compuerta radial del vertedero.

Fuente: Integral S.A.



**Nota:** El caudal indicado corresponde al descargado con las cuatro compuertas abiertas. Para considerar la apertura de una sola compuerta, el caudal relacionado en el eje de abscisas debe ser dividido por cuatro.

Figura 2-203 Curva de calibración del vertedero.

Fuente: Integral S.A.

Actualmente el vertedero se encuentra en funcionamiento continuo según la regla de operación definida durante contingencia (embalse en la cota 407,70 m.s.n.m.); por lo que, una vez el proyecto entre en la etapa de operación, el vertedero se operará con base en la regla de operación definida para este período, cambiando las condiciones en las que hoy en día opera (nivel normal de operación del embalse en la cota 420 m.s.n.m.) y, por ende, de las amenazas asociadas.

#### A. Casos de análisis

Durante la operación normal del proyecto, así como durante el estado de contingencia, pueden presentarse fallas en los equipos electromecánicos. En caso de presentarse fallas técnicas u operativas de las diferentes compuertas de las estructuras de evacuación de agua del embalse, ya sea que no puedan cerrarse (generando un aumento en el caudal descargado) o que – por el contrario – no puedan abrirse y se genere un sobrepaso de la presa, se podría generar un evento con considerables consecuencias para las poblaciones localizada en las riberas del río aguas abajo del proyecto.

Debido a una falla del sistema de compuertas del vertedero, ya sea por consecuencia directa del error humano en su operación, o por el colapso de la estructura de dicho sistema, existe la posibilidad de que se abra rápidamente una compuerta (o varias compuertas) con el embalse al

nivel máximo normal. En tales circunstancias, para este análisis de escenario extremo de falla, se sumen la apertura de una de las compuertas que generaría una descarga de unos 2.500 m<sup>3</sup>/s, y la apertura o falla de las cuatro compuertas que generaría un caudal máximo de 10.000 m<sup>3</sup>/s.

Es importante resaltar que el proceso de instalación de estos equipos contempló, desde las etapas de diseño, todos los criterios necesarios de seguridad de la normatividad aplicable, y además se cuenta con el CMT (Centro de Monitoreo Técnico) que sigue de forma permanente el estado general de estas estructuras; sin embargo, no se puede descartar la probabilidad de ocurrencia de un evento contingente como este.

Para la evaluación de la amenaza por fallas operativas en las compuertas del vertedero, también se tiene en cuenta un evento de inoperatividad de las compuertas, ya sea por consecuencia directa del error humano en su operación como fallas eléctricas, entre otros, o por el colapso de la estructura de dicho sistema, se tienen en cuenta los efectos que esto tendría aguas abajo del proyecto. En ese sentido, se evalúan las crecientes generadas por la falla de una o de las cuatro compuertas del vertedero (tanto en la situación actual como en operación), o los efectos que tendría el no poder abrir a compuertas durante un creciente mayor a 5.000 m<sup>3</sup>/s que podría generar sobrepaso de agua por encima de la presa y su eventual rompimiento. El caudal de 5.000 m<sup>3</sup>/s corresponde a la capacidad de evacuado por encima de las compuertas, con un nivel de embalse en la cota 435 m.s.n.m. (cresta de la presa), en caso de que las cuatro (4) compuertas se quedaran cerradas; para este caso o escenario de falla, se asumió el peor escenario contingente (que generaría la máxima contingencia aguas abajo del proyecto) y es que las cuatro compuertas del vertedero se quedaran atrancadas durante el paso de la Creciente Máxima Probable (CMP).

En la Tabla 2-62 se presenta un resumen de los casos evaluados para el cálculo de la amenaza por fallas operativas en las compuertas del vertedero.

Tabla 2-62 Casos evaluados para el cálculo de la amenaza por fallas operativas en las compuertas del vertedero.

Caso	Descripción	Situación actual		Operación	
		Nivel (m.s.n.m.)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Nivel (m.s.n.m.)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	Falla de operación - Apertura de una compuerta.	407,70	500	420,00	2.500
2	Falla de operación - Apertura de las cuatro compuertas	407,70	2.000	420,00	10.000
3	Caso de sobrevertimiento por la CMP, y no operación de las compuertas, con la presa terminada – considerando sedimentos.	420,00	368.000	420,00	368.000

**Nota:** Todos los casos considerados tienen en cuenta la presa terminada a la cota 435 m.s.n.m.

Fuente: Integral S.A.

Como es posible observar de la tabla anterior, el caudal descargado durante la situación actual con la apertura de una (1) y cuatro (4) compuertas y en de la falla de una (1) compuerta en la

operación del proyecto, el caudal evacuado obedece a un caudal menor que una creciente con una probabilidad 2,33 años de período de retorno, que equivale a un caudal descargado de 2.660 m<sup>3</sup>/s; es decir, una creciente normal del río; por lo cual, para evaluar los efectos en estos casos, se consideran los efectos de dicha creciente.

En cuanto a la apertura de las cuatro compuertas durante la operación del proyecto, se realiza un análisis en operación teniendo en cuenta un caudal descargado de 11.400 m<sup>3</sup>/s, en el cual, se tiene en cuenta el caudal descargado con la apertura de las cuatro compuertas (10.000 m<sup>3</sup>/s) más un caudal turbinado de 1.380 m<sup>3</sup>/s al inicio del evento.

Ahora, el caso 3 considera un sobrevvertimiento de la presa, considerando el paso de la CMP, la inoperancia de las compuertas del vertedero y la influencia de los sedimentos, generando una hidrógrafa con caudal pico de 368.000 m<sup>3</sup>/s.

#### B. Probabilidad de falla de las compuertas del vertedero

A continuación, se analizan las probabilidades o posibilidades de falla de algunas de las compuertas del proyecto con el propósito de identificar, a su vez, eventos o consecuencias de estas sobre el proyecto o en zonas aguas abajo de la presa. Para el análisis de estos temas se ha considerado conveniente clasificar las posibles fallas de la siguiente manera:

- Fallas de tipo estructural.
- Fallas de tipo operacional.
- Fallas por condiciones excepcionales.
- Fallas por suministro de energía eléctrica

En ese sentido, se describen los diferentes tipos de falla, independientemente del tipo de compuerta y más adelante, se presentará un análisis particular para cada caso.

##### 1) Descripción de los tipos de falla

##### e) Fallas de tipo estructural

Este tipo de falla en las compuertas, en general, se refieren a eventuales fallas que pudieran presentarse en sus componentes estructurales, tales como el cuerpo mismo de la compuerta principal u órgano de cierre en sus vigas principales o en su membrana, o en sus brazos de soporte como en el caso de las compuertas radiales; o en sus muñones, o en sus vástagos de operación, o en sus mecanismos de rodadura como en el caso de las compuertas de ruedas por bloqueo o desprendimiento. Algunas de estas fallas de tipo estructural, en caso de presentarse, podrían causar desastres significativos ya sea por la imposibilidad de operar la compuerta o por la rotura o desprendimiento de partes importantes que lleven a un colapso de la estructura misma.

En el caso de las compuertas radiales del vertedero (ver Figura 2-204) o de la descarga intermedia, una falla grave de este tipo podría ser la rotura de uno o de ambos brazos de soporte de la compuerta, o el desprendimiento de los muñones en el punto de anclaje o de

pivote de la compuerta que implicaría una caída parcial o total y un eventual arrastre de la misma por el caudal de descarga, o el desprendimiento de los servomotores de accionamiento que producirían igualmente una caída súbita de la compuerta y un cierre brusco de la misma.



Figura 2-204 Compuertas radiales de vertedero - Vistas frontal y posterior.

Fuente: Integral S.A.

Dados los requerimientos de diseño y de fabricación de estas compuertas, así como de las condiciones de operación previstas, se considera que la probabilidad de falla de tipo estructural en este tipo de compuertas es *muy baja*, teniendo en cuenta que los diseños utilizados por los fabricantes han sido ya probados con base a experiencias previas adquiridas durante muchos años. No obstante, algunas de estas fallas deben prevenirse o evitarse ya que las consecuencias podrían ser catastróficas.

f) Falla de tipo operacional

Una falla de tipo operacional se refiere, en general, a una falla de algunos de los sistemas de operación y control de las compuertas tales como una falla en los servomotores de accionamiento, o una falla en las unidades de aceite a presión o en alguno de sus componentes como las bombas, motores o válvulas de control, o una falla en las tuberías de suministro y/o retorno de aceite a presión, o una falla en los tableros o sistemas eléctricos o de instrumentación y control (ver Figura 2-205). Se asume que no hay roturas o daños graves de elementos (aunque podrían presentarse eventualmente por causas externas) y que se puede disponer normalmente de partes de repuesto suficientes para atender cualquier necesidad.

Este tipo de falla puede ser de mayor probabilidad de ocurrencia (media baja) que una falla de tipo estructural, aunque la mayoría de estas fallas pueden resolverse mediante la acción o reacción oportuna del personal de operación y mantenimiento, y no necesariamente son la causa de un desastre, a menos que no se actúe oportunamente (por descuido) o que la falla perdure por mucho tiempo. En muchos casos, es posible recurrir a diferentes opciones de acción que permitan controlar la situación, las cuales deben identificarse con anticipación, y deben estar previstas en los respectivos manuales de operación y mantenimiento.





Figura 2-205 Unidades de aceite a presión y servomotores.

Fuente: Integral S.A.

g) Fallas por condiciones excepcionales

Se refiere a eventuales fallas de *muy baja* probabilidad o muy remota ocurrencia en las compuertas del vertedero y que correspondería a una suma o superposición de circunstancias en momentos en que se presente una creciente súbita de muchos años en el embalse que requiera una operación de apertura de emergencia de las compuertas y que, por alguna razón, los equipos no estén en condiciones de operación normal por mal estado de algunos de sus componentes o por fallas graves en el suministro de energía eléctrica y que la situación se prolongue por mucho tiempo.

Según la magnitud del evento extraordinario, creciente máxima y nivel máximo de inundación en el embalse (cota 432,50 m.s.n.m.) y en caso de que las compuertas no puedan abrirse según lo requerido, el agua podría pasar hasta unos 5.000 m<sup>3</sup>/s por encima de las compuertas, lo que disminuye en gran medida la probabilidad de sobrepasar la cota máxima de la presa (cota 435,00 m.s.n.m.).

En los casos en que el nivel del embalse se encuentre por encima de la cota del azud del vertedero (407,00 m.s.n.m.), las crecientes en el embalse podrán controlarse sin mayores inconvenientes con la apertura de las compuertas ya que su capacidad máxima de descarga es mayor que las crecientes máximas esperadas en el río. (4.700 m<sup>3</sup>/s, cada 50 años, o 25.300 m<sup>3</sup>/s, el pico de la CMP – Creciente Máxima Probable –).

También, podrían incluirse dentro de este tipo de falla excepcional, algunos daños que pudieran resultar de eventos sísmicos de gran magnitud que sobrepasen los requerimientos de diseño o la presencia de alguna ola de dimensiones significativas en el embalse que pudiera producirse cerca al vertedero por derrumbes en la ladera del embalse.

h) Fallas del suministro de energía eléctrica

Desde el punto de vista de la disponibilidad permanente de alimentación eléctrica y de los sistemas de operación y control de las compuertas del vertedero y de la descarga intermedia, el proyecto cuenta con un sistema robusto, además de redundante, que hace que la probabilidad

de que las compuertas no puedan ser accionadas por fallas en estos sistemas son muy bajas. A continuación, se describen en detalle los sistemas y principales y sus correspondientes provisiones de redundancia.

Los equipos de los sistemas eléctricos del vertedero, la captación y la descarga intermedia son alimentados desde el sistema eléctrico de los servicios auxiliares de la central el cual está conectado a varias fuentes de energía así: un alimentador principal a través de un transformador de 10 MVA que se conecta a la subestación de 500 kV que hace parte del SIN y al cual se conectan las unidades generadoras del proyecto, un alimentador de respaldo conectado a la subestación de construcción del sistema de distribución de EPM y un alimentador de emergencia alimentado desde dos plantas de Diesel, en caso de falla del alimentador principal, mediante un sistema de transferencias automático, los equipos de los servicios auxiliares serán conectados al circuito de respaldo y en caso de falla de este al circuito de emergencia con las plantas Diesel, hasta que se restablezcan las condiciones normales del alimentador fallado.

La subestación de servicios auxiliares para el vertedero del proyecto hidroeléctrico Ituango, desde la cual se alimentan los equipos electromecánicos de las compuertas del vertedero, de la captación y los equipos de los sistemas eléctricos complementarios de la zona, tiene un alimentador principal conectado a un circuito aéreo a 13,2 kV, proveniente de los tableros de distribución de los servicios auxiliares de la central, que se conecta a un transformador de 160 kVA, 13,2 kV-480/277 V, el secundario del transformador se conecta al tablero de distribución de baja tensión a través de un interruptor con una transferencia automática. Como fuente de respaldo el tablero de distribución tiene otro alimentador independiente, derivado de una planta Diesel la cual se conecta al tablero por medio de un interruptor del tipo de caja moldeada y la transferencia automática, este alimentador se considera como alimentador de emergencia. En caso de falla del alimentador principal la transferencia automática realizará el arranque y conexión de la planta Diesel al barraje del tablero de distribución para garantizar la continuidad del servicio hasta que se restablezcan las condiciones normales de operación del alimentador principal. Para el sistema de control de los equipos electromecánicos, eléctricos y de comunicaciones instalados en las casetas del vertedero se tiene un sistema de corriente continua conformado por dos cargadores y un banco de baterías a 125 Vcc.

Los equipos electromecánicos de las compuertas de la captación son alimentados desde el tablero de distribución a 480 Vca del vertedero, de donde se derivan los alimentadores para conectar los tableros de distribución para la conexión de los equipos electromecánicos de las compuertas, un tablero de distribución por cada dos unidades oleohidráulicas de accionamiento de las compuertas. En este caso se tiene el mismo respaldo de energía que proporciona el tablero de distribución eléctrica del vertedero. Para el sistema de control de los equipos electromecánicos, eléctricos y de comunicaciones instalados en la galería de compuertas de la captación se tiene un sistema de corriente continua conformado por dos cargadores y un banco de baterías a 125 Vcc.

La subestación de servicios auxiliares para la zona de la descarga intermedia del proyecto hidroeléctrico Ituango, desde la cual se alimentan los equipos electromecánicos de las

compuertas de la descarga intermedia y los equipos de los sistemas eléctricos complementarios de la zona, tiene un alimentador principal conectado a un circuito aéreo a 13,2 kV, proveniente de los tableros de distribución de los servicios auxiliares de la central, que se conecta a un transformador de 112,5 kVA, 13,2 kV-480/277 V, el secundario del transformador se conecta al tablero de distribución de baja tensión a través de un interruptor con una transferencia automática. Como fuente de respaldo el tablero de distribución tiene otro alimentador independiente, derivado de una planta Diesel la cual se conecta al tablero por medio de un interruptor del tipo de caja moldeada y la transferencia automática, este alimentador se considera como alimentador de emergencia. En caso de falla del alimentador principal la transferencia automática realizará el arranque y conexión de la planta Diesel al barraje del tablero de distribución para garantizar la continuidad del servicio hasta que se restablezcan las condiciones normales de operación del alimentador principal. Para el sistema de control de los equipos electromecánicos, eléctricos y de comunicaciones instalados en la caseta de la descarga intermedia se tiene un sistema de corriente continua conformado por dos cargadores y un banco de baterías a 48 Vcc.

### **Supervisión de los equipos eléctricos y mecánicos del vertedero, la captación y la descarga intermedia**

Desde el sistema de control de la central se tiene prevista la integración de todos los equipos que conforman el proyecto, para lo cual se tienen equipos distribuidos por cada frente de obra interconectados por medio de conexiones redundantes en fibra óptica para mejorar su confiabilidad. Como parte del sistema de control se tiene una sala de control dentro de la casa de máquinas donde hay dos estaciones de operación con operadores disponibles continuamente durante el funcionamiento de la central.

En el sistema de control se supervisan todos los parámetros de operación de los equipos eléctricos y mecánicos de la central entre los cuales están los instalados en el vertedero, la captación y la descarga de fondo, igualmente se realizará el control de la operación de las compuertas. En el sistema de control se tendrán las alarmas correspondientes a las fallas que se puedan presentar en la operación de los equipos mecánicos y eléctricos y la posición de las compuertas, de forma tal que el operador de la central pueda activar los procesos previstos para la atención de las fallas en estos equipos

#### **i) Fallas en las compuertas del vertedero**

Como se ha mencionado anteriormente, se considera que una falla de tipo estructural en una de las compuertas radiales del vertedero es de *muy baja probabilidad ocurrencia*, aunque en caso de presentarse podría tener consecuencias graves. No obstante, no sería de esperar que se presentara simultáneamente una falla de este tipo en las cuatro compuertas radiales a menos que se produjese un sobre paso del agua por encima de las compuertas en caso de bloqueo de las cuatro compuertas en condiciones excepcionales (creciente máxima) y sin que se tuviera el tiempo suficiente para reaccionar. Aunque, estas compuertas hayan sido diseñadas para atender las condiciones de operación más extremas previstas en el embalse,

deben tomarse todas las precauciones necesarias asegurando todas las actividades de inspección y mantenimiento requeridas. En el caso de crecientes y niveles máximos en el embalse, se asume que el proceso de apertura de las compuertas puede efectuarse con suficiente anticipación de forma manual o automática para evitar cualquier exceso; por lo cual se considera que son circunstancias controlables.

Vale la pena advertir o aclarar que el vertedero ha sido diseñado para permitir el paso de la CMP (25.300 m<sup>3</sup>/s, que según los registros históricos de caudales máximos del río Cauca correspondería una creciente de un (1) millón de años de período de retorno), con el propósito de proteger la presa y el proyecto mismo. Se trata de evitar que el agua pase por encima de la presa (overtopping), lo cual sería una verdadera catástrofe. Sin embargo, esto no quiere decir que el paso de la creciente por el vertedero no tenga consecuencias graves aguas abajo del embalse y que todas las poblaciones están protegidas. De hecho, una creciente de más de 5.000 m<sup>3</sup>/s, con proyecto o sin proyecto, puede afectar gravemente las poblaciones aguas abajo, tal como sucedió durante la contingencia cuando se produjo el destaponamiento súbito del TDD (Túnel de Desviación Derecho); los desastres por inundaciones aguas abajo pueden producirse con crecientes naturales del río que se transiten de manera regular por el vertedero. Estos eventos podrán ser conocidos por EPM con miras a advertir las comunidades.

Por otra parte, si solo se presentara una falla de tipo estructural en una sola de las compuertas, se considera que las otras tres estarían en capacidad de atender la descarga de la creciente; no obstante, por el vano abierto saldría una gran cantidad de agua. En ese sentido, habría que tratar de reducir el nivel del embalse abriendo todas las compuertas hasta un punto en que fuese posible instalar los “stop logs” para contener el paso de agua por este vano y proceder luego a la reparación o reconstrucción de la compuerta o la instalación de una nueva.

## 2) Acciones preventivas para evitar fallas de las compuertas

### a) Montaje y puesta en servicio

Deberían revisarse los protocolos (o informes) de montaje y de puesta en servicio de estos equipos para verificar si todas las actividades relacionadas se terminaron completamente y si, eventualmente, algunas de estas actividades quedaron pendientes para ejecución posterior y si tales actividades fueron concluidas finalmente o aún siguen pendientes.

### b) Inspección y mantenimiento de los equipos

Otro de los factores que más pueden incidir en el correcto funcionamiento de los equipos y componentes asociados es la ejecución oportuna de las diferentes actividades de inspección y mantenimiento de estos. Por lo tanto, se recomienda hacer una verificación del cumplimiento de estas tareas.

Dentro de estas tareas, se recomienda hacer verificaciones de los sistemas eléctricos y de instrumentación y control (suministro normal de energía y fuentes de respaldo) como, también, la verificación operacional de las unidades de aceite a presión, motores y bombas, niveles y presiones de aceite, cambios de aceite, estado de las tuberías de aceite (detectar

eventuales fugas de aceite), vibraciones, entre otros. Téngase en cuenta que mediante estas actividades es posible identificar oportunamente algunas fallas operativas que pudieran presentarse.

c) Operación de los equipos

Verificar el estado de operación de los equipos y componentes asociados, como actividades complementarias a las de inspección y mantenimiento. Esta verificación periódica comprende la observación cuidadosa de su correcto funcionamiento.

d) Factores clave

Los componentes de las compuertas y equipos asociados podrían clasificarse de la siguiente manera:

- Parte estructural y sistemas de anclaje o fijación, o sistemas de pivote para rotación como los muñones.
- Unidades de aceite a presión para accionamiento de las compuertas.
- Sistemas de sello y estanqueidad
- Equipos eléctricos, de instrumentación y control (incluidos los sistemas de suministro de energía).

Cada uno de estos componen pueden ser revisados periódicamente de diversas formas, de acuerdo con sus características particulares y según las recomendaciones de los manuales de operación y mantenimiento. Dentro de las estructuras, por ejemplo, puede verificarse el estado de las uniones pernadas y soldadas, el estado de los recubrimientos de pintura para evitar problemas de corrosión, entre otros. También se pueden verificar los niveles de vibración en algunos puntos y los pivotes o muñones.

C. Análisis de resultados y caracterización de la amenaza

En este capítulo se presentan los análisis de resultados de los escenarios por fallas de operación en las compuertas del vertedero, ya sea por la apertura de una (1) o cuatro (4) compuertas, o por la no operación de las compuertas durante el paso de la CMP (caso de sobrevertimiento de la presa).

En el caso de las fallas de operación de las compuertas por una apertura de estas, se considera la creciente de 2,33 años ( $2.660 \text{ m}^3/\text{s}$ ) de período de retorno (asociada con los casos 1 y 2, con la apertura de una (1) y cuatro (4) compuertas por fallos en su operación), puesto que – como se mencionó anteriormente – cobija las afectaciones presentadas con estos escenarios, siendo una creciente natural en el río Cauca y que se presenta con cierta frecuencia.

Para todos los casos se analizan las manchas de inundación, velocidades, profundidades y caracterización de la amenaza. (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-CV-P-010)



**Caso 1. Falla de operación por apertura de una compuerta (condiciones de situación actual y operación del proyecto) y Caso 2. Falla de operación por apertura de cuatro compuertas en la situación actual del proyecto.**

Según lo mencionado, el caudal descargado durante la situación actual con la apertura de una (1) y cuatro (4) compuertas y en de la falla de una (1) compuerta en la operación del proyecto, el caudal evacuado obedece a un caudal menor que una creciente con una probabilidad 2,33 años de período de retorno ( $2.660 \text{ m}^3/\text{s}$ ); es decir, una creciente normal del río. En ese sentido, se considera que la evaluación de las afectaciones asociadas con esta creciente natural, cobijan las afectaciones que puedan evidenciarse con la ocurrencia de alguna de estas amenazas.

A continuación, la Figura 2-207 da cuenta de los valores de profundidad (mapa ubicado en el costado izquierdo) y velocidad máxima (mapa ubicado en el costado izquierdo). Finalmente, en la Figura 2-206 se puede apreciar de manera espacial la amenaza por Inundación en Puerto Valdivia y otras localidades.

La amenaza es, de forma general, Extrema en el cauce principal del río Cauca y de Baja a Media en algunos sectores de Caucasia y Nechí. En Puerto Antioquia y Cáceres, no se observan inundaciones respecto al casco urbano.

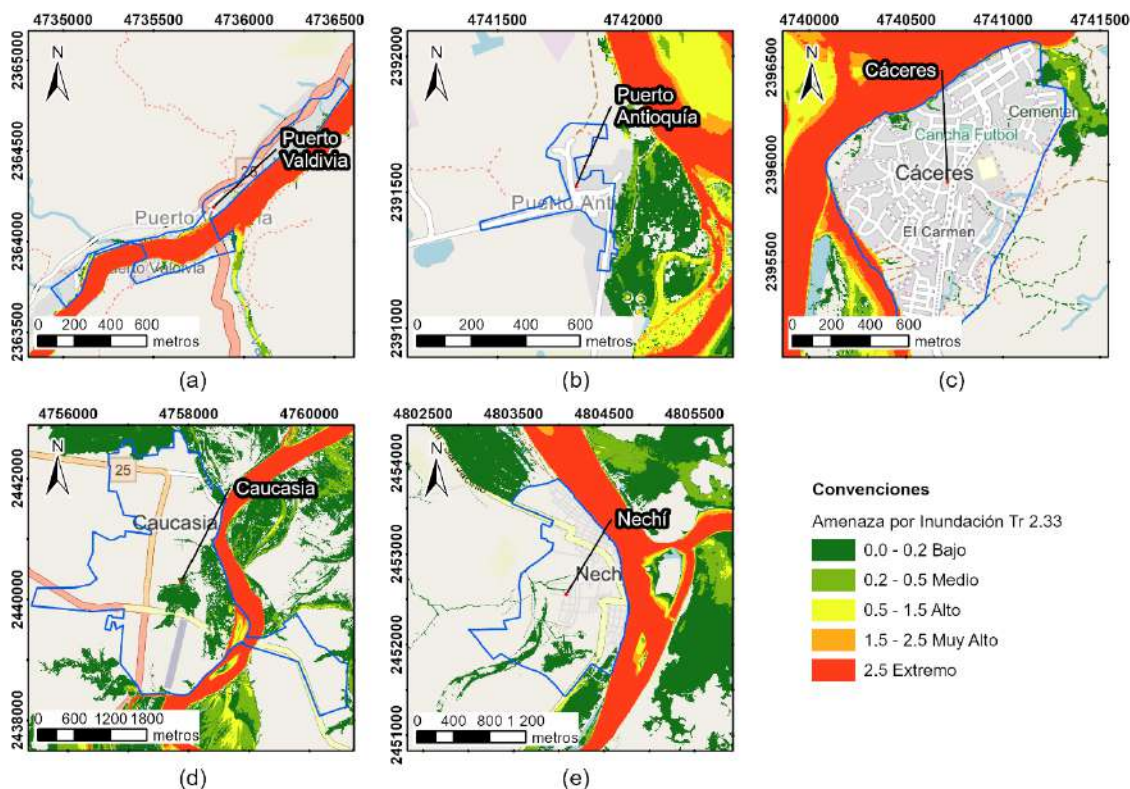


Figura 2-206 Categorización por amenaza de inundación con una creciente de 2,33 años en las principales zonas de interés.

(a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucaasia, (e) Nechí.

Fuente: Integral S.A., 2.018

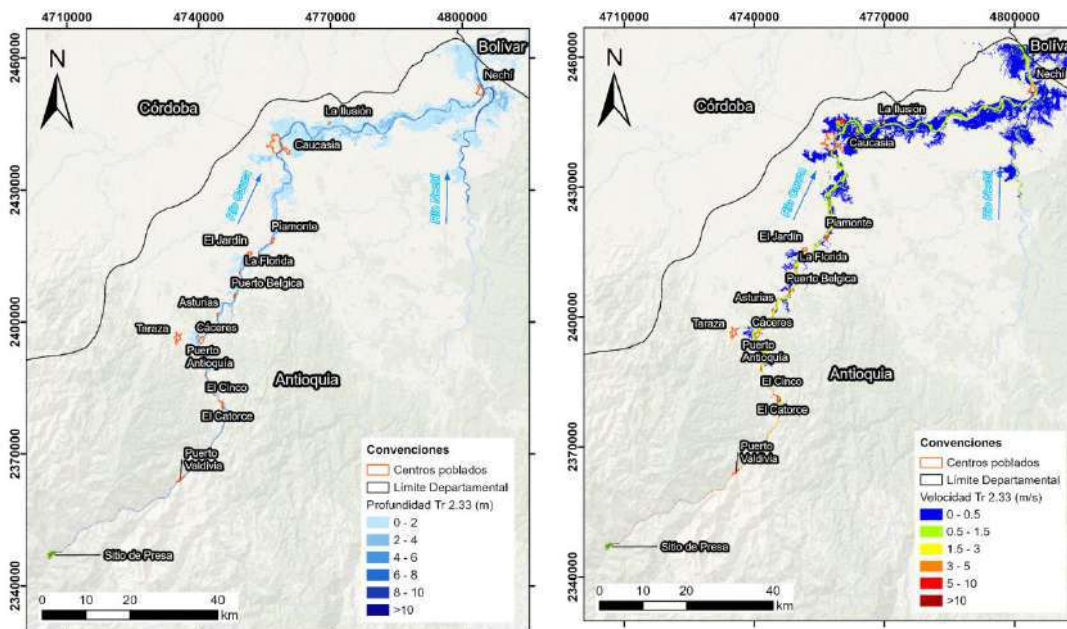


Figura 2-207 Mancha de inundación generada con una creciente de 2,33 años. Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha)

Fuente: Integral S.A., 2.018

## Caso 2. Falla de operación por apertura de cuatro compuertas durante la operación del proyecto.

Para este escenario considero un evento de falla simultánea en la operación de todas las compuertas como resultado de un proceso de maniobra del vertedero del proyecto, teniendo presente las siguientes consideraciones iniciales:

- El caudal base de entrada al proyecto de  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , este como condición representativa de un caudal medio del río Cauca.
- El nivel del embalse inicial antes del evento es la cota 420 m.s.n.m., que corresponde al medio de operación del proyecto.
- El vertedero funciona con las cuatro compuertas abiertas y sin posibilidad de cierre durante el descenso del nivel inicial hasta la cota de operación mínima del vertedero (401 m.s.n.m.)
- Se encuentra turbinándose  $1.380 \text{ m}^3/\text{s}$  al inicio del evento y se hace una maniobra de cierre en 1 hora.

- Se tomó como tiempo de calentamiento del escenario un valor de 5 horas aproximadamente antes de la maniobra de cierre e inicio del evento.
- Estas condiciones representan un evento crítico y atípico en términos de caudales pico, donde no se tendría control sobre un desembalse desde la cota 420 hasta la 401 m.s.n.m. por el vertedero del proyecto, generando de esta manera una hidrógrafa aguas abajo de sitio de presa como muestra la Figura 2-208.

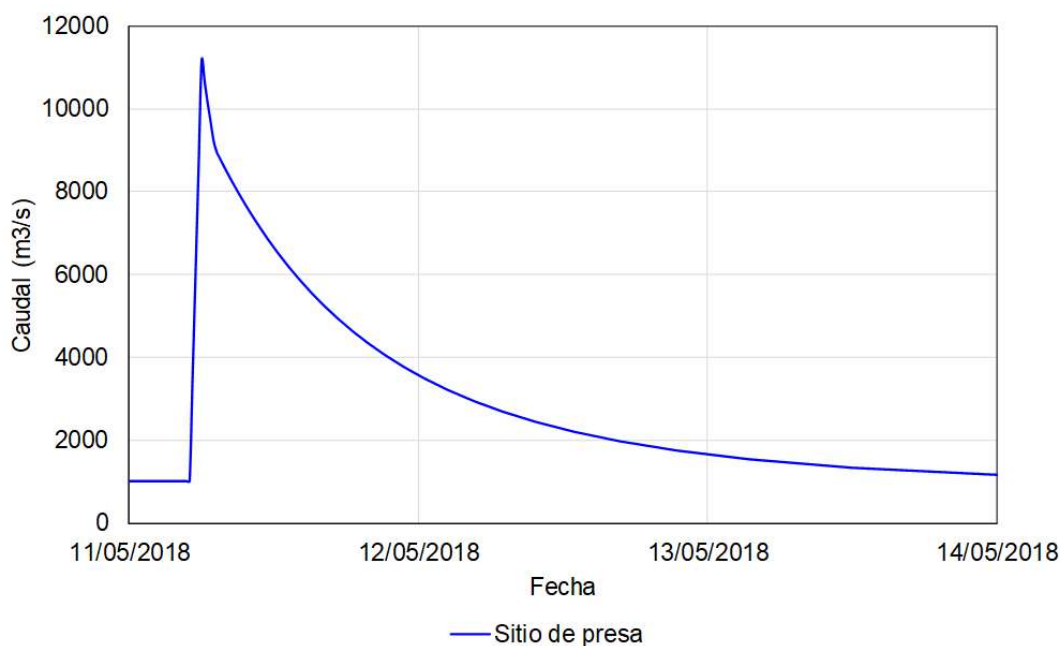


Figura 2-208 Hidrógrafa del Caso de Operación 1 en sitio de presa.

Fuente: Integral S.A., 2.020.

El evento considerado tiene un caudal pico de aproximadamente  $11.380 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual disminuye de forma progresiva hasta alcanzar el flujo base luego de 72 horas desde su caudal pico.

A continuación, la Figura 2-210 da cuenta de los valores de profundidad (mapa ubicado en el costado izquierdo) y velocidad máxima (mapa ubicado en el costado izquierdo). Finalmente, en la Figura 2-209 se puede apreciar de manera espacial la amenaza por Inundación en Puerto Valdivia y otras localidades.

La amenaza es de forma general, extrema en el cauce principal del río Cauca y en Puerto Valdivia, de baja a muy alto en algunos sectores del casco urbano de Cáceres, Caucasia y Nechí. En Puerto Antioquia no se observan inundaciones respecto al casco urbano.

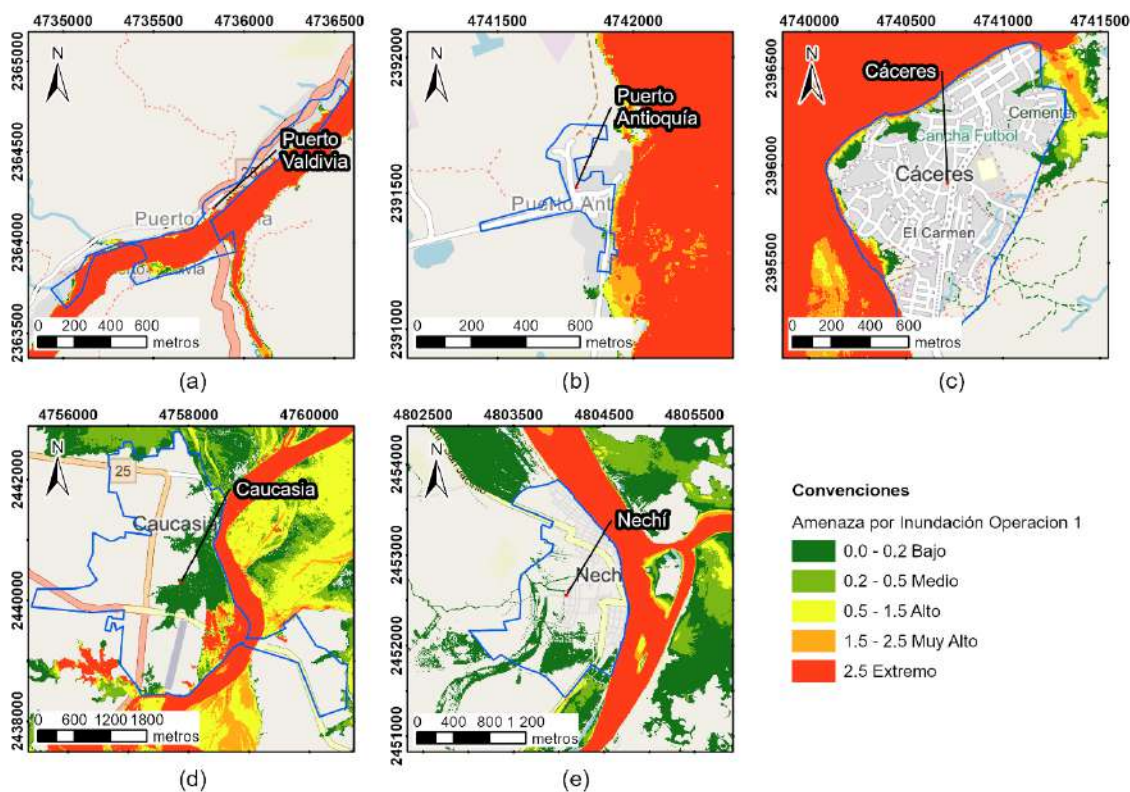


Figura 2-209 Categorización por amenaza de inundación de unos 11.400 m<sup>3</sup>/s asociada con una inoperatividad de las compuertas del vertedero (que se abran y no puedan cerrarse) durante la operación del proyecto.

(a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí.

Fuente: Integral S.A., 2.018



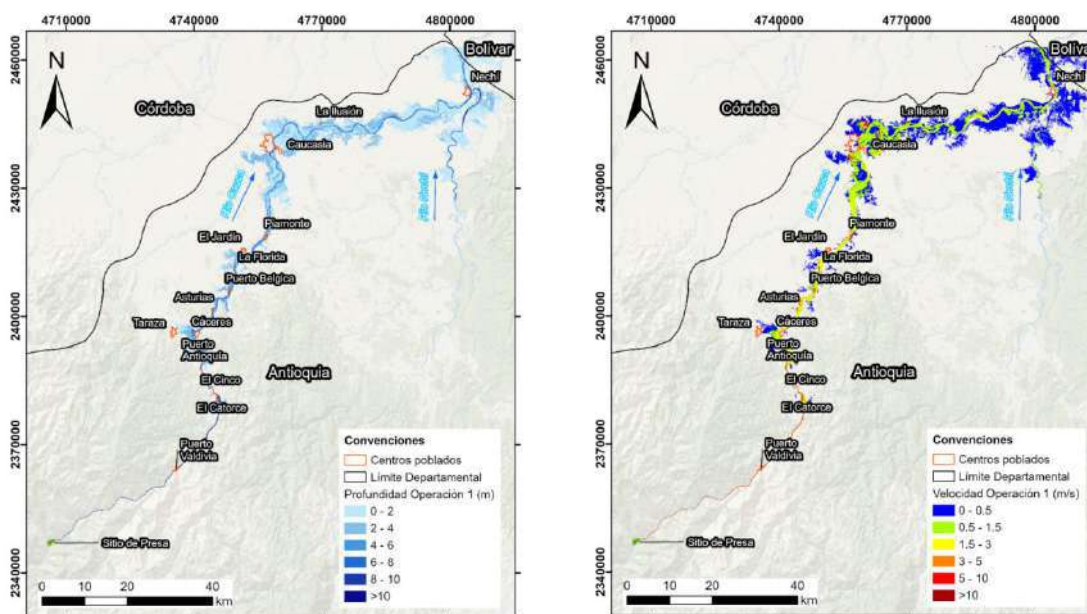


Figura 2-210 Mancha de inundación generada con una creciente de unos  $11.400 \text{ m}^3/\text{s}$  asociada con una inoperatividad de las compuertas del vertedero (que se abran y no puedan cerrarse) durante la operación del proyecto.

Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha)

Fuente: Integral S.A., 2.018

### Caso 3. Caso de sobrevertimiento por la CMP y no operación de las compuertas del vertedero, con la presa terminada – considerando sedimentos.

Según lo mencionado, el caso 3 corresponde a un sobrevertimiento de la presa, considerando el paso de la CMP, la inoperancia de las compuertas del vertedero y la influencia de los sedimentos, generando una hidrógrafa con caudal pico de  $368.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

De manera general, la Figura 2-212 da cuenta de los valores de profundidad (mapa ubicado en el costado izquierdo) y velocidad máxima (mapa ubicado en el costado izquierdo), y en la Figura 2-211 se presenta el mapa general de la amenaza generada con el rompimiento de la presa asociada con un sobrevertimiento por inoperancia de las compuertas del vertedero. Se observa que se provocaría un riesgo extremo (5) en las poblaciones desde Puerto Valdivia y Puerto Antioquia, donde se cubriría todo el casco urbano. En Cáceres y Caucasia se observa una amenaza Extrema en la mayor parte del casco urbano, y entre Extremo Muy Alto para Nechí.



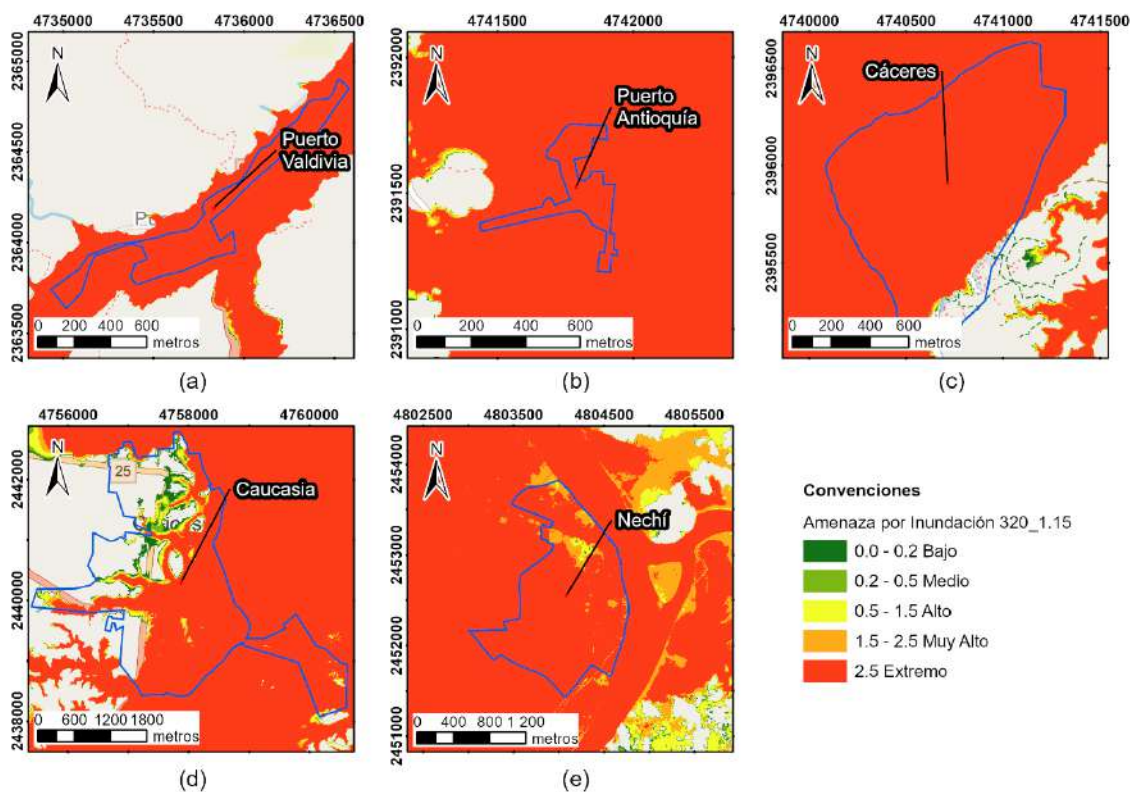


Figura 2-211 Categorización por amenaza de inundación por una creciente con caudal pico de 368.000 m<sup>3</sup>/s (Sobrevvertimiento de la CMP considerando aporte de sedimentos). en las principales zonas de interés. (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí.

Fuente: Integral S.A., 2.018

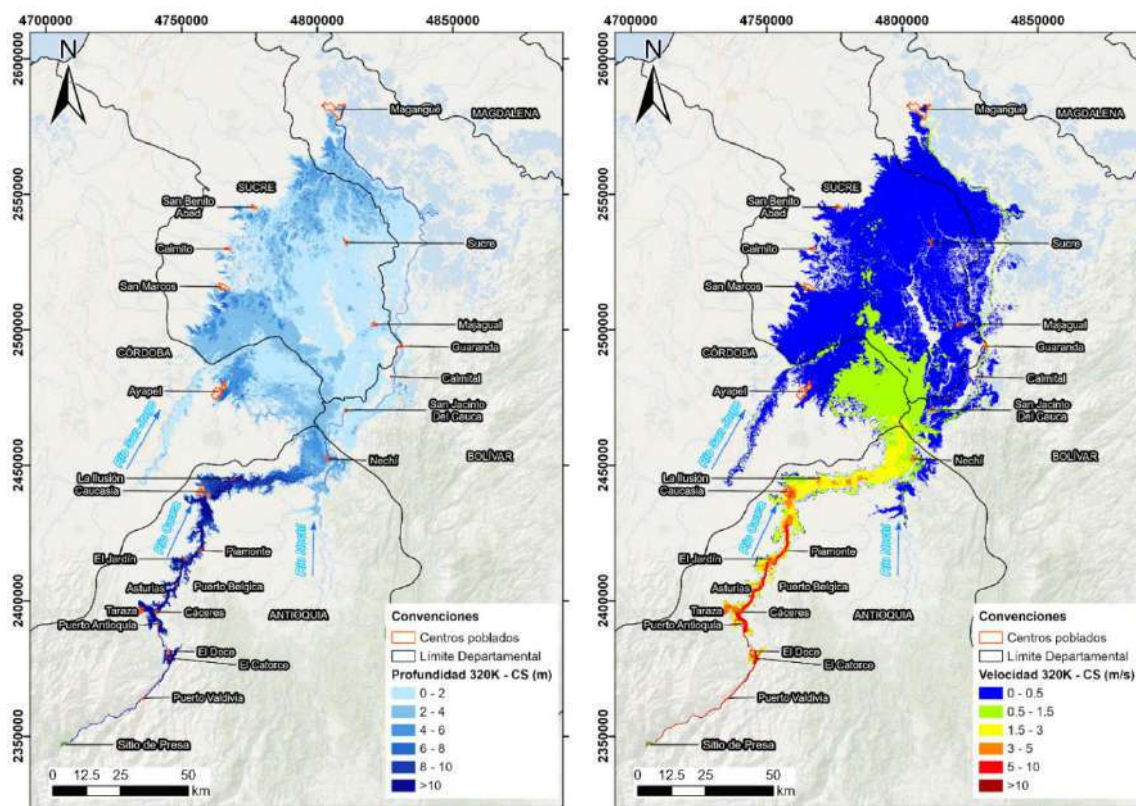


Figura 2-212 Mancha de inundación generada con caudal pico de 368.000 m<sup>3</sup>/s (Sobreventimiento de la CMP considerando aporte de sedimentos). Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha)

Fuente: Integral S.A., 2.018

#### 2.2.4.9.4 Inundación en la casa de máquinas por la Descarga 3

Para facilitar las labores de inspección, estabilización y recuperación de las obras subterráneas se ha establecido como prioritario mantener habilitado un acceso hacia el complejo de cavernas a través de la Descarga N°3. Sin embargo, este acceso tiene el riesgo de que un caudal alto del río, que supere la cota de la vía por la cual se ingresa al complejo de cavernas, podría inundar la casa de máquinas; situación por la cual se tiene preciso hacer una clausura del portal de salida de dicha descarga mediante la instalación de tableros metálicos y lleno, que serán ejecutados en caso de advertirse un caudal del río que pueda poner en riesgo de inundación el complejo de cavernas.

Actualmente las Descargas N°1 y N°2 cuentan con un muro de protección hasta las cota 235 m.s.n.m. que incluye además un pequeño muro parapeto que, en principio, permiten el paso de la creciente de 500 años de período de retorno sin inundar la casa de máquinas; no obstante, con el acceso habilitado al complejo por la Descarga N°3 esta protección tuvo que ser demolida parcialmente, adecuándose un muro con cresta en la cota 230 m.s.n.m. que, en términos teóricos, protege para una creciente de 25 años, y en caso de que la creciente sea

mayor se procedería al cierre – con tableros previamente dispuestos en la zona – del portal de salida. Ahora, esta creciente puede presentarse de manera natural en el río; no obstante, una falla en los terraplenes del dique de protección (cota 230 m.s.n.m.), no poder iniciar con la ejecución de los trabajos de recuperación del lecho del río que, de haberse ejecutado, se tendría un nivel de protección más alto en este momento, un destaponamiento del TDD o estrangulamientos excesivos durante el proceso de recuperación del cauce del río, podrían generar que se presente una inundación en el complejo. Por lo que, finalmente, el riesgo se encontraría en la amenaza asociada con que, debido a una inundación de la Casa de Máquinas **se retrase la entrada en operación del P. H. Ituango.**

#### A. Casos de análisis

Según lo mencionado, una inundación progresiva de las cavernas sin mayor velocidad de flujo (almenara, casa de máquinas y transformadores) hasta nivelarse con la cota del nivel del agua del río, podría generar retrasos en la puesta en operación del proyecto. Por lo tanto, en caso de que no se pueda realizar el cierre oportuno de los tableros dispuestos en la Descarga N°3, solo se contaría con las protecciones del río por lo que, si se inunda por sobrepaso del dique en la 230 m.s.n.m., el nivel de inundación podrá alcanzar dicha cota, y si es por sobrepaso del jarillón de concreto, podría alcanzar la cota 235 m.s.n.m., quedando prácticamente anegadas las cavernas, ya que el techo de está en la cota de 240 m.s.n.m.

#### B. Procedimiento de cierre de la Descarga 3

En el acceso al complejo de cavernas por la salida de la Descarga N°3 se tiene implementado con una vía en rampa, que parte del dique de protección, con una pendiente del 17.0 %, y se introduce hacia el túnel de descarga. Para evitar que el agua del río – durante caudales altos que aumenten el nivel de las descargas a una cota cerca o superior al período de retorno considerado en diseño – pueda ingresar a la casa de máquinas, se ha establecido que se deben instalar los tableros y colocar un lleno aguas arriba de estos antes de que el agua rebase el nivel de protección previsto en esta zona.

Para este cierre se indagó al Contratista (CCI) el tiempo en el cual podría realizar el cierre de la Descarga N°3. Teóricamente, cada Stop-Log se demora 30 minutos en posicionarse sobre la estructura de salida, por lo que el total de 14 Stop-Logs equivaldría a un tiempo aproximado de 7 horas con el personal de transporte de EPM. No obstante, teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la instalación de los tableros de la compuerta auxiliar en la estructura de cierre de la Descarga 3 el día 18 de mayo de 2.021 (realizada como medida de protección ante de una creciente del río Cauca y una descarga del vertedero de gran caudal, con el fin de proteger la casa de máquinas debido a la vulnerabilidad en las obras de protección), se encontró que para la realización de esta actividad se tomó un tiempo de alrededor de unas 22 horas (desde las las 3:19 a.m. del 18 de mayo de 2.021 en que EPM emite la orden de inicio del protocolo de cierre de la descarga 3 hasta las 00:30 a.m. del 19 de mayo de 2.021 en que fue instalado el último tablón – tablón 24 –, con lo cual se bloqueó el túnel de descarga 3 hasta la cota 234,30 m.s.n.m.), contemplando el tiempo, no solo del cierre de los tableros sino desde la

activación del protocolo de cierre. Lo anterior tiene – a grandes rasgos - las siguientes actividades: Desde la activación del protocolo de cierre de la Descarga 3 se suspenden las operaciones de acceso de personal y equipo por esta vía, se retiran los prefabricados de concreto de la vía y se realiza limpieza del material de relleno sobre el tablón superior para garantizar un correcto asiento y sello de los demás tablonos sobre este; una vez concluida la limpieza sobre el último tablón preinstalado se inicia con el amarre, izado y descenso de los tablonos desde el número 8 hasta el número 25; en cada tablón se instalan polines de madera entre la estructura de cierre y el tablón, con el fin de comprimir los sellos contra el marco de sellado y así minimizar las fugas que se puedan presentar en la compuerta; y, una vez finalizada la instalación de los tablonos, se procede a instalar un geotextil en el costado aguas abajo de la compuerta auxiliar de cierre, empezando en la vía industrial y cubriendo los tablonos de cierre número 8 a número 14 con material (con el fin de hacer un sello adicional para evitar filtraciones de agua a través de los tablonos).

### C. Análisis de la amenaza

La estimación de la probabilidad es la posibilidad de ocurrencia de un riesgo. Para la elaboración de la matriz de riesgos se define una escala numérica que permite representar la frecuencia con la cual se podrían materializar los mismos, que afectarían el desarrollo del proyecto. A continuación, se presenta la escala de probabilidad utilizada en el presente análisis, revisada en el documento Escenarios de riesgo que generan una posible inundación de la Casa de Máquinas, que se presenta en el Anexo VEC-Anexo09\_I-I-2194-PHI-060-ENE-RIE-001 (ver Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A10).

Tabla 2-63 Escala de Probabilidad de ocurrencia de EPM.

Valor	Clasificación	Probabilidad de ocurrencia	Descripción
5	Muy alta	Mayor del 84%	El evento ocurre permanentemente
4	Alta	50,1% - 84%	El evento se presenta con cierta regularidad. Ocurre muchas veces
3	Media	16,1% - 50%	Evento que se presenta en forma esporádica. Ocurre varias veces.
2	Baja	2,1% - 16%	Evento no habitual. Poco frecuente
1	Muy baja	Menor o igual al 2%	Evento que ocurre en forma excepcional. Muy difícil que ocurra

Fuente: EPM, 2.020.

En cuanto a los diferentes escenarios que pueden presentarse para inundar la casa de máquinas a través de la Descarga N°3 se presentan a continuación:

La Probabilidad de inundación por la Descarga N°3 depende de una creciente de 25 años de periodo de retorno, y que además no se cierren los tableros con anterioridad, lo que genera una probabilidad menor al 2% (muy baja).

La Probabilidad de que se inunde por los jarillones de concreto (en la cota 235 m.s.n.m.) es de 1/500 (una creciente de 500 años de período de retorno), la cual sigue siendo menor al 2% (muy baja).

La Probabilidad de destaponamiento del TDD también se estimó como muy baja; además, se procedería a cerrar el caudal evacuado por el vertedero (una vez se esté descargando un caudal de unos 1000 m<sup>3</sup>/s por el TDD), y así poder disminuir el mismo en las descargas.

La Probabilidad de erosión del dique se estima como muy baja, dado que se hace un seguimiento permanente de su estabilidad. En caso de identificarse deterioros que comprometan su estabilidad y que no sea posible controlarla, se procedería a cerrar los tableros de la Descarga 3.

### **Probabilidad de que no puedan cerrarse los tableros oportunamente.**

Con relación a los “*stop-logs*” dispuestos a la salida del túnel de Descarga N°3 (y en los otros portales similares), las fallas operacionales para el cierre de estos portales están más relacionadas con eventuales problemas o dificultades que pudieran presentarse durante la instalación de estos. Estos problemas podrían estar más relacionados con la falta de disponibilidad oportuna de una grúa móvil apropiada para el manejo y disposición de los módulos de los “*stop logs*”, la adecuación del terreno para permitir el acercamiento de la grúa móvil con sus accesorios o un mal manejo de los componentes. Así mismo, debe asegurarse la limpieza previa del canal de descarga para asegurar la correcta instalación del módulo inferior.

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta es la protección de los sellos de los “*stop logs*” durante los períodos de almacenamiento para evitar su deterioro, por lo cual debe efectuarse una revisión previa de los mismos, con suficiente anticipación, y disponer de los repuestos necesarios.

Adicionalmente, debe tenerse en cuenta y analizarse, especialmente para la protección de la casa de máquinas, son los niveles máximos del río que pudieran presentarse en caso de crecientes, que pudieran sobrepasar la altura máxima de los “*stop logs*”, en cuyo caso el agua podría ingresar por la parte superior al túnel de descarga, a la almenara 2, e incluso hasta la casa de máquinas si, en dicho momento, las compuertas de los tubos de aspiración de las unidades 5 a 8 aún no han sido instaladas. En caso de presentarse esta situación, sería otra catástrofe para la casa de máquinas, por lo cual no puede permitirse. Debe tenerse en cuenta que es probable que aún persista parte del problema de la recuperación de los niveles del río para asegurar la reducción de los niveles en la descarga.

#### **D. Análisis de resultados y caracterización de la amenaza**

Según lo mencionado, esta amenaza está asociada con el cierre oportuno de los tableros de la descarga N°3 para evitar inundaciones de la casa de máquinas. En ese sentido, *la afectación a*



*las comunidades se asocia con un retraso en las actividades realizadas en el proyecto y su puesta en operación.*

Actualmente, y con base en lo dicho anteriormente, el acceso a la recuperación del sistema de la casa de máquinas, túneles de descarga, GAD y demás galerías asociadas se realiza por la vía de descarga N°3, la cual se encuentra protegida por el jarillón de protección de las descargas, que abarca desde la descarga N°1 hasta la ventana auxiliar de construcción. Este jarillón, justo al frente de la descarga N°3, se encuentra localizado hasta la cota 231 m.s.n.m., equivalente a una creciente con periodo de retorno de 25 años con un borde libre de 1,0 m.

En caso de presentarse una creciente igual o superior a la mencionada, deberán instalarse los tableros de protección – *stop logs*- en la estructura de salida de la descarga N°3. Ahora bien, si se considera el escenario de que los mismos fallasen o hubiese un retraso en la puesta de estos que obligue a evacuar, se podrá presentar inundaciones en el complejo de cavernas que involucran los túneles de descarga, la GAD, almenaras, caverna de casa de máquinas, caverna de transformadores, galerías de construcción túneles de conducción inferiores, entre otros.

Ahora, incluso cuando el proyecto comience a operar con las unidades 1 a 4 es posible una inundación del complejo por las Descargas N°3 y N°4 en la zona sur y la almenara 2, a través de los tubos de aspiración, y que solo se controlará cuando estén en operación las 8 unidades. No obstante, a medida que pasa el tiempo y empiecen a operar más unidades, la probabilidad de que este evento ocurre disminuirá y será más controlada, pero – como se mencionó – persistirá hasta tener las 8 unidades operativas.

Para evaluar el área afectada y teniendo en cuenta la cota asociada a los 25 años de periodo de retorno (230 m.s.n.m. en la descarga N°3), se proyectó dicha cota sobre toda la infraestructura asociada y que tiene conexión con la descarga N°3, de esta forma, se calcula que el área afectada es de 105.000 m<sup>2</sup> aproximadamente, tal como se presenta en las Figura 2-213 y Figura 2-214.

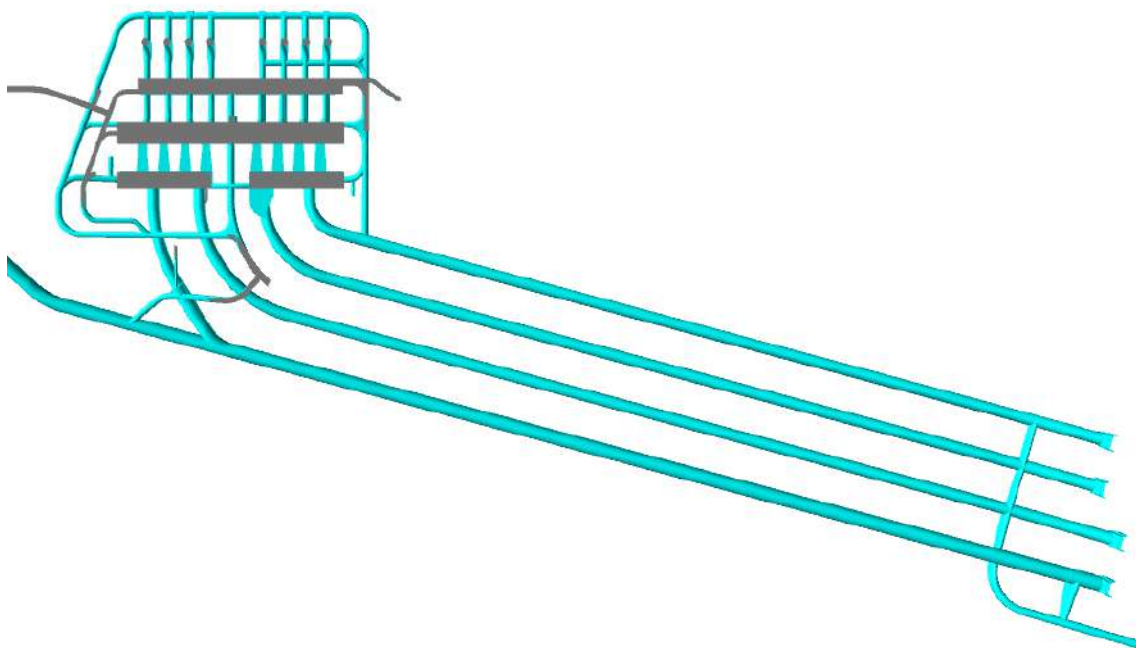


Figura 2-213 Área de afectación generada a la cota 230 m.s.n.m. – Planta.  
Fuente: Integral S.A., 2022.

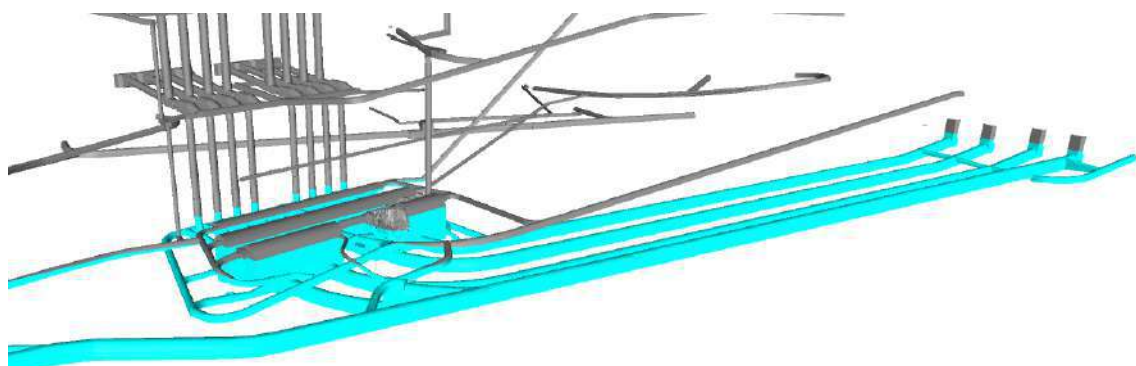


Figura 2-214 Área de afectación generada a la cota 230 m.s.n.m. – 3D.  
Fuente: Integral S.A., 2022.

#### **2.2.4.10 Caracterización de amenaza por fenómenos climáticos extremos: crecientes y sequías (río Cauca)**

Se valorará la amenaza exógena (es decir, de origen natural), relacionada las variaciones extremas de caudal, asociado con el comportamiento natural de la cuenca del río Cauca.

Con la operación del proyecto el régimen de las crecientes máximas no se verá modificado dado que se mantendrá igual que en las condiciones naturales, debido a que la operación del embalse no considera la regulación de crecientes. Lo anterior debido a que el diseño del

embalse del P. H. Ituango se considera como a filo de agua, por lo que no se generaría un amortiguamiento importante con el paso de la creciente y los efectos aguas abajo del embalse serían los mismos.

Bajo condiciones medias de caudal, puede no llegar a ser representativo el nivel de flujo en términos de amenazas sobre las poblaciones cercanas. Sin embargo, las variaciones del flujo ante eventos de creciente pueden ser incrementadas por efecto del cambio climático; aumentando la posible amenaza en función del periodo de retorno ( $T_r$ ) del evento.

La identificación de las amenazas por efecto de los eventos inundación busca determinar y delimitar aquellas zonas que pueden llegar a presentar afectación por eventos de creciente, y su correspondiente aumento en los niveles de flujo, en las corrientes cercanas. Resulta relevante además definir las zonas que mayor aporte de caudal puedan tener sobre los cursos de agua, en procura de plantear alternativas que permitan prevenir futuros eventos que puedan llegar a afectar las poblaciones e infraestructura próxima a las diferentes fuentes hídricas en el área de estudio.

Adicionalmente, históricamente, es común identificar que las poblaciones se ubican en la proximidad de alguna fuente hídrica. Esto es, por supuesto, debido a la necesidad de agua para el desarrollo de la vida. En el caso de los sistemas lénticos, el comportamiento de las corrientes varía en función de su antigüedad y de las condiciones topográficas. Cuencas asociadas a corrientes con un comportamiento torrencial dan cuenta de una, casi permanente, ausencia de flujo superficial durante la mayor parte del tiempo, pero también de eventos extremos de gran magnitud y corta duración. Estas cuencas se pueden encontrar en sistemas montañosos, con corrientes confinadas, que normalmente cuentan con un gran suministro de sedimentos (algunas veces de tamaño considerable). Por el contrario, en las zonas de menor pendiente se pueden identificar corrientes con un flujo constante de agua, con amplias llanuras de inundación, donde el suministro de sedimentos puede ser limitado, pero los eventos de creciente pueden llegar a tener un alcance lateral (perpendicular al tramo) de extensiones considerables. En estas zonas de menor pendiente es donde normalmente se desarrollan las comunidades.

Ahora, aguas arriba de embalse, pueden ocurrir variaciones en el nivel que serán mayores o menores dependiendo del estado del proyecto. En caso de la situación actual, el nivel del embalse tendrá una variación mayor, debido a que el nivel normal de operación durante este período es la cota 407,70 m.s.n.m. y con el paso de la creciente, el nivel del embalse aumentaría hasta tal punto en que se pueda descargar el volumen de agua que entró al embalse; situación que ocurriría durante la operación del proyecto, dado que – con un metro más (hasta la cota 421 m.s.n.m.) – el vertedero es capaz de transitar toda la creciente y únicamente la CMP (Creciente Máxima Probable) podría subir el embalse hasta la cota 432.50 m.s.n.m. aprox.).

Asimismo, durante las épocas de estiaje o verano que se presenten naturalmente en la cuenca del río Cauca, el P. H. Ituango y cualquier obra como tal ejecutada no debe alterar las sequías

que se presenten en el territorio; por lo que desde el proyecto se debe garantizar la continuidad del flujo con las unidades de generación y el vertedero, siendo las turbinas quienes ofrecen una mayor flexibilidad para el cumplimiento de la “Regla de Operación” y la entrega de un caudal ecológico, y que conserva en mejor medida la continuidad permanente del flujo a lo largo del río Cauca y con una calidad de aguas homogénea.

#### 2.2.4.10.1 Eventos crecientes naturales del río Cauca

Para el análisis de las crecientes naturales del río Cauca, se tienen en cuenta los efectos tanto aguas arriba como aguas abajo del embalse, donde, dependiendo del estado del proyecto (situación actual u operación) los efectos aguas arriba del embalse pueden variar, dado que, en la situación actual del proyecto, el embalse tiene mayor variabilidad (como se verá más adelante).

Para el caso de las corrientes del río Cauca, las crecientes aguas abajo de la presa pueden ocurrir como consecuencia de un caudal de tal magnitud, que sea mayor al caudal medio del río durante el periodo del año en que se esté. Estas crecientes pueden originarse por episodios de lluvia intensos de manera tal que aumenten el caudal recibido por la presa, los cuales no varían con o sin proyecto.

Con la operación del P. H. Ituango, el régimen de las crecientes máximas aguas abajo del proyecto no se verá modificado dado que se mantendrá igual que en las condiciones naturales del río Cauca, debido a que la operación del embalse no considera la regulación de crecientes. Lo anterior se debe a que el diseño del embalse del proyecto se considera como a filo de agua, por lo que no se generaría un amortiguamiento importante con el paso de la creciente de gran magnitud (en cuanto a caudal y volumen) y los efectos aguas abajo del embalse serían los mismos incluso sin el proyecto. Lo anterior se confirma con lo mostrado en la Figura 2-215, que compara las curvas de duración de caudales con y sin proyecto, y se es posible afirmar que el comportamiento en la zona de menores frecuencias es igual para ambos escenarios. Adicionalmente, con el análisis de tránsito de crecientes por el embalse se evidencia cómo el amortiguamiento de los caudales pico es mínimo (ver Tabla 2-64). Por ejemplo, en el caso del paso de la creciente de 50 años de retorno (4.700 m<sup>3</sup>/s) actualmente el vertedero descargaría unos 4.464 m<sup>3</sup>/s (236 m<sup>3</sup>/s menos que el pico de la creciente, que equivale a un amortiguamiento del 5%), mientras que, en operación no se tendría amortiguamiento de la creciente, puesto que se descargaría el caudal pico de la creciente que entra.

Aguas arriba del proyecto, con el paso de las crecientes se generan variaciones en el nivel del embalse que, en caso de la situación actual, se tendrían mayores variaciones. Por ejemplo, una creciente de 500 años inundaría hasta la cota 412,50 m.s.n.m., mientras que durante operación, y según la regla de operación del vertedero, el nivel no tiene mayor variación (hasta la cota 420 m.s.n.m. es capaz de transitar todas las crecientes y únicamente la CMP subiría hasta la cota 432,5. m.s.n.m. aprox.).

Tabla 2-64 Descarga de las crecientes de diseño por la estructura del vertedero.

Tr	Caudal máximo de entrada	Situación actual		Operación	
		Caudal máx. salida	Amort.*	Caudal máx. salida**	Amort.*
(años)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(%)	(m <sup>3</sup> /s)	(%)
2,33	2.660	2.638	99	2.660	100
10	3.716	3.587	97	3.716	100
50	4.700	4.464	95	4.700	100
100	5.126	4.847	95	5.126	100
500	6.116	5.883	96	6.116	100

\* Amort. = 1- Amortiguamiento del pico de la creciente.

\*\* El caudal máximo de salida en operación, corresponde al caudal descargado por el vertedero más la capacidad máxima de turbinación (1.350 m<sup>3</sup>/s).

Fuente: Integral S.A., 2.022.

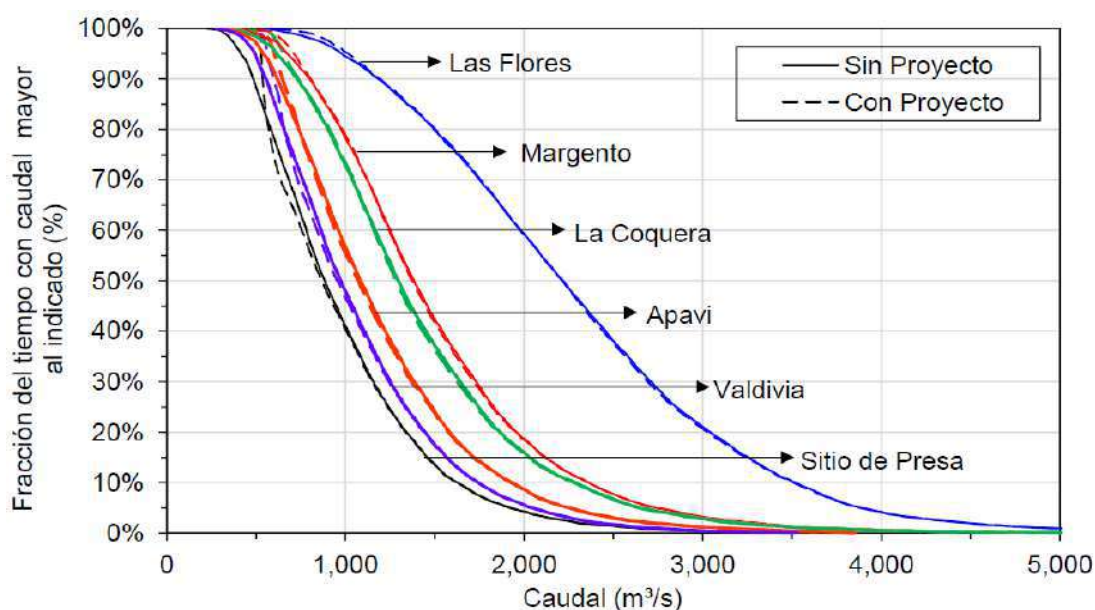


Figura 2-215 Curva de duración de caudales hacia aguas abajo del sitio de presa para la condición existente y para la operación del proyecto.

Fuente: Integral S.A., 2.016.

Ahora, adicional al análisis de crecientes realizado para el cauce del río Cauca, se evaluaron las crecientes (o inundaciones) asociadas con tributarios del río, siendo el área de análisis la asociada con regiones donde se ejecutaron obras en el proyecto. Por lo cual, se tuvo como finalidad, identificar en la zona de estudio aquellas áreas con mayor nivel amenaza por eventos de creciente sobre las fuentes hídricas (tributarias del río Cauca, según lo mencionado). El área de estudio abarca la zona del embalse desde su cola, localizada en el departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Buriticá (corregimiento La Angelina), Liborina (veredas La Sucia y Llano Grande) y Santa Fe de Antioquia (vereda Cativo), hasta aguas abajo del sitio de presa (hacia el norte por el eje del río Cauca), en las inmediaciones del corregimiento El Doce del municipio de Tarazá (Antioquia). De igual forma, se buscó delimitar



aquellas áreas cuyo aporte de caudal a las fuentes hídricas analizadas pudiera repercutir en un favorecimiento de los eventos máximos con implicaciones negativas sobre las comunidades.

El área de estudio de los tributarios donde se encuentran obras generadas por el proyecto abarca la zona del embalse desde su cola, localizada en el departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Buriticá (corregimiento La Angelina), Liborina (veredas La Sucia y Llano Grande) y Santa Fe de Antioquia (vereda Cativo), hasta aguas abajo del sitio de presa (hacia el norte por el eje del río Cauca), en las inmediaciones del corregimiento El Doce del municipio de Tarazá (Antioquia).

#### A. Evaluación de las crecientes naturales del río Cauca

##### 1) Casos de análisis

Para el análisis de las crecientes naturales del río Cauca, se simularon los comportamientos hidráulicos de las crecientes naturales asociadas a los periodos de retorno de 2,33, 50, 100 y 500 años aguas abajo del proyecto que, como se mencionó anteriormente, los efectos no varían debido a que el amortiguamiento por el embalse es mínimo. Ahora, de la presa hacia aguas arriba, el embalse genera aumentos de nivel durante el tránsito de las crecientes, que dependerá del nivel de operación del embalse en la situación actual y en la operación del proyecto.

En ese sentido, de manera ilustrativa, en la Tabla 2-65 se presentan los casos a analizar, donde se seleccionaron cuatro (4) de las crecientes de diseño del proyecto.

Tabla 2-65 Casos de análisis para la evaluación de las amenazas aguas arriba y aguas abajo del proyecto, por el paso de crecientes naturales del río Cauca.

Caso	Tr*	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Nivel embalse (m.s.n.m.)	
	(años)		Situación actual	Operación
1	2,33	2.660	409,00	420,40
2	50	4.700	412,50	420,84
3	100	5.126	413,30	420,88
4	500	6.116	415,00	421,08

\* Tr = Período de retorno en años.

Fuente: Integral, S.A., 2.022.

##### a) Operación durante la contingencia

En ese sentido, luego del cierre de las conducciones de casa de máquinas, cuando comenzó la operación continua del vertedero, se definió una regla de operación de las compuertas del vertedero con un nivel normal de operación del embalse en la cota 407,70 m.s.n.m. Esta última actualización de la regla de operación, la cual comenzó su aplicación entre julio de 2.019 hasta la fecha, tiene en cuenta una manipulación de las compuertas en la cual se garantiza la continuidad del flujo de aguas arriba hacia aguas abajo del embalse, protegiendo las bermas del vertedero y regulando el embalse en la cota de operación establecida (407,70 m.s.n.m.) a excepción de los eventos de crecientes donde el embalse tendría que subir para darle paso a la

misma. En ese sentido, a continuación, se presenta el funcionamiento general de la regla de operación en la situación actual del proyecto y en la Tabla 2-66 se referencia dicha regla y en la Tabla 2-67 se referencian los niveles del embalse asociados con las crecientes de diseño del proyecto.

- Para caudales inferiores a 500 m<sup>3</sup>/s la compuerta N°1 (canal izquierdo) es la única que estaría abierta, dejando pasar el agua del río a flujo libre.
- Para caudales entre 500 y 1.000 m<sup>3</sup>/s las compuertas N°2, N°3 y N°4 (canal derecho) se encuentran descargando agua desde el embalse, con las compuertas parcialmente abiertas, controlando el paso del flujo.
- Para caudales entre 1.000 y 2.000 m<sup>3</sup>/s se comienza con la apertura de la compuerta N°1, operando las cuatro compuertas del vertedero a flujo controlado.
- Para caudales mayores a 2.000 m<sup>3</sup>/s las cuatro compuertas del vertedero se abrirán por encima de la napa del flujo para que el azud trabaje a flujo libre.

Esta regla de operación se oficializó en la presentación realizada para el PMU (Puesto de Mando Unificado) celebrado el día 26 de julio de 2.019 (ver documento CCE\_A01\_2019-07-26\_PresentaciónVariables-R2), similar a la utilizada por EPM para la operación del vertedero y que continúa vigente hasta la fecha, donde en algunas oportunidades los límites de operatividad del canal derecho se llevan a valores cercanos a los 1.500 m<sup>3</sup>/s.

Tabla 2-66 Regla de operación actual del Vertedero.

Paso o secuencia	Nivel nominal embalse (m.s.n.m.)	Caudal por Vert. (m³/s)	Caudal Filtrac. (m³/s)	Caudal Total desc. (m³/s)	Delta de Q (%)	Apertura en cada una de las compuertas (m) (* FL significa flujo libre por debajo de la compuerta)				Caudal Evacuado por cada compuerta (m³/s)				Observación
						No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
1	404.00	143	20	163		5.00	0.00	0.00	0.00					Para caudales menores a 500 m³/s el agua solo pasa por el canal izquierdo (Compuerta No 1), el resto de compuertas permanece cerradas. Las variaciones de caudal serán graduales pues depender del nivel del embalse y no de la operación de compuertas.
	404.50	181	20	201		5.00	0.00	0.00	0.00					
	405.00	223	20	243		5.00	0.00	0.00	0.00					
	405.50	267	20	287		5.00	0.00	0.00	0.00					
	406.00	315	20	335		5.00	0.00	0.00	0.00					
	406.50	365	20	385		5.00	0.00	0.00	0.00					
	407.00	418	20	438		5.00	0.00	0.00	0.00					
407.50	473	20	493		5.00	0.00	0.00	0.00						
1 ó a	407.70	496	20	516	0%	5.00	0.00	0.00	0.00	496				Pasa el flujo del canal Derecho al canal al izquierdo operando simultáneamente dos compuertas a la vez. Los pasos a, b, c y d se hacen con intervalos de tiempo de 3 minutos.
	407.70	500	20	520	1%	3.80	0.00	1.70	0.00	324		176		
	407.70	507	20	527	1%	1.50	0.00	1.70	1.70	156		176	176	
	407.70	527	20	547	4%	0.00	1.70	1.70	1.70		176	176	176	
2	407.70	527	20	547	6%	0.00	1.70	1.70	1.70		176	176	176	Se manipulan las compuertas del canal derecho según el caudal objetivo que se desea evacuar anteriores.  El desfase de 0.15 m antes el nivel de apertura y cierre está definido para evitar manipulaciones continuas de la compuerta por ascenso y descenso del nivel.
	407.70	526	20	546	5%	0.00	1.70	2.00	1.70		176	205	176	
	407.70	525	20	545	5%	0.00	1.70	2.00	2.00		176	205	205	
	407.70	524	20	544	5%	0.00	2.00	2.00	2.00		205	205	205	
	407.70	523	20	543	7%	0.00	2.00	2.50	2.00		205	252	205	
	407.70	522	20	542	7%	0.00	2.50	2.50	2.50		205	252	252	
	407.70	521	20	541	8%	0.00	2.50	3.20	2.50		252	316	252	
	407.70	520	20	540	8%	0.00	2.50	3.20	3.20		252	316	316	
	407.70	519	20	539	7%	0.00	3.20	3.20	3.20		316	316	316	
	407.70	518	20	538	6%	0.00	3.20	2.50	3.20	95	316	252	316	
	407.70	517	20	537	1%	1.60	2.50	2.50	3.20	166	252	252	316	
11 ó x	407.70	978	20	998	0%	0.90	3.20	2.50	3.20	252	252	252	252	Reapertura del canal izquierdo. Los pasos x, y, z se debe hacer con intervalos de 3 minutos, operando dos compuertas a la vez.
	407.70	996	20	1006	1%	1.60	2.50	2.50	3.20	166	252	252	316	
12 ó z	407.70	1009	20	1029	7%	2.50	2.50	2.50	2.50	252	252	252	252	Se manipulan todas las compuertas del vertedero según el caudal a evacuar.
	407.70	1083	20	1103	7%	2.70	2.70	2.70	2.70	271	271	271	271	
13	407.70	1156	20	1176	7%	2.90	2.90	2.90	2.90	289	289	289	289	
	407.70	1228	20	1248	6%	3.10	3.10	3.10	3.10	307	307	307	307	
	407.70	1298	20	1318	6%	3.30	3.30	3.30	3.30	324	324	324	324	
	407.70	1366	20	1386	5%	3.50	3.50	3.50	3.50	342	342	342	342	
	407.70	1434	20	1454	5%	3.70	3.70	3.70	3.70	358	358	358	358	
	407.70	1572	20	1592	9%	5.00	5.00	5.00	5.00	496	358	358	358	
	407.70	1709	20	1729	9%	6.00	6.00	6.00	6.00	496	358	496	358	
20	407.70	1847	20	1867	8%	6.00	6.00	6.00	6.00	496	358	496	496	Se genera flujo libre en la compuerta de una en una a la vez según el cual objetivo a evacuar
	407.70	1985	20	2005	7%	6.00	6.00	6.00	6.00	496	496	496	496	
Flujo libre por la 4 compuertas	408.00	2125	20	2145		12.0	12.0	12.0	12.0	531	531	531	531	Todas las compuertas permanece abiertas alejándose de la riapa del agua para que se garantice siempre el paso del flujo libre.
	409.00	2615	20	2635		12.0	12.0	12.0	12.0	654	654	654	654	
	410.00	3141	20	3161		12.0	12.0	12.0	12.0	785	785	785	785	
	411.00	3702	20	3722		12.0	12.0	12.0	12.0	925	925	925	925	
	412.00	4295	20	4315		15.0	15.0	15.0	15.0	1074	1074	1074	1074	
	413.00	4920	20	4940		15.0	15.0	15.0	15.0	1230	1230	1230	1230	
	414.00	5575	20	5595		15.0	15.0	15.0	15.0	1394	1394	1394	1394	
	415.00	6258	20	6278		15.0	15.0	15.0	15.0	1565	1565	1565	1565	
	416.00	6968	20	6988		15.0	15.0	15.0	15.0	1742	1742	1742	1742	
	417.00	7702	20	7722		15.0	15.0	15.0	15.0	1925	1925	1925	1925	
	418.00	8459	20	8479		15.0	15.0	15.0	15.0	2115	2115	2115	2115	

Fuente: Ituango S.A., 2.019.

Tabla 2-67 Nivel del embalse durante el paso de las crecientes naturales del río Cauca en la situación actual.

Período de retorno (años)	Probabilidad de excedencia (%)	Caudal (m³/s)	Nivel del embalse (m.s.n.m.)
Caudal medio	N/A	1.000	405,0
2,33	43	2.660	409,0
5	20	3.270	410,3
10	10	3.710	411,2
25	4	4.240	411,6
50	2	4.700	412,5
100	1	5.126	413,3
500	0,2	6.116	415,0
CMP	0,0001	25.300	433,0

Fuente: Integral S.A., 2.019.

b) Operación normal del proyecto

Bajo condiciones normales de operación del proyecto, las compuertas del vertedero deben permanecer cerradas, a menos que el embalse aumente por encima del nivel máximo normal de operación (cota 420 m.s.n.m.), momento en el cual se iniciaría la operación de las compuertas radiales para dejar pasar las crecientes del río. La secuencia con la cual se deben abrir las compuertas se definió luego de evaluar el comportamiento del flujo a la salida del vertedero, buscando que el chorro lanzado desde el deflector cayera directamente sobre el pozo de aquietamiento (cuenco amortiguador) disminuyendo el tiempo de acción del flujo sobre las bermas del vertedero.

En la Tabla 2-68 se muestra la forma como se esperaba operar el vertedero mediante la secuencia de pasos para controlar las crecientes, y se define cuál sería la apertura de cada una de las cuatro compuertas en función del nivel del embalse. Si el embalse subía del nivel 420,00 m.s.n.m. a 420,04 m.s.n.m., el control ejecutará el primer paso y abre la primera compuerta 1,00 m. Si el nivel sigue subiendo se ejecutaría el siguiente paso, y así sucesivamente. En el momento en que el nivel del embalse deje de subir y por el contrario empiece a descender, los pasos se ejecutarán en forma inversa; es decir, cerrando las compuertas con la secuencia que le corresponda según el nivel del embalse. Esta información puede encontrarse de manera detallada en el anexo CCE-A02\_I-2194-PHI-042-184-AGU-ROC-0001 (ver I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A11).

Tabla 2-68 Secuencia de operación de las compuertas del vertedero en condiciones normales, con generación.

Paso	Nivel embalse (m.s.n.m.)	Caudal Vertedero (m³/s)	Caudal Turbinado (m³/s)	Caudal Total (m³/s)	Delta de Q (%)	Apertura en cada compuerta				Apertura Máxima %	Creciente evacuada (Tr)
						No. 1	No. 2	No. 3	No. 4		
0	420,00	178	1350	1528		1,0				5%	
1	420,04	266	1350	1616	6%	1,5				7%	
2	420,08	355	1350	1705	5%	2,0				9%	
3	420,12	444	1350	1794	5%	2,5				12%	
4	420,16	533	1350	1883	5%	3,0				14%	
5	420,20	622	1350	1972	5%	3,5				16%	
6	420,24	710	1350	2060	5%	4,0				19%	
7	420,28	710	1350	2060	0%	0,0	2,0	1,0	1,0	9%	
8	420,32	888	1350	2238	9%	1,0	2,0	1,0	1,0	9%	
9	420,36	1065	1350	2415	8%	2,0	2,0	1,0	1,0	9%	
10	420,40	1243	1350	2593	7%	2,0	2,0	2,0	1,0	9%	2,33
11	420,44	1421	1350	2771	7%	2,0	2,0	2,0	2,0	9%	
12	420,48	1598	1350	2948	6%	2,5	2,0	2,5	2,0	12%	
13	420,52	1776	1350	3126	6%	2,5	2,5	2,5	2,5	12%	
14	420,56	1953	1350	3303	6%	3,0	2,5	3,0	2,5	14%	
15	420,60	2131	1350	3481	5%	3,0	3,0	3,0	3,0	14%	
16	420,64	2308	1350	3658	5%	3,5	3,0	3,5	3,0	16%	10
17	420,68	2486	1350	3836	5%	3,5	3,5	3,5	3,5	16%	
18	420,72	2664	1350	4014	5%	4,0	3,5	4,0	3,5	19%	
19	420,76	2841	1350	4191	4%	4,0	4,0	4,0	4,0	19%	
20	420,80	3196	1350	4546	8%	4,5	4,5	4,5	4,5	21%	
21	420,84	3552	1350	4902	8%	5,0	5,0	5,0	5,0	23%	50
22	420,88	3907	1350	5257	7%	5,5	5,5	5,5	5,5	26%	100
23	420,92	4262	1350	5612	7%	6,0	6,0	6,0	6,0	28%	
24	420,96	4617	1350	5967	6%	6,5	6,5	6,5	6,5	30%	
25	421,00	4972	1350	6322	6%	7,0	7,0	7,0	7,0	33%	
26	421,04	5327	1350	6677	6%	7,5	7,5	7,5	7,5	35%	
27	421,08	5682	1350	7032	5%	8,0	8,0	8,0	8,0	37%	500
28	421,12	6038	1350	7388	5%	8,5	8,5	8,5	8,5	40%	
29	421,16	6393	1350	7743	5%	9,0	9,0	9,0	9,0	42%	1000
30	421,20	7103	675	7778	0%	10,0	10,0	10,0	10,0	47%	
31	421,24	7813	338	8151	5%	11,0	11,0	11,0	11,0	51%	
32	421,28	8524	169	8693	7%	12,0	12,0	12,0	12,0	56%	
33	421,32	9234	0	9234	6%	13,0	13,0	13,0	13,0	60%	
34	421,36	9944	0	9944	8%	14,0	14,0	14,0	14,0	65%	

Fuente: Integral S.A.

## 2) Análisis de resultados y caracterización de la amenaza

Empleando el modelo descrito en numerales anteriores, se simularon los eventos de crecientes naturales descritos en el numeral 1), sobre los cuales se presentan las manchas de inundación (profundidad), velocidad y amenaza hidráulica de las crecientes de 2,33, 50, 100 y 500 años.

### a) Tramo aguas abajo del proyecto



A continuación, se presentan los resultados obtenidos aguas abajo del proyecto.

### Caso 1. Creciente de 2,33 años de período de retorno.

A continuación, la Figura 2-217 da cuenta de los valores de profundidad (mapa ubicado en el costado izquierdo) y velocidad máxima (mapa ubicado en el costado izquierdo). Finalmente, en la Figura 2-216 se puede apreciar de manera espacial la amenaza por Inundación en Puerto Valdivia y otras localidades.

La amenaza es, de forma general, Extrema en el cauce principal del río Cauca y en Puerto Valdivia (con parte del de área inundada respecto al casco urbano) mientras que, para las demás localidades analizadas, no se presenta área inundada o con amenaza de inundación Baja. No obstante, siendo esta una creciete media del río, es posible evidenciar que el río Cauca se desborda habitualmente en varios sectores, en especial a partir de la cabecera municipal del municipio de Caucasia, tal y como se puede apreciar en la Figura 2-216, encontrando que, para el corregimiento del municipio de Valdivia, el caserío o centro urbano El Doce en el municipio de Tarazá y la cabecera municipal de Cáceres, la mancha de inundación permanece dentro del cauce. Caso contrario sucede con el municipio de Caucasia, donde la mancha de inundación de la creciete de 2,33 años genera afectaciones en el sector oriental, inundando parte del perímetro urbano próximo al río Cauca, producto del desborde de caños e inunda la margen izquierda de la llanura de inundación, donde se encuentran varias viviendas (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-CNA-P-010).

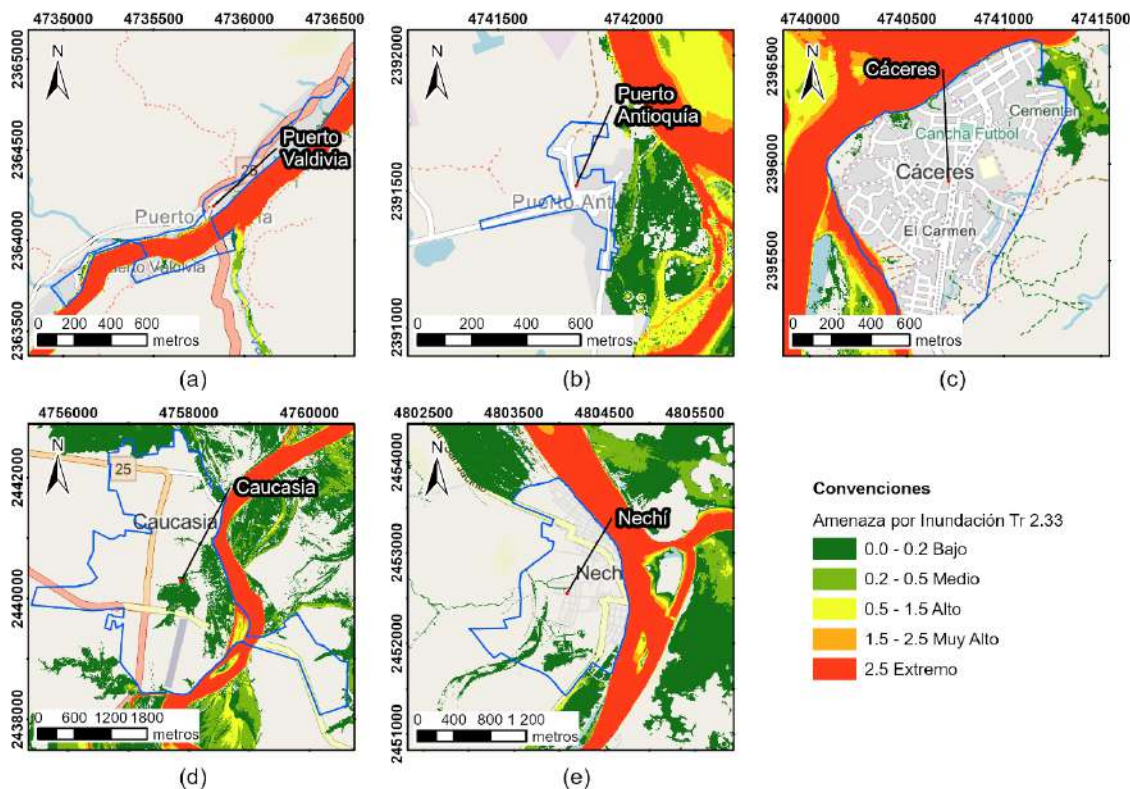


Figura 2-216 Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés.  
 (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Cauca, (e) Nechí.

Fuente: Integral S.A., 2.020.

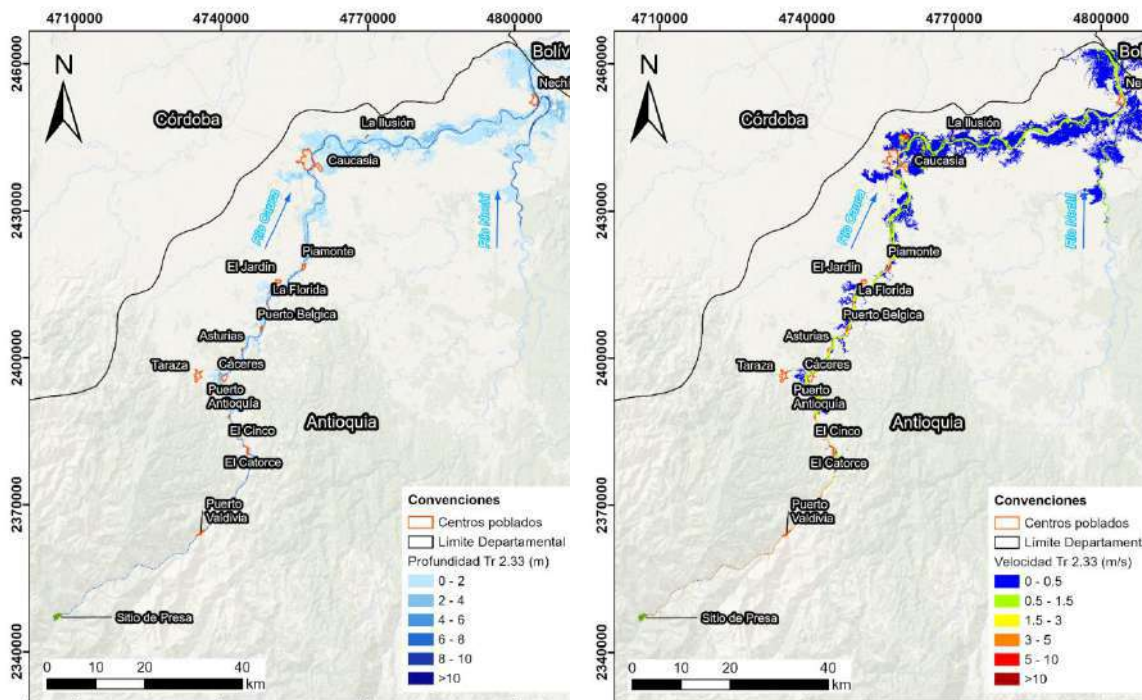


Figura 2-217 Mancha de inundación generada con caudal pico de 2.660 m<sup>3</sup>/s (Tr de 2,33 años).

Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha).

Fuente: Integral S.A., 2.020

### Caso 2. Creciente de 50 años de período de retorno.

A continuación, la Figura 2-219 da cuenta de los valores de profundidad (mapa ubicado en el costado izquierdo) y velocidad máxima (mapa ubicado en el costado izquierdo). Finalmente, en la Figura 2-218 se puede apreciar de manera espacial la amenaza por Inundación en Puerto Valdivia y otras localidades.

La amenaza es, de forma general, Extrema en el cauce principal del río Cauca y en Puerto Valdivia (con parte del de área inundada respecto al casco urbano). Es posible evidenciar para el corregimiento del municipio de Valdivia, el caserío o centro urbano El Doce en el municipio de Tarazá y la cabecera municipal de Cáceres, la mancha de inundación permanece dentro del cauce, así como el caso anterior, caso contrario sucede con los municipios de Cauca y Nechí, donde la mancha de inundación de la crecienta de 50 años genera afectaciones, inundando parte del perímetro urbano próximo al río Cauca aumentando la amenaza hasta Muy Alta en Cauca y entre Bajo y Medio para Nechí.(ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-CNB-P-010).

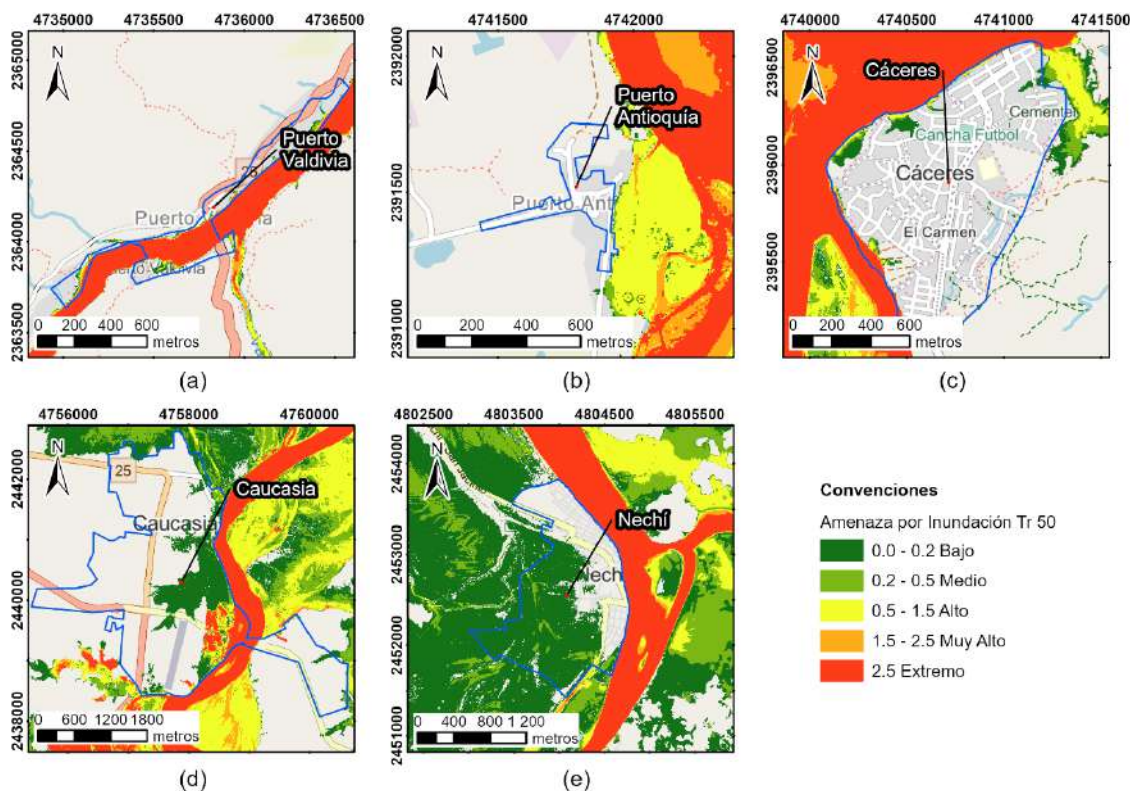


Figura 2-218 Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés.  
 (a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí.

Fuente: Integral S.A., 2.020



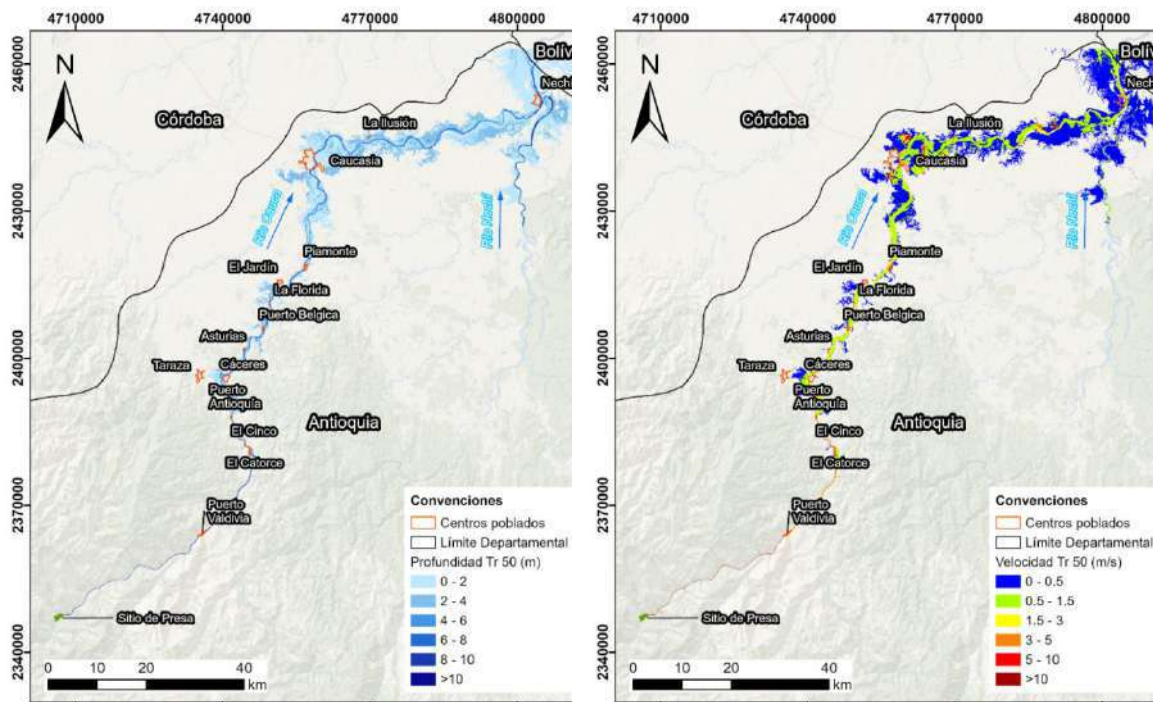


Figura 2-219 Mancha de inundación generada con caudal pico de 4.700 m<sup>3</sup>/s (asociado con una creciente de 50 años de período de retorno).  
Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha).  
Fuente: Integral S.A., 2.020

### Caso 3. Creciente de 100 años de período de retorno.

A continuación, la Figura 2-221 da cuenta de los valores de profundidad (mapa ubicado en el costado izquierdo) y velocidad máxima (mapa ubicado en el costado izquierdo). Finalmente, en la Figura 2-220 se puede apreciar de manera espacial la amenaza por Inundación en Puerto Valdivia y otras localidades.

Al igual que con las crecientes analizadas anteriormente, la amenaza es, de forma general, Extrema en el cauce principal del río Cauca y en Puerto Valdivia (con parte del de área inundada respecto al casco urbano). Los resultados son muy similares a la creciente de 50 años de período de retorno (dado que los caudales analizados son muy similares, con una diferencia de unos 400 m<sup>3</sup>/s que para la magnitud de caudal no se encuentran variaciones importantes), donde es posible evidenciar para el corregimiento del municipio de Valdivia y la cabecera municipal de Puerto Antioquia y Cáceres la mancha de inundación permanece dentro del cauce, caso contrario sucede con los municipios de Cauca y Nechí, donde la mancha de inundación de la creciente de 100 años genera afectaciones, inundando parte del perímetro urbano próximo al río Cauca aumentando la amenaza hasta Muy Alta en Cauca y entre Bajo y Medio para Nechí (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-CNC-P-010).

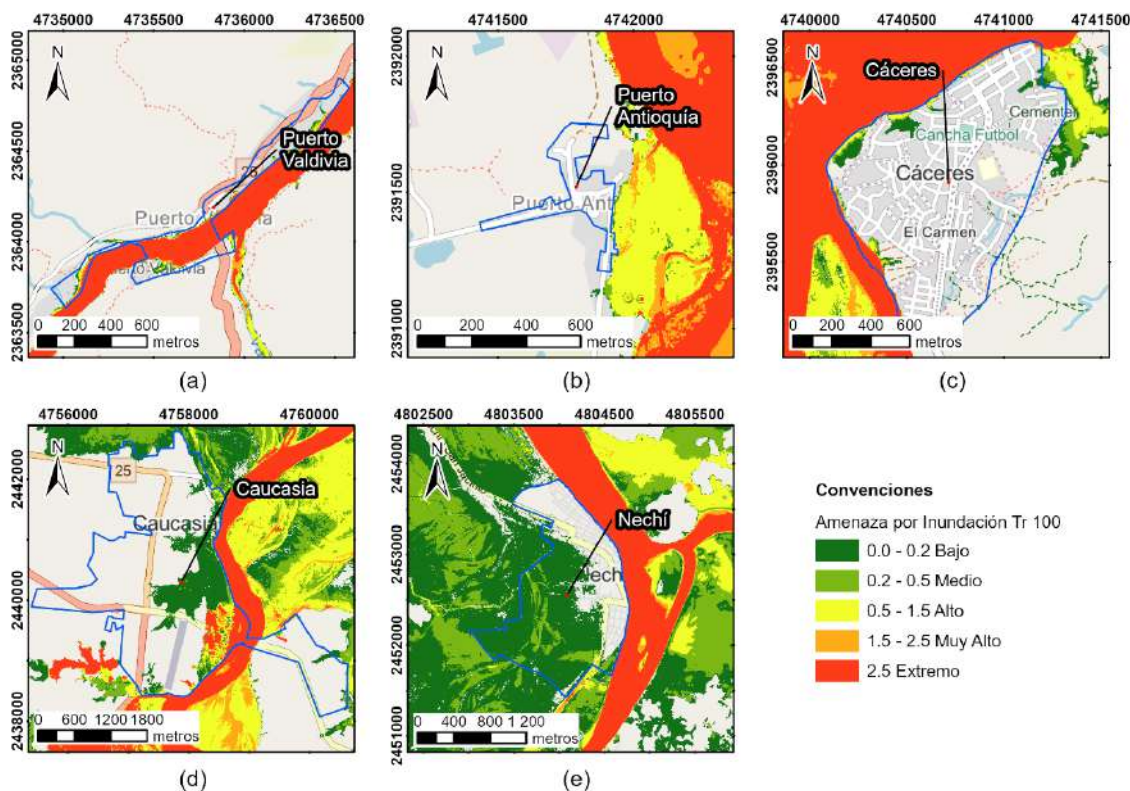


Figura 2-220 Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés.

(a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí.

Fuente: Integral S.A., 2.020



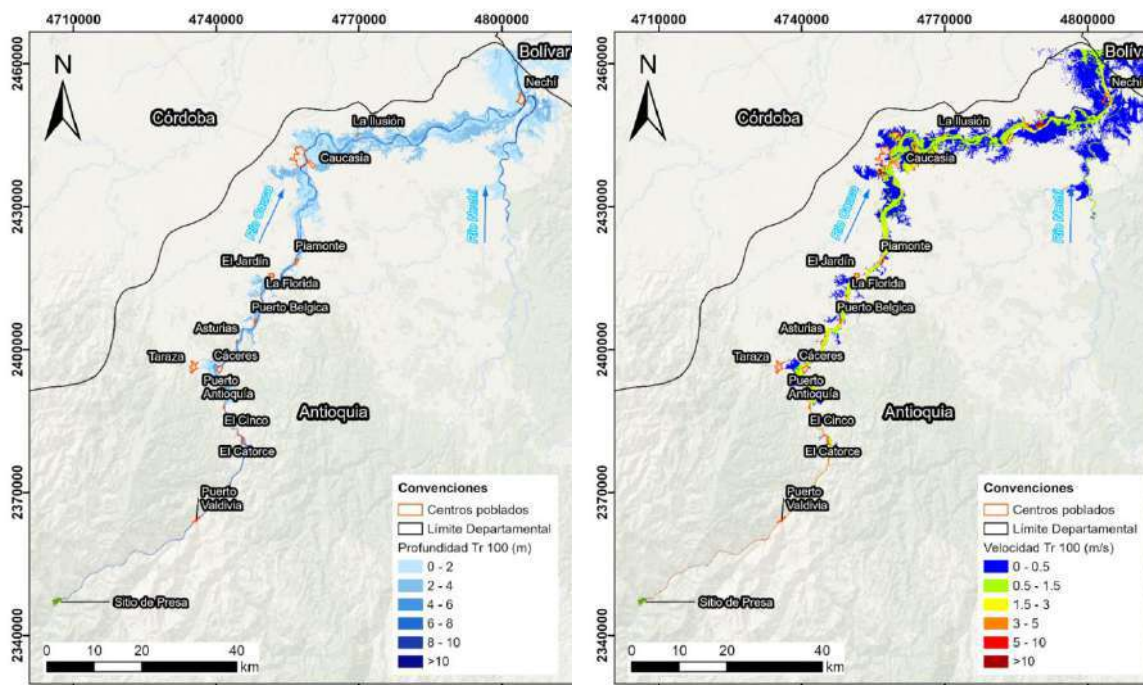


Figura 2-221 Mancha de inundación generada con caudal pico de 5.126 m<sup>3</sup>/s (asociado a la creciente de 100 años de período de retorno).

Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha).

Fuente: Integral S.A., 2.020

#### Caso 4. Creciente de 500 años de período de retorno.

A continuación, la Figura 2-223 da cuenta de los valores de profundidad (mapa ubicado en el costado izquierdo) y velocidad máxima (mapa ubicado en el costado izquierdo). Finalmente, en la Figura 2-222 se puede apreciar de manera espacial la amenaza por Inundación en Puerto Valdivia y otras localidades.

Al igual que con las crecientes analizadas anteriormente, la amenaza es, de forma general, Extrema en el cauce principal del río Cauca y en Puerto Valdivia (con gran parte del de área inundada respecto al casco urbano). Los resultados son muy similares a las crecientes anteriores aumentando un poco las áreas de inundación en las diferentes localidades, donde es posible evidenciar para el corregimiento del municipio de Valdivia y la cabecera municipal de Puerto Antioquia y Cáceres la mancha de inundación permanece dentro del cauce, aunque aumentando la amenaza a Muy Alto en la llanura de inundación de Puerto Antioquia, caso contrario sucede con los municipios de Cauca y Nechí, donde la mancha de inundación de la creciente generar afectaciones, inundando parte del perímetro urbano próximo al río Cauca aumentando la amenaza hasta Extrema en Cauca y entre Bajo y Medio para Nechí (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-CND-P-010).

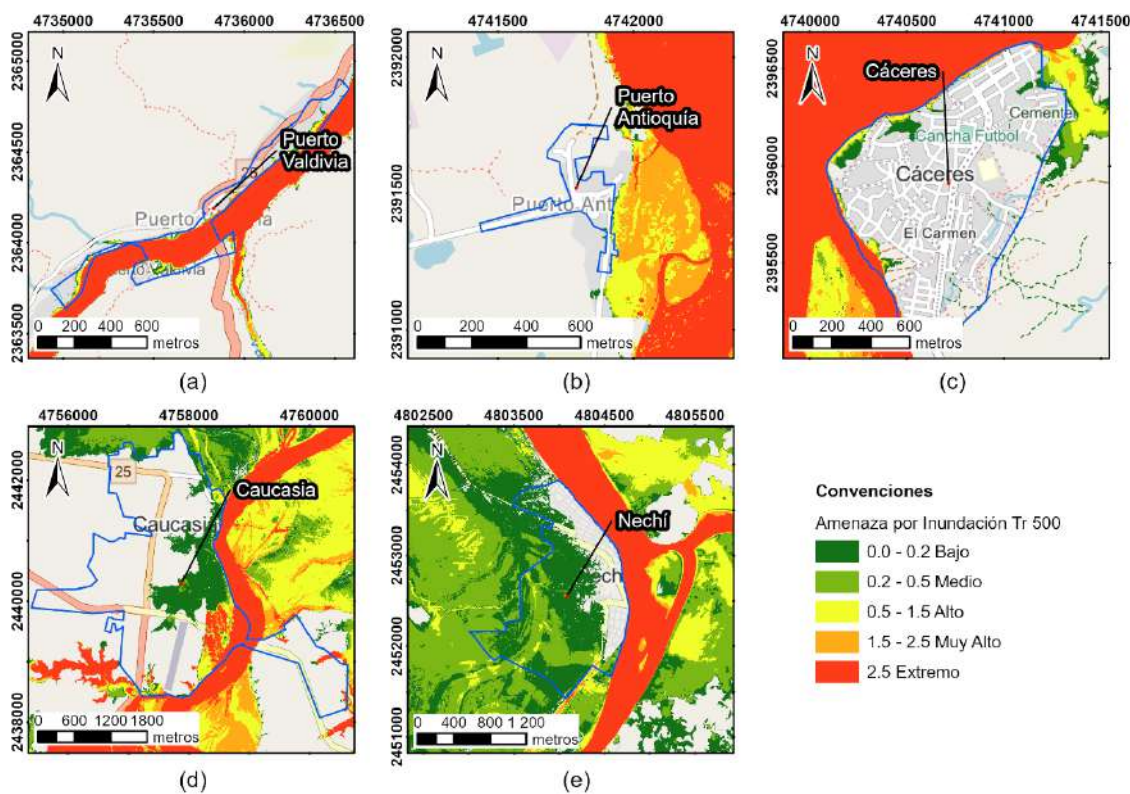


Figura 2-222 Categorización por amenaza de inundación en las principales zonas de interés.  
(a) Puerto Valdivia, (b) Puerto Antioquia, (c) Cáceres, (d) Caucasia, (e) Nechí.

Fuente: Integral S.A., 2.020

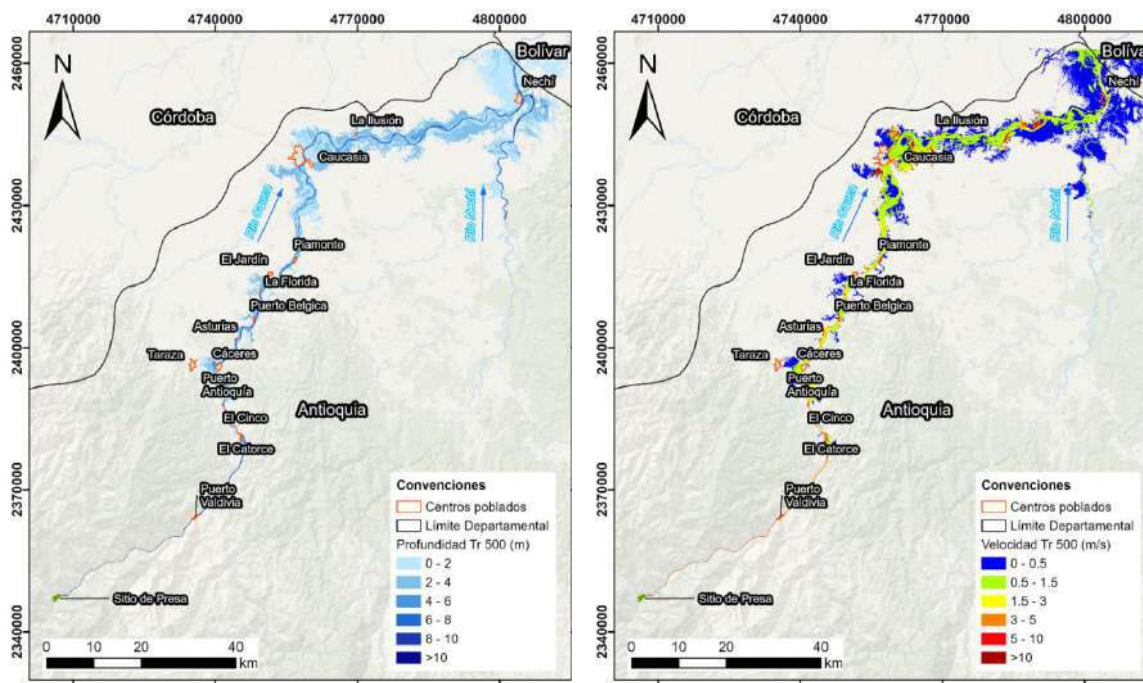


Figura 2-223 Mancha de inundación generada con caudal pico de  $6.116 \text{ m}^3/\text{s}$  (asociado a la creciente de 500 años de período de retorno).

Mapas de profundidad (izquierda) y velocidad máxima (derecha).

Fuente: Integral S.A., 2.020

#### b) Tramo aguas arriba del proyecto

Según lo mencionado, con el paso de las crecientes naturales del río Cauca no genera amortiguamiento importante del río por el embalse ni en la situación actual ni durante la operación del proyecto, por lo que las afectaciones aguas debajo de la presa, son las mismas con o sin proyecto; no obstante, estas diferencias si son considerables aguas arriba del embalse según la situación del proyecto.

En caso de la situación actual del proyecto, se asocia una variación del embalse de hasta unos 7 m entre el nivel normal de operación (cota 407,70 m.s.n.m.) y el aumento del nivel del embalse con la creciente de 500 años (que inundaría hasta la cota 415 m.s.n.m.). Mientras que, durante la operación, entre la cota de normal de operación (420 m.s.n.m.) y la de 500 años, la variación es de 1 m (cota 421,08 m.s.n.m.), por lo que, hasta la cota de operación, el embalse es capaz de transitar todas las crecientes y solo la CMP subiría hasta la cota 435,50 m.s.n.m. (como se muestra en la Figura 2-224).

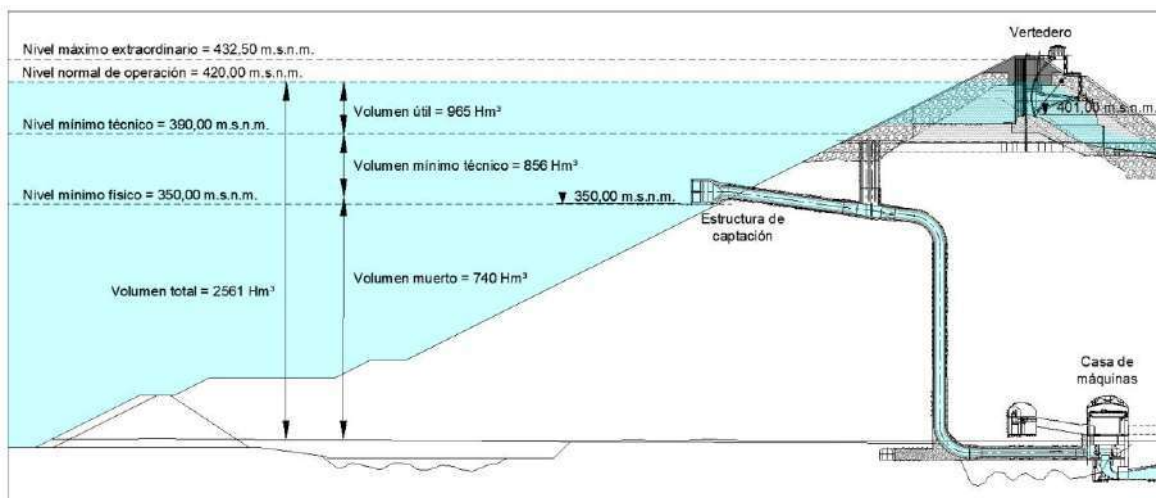


Figura 2-224 Fluctuación de los niveles del embalse durante la operación del proyecto.  
Fuente: Integral S.A.

Ahora, a continuación, se presentan en la Figura 2-225 y Figura 2-226 una comparación entre los diferentes niveles del embalse – asociados con las crecientes analizadas (2,33, 50, 100 y 500 años) – para la situación actual y durante la operación del proyecto, respectivamente. Es posible observar que durante la situación actual la variabilidad del embalse es mayor.



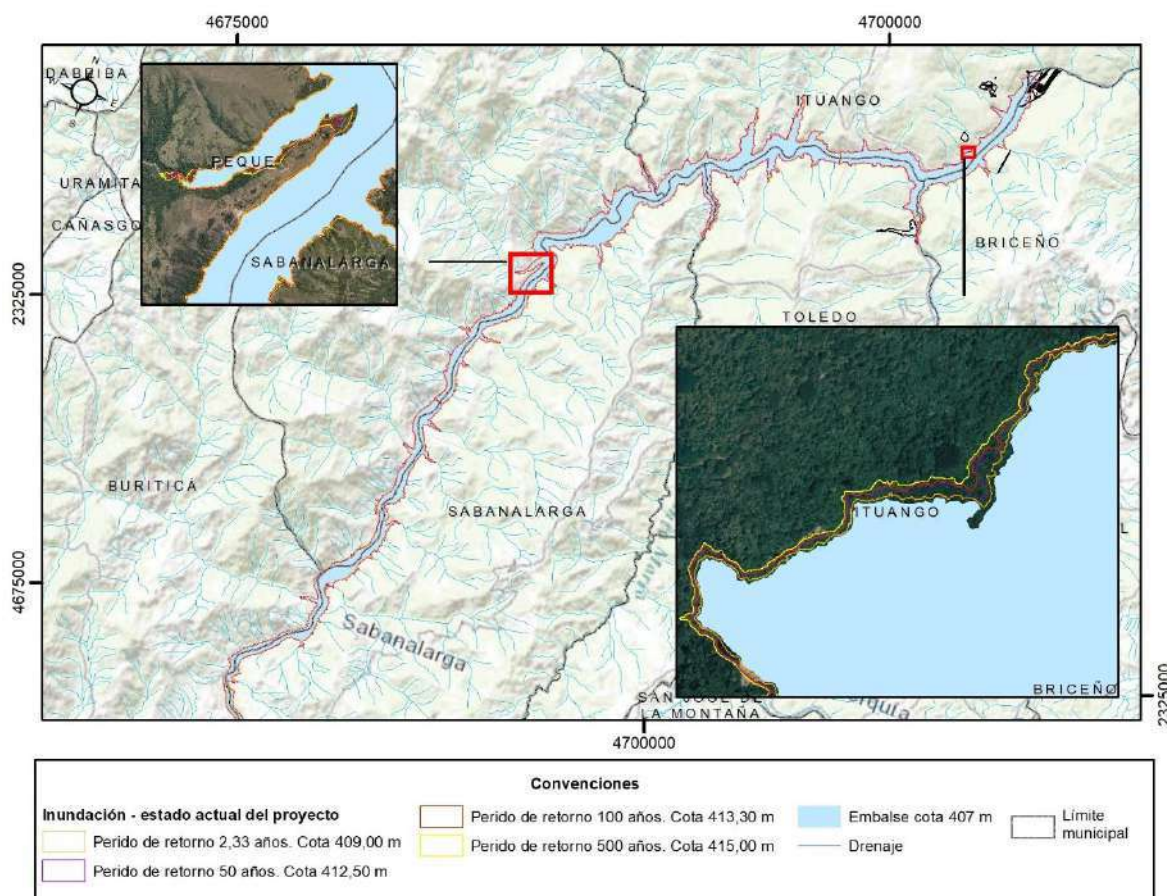


Figura 2-225 Fluctuación de los niveles del embalse durante la situación actual del proyecto.  
Fuente: Integral S.A., 2.022.



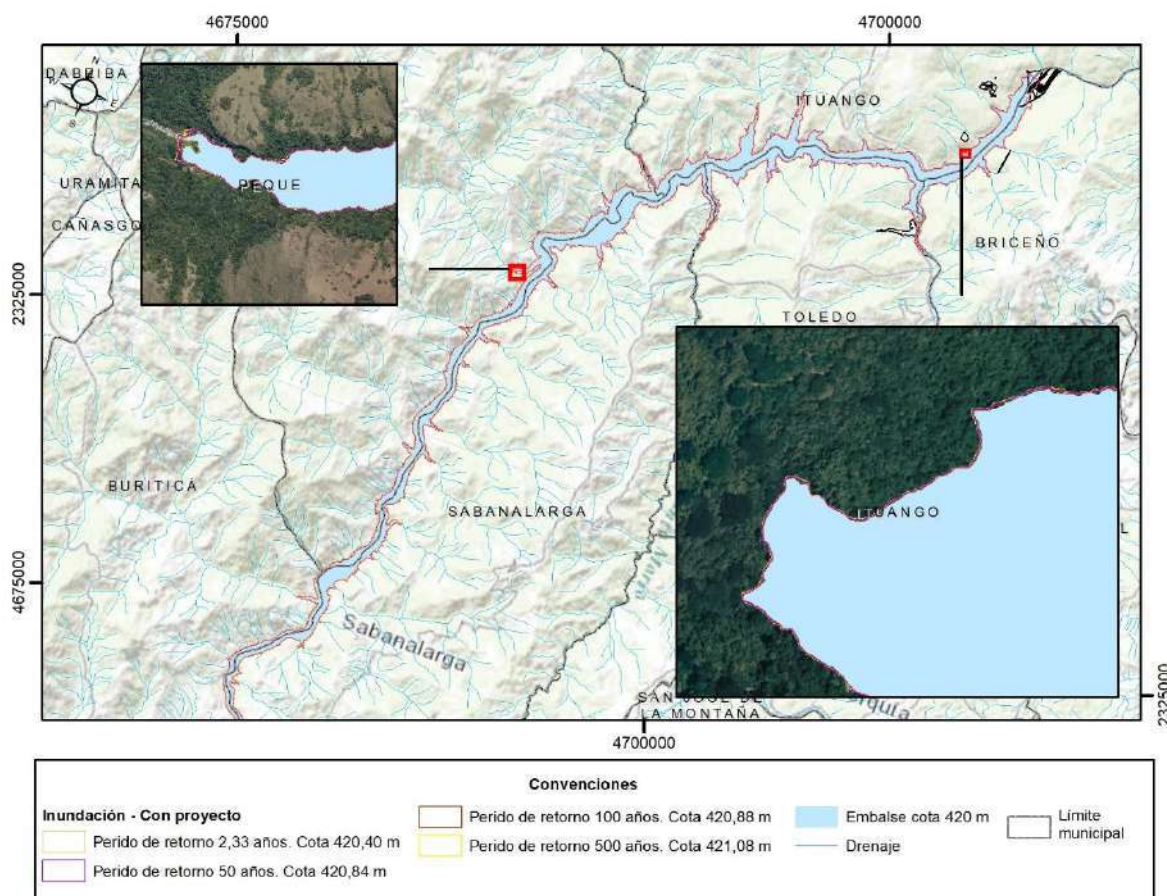


Figura 2-226 Fluctuación del nivel del embalse durante la operación del proyecto.  
Fuente: Integral S.A., 2.022.

#### 2.2.4.10.2 Amenazas por inundación en otros cauces diferentes al río Cauca durante el paso de crecientes

La identificación de las amenazas por efecto de los eventos inundación busca determinar y delimitar aquellas zonas que pueden llegar a presentar afectación por eventos de creciente, y su correspondiente aumento en los niveles de flujo, en las corrientes cercanas. Resulta relevante además definir las zonas que mayor aporte de caudal puedan tener sobre los cursos de agua, en procura de plantear alternativas que permitan prevenir futuros eventos que puedan llegar a afectar las poblaciones e infraestructura próxima a las diferentes fuentes hídricas en el área de estudio.

Según lo mencionado, el presente estudio tuvo como finalidad identificar para algunas cuencas aportantes del río Cauca en la zona de estudio aquellas áreas con mayor nivel de amenaza por eventos de creciente sobre las fuentes hídricas. Las cuencas analizadas en el área de estudio abarcan la zona del embalse desde su cola, localizada en el departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Buriticá (corregimiento La Angelina), Liborina (veredas La Sucia

y Llano Grande) y Santa Fe de Antioquia (vereda Cativo), hasta aguas abajo del sitio de presa (hacia el norte por el eje del río Cauca), en las inmediaciones del corregimiento El Doce del municipio de Tarazá (Antioquia). De igual forma, se buscó delimitar aquellas áreas cuyo aporte de caudal a las fuentes hídricas analizadas pudiera repercutir en un favorecimiento de los eventos máximos con implicaciones negativas sobre las comunidades.

En el presente estudio, se implementó la metodología propuesta en el documento “Evaluación y Zonificación de Riesgos por Avenida Torrencial, Inundación y Movimiento en Masa y Dimensionamiento de Procesos Erosivos en el Municipio de San Roque” de la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro – Nare (CORNARE) para el análisis de amenazas por inundación (CORNARE, 2012). Como resultado de la implementación de esta metodología se obtuvieron dos mapas. El primero asociado a las Zonas de Control, donde se identifican aquellas áreas que mayor aporte tienen sobre la escorrentía directa que favorece el desarrollo de eventos de creciente. El segundo mapa se asocia a las áreas amenazadas por inundaciones en la zona de estudio.

#### A. Caracterización de la zona de estudio

En este capítulo se describen algunas de las características principales de la zona de estudio. Los elementos descritos en este numeral tienen relevancia porque, como se mostrará más adelante, entrarán a hacer parte de la metodología para la delimitación de Áreas de Inundación y Zonas de Control. Para la zonificación se delimitó un área de análisis de acuerdo con la ubicación de las obras principales del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI), el embalse y un tramo aguas abajo del sitio de presa, teniendo en cuenta aspectos fisiográficos importantes, como la conformación topográfica y orientación de las vertientes aledañas al cañón del río Cauca para la zona del proyecto.

El área de análisis abarcó la zona del embalse desde su cola, localizada en el departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Buriticá (corregimiento La Angelina), Liborina (veredas La Sucia y Llano Grande) y Santa Fe de Antioquia (vereda Cativo), hasta aguas abajo del sitio de presa (hacia el norte por el eje del río Cauca), en las inmediaciones del corregimiento El Doce del municipio de Tarazá (Antioquia). También se extendió hasta las divisorias de agua de las laderas que, según su orientación, disposición fisiográfica y estructural, y morfología, conforman el cañón del río, donde los procesos de inestabilidad y su propagación inciden directamente en el área de influencia del proyecto. El área de análisis se asocia a aquellas regiones donde se ejecutaron obras en el proyecto.

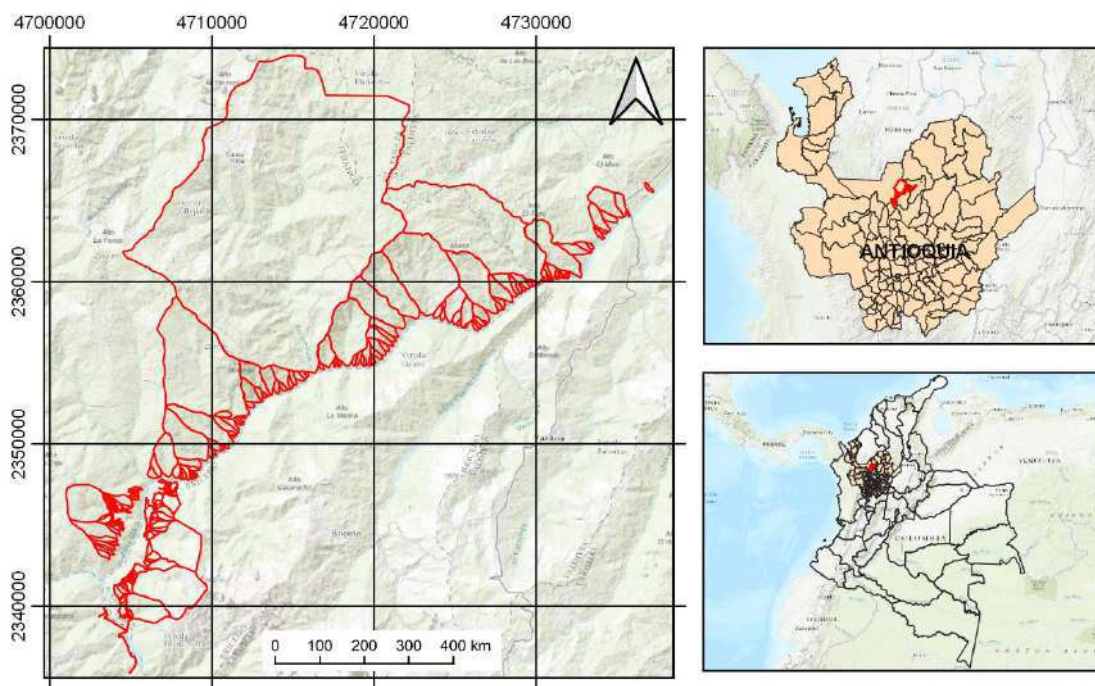


Figura 2-227 Localización general del área de estudio.  
Fuente: Integral S.A., 2.022.

Para la caracterización de la zona de estudio se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés), del satélite ALOS (“Advanced Land Observation Satellite”), el cual tiene un tamaño de píxel de 12,5 m x 12,5 m.

En el área de estudio se presentan pendientes altas con valores entre 19,29° y 36,87° (35% y 75%) en general, siendo muy dominantes pendientes mayores a los 36,87° (75%) en aquellas zonas donde se ubican las corrientes principales. La Figura 2-228 muestra las pendientes en el área de estudio.



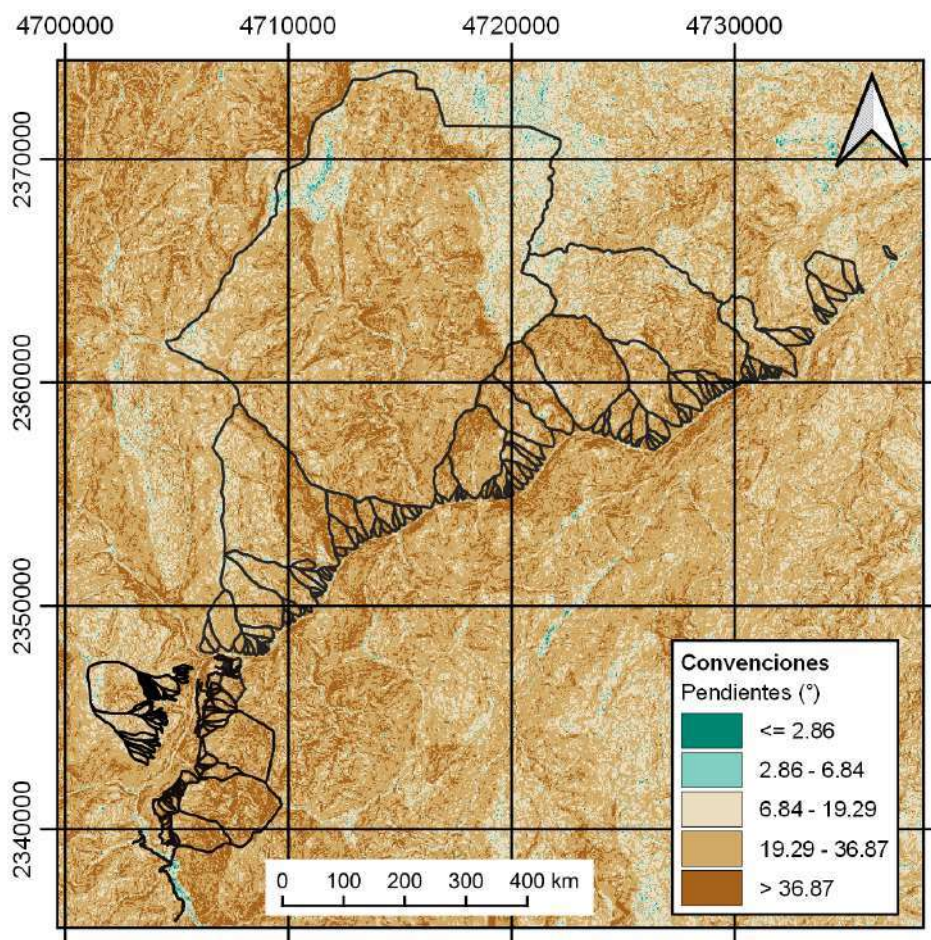


Figura 2-228 Distribución de las pendientes sobre el área de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2.022.

Para analizar la distribución de las precipitaciones sobre la región, se utilizó un mapa que da cuenta de la precipitación media total multianual

Según lo observado, en el área de estudio se registran precipitaciones que varían entre 1.665 mm y 3.792 mm anuales. En el costado nororiental se alcanzan valores que están por encima de 3.792 mm anuales, mientras que en el suroccidente las precipitaciones disminuyen, alcanzado valores por debajo de 1.665 mm anuales. La Figura 2-229 muestra la distribución anual de la precipitación en la región de analizada.

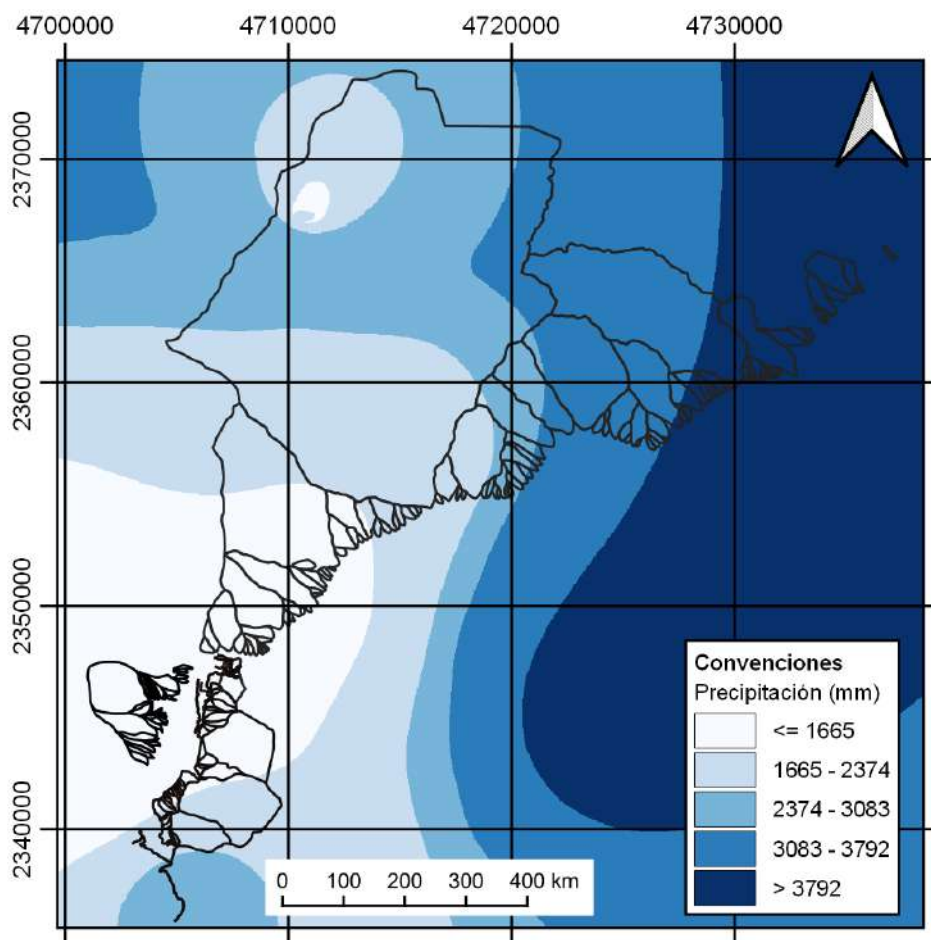
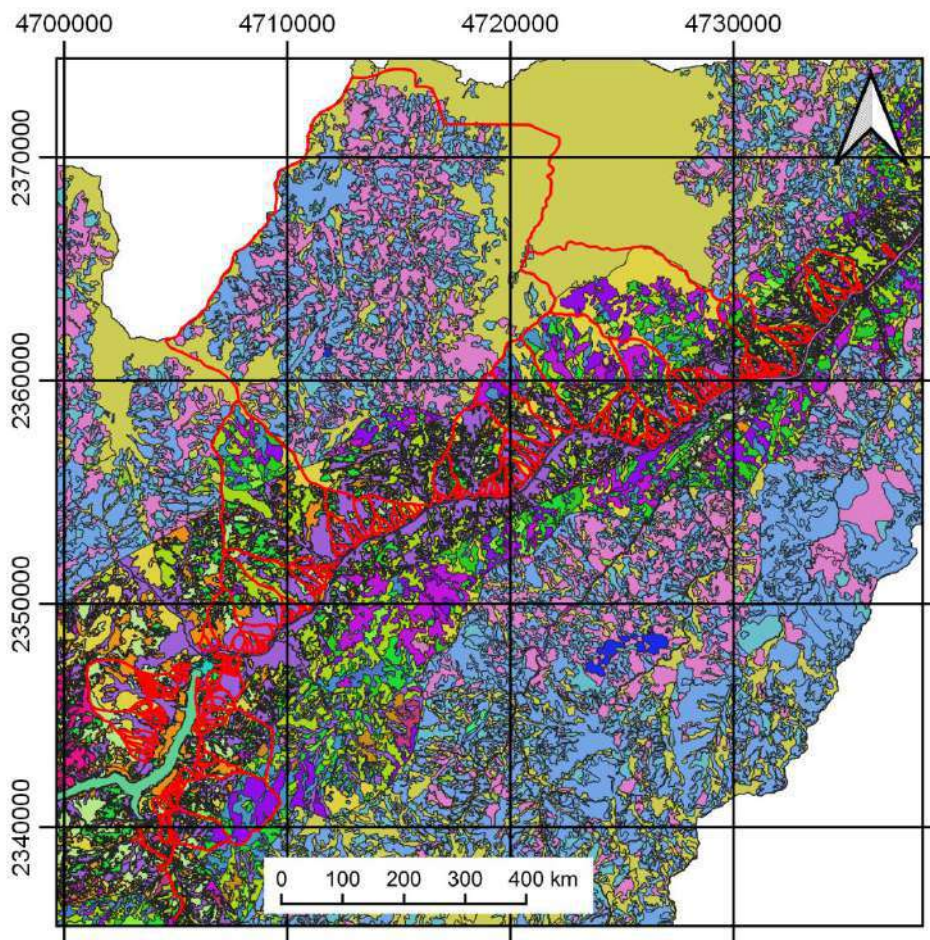


Figura 2-229 Precipitación en la zona de análisis.

Fuente: Integral S.A, 2.022.

Otro elemento de importancia en la caracterización del área de estudio tiene que ver con las coberturas del suelo, donde se cuenta con información a escala de hasta de 1:5.000, la cual fue complementada con información de levantada por Corantioquia a escala de 1:25.000 e información levantada por CartoAntioquia a escala de 1:100.000 para cubrir la zona de análisis en su totalidad. La Figura 2-230 muestra la distribución de las coberturas del suelo para el área de estudio.





#### Convenciones

<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Coberturas</li> <li>■ Afloramientos rocosos</li> <li>■ Aguas Continentales</li> <li>■ Arbustal</li> <li>■ Arbustal abierto</li> <li>■ Arbustal denso</li> <li>■ Areas Agricolas Heterogeneas</li> <li>■ Areas con Vegetacion Herbacea y Arbustiva</li> <li>■ Areas deportivas</li> <li>■ Areas Húmedas Continentales</li> <li>■ Areas Abiertas sin o con poca Vegetacion</li> <li>■ Bosque abierto</li> <li>■ Bosque de galería y/o ripario</li> <li>■ Bosque denso</li> <li>■ Bosque fragmentado</li> <li>■ Bosques</li> <li>■ Bosques naturales</li> <li>■ Café</li> <li>■ Caña</li> <li>■ Canales</li> <li>■ Citricos</li> <li>■ Coca</li> <li>■ Cuerpos de agua artificiales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Cultivos agroforestales</li> <li>■ Cultivos permanentes arbóreos</li> <li>■ Cultivos permanentes arbustivos</li> <li>■ Cultivos permanentes herbáceos</li> <li>■ Cultivos Permanentes</li> <li>■ Embalses</li> <li>■ Herbazal</li> <li>■ Herbazal denso</li> <li>■ Maíz</li> <li>■ Mosaico de cultivos</li> <li>■ Mosaico de cultivos y espacios naturales</li> <li>■ Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales</li> <li>■ Mosaico de pastos con espacios naturales</li> <li>■ Mosaico de pastos y cultivos</li> <li>■ Mosaicos agrícolas</li> <li>■ Nubes</li> <li>■ Obras hidráulicas</li> <li>■ Otra vegetacion herbacea</li> <li>■ Otros cultivos transitorios</li> <li>■ Sitios de disposición de residuos a cielo abierto</li> <li>■ Papaya</li> <li>■ Parques cementerios</li> <li>■ Pastos</li> <li>■ Pastos arbolados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pastos enmalezados</li> <li>■ Pastos limpios</li> <li>■ Plantación forestal</li> <li>■ Plátano y banano</li> <li>■ Rastrojos</li> <li>■ Red vial y territorios asociados</li> <li>■ Red vial, ferroviaria y terrenos asociados</li> <li>■ Rios (50 m)</li> <li>■ Sin información por presencia de nubes</li> <li>■ Tejido urbano continuo</li> <li>■ Tejido urbano discontinuo</li> <li>■ Tierras desnudas y degradadas</li> <li>■ Vegetación secundaria alta</li> <li>■ Vegetación secundaria baja</li> <li>■ Vegetación secundaria o en transición</li> <li>■ Zonas arenosas naturales</li> <li>■ Zonas de extracción minera</li> <li>■ Zonas de Extracción Minera y Escombreras</li> <li>■ Zonas industriales o comerciales</li> <li>■ Zonas Industriales o Comerciales y Redes de Comun*</li> <li>■ Zonas quemadas</li> <li>■ Zonas Urbanizadas</li> <li>■ Otros</li> <li>■ Cultivos Transitorios</li> </ul>
--	---	---

Figura 2-230 Coberturas del suelo de la zona de análisis.

Fuente: Integral S.A., 2.022.

## B. Resultados

Con la metodología implementada se obtuvieron dos mapas. El primero asociado a las Zonas de Control (Figura 2-236), donde se identifican aquellas áreas que mayor aporte tienen sobre la

escorrentía directa que favorece el desarrollo de eventos de creciente. El segundo mapa se asocia a las áreas amenazadas por inundaciones en la zona de estudio (Figura 2-5). A continuación, se presentan los mapas mencionados, además de las reclasificaciones previas realizadas a la obtención de estos dos mapas.

### 1) Zonas de control

La Figura 2-231 muestra las cuencas delimitadas para la estimación del Coeficiente de Compacidad. Se puede observar que la mayor parte del área de estudio presenta valores entre 1,467 y 2,390.

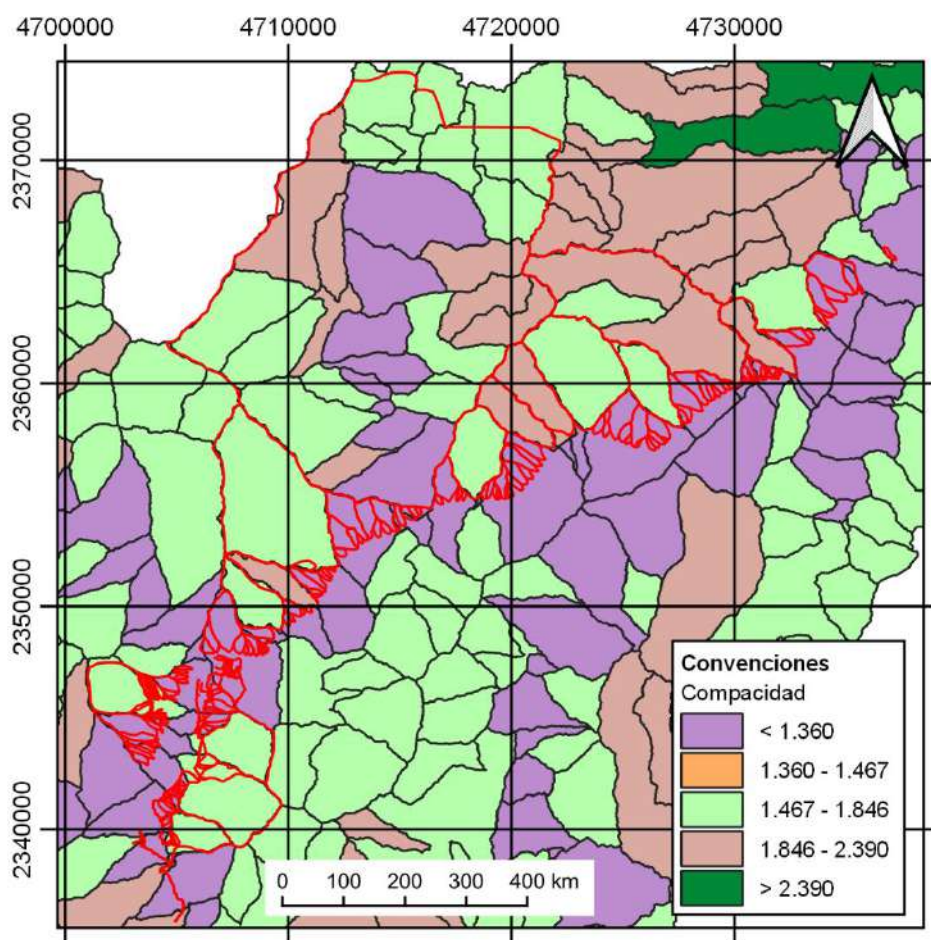


Figura 2-231 Delimitación morfométrica por tramos en la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2.022.

A continuación, la Figura 2-232 muestra la distribución del Coeficiente de Compacidad con los valores de la reclasificación.



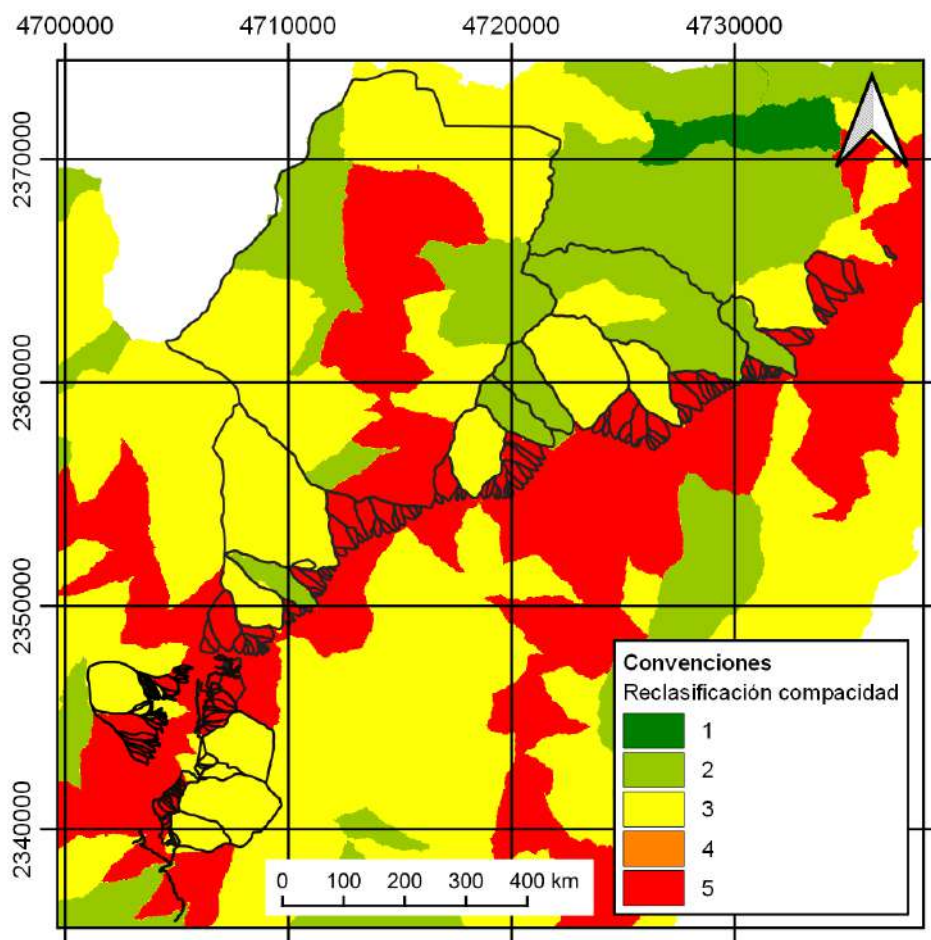


Figura 2-232 Reclasificación del coeficiente de compacidad.  
Fuente: Integral S.A., 2.022.

A continuación, la Figura 2-233 muestra la reclasificación de la pendiente.

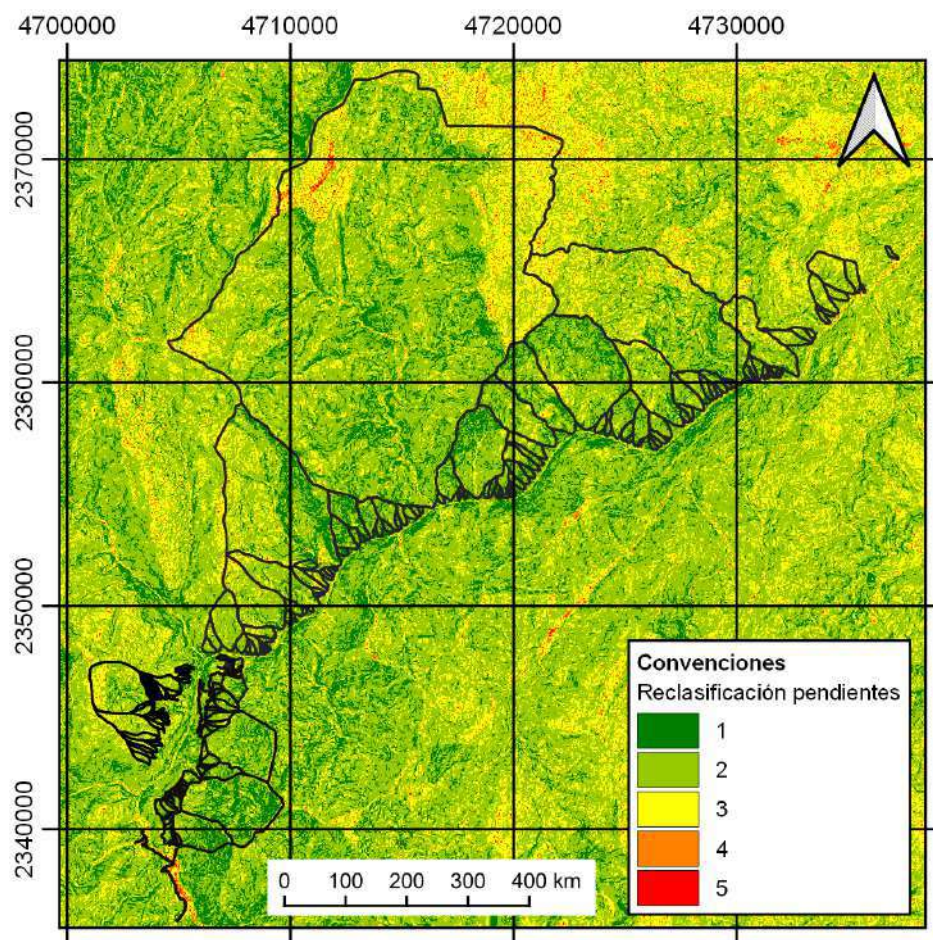


Figura 2-233 Reclasificación de la pendiente media sobre el área de estudio.  
Fuente: Integral S.A., 2.022.

La Figura 2-234 muestra la distribución de la precipitación.

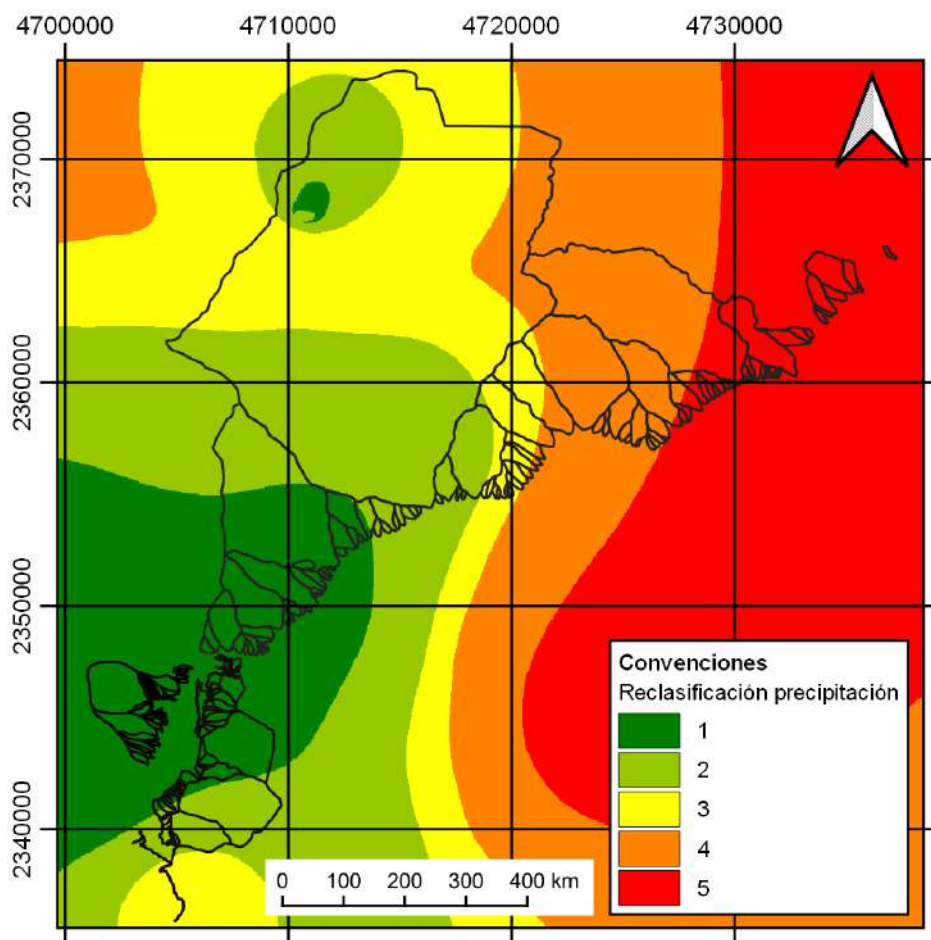


Figura 2-234 Reclasificación de la precipitación.

Fuente: Integral S.A., 2.022.

La reclasificación obtenida para la cobertura vegetal se puede observar en la Figura 2-235 y se puede concluir que una gran porción de la zona de estudio se encuentra clasificada en el valor de 2 y 3, es decir, son Áreas deportivas, Aeropuertos, Arbustal, Arbustal abierto, Arbustal denso, Arbustos matorrales, Cítricos, Caña, Café, Canales, Coca, Cultivos agroforestales, Cultivos permanentes arbóreos, Cultivos permanentes arbustivos, Cultivos permanentes herbáceos, Herbazal, Herbazal denso, Maíz - Obras hidráulicas, Otros cultivos transitorios, Papaya, Parques cementerios, Plátano y banano, Red vial y territorios asociados, Red vial, ferroviaria y terrenos asociados, Tejido urbano continuo, Tejido urbano discontinuo, Tubérculos, Vegetación esclerófila, Zonas de extracción minera, Zonas industriales o comerciales, Coníferas, Mosaico de cultivos, Mosaico de cultivos y espacios naturales, Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, Mosaico de pastos con espacios naturales, Mosaico de pastos y cultivos, otros cultivos permanentes, otros cultivos transitorios, Pastos arbolados, Pastos enmalezados, Pastos enrastrujados, Pastos limpios, Pastos Limpios manejados y Pastos no manejados, Plantación forestal.



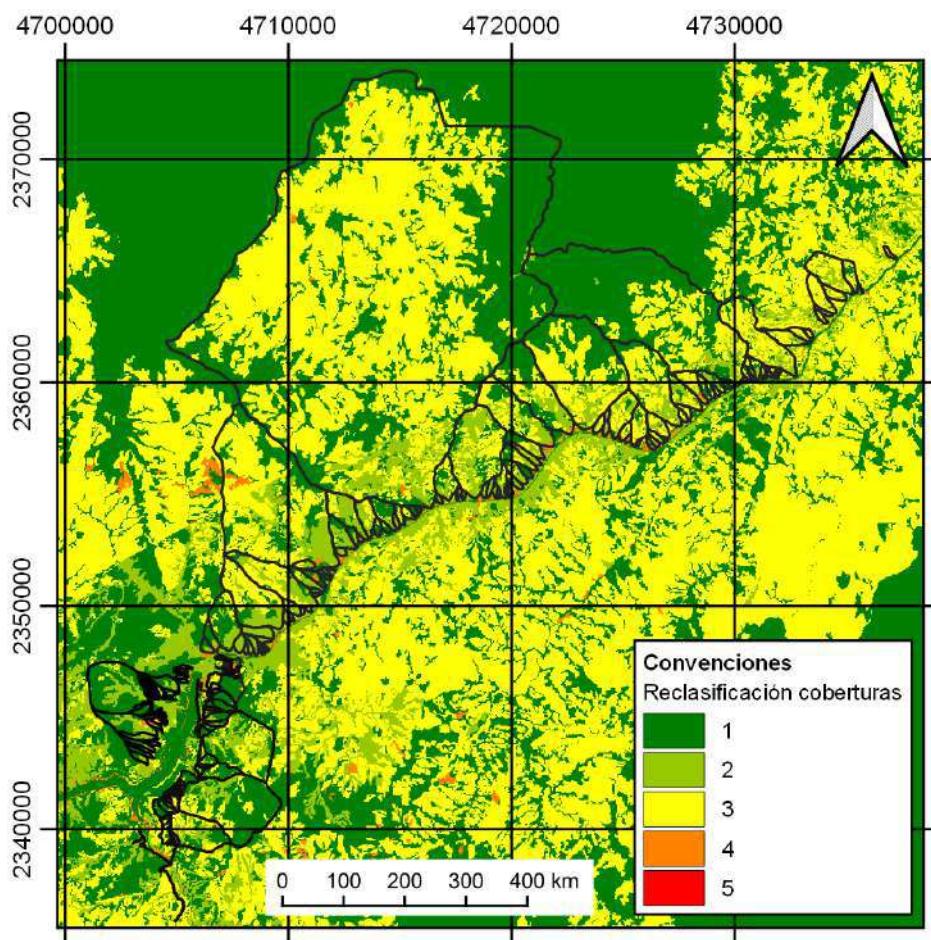


Figura 2-235 Reclasificación de las coberturas vegetales.

Fuente: Integral S.A., 2.022.

Finalmente, la Figura 2-236 muestra la distribución de las Zonas de Control para la región de estudio. Según lo presentado en la Figura 2-236, el área de estudio presenta Zonas de Control cuyo aporte a los eventos de inundación se encuentra predominantemente en un rango entre Medio y Bajo. Para algunas cuencas ubicadas en la parte sur del área de análisis, se logran identificar Zonas de Control con calificación predominantemente Alta, y donde se favorecerían los eventos de inundación.

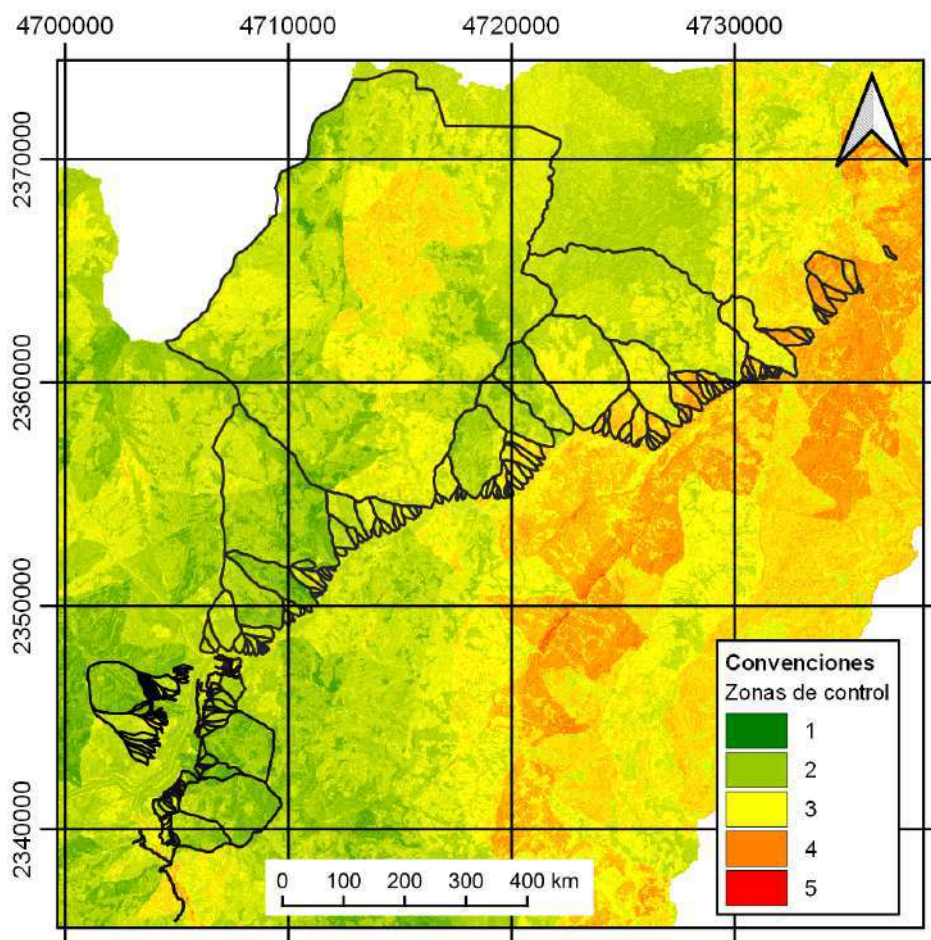


Figura 2-236 Clasificación Zonas de Control.

Fuente: Integral S.A., 2.022.

## 2) Zonas inundables

En primer lugar, la Figura 2-237 muestra la distribución de los órdenes de drenaje y sus respectivos Buffer, para la región analizada. Cabe resaltar que la red de drenaje se definió a partir del DEM utilizado en el presente estudio, el cual cuenta con un tamaño de píxel de 12,5 m. Para cada tramo de la red de drenaje, se realizó un Buffer.



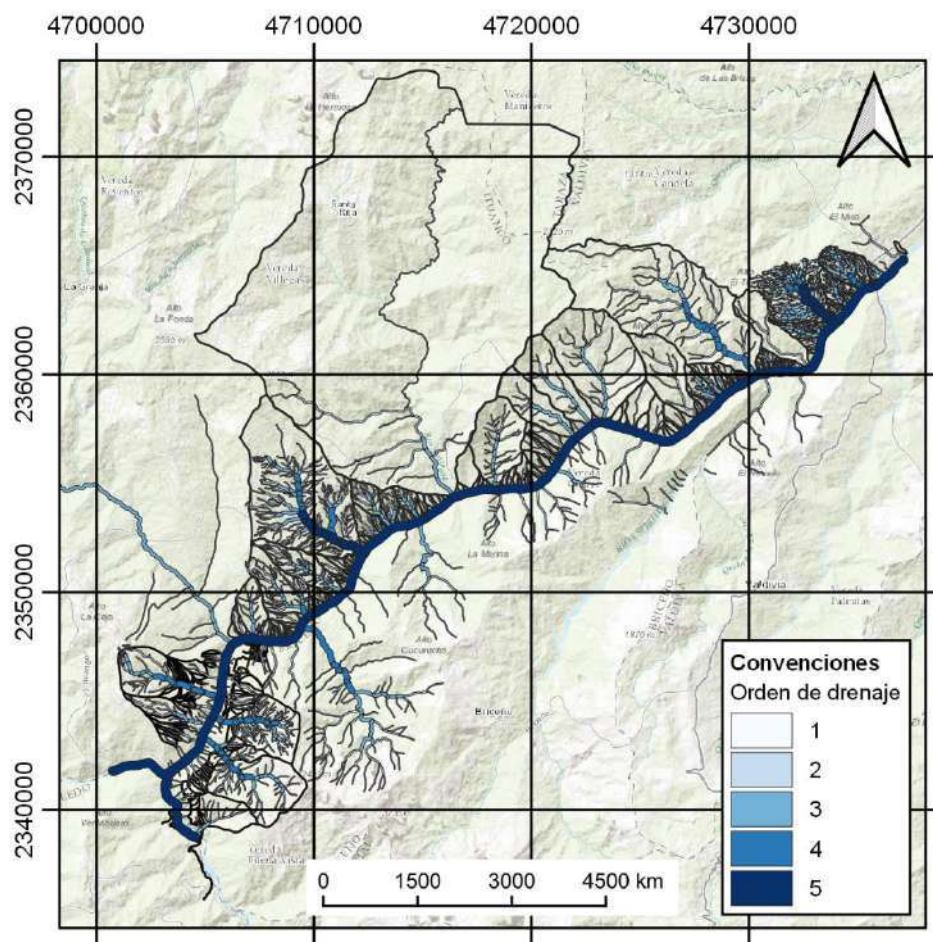


Figura 2-237 Órdenes de drenaje y distribución de Buffer.  
Fuente: Integral S.A., 2.022.

La Figura 2-238 muestra la estimación de las curvaturas en el área de estudio, y la Figura 2-239 muestra la reclasificación de las curvaturas.

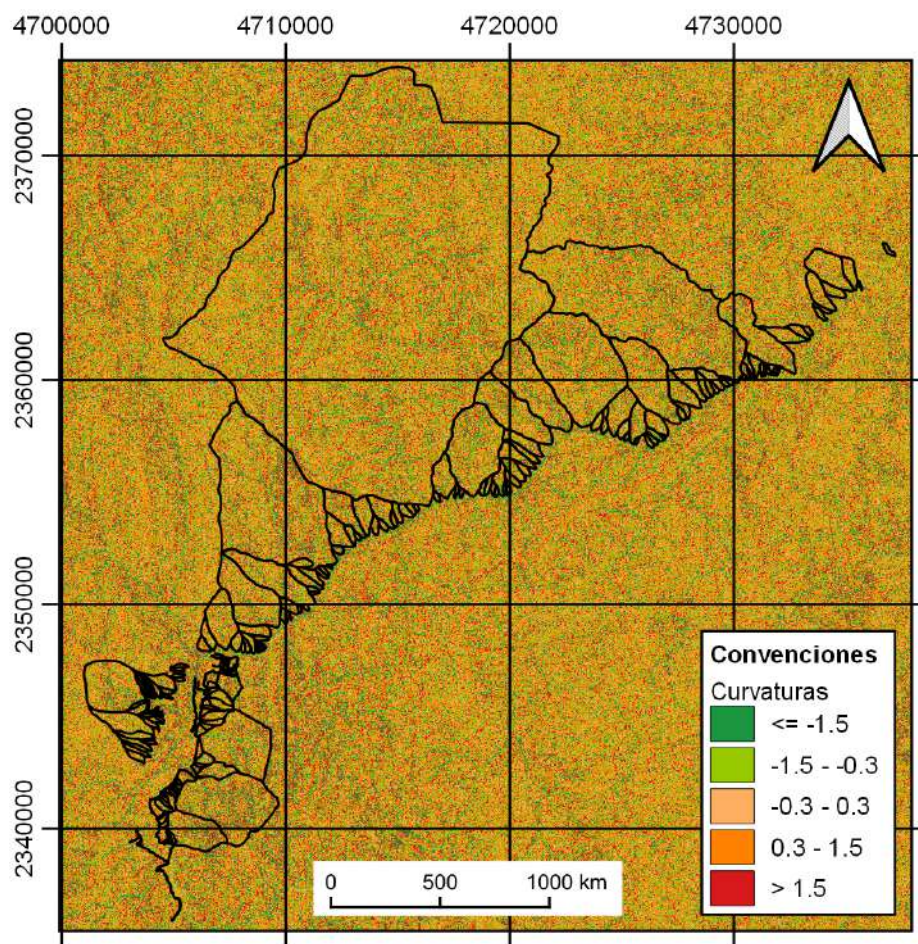


Figura 2-238 Mapa de curvaturas sobre el área de estudio.  
Fuente: Integral S.A., 2.022.



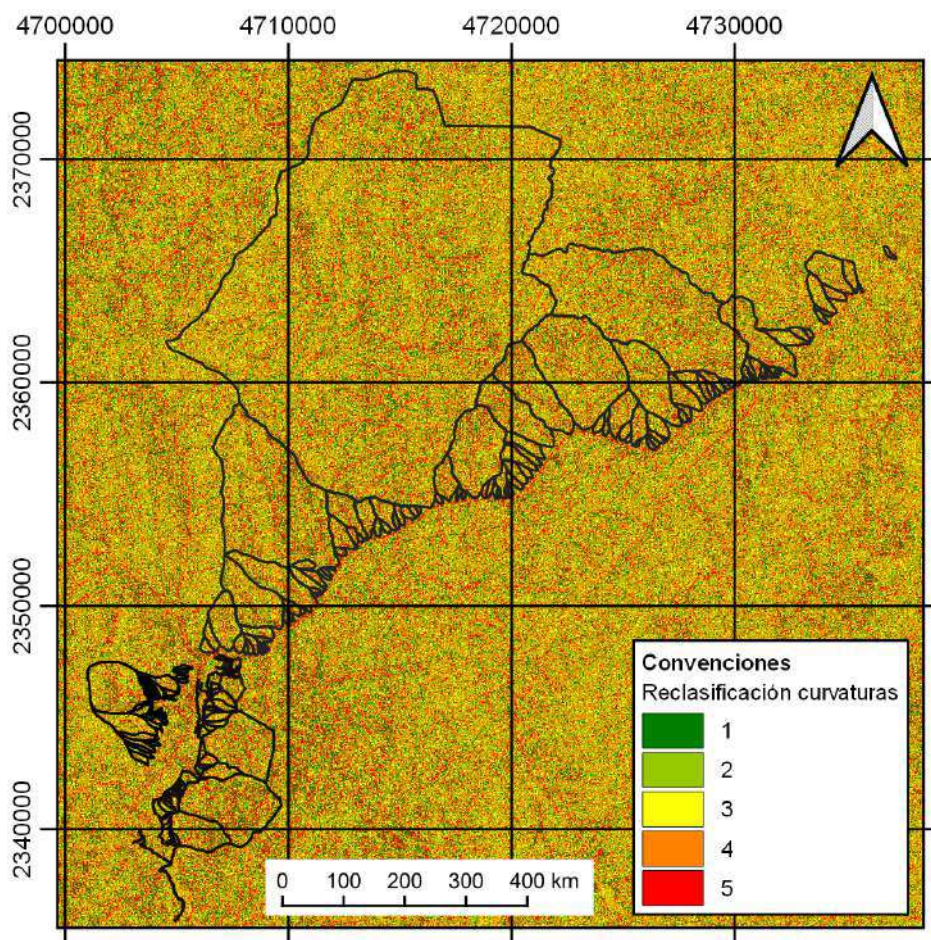


Figura 2-239 Reclasificación de las curvaturas.

Fuente: Integral S.A., 2.022.

Considerando la reclasificación de las pendientes (ver Figura 2-233) y las curvaturas del área de estudio (ver Figura 2-239), se realizó la delimitación de las Zonas Inundables. La Figura 2-240 muestra las Zonas Inundables asociadas a la delimitación de los Buffer según el orden de los drenajes. Este mapa es un indicativo entonces de las áreas de amenaza por eventos de inundación.



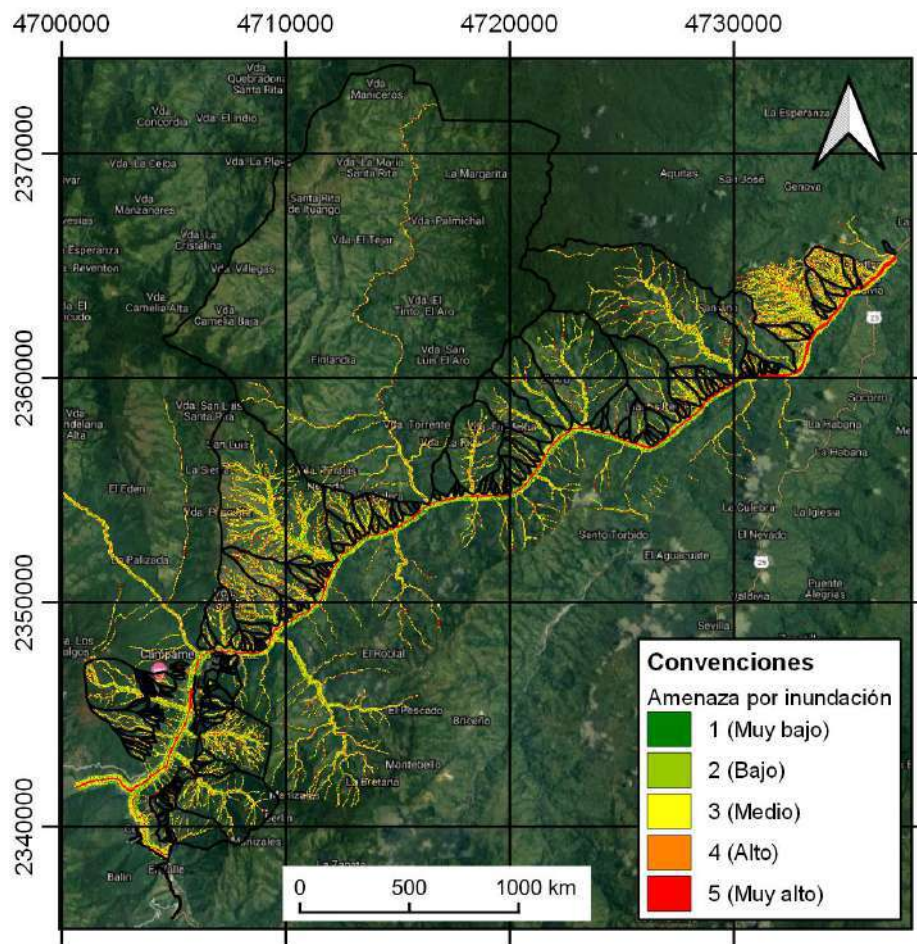


Figura 2-240 Amenaza por inundación en la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2.022.

Los resultados presentados en la Figura 2-240 dan cuenta de una amenaza por inundación predominantemente Baja - Media, con algunas zonas donde son fácilmente apreciables valores con calificación Muy Alta, principalmente sobre el Buffer asociado al río Cauca. Es decir, que los drenajes que presentan un orden de drenaje igual a 5, es decir, los cauces principales, son más susceptibles a presentar una amenaza por inundación Muy Alta ya que estos se encuentran ubicados en sitios más planos, y las zonas donde el orden del drenaje tiene valores menores o iguales a 4, se presenta una amenaza por inundación Bajo – Medio (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-SNO-P-010).

#### 2.2.4.10.3 Eventos de sequía naturales en el río Cauca

Según lo ya mencionado, el P. H. Ituango y cualquier obra ejecutada no debe alterar las sequías que se presentan en el territorio de manera natural. Para esto se toman medidas en cada proyecto, con el propósito de que durante estos caudales bajos se pueda continuar

garantizando la continuidad del flujo, con niveles del embalse menores al que normalmente se maneja durante la operación de un proyecto.

#### A. Casos de análisis

Para evaluar una sequía natural en el río Cauca, se tomó como base el análisis de frecuencia de mínimos realizado en la orden de trabajo OT-EGRN-006-007, el cual se presenta en detalle en el anexo CCE-A04\_I-0010085-OT-EGRN-006-007-B-A4 (ver I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001\_A11), donde se muestra la curva de frecuencia de caudales mínimos estimada para las distintas estaciones en función de los datos de caudales mínimos históricos disponibles, suministrados por el IDEAM, correspondientes a los periodos que se indican en la Tabla 2-69.

Las crecientes se determinaron mediante un análisis de frecuencia que utilizó procedimientos de regionalización para mejorar la bondad de los resultados obtenidos. Una vez realizado este análisis, se procedió a elaborar un análisis de frecuencia para cada estación, en el cual se utilizaron las distribuciones de probabilidad tipo Gumbel, Log Gumbel, Normal, Log Normal, Pearson y Log Pearson, para el cual se concluyó que la distribución Log Pearson es la que tenía el mejor ajuste gráfico (ver Figura 2-241):

A partir del gráfico, es posible observar los caudales mínimos característicos de las diferentes estaciones, donde además se presentan los resultados para el sitio del proyecto, obtenidos a partir de una ponderación del área de la cuenca entre la presa y las estaciones aguas arriba y aguas abajo.

Con base en estos resultados, si se mira un caudal de 450 m<sup>3</sup>/s (caudal aprobado como remanente de llenado del embalse), este tiene un período de retorno de unos 1,65 años, que corresponde a un caudal mínimo que se presentaría el 60% de tiempo, incluso con una probabilidad mayor que un caudal mínimo normal (con período de retorno de 2,33 años), por lo que eventos más extremos descenderían caudales inferiores a este.

En ese sentido, dado que el caudal de 450 m<sup>3</sup>/s es una sequía con una probabilidad alta de ocurrencia (alrededor del 60%), se asume esta condición como la que abarcaría los efectos de una sequía en la zona aguas abajo del P. H. Ituango, por lo que contendría las zonas que podrían encontrarse afectadas con caudales menores, pero igualmente naturales en la cuenca del río Cauca.

Tabla 2-69 Estaciones y sus registros para estimación de caudales mínimos.

Estación	Periodo registro	Longitud periodo (años)	Número de años faltantes
La Pintada	1.965-2.014	50	0
Pte. Iglesias	1.979-2.014	36	1
Bolombolo	1.971-2.014	44	0
Cañafisto	1.979-2.010	32	0
Pte. Pescadero	1.984-2.013	30	6
Pto Valdivia	1.960-2.014	55	3
Apaví	1.972-2.014	43	0
Coquera	1.966-2.014	49	1
Margento	1.966-2.014	49	5
Las Flores	1.974-2.013	40	1

Fuente: Integral S.A., 2.017.

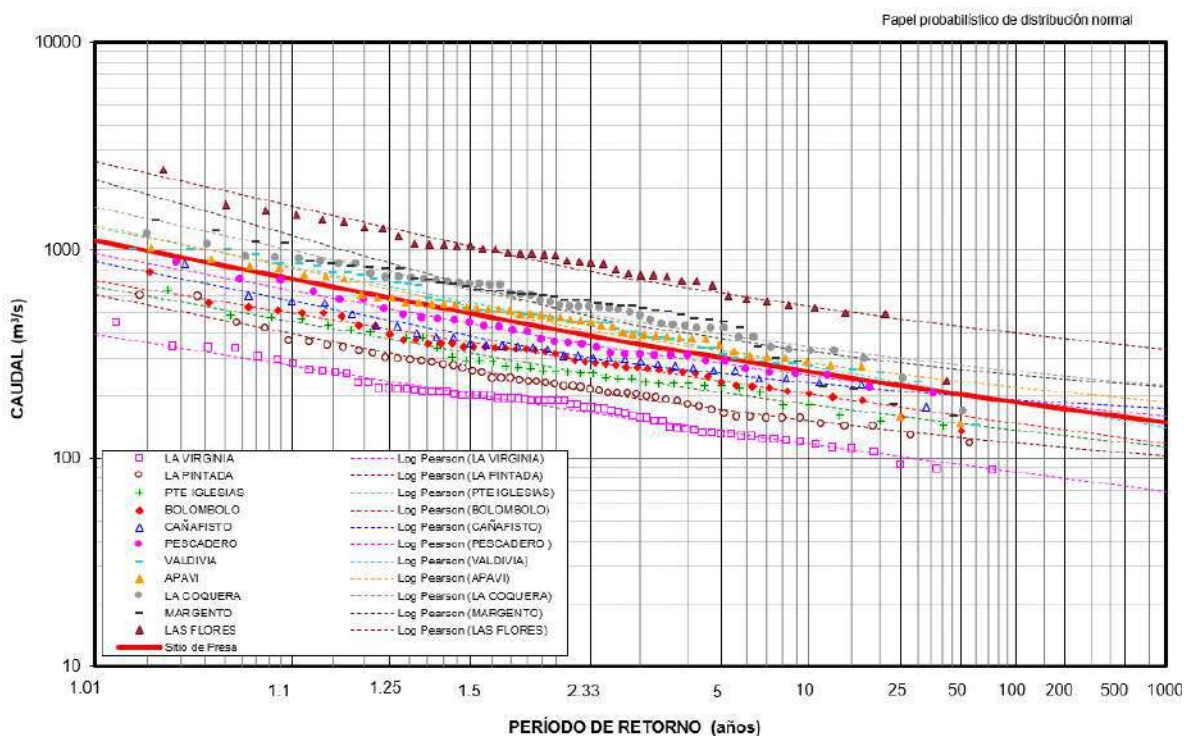


Figura 2-241 Curva de frecuencia de caudales mínimos en diferentes estaciones.

Fuente: actualización del análisis de Integral, S.A., 2.017.

## B. Análisis de resultados

Se debe mencionar que, al evaluar las condiciones hidráulicas para los casos considerados para el cierre de casa de máquinas, con el cierre de una compuerta sin alcanzar la cota del vertedero, se pudo estimar que las magnitudes de flujo presentadas para el caso analizado

(caudal de 450 m<sup>3</sup>/s) son similares a las de un verano fuerte (superiores a un mínimo con periodo de retorno de 2,33 años), como se observa en la Figura 2-242.

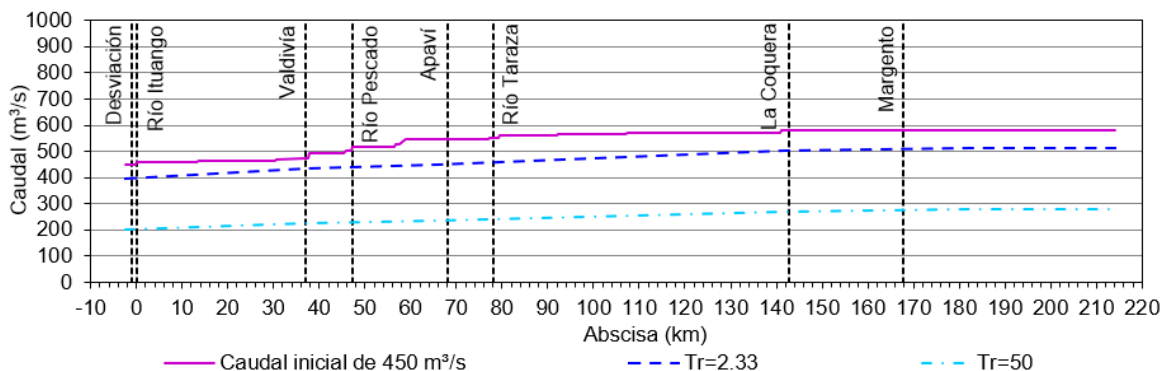
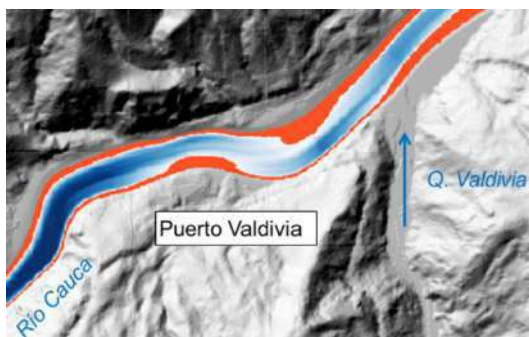


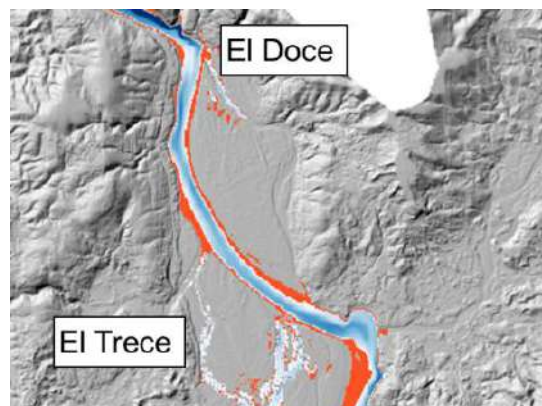
Figura 2-242 Resultados de la caracterización hidráulica, perfiles de la variación de los caudales en la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2.019.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del modelo bidimensional, en cuanto al perfil de lámina de agua de los escenarios: (1) caudal de 450 m<sup>3</sup>/s y (2) caudal de 35 m<sup>3</sup>/s. En la Figura 2-243 del literal (a) al (f), se presenta de forma esquemática el espejo de agua dentro del río Cauca para ambos escenarios, en color naranja la mancha el primer escenario y de escala de azules el segundo escenario, para los sitios: Puerto Valdivia, el tramo entre El Quince -Doce, Cáceres, Puerto Antioquia, Caucasia y el tramo Nuevo Mundo (Margento -Nechí), respectivamente; donde se observa efectivamente que la mancha con un caudal de 450 m<sup>3</sup>/s abarca los efectos de sequías mucho más extremas.

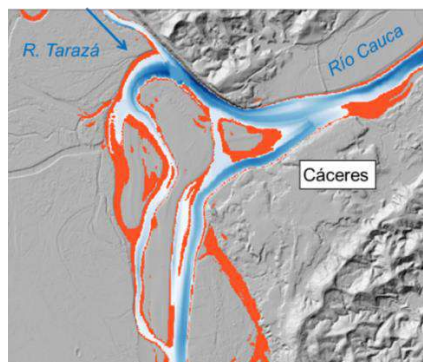


(a)

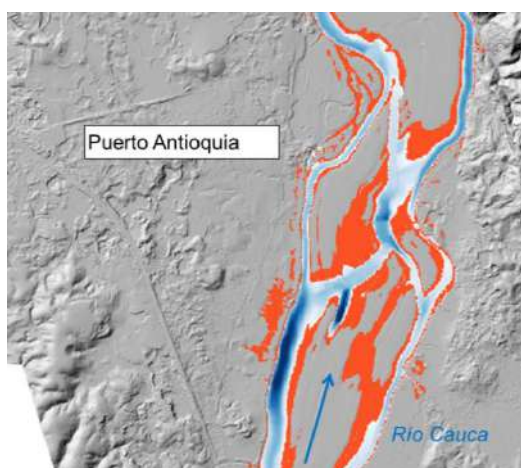




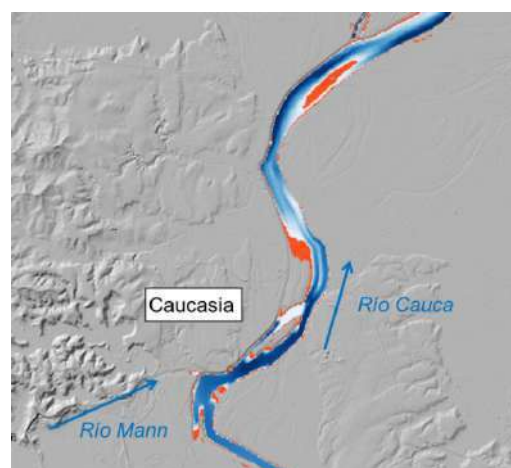
(b)



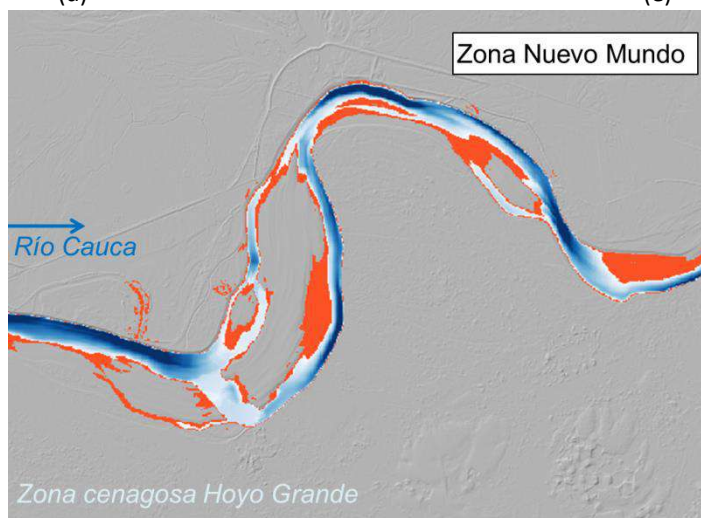
(c)



(d)



(e)



(f)



Figura 2-243 Comparativo de espejos de agua entre un caudal de 450 m<sup>3</sup>/s (naranja) y el caudal de 35 m<sup>3</sup>/s (escala azul) para los sitios: Puerto Valdivia, El Quince -Doce, Cáceres, Puerto Antioquia, Caucasia y Nuevo Mundo (Hacia Nechí)

Fuente Integral S.A. 2.019.

Ahora, con el objetivo de evaluar algunos de los impactos adicionales que podría ocasionar una sequía del P.H. Ituango, se procedió a verificar si, producto de dicho evento (inoperatividad de las compuertas del túnel de la DI en el momento requerido), podrían generarse desconexiones de los sistemas río – ciénagas presentes en el área de influencia. En total fueron caracterizadas un total de 12 complejos cenagosos, correspondiendo a 29 ciénagas. A continuación, en la Figura 2-244 se presentan los cuerpos de agua caracterizados para la zona de estudio.

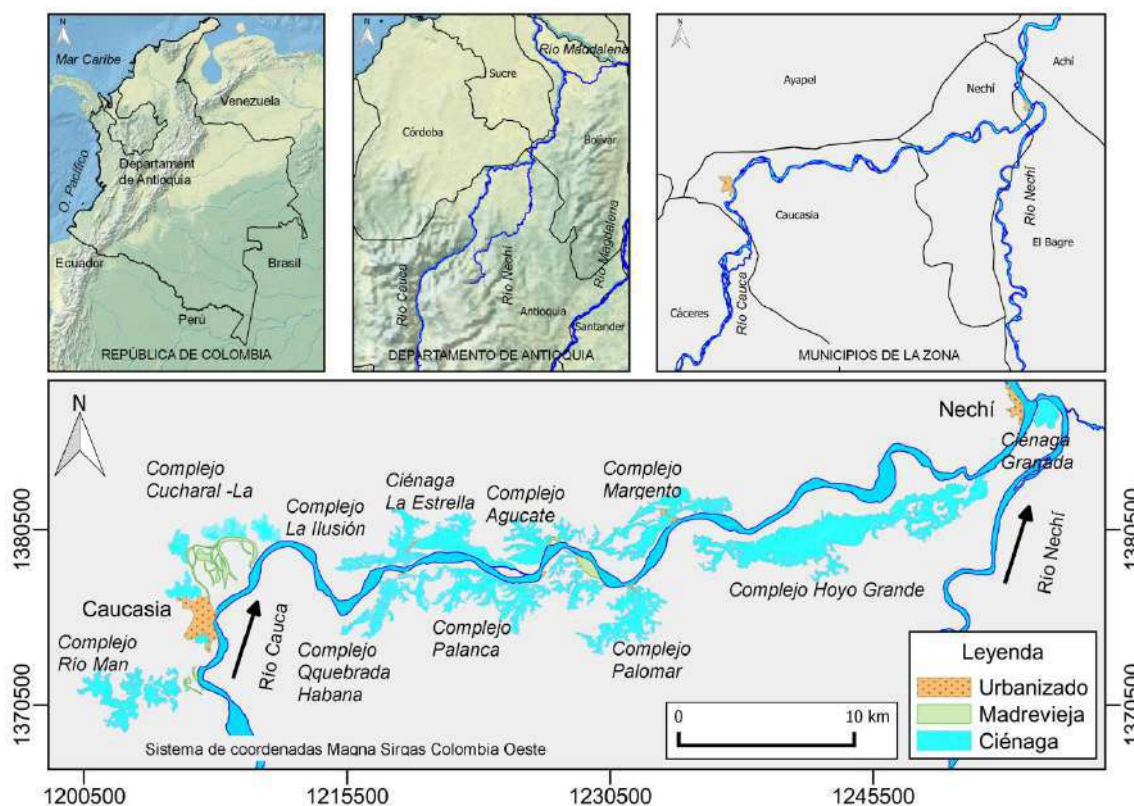


Figura 2-244 Principales ciénagas caracterizadas para la zona de estudio.

Fuente: Integral S.A. 2.016.

Para esto se recurrió a la información recopilada en los anteriores estudios orientados al cambio del caudal remanente de llenado del embalse y su efecto sobre los complejos cenagosos. De esta forma fue retomada la caracterización de ciénagas en la que fueron estimadas las cotas y los caudales para los cuales cada uno de los complejos se conecta y desconecta del río Cauca.

Con esta información, y haciendo uso de los perfiles de flujo simulados para cada uno de los escenarios y casos de estudio, se pudo evaluar cuáles cuerpos y sistemas lénticos se verían afectados. Dentro de los casos que fueron utilizados se encuentran: 1) caudal de 450 m<sup>3</sup>/s, 2) caudal mínimo para un periodo de retorno de 2,33 años y 3) caudal mínimo para un periodo de retorno de 50 años.

Tras comparar los resultados para cada uno de los escenarios y casos seleccionados, se pudo observar que, bajo condiciones naturales y ante un verano “fuerte” (condición mínima de 2,33), todos los complejos excepto el denominado Hoyo Grande, se desconectan del río Cauca. Este mismo fenómeno ocurre para el caudal de 450 m<sup>3</sup>/s, con la salvedad que para este último se observa que el complejo del río Man permanece conectado. Lo anterior conduce a afirmar que durante caudales de esta magnitud no se inducen sobre las ciénagas efectos ajenos a la dinámica natural de la zona.

Con base en las simulaciones realizadas, se debe resaltar que el río Cauca en el tramo comprendido entre las confluencias del río Ituango y el río Nechí, posee la capacidad de recuperar parcialmente sus características hidráulicas; dado que los tributarios en la zona de estudio poseen las condiciones como para recargar el sistema hídrico principal.

En ese sentido, en la Figura 2-245 se presenta la mancha de inundación con un caudal de 450 m<sup>3</sup>/s con una probabilidad de ocurrencia del 60% y en la cual quedarían contenidos los efectos que se tendrían con caudales menos asociados con eventos más extremos, pero igualmente naturales en el río Cauca, como los caudales mínimos de 2,33 y 50 años, analizadas y comparadas anteriormente con el caso analizado. Además, es posible observar que todos los efectos asociados con el caudal de 450 m<sup>3</sup>/s y con periodos de retorno menores, quedan contenidos en el cauce principal del río (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-SN-P-010).

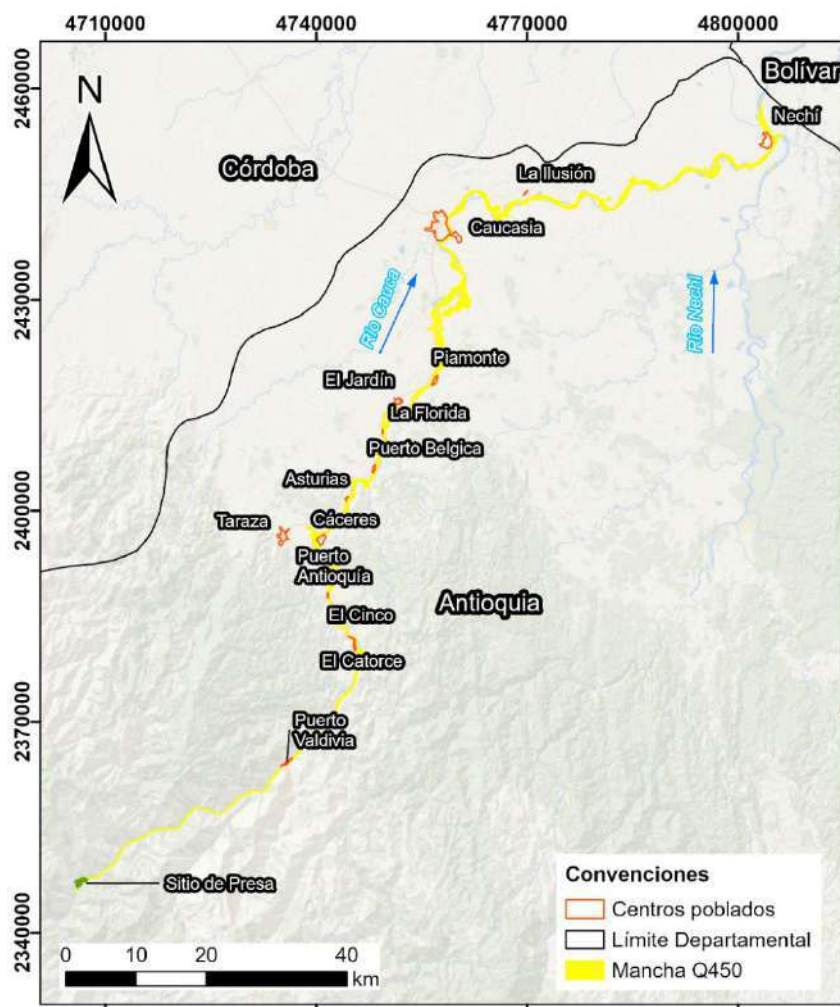


Figura 2-245 Mancha de inundación para un caudal de 450 m<sup>3</sup>/s, asociada a un caudal mínimo de 60% de probabilidad de ocurrencia en la zona del P. H. Ituango.

Fuente: Integral S.A., 2.019.

Ahora, aguas arriba del embalse, en caso de caudales bajos, es posible que el embalse pueda descender hasta la cota mínima de operación (390 m.s.n.m.); no obstante, esto se presentaría únicamente durante eventos de estiaje extremos.

Para definir la probabilidad de que el embalse se encuentre en la cota 390 m.s.n.m., se realizó una operación aislada del embalse, empleando un enfoque probabilístico donde se determina inicialmente una política de operación óptima del embalse empleando Programación Dinámica Estocástica (PDE) y, una vez obtenida, se realiza la simulación a partir de la serie histórica de caudales. Para la obtención de la política de extracciones o caudales turbinados óptimo a partir de la PDE se dividió el volumen útil en 18 estados, las probabilidades (independientes) se obtuvieron a partir de los registros históricos, se consideró un caudal mínimo de aproximadamente 300 m<sup>3</sup>/s y para considerar la capacidad de regulación del embalse, las

etapas consideradas corresponden a semanas. Asimismo, para tratar de reflejar la operación comercial, en la función objetivo se multiplicó la generación por el comportamiento adimensional de los precios promedios de bolsa semanales.

Si se impone una restricción tipo curva guía mínima (mitad del volumen útil o cota 406 m.s.n.m.) y, por lo tanto, se penaliza cuando el embalse se baje de este nivel, priorizando la operación en niveles altos (aunque con mayores vertimientos y una menor capacidad de incrementar generación en las semanas de mayor precio), se logra mantener frecuentemente el embalse por encima de la cota mínima establecida; sin embargo, el embalse en una condición de verano extremo, como la presentada en el periodo 2015 – 2016, continuaría bajando a la cota mínima, manteniéndose en este nivel por aproximadamente 13 semanas; es decir que, con base en los análisis de frecuencia realizados de la operación del embalse, se presentarían niveles alrededor de la cota 390 m.s.n.m. con un período de retorno de 40 años, que equivale a una probabilidad de 2,5% del tiempo.

#### **2.2.4.11 Caracterización de amenaza por incendios y explosiones**

Esta amenaza se caracteriza de acuerdo con el inventario y las características de los sitios del proyecto donde se presentan almacenamiento de material detonante y explosivo. Una vez caracterizada esta amenaza, se evalúan los escenarios de riesgos críticos de la siguiente manera:

##### **2.2.4.11.1 Determinación del mecanismo de desarrollo del evento analizado**

Si bien no se ha identificado un evento de incendio y explosión dentro del proyecto en las zonas de almacenamientos de explosivos, se ha realizado una consulta de eventos relacionados con el fenómeno analizado los cuales se presentan a continuación. El propósito de esto es determinar la secuencia de eventos que da a lugar a un posible incendio o explosión y, adicionalmente, determinar la probabilidad de ocurrencia.

Tabla 2-70 Relación de eventos de explosiones en polvorines.

FECHA DEL INCIDENTE	LUGAR	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EVENTO	# PERSONAS LESIONADAS	# PERSONAS FALLECIDAS	FUENTE
10/09/2020	Guatemala	El accidente se registró en el cuarto de cohetes, ubicada en la zona de polvorines muy cerca del puente de hierro, del poblado de San Pedro de Laguna. Debido a la explosión, dos cuartos de 10 y 15m <sup>2</sup> quedaron destruidos.	3		<a href="https://www.excelsior.com.mx/comunidad/explosion-de-polvorin-deja-tres-heridos-en-zumpango/1405041">https://www.excelsior.com.mx/comunidad/explosion-de-polvorin-deja-tres-heridos-en-zumpango/1405041</a>
06/08/2019	Ecuador	Explosión de un polvorín en una mina en la provincia de El Oro, dejó al menos tres personas fallecidas y varias viviendas afectadas en su infraestructura.		3	<a href="https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/fallecidos-explosion-mina-zaruma-polvorin.html">https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/fallecidos-explosion-mina-zaruma-polvorin.html</a>
28/09/2015	San Salvador	11 heridos por explosión de polvorín de la Fuerza Armada "debido a violación de los protocolos de seguridad, debido a trabajos de soldadura que unos obreros realizaban al lado de granadas de mano y explosivos privados bajo resguardo de la Fuerza Armada, provocaron la detonación de tres polvorines ubicados en el Regimiento de Caballería, unos 25 kilómetros al occidente de San Salvador.	11		<a href="https://www.elfaro.net/es/201509/noticias/17403/11-heridos-por-explosi%C3%B3n-de-polvor%C3%ADn-de-la-Fuerza-Armada-debido-a-violaci%C3%B3n-de-los-protocolos-de-seguridad.htm?st-full_text=all&amp;tpl=11">https://www.elfaro.net/es/201509/noticias/17403/11-heridos-por-explosi%C3%B3n-de-polvor%C3%ADn-de-la-Fuerza-Armada-debido-a-violaci%C3%B3n-de-los-protocolos-de-seguridad.htm?st-full_text=all&amp;tpl=11</a>
30/12/2007	Colombia	La explosión accidental de un polvorín en el interior de una guarnición militar registrada hoy en la ciudad colombiana de Medellín,	7	2	<a href="https://www.lavanguardia.com/sucesos/20071230/53422560301/la-explosion-accidental-de-un-polvorin-causa-seis-militares-">https://www.lavanguardia.com/sucesos/20071230/53422560301/la-explosion-accidental-de-un-polvorin-causa-seis-militares-</a>

07/30/1986	Estados Unidos	Tres detonaciones se iniciaron durante la descarga de cuatro toneladas métricas de explosivos producidos en un pozo de 14 metros de profundidad y arrojaron escombros a 1,6 kilómetros.		5	EPA - commercial explosives and their hazards
08/19/1980	Irán	La soldadura en la puerta de los almacenes de explosivos de una empresa de construcción provocó un incendio y una explosión posterior de 0,5 toneladas métricas de contenido.	45	80	EPA - commercial explosives and their hazards
18/08/1945	España	La explosión había tenido lugar en una zona entre Cortadura y las murallas de Cádiz, donde la Armada disponía de unos polvorines que contenían unas 1600 cargas explosivas, minas en su mayoría, torpedos y cargas de profundidad, 1 pertenecientes a la Guerra Civil. Salvo 491 de ellas que no explotaron, las restantes reventaron prácticamente al unísono, provocando la mayor catástrofe que se recuerda en Cádiz desde el maremoto de 1755.	Más 5000	Más 150	<a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Explosi%C3%B3n_de_un_polvor%C3%ADn_de_la_Armada_en_C%C3%A1diz_de_1947">https://es.wikipedia.org/wiki/Explosi%C3%B3n_de_un_polvor%C3%ADn_de_la_Armada_en_C%C3%A1diz_de_1947</a>
09/07/1939	España	La explosión accidental de varios miles de kilos de explosivos sacudió la localidad de Peñaranda de Bracamonte, causando 15 muertos, alrededor de 1500 heridos, la destrucción de medio pueblo y un incendio de varias proporciones que tardó varios días en ser controlado. La cantidad de explosivos envueltos en el incidente de los 23.500 kg presentes en los vagones, más aproximadamente 97.000 kg procedentes de las bombas de aviación almacenadas en los polvorines de la estación.	1500	15	<a href="https://www.yumpu.com/es/document/read/14438711/explosiones-accidentales-en-almacenes-de-municiones-biblioteca-">https://www.yumpu.com/es/document/read/14438711/explosiones-accidentales-en-almacenes-de-municiones-biblioteca-</a>



Los explosivos representan un riesgo permanente para las personas y el entorno, si no se emplean con precaución y conocimiento; y cumpliendo a cabalidad cada una de los lineamientos y exigencias normativas para prevenir y controlar los accidentes por este tipo de materiales.

Revisando los antecedentes de los eventos relacionados con los polvorines, en la mayoría de los casos, los accidentes con explosivos tienen alto nivel de fatalidad, y se producen más por actos inseguros de las personas que por condiciones inseguras de los productos o del ambiente de trabajo.

En todos los casos, las consecuencias de un accidente con explosivos son muy graves ya que no sólo afectan a la persona causante de una falla o error, sino también a las personas que puedan estar en el área, además de equipos e instalaciones que le rodean.

#### 2.2.4.11.2 Sitios del PHI con almacenamiento y manejo de sustancias peligrosas

De acuerdo con el informe presentado por la interventoría del proyecto, se han identificado dos polvorines o almacenamientos de explosivos que han sido utilizados durante la ejecución del proyecto; el primero, ubicado en una galería del túnel de acceso a la casa de máquinas y el segundo, ubicado en la zona del Palmar, cercano al taller de fabricación de ATB. Los sitios mencionados se identifican a continuación:

Tabla 2-71 Identificación de sitios de almacenamiento sustancias peligrosas

ID	NOMBRE
A	Polvorín – El Palmar
B	Polvorín – Túnel de acceso Casa de máquinas
1	Planta de asfalto
2	Subestación eléctrica 500 KVA – Casa de máquinas
3.1	Casa Máquinas - Unidades de generación
3.2	Casa de máquinas - Almenaras
3.3	Casa de máquinas - Túnel de acceso
3.4	Casa de máquinas – Galerías de construcción
4	Casa de máquinas - Caverna de transformadores
5	Subestación de 44 kVA - Palmar
6	Estación de gas casino del campamento Tacuí - Zona de parqueo
7	Taller de villa luz _ Taller ATB
8	Estación de combustible - Villa luz
9	Talleres de mantenimiento CCC
10	Taller industrial CCC
11	Casino Campamento - Villaluz
12	Base militar Capitanes
13	Planta Diésel Plazoleta - Cerca al túnel de acceso CM
14	Base militar - Zona Industrial Villa Luz
15	Plazoleta El palmar
16	Planta Diésel - Campamento
17	Subestación 44KVA (Plazoleta - Cerca al túnel de acceso CM)
18	Planta de Concreto

ID	NOMBRE
19	Laboratorio Calidad

Fuente: Integral S.A., 2022.

Adicionalmente, se presenta la ubicación geográfica de los lugares listados en el párrafo anterior desde la Figura 2-246 a la Figura 2-251.



Figura 2-246 Ubicación de polvorines.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango\_CGI, 2022.

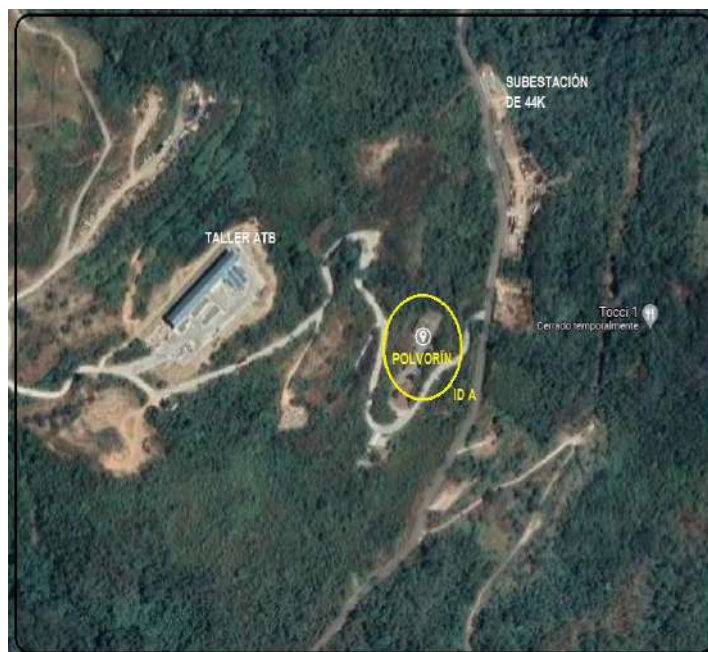


Figura 2-247 Ubicación de sitios de inspección – Polvorín El Palmar

Fuente: Consorcio Generación Ituango\_CGI, 2022.



Figura 2-248 Localización general de sitios

Fuente: Consorcio Generación Ituango\_CGI, 2022.





Figura 2-249 Ubicación de sitios en zona de presa.

Fuente: Consorcio Generación Ituango\_CGI, 2022.





Figura 2-250 Ubicación de sitios de inspección – Zona Villa luz  
Fuente: Consorcio Generación Ituango\_CGI, 2022.



Figura 2-251 Ubicación de las obras en zona de campamento Tacu.  
Fuente: Consorcio Generación Ituango\_CGI, 2022.

En recorrido realizado en sitio el 02 de diciembre del 2021, se recibió por parte del personal del almacén del polvorín del Palmar, la relación de elementos inventariados en la zona, el cual es presentado a continuación:

INVENTARIO INT		MATERIAL FÍSICO - POLVORÍN		FECHA		jueves, 2 de diciembre de 2021			
ITEM	DESCRIPCIÓN MATERIAL	COD. SAP	MEDIDA	CAJAS	UNDS	TOTAL	SAP	TOTAL CRUCE	FECHA DE CADUCIDAD
1	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 1	1632798	UND	0	56	56	56	0	No presenta fecha
2	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 2	1632799	UND	1	33	183	183	0	Junio de 2025
3	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 3	1632805	UND	0	84	84	84	0	No presenta fecha
4	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 4	1632806	UND	0	69	69	69	0	Junio de 2025
5	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 5	1632807	UND	1	48	198	198	0	Junio de 2025
6	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 6	1632808	UND	0	60	60	60	0	No presenta fecha
7	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 7	1632809	UND	0	119	119	119	0	Junio de 2025
8	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 8	1632810	UND	1	42	192	192	0	No presenta fecha
9	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 9	1632811	UND	0	73	73	73	0	No presenta fecha
10	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 10	1632812	UND	1	40	190	190	0	No presenta fecha
11	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 11	1632813	UND	1	21	171	171	0	No presenta fecha
12	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 12	1632814	UND	2	10	310	310	0	No presenta fecha
13	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 13	1632815	UND	2	20	320	320	0	No presenta fecha
14	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 14	1632816	UND	2	23	323	323	0	No presenta fecha
15	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 15	1632817	UND	1	22	172	172	0	No presenta fecha
16	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 16	1632818	UND	4	8	608	608	0	No presenta fecha
17	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 17	1632819	UND	2	35	335	335	0	No presenta fecha
18	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 18	1632820	UND	3	37	487	487	0	No presenta fecha
19	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 19	1632821	UND	0	0	0	0	0	No presenta fecha
20	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 20	1597196	UND	1	45	195	195	0	No presenta fecha
21	DETONADOR EXEL MS 4.8 Mts N° 21	8136680	UND	1	0	150	150	0	No presenta fecha
22	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 2	8136039	UND	1	0	150	150	0	No presenta fecha
23	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 5	1632823	UND	2	140	440	440	0	No presenta fecha
24	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 6	1632824	UND	2	98	398	398	0	No presenta fecha
25	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 7	1632825	UND	3	123	573	573	0	No presenta fecha
26	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 8	1632826	UND	3	145	595	595	0	No presenta fecha
27	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 9	1632827	UND	4	1	601	601	0	No presenta fecha
28	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 10	1632828	UND	4	76	576	576	0	No presenta fecha
29	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 11	1632829	UND	4	124	724	724	0	No presenta fecha
30	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 12	1632830	UND	3	122	572	572	0	No presenta fecha
31	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 13	1632831	UND	2	1	301	301	0	No presenta fecha
32	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 14	1632832	UND	3	38	488	488	0	No presenta fecha
33	DETONADOR EXEL LP 4.8 Mts N° 15	1632833	UND	0	58	58	58	0	No presenta fecha
34	DETONADOR EXEL MS 4.2 Mts N° 1	8104287	UND	0	71	71	71	0	No presenta fecha
35	DETONADOR EXEL MS 4.2 Mts N° 3	8104288	UND	0	86	86	86	0	No presenta fecha
36	DETONADOR EXEL MS 4.2 Mts N° 4	8104289	UND	0	80	80	80	0	No presenta fecha
37	DETONADOR EXEL MS 4.2 Mts N° 5	8104290	UND	0	83	83	83	0	No presenta fecha
38	DETONADOR EXEL MS 4.2 Mts N° 6	8104291	UND	0	112	112	112	0	No presenta fecha
39	DETONADOR EXEL LP 4.2 Mts N° 2	8053606	UND	0	22	22	22	0	No presenta fecha
51	DETONADOR EXEL LP 4.2 Mts N° 15	8053613	UND	0	56	56	56	0	No presenta fecha
53	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 8	8104292	UND	0	17	17	17	0	No presenta fecha
54	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 9	8104293	UND	1	23	143	143	0	No presenta fecha
55	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 10	8104294	UND	1	76	196	196	0	No presenta fecha
56	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 11	8104295	UND	1	30	150	150	0	No presenta fecha
57	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 12	8104296	UND	1	38	158	158	0	No presenta fecha
58	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 13	8104297	UND	1	44	164	164	0	No presenta fecha
59	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 14	8104298	UND	1	38	158	158	0	No presenta fecha
60	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 15	8104299	UND	1	46	166	166	0	No presenta fecha
61	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 17	8104301	UND	1	73	193	193	0	No presenta fecha
62	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 19	8104302	UND	0	114	114	114	0	No presenta fecha
63	DETONADOR EXEL MS 6.1 Mts N° 21	8104303	UND	0	0	0	0	0	No presenta fecha
64	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 5	8104304	UND	0	26	26	26	0	No presenta fecha
65	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 6	8104305	UND	0	19	19	19	0	No presenta fecha
66	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 7	8104306	UND	0	51	51	51	0	No presenta fecha
67	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 8	8104307	UND	0	67	67	67	0	No presenta fecha
69	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 10	8104309	UND	0	49	49	49	0	No presenta fecha
70	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 11	8104310	UND	0	47	47	47	0	No presenta fecha
71	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 12	8104311	UND	1	4	124	124	0	No presenta fecha
72	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 13	8104312	UND	1	16	136	136	0	No presenta fecha
73	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 14	8104313	UND	1	65	185	185	0	No presenta fecha
74	DETONADOR EXEL LP 6.1 Mts N° 15	8104314	UND	0	68	68	68	0	No presenta fecha
94	DETONADOR ELECTRICO UNITRONIC	8048260	UND	1	36	102	102	0	Julio de 2026
96	INDUGEL 26 X 250	1635406	KG	69	146	1.748.652	1.748.652	0,000	Abril de 2022
100	EMULIND - E 38mm X 250 MM	8000836	KG	530	10	13253.200	13.253.200	0,000	Dic. 2021 - Ene 2022
102	EMULIND - E 44mm X 250	8000837	KG	0	0	0,000	0,000	0,000	
103	DETONADOR COMUN N° 8	1635411	UND	3	37	337	337	0	No presenta fecha
104	MÉCHA DE SEGURIDAD	1635412	MT	2	350	1.350	1.350	0	Abril de 2022
105	CORDON DETONANTE DE 3 GR5	1635413	MT	1	240	1.240	1.240	0	No presenta fecha
108	CORDON DETONANTE DE 38 GR5	1635416	MT	7	121	1.521	1.521	0	Sep. Oct. Nov. 2022

EXcel = 72.672

JAVIER HERNANDO VELANDIA  
ALMACENISTA

Figura 2-252 Inventario de materiales polvorín el palmar Zona A – Fecha de corte: 2 diciembre 2021.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.



### 2.2.4.11.3 Caracterización de sitios críticos del PHI

Se realizó la caracterización de cada una de las zonas de almacenamientos de residuos peligrosos del proyecto. Los resultados de dicha caracterización se presentan a continuación:



#### A. Zona: ID A Polvorín El Palmar

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-72 Caracterización Zona A: Polvorín El Palmar

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	A
Características	<p>Durante la visita a la zona del polvorín, ubicado en El Palmar; se evidenció que el área está totalmente demarcada, con vigilancia permanente y acceso restringido; para el almacenamiento de los elementos potencialmente peligrosos se cuenta con tres bodegas, de las cuales en la actualidad solo hay dos que están ocupadas con estos materiales.</p> <p>Para el almacenamiento de explosivos se dispone de dos bodegas, sin embargo, para el momento de la visita se evidenció que solo se estaban almacenando este material en una de ellas; la otra estaba totalmente vacía.</p> <p>- Zona almacenamiento de Explosivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bodega #1 (Con material explosivo)</li> <li>• Bodega #2 (Vacía)</li> </ul> <p>- Zona almacenamiento de Detonadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bodega #1 (Con material detonante)</li> <li>• Bodega #2 (Con material detonante)</li> <li>• Bodega #3 (Sin material detonante)</li> </ul> <p>Respecto a las características físicas del sitio, se observa que las bodegas tienen un sistema de construcción tradicional, con una estructura aporticada en concreto (vigas y columnas); con muros perimetrales y divisorios en bloques de concreto a la vista, además cuenta con una losa estructural en Steel deck con hormigón a manera de techo; se evidencia una ventilación e iluminación natural en cada bodega.</p> <p>Por otro lado, el sitio en el cual está ubicado el polvorín se encuentra en una zona en la cual no hay estructuras cercanas donde se realicen labores de la obra.</p> <p>Respecto a la protección contra posibles conatos de incendio se contempla la ubicación de extintores de polvo químico seco distribuidos por toda la zona; se evidenciaron un total de ocho (8) extintores de 20Lb que se encuentran con fecha de caducidad vigente, y uno (1) extintor tipo satélite de 150 Lb que se encuentra caducado.</p> <p>El polvorín presenta las siguientes condiciones de seguridad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aparentemente está situado a más de 100 metros de edificaciones y carreteras (en este caso se toma la distancia a la vía principal que lleva a Ituango)</li> <li>- Se evidencia un termohigrómetro en la Bodega #1 de almacenamiento de explosivos, con el fin de mantener las condiciones de temperatura y humedad relativa, recomendadas por el fabricante para la conservación de los explosivos.</li> <li>- Cartelera con información de las hojas de seguridad y el plan de emergencias.</li> <li>- Zonas de espacios libres para transitar.</li> </ul>


ITEM	DESCRIPCIÓN
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hay bodegas separadas para almacenar los detonadores y los explosivos.</li> <li>- El lugar permanece cerrado y vigilado.</li> <li>- Se utilizan estibas de madera para colocar sobre ellas tanto los detonadores como los explosivos.</li> <li>- La zona de almacenamiento tanto de los detonadores como de los explosivos estaban limpios, secos y libres de arena, papel, paquetes, envases vacíos, entre otros.</li> <li>- No se evidencian instalaciones eléctricas dentro de las áreas de almacenamiento, dicha zona posee iluminación natural en las diferentes bodegas.</li> <li>- En la entrada a la bodega de almacenamiento de los explosivos se cuenta con una plancha metálica conectada a tierra con el fin de que toda persona que entre al polvorín la pise antes de entrar y descargue la electricidad estática que pueda tener acumulada en su cuerpo.</li> <li>- Toda el área destinada para el polvorín cuenta con un sistema de pararrayos.-</li> <li>- Todo el polvorín se encuentra señalizado y su ingreso es restringido.</li> <li>- Tanto el personal de vigilancia como el almacenista, poseen llaves diferentes para ingresar a las diferentes bodegas es decir, no es posible el ingreso a las bodegas.</li> <li>- Se evidencia el control permanente del consumo de explosivos y elementos de ignición.</li> </ul>
<p>Registro Fotográfico</p>	

ITEM	DESCRIPCIÓN
	 



ITEM	DESCRIPCIÓN
	 <p><b>Bodega #2 Detonadores</b></p>

ITEM	DESCRIPCIÓN
	<p>ALMACENAMIENTO DE EXPLOSIVOS</p> <p>Bodega #1</p> <p>Bodega #1</p> <p>iluminación y ventilación natural</p> <p>Bodega #1 Explosivos</p>

ITEM	DESCRIPCIÓN
	 <p style="text-align: center;">Bodega #2 - Vacía</p>
<p>Escenario probable de incendio y explosión</p>	<p>Las condiciones de seguridad que se maneja en el polvorín, tales como se expone en el ítem características, denota que cumplen con los requerimientos mínimos exigidos en la normatividad colombiana, siendo el escenario más probable de incendio o explosión un error humano por mala manipulación o actos inseguros que puedan conllevar a dichas situaciones.</p>

Fuente: Integral S.A., 2022.

Tabla 2-73 Propiedades físicas de los elementos analizados.

	Elemento	Valor	Unidades	Fuente
Indugel	Código UN	0241		
	Cantidad	1749	kg	Inventario de obra del 02/dic/2021
	Densidad	1,2	g/cm3	Ficha técnica indumil
	Potencia absoluta en volumen (RBS)	1,43	Adimensional	Ficha técnica indumil
Emulind-E	Código UN	0241		
	Cantidad	13253	kg	Inventario de obra del 02/dic/2021
	Densidad	1,16	g/cm3	Ficha técnica indumil
	Potencia absoluta en volumen (RBS)	1,44	Adimensional	Ficha técnica indumil
Cordón detonante	Código UN	0065		Inventario de obra del 02/dic/2021
	Cantidad 3 g/m	1240	m	Inventario de obra del 02/dic/2021
	Cantidad 38 g/m	1521	m	
	Factor efectividad relativa	1,66	Adimensional	Ficha técnica indumil - <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Pent">https://es.wikipedia.org/wiki/Pent</a>

Fuente: Integral S.A., 2022.


B. Zona: ID B Polvorín túnel de acceso a casa de máquinas

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-74 Caracterización Zona B: Polvorín Túnel de Acceso.

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	B
Características	<p>Durante los procesos de excavaciones de la casa de máquinas se implementó un polvorín en una de las galerías del túnel de acceso, para facilitar el control y transporte de estos elementos en la obra.</p> <p>Sin embargo, en el recorrido realizado en obra se identificó que este polvorín fue clausurado y no se encuentra operativo.</p>
Registro Fotográfico	



ITEM	DESCRIPCIÓN
	
Escenario probable de incendio y explosión	No se tiene ningún escenario probable de incendio y explosión en la zona determinada, debido a que no está activo.

Fuente: Integral S.A., 2022.

### C. ID 1: Planta de asfalto


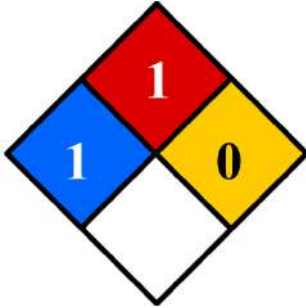
A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-75 Caracterización Zona: Planta de Asfalto

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	1
Características	Durante la visita a la zona denominada como planta de Asfalto, se evidenció una cantera de uso privado, donde extraen material de playa para su comercialización. Aparentemente, este espacio fue dedicado hace algún tiempo por el proyecto para el funcionamiento de la planta de asfalto, utilizado para la construcción de las vías.





ITEM	DESCRIPCIÓN
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	Las subestaciones eléctricas tipo GIS tienen una alta confiabilidad, por lo que las probabilidades de incendios o explosiones son menores que subestaciones eléctricas convencionales.
Tipo de elemento almacenado	En esta zona se evidencia un transformador en aceite Nafténico.
Rombo de seguridad	
Cantidad:	29.000 L
Presión de almacenamiento:	Presión atmosférica
Potencial Combustible (MJ/kg):	42
Observaciones/ Comentarios	Esta área es restringida, solo pueden acceder las personas que operan la subestación y/o personal con previa autorización.

Fuente: Consorcio Generación Ituango\_CGI, 2022.

Análisis del nivel de peligro MESERI:

A continuación, se presentan los resultados del análisis de riesgo realizado para la instalación:

Tabla 2-77 Método Simplificado de Evaluación de peligro de Incendio (MESERI) Subestación 500Kva.

MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)				
			Puntuación	Puntos
Factores de construcción	Número de plantas/pisos del edificio		Altura del edificio (m)	
	1 o 2		Inferior a 6	
	de 3 a 5		Entre 6 y 15	
	De 6 a 9		Entre 16 y 28	
			3	3
			2	
			1	

	Más de 10	Más de 28	0	
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Inferior a 500		5	
	de 501 a 1500		4	
	de 1501 a 2500		3	
	de 2501 a 3500		2	2
	de 3501 a 4500		1	
	mayor a 4500		0	
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alta (ej. hormigón)		10	
	Media		5	5
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0	
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	No existen		5	5
	incombustibles (M0)		3	
	Combustibles (M4 o peor)		0	
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Menor de 5	Menor de 5	10	10
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8	
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6	
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2	
	Más de 20	Más de 25	0	
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Buena		5	5
	Media		3	
	Mala		1	
Muy mala		0		
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Bajo		10	10
	Medio		5	
	Alto		0	
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja (Inferior a 1000)		10	
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5	5
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2	
	Muy alta (superior a 5000)		0	
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
Baja		5		
Media		3	3	
Alta		0		

	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alto			10	10	
	Medio			5		
	Bajo			0		
	<b>Almacenamiento en altura</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Menor de 2m			3	3	
	Entre 2 y 6m			2		
	Superior a 6m			0		
<b>Factores de valor económico de los bienes</b>	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	<b>COP MILL/ m2</b>	Inferior a 2,6	<b>Euros /m2</b>	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	0
<b>Factores de destructibilidad</b>	<b>Destructibilidad por calor</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10	10	
	Media			5		
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por humo</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10	10	
	Media			5		
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10	10	
	Media			5		
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por agua</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10	10	
	Media			5		
	Alta			0		
<b>Factores de propagabilidad</b>	<b>Propagabilidad horizontal</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			5	5	
	Media			3		
	Alta			0		
	<b>Propagabilidad vertical</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	

Baja	5	5
Media	3	
Alta	0	
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>		<b>111</b>

Factores de protección	Instalaciones de protección contra incendios	VIGILANCIA HUMANA				Puntos
		Con vigilancia humana		Sin vigilancia humana		
		Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	
Detección automática	Con CRA	4	3	2	0	0
	Sin CRA					
Rociadores automáticos	Con CRA	8	7	6	5	0
	Sin CRA					
Extintores portátiles		2		1		0
Gabinetes/tomas de manguera		4		2		4
Hidrantes exteriores		4		2		4
<b>Organización de la protección contra incendios</b>					<b>Puntos</b>	
Equipos de primera intervención (EPI)		2		2		2
Equipos de segunda Intervención (ESI)		4		4		4
Planes de emergencia		4		2		4
<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>					<b>18</b>	
<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>					<b>7,302</b>	

Tabla 2-78 Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI

Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy Alto
Entre 3 y 5	Alto
<b>Entre 5 y 8</b>	<b>Medio</b>
Superior a 8	Bajo

E. ID 3: Casa de máquinas

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-79 Caracterización Zona: Casa de máquinas

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	3



ITEM	DESCRIPCIÓN
Características	<p><b>Casa de máquinas - Piso principal:</b> En el costado sur de este nivel, se encuentra el almacén de GE (General Electric), destinado para guardar materiales, equipos y herramientas, necesarias para la ejecución de las obras. Durante la visita técnica, en esta área no se evidenció almacenamiento de materiales combustibles o inflamables; si bien se realizan actividades de soldadura en esta zona, solo se utilizan la cantidad de cilindros (acetileno, oxígeno, argón o nitrógeno) necesarios para labores diarias.</p> <p>En la zona hay dispuestos extintores portátiles tipo ABC de 10Lb.</p> <p><b>Casa de máquinas – Almenaras:</b> Actualmente está en fase constructiva el sector de la almenara 1; se efectúan labores de soldadura, sin embargo, no se identifican zonas de almacenamiento de sustancias combustibles, que puedan considerarse peligrosas.</p> <p><b>Túnel de acceso:</b> Durante el recorrido realizado en el túnel de acceso, se observa que no hay almacenamiento de sustancias químicas peligrosas o inflamables. En la margen derecha del túnel, se encuentra una subestación eléctrica con transformadores tipo seco; incluye un extintor manual ABC de 10 Lb.</p> <p><b>Casa de máquinas – Eje de Descarga 1:</b> En este sector, se observa un área donde almacenan diferentes tipos de compuestos químicos; con acceso solo al personal del almacén. Seguidamente, se encuentra una subestación eléctrica de 13.200 V; ambas áreas tienen cerramientos con mallas, señalización y sistemas de extinción manual a base de extintores portátiles.</p> <p><b>Casa de máquinas – Eje de Descarga 2:</b> Durante la visita se identificó una zona donde se ubica unos cilindros para el proceso de soldadura; sin embargo, al ser la zona tan abierta, sin ningún equipo o proceso que pueda generar chispas que pueda provocar un conato. Es de mencionar, que la zona está demarcada y señalizada.</p> <p><b>Casa de máquinas – Eje de Descarga 3:</b> En esta área se encuentra una unidad de neutralización, y no se evidencia almacenamiento de líquidos combustibles o inflamables.</p>
Registro Fotográfico	

ITEM	DESCRIPCIÓN

ITEM	DESCRIPCIÓN
	
Escenario probable de incendio y explosión	<p>En el eje de descarga 1, hay una zona de almacenamiento de químicos que está cercano a la subestación eléctrica 13200 voltios, se evidencian como fuentes de peligro un posible corto circuito o un foco de ignición las chispas provenientes de vehículos que pasan por la zona.</p> <p>Otra fuente de peligro identificada en esta zona son las cajas de cartón que almacenan encima de elementos peligrosos, las cuales tienen una alta inflamabilidad ante chispas de soldaduras.</p>
Tipo de elemento almacenado	Se almacenan diversos elementos, en cantidades variadas, a continuación, se nombran algunas de ellas: Igol denso (1440kg), Igol imprimante (192kg), Antisol blanco (400kg), Sika látex (200kg), Antisol (200kg), ácido nítrico (40kg), entre otros.
Rombo de seguridad	 <p>Rombo de seguridad Igol Denso</p>
Cantidad:	Igol Denso 1440kg
Presión de almacenamiento:	No disponible
Potencial Combustible (MJ/kg):	40.61
Observaciones/ Comentarios	Esta área está muy cerca de la zona donde se adelantan diversos trabajos, asociados a los blindajes de los túneles de aspiración de la almenara 1.

Análisis de nivel de peligro MESERI:

A continuación, se presentan los resultados del análisis de riesgo realizado para la instalación:

Tabla 2-80 Método Simplificado de Evaluación de peligro de Incendio (MESERI) Casa de máquinas

<b>MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)</b>					
			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>			
	1 o 2	Inferior a 6	3		
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2	2	
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1		
	Más de 10	Más de 28	0		
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Inferior a 500		5		
	de 501 a 1500		4		
	de 1501 a 2500		3		
	de 2501 a 3500		2	2	
	de 3501 a 4500		1		
	mayor a 4500		0		
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alta (ej. hormigón)		10	10	
	Media		5		
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0		
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
No existen		5	5		
incombustibles (M0)		3			
Combustibles (M4 o peor)		0			
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Menor de 5	Menor de 5	10		
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8	8	
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6		
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2		
	Más de 20	Más de 25	0		
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Buena		5		
	Media		3	3	
	Mala		1		
Muy mala		0			
<b>es de proces o/oper</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Bajo		10		

	Medio		5	3		
	Alto		0			
	<b>Carga térmica (MJ/m<sup>2</sup>)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja (Inferior a 1000)		10	10		
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5			
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2			
	Muy alta (superior a 5000)		0			
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja		5			
	Media		3	3		
	Alta		0			
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Alto		10			
	Medio		5	5		
	Bajo		0			
	<b>Almacenamiento en altura</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Menor de 2m		3	3		
	Entre 2 y 6m		2			
	Superior a 6m		0			
<b>Factores de valor económico de los bienes</b>	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	<b>COP MILL/ m<sup>2</sup></b>	Inferior a 2,6	<b>Euros /m<sup>2</sup></b>	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	0
<b>Factores de destructibilidad</b>	<b>Destructibilidad por calor</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5		
	Alta			0	0	
	<b>Destructibilidad por humo</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5		
	Alta			0	0	
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por agua</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	



	Baja	10	
	Media	5	5
	Alta	0	
<b>Factores de propagabilidad</b>	<b>Propagabilidad horizontal</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	5	
	Media	3	
	Alta	0	0
	<b>Propagabilidad vertical</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	5	
	Media	3	3
	Alta	0	
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>			<b>67</b>

<b>Factores de protección</b>	<b>Instalaciones de protección contra incendios</b>	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>				<b>Puntos</b>
		<b>Con vigilancia humana</b>		<b>Sin vigilancia humana</b>		
	Detección automática	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	
		4	3	2	0	0
	Rociadores automáticos	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	
		8	7	6	5	0
	Extintores portátiles	2		1		2
	Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0
	Hidrantes exteriores	4		2		0
	<b>Organización de la protección contra incendios</b>					<b>Puntos</b>
	Equipos de primera intervención (EPI)	2		2		2
	Equipos de segunda Intervención (ESI)	4		4		4
	Planes de emergencia	4		2		4
<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>						<b>12</b>

<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>	<b>4,596</b>
-----------------------------------	--------------

Tabla 2-81 Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI


<b>Valor de peligro (P)</b>	<b>Calificación del peligro</b>
Inferior a 3	Muy alto
<b>Entre 3 y 5</b>	<b>Alto</b>
Entre 5 y 8	Medio
Superior a 8	Bajo

**NOTA:** No se realiza análisis de consecuencias debido a que las actividades son realizadas al interior de un túnel y no tienen afectación sobre las demás áreas externas del proyecto.

F. ID 4: Caverna de transformadores

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-82 Caracterización Zona: Caverna de transformadores

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	04
Características	<p>En las inmediaciones no hay actividades de trabajos en caliente que puedan generar chispas o puntos calientes.</p> <p>No se evidenciaron otros elementos químicos que puedan reaccionar con el aceite almacenado.</p> <p>El área cuenta con un Kit de emergencias para control de derrames</p> <p>El sitio no cuenta con señalización de seguridad que restrinja algunas actividades o acciones que puedan generar riesgos en el área.</p>
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	<p>Incendio provocado por chispas de soldadura que caigan sobre las canecas, correspondientes a los trabajos que se están realizando en el nivel superior de los transformadores.</p> <p>Sin embargo, debido al alto flashpoint, el almacenamiento a presión ambiental, en canecas metálicas; es menos probable que desarrolle un evento riesgoso, asociado con incendio o explosión.</p> <p>Por lo anterior, se considera que el escenario de riesgo es poco probable que se genere.</p>

ITEM	DESCRIPCIÓN
Tipo de elemento almacenado	Aceite aislante - Nytro Orion I
Rombo de seguridad	No Regulado por la NFPA
Cantidad:	142 canecas de 55 galones (29m3)
Presión de almacenamiento:	Presión atmosférica
Potencial Combustible (MJ/m2):	18.900
Observaciones/ Comentarios	El aceite no cuenta con señalización de seguridad tipo Rombo de acuerdo con el estándar de la NFPA

Análisis de nivel de peligro MESERI:

A continuación, se presentan los resultados del análisis de riesgo/peligro realizado para la instalación:

Tabla 2-83 Método Simplificado de Evaluación de peligro de Incendio (MESERI) Caverna de transformadores.

MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)				
			Puntuación	Puntos
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>		
	1 o 2	Inferior a 6	3	
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2	2
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1	
	Más de 10	Más de 28	0	
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Inferior a 500		5	
	de 501 a 1500		4	4
	de 1501 a 2500		3	
	de 2501 a 3500		2	
	de 3501 a 4500		1	
	mayor a 4500		0	
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alta (ej. hormigón)		10	10
	Media		5	
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0	
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	No existen		5	5
incombustibles (M0)		3		
Combustibles (M4 o peor)		0		
<b>ore s de situ ació</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>

	Menor de 5	Menor de 5	10			
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8	8		
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6			
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2			
	Más de 20	Más de 25	0			
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Buena		5	5		
	Media		3			
	Mala		1			
	Muy mala		0			
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Bajo		10			
	Medio		5			
	Alto		0			
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja (Inferior a 1000)		10			
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5	5		
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2			
	Muy alta (superior a 5000)		0			
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja		5			
	Media		3	3		
	Alta		0			
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Alto		10	10		
	Medio		5			
	Bajo		0			
	<b>Almacenamiento en altura</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Menor de 2m		3			
	Entre 2 y 6m		2	2		
Superior a 6m		0				
<b>Factores de valor económico de los bienes</b>	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	<b>COP MILL/ m2</b>	Inferior a 2,6	<b>Euros /m2</b>	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	

		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	0
<b>Factores de destructibilidad</b>	<b>Destructibilidad por calor</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	10
	Media				5	
	Alta				0	
	<b>Destructibilidad por humo</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	
	Media				5	
	Alta				0	0
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	10
	Media				5	
	Alta				0	
	<b>Destructibilidad por agua</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	10
Media				5		
Alta				0		
<b>Factores de propagabilidad</b>	<b>Propagabilidad horizontal</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				5	5
	Media				3	
	Alta				0	
	<b>Propagabilidad vertical</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				5	
	Media				3	3
Alta				0		
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>						<b>92</b>

<b>Factores de protección</b>	<b>Instalaciones de protección contra incendios</b>	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>				<b>Puntos</b>
		<b>Con vigilancia humana</b>		<b>Sin vigilancia humana</b>		
	Detección automática	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		4	3	2	0	
	Rociadores automáticos	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		8	7	6	5	
	Extintores portátiles	2		1		2
	Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0
Hidrantes exteriores	4		2		0	



	<b>Organización de la protección contra incendios</b>			<b>Puntos</b>
	Equipos de primera intervención (EPI)	2	2	2
	Equipos de segunda Intervención (ESI)	4	4	4
	Planes de emergencia	4	2	4
	<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>			<b>12</b>
	<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>			<b>5,566</b>

Tabla 2-84 Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI

Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy Alto
Entre 3 y 5	Alto
<b>Entre 5 y 8</b>	<b>Medio</b>
Superior a 8	Bajo

G. ID 5: Subestación – 44 KVA

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-85 Caracterización Zona: Subestación 44 KVA – Zona El Palmar

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	05
Características	Esta subestación empezó a funcionar el 17 de enero del año en curso, es decir, se puso en servicio y operación en esa fecha. Se destacan los protocolos que se manejan para el ingreso al lugar; además de estar muy ordenada y limpia. Esta subestación cuenta con un transformador reductor, de 5.000 kVA de potencia. También se cuenta con un banco de 59 batería estacionarias del tipo plomo-ácido como fuente de respaldo en caso de ser necesario su uso.

ITEM	DESCRIPCIÓN
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	<p>En este tipo de subestaciones, que son del tipo convencional, generalmente las fallas más frecuentes en transformadores inmersos en líquido que pueden ocasionar una interrupción en el servicio además de fuego y/o explosión; en este caso, podría tratarse de una falla dieléctrica.</p> <p>A pesar de lo anterior, se evidenció que la subestación cuenta con dique de contención de derrames; y que adicionalmente, las distancias de seguridad a otros equipos cumplen con lo indicado en la NFPA 850, para transformadores refrigerados por aceite. Por último, al ser un equipo nuevo no se esperan fallas producto del desgaste de piezas o falta de mantenimiento y las fallas en etapas tempranas del proceso por errores en el montaje no se han presentado.</p>
Tipo de elemento almacenado	Aceite inhibido (dieléctrico)
Rombo de seguridad	
Cantidad:	3337 L
Presión de almacenamiento:	68.9 KPa
Potencial Combustible (MJ/kg):	42
Observaciones/ Comentarios	<p>En el momento de la visita, se evidenció que los extintores se encontraban vencidos, lo que puede provocar fallos en su funcionamiento durante una descarga y, adicionalmente, crear una falsa sensación de seguridad.</p> <p>Por lo anterior, se recomienda recargar los extintores y realizarles el mantenimiento adecuado.</p>

Análisis del nivel de peligro MESERI:

A continuación, se presentan los resultados del análisis de riesgo realizado para la instalación:

Tabla 2-86 Método Simplificado de Evaluación de Riesgo/Peligro de Incendio (MESERI)  
Subestación 44 KVA

<b>MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)</b>					
			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>			
	1 o 2	Inferior a 6	3	3	
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2		
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1		
	Más de 10	Más de 28	0		
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m<sup>2</sup>)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Inferior a 500		5		
	de 501 a 1500		4	4	
	de 1501 a 2500		3		
	de 2501 a 3500		2		
	de 3501 a 4500		1		
	mayor a 4500		0		
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alta (ej. hormigón)		10		
	Media		5	5	
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0		
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
No existen		5	5		
incombustibles (M0)		3			
Combustibles (M4 o peor)		0			
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Menor de 5	Menor de 5	10		
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8		
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6	6	
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2		
	Más de 20	Más de 25	0		
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Buena		5	5	
	Media		3		
	Mala		1		
Muy mala		0			

<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Bajo			10	10	
	Medio			5		
	Alto			0		
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja (Inferior a 1000)			10	10	
	Moderada (Entre 1000 y 2000)			5		
	Alta (Entre 2000 y 5000)			2		
	Muy alta (superior a 5000)			0		
	<b>Inflamabilidad</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			5	5	
	Media			3		
	Alta			0		
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alto			10	5	
	Medio			5		
	Bajo			0		
	<b>Almacenamiento en altura</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
Menor de 2m			3	3		
Entre 2 y 6m			2			
Superior a 6m			0			
<b>Factores de valor económico de los bienes</b>	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	<b>COP MILL/ m2</b>	Inferior a 2,6	<b>Euros /m2</b>	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	2
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	
<b>Factores de destructibilidad</b>	<b>Destructibilidad por calor</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por humo</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10	10	
	Media			5		
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
Baja			10	10		

<b>Factores de propagabilidad</b>	Media	5	
	Alta	0	
	<b>Destructibilidad por agua</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	10	
	Media	5	5
	Alta	0	
	<b>Propagabilidad horizontal</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	5	5
	Media	3	
	Alta	0	
	<b>Propagabilidad vertical</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	5	5
	Media	3	
	Alta	0	
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>			<b>103</b>

<b>Factores de protección</b>	<b>Instalaciones de protección contra incendios</b>	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>				<b>Puntos</b>
		<b>Con vigilancia humana</b>		<b>Sin vigilancia humana</b>		
		Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	
	Detección automática	4	3	2	0	0
	Rociadores automáticos	8	7	6	5	0
	Extintores portátiles	2		1		0
	Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0
	Hidrantes exteriores	4		2		0
	<b>Organización de la protección contra incendios</b>					<b>Puntos</b>
	Equipos de primera intervención (EPI)	2		2		2
	Equipos de segunda Intervención (ESI)	4		4		4
	Planes de emergencia	4		2		4
	<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>					<b>10</b>

<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>	<b>5,658</b>
-----------------------------------	--------------



Tabla 2-87 Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI

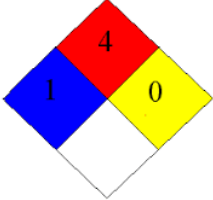
Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy alto
Entre 3 y 5	Alto
<b>Entre 5 y 8</b>	<b>Medio</b>
Superior a 8	Bajo

H. ID 6: Estación de gas casino del campamento Tacuí – Zona de parqueo.

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-88 Caracterización Zona: Estación de Gas

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	06
Características	La estación de gas se compone de un almacenamiento de cilindros de gas natural comprimido, dispuestos en tres (3) racks metálicos en la zona del parqueadero; también cuenta con una estación reguladora de presión y de conexión a la red del campamento, dispuesta al interior de una caseta protegida con mallas con acceso restringido.
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	De acuerdo con lo observado en sitio, el escenario más probable de incendio es uno en el cual se presenta una fuga de gas en el uno de los empalmes o mangueras del colector, se dispersa el gas en la zona y una chispa generada por un vehículo circundante o por un fenómeno estático ocasiona la conflagración.
Tipo de elemento almacenado	Gas Natural Comprimido (compuesto principalmente por Metano)

ITEM	DESCRIPCIÓN
Rombo de seguridad	
Cantidad:	170 pipetas de 0,145m <sup>3</sup> de capacidad volumétrica
Presión de almacenamiento:	1200 psi
Potencial Combustible (MJ/Kg):	2,9
Observaciones/ Comentarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se identifica que la siguiente prueba para los cilindros debía ser el 19 de dic de 2020.</li> <li>- La zona cuenta con un extintor multipropósito de 150 Lb tipo satélite, con fecha de recarga del 20 de agosto de 2020.</li> <li>- No se evidencian sistemas de extinción con agua en las zonas cercanas.</li> <li>- La estación de gas se encuentra cercana a zonas boscosas y a oficinas del personal construidas con muros en drywall.</li> <li>- La zona no cuenta con barreras de protección para evitar colisiones de los vehículos con los racks y es de acceso libre al público.</li> <li>- La zona se encuentra aireada y en un espacio libre, de fácil acceso para el personal de atención de riesgo.</li> </ul>

#### Análisis del nivel de peligro MESERI:

De acuerdo con un análisis preliminar de las condiciones del sitio, se considera que el sitio es susceptible a presentar un riesgo de incendio; por lo anterior, se realiza la caracterización del nivel de riesgo por medio del método MESERI, en el cual se muestran los resultados a continuación:

Tabla 2-89 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI)\_ Estación de gas

MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN RIESGO/PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)						
				Puntuación	Puntos	
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>		<b>Altura del edificio (m)</b>			
	1 o 2		Inferior a 6		3	3
	de 3 a 5		Entre 6 y 15		2	
	De 6 a 9		Entre 16 y 28		1	
	Más de 10		Más de 28		0	
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m<sup>2</sup>)</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Inferior a 500				5	
	de 501 a 1500				4	
	de 1501 a 2500				3	

	de 2501 a 3500		2	
	de 3501 a 4500		1	
	mayor a 4500		0	0
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alta (ej. hormigón)		10	
	Media		5	
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0	0
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	No existen		5	
	incombustibles (M0)		3	
	Combustibles (M4 o peor)		0	0
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Menor de 5	Menor de 5	10	
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8	
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6	
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2	
	Más de 20	Más de 25	0	0
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Buena		5	
Media		3	3	
Mala		1		
Muy mala		0		
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Bajo		10	
	Medio		5	
	Alto		0	0
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja (Inferior a 1000)		10	10
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5	
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2	
	Muy alta (superior a 5000)		0	
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja		5	
	Media		3	
	Alta		0	0
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alto		10	10
	Medio		5	
	Bajo		0	
<b>Almacenamiento en altura</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
Menor de 2m		3	3	
Entre 2 y 6m		2		
Superior a 6m		0		

Factores de valor económico de los bienes	Concentración de valores				Puntuación	Puntos
	COP MILL/ m2	Inferior a 2,6	Euros /m2	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	0
Factores de destructibilidad	Destructibilidad por calor				Puntuación	Puntos
	Baja				10	
	Media				5	
	Alta				0	0
	Destructibilidad por humo				Puntuación	Puntos
	Baja				10	
	Media				5	
	Alta				0	0
	Destructibilidad por corrosión				Puntuación	Puntos
	Baja				10	10
	Media				5	
	Alta				0	
	Destructibilidad por agua				Puntuación	Puntos
	Baja				10	10
	Media				5	
Alta				0		
Factores de propagabilidad	Propagabilidad horizontal				Puntuación	Puntos
	Baja				5	
	Media				3	
	Alta				0	0
	Propagabilidad vertical				Puntuación	Puntos
	Baja				5	5
	Media				3	
Alta				0		
FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)						54
Factores de protección	Instalaciones de protección contra incendios	VIGILANCIA HUMANA				Puntos
		Con vigilancia humana		Sin vigilancia humana		
	Detección automática	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		4	3	2	0	
	Rociadores automáticos	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		8	7	6	5	
	Extintores portátiles	2		1		0
	Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0
	Hidrantes exteriores	4		2		0
Organización de la protección contra incendios					Puntos	

	Equipos de primera intervención (EPI)	2	2	2
	Equipos de segunda Intervención (ESI)	4	4	4
	Planes de emergencia	4	2	2
			<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>	<b>8</b>
			<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>	<b>3,4264</b>

Tabla 2-90 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI

Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy Alto
<b>Entre 3 y 5</b>	<b>Alto</b>
Entre 5 y 8	Medio
Superior a 8	Bajo

**NOTA:** De acuerdo con lo anterior, el resultado de peligro de  $P= 3,4263$  representa un nivel de riesgo **ALTO**; por lo cual, se considera necesario realizar un análisis más profundo de las consecuencias de un evento de incendio en esta zona.


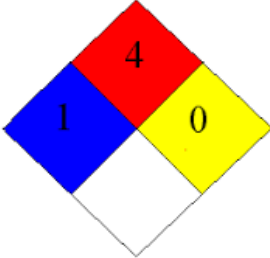
#### I. ID 7: Taller ATB – Zona Villaluz

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-91 Caracterización Zona: Taller ATB – Zona Villaluz

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	07
Características	<p>El taller de fabricación de ATB cuenta con una zona cubierta en la cual se realizan las labores de fabricación, una zona exterior de almacenamiento de insumos y consumibles.</p> <p>Dentro de los posibles elementos generadores de riesgo de incendio se ha identificado un almacenamiento de pinturas al interior de la bodega, los cuales cuentan con cárcamo recolector fabricado en lámina metálica, en una zona con acceso restringido, señalizada, en la cual no se evidencian elementos iniciadores de incendio en las cercanías a esta; por lo anterior, este escenario de incendio se descarta.</p> <p>Adicionalmente, se logró identificar un almacenamiento de químicos en la parte exterior de la bodega, donde almacenan cilindros de Propano, Star-Gold (Argón + CO<sub>2</sub>) y oxígeno.</p> <p>El taller tiene, también, una subestación de 13.200 V con dos transformadores trifásicos de 500 kVA, con un volumen de almacenamiento de 441 L localizados en la parte posterior, en una zona de acceso restringido, la cual se encuentra alejado de los demás riesgos y tiene cárcamo recolector de aceite.</p>



ITEM	DESCRIPCIÓN
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	Se ha considerado que el escenario más probable de incendio está en la zona de almacenamiento de cilindros exteriores, donde una fuga en los cilindros de propano puede provocar un incendio al generarse una chispa. Este escenario es el más riesgoso debido a que los cilindros de propano están cercanos a cilindros de oxígeno, los cuales pueden aumentar la potencia del incendio.
Tipo de elemento almacenado	Propano
Rombo de seguridad	
Cantidad:	4 cilindros de 45 Kg de Propano = 180 Kg 2 cilindros de 18kg de propano: 36kg
Presión de almacenamiento:	80 a 150 psi
Potencial Combustible (MJ/Kg):	46
Observaciones/ Comentarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El taller cuenta con extintores manuales tipo ABC multipropósito distribuidos en la bodega.</li> <li>- Las zonas de trabajos en caliente están separadas de las zonas de almacenamiento de oxígeno dentro de la bodega.</li> <li>- De acuerdo con lo indicado en la NFPA 850, el volumen de aceite del transformador al ser inferior a 500 gal no requiere muros cortafuegos y la separación a las demás estructuras está dentro de los rangos requeridos.</li> </ul>

Análisis de nivel de peligro MESERI:

A continuación, se presentan los resultados del análisis de riesgo realizado para la instalación:

Tabla 2-92 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) Subestación 44kVA El Palmar

<b>MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)</b>				
			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>		
	1 o 2	Inferior a 6	3	3
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2	
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1	
	Más de 10	Más de 28	0	
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Inferior a 500		5	
	de 501 a 1500		4	
	de 1501 a 2500		3	
	de 2501 a 3500		2	
	de 3501 a 4500		1	
	mayor a 4500		0	0
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alta (ej. hormigon)		10	
	Media		5	
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0	0
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	No existen		5	
incombustibles (M0)		3		
Combustibles (M4 o peor)		0	0	
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Menor de 5	Menor de 5	10	
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8	
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6	
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2	
	Más de 20	Más de 25	0	0
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Buena		5	
	Media		3	3
	Mala		1	

	Muy mala		0			
Factores de proceso/operación	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Bajo		10			
	Medio		5			
	Alto		0	0		
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja (Inferior a 1000)		10	10		
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5			
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2			
	Muy alta (superior a 5000)		0			
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja		5			
	Media		3			
	Alta		0	0		
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Alto		10	10		
	Medio		5			
	Bajo		0			
	<b>Almacenamiento en altura</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
Menor de 2m		3	3			
Entre 2 y 6m		2				
Superior a 6m		0				
Factores de valor económico de los bienes	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	COP MILL/ m2	Inferior a 2,6	Euros /m2	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	0
Factores de destructibilidad	<b>Destructibilidad por calor</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja		10			
	Media		5			
	Alta		0	0		
	<b>Destructibilidad por humo</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja		10			
	Media		5			
	Alta		0	0		
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja		10	10		
Media		5				

<b>Factores de propagabilidad</b>	Alta	0	
	<b>Destructibilidad por agua</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	10	10
	Media	5	
	Alta	0	
	<b>Propagabilidad horizontal</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	5	
	Media	3	
	Alta	0	0
	<b>Propagabilidad vertical</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	5	5
	Media	3	
	Alta	0	
	<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>		

<b>Factores de protección</b>	<b>Instalaciones de protección contra incendios</b>	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>				<b>Puntos</b>
		<b>Con vigilancia humana</b>		<b>Sin vigilancia humana</b>		
	Detección automática	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		4	3	2	0	
	Rociadores automáticos	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		8	7	6	5	
	Extintores portátiles	2		1		0
	Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0
	Hidrantes exteriores	4		2		0
	<b>Organización de la protección contra incendios</b>					<b>Puntos</b>
	Equipos de primera intervención (EPI)	2		2		2
	Equipos de segunda Intervención (ESI)	4		4		4
	Planes de emergencia	4		2		2
	<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>					<b>8</b>
<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>					<b>3,426</b>	


Tabla 2-93 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI

Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy Alto
<b>Entre 3 y 5</b>	<b>Alto</b>
Entre 5 y 8	Medio
Superior a 8	Bajo


J. ID 8: Estación de combustible

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-94 Caracterización Zona: Estación de combustible

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	08
Características	<p>La zona de estación de combustible es utilizada para el cargue de combustible a diferentes vehículos del proyecto.</p> <p>En la zona se encuentran tres (3) tanques de almacenamiento de combustible: dos (2) tanques de 12.000 galones y un (1) tanque de 10.000 galones. Los tanques se encuentran dispuestos al interior de una cuba que hace veces de contenedor de derrames y están expuestos a las condiciones ambientales del sitio. Los tanques cuentan, adicionalmente, con señalización y demarcación de seguridad.</p> <p>Al respecto de la zona donde se encuentran ubicados los tanques de combustible, no se identifican estructuras aledañas a excepción de una caseta para el operador y el espacio se encuentra libre. En el perímetro del sitio hay árboles.</p> <p>Al respecto de la atención a emergencias, el sitio cuenta con un (1) hidrante con dos (2) tomas de manguera y su respectiva dotación localizada al interior de un gabinete, tres (3) extintores tipo satélite multipropósito, señalización de emergencia y, adicionalmente, con el espacio abierto y sin obstrucciones para el ingreso del personal de emergencias.</p>
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	<p>El escenario más probable de incendio se da por la acumulación dentro del tanque de vapores inflamables, los cuales se pueden ocasionar un incendio bajo el efecto de una chispa o descarga eléctrica en el proceso de "tanqueo" de los camiones.</p>



ITEM	DESCRIPCIÓN
Tipo de elemento almacenado	Biodiésel B1-B20, en un 99% Diesel.
Rombo de seguridad	
Cantidad:	Dos (2) tanques de 12000 galones y un (1) tanque de 10000 gal.
Presión de almacenamiento:	Presión ambiente
Potencial Combustible (MJ/Kg):	43 MJ/Kg
Observaciones/ Comentarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se identifican canecas de espuma ni proporcionador/eductores para instalar en las tomas de manguera del hidrante.</li> <li>- Se desconoce la capacidad en cuanto a presión y caudal del hidrante instalado en sitio.</li> </ul>

#### Análisis del nivel de peligro MESERI:

De acuerdo con un análisis preliminar de las condiciones del sitio, se considera que el sitio es susceptible a presentar un riesgo de incendio; por lo anterior, se realiza la caracterización del nivel de riesgo por medio del método MESERI, en el cual se muestran los resultados a continuación:

Tabla 2-95 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) \_ Estación de combustible

MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)				
			Puntuación	Puntos
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>		
	1 o 2	Inferior a 6	3	3
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2	
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1	
	Más de 10	Más de 28	0	
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m<sup>2</sup>)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Inferior a 500		5	
	de 501 a 1500		4	
	de 1501 a 2500		3	
	de 2501 a 3500		2	2
	de 3501 a 4500		1	
	mayor a 4500		0	
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>			<b>Puntuación</b>

	Alta (ej. hormigón)	10	
	Media	5	
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)	0	0
	<b>Falsos techos/suelos</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	No existen	5	5
	incombustibles (M0)	3	
	Combustibles (M4 o peor)	0	
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>
	Menor de 5	Menor de 5	10
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2
	Más de 20	Más de 25	0
	<b>Accesibilidad al edificio</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Buena	5	5
	Media	3	
	Muy mala	0	
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Bajo	10	
	Medio	5	
	Alto	0	0
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja (Inferior a 1000)	10	
	Moderada (Entre 1000 y 2000)	5	5
	Alta (Entre 2000 y 5000)	2	
	Muy alta (superior a 5000)	0	
	<b>Inflamabilidad</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	5	
	Media	3	
	Alta	0	0
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alto	10	
	Medio	5	5
	Bajo	0	
	<b>Almacenamiento en altura</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
Menor de 2m	3		
Entre 2 y 6m	2	2	

	Superior a 6m			0		
Factores de valor económico de los bienes	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	COP MILL/ m2	Inferior a 2,6	Euros /m2	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	2
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	
Factores de destructibilidad	<b>Destructibilidad por calor</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5		
	Alta			0	0	
	<b>Destructibilidad por humo</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por agua</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
Factores de propagabilidad	<b>Propagabilidad horizontal</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			5		
	Media			3		
	Alta			0	0	
	<b>Propagabilidad vertical</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			5	5	
	Media			3		
Alta			0			
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>					<b>59</b>	

Factores de protección	Instalaciones de protección contra incendios	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>				<b>Puntos</b>
		<b>Con vigilancia humana</b>		<b>Sin vigilancia humana</b>		
	Detección automática	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		4	3	2	0	
	Rociadores automáticos	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		8	7	6	5	
Extintores portátiles	2		1		2	
Gabinetes/tomas de	4		2		4	

	manguera			
	Hidrantes exteriores	4	2	0
<b>Organización de la protección contra incendios</b>				<b>Puntos</b>
	Equipos de primera intervención (EPI)	2	2	2
	Equipos de segunda Intervención (ESI)	4	4	4
	Planes de emergencia	4	2	4
<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>				<b>16</b>
<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>				<b>4,95</b>

Tabla 2-96 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI



Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy Alto
<b>Entre 3 y 5</b>	<b>Alto</b>
Entre 5 y 8	Medio
Superior a 8	Bajo

K. ID 9: Taller de mantenimiento – Plazoleta casa de máquinas

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-97 Caracterización Zona: Taller de mantenimiento – Plazoleta casa de máquinas

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	09
Características	<p>El taller de mantenimiento de la obra es el lugar donde se le hace mantenimiento a los buses, camiones y equipos de construcción de la obra.</p> <p>El taller está dividido en tres (3) zonas principales: una zona de mantenimiento de maquinaria amarilla, una zona de mantenimiento de buses y camiones y una tercera zona de almacenamiento de insumos.</p> <p>En las zonas de mantenimiento se evidencia el orden y el aseo, las zonas demarcadas adecuadamente y extintores multipropósito distribuidos en las diferentes áreas. No se identificaron elementos iniciadores de incendios.</p> <p>La bodega de almacenamiento de aceites, grasas e insumos cuenta con un dique de contención, no se evidencian elementos iniciadores de incendio en el sitio.</p> <p>Por otro lado, como elementos de apoyo se encuentran tres zonas: un (1) almacenamiento de aceite y usado, un acopio de residuos químicos cercana a la subestación de 13200 kVA, en medio del taller.</p> <p>El almacenamiento de aceites usados está alejado de elementos iniciadores de llama, cuenta con un dique de contención de derrames y se encuentra señalizado adecuadamente.</p> <p>Se ha identificado el acopio de productos químicos que se encuentra en el área central del taller como la zona más propensa a un incendio; lo anterior, por su cercanía con la subestación eléctrica.</p>

ITEM	DESCRIPCIÓN
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	El escenario más probable de incendio se ha identificado en el acopio de productos químicos, en el cual una evaporación del “thinner” almacenado pueda generar una atmosfera peligrosa, la cual puede generar un incendio por una chispa generada por una acumulación electrostática en la zona de los transformadores.
Tipo de elemento almacenado	El thinner está compuesto principalmente por Tolueno.
Rombo de seguridad	
Cantidad:	Una (1) Caneca de 55 Galones
Presión de almacenamiento:	Presión atmosférica
Potencial Combustible (MJ/Kg):	38,8
Observaciones/ Comentarios	Se recomienda reubicar el almacenamiento de thinner lejano de la zona de la subestación y de lugares donde se pueda dar una ignición por chispa.

#### Análisis de nivel de peligro MESERI:

De acuerdo con un análisis preliminar de las condiciones del sitio, se considera que el sitio es susceptible a presentar un riesgo de incendio; por lo anterior, se realiza la caracterización del nivel de riesgo por medio del método MESERI, en el cual se muestran los resultados a continuación:



Tabla 2-98 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) Taller de mantenimiento

<b>MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)</b>					
			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>			
	1 o 2	Inferior a 6	3	3	
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2		
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1		
	Más de 10	Más de 28	0		
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Inferior a 500		5		
	de 501 a 1500		4		
	de 1501 a 2500		3	3	
	de 2501 a 3500		2		
	de 3501 a 4500		1		
	mayor a 4500		0		
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alta (ej. hormigón)		10		
	Media		5	5	
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0		
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	No existen		5	5	
	incombustibles (M0)		3		
	Combustibles (M4 o peor)		0		
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Menor de 5	Menor de 5	10	10	
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8		
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6		
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2		
	Más de 20	Más de 25	0		
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Buena		5		
	Media		3	5	
	Mala		1		
Muy mala		0			
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Bajo		10		
	Medio		5	5	

	Alto			0		
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja (Inferior a 1000)			10	10	
	Moderada (Entre 1000 y 2000)			5		
	Alta (Entre 2000 y 5000)			2		
	Muy alta (superior a 5000)			0		
	<b>Inflamabilidad</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			5		
	Media			3	3	
	Alta			0		
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alto			10	10	
	Medio			5		
	Bajo			0		
	<b>Almacenamiento en altura</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Menor de 2m			3	3	
	Entre 2 y 6m			2		
	Superior a 6m			0		
Factores de valor económico de los bienes	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	COP MILL/ m2	Inferior a 2,6	Euros /m2	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	0
Factores de destructibilidad	<b>Destructibilidad por calor</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por humo</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10	10	
	Media			5		
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por agua</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
Media			5	5		

<b>Factores de propagabilidad</b>	Alta	0	
	<b>Propagabilidad horizontal</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	5	
	Media	3	
	Alta	0	0
	<b>Propagabilidad vertical</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja	5	5
	Media	3	
	Alta	0	
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>			<b>92</b>

	<b>Instalaciones de protección contra incendios</b>	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>				<b>Puntos</b>
		<b>Con vigilancia humana</b>		<b>Sin vigilancia humana</b>		
	Detección automática	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	
		4	3	2	0	0
	Rociadores automáticos	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	
		8	7	6	5	0
	Extintores portátiles	2		1		2
	Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0
	Hidrantes exteriores	4		2		0
	<b>Organización de la protección contra incendios</b>					<b>Puntos</b>
	Equipos de primera intervención (EPI)	2		2		2
	Equipos de segunda Intervención (ESI)	4		4		4
	Planes de emergencia	4		2		4
<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>						<b>12</b>
<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>						<b>5,565</b>

Tabla 2-99 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI

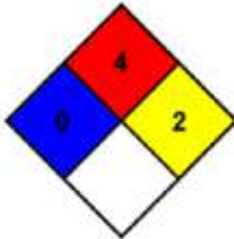
<b>Valor de peligro (P)</b>	<b>Calificación del peligro</b>
Inferior a 3	Muy alto
Entre 3 y 5	Alto
<b>Entre 5 y 8</b>	<b>Medio</b>
Superior a 8	Bajo

L. ID 10: Taller industrial

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-100 Caracterización Zona: Taller Industrial

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	10
Características	En esta área se realizan actividades varias, como la reparación de piezas metálicas, equipos, incluye todos los procesos relacionados con carpintería metálica.
Registro Fotográfico	  
Escenario probable de incendio	Incendio del acetileno causado por las chispas del proceso de soldadura, las

ITEM	DESCRIPCIÓN
y explosión	cuales se propaguen por la falta de muros cortafuegos. Sin embargo, este peligro solamente se da durante los trabajos en caliente.
Tipo de elemento almacenado	Acetileno C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Rombo de seguridad	
Cantidad:	2 cilindros de 5.5 Kg
Presión de almacenamiento:	Presión de vapor: 4400 kPa Presión crítica: 6138 kPa
Potencial Combustible (MJ/Kg):	50,2
Observaciones/ Comentarios	- Se observa que el orden y aseo es susceptible de mejora.

#### Análisis del nivel de peligro MESERI:

De acuerdo con un análisis preliminar de las condiciones del sitio, se considera que el sitio es susceptible a presentar un riesgo de incendio; por lo anterior, se realiza la caracterización del nivel de riesgo por medio del método MESERI, en el cual se muestran los resultados a continuación:

Tabla 2-101 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI)

MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)					
			Puntuación	Puntos	
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>			
	1 o 2	Inferior a 6	3	3	
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2		
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1		
	Más de 10	Más de 28	0		
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m<sup>2</sup>)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Inferior a 500		5		
	de 501 a 1500		4	4	
	de 1501 a 2500		3		
	de 2501 a 3500		2		



	de 3501 a 4500	1		
	mayor a 4500	0		
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alta (ej. hormigon)	10		
	Media	5		
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)	0	0	
	<b>Falsos techos/suelos</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	No existen	5	5	
	incombustibles (M0)	3		
	Combustibles (M4 o peor)	0		
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	
	Menor de 5	Menor de 5	10	
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8	
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6	
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2	
	Más de 20	Más de 25	0	
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Buena		5	
	Media		3	3
	Mala		1	
Muy mala		0		
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	
	Bajo		10	
	Medio		5	
	Alto		0	
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja (Inferior a 1000)		10	10
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5	
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2	
	Muy alta (superior a 5000)		0	
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja		5	
	Media		3	
	Alta		0	0
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
Alto		10		

		Medio		5	5	
		Bajo		0		
		<b>Almacenamiento en altura</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
		Menor de 2m		3	3	
		Entre 2 y 6m		2		
		Superior a 6m		0		
Factores de valor económico de los bienes	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	COP MILL/ m2	Inferior a 2,6	Euros /m2	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	2
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	
Factores de destructibilidad	<b>Destrucción por calor</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
			Baja	10	10	
			Media	5		
			Alta	0		
		<b>Destrucción por humo</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
			Baja	10	10	
			Media	5		
			Alta	0		
		<b>Destrucción por corrosión</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
			Baja	10	10	
			Media	5		
			Alta	0		
		<b>Destrucción por agua</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
			Baja	10		
			Media	5	5	
		Alta	0			
Factores de propagabilidad	<b>Propagabilidad horizontal</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
			Baja	5		
			Media	3	3	
			Alta	0		
		<b>Propagabilidad vertical</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
			Baja	5	5	
			Media	3		
		Alta	0			
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>					<b>93</b>	

Previsión de protección	Instalaciones de	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>	<b>Puntos</b>
-------------------------	------------------	--------------------------	---------------

	protección contra incendios	Con vigilancia humana		Sin vigilancia humana		
		Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	
Detección automática	Con CRA	4	3	2	0	0
	Sin CRA					
Rociadores automáticos	Con CRA	8	7	6	5	0
	Sin CRA					
Extintores portátiles	2		1		2	
Gabinets/tomas de manguera	4		2		0	
Hidrantes exteriores	4		2		0	
<b>Organización de la protección contra incendios</b>						<b>Puntos</b>
Equipos de primera intervención (EPI)	2		2		2	
Equipos de segunda Intervención (ESI)	4		4		4	
Planes de emergencia	4		2		4	
<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>						<b>12</b>
<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>						<b>5,60</b>

Tabla 2-102 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI


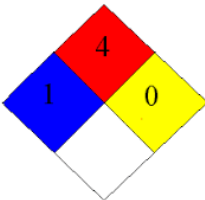
Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy Alto
Entre 3 y 5	Alto
<b>Entre 5 y 8</b>	<b>Medio</b>
Superior a 8	Bajo

M. ID 11: Estación de gas GLP – Campamento Villa Luz

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-103 Caracterización Zona: Estación de Gas – Campamento Villaluz

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	11
Características	Esta estación de GLP sirve como combustible para la cocción de alimentos en el casino de Villa luz, para la zona de lavandería y los calentadores de agua de las habitaciones del campamento de Villa Luz.

ITEM	DESCRIPCIÓN
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	El almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo conlleva peligros y riesgos, debido a las propiedades físico-químicas altamente combustibles y explosivas; en este caso, el escenario probable es una posible fuga de gas.
Tipo de elemento almacenado	GLP (Gas licuado de petróleo)
Rombo de seguridad	
Cantidad:	1 tanque de 10000 galones
Presión de almacenamiento:	45 psi
Potencial Combustible (MJ/Kg):	46
Observaciones/ Comentarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se evidencia personal de vigilancia constante en el sitio.</li> <li>- La zona se observa bien demarcada y señalizada. Se logra identificar claramente el tipo de químico utilizado.</li> </ul>

Análisis del nivel de peligro MESERI:

Tabla 2-104 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) \_ Estación de GLP

<b>MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)</b>					
			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>			
	1 o 2	Inferior a 6	3	3	
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2		
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1		
	Más de 10	Más de 28	0		
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Inferior a 500		5		
	de 501 a 1500		4		
	de 1501 a 2500		3	3	
	de 2501 a 3500		2		
	de 3501 a 4500		1		
	mayor a 4500		0		
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alta (ej. hormigón)		10		
	Media		5		
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0	0	
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
No existen		5	5		
incombustibles (M0)		3			
Combustibles (M4 o peor)		0			
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Menor de 5	Menor de 5	10		
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8		
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6	6	
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2		
	Más de 20	Más de 25	0		
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Buena		5		
	Media		3	3	
	Mala		1		
Muy mala		0			
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Bajo		10		
	Medio		5	5	
	Alto		0		



	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja (Inferior a 1000)			10		
	Moderada (Entre 1000 y 2000)			5		
	Alta (Entre 2000 y 5000)			2	2	
	Muy alta (superior a 5000)			0		
	<b>Inflamabilidad</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			5		
	Media			3		
	Alta			0	0	
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alto			10	10	
	Medio			5		
	Bajo			0		
	<b>Almacenamiento en altura</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Menor de 2m			3		
	Entre 2 y 6m			2	2	
Superior a 6m			0			
<b>Factores de valor económico de los bienes</b>	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	<b>COP MILL/ m2</b>	Inferior a 2,6	<b>Euros /m2</b>	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	2
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	
<b>Factores de destructibilidad</b>	<b>Destructibilidad por calor</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por humo</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por agua</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10	10	
	Media			5		
	Alta			0		

<b>Factores de propagabilidad</b>				
	<b>Propagabilidad horizontal</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja		5	
	Media		3	3
	Alta		0	
	<b>Propagabilidad vertical</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja		5	5
	Media		3	
Alta		0		
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>				<b>74</b>

<b>Factores de protección</b>	<b>Instalaciones de protección contra incendios</b>	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>				<b>Puntos</b>
		<b>Con vigilancia humana</b>		<b>Sin vigilancia humana</b>		
		Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	
Detección automática	Con CRA	4	3	2	0	0
	Sin CRA					
Rociadores automáticos	Con CRA	8	7	6	5	0
	Sin CRA					
Extintores portátiles	2		1		1	
Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0	
Hidrantes exteriores	4		2		0	
<b>Organización de la protección contra incendios</b>					<b>Puntos</b>	
Equipos de primera intervención (EPI)	2		2		2	
Equipos de segunda Intervención (ESI)	4		4		4	
Planes de emergencia	4		2		4	
<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>					<b>11</b>	

<b>VALORACIÓN DEL RIESGO/PELIGRO (P)</b>	<b>4,702</b>
--	--------------

Tabla 2-105 Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI



<b>Valor de /peligro (P)</b>	<b>Calificación del peligro</b>
Inferior a 3	Muy Alto
<b>Entre 3 y 5</b>	<b>Alto</b>
Entre 5 y 8	Medio
Superior a 8	Bajo

N. ID 13: Planta Diésel – Plazoleta Casa de máquinas

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-106 Caracterización Zona: Planta Diésel – Plazoleta Casa de máquinas

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	13
Características	Esta zona cuenta con un tanque enterrado de doble pared donde se almacena combustible diésel, con capacidad de 10000 L, dos transformadores de potencia de instalación exterior, trifásicos, en aceite, con refrigeración natural tipo ONAN, de 1250 kVA, 0,48/13,2 kV, elevador; dos plantas diesel de 910 ekW 1138 kVA 60 Hz 1800 rpm 480 Volts.
Registro Fotográfico	

ITEM	DESCRIPCIÓN
	
Escenario probable de incendio y explosión	El escenario más probable se da por una falla en el generador de la planta, el cual produce una chispa que incendia el combustible presente en el equipo y este se propaga por la tubería que conecta al tanque de almacenamiento.
Tipo de elemento almacenado	Diésel
Rombo de seguridad	
Cantidad:	5000 gal
Presión de almacenamiento:	Presión ambiental
Potencial Combustible (MJ/Kg):	43
Observaciones/ Comentarios	- No se evidencia señalización de los peligros asociados a la planta, transformador y almacenamiento de combustible.

Análisis del nivel de peligro MESERI:

Tabla 2-107 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) \_ Planta Diésel.

MÉTODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)				
			Puntuación	Puntos
Factores de construcción	Número de plantas/pisos del edificio		Altura del edificio (m)	
	1 o 2		Inferior a 6	
	de 3 a 5		Entre 6 y 15	
	De 6 a 9		Entre 16 y 28	
	Más de 10		Más de 28	
			3	3
			2	
			1	
			0	

	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Inferior a 500		5	
	de 501 a 1500		4	4
	de 1501 a 2500		3	
	de 2501 a 3500		2	
	de 3501 a 4500		1	
	mayor a 4500		0	
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alta (ej. hormigón)		10	
	Media		5	5
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0	
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	No existen		5	
	incombustibles (M0)		3	3
Combustibles (M4 o peor)		0		
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Menor de 5	Menor de 5	10	10
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8	
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6	
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2	
	Más de 20	Más de 25	0	
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Buena		5	
	Media		3	3
	Muy mala		0	
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Bajo		10	
	Medio		5	5
	Alto		0	
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja (Inferior a 1000)		10	
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5	5
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2	
	Muy alta (superior a 5000)		0	
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja		5	
	Media		3	3
	Alta		0	



	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alto			10	10	
	Medio			5		
	Bajo			0		
	<b>Almacenamiento en altura</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Menor de 2m			3	3	
	Entre 2 y 6m			2		
	Superior a 6m			0		
<b>Factores de valor económico de los bienes</b>	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	<b>COP MILL/ m2</b>	Inferior a 2,6	<b>Euros /m2</b>	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	0
<b>Factores de destructibilidad</b>	<b>Destructibilidad por calor</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por humo</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10	10	
	Media			5		
	Alta			0		
	<b>Destructibilidad por agua</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			10	10	
	Media			5		
	Alta			0		
<b>Factores de propagabilidad</b>	<b>Propagabilidad horizontal</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			5		
	Media			3	3	
	Alta			0		
	<b>Propagabilidad vertical</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Baja			5	5	
	Media			3		
Alta			0			

**FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)**
**92**

Factores de protección	Instalaciones de protección contra incendios	VIGILANCIA HUMANA				Puntos
		Con vigilancia humana		Sin vigilancia humana		
	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA		
Detección automática	Con CRA	4	3	2	0	0
	Sin CRA					
Rociadores automáticos	Con CRA	8	7	6	5	0
	Sin CRA					
Extintores portátiles	2		1		0	
Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0	
Hidrantes exteriores	4		2		0	
<b>Organización de la protección contra incendios</b>						<b>Puntos</b>
Equipos de primera intervención (EPI)	2		2		2	
Equipos de segunda Intervención (ESI)	4		4		4	
Planes de emergencia	4		2		4	
<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>						<b>10</b>
<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>						<b>5,23</b>

Tabla 2-108 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI

Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy alto
Entre 3 y 5	Alto
<b>Entre 5 y 8</b>	<b>Medio</b>
Superior a 8	Bajo


O. ID 16: Planta Diésel – Campamento Tacuí

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-109 Caracterización Zona: Planta Diesel – Campamento Tacuí

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	16
Características	Se evidencia que en las zonas cercanas a la planta se están almacenando aceites en canecas de galón. A pesar de que la zona cuenta con acceso restringido al personal no autorizado

ITEM	DESCRIPCIÓN
	<p>y separado de las demás áreas, no está cerrado completamente en su perímetro con materiales cortafuegos, lo que aumenta su capacidad de propagación a otras zonas.</p> <p>El sitio cuenta con extintores manuales, pero no cuenta con la etiqueta donde se refleje la fecha de vencimiento; condición que no permite garantizar su vigencia.</p> <p>En el área cuenta con un hidrante tipo petrolero cercano a la subestación.</p> <p>Esta zona cuenta con un tanque enterrado de doble pared donde se almacena combustible diésel, con capacidad de 10000 L, un transformador de potencia de instalación exterior, trifásicos, en aceite, con refrigeración natural tipo ONAN, de 1250 kVA, 0,48/13,2 kV, elevador; una planta diesel de 910 kW 1138 kVA 60 Hz 1800 rpm 480 Volts.</p>
<p>Escenario probable de incendio y explosión</p>	<p>El escenario más probable se da por una falla en el generador de la planta, el cual produce una chispa que incendia el combustible presente en el equipo y este se propaga por la tubería que conecta al tanque de almacenamiento.</p>
<p>Registro Fotográfico</p>	

ITEM	DESCRIPCIÓN
Tipo de elemento almacenado	Diésel
Rombo de seguridad	
Cantidad:	5000 Litros
Presión de almacenamiento:	Presión atmosférica
Potencial Combustible (MJ/Kg):	43
Observaciones/ Comentarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se evidencia señalización de los peligros asociados a la planta, transformador y almacenamiento de combustible.</li> <li>- La fecha de recarga del extintor se encuentra vencida.</li> </ul>

Análisis del nivel de peligro MESERI:

Tabla 2-110 Método Simplificado de Evaluación de Peligro de Incendio (MESERI) \_ Planta Diésel campamento Tacuí.

METODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)					
			Puntuación	Puntos	
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>			
	1 o 2	Inferior a 6	3	3	
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2		
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1		
	Más de 10	Más de 28	0		
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Inferior a 500		5		
	de 501 a 1500		4		
	de 1501 a 2500		3		
	de 2501 a 3500		2		
	de 3501 a 4500		1		
	mayor a 4500		0	0	
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Alta (ej. hormigón)		10		
	Media		5	5	
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0		
<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
No existen		5			

	incombustibles (M0)		3	3		
	Combustibles (M4 o peor)		0			
Factores de situación	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Menor de 5	Menor de 5	10			
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8			
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6			
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2	2		
	Más de 20	Más de 25	0			
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Buena		5			
	Media		3			
	Mala		1	1		
Muy mala		0				
Factores de proceso/operación	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Bajo		10			
	Medio		5	5		
	Alto		0			
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja (Inferior a 1000)		10	10		
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5			
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2			
	Muy alta (superior a 5000)		0			
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Baja		5			
	Media		3	3		
	Alta		0			
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Alto		10			
	Medio		5	5		
	Bajo		0			
	<b>Almacenamiento en altura</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>		
	Menor de 2m		3	3		
	Entre 2 y 6m		2			
Superior a 6m		0				
Factores de valor económico de los bienes	<b>Concentración de valores</b>			<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	COP MILL/ m2	Inferior a 2,6	Euros /m2	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	2



		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	
<b>Factores de destructibilidad</b>	<b>Destructibilidad por calor</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	
	Media				5	5
	Alta				0	
	<b>Destructibilidad por humo</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	
	Media				5	5
	Alta				0	
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	10
	Media				5	
	Alta				0	
	<b>Destructibilidad por agua</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	
	Media				5	5
	Alta				0	
<b>Factores de propagabilidad</b>	<b>Propagabilidad horizontal</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				5	
	Media				3	3
	Alta				0	
	<b>Propagabilidad vertical</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				5	
	Media				3	3
Alta				0		
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>						<b>73</b>

<b>Factores de protección</b>	<b>Instalaciones de protección contra incendios</b>	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>				<b>Puntos</b>
		<b>Con vigilancia humana</b>		<b>Sin vigilancia humana</b>		
	Detección automática	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		4	3	2	0	
	Rociadores automáticos	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
		8	7	6	5	
Extintores portátiles	2		1		0	

	Gabinetes/tomas de manguera	4	2	0
	Hidrantes exteriores	4	2	4
	<b>Organización de la protección contra incendios</b>			<b>Puntos</b>
	Equipos de primera intervención (EPI)	2	2	2
	Equipos de segunda Intervención (ESI)	4	4	4
	Planes de emergencia	4	2	4
	<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>			<b>14</b>
	<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>			<b>5,162</b>

Tabla 2-111 Parámetros de nivel de calificación del riesgo/peligro método MESERI


Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy alto
Entre 3 y 5	Alto
<b>Entre 5 y 8</b>	<b>Medio</b>
Superior a 8	Bajo

P. ID 17: Subestación 44 KVA Plazoleta – Casa de máquinas

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-112 Caracterización Zona: Subestación 44 kVA – Casa de máquinas

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	17
Características	<p>En este momento la planta eléctrica no está operativa.</p> <p>Durante el recorrido en sitio se observó que el transformador cuenta con un dique de contención de derrames y con la separación a otros elementos cumpliendo con lo indicado en la NFPA 850.</p> <p>Respecto al almacenamiento de productos combustibles, se evidenció que en la zona donde está ubicada la planta están almacenadas unas canecas de combustible, las cuales se deben reubicar en el momento de arranque de la planta.</p> <p>Adicionalmente, en la zona de la subestación se encuentra el tanque de agua del sistema contra incendios y la planta de tratamiento de aguas.</p>

ITEM	DESCRIPCIÓN
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	El escenario más probable de incendio se da en el tiempo en el que la planta se encuentra operativa. El escenario más probable se da por una falla en el transformador de aceite por efecto de una sobrecarga eléctrica, lo que provoca un incremento súbito de presión al interior de la cuba del transformador causando una explosión.
Tipo de elemento almacenado	NYTRO IZAR II
Rombo de seguridad	Sin caracterización
Cantidad:	9,6 m3
Presión de almacenamiento:	44,8 kPa
Potencial Combustible (MJ/m2):	713,66
Observaciones/ Comentarios	En el momento de la visita se evidencia que los extintores están caducados.

Análisis del nivel de peligro MESERI:

Tabla 2-113 Método Simplificado de Evaluación de Riesgo/Peligro de Incendio (MESERI) \_  
Subestación 44 kVA – Casa de máquinas.

METODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)					
			Puntuación	Puntos	
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>			
	1 o 2	Inferior a 6	3	3	
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2		
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1		
	Más de 10	Más de 28	0		
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Inferior a 500		5		
	de 501 a 1500		4	4	
	de 1501 a 2500		3		
	de 2501 a 3500		2		
	de 3501 a 4500		1		
	mayor a 4500		0		
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
Alta (ej. hormigón)		10			

	Media		5	5
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0	
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	No existen		5	5
	incombustibles (M0)		3	
	Combustibles (M4 o peor)		0	
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Menor de 5	Menor de 5	10	10
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8	
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6	
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2	
	Más de 20	Más de 25	0	
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Buena		5	5
	Media		3	
	Mala		1	
Muy mala		0		
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Bajo		10	
	Medio		5	5
	Alto		0	
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja (Inferior a 1000)		10	10
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5	
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2	
	Muy alta (superior a 5000)		0	
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja		5	
	Media		3	3
	Alta		0	
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alto		10	
	Medio		5	5
	Bajo		0	
	<b>Almacenamiento en altura</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Menor de 2m		3	3
	Entre 2 y 6m		2	
Superior a 6m		0		

Factores de valor económico de los bienes	Concentración de valores			Puntuación	Puntos	
	COP MILL/ m2	Inferior a 2,6	Euros /m2	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	0
Factores de destructibilidad	Destructibilidad por calor			Puntuación	Puntos	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	Destructibilidad por humo			Puntuación	Puntos	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	Destructibilidad por corrosión			Puntuación	Puntos	
	Baja			10		
	Media			5	5	
	Alta			0		
	Destructibilidad por agua			Puntuación	Puntos	
	Baja			10		
	Media			5	5	
Alta			0			
Factores de propagabilidad	Propagabilidad horizontal			Puntuación	Puntos	
	Baja			5		
	Media			3	3	
	Alta			0		
	Propagabilidad vertical			Puntuación	Puntos	
	Baja			5	5	
	Alta			0		
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>				<b>86</b>		

Factores de protección	Instalaciones de protección contra incendios	VIGILANCIA HUMANA				Puntos
		Con vigilancia humana		Sin vigilancia humana		
	Detección automática	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	0
4		3	2	0		
Rociadores automáticos	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA		



	8	7	6	5	0
Extintores portátiles	2		1		0
Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0
Hidrantes exteriores	4		2		0
<b>Organización de la protección contra incendios</b>					<b>Puntos</b>
Equipos de primera intervención (EPI)	2		2		2
Equipos de segunda Intervención (ESI)	4		4		4
Planes de emergencia	4		2		4
<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>					<b>10</b>
<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>					<b>5</b>

Tabla 2-114 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI



Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy alto
Entre 3 y 5	Alto
<b>Entre 5 y 8</b>	<b>Medio</b>
Superior a 8	Bajo

Q. ID 18: Planta de concreto

A continuación, se presentan la caracterización de la zona analizada:

Tabla 2-115 Caracterización Zona: Planta de Concreto

ITEM	DESCRIPCIÓN
ID	18
Características	<p>El almacenamiento principal de esta zona se enfoca en 6 silos con una capacidad de 10000 litros cada uno, donde se almacenan insumos para la fabricación del concreto de la obra como SIKA Plast-327, SIKA Stabilizer y SIKA-Tard935.</p> <p>Si bien se han identificado varios químicos en este lugar que se utilizan para diferentes procesos, se considera el almacenamiento de amoniaco potencialmente peligroso, debido a sus características tóxicas que pueden generar daño a las personas por exposición y a su compleja manipulación.</p>

ITEM	DESCRIPCIÓN
Registro Fotográfico	
Escenario probable de incendio y explosión	El escenario de riesgo más probable se da por una fuga en el almacenamiento del amoniaco, que desate un riesgo para el personal por intoxicación y, adicionalmente, un posible incendio al generarse una chispa.
Tipo de elemento almacenado	Amoniaco
Rombo de seguridad	
Cantidad:	4 cilindros de 68kg cada uno
Presión de almacenamiento:	Presión atmosférica
Potencial Combustible (MJ/Kg):	18.83
Observaciones/ Comentarios	- El Amoniaco se encuentra almacenado dentro de un espacio de ingreso restringido, rodeado por malla electrosoldada.

Análisis del nivel de peligro MESERI:

Tabla 2-116 Método Simplificado de Evaluación de Riesgo/Peligro de Incendio (MESERI) \_ Planta de concreto.

METODO SIMPLIFICADO DE EVALUACIÓN PELIGRO DE INCENDIO (MESERI)					
			Puntuación	Puntos	
<b>Factores de construcción</b>	<b>Número de plantas/pisos del edificio</b>	<b>Altura del edificio (m)</b>			
	1 o 2	Inferior a 6	3		
	de 3 a 5	Entre 6 y 15	2	2	
	De 6 a 9	Entre 16 y 28	1		
	Más de 10	Más de 28	0		
	<b>Superficie del mayor sector de incendio (m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>	
	Inferior a 500		5		
	de 501 a 1500		4	4	
	de 1501 a 2500		3		

	de 2501 a 3500		2	
	de 3501 a 4500		1	
	mayor a 4500		0	
	<b>Resistencia al fuego de los elementos constructivos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alta (ej. hormigón)		10	
	Media		5	
	Baja (ej. elementos metálicos desnudos)		0	0
	<b>Falsos techos/suelos</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	No existen		5	5
	Incombustibles (M0)		3	
	Combustibles (M4 o peor)		0	
<b>Factores de situación</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Tiempo de llegada (min)</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Menor de 5	Menor de 5	10	10
	Entre 5 y 10	Entre 5 y 10	8	
	Entre 10 y 15	Entre 10 y 15	6	
	Entre 15 y 20	Entre 15 y 25	2	
	Más de 20	Más de 25	0	
	<b>Accesibilidad al edificio</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Buena		5	
	Media		3	3
	Mala		1	
Muy mala		0		
<b>Factores de proceso/operación</b>	<b>Peligro de activación</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Bajo		10	10
	Medio		5	
	Alto		0	
	<b>Carga térmica (MJ/m2)</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja (Inferior a 1000)		10	10
	Moderada (Entre 1000 y 2000)		5	
	Alta (Entre 2000 y 5000)		2	
	Muy alta (superior a 5000)		0	
	<b>Inflamabilidad</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja		5	
	Media		3	
	Alta		0	
	<b>Orden, limpieza y mantenimiento</b>		<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Alto		10	
Medio		5	5	
Bajo		0		

				<b>Almacenamiento en altura</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
				Menor de 2m	3	
				Entre 2 y 6m	2	2
				Superior a 6m	0	
<b>Factores de valor económico de los bienes</b>	<b>Concentración de valores</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	<b>COP MILL/ m2</b>	Inferior a 2,6	<b>Euros /m2</b>	Inferior a 600	3	
		Entre 2,6 y 6,5		Entre 600 y 1500	2	
		Superior a 6,5		Superior a 1500	0	0
<b>Factores de destructibilidad</b>	<b>Destructibilidad por calor</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	
	Media				5	5
	Alta				0	
	<b>Destructibilidad por humo</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	
	Media				5	5
	Alta				0	
	<b>Destructibilidad por corrosión</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	
	Media				5	5
	Alta				0	
	<b>Destructibilidad por agua</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				10	
	Media				5	5
Alta				0		
<b>Factores de propagabilidad</b>	<b>Propagabilidad horizontal</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				5	
	Media				3	3
	Alta				0	
	<b>Propagabilidad vertical</b>				<b>Puntuación</b>	<b>Puntos</b>
	Baja				5	
	Media				3	3
Alta				0		
<b>FACTORES GENERADORES Y AGRAVANTES (X)</b>						<b>77</b>

<b>Factores de protección</b>	<b>Instalaciones de protección contra incendios</b>	<b>VIGILANCIA HUMANA</b>				<b>Puntos</b>
		<b>Con vigilancia humana</b>		<b>Sin vigilancia humana</b>		
	Detección automática	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	

	4	3	2	0	0
Rociadores automáticos	Con CRA	Sin CRA	Con CRA	Sin CRA	
	8	7	6	5	0
Extintores portátiles	2		1		2
Gabinetes/tomas de manguera	4		2		0
Hidrantes exteriores	4		2		0
<b>Organización de la protección contra incendios</b>					<b>Puntos</b>
Equipos de primera intervención (EPI)	2		2		2
Equipos de segunda Intervención (ESI)	4		4		4
Planes de emergencia	4		2		4
<b>FACTORES REDUCTORES Y PROTECTORES (Y)</b>					<b>12</b>
<b>VALORACIÓN DEL PELIGRO (P)</b>					<b>4,9845</b>

Tabla 2-117 Parámetros de nivel de calificación del peligro método MESERI

Valor de peligro (P)	Calificación del peligro
Inferior a 3	Muy alto
<b>Entre 3 y 5</b>	<b>Alto</b>
Entre 5 y 8	Medio
Superior a 8	Bajo

#### 2.2.4.11.4 Análisis de consecuencias y área de afectación por almacenamiento y manejo de sustancias peligrosas

En esta etapa se realiza una evaluación del radio de afectación por los riesgos analizados en el programa ALOHA 5.4.7 (*Areal Locations of Hardous Atmospheres*), desarrollado por la NORA (*National Oceanic and atmospheric administration*) y la EPA (*Enviromental Protection Association*), el cual es un programa de modelación que estima zonas de riesgos asociados a la liberación de químicos peligrosos, incluyendo nubes de vapor tóxicos, incendios y explosiones. Ver mapas de anexos M-PHI-111-TRA-ISP-M-010 y M-PHI-111-TRA-IIE-M-010.

##### A. Cálculo de radio de afectación ID6 Estación Gas Tacuá

###### 1) Consideraciones iniciales

Se ha considerado que el evento de incendio más grave es en el cual existe una fuga en una de las mangueras del colector. Por lo anterior, se ha simplificado el modelo como un solo tanque



que presenta una fuga, en el cual el volumen total del tanque es la suma del volumen de todos los cilindros.

## 2) Datos de entrada ALOHA

### SITE DATA:

Location: VALLE DE TOLEDO, ANTIOQUIA, COLOMBIA  
 Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (unsheltered single storied)  
 Time: March 19, 2021 1222 hours ST (using computer's clock)

### CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHANE  
 CAS Number: 74-82-8 Molecular Weight: 16.04 g/mol  
 PAC-1: 65000 ppm PAC-2: 230000 ppm PAC-3: 400000 ppm  
 LEL: 50000 ppm UEL: 150000 ppm  
 Ambient Boiling Point: -162.1° C  
 Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm  
 Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

### ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 3 meters/second from NW at 3 meters  
 Ground Roughness: open country Cloud Cover: 0 tenths  
 Air Temperature: 28° C Stability Class: B  
 No Inversion Height Relative Humidity: 80%

### SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank  
 Flammable chemical escaping from tank (not burning)  
 Tank Diameter: 1.8 meters Tank Length: 9.69 meters  
 Tank Volume: 24.65 cubic meters  
 Tank contains gas only Internal Temperature: 28° C  
 Chemical Mass in Tank: 1.64 tons Internal Press: 1200 psia  
 Circular Opening Diameter: 2 inches  
 Release Duration: 6 minutes  
 Max Average Sustained Release Rate: 764 kilograms/min  
 (averaged over a minute or more)  
 Total Amount Released: 1,460 kilograms

## 3) Resultado numérico del radio de afectación

A continuación, se presentan los resultados generados por el programa ALOHA:

Tabla 2-118 Resultados de radio de afectación.

		Alto	Medio	Bajo
Nube de vapor tóxica	Nivel de afectación	PAC-3 = 400000 ppm	PAC-2 = 230000 ppm	PAC-1 = 65000 ppm
	Radio de afectación (m)	20 m	27 m	50 m
Zona inflamable	Nivel de afectación	100% LEL = 50000 ppm	60% LEL = 30000 ppm	10% LEL = 5000 ppm

		Alto	Medio	Bajo
	Radio de afectación (m)	81 m	105 m	245 m
Radiación térmica	Nivel de afectación	10 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	2 kW/m <sup>2</sup>
	Radio de afectación (m)	24 m	35 m	55 m
Sobrepresión	Nivel de afectación	8 psi	3,5 psi	1 psi
	Radio de afectación (m)	N/A	N/A	101 m

**NOTA:** No se presentan los resultados de sobrepresión para los niveles alto y medio porque en estos niveles no se excede el LOC (*Level Of Concern* - nivel de preocupación), por lo que no se da este escenario.

#### 4) Resultado grafico del radio de afectación

De acuerdo con lo revisado se tienen los siguientes resultados:

Tabla 2-119 ID 6 Estación Gas Tacuí - Zona riesgo vapores tóxicos



Tabla 2-120 ID 6 Estación Gas Tacuá - Zona riesgo inflamable



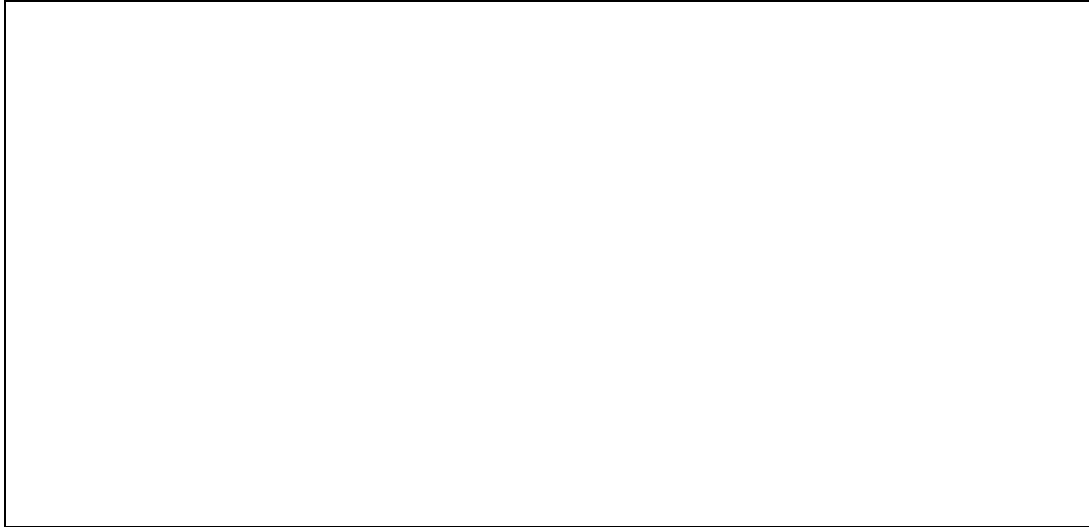




Tabla 2-121 ID 6 Estación Gas Tacuí - Resultado Radiación térmica

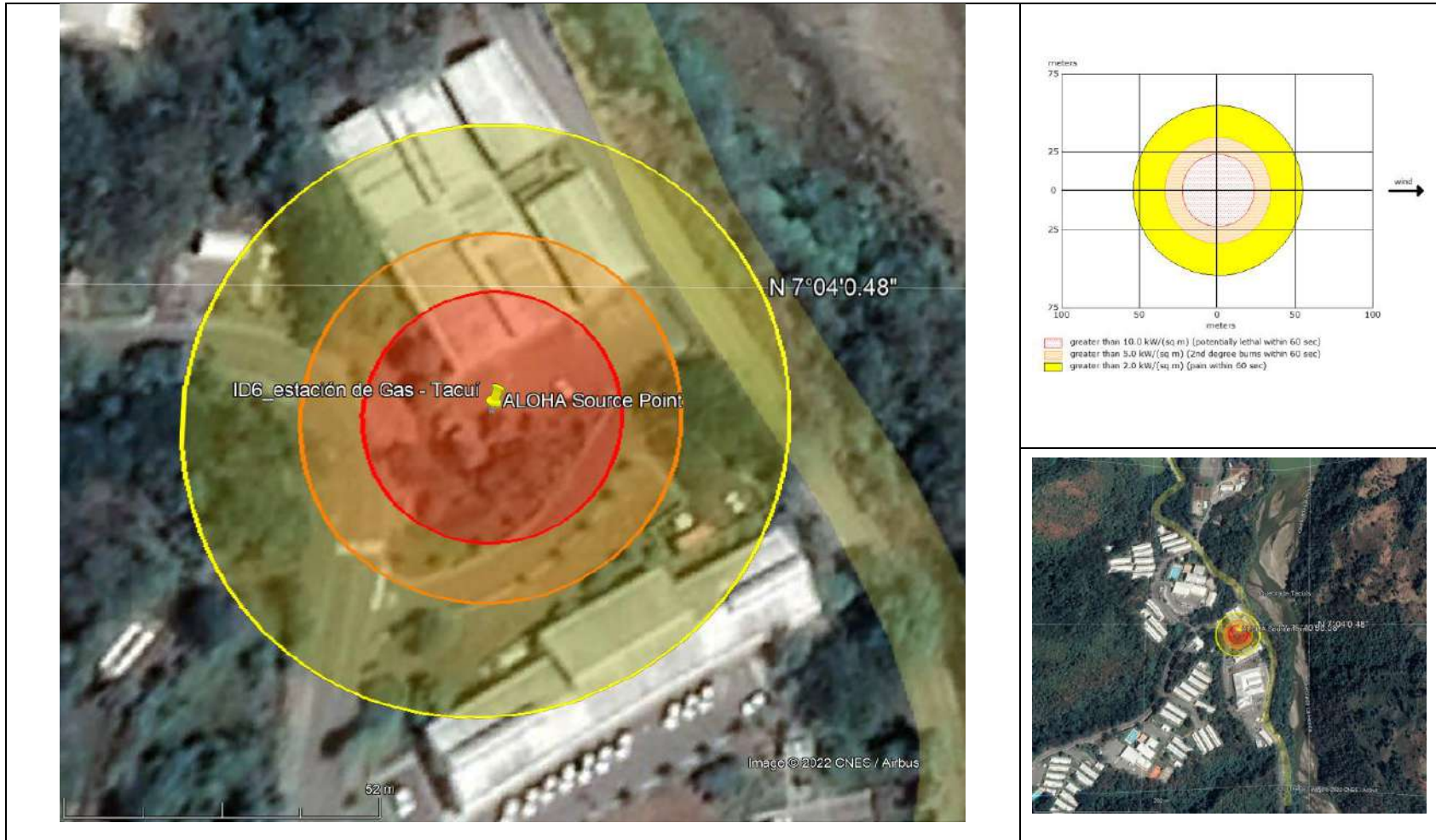


Tabla 2-122 ID 6 Estación Gas Tacuí - Zona riesgo de sobrepresión (fuerza de choque)



## B. Cálculo de radio de afectación ID 7 Taller ATB

### 1) Condiciones iniciales

En este punto se analizan dos eventos: una fuga en el tanque de almacenamiento y una posible explosión del tanque.

### 2) Datos de entrada ALOHA

#### SITE DATA:

Location: VALLE DE TOLEDO, ANTIOQUIA, COLOMBIA

Building Air Exchanges Per Hour: 0.79 (unsheltered single storied)

Time: April 20, 2021 0834 hours ST (using computer's clock)

#### CHEMICAL DATA:

Chemical Name: PROPANE

CAS Number: 74-98-6

Molecular Weight: 44.10 g/mol

AEGL-1 (60 min): 5500 ppm AEGL-2 (60 min): 17000 ppm

AEGL-3 (60 min): 33000 ppm

IDLH: 2100 ppm LEL: 21000 ppm UEL: 95000 ppm

Ambient Boiling Point: -43.3° C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

#### ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 3 meters/second from NW at 3 meters

Ground Roughness: open country

Cloud Cover: 0 tenths

Air Temperature: 28° F

Stability Class: B

No Inversion Height

Relative Humidity: 80%

#### SOURCE STRENGTH:

Leak from short pipe or valve in vertical cylindrical tank

Flammable chemical escaping from tank (not burning)

Tank Diameter: 0.64 meters

Tank Length: 1.2 meters

Tank Volume: 0.3829 cubic meters

Tank contains liquid

Internal Temperature: 28° F

Chemical Mass in Tank: 180 kilograms

Tank is 88% full

Circular Opening Diameter: 0.5 inches

Opening is 1.20 meters from tank bottom

Release Duration: 7 minutes

Max Average Sustained Release Rate: 31.3 kilograms/min(averaged over a minute or more)

Total Amount Released: 164 kilograms

Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

**SOURCE STRENGTH:**

BLEVE of flammable liquid in vertical cylindrical tank

Tank Diameter: 0.64 meters      Tank Length: 1.2 meters

Tank Volume: 0.3829 cubic meters

Tank contains liquid

Internal Storage Temperature: 28° F

Chemical Mass in Tank: 180 kilograms

Tank is 89% full

Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%

Fireball Diameter: 33 meters      Burn Duration: 3 seconds

**3) Resultado numérico del radio de afectación.**

A continuación, se presentan los resultados generados por el programa ALOHA:

**Tabla 2-123 Resultados de radio de afectación.**

		Alto	Medio	Bajo
Nube de vapor tóxica	Nivel de afectación	AEGL-3 = 33000 ppm	AEGL-2 = 17000 ppm	AEGL-1 = 5500 ppm
	Radio de afectación (m)	11 m	16 m	31 m
Zona inflamable	Nivel de afectación	100% LEL = 21000 ppm	60% LEL = 12600 ppm	10% LEL = 2100 ppm
	Radio de afectación (m)	13 m	20 m	54 m
Radiación térmica	Nivel de afectación	10 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	2 kW/m <sup>2</sup>



		Alto	Medio	Bajo
	Radio de afectación (m)	84 m	118 m	185 m
Sobrepresión	Nivel de afectación	8 psi	3,5 psi	1 psi
	Radio de afectación (m)	N/A	14 m	31 m

**Nota:** La concentración no es lo suficiente para que se dé una sobrepresión de 8psi.

4) Resultado gráfico del radio de afectación.

De acuerdo con lo revisado se tienen los siguientes resultados:



Tabla 2-124 ID 7 Taller ATB – Nube de vapor tóxica

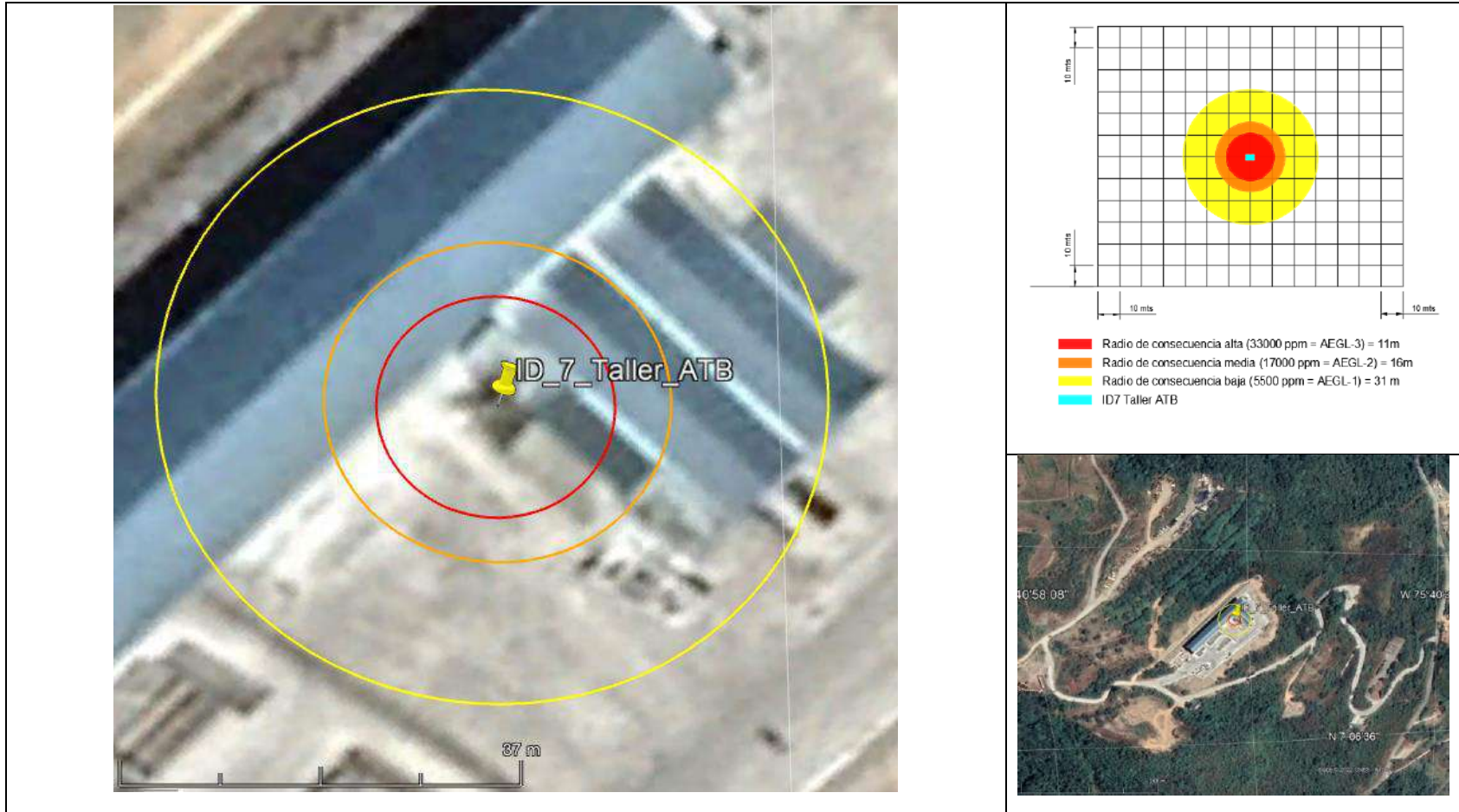
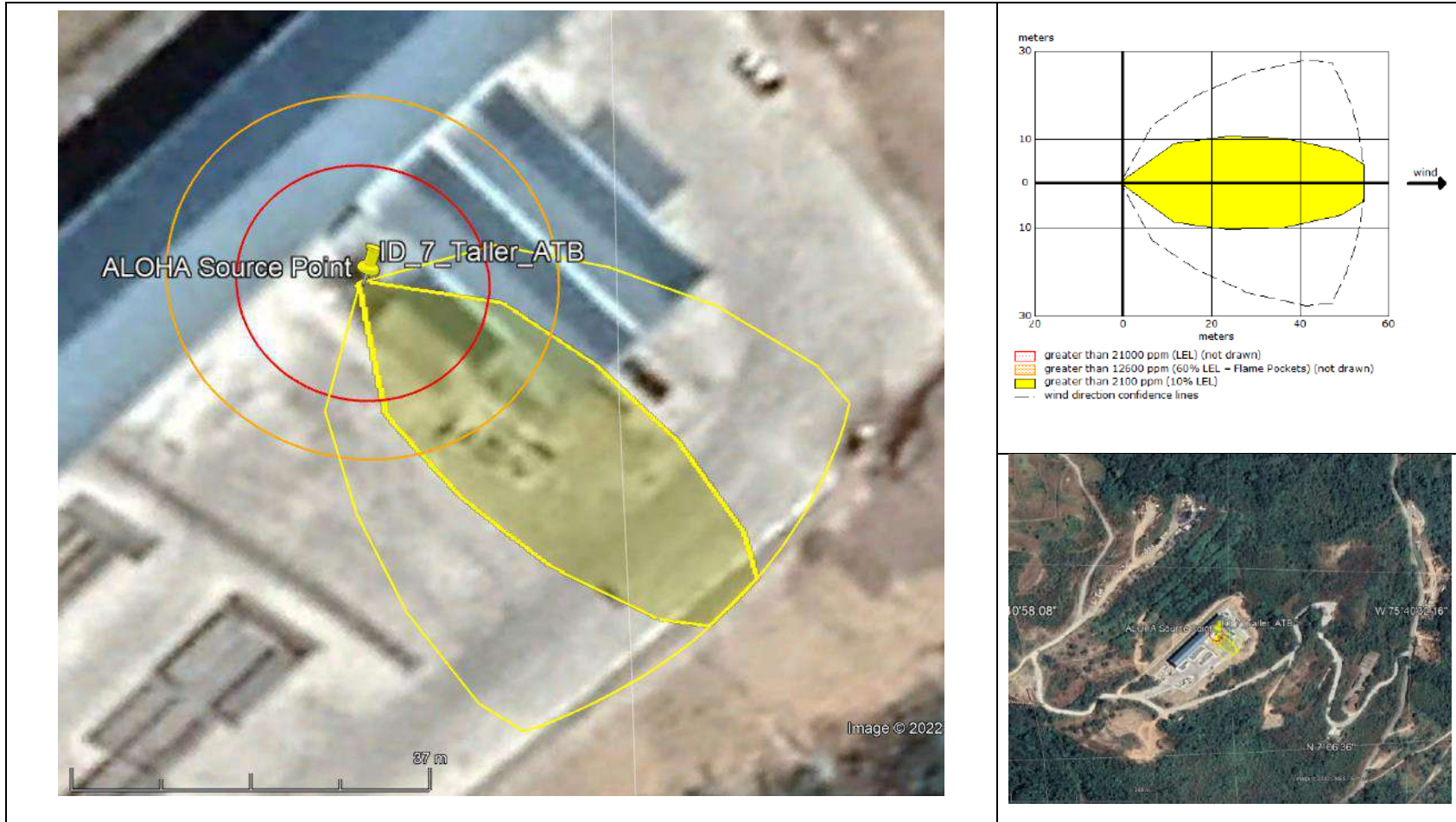


Tabla 2-125 ID 7 Taller ATB - Zona riesgo inflamable



HIDROELÉCTRICA ITUANGO S.A. E.S.P.

Naturalmente... ¡Buena energía!



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



<http://www.hidroituango.com.co>



[info@hidroituango.com.co](mailto:info@hidroituango.com.co)



PBX: (574) 5203160



Tabla 2-126 ID 7 Taller ATB - Resultado Radiación térmica

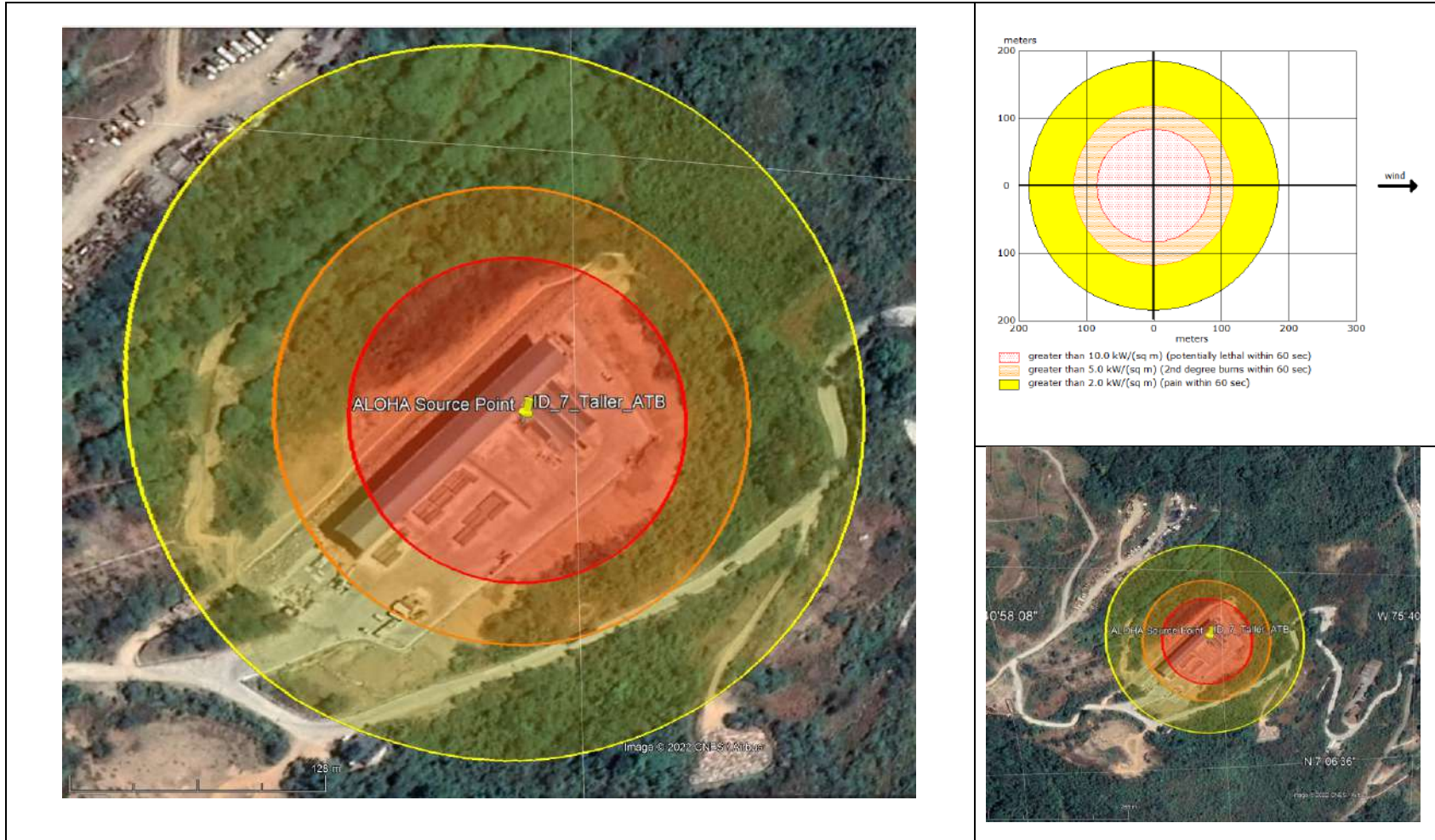
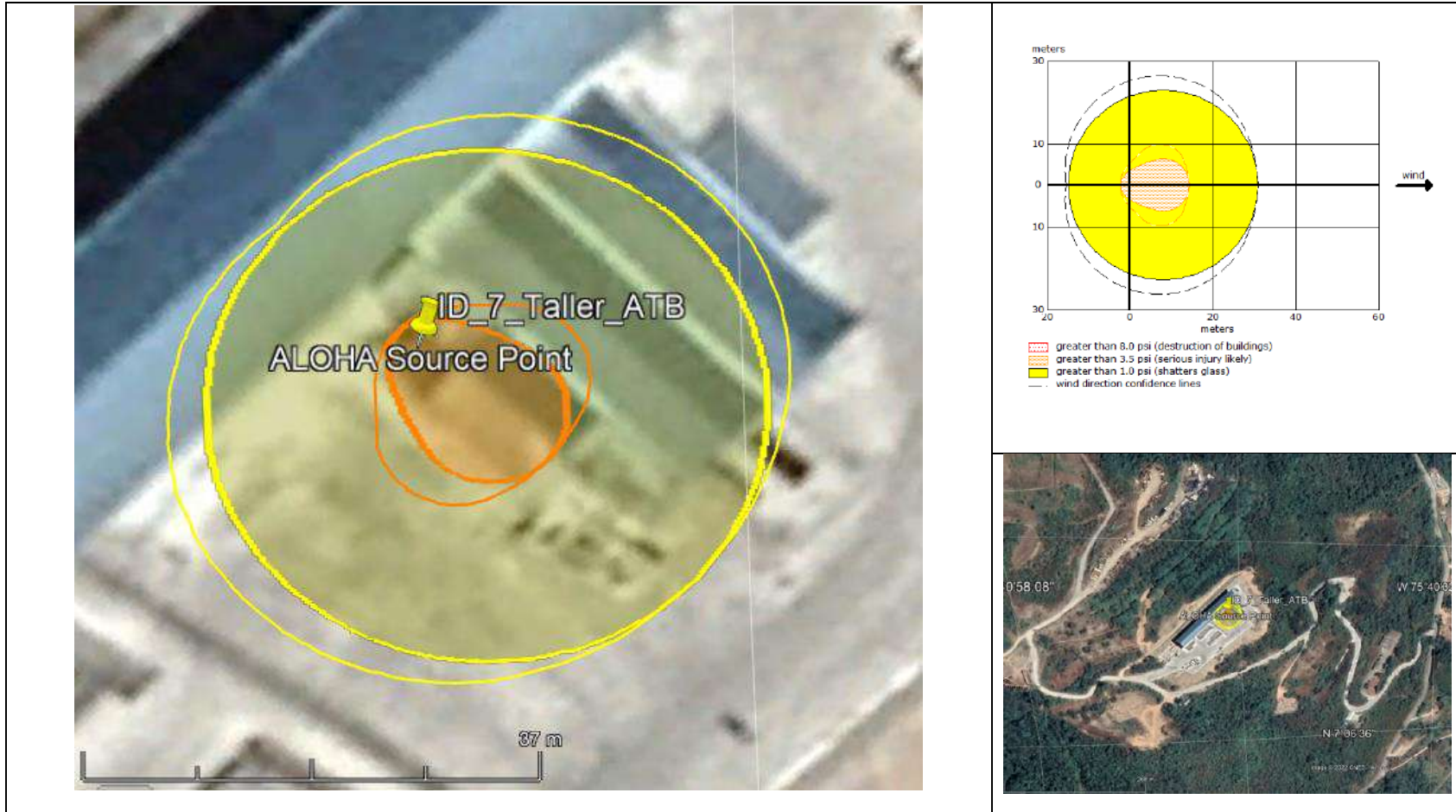


Tabla 2-127 ID 7 Taller ATB - Zona riesgo de sobrepresión (fuerza de choque)



### C. Cálculo de radio de afectación ID 8 Estación de combustible plazoleta

A continuación, se muestra el análisis de consecuencias de la zona analizada:

#### 1) Condiciones iniciales

Se han considerado dos eventos, un evento de fuga de combustible en el cual se analiza su radio de afectación por nube de vapor tóxica, inflamabilidad y sobrepresión y otro evento en el cual el tanque se incendia, donde se analiza radiación térmica.

#### 2) Datos de entrada ALOHA

##### SITE DATA:

Location: VALLE DE TOLEDO, ANTIOQUIA, COLOMBIA

Building Air Exchanges Per Hour: 0.55 (sheltered single storied)

Time: April 20, 2021 1045 hours ST (using computer's clock)

##### CHEMICAL DATA:

Chemical Name: N-DODECANE

CAS Number: 112-40-3

Molecular Weight: 170.33 g/mol

PAC-1: 1.7 ppm

PAC-2: 18 ppm

PAC-3: 110 ppm

LEL: 6000 ppm

UEL: 49000 ppm

Ambient Boiling Point: 214.1° C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: 2.26e-004 atm

Ambient Saturation Concentration: 238 ppm or 0.024%

##### ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 3 meters/second from NW at 3 meters

Ground Roughness: open country Cloud Cover: 0 tenths

Air Temperature: 28° C Stability Class: B

No Inversion Height Relative Humidity: 80%

##### SOURCE STRENGTH:

Leak from short pipe or valve in horizontal cylindrical tank

Flammable chemical escaping from tank (not burning)

Tank Diameter: 2.75 meters

Tank Length: 8.42 meters

Tank Volume: 50000 liters





Tank contains liquid Internal Temperature: 28° C

Chemical Mass in Tank: 33,804 kilograms

Tank is 91% full

Circular Opening Diameter: 1 inches

Opening is 0.28 meters from tank bottom

Ground Type: Concrete

Ground Temperature: equal to ambient

Max Puddle Diameter: Unknown

Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour

Max Average Sustained Release Rate: 272 grams/min (averaged over a minute or more)

Total Amount Released: 8.46 kilograms

Note: The chemical escaped as a liquid and formed an evaporating puddle.

The puddle spread to a diameter of 22 meters.

SOURCE STRENGTH:

Leak from short pipe or valve in horizontal cylindrical tank

Flammable chemical is burning as it escapes from tank

Tank Diameter: 2.75 meters Tank Length: 8.42 meters

Tank Volume: 50000 liters

Tank contains liquid Internal Temperature: 28° C

Chemical Mass in Tank: 33,804 kilograms

Tank is 91% full

Circular Opening Diameter: 1 inches

Opening is 0.28 meters from tank bottom

Max Puddle Diameter: Unknown

Max Flame Length: 6 meters

Burn Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour

Max Burn Rate: 22.8 kilograms/min

Total Amount Burned: 1,349 kilograms

Note: The chemical escaped as a liquid and formed a burning puddle.

The puddle spread to a diameter of 2.7 meters.

### 3) Resultado numérico del radio de afectación

A continuación, se presentan los resultados generados por el programa ALOHA:

Tabla 2-128 Resultados de radio de afectación.

		Alto	Medio	Bajo
Nube de vapor tóxica	Nivel de afectación	PAC-3 = 110 ppm	PAC-2 = 18 ppm	PAC-3 = 1.7 ppm
	Radio de afectación (m)	N/A	N/A	N/A
Zona inflamable	Nivel de afectación	100% LEL	60% LEL	10% LEL
	Radio de afectación (m)	N/A	N/A	N/A
Radiación térmica	Nivel de afectación	10 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	2 kW/m <sup>2</sup>
	Radio de afectación (m)	10 m	11 m	15 m
Sobrepresión	Nivel de afectación	8 psi	3,5 psi	1 psi
	Radio de afectación (m)	N/A	N/A	N/A

**Nota:** Las concentraciones de gases debido a fugas en el tanque no presentan una concentración suficiente para generar riesgos de nubes tóxicas, inflamabilidad o sobrepresión.

### 4) Resultado gráfico del radio de afectación.

De acuerdo con lo revisado se tienen gráficamente los siguientes resultados:

Tabla 2-129 ID 8 Estación combustible plazoleta - Resultado Radiación térmica – Incendio tipo “pool fire”.



#### D. Cálculo de radio de afectación ID 9 Taller de Mantenimiento

A continuación, se muestra el análisis de consecuencias de la zona analizada:

##### 1) Condiciones iniciales

Se han considerado dos eventos, un evento de fuga de combustible en el cual se analiza su radio de afectación por nube de vapor tóxica, inflamabilidad y sobrepresión y otro evento en el cual el tanque se incendia, donde se analiza radiación térmica.

##### 2) Datos de entrada ALOHA

###### SITE DATA:

Location: VALLE DE TOLEDO, ANTIOQUIA, COLOMBIA

Building Air Exchanges Per Hour: 0.40 (unsheltered single storied)

Time: April 22, 2021 1001 hours ST (using computer's clock)

###### CHEMICAL DATA:

Chemical Name: TOLUENE

CAS Number: 108-88-3

Molecular Weight: 92.14 g/mol

AEGL-1 (60 min): 67 ppm AEGL-2 (60 min): 560 ppm AEGL-3 (60 min): 3700 ppm

IDLH: 500 ppm LEL: 11000 ppm UEL: 71000 ppm

Ambient Boiling Point: 108.8° C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: 0.044 atm

Ambient Saturation Concentration: 46,108 ppm or 4.61%

###### ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 3 miles/hour from NW at 3 meters

Ground Roughness: open country Cloud Cover: 0 tenths

Air Temperature: 28° C Stability Class: B

No Inversion Height Relative Humidity: 80%

###### SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank

Flammable chemical escaping from tank (not burning)

Tank Diameter: 0.54 meters Tank Length: 0.92 meters

Tank Volume: 208 liters

Tank contains liquid Internal Temperature: 28° C

Chemical Mass in Tank: 179 kilograms

Tank is 100% full

Circular Opening Diameter: 2 inches

Opening is 5 centimeters from tank bottom

Ground Type: Concrete

Ground Temperature: equal to ambient

Max Puddle Diameter: Unknown

Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour

Max Average Sustained Release Rate: 1.64 kilograms/min (averaged over a minute or more)

Total Amount Released: 88.1 kilograms

Note: The chemical escaped as a liquid and formed an evaporating puddle.

The puddle spread to a diameter of 7.1 meters.

SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank

Flammable chemical is burning as it escapes from tank

Tank Diameter: 0.54 meters Tank Length: 0.92 meters

Tank Volume: 208 liters

Tank contains liquid Internal Temperature: 28° C

Chemical Mass in Tank: 179 kilograms

Tank is 100% full

Circular Opening Diameter: 2 inches

Opening is 5 centimeters from tank bottom

Max Puddle Diameter: Unknown

Max Flame Length: 12 meters

Burn Duration: 2 minutes

Max Burn Rate: 84.3 kilograms/min

Total Amount Burned: 171 kilograms

Note: The chemical escaped as a liquid and formed a burning puddle.

The puddle spread to a diameter of 4.7 meters.



### 3) Resultado numérico del radio de afectación.

A continuación, se presentan los resultados generados por el programa ALOHA:

Tabla 2-130 Resultados de radio de afectación.

		Alto	Medio	Bajo
Nube de vapor tóxica	Nivel de afectación	AEGL-3 = 3700 ppm	AEGL-2 = 560 ppm	AEGL-1 = 67 ppm
	Radio de afectación (m)	10 m	23 m	75 m
Zona inflamable	Nivel de afectación	100% LEL = 11000 ppm	60% LEL = 6600 ppm	10% LEL = 1100 ppm
	Radio de afectación (m)	N/A	10 m	17 m
Radiación térmica	Nivel de afectación	10 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	2 kW/m <sup>2</sup>
	Radio de afectación (m)	10 m	14 m	23 m
Sobrepresión	Nivel de afectación	8 psi	3,5 psi	1 psi
	Radio de afectación (m)	N/A	N/A	N/A

**NOTA:** La concentración del gas no alcanza a producir una nube inflamable para el 100% del LEL. Adicionalmente, no presenta un nivel de concentración suficiente para generar una explosión.

### 4) Resultado gráfico del radio de afectación

De acuerdo con lo revisado se tienen gráficamente los siguientes resultados:

Tabla 2-131 ID 09 Taller de Mantenimiento - Vapores tóxicos en la atmosfera



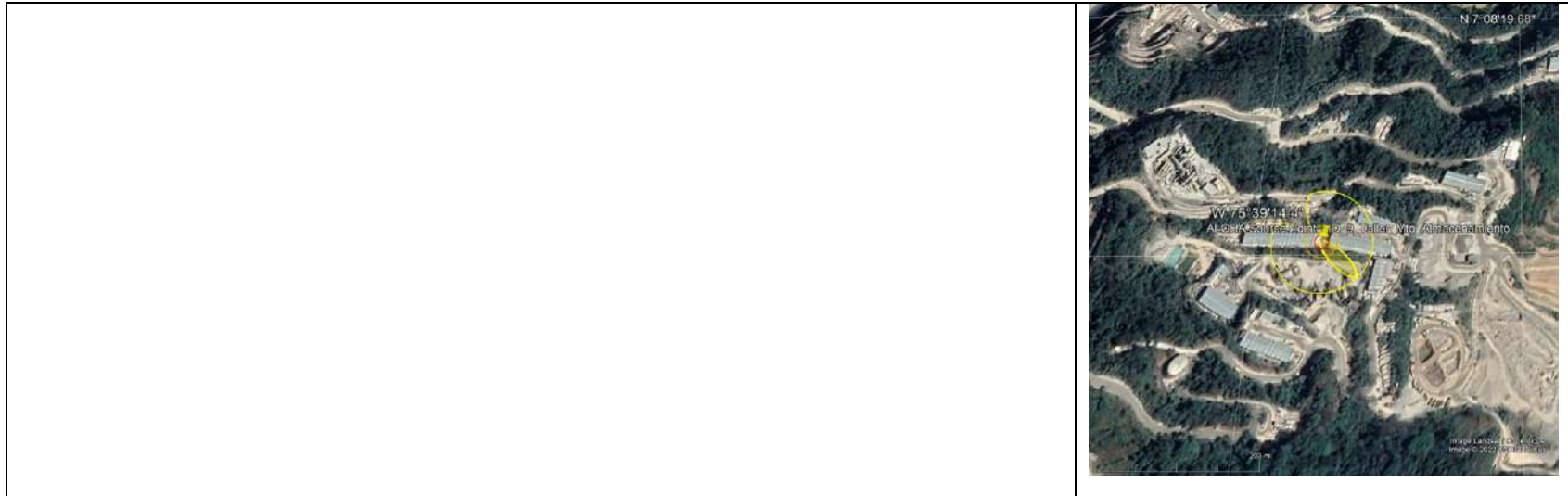


Tabla 2-132 ID 09 Taller de Mantenimiento - Zona riesgo inflamable

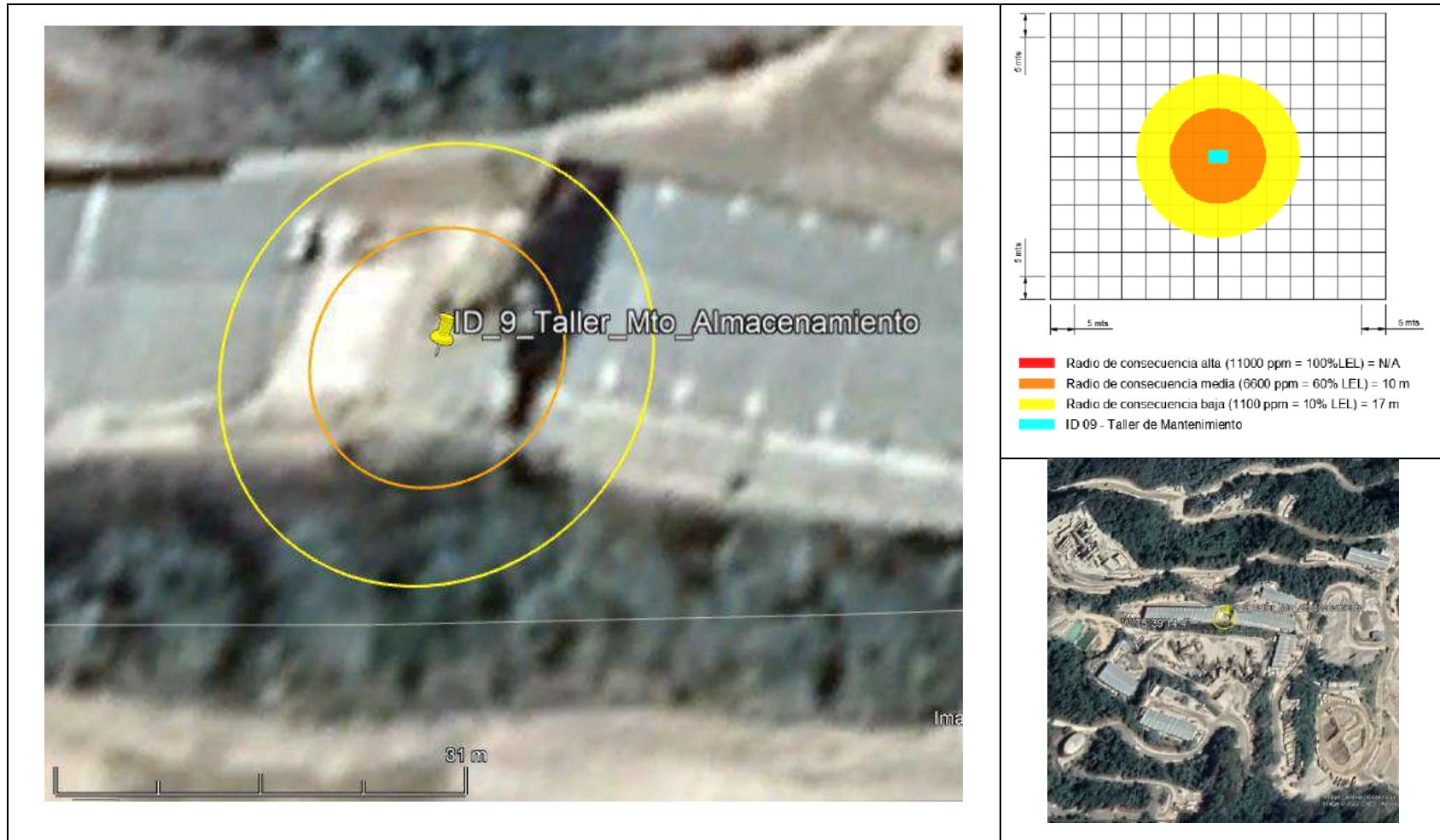
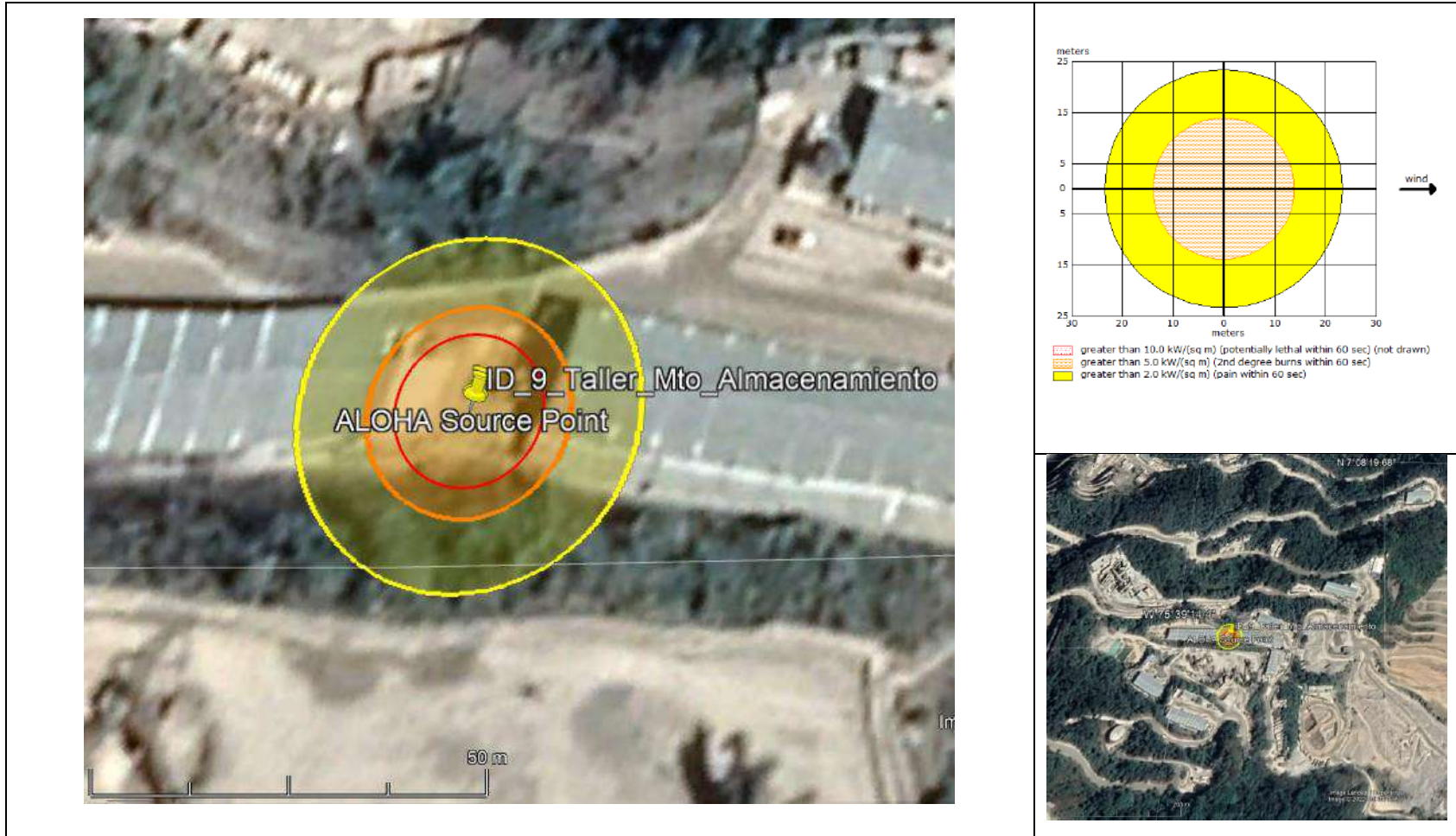




Tabla 2-133 ID 09 Taller de Mantenimiento - Resultado Radiación térmica





E. Cálculo de radio de afectación ID 11 Casino Villa Luz

A continuación, se muestra la identificación

1) Condiciones iniciales

- Fuga en válvula de 2" de diámetro en la parte superior.
- Se asumen las propiedades del GLP en su totalidad como propano.
- Se asume un tanque de 50000 Litros con un contenido del 90% en volumen.

2) Datos de entrada ALOHA

SITE DATA:

Location: VALLE DE TOLEDO, ANTIOQUIA, COLOMBIA

Building Air Exchanges Per Hour: 0.69 (unsheltered single storied)

Time: April 22, 2021 1045 hours ST (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: PROPANE

CAS Number: 74-98-6                      Molecular Weight: 44.10 g/mol

AEGL-1 (60 min): 5500 ppm              AEGL-2 (60 min): 17000 ppm

AEGL-3 (60 min): 33000 ppm

IDLH: 2100 ppm    LEL: 21000 ppm    UEL: 95000 ppm

Ambient Boiling Point: -43.3° C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 3 meters/second from NW at 3 meters

Ground Roughness: open country                      Cloud Cover: 0 tenths

Air Temperature: 28° C                      Stability Class: B

No Inversion Height                      Relative Humidity: 80%

SOURCE STRENGTH:

Leak from short pipe or valve in horizontal cylindrical tank

Flammable chemical escaping from tank (not burning)

Tank Diameter: 2.64 meters                      Tank Length: 9.128 meters

Tank Volume: 50000 liters

Tank contains liquid Internal Temperature: 28° C

Chemical Mass in Tank: 21,987 kilograms

Tank is 90% full

Circular Opening Diameter: 2 inches

Opening is 2.64 meters from tank bottom

Release Duration: 40 minutes

Max Average Sustained Release Rate: 895 kilograms/min (averaged over a minute or more)

Total Amount Released: 20,081 kilograms

Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

SOURCE STRENGTH:

Leak from short pipe or valve in horizontal cylindrical tank

Flammable chemical is burning as it escapes from tank

Tank Diameter: 2.64 meters Tank Length: 9.128 meters

Tank Volume: 50000 liters

Tank contains liquid Internal Temperature: 28° C

Chemical Mass in Tank: 21,987 kilograms

Tank is 90% full

Circular Opening Diameter: 2 inches

Opening is 2.64 meters from tank bottom

Max Flame Length: 20 meters Burn Duration: 40 minutes

Max Burn Rate: 915 kilograms/min

Total Amount Burned: 20,081 kilograms

Note: The chemical escaped from the tank and burned as a jet fire.

3) Resultado numérico del radio de afectación

A continuación, se presentan los resultados generados por el programa ALOHA:

Tabla 2-134 Resultados de radio de afectación.

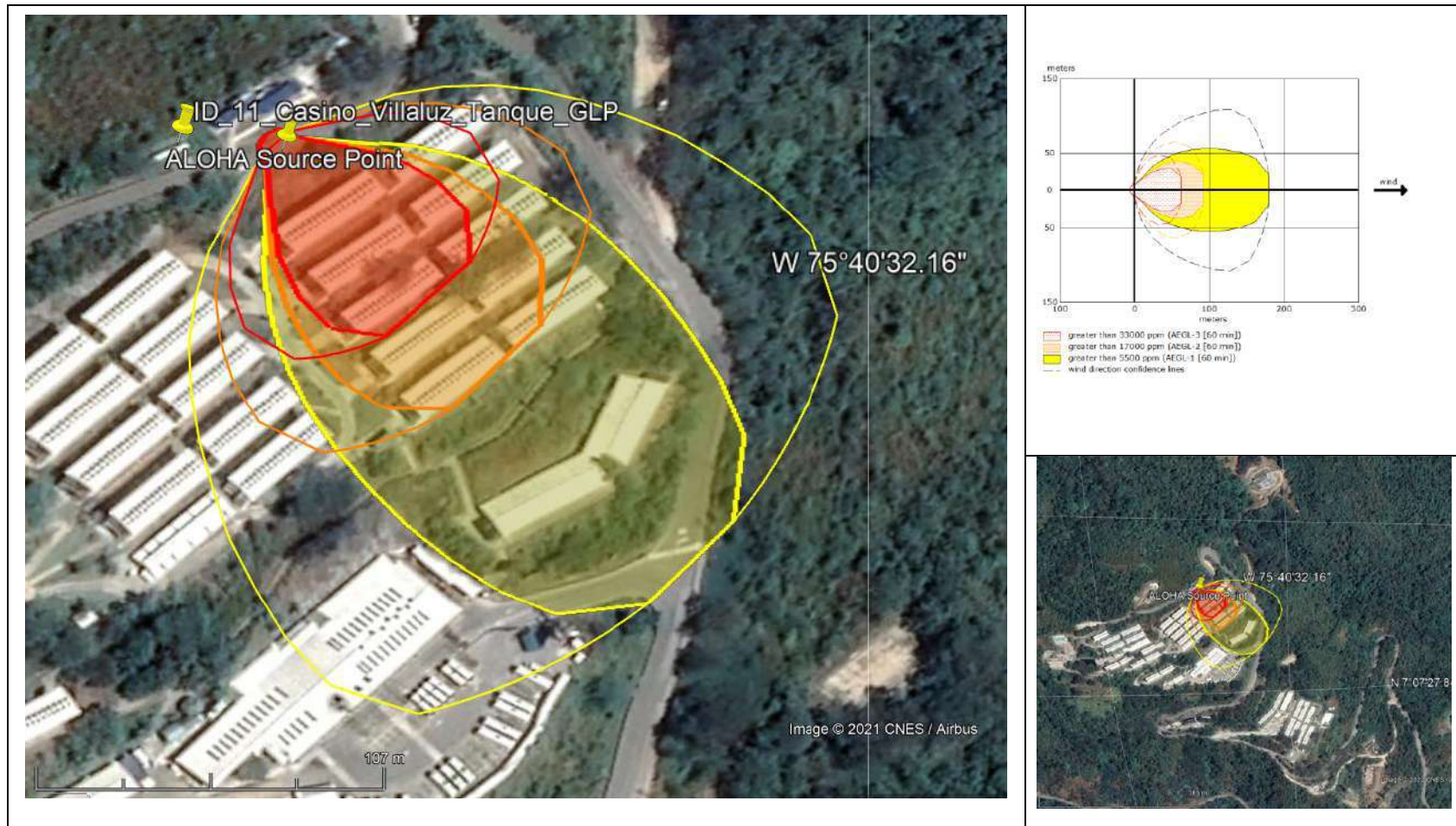
		Alto	Medio	Bajo
Nube de vapor tóxica	Nivel de afectación	AEGL-3 = 33000 ppm	AEGL-2 = 17000 ppm	AEGL-1 = 5500 ppm
	Radio de afectación (m)	63 m	93 m	179
Zona inflamable	Nivel de	100% LEL =	60% LEL =	10% LEL =

		Alto	Medio	Bajo
	afectación	21000 ppm	12600 ppm	2100 ppm
	Radio de afectación (m)	82 m	112 m	314 m
Radiación térmica	Nivel de afectación	10 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	2 kW/m <sup>2</sup>
	Radio de afectación (m)	31 m	44 m	68 m
Sobrepresión	Nivel de afectación	8 psi	3,5 psi	1 psi
	Radio de afectación (m)	N/A	66 m	133 m

**NOTA:** La concentración de gas es tan baja que no alcanza a producirse una sobrepresión a 8 psi.

4) Resultado gráfico del radio de afectación.

Tabla 2-135 ID 11 Casino Villa Luz - Vapores tóxicos en la atmosfera



HIDROELÉCTRICA ITUANGO S.A. E.S.P.

Naturalmente... ¡Buena energía!



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



<http://www.hidroituango.com.co>



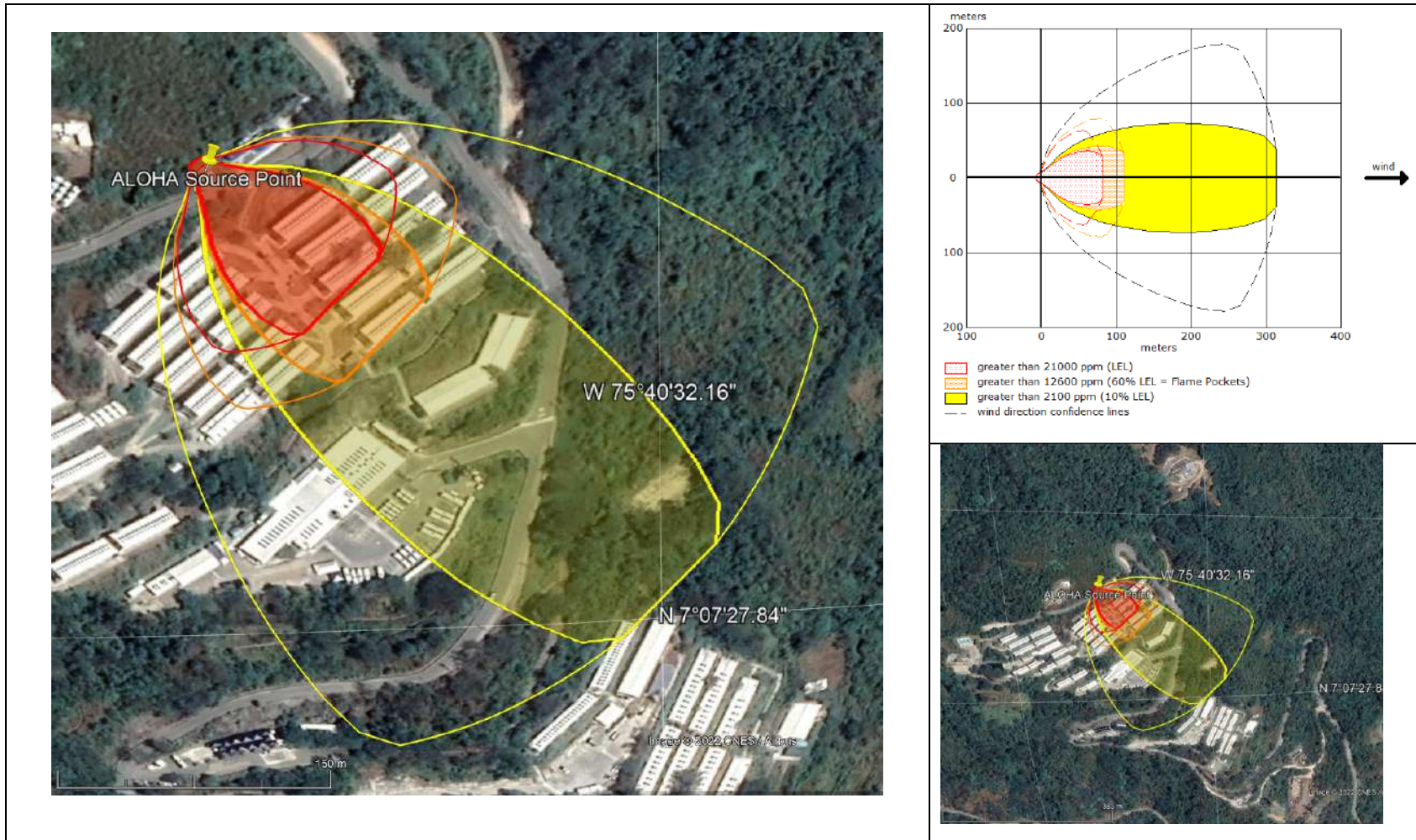
[info@hidroituango.com.co](mailto:info@hidroituango.com.co)



PBX: (574) 5203160



Tabla 2-136 ID 11 Casino Villa Luz - Zona riesgo inflamable



HIDROELÉCTRICA ITUANGO S.A. E.S.P.

Naturalmente... ¡Buena energía!



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



<http://www.hidroituango.com.co>



[info@hidroituango.com.co](mailto:info@hidroituango.com.co)

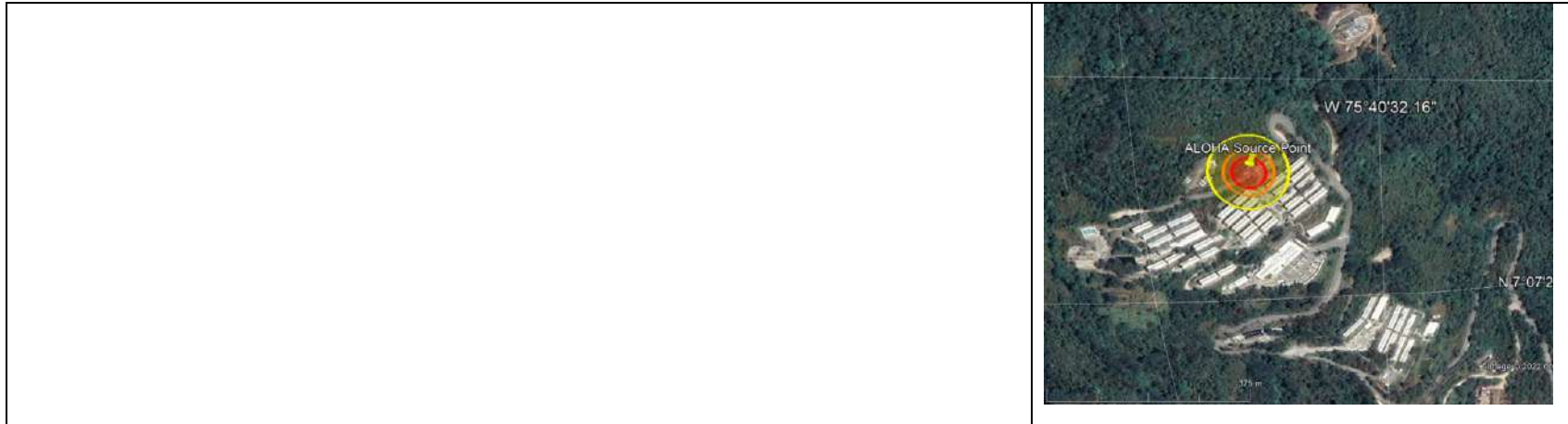


PBX: (574) 5203160



Tabla 2-137 ID 11 Casino Villa Luz - Resultado Radiación térmica





**HIDROELÉCTRICA ITUANGO S.A. E.S.P.**

Naturalmente... ¡Buena energía!



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



<http://www.hidroituango.com.co>

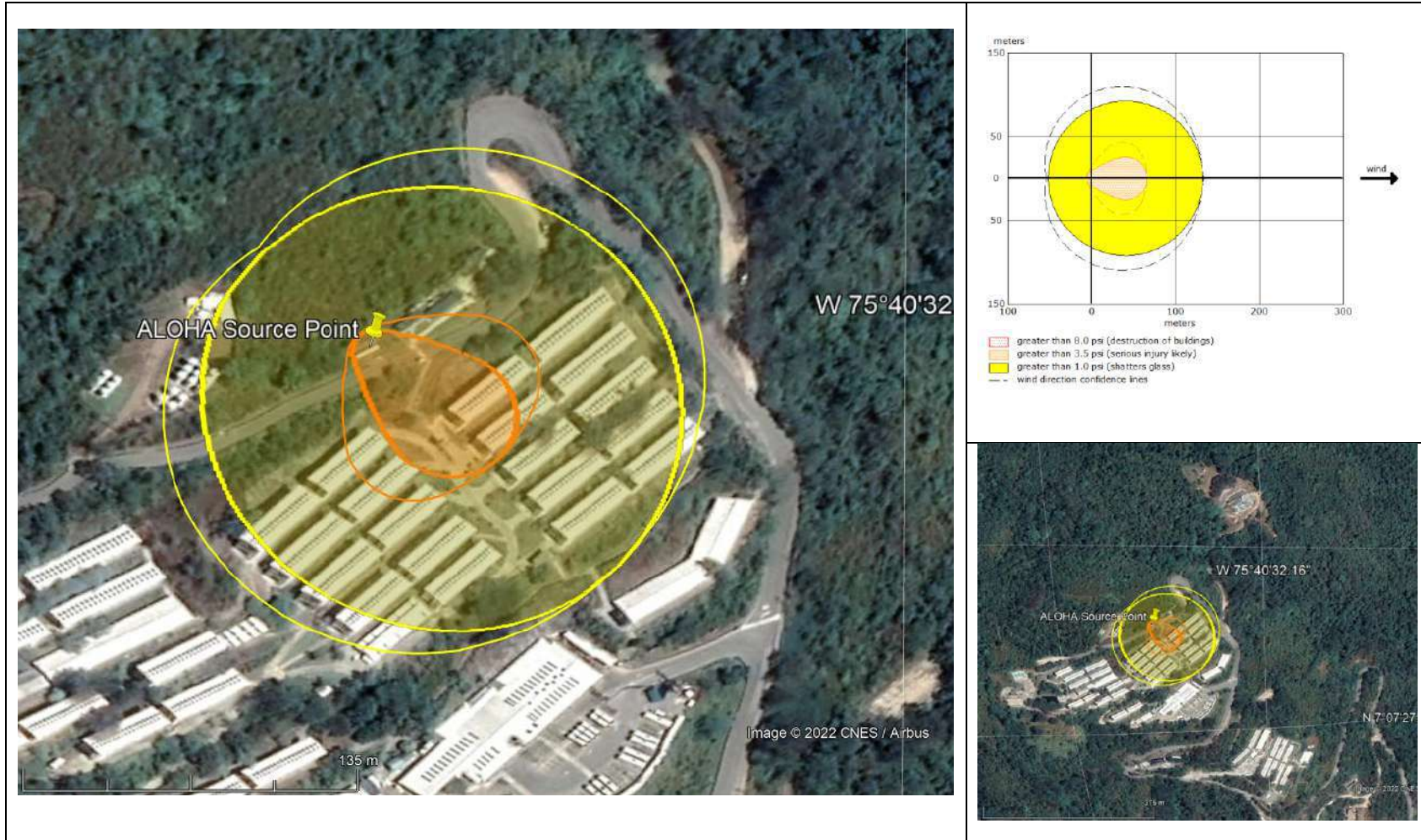


[info@hidroituango.com.co](mailto:info@hidroituango.com.co)



PBX: (574) 5203160

Tabla 2-138 ID 11 Casino Villa Luz - Zona riesgo de sobrepresión (fuerza de choque)



HIDROELÉCTRICA ITUANGO S.A. E.S.P.

Naturalmente... ¡Buena energía!



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



<http://www.hidroituango.com.co>



[info@hidroituango.com.co](mailto:info@hidroituango.com.co)



PBX: (574) 5203160

## F. Cálculo de radio de afectación ID 18 Planta de Concreto

A continuación, se muestra la identificación

### 1) Condiciones iniciales

Se ha considerado un escenario en el cual se encuentran abiertos los cuatro cilindros, creando de esta manera una atmosfera tóxica. Por lo cual se realizarán los cálculos con un tanque de volumen equivalente al volumen de los cuatro cilindros abiertos en la parte superior.

### 2) Datos de entrada ALOHA

#### SITE DATA:

Location: VALLE DE TOLEDO, ANTIOQUIA, COLOMBIA

Building Air Exchanges Per Hour: 0.69 (unsheltered single storied)

Time: April 22, 2021 1155 hours ST (using computer's clock)

#### CHEMICAL DATA:

Chemical Name: AMMONIA

CAS Number: 7664-41-7

Molecular Weight: 17.03 g/mol

AEGL-1 (60 min): 30 ppm AEGL-2 (60 min): 160 ppm

AEGL-3 (60 min): 1100 ppm

IDLH: 300 ppm LEL: 150000 ppm UEL: 280000 ppm

Ambient Boiling Point: -34.5° C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

#### ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 3 meters/second from NW at 3 meters

Ground Roughness: open country

Cloud Cover: 0 tenths

Air Temperature: 28° C

Stability Class: B

No Inversion Height

Relative Humidity: 80%

#### SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in vertical cylindrical tank

Flammable chemical escaping from tank (not burning)

Tank Diameter: 0.70 meters

Tank Length: 1.2 meters

Tank Volume: 0.46 cubic meters

Tank contains liquid Internal Temperature: 28° C

Chemical Mass in Tank: 275 kilograms

Tank is 100% full

Circular Opening Diameter: 1 inches

Opening is 1.20 meters from tank bottom

Note: RAILCAR predicts a stationary cloud or 'mist pool' will form.

Model Run: RAILCAR

Release Duration: 2 minutes

Max Average Sustained Release Rate: 143 kilograms/min

(averaged over a minute or more)

Total Amount Released: 159 kilograms

#### SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in vertical cylindrical tank

Flammable chemical is burning as it escapes from tank

Tank Diameter: 0.70 meters Tank Length: 1.2 meters

Tank Volume: 0.46 cubic meters

Tank contains liquid Internal Temperature: 28° C

Chemical Mass in Tank: 275 kilograms

Tank is 100% full

Circular Opening Diameter: 1 inches

Opening is 1.20 meters from tank bottom

Max Flame Length: 9 meters Burn Duration: 4 minutes

Max Burn Rate: 641 kilograms/min

Total Amount Burned: 128 kilograms

Note: The chemical escaped from the tank and burned as a jet fire.

### 3) Resultado numérico del radio de afectación

A continuación, se presentan los resultados generados por el programa ALOHA:

Tabla 2-139 Resultados de radio de afectación.

		Alto	Medio	Bajo
Nube de vapor tóxica	Nivel de afectación	AEGL-3 = 1100 ppm	AEGL-2 = 160 ppm	AEGL-1 = 30 ppm



		Alto	Medio	Bajo
	Radio de afectación (m)	251 m	685 m	1600 m
Zona inflamable	Nivel de afectación	100% LEL = 150000 ppm	60% LEL = 90000 ppm	10% LEL = 15000 ppm
	Radio de afectación (m)	12 m	20 m	61 m
Radiación térmica	Nivel de afectación	10 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	2 kW/m <sup>2</sup>
	Radio de afectación (m)	10 m	12 m	20 m
Sobrepresión	Nivel de afectación	8 psi	3,5 psi	1 psi
	Radio de afectación (m)	N/A	N/A	N/A

**NOTA:** Los niveles de concentración de gas LOC no son lo suficientemente altos para que se den explosiones del gas en los niveles que fueron determinados.

#### 4) Resultado gráfico del radio de afectación.

Tabla 2-140 ID 18 Planta de Concreto - Vapores tóxicos en la atmosfera

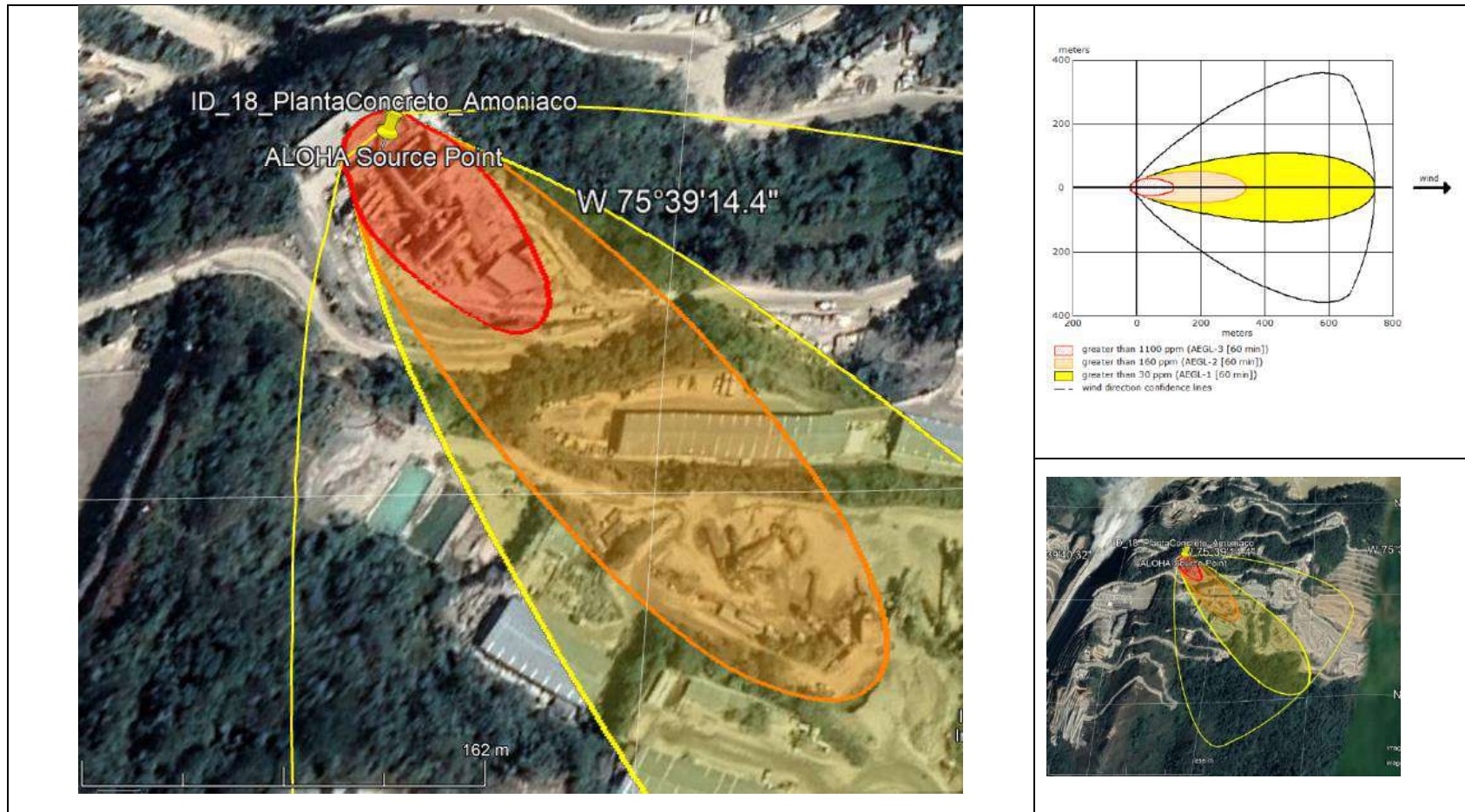


Tabla 2-141 ID 18 Planta de Concreto – Zona riesgo Inflamable



HIDROELÉCTRICA ITUANGO S.A. E.S.P.

Naturalmente... ¡Buena energía!



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



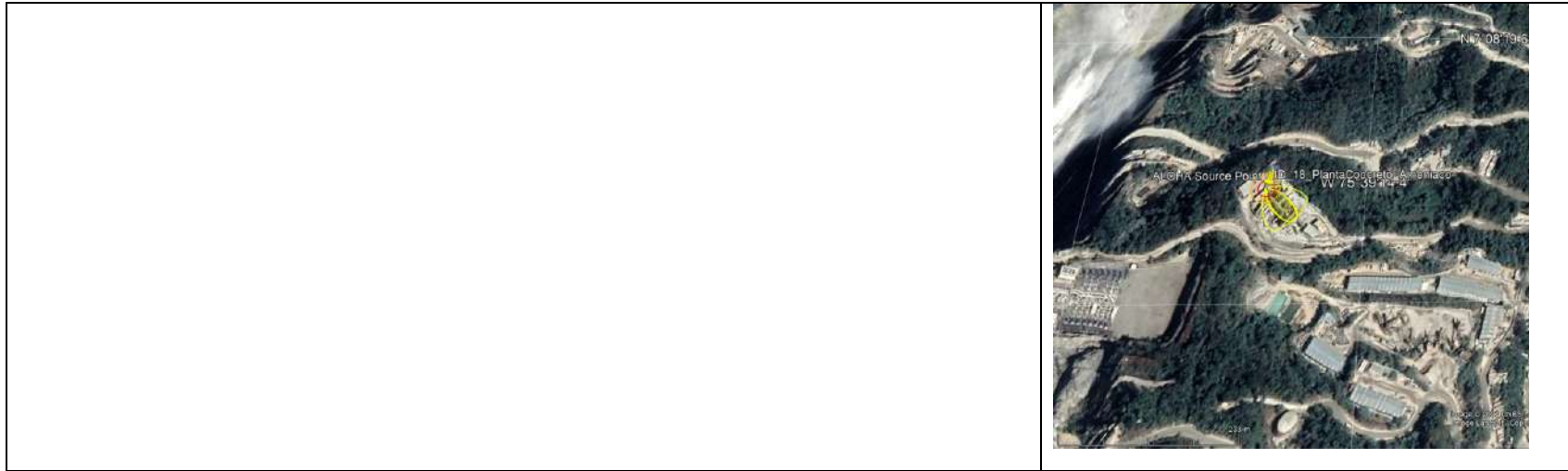
<http://www.hidroituango.com.co>



[info@hidroituango.com.co](mailto:info@hidroituango.com.co)



PBX: (574) 5203160



**HIDROELÉCTRICA ITUANGO S.A. E.S.P.**

Naturalmente... ¡Buena energía!



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



<http://www.hidroituango.com.co>



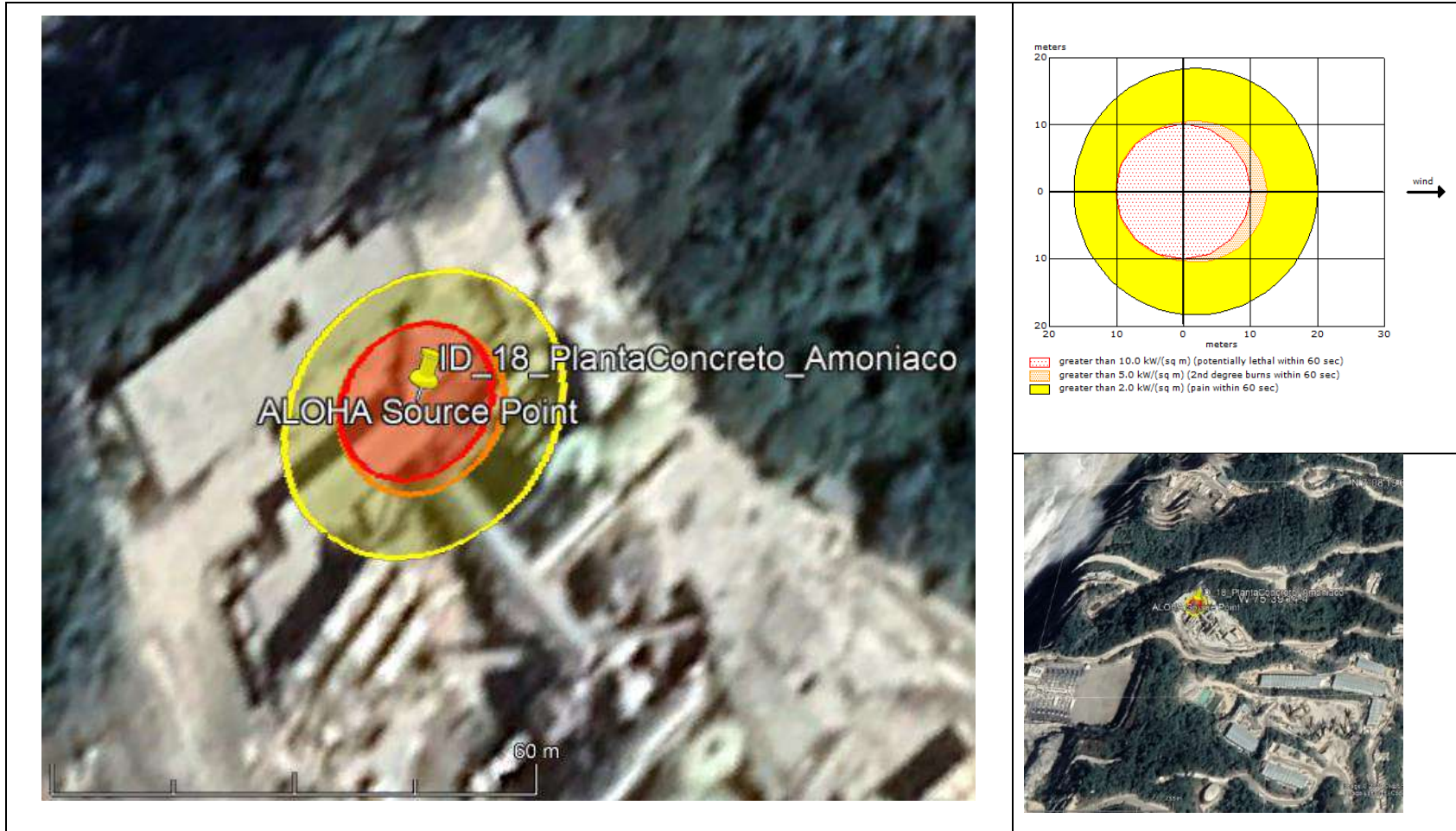
[info@hidroituango.com.co](mailto:info@hidroituango.com.co)



PBX: (574) 5203160



Tabla 2-142 ID 18 Planta de Concreto - Resultado Radiación térmica





#### G. Cálculo de radio de afectación Zona A: Polvorín El Palmar

Para la determinación de las amenazas asociadas a incendio y explosión se ha realizado la siguiente metodología de trabajo:

##### 1) Condiciones iniciales

A continuación, se presentan las consideraciones bajo las cuales se han realizado el cálculo de afectación:

- Se ha considerado que por la naturaleza de los elementos almacenados, , estos explotarían ante una chispa generada por mala manipulación, ocasionando una reacción en cadena que causa una explosión.
- En el cálculo se considera que la totalidad de los explosivos que se encuentran almacenados explotan simultáneamente.
- El cálculo no se considera que los elementos explosivos están compartimentados, por lo tanto, el resultado de la explosión podría verse atenuado por los muros y losa de techo y su impacto podría ser inferior al calculado.

##### 2) Cálculo de afectación

De acuerdo con lo identificado en el inventario de materiales almacenados, se tienen los siguientes elementos explosivos: Indugel, Emulind-E y Cordon detonante, cuyas propiedades físicas se encuentran en la Tabla 2-73.

Para lo anterior, se determinó la masa equivalente en TNT de cada uno de los componentes analizados de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$W = (\eta M E_c) * (E_{c \text{ TNT}})^{-1}$$

Donde:

- W** : Masa Equivalente de TNT (Kg.)  
 **$\eta$**  : Factor de Eficiencia de la Explosión (10%)  
**M** : Masa de Sustancia Inflamable Liberada (Kg.)  
 **$E_c$**  : Calor inferior de combustión del gas inflamable (KJ/Kg.)  
 **$E_{c \text{ TNT}}$**  : Calor de combustión del TNT<sup>16</sup> (4520 KJ/Kg.)

#### Ecuación 2 Masa equivalente TNT

Adicionalmente, para determinar el calor de combustión del Indugel y del Emulind-E, se utiliza la siguiente relación:

$$RBS = \frac{PAPxPe}{PAPp_xPe_p}$$

Donde:

$PAP$  = Potencia absoluta en peso del explosivo en cuestión, cal/g

$Pe$  = Densidad del explosivo en cuestión, g/cm<sup>3</sup>

$PAP_p$  y  $Pe_p$  = se refieren al explosivo patrón.

### Ecuación 3 Calor de combustión

Para determinar la masa equivalente del cordón detonante se utiliza la siguiente relación, debido a que se considera el cordón detonante como 100% de pentrita (PETN), teniendo en cuenta un  $E_u$  de 1,66:

$$E_u = \frac{W_{TNT} (kg)}{W_{explosivo\ ensayado} (kg)}$$

### Ecuación 4

De acuerdo con lo anterior, se tienen los siguientes resultados para el cálculo de la masa equivalente en TNT:

Tabla 2-143 Resultados calculo masa equivalente TNT para elementos explosivos analizados.

Elemento		Unidades	Valor
Indugel	Eficiencia de la explosión	n	0,1
	Masa sustancia liberada	M (kg)	1749
	Calor de combustión, sustancia liberada	Ec (kJ/kg)	8887,45
	Calor de combustión, TNT	Ec, TNT (kJ/kg)	4520
	Masa equivalente, TNT	W,TNT (kg)	<b>343,897125</b>
Emulind-E	Eficiencia de la explosión	n	0,1
	Masa sustancia liberada	M (kg)	13253
	Calor de combustión, sustancia liberada	Ec (kJ/kg)	9258,206897
	Calor de combustión, TNT	Ec, TNT (kJ/kg)	4520
	Masa equivalente, TNT	W,TNT (kg)	<b>2714,58</b>
Cordón detonante	Masa sustancia liberada	M (kg)	61,518
	Masa equivalente, TNT	W,TNT (kg)	<b>102,11988</b>
Masa equivalente total de TNT almacenada		W,TNT (kg)	<b>3160,597005</b>

Para determinar el radio de afectación, se utilizó la formulación de Sadovski mostrada a continuación:

$$\Delta P = 0,95 [(W^{1/3}) R^{-1}] + 3,9 [(W)^{2/3} R^{-2}] + 13 [W R^{-3}]$$

Donde:

- $\Delta P$  : Sobrepresión (Atm) debe convertirse a mBar.  
 $W$  : Masa Equivalente de TNT. (Kg.)  
 $R$  : Distancia real. (m)

#### Ecuación 5 Cálculo sobrepresión

De acuerdo con esto, se tienen los siguientes resultados correspondientes al radio de afectación por sobrepresión:

Tabla 2-144 Resultados radio de afectación por sobrepresión.

Radio de afectación (m)	Nivel	Sobrepresión	
		psi	atm
66,45380353	Alto	8 psi	0,54
106,2147038	Medio	3,5 psi	0,24
255,1976686	Bajo	1 psi	0,07

Fuente: Integral S.A., 2022.

### 3) Resultados de afectación zona A

De acuerdo con lo revisado se tienen los siguientes resultados:



Figura 2-253 Radio de afectación por sobrepresión – Zona A Polvorín El Palmar.  
Fuente: Integral S.A., 2022.

#### 2.2.4.11.5 Probabilidad de ocurrencia

En la Tabla 2-88 se presentan los niveles de probabilidad estimados para los sitios críticos identificados en el PHI.

Tabla 2-145 Determinación del nivel de probabilidad para los sitios analizados.

ID	ZONA	Nivel de peligro (MESERI)	ND	NE	NP	Nivel de probabilidad
1	Polvorín El Palmar	N/A	2	2	4	Bajo
2	Planta de asfalto	N/A	0	0	0	Bajo
3	Subestación 500 kVA	Valor: 7,2 Nivel: Medio	2	4	8	Bajo
4	Casa de máquinas	Valor: 4,596 Nivel: Alto	6	2	8	Medio
5	Caverna de transformadores	Valor: 5,566 Nivel: Medio	6	1	6	Medio
6	Subestación 44 kVA	Valor: 5,658 Nivel: Medio	2	1	2	Bajo
7	Estación de gas casino campamento Cuní	Valor: 3,426 Nivel: Alto	6	3	18	Medio

ID	ZONA	Nivel de peligro (MESERI)	ND	NE	NP	Nivel de probabilidad
8	Taller ATB – Zona Villaluz	Valor: 3,426 Nivel: Alto	6	2	12	Bajo
9	Estación de combustible	Valor: 4,95 Nivel: Alto	2	3	6	Medio
10	Taller de mantenimiento – Plazoleta casa de máquinas	Valor: 5,565 Nivel: Medio	6	2	12	Bajo
11	Taller industrial	Valor: 5,6 Nivel: Medio	2	1	3	Bajo
12	Estación de gas GLP – Campamento Villaluz	Valor: 4,702 Nivel: Alto	6	3	18	Medio
14	Planta diésel – Plazoleta casa de máquinas	Valor: 5,23 Nivel: Medio	2	1	2	Bajo
17	Planta diésel – Campamento Tacuí	Valor: 5,162 Nivel: Medio	2	1	2	Bajo
18	Subestación 44 kVA Plazoleta casa de máquinas	Valor: 5 Nivel: Medio	2	1	2	Bajo
19	Planta de concreto	Valor: 4,984 Nivel: Alto	2	3	6	Medio

Fuente: Integral S.A., 2022.

#### 2.2.4.11.6 Recomendaciones

- Se debe realizar simulacros de evacuación y atención a emergencias y definir un lugar de reunión para los eventos de incendio considerando el rango de afectación presentado en la figura 2.
- Se recomienda realizar brigadas de inspección aleatorias, para revisar el cumplimiento de las normas e inspeccionar que se mantengan las medidas de seguridad.
- Se debe prestar particular atención en las fechas de vencimiento de los elementos almacenados, debido a que a partir de la fecha de vencimiento pueden representar un riesgo para los demás elementos, debido a que no se puede controlar su estabilidad química.
- Se recomienda recargar el extintor tipo satélite, en vista que durante la visita se evidenció que estaba caducado.
- Además de lo mencionado anteriormente, también se evidencia la ubicación de pararrayos, sistema de extinción manual por medio de extintores portátiles, ingreso restringido solo para personal autorizado, información con las fichas de seguridad de los materiales almacenados, vigilancia permanente.
- De acuerdo con lo indicado en el decreto Decreto 2222 de 1993 - Por el cual se expide el reglamento de higiene y seguridad en las labores mineras a cielo abierto. se presentan las siguientes recomendaciones que, si bien están cumpliéndose



actualmente, se deben mantener a lo largo de la operación de los polvorines en el proyecto:

- *Artículo 49. Los explosivos y elementos de ignición deberán almacenarse en polvorines con secciones independientes para cada material y destinados exclusivamente para tal fin, ser sólidos, a prueba de incendios y balas, provistos de adecuada iluminación y óptima ventilación natural, situadas a más de 100 metros de edificaciones, vías férreas, carreteras salvo que lo autorice la autoridad competente y provistos de cámaras de amortiguación y resonancia, tener puertas de hierro con cerraduras seguras, contar con pararrayos y no tener más aberturas que las necesarias para la entrada de material y el paso de ventilación.*
- *Parágrafo 1º. El área máxima de almacenamiento del polvorín será del sesenta por ciento (60%) del área total de la instalación y el cuarenta por ciento (40%) restante será para tránsito y movimiento de material.*
- *Parágrafo 2º. Los planos de los polvorines deberán tener el visto bueno de los comandos de las guarniciones militares respectivas a donde deben ser enviados para revisión y aprobación.*
- *Artículo 50. Los explosivos y los elementos de ignición deberán ser suministrados únicamente por el explotador o por la persona responsable del polvorín de la empresa.*
- *Artículo 51. Queda prohibido almacenar en los polvorines materiales diferentes a los explosivos, tales como pinturas, maderas, basuras, cartones, cables u objetos metálicos que puedan ocasionar explosiones por impacto o fricción sobre los explosivos.*
- *Artículo 52. Queda terminantemente prohibido fumar dentro de los polvorines.*
- *Artículo 53. El explotador deberá velar porque el polvorín mantenga las condiciones de temperatura, humedad y velocidad de aire recomendadas por el fabricante para la conservación de los explosivos.*
- *Artículo 54. No deberán efectuarse instalaciones o reparaciones eléctricas dentro de los polvorines ni en áreas en un radio inferior a 10 metros del polvorín, mientras haya explosivos almacenados.*
- *Artículo 55. El almacenamiento de explosivos deberá efectuarse de tal manera que se consuman primero los más antiguos. Parágrafo. Deberán destruirse así no hayan sido consumidos, los explosivos, cebos y todo material de ignición cuando se sospechen defectos, estén cumplidas las fechas de vencimiento o haya habido explosiones fallidas.*
- *Artículo 56. El almacenista está en la obligación de llevar un control permanente del consumo de explosivos y elementos de ignición.*
- *Artículo 57. No deberán almacenarse explosivos a una altura superior a 1.60 metros para darle seguridad y comodidad a su manejo. Los explosivos estarán colocados sobre plataformas de madera que tendrán una altura mínima de 10 - 30 centímetros*

*sobre el nivel del piso para protegerlos de la humedad, vibraciones, sacudidas y así garantizar su correcta ventilación.*

- *Artículo 58. Está prohibido preparar cebo dentro de un polvorín o en cercanías de éste y almacenar explosivos cebados.*

#### **2.2.4.12 Caracterización de amenaza por incendios forestales**

La amenaza por incendios es el peligro latente que representa la manifestación de este fenómeno en particular (incendio en la cobertura vegetal), de origen natural, socio-natural o antrópico en un territorio, que puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, los bienes y servicios y el ambiente. Es un factor de riesgo sobre un elemento o grupo de elementos expuestos (vegetación), que se expresa como la probabilidad de que un evento (incendio) se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y en un tiempo definido (IDEAM, 2011).

Los incendios y explosiones de naturaleza exógena se pueden presentar por intensos periodos secos y/o por intención humana como parte de un sabotaje. En Colombia se estima que casi la totalidad de los incendios forestales, considerados como amenaza exógena, son de origen antrópico, bien sean generados intencionalmente para la ampliación de la frontera agrícola y pecuaria, o por negligencia al no tomar las precauciones adecuadas durante las quemas; por su parte, el descuido (fumadores, fogatas, pólvora y cacería de animales, entre otros.); situaciones accidentales (caída de líneas eléctricas sobre la vegetación o roce de las mismas con los árboles), o atentados terroristas.

El principal efecto de esta amenaza corresponde a la deforestación, la cual se caracteriza por los siguientes aspectos:

El área de influencia del proyecto se caracteriza por tener una alta intervención sobre los recursos naturales mediante la extracción de madera, expansión de la frontera agrícola, ganadería y actividades de explotación minera. Los fragmentos de bosque secundario que aún se conservan, se concentran en las zonas más pendientes y en las orillas de las quebradas, reduciéndose en muchos casos a unos cuantos metros.

Este proceso de deforestación que sufren las diferentes microcuencas podría generar problemas como: cambios en el microclima (reducción de la humedad y aumento de la temperatura), aumento de procesos erosivos (reducción de la capacidad del suelo de retener humedad) y pérdida de regulación del régimen hídrico (que conlleva a un aumento de la sedimentación y riesgos de inundación).

Adicionalmente, la pérdida de cobertura en las partes altas de las microcuencas disminuye la calidad del agua por el aumento de concentración de sólidos, turbiedad, cambios en el color y en la temperatura.

Entre las causas de la deforestación se encuentran los incendios forestales, que pueden definirse como la propagación libre e ilimitada del fuego y cuya acción consume pastos, matorrales, arbustos y árboles. En su mayoría, son producidos por el manejo descuidado del fuego y ocasionalmente por causas naturales como los rayos.

Los efectos del fuego en los bosques son principalmente los siguientes:

- Eliminación de las áreas boscosas.
- Pérdidas económicas.
- Pérdida del horizonte agrícola.
- Pérdida de biodiversidad.
- Aumento de gases de efecto invernadero.
- Aumento de la temperatura ambiental.
- Incremento de los efectos erosivos del viento y del agua.
- Disminución de la humedad.
- Daño o afectación de los hábitats.

Asimismo, la acción del fuego afecta al suelo en tres formas, que son: física, ya que se destruye la estructura y se compacta el suelo por falta de humedad; química, al producirse una disminución de los nutrientes de la vegetación, y finalmente biológica, por la eliminación de los microorganismos del suelo encargados de la descomposición de los restos orgánicos.

Considerando la importancia de este evento contingente, se hace necesario hablar sobre las coberturas vegetales de la zona que son susceptibles al fenómeno de incendios. Las características intrínsecas de la vegetación y los ecosistemas (carga de combustibles, disposición y combustibilidad), confieren un grado de probabilidad de presentarse un incendio, propagar y mantener el fuego, lo cual, hace de estos elementos parte importante de la amenaza. Para el caso particular del PHI, los incendios forestales son un fenómeno bastante frecuente y generalizado, por lo cual podría afirmarse que es un determinante de las sucesiones vegetales en la región.

Aunque podría pensarse que es el Bosque seco tropical (localizado en la franja más aledaña al río), la zona de vida más susceptible a los incendios debido a la prolongada sequía y las bajas precipitaciones. Durante estos periodos secos, la acumulación de la biomasa es alta, lo cual, sumado a los fuertes vientos, genera condiciones óptimas para la propagación de los incendios forestales. También se ha observado que el Bosque húmedo Tropical (localizado sobre el cañón del río), se ve afectado por incendios forestales devastadores, que destruyen tanto coberturas naturales (Bosques, arbustales y vegetaciones secundarias), como coberturas antropogénicas (Pastos y Cultivos). Al parecer esta situación es propiciada por las drásticas condiciones climáticas que provocan la deshidratación en la vegetación y la hace completamente vulnerable a la acción del fuego. En estas condiciones, cualquier cantidad de biomasa seca, puede incendiarse fácilmente y propagar el fuego por acción de los vientos.

Para la evaluación de la amenaza de incendios y definir la probabilidad de ocurrencia se tuvo en cuenta factores que fueron el punto de partida para generar la zonificación de la amenaza. Dichos factores presentan las características propias del territorio, las cuales confieren mayor o menor probabilidad de ser afectadas por incendios (IDEAM, 2011).

#### 2.2.4.12.1 Factores de amenaza de incendios forestales

##### A. Susceptibilidad de la cobertura vegetal a los incendios

La susceptibilidad de la cobertura vegetal se analizó mediante la identificación y valoración pirogénica de la vegetación, según lo propuesto por Páramo, 2007, en el modelo de combustibles desarrollado para Colombia, donde presentan la condición pirogénica de la vegetación colombiana. Para la determinación de la susceptibilidad de la cobertura vegetal a los incendios se utilizó el procedimiento detallado en el Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal (IDEAM, 2011). (ver anexo M-PHI-111-TRA-IF-X-010).

#### Generación del mapa de tipo de combustibles

A partir de las coberturas vegetales presentes en el área se generó una reclasificación con la interpretación de los tipos de cobertura según los tipos de combustible dominante, generando para cada uno de ellos un valor de calificación (ver Tabla 2-146).

Tabla 2-146 Coberturas vegetales del área y el tipo combustible predominante.

Tipo de cobertura (Corine Land Cover nivel 3)	Tipo de combustible
Bosque denso	Árboles
Bosque fragmentado	Árboles
Plantación forestal	Arboles
Bosque abierto	Árboles
Bosque de galería y/o ripario	Árboles
Vegetación secundaria o en transición	Árboles y Arbustos
Arbustal	Arbustos
Tejido urbano discontinuo	Áreas urbanas
Obras hidráulicas	Áreas urbanas
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Áreas urbanas
Tejido urbano continuo	Áreas urbanas
Herbazal	Hierbas
Cultivos permanentes arbóreos	Hierbas
Cultivos permanentes arbustivos	Hierbas
Cultivos permanentes herbáceos	Hierbas
Mosaico de cultivos	Hierbas
Afloramientos rocosos	No combustible
Zonas de extracción minera	No combustible

Tipo de cobertura (Corine Land Cover nivel 3)	Tipo de combustible
Cuerpos de agua artificiales	No combustible
Ríos (50 m)	No combustible
Tierras desnudas y degradadas	No combustible
Zonas arenosas naturales	No combustible
Zonas de disposición de residuos	No combustible
Zonas industriales o comerciales	No combustible
Instalaciones recreativas	Pastos
Otros cultivos transitorios	Pastos
Pastos arbolados	Pastos
Pastos enmalezados	Pastos
Pastos limpios	Pastos
Mosaico de cultivos y espacios naturales	Pastos / Hierbas
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Pastos / Hierbas
Mosaico de pastos con espacios naturales	Pastos / Hierbas
Mosaico de pastos y cultivos	Pastos / Hierbas

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

En la Tabla 2-147 se presentan las categorías de amenaza del presente proyecto de acuerdo con lo descrito en el protocolo de incendios (IDEAM, 2011).

Tabla 2-147 Categorías de amenaza y calificación según el tipo de combustible.

Tipo de combustibles	Calificación	Categoría de amenaza
Árboles	Baja	2
Árboles y Arbustos	Media	3
Arbustos	Alta	4
Hierbas	Alta	4
Pastos	Muy alta	5
Pastos / Hierbas	Muy alta	5
Áreas urbanas	Muy baja	1
No combustible	Muy baja	1

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Una vez categorizado este factor de análisis, se procedió a especializar el tipo de combustible presente en el área de influencia (ver Figura 2-254).



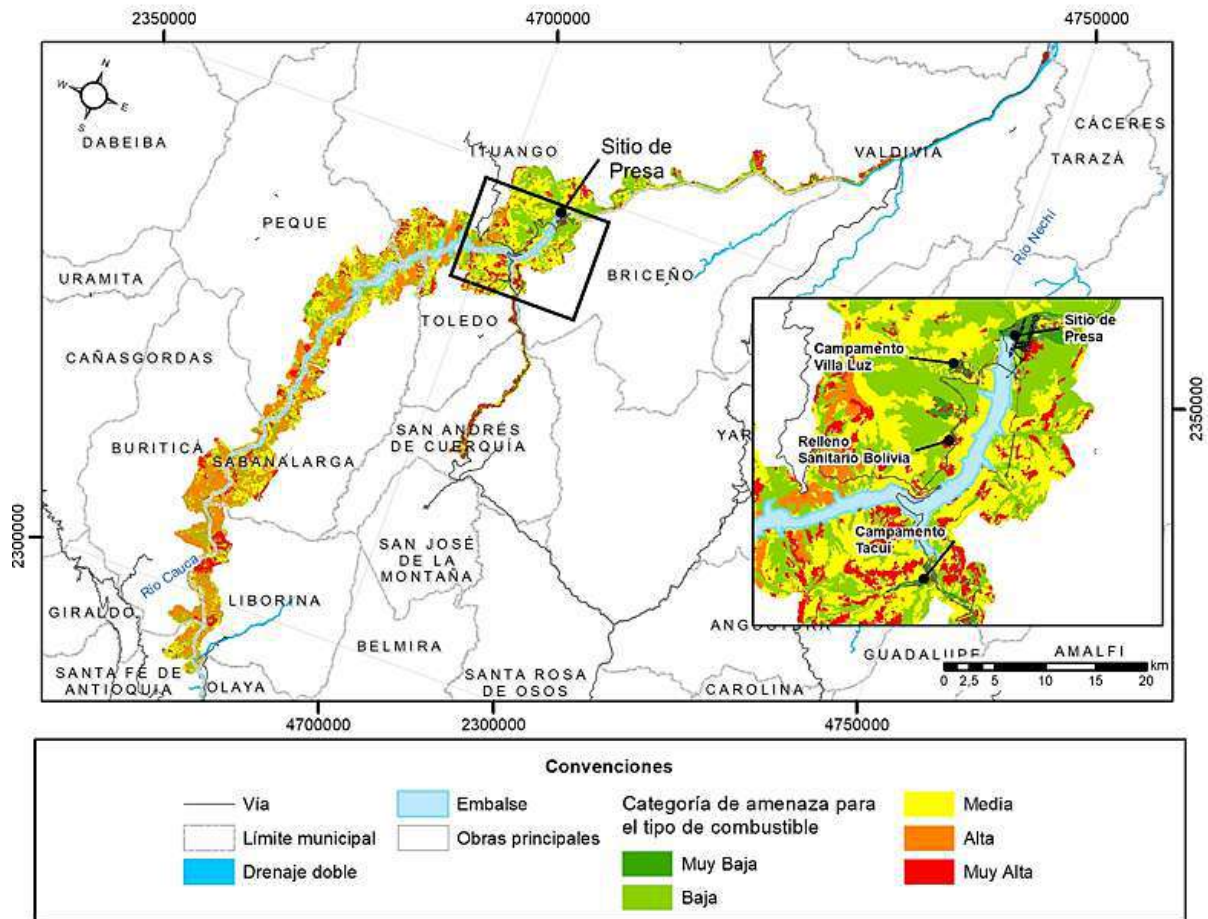


Figura 2-254 Especialización del tipo de combustible.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

### Generación del mapa duración de combustibles.

A partir del mapa de cobertura vegetal, generar una reclasificación mediante la interpretación de los tipos de cobertura, asignando de acuerdo con las coberturas predominantes una calificación según la duración de los combustibles, como se indica en los anexos 1 y 2 del Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000 (IDEAM, 2011) (ver Tabla 2-148).

Tabla 2-148 Duración del combustible según la cobertura vegetal.

Tipo de cobertura (Corine Land Cover nivel 3)	Duración del combustible
Instalaciones recreativas	1 hora
Mosaico de cultivos y espacios naturales	1 hora
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1 hora

Mosaico de pastos con espacios naturales	1 hora
Mosaico de pastos y cultivos	1 hora
Pastos arbolados	1 hora
Pastos enmalezados	1 hora
Pastos limpios	1 hora
Bosque denso	10 horas
Cultivos permanentes arbustivos	10 horas
Cultivos permanentes herbáceos	10 horas
Herbazal	10 horas
Mosaico de cultivos	10 horas
Otros cultivos transitorios	10 horas
Vegetación secundaria o en transición	10 horas
Arbustal	100 horas
Bosque abierto	100 horas
Bosque de galería y/o ripario	100 horas
Bosque fragmentado	100 horas
Cultivos permanentes arbóreos	100 horas
Plantación forestal	100 horas
Obras hidráulicas	Áreas urbanas
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Áreas urbanas
Tejido urbano continuo	Áreas urbanas
Tejido urbano discontinuo	Áreas urbanas
Afloramientos rocosos	No combustibles
Cuerpos de agua artificiales	No combustibles
Ríos (50 m)	No combustibles
Tierras desnudas y degradadas	No combustibles
Zonas industriales o comerciales	No combustibles
Zonas de extracción minera	No combustibles
Zonas de disposición de residuos	No combustibles
Zonas arenosas naturales	No combustibles

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

En la Tabla 2-149 describe las categorías de amenaza de acuerdo con la duración (en horas) del combustible.

Tabla 2-149 Categorías de amenaza según la duración del combustible

Duración de los combustibles	Categoría de amenaza	Calificación
Áreas urbanas	Muy baja	1
No combustible	Muy baja	1
100 horas (Predominio de árboles)	Baja	2
10 horas (Predominio de arbustos y hierbas)	Media	3
1 hora (Predominio de pastos)	Alta	4

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Luego de la caracterización de este factor de análisis, se procedió a espacializar el tipo de combustible presente en el área (ver Figura 2-255).

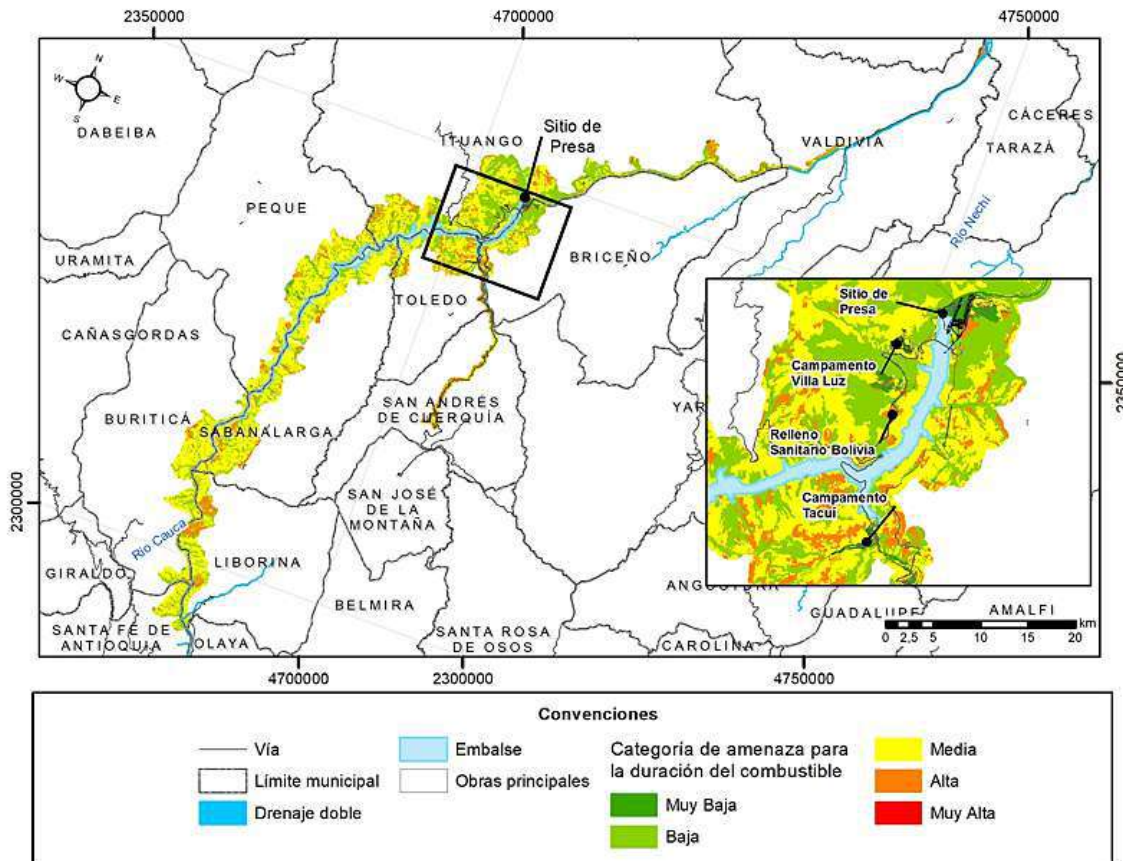


Figura 2-255 Espacialización de la duración del combustible

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

### Generación del mapa carga de combustibles

A partir de la información de las coberturas vegetales presentes en el área de influencia del proyecto, se obtuvo información específica sobre la biomasa de los diferentes tipos de coberturas, teniendo en cuenta la información relacionada a estas que sugieren en los anexos del documento Metodología propuesta en el Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000 (IDEAM, 2011) (ver Tabla 2-150).

Tabla 2-150 Carga total de combustibles según la cobertura vegetal

Tipo de cobertura (Corine Land Cover_Nivel 3)	Carga total de combustible
Afloramientos rocosos	No combustibles

Cuerpos de agua artificiales	No combustibles
Obras hidráulicas	No combustibles
Ríos (50 m)	No combustibles
Tierras desnudas y degradadas	No combustibles
Zonas arenosas naturales	No combustibles
Zonas de disposición de residuos	No combustibles
Zonas de extracción minera	No combustibles
Zonas industriales o comerciales	No combustibles
Arbustal	Muy alta (más de 100 ton/ha)
Plantación forestal	Muy Alta (Más de 100 ton/ha)
Bosque abierto	Muy Alta (Más de 100 ton/ha)
Bosque de galería y/o ripario	Muy Alta (Más de 100 ton/ha)
Bosque denso	Muy Alta (Más de 100 ton/ha)
Bosque fragmentado	Muy Alta (Más de 100 ton/ha)
Cultivos permanentes arbóreos	Muy Alta (Más de 100 ton/ha)
Cultivos permanentes arbustivos	Moderada (50-100 ton/ha)
Mosaico de cultivos y espacios naturales	Moderada (50-100 ton/ha)
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Moderada (50-100 ton/ha)
Mosaico de pastos con espacios naturales	Moderada (50-100 ton/ha)
Mosaico de pastos y cultivos	Moderada (50-100 ton/ha)
Vegetación secundaria o en transición	Moderada (50-100 ton/ha)
Cultivos permanentes herbáceos	Baja (1-50 ton/ha)
Herbazal	Baja (1-50 ton/ha)
Instalaciones recreativas	Baja (1-50 ton/ha)
Mosaico de cultivos	Baja (1-50 ton/ha)
Otros cultivos transitorios	Baja (1-50 ton/ha)
Pastos arbolados	Baja (1-50 ton/ha)
Pastos enmalezados	Baja (1-50 ton/ha)
Pastos limpios	Baja (1-50 ton/ha)
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Áreas urbanas (Menos de 1 ton/ha)
Tejido urbano continuo	Áreas urbanas (Menos de 1 ton/ha)
Tejido urbano discontinuo	Áreas urbanas (Menos de 1 ton/ha)

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

La Tabla 2-151 registra las categorías de amenaza y su respectiva calificación de acuerdo con la carga de combustible en términos de biomasa.

Tabla 2-151 Categorías de amenaza y calificación según la carga de combustible.

Carga total (Biomasa) de combustibles	Categoría de amenaza	Calificación
No combustibles	Muy baja	1
Áreas urbanas (Menos de 1 ton/ha)	Muy baja	1
Baja (1-50 ton/ha)	Baja	2



Media (50-100 ton/ha)	Media	3
Muy alta (más de 100 ton/ha)	Alta	4

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Una vez categorizado este factor de análisis, se procedió a espacializar la carga de combustible según el tipo de cobertura vegetal presente en el área de influencia (ver Figura 2-256).

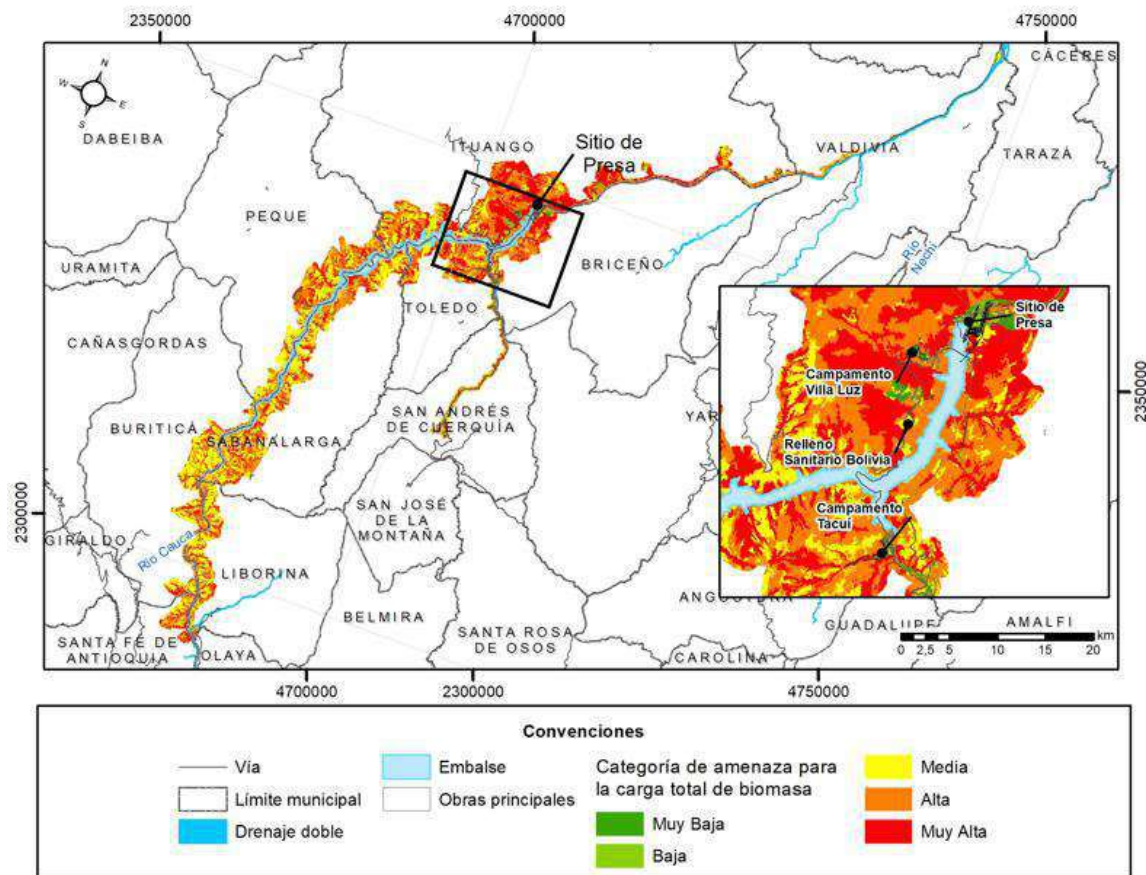


Figura 2-256 Espacialización de la carga de combustible según la cobertura vegetal.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

### Generación del mapa de susceptibilidad de la vegetación a incendios.

Seguido del análisis de estos factores, se procedió hacer la superposición de capas (Algebra de mapas), para obtener como resultado la imagen de la espacialización de la susceptibilidad de la vegetación evidenciada en la Figura 2-257.



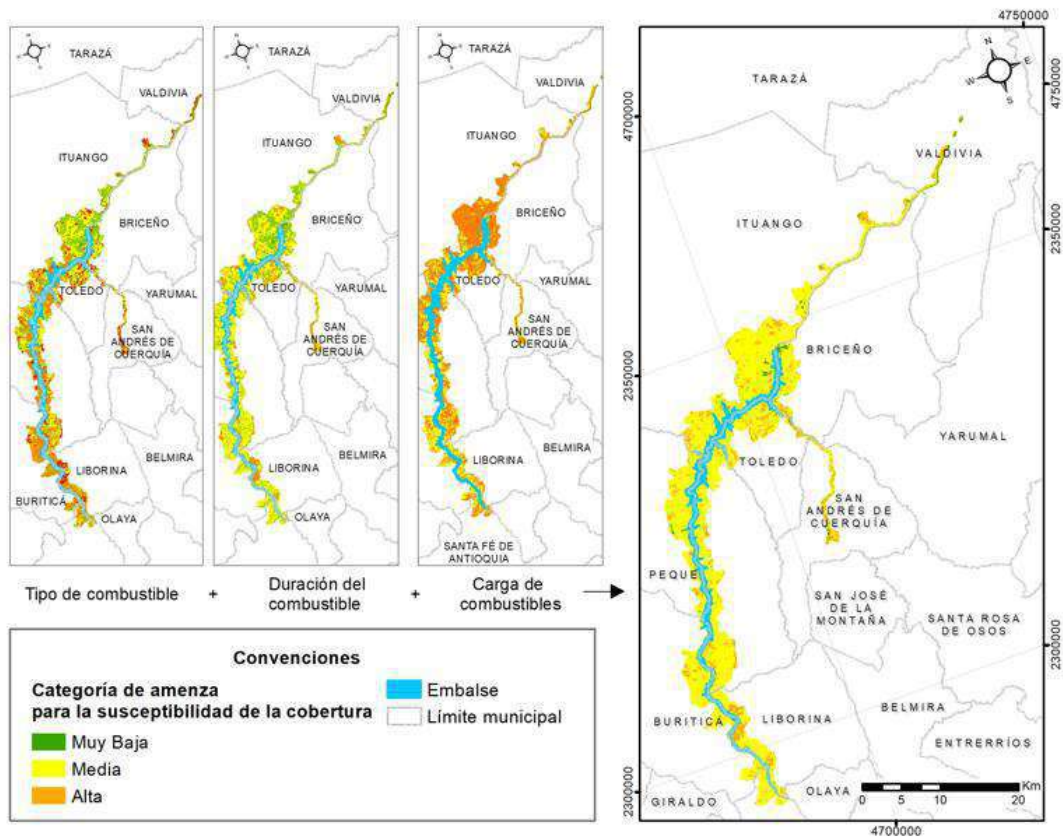


Figura 2-257 Susceptibilidad de la vegetación a la ocurrencia de incendios forestales

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

## B. Factores climáticos

El clima juega un papel fundamental en la generación y propagación del fuego en los incendios forestales, ya que este determina la duración y la severidad de las estaciones secas y calurosas en un área geográfica determinada, lo cual influye directamente sobre la humedad y la cantidad de combustible presente.

La susceptibilidad de la vegetación se ve afectada por factores externos de tipo climático que se encuentran ligados a ella, generando variaciones intrínsecas de las cualidades principales en lo que respecta a la humedad contenida en los tejidos vegetales y que está directamente relacionado con la precipitación, humedad del suelo y temperatura ambiental. Es por esto que se hace necesario generar una calificación de la susceptibilidad bajo las condiciones normales de precipitación y temperatura del país.

Para ello, se efectúa un procedimiento similar al de la calificación de la susceptibilidad para generar los mapas de las variables climáticas a partir de la información de precipitación y

temperatura (ver Tabla 2-152 y Tabla 2-153) con los cuales se caracterizan climáticamente los ecosistemas colombianos (IDEAM, 2011).

Tabla 2-152 Categorías de amenaza y calificación según la precipitación.

Precipitación media anual (mm)	Categoría de amenaza	Calificación
Árido (0-500)	Muy baja	1
Pluvial (> 7000)	Muy baja	1
Muy húmedo (3000-7000)	Media	2
Húmedo	Moderada	3
Seco (1000-2000)	Alta	4
Muy seco (500-1000)	Muy alta	5

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Tabla 2-153 Categorías de amenaza y calificación según la temperatura.

Temperatura media anual (°c)	Categoría de amenaza	Calificación
Nival (<1.5)	Muy baja	1
Extremadamente frío (1.5-6)	Muy baja	1
Muy frío (6-12)	Media	2
Frío (12-18)	Moderada	3
Templado (18-24)	Alta	4
Cálido (>24)	Muy alta	5

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Luego de obtener el resultado del análisis de los factores climáticos, se procedió a espacializar las categorías de amenaza en el área de influencia del proyecto (ver Figura 2-258 y Figura 2-259).

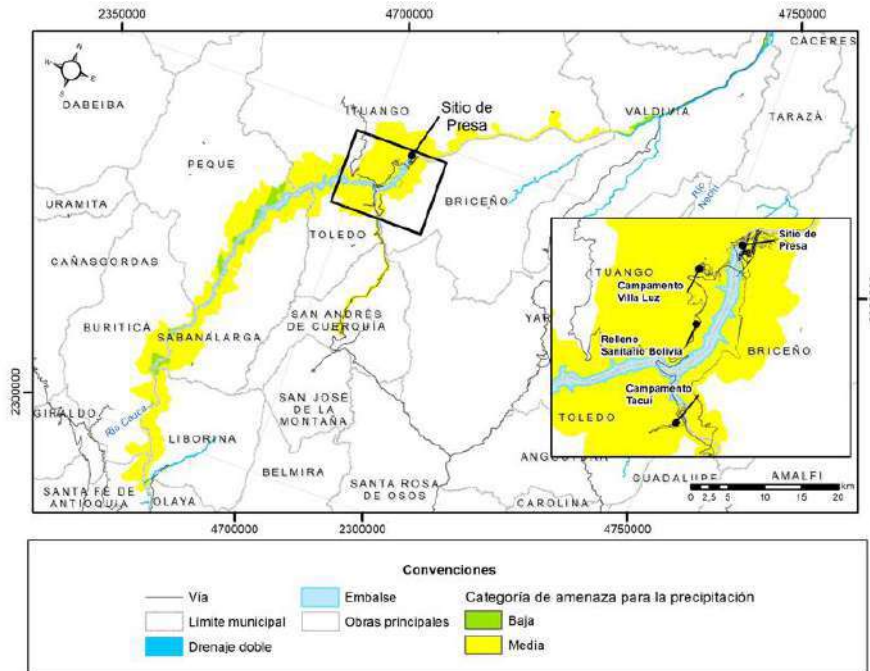


Figura 2-258 Espacialización de la amenaza por factores climáticos; Amenaza por precipitación.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

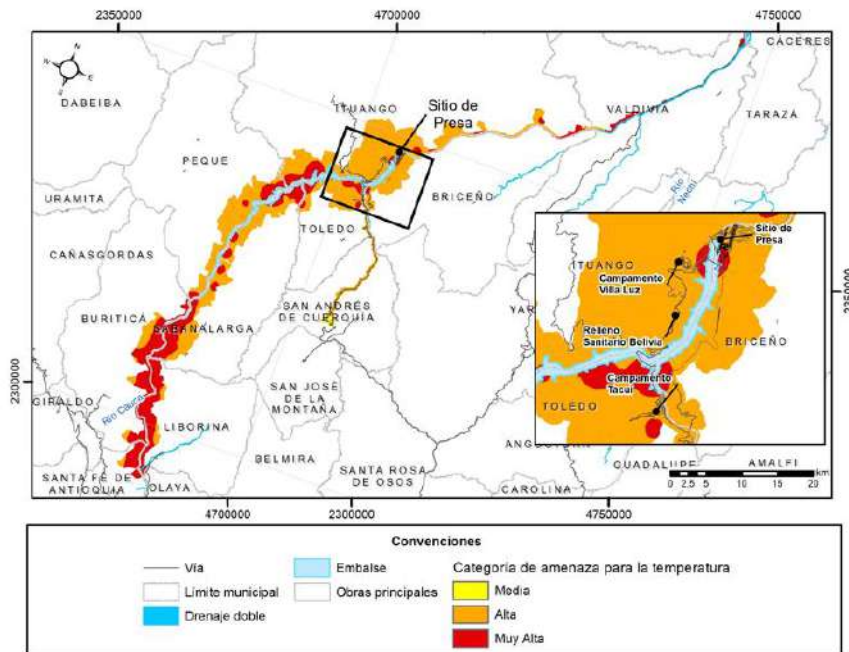


Figura 2-259 Espacialización de la amenaza por factores climáticos; Amenaza por Temperatura.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

### C. Eventos históricos

A partir de la información consultada en la herramienta del Sistema para el monitoreo de puntos de calor sobre la superficie detectados satelitalmente (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/country/>) se identificaron los puntos de calor y se verificó con herramientas de Sistemas de Información Geográfica los probables cambios en la cobertura vegetal, que pudiera dar el indicio que se haya presentado un incendio.

Se evaluó una escala temporal de nueve años (2012-2021) donde se verificaron los eventos o puntos de calor registrados en las coberturas (en total 157). En la Tabla 2-154 se destaca que las coberturas más afectadas, fue la Vegetación secundaria o en transición con 39 puntos de calor, seguido del Bosque de galería y/o ripario con 36 puntos de calor, el Herbazal con 34 puntos de calor y los Pastos enmalezados con 20 puntos de calor.

Tabla 2-154 Análisis histórico de los eventos registrados como incendios forestales.

Coberturas	Cantidad_Puntos de Calor
Cultivos permanentes arbustivos	1
Pastos limpios	8
Pastos arbolados	4
Pastos enmalezados	20
Mosaico de pastos y cultivos	1
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2
Bosque denso	5
Bosque abierto	2
Bosque de galería y/o ripario	36
Herbazal	34
Vegetación secundaria o en transición	39
Tierras desnudas y degradadas	5
<b>Total</b>	<b>157</b>

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Con los resultados obtenidos (a nivel satelital) se estimó la frecuencia probable de incendios entre los años 2012 y 2021, dando como resultado los puntos de calor registrados en la Figura 2-260.

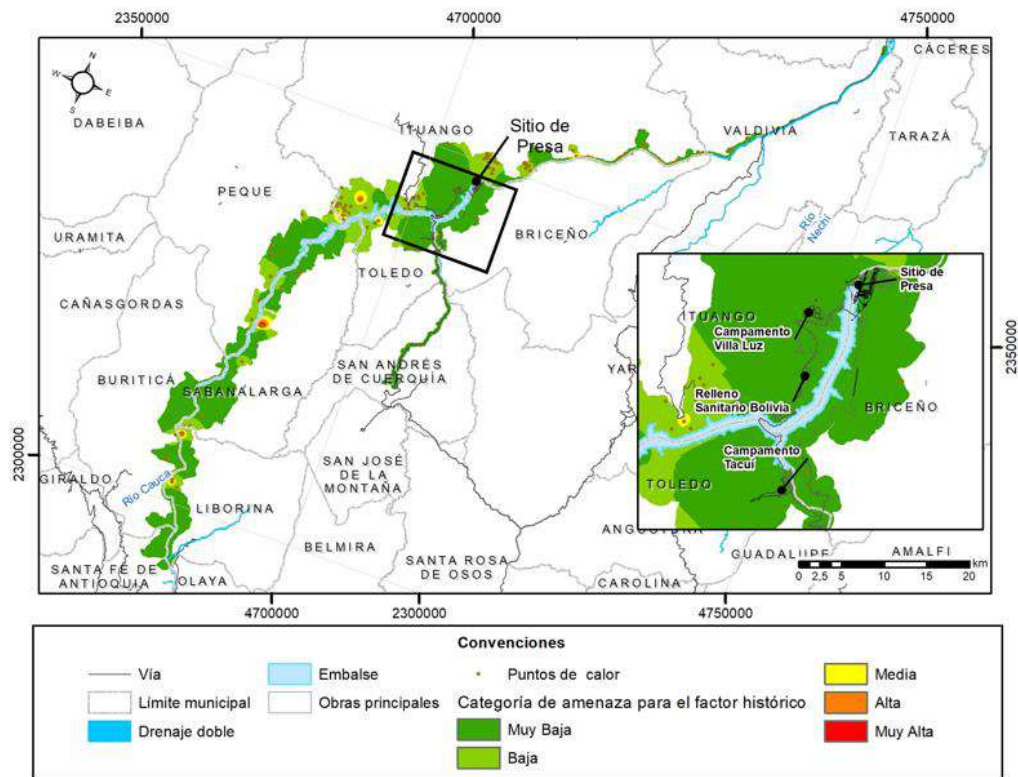


Figura 2-260 Espacialización de la amenaza de incendios forestales evaluados desde el factor histórico

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

#### D. Relieve (pendientes)

La pendiente aumenta la propagación del fuego a favor de esta de manera rápida y peligrosa (IDEAM, 2011). Con el propósito de valorar este atributo se tendrá en cuenta un mapa de pendientes a partir de los modelos de terreno que se tienen para el proyecto.

A partir del mapa de curvas de nivel se generó el modelo digital del terreno, haciendo una reclasificación en porcentajes de las pendientes, como se observa en la Tabla 2-155.

Tabla 2-155 Categorías de amenaza según el relieve (pendientes).

Pendiente media (%)	Categoría de amenaza	Calificación
0-7 %	Muy baja	1
7-12 %	Baja	1
12-25%	Media	2
25-75 %	Alta	3
> 75 %	Muy alta	4

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022



Una vez generado el modelo y la clasificación de las pendientes que se encuentran en el área de afectación, se procedió a espacializar la amenaza por pendiente (ver Figura 2-261).

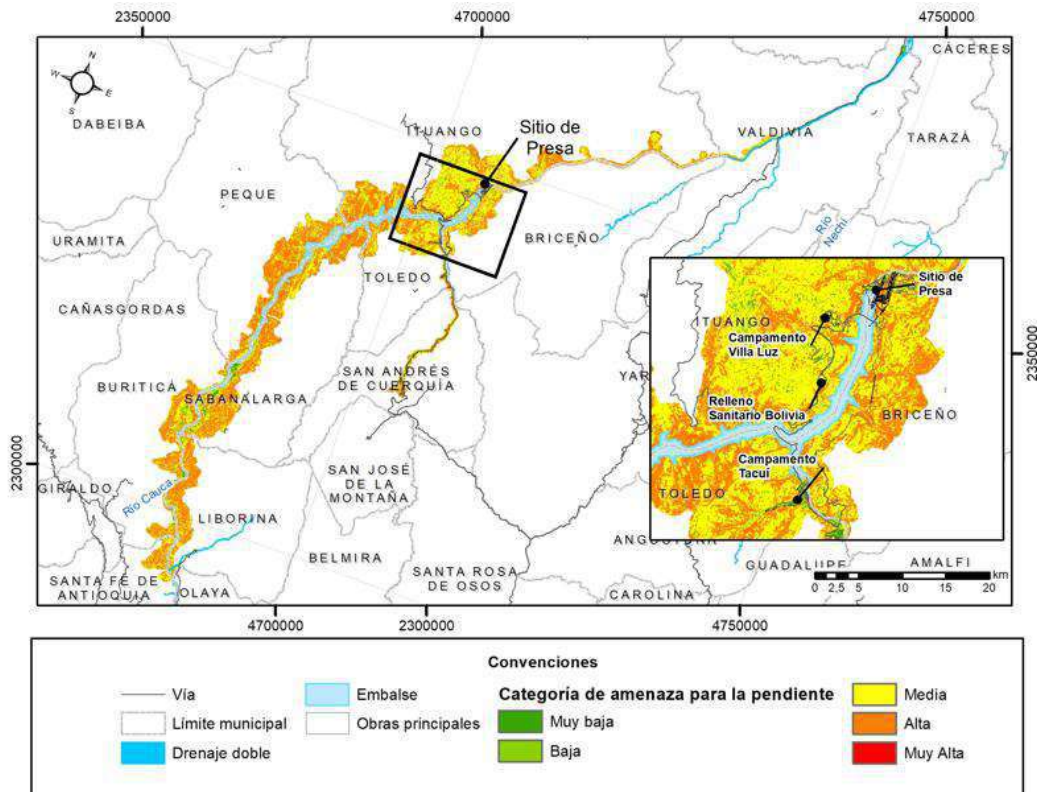


Figura 2-261 Espacialización de la amenaza por relieve (pendientes).

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

### E. Accesibilidad

Este atributo se refiere a la densidad vial, se considera como parte de la amenaza debido a que es fundamental en la probabilidad de que la población pueda llegar a áreas forestales y generar focos de incendio.

Para este proceso se tuvo en cuenta el mapa vial (vías principales y secundarias), la generación de cuatro zonas buffer cada una de 500 m de grosor; una vez generados los buffers, se procedió a su calificación y espacialización para la generación de las amenazas que se pueden presentar sobre la cobertura por efecto de la mayor o menor posibilidad de acceso que se tenga sobre ellas, de acuerdo a los criterios de la Tabla 2-156.

Tabla 2-156 Categorías de amenaza según la accesibilidad (Distancia de las vías)

Distancia de la vía (grosor del buffer (m))	Categoría de amenaza	Calificación
0 - 500	Muy alta	5
500 - 1000	Alta	4

Distancia de la vía (grosor del buffer (m))	Categoría de amenaza	Calificación
1000 - 1500	Media	3
1500 - 2000	Baja	2
> 2000	Muy baja	1

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Una vez generados los buffer y la clasificación de la accesibilidad frente a las vías que se encuentran en el área de influencia, se procedió a espacializar la amenaza por accesibilidad (ver Figura 2-262).

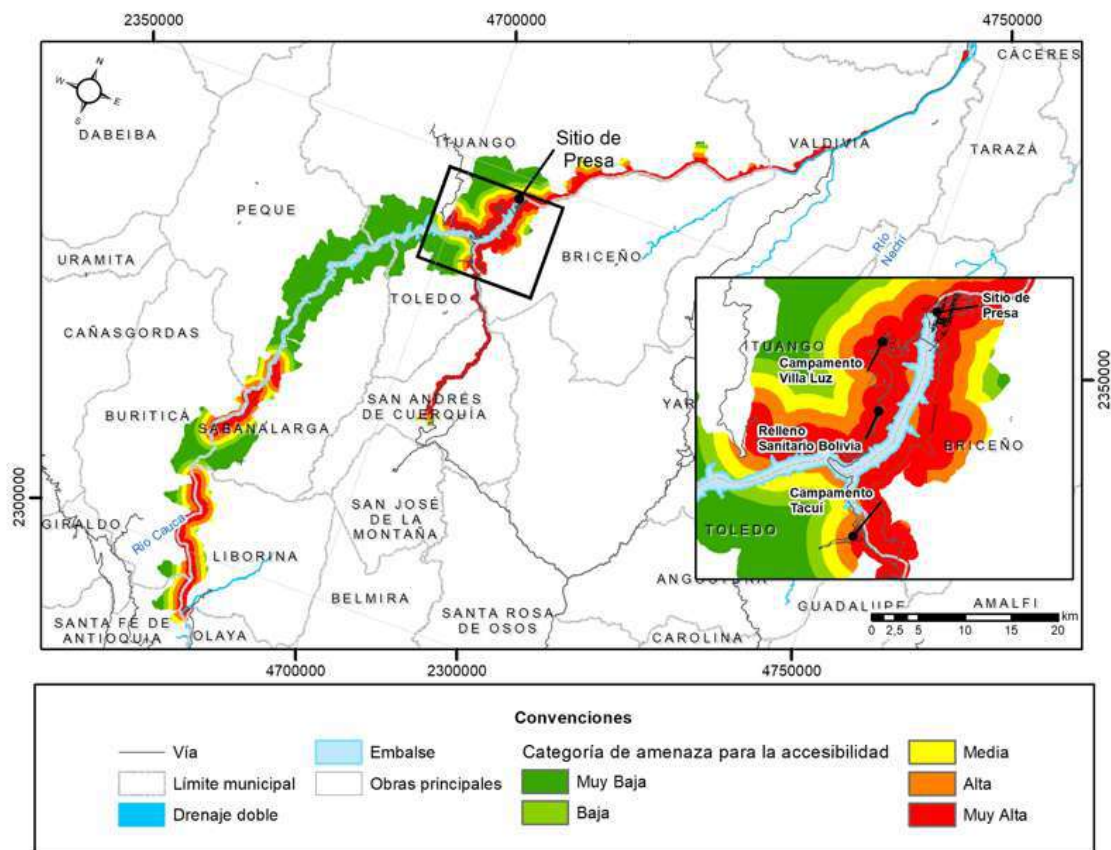


Figura 2-262 Espacialización de la amenaza por el factor de accesibilidad.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

#### 2.2.4.12.2 Obtención del mapa de amenaza por incendios forestales

Con la información generada en el numeral anterior y mediante el proceso de álgebra de mapas, se generó una suma ponderada, la cual equivale a la amenaza total por incendios forestales. Al no tener datos estadísticos de la causalidad de ocurrencia de incendios forestales en la zona, el peso de esta variable fue distribuido en las otras variables de análisis de forma proporcional según el peso que tuvieran estas.

Una vez realizada la suma ponderada, se procedió a realizar la distribución de las categorías en cinco rangos, teniendo rango menor (Muy Baja), rango mayor (Muy Alta), y categorías intermedias de Baja, Moderada y Alta. Finalmente se obtuvo como resultado el mapa de amenaza total para incendios forestales para el área de influencia del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (ver Figura 2-263).

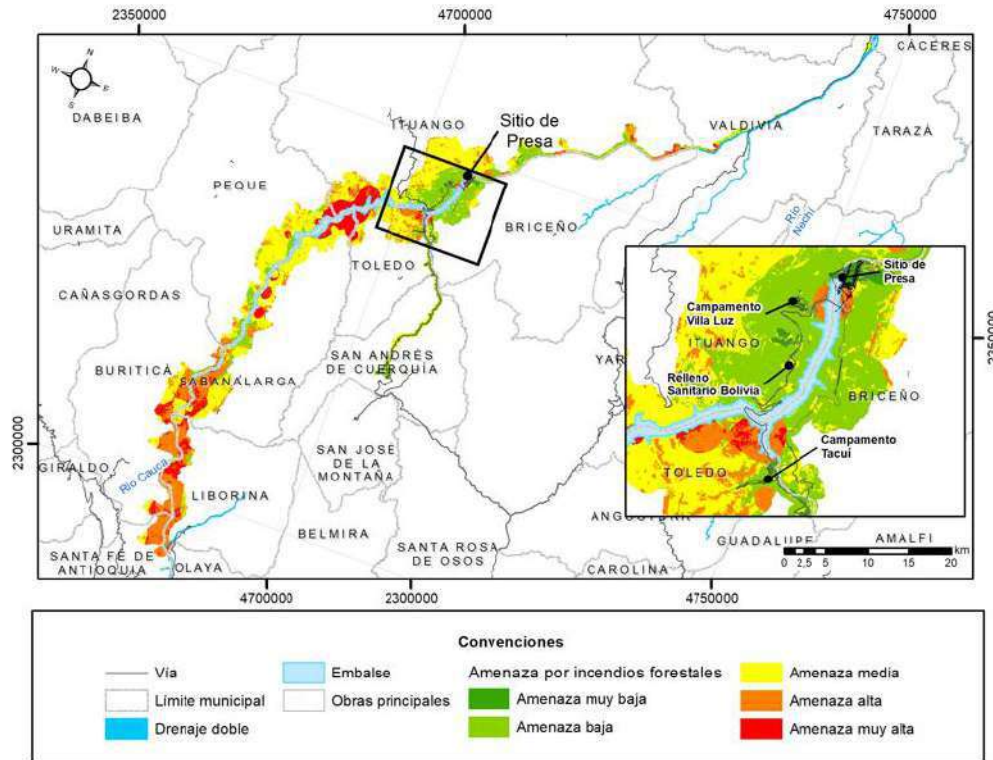


Figura 2-263 Mapa de amenaza total por incendios forestales.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

### 2.2.4.13 Caracterización de amenaza por emergencias sanitarias

Las emergencias sanitarias representan una amenaza a la salud pública y al bienestar del medio ambiente. Son eventos singulares que tienen el potencial de incidir negativamente en la mortalidad de la población, la cual para su atención requiere de una gestión integral y oportuna de los profesionales y directivas de la salud, además de disposición y compromiso por parte de la comunidad en general. Las emergencias sanitarias ocurren debido a causas socio naturales, antrópicas o por déficits operacionales.

En la Tabla 2-157 se presentan las amenazas de tipo endógenas y exógenas y su naturaleza de acuerdo con lo identificado para la condición actual del Proyecto.

Tabla 2-157 Amenazas Proyecto Hidroeléctrico Ituango \_PHI - Estado actual.

Tipo de amenaza	Amenazas	Origen			
		Natural	Antrópico	Socio natural	Operacional
Exógena	Emergencias Sanitarias	X	X	X	
Endógena	Emergencias Sanitarias generadas por situaciones propias del proyecto				X

Fuente: Consorcio Generación Ituango\_CGI, 2022.

De acuerdo con la clasificación de las amenazas presentadas en la Tabla 2-157 y los registros relacionados a emergencias sanitarias, se especializo la afectación de la amenaza identificada en el estado actual del PHI (ver Figura 2-264), a continuación se presenta la descripción y caracterización de cada una de ellas:

- **Emergencias sanitarias.**

El flujo migratorio del personal proveniente de diferentes lugares tanto del departamento como del país hacia el Proyecto puede propiciar la introducción de un brote inesperado de enfermedades infecciosas como fiebre amarilla, malaria, dengue, SARS-CoV-2 (COVID 19), y de transmisión sexual como hepatitis B, SIDA, entre otras. Se pueden propagar por vía aérea y/o contacto directo, en donde algunos brotes de infecciones virales y bacterianas por su potencial de propagación generan una alteración relevante que pone en riesgo la salud pública, como es el caso de epidemias y pandemias, afectando así al personal residente de los campamentos del Proyecto y por consiguiente la continuidad de las obras. Igualmente se pueden producir ataques de avispas y/o abejas desencadenadas por un frenesí defensivo de sus colonias en el área de posible afectación, esto debido a la interacción constante que se tiene con el entorno natural.

El riesgo biológico originado por brotes de infecciones contagiosas, además de ser evaluado dentro de las amenazas socio naturales, también debe ser estimado en un contexto antrópico, en el cual el virus puede ser liberado de manera accidental por la manipulación de agentes biológicos o por la liberación intencional con fines bioterroristas.

- **Emergencias sanitarias generadas por situaciones propias del proyecto.**

Las emergencias sanitarias de naturaleza endógena se pueden presentar por déficits operacionales propios del proyecto que generen accidentes o situaciones alarmantes en el área de afectación.

Se pueden presentar deficiencias en los sistemas de tratamiento de aguas de los campamentos y obras provisionales, en donde se vean afectados los procesos de control y eliminación de virus y microorganismos bacterianos como Coliformes, Escherichia Coli, entre otros, que generen una afectación a la salud de los trabajadores y visitantes del proyecto, ocasionando incapacidades y posibles retrasos en los cronogramas de trabajos estipulados. Además, por



fallas en los procesos de evacuación de gases tóxicos como el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre, o niveles bajos de oxígeno en las zonas de obras subterráneas se pueden presentar masivas intoxicaciones perjudiciales para la salud del personal de las obras.

Alimentos en mal estado suministrados al personal del proyecto pueden generar síntomas de vómito, diarrea, fiebre, entre otros, que desencadenen una intoxicación masiva que afecte el normal desarrollo del proyecto y posibles cierres de infraestructuras de alimentación.

Así mismo, debido a los ciclos de llenado del embalse se pueden favorecer procesos de proliferación de vectores y enfermedades transmitidas por ellos en el entorno del proyecto que puedan desencadenar una afectación a al personal y a las comunidades aledañas.

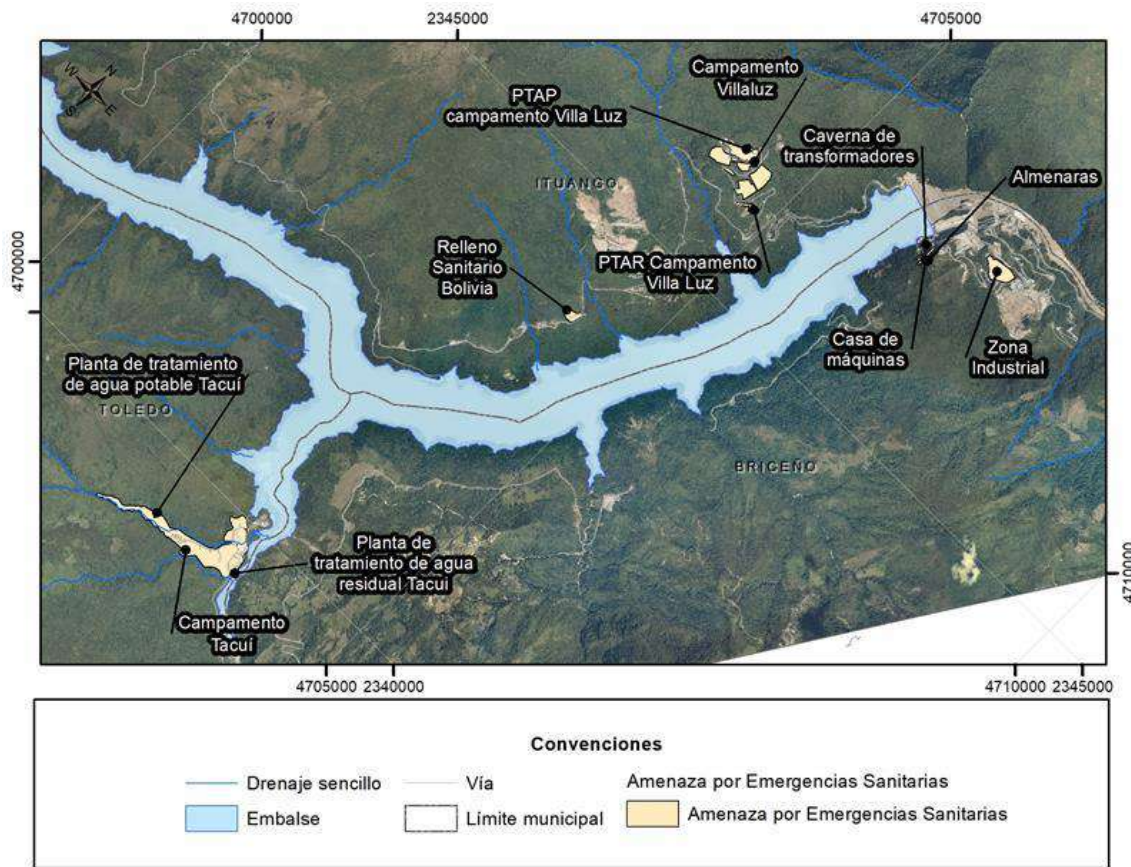


Figura 2-264 Espacialización de la probabilidad de amenaza por emergencia sanitaria dentro del PHI.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

#### 2.2.4.13.1 Evaluación de la amenaza

Finalmente, de acuerdo con la caracterización realizada para la amenaza, se determinó la calificación de éstas en términos de probabilidad de ocurrencia, de acuerdo a los rangos



establecidos en la Tabla 2-158, que asignan un valor según la frecuencia de manifestación de los eventos caracterizados:

Tabla 2-158 Criterios de calificación de probabilidad de ocurrencia de las amenazas

Valor	Clasificación	Probabilidad estadística	Descripción	Frecuencia
5	Muy alta	Mayor del 84%	El evento ocurre permanentemente	Más de 10 veces al año.
4	Alta	50.1% - 84%	El evento se presenta con cierta regularidad. Ocurre muchas veces	Entre 1 vez y 10 veces al año.
3	Media	16.1% - 50%	Evento que se presenta en forma esporádica. Ocurre varias veces.	Una vez entre 1 y 5 años.
2	Baja	2.1% - 16%	Evento no habitual. Poco frecuente	Una vez entre los 5 y los 20 años.
1	Muy baja	Menor o igual al 2%	Evento que ocurre en forma excepcional. Muy difícil que ocurra	Una vez en 20 o más años.

Fuente: Guía Metodológica para la Gestión de Riesgos EPM, 2020

De acuerdo con los criterios de calificación de la amenaza y los registros del último año relacionados a emergencias sanitarias se estableció una calificación de amenaza muy alta, dados los más de 600 casos relacionados a contagios e intoxicaciones en el área de afectación. La especialización de la calificación se determinó de acuerdo a la sensibilidad de recurrencia del personal en las infraestructuras del proyecto, arrojando las áreas de los campamentos, obras subterráneas y la variante San Andrés a la altura de la abscisa 0+500 como las más sensibles, debido al gran número de personas que constantemente convergen en estas infraestructuras (ver Figura 2-265 y mapa anexo M-PHI-111-TRA-ES-X-010).

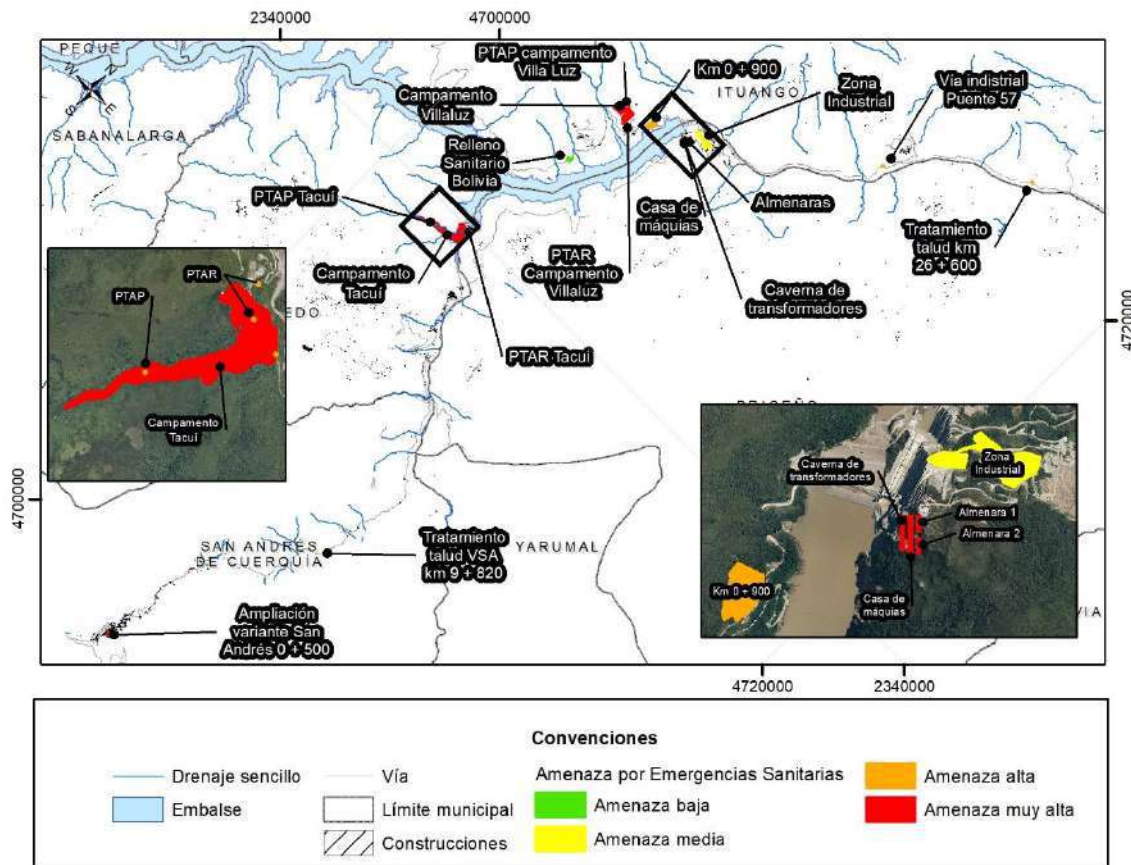


Figura 2-265 Espacialización de la calificación de amenaza por emergencias sanitarias.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Los polígonos relacionados a los campamentos, obras subterráneas y la variante San Andrés en el km 0+500 tienen un grado de amenaza muy alto en las 45,85 ha que los conforman, esto debido al gran número de colaboradores que constantemente frecuentan estas áreas y los reportes por brotes de enfermedades con el potencial de afectar masivamente a la población que se han presentado dentro del área de afectación. Además, el PHI comprende un área de 5,76 ha altamente amenazada sobre las plantas de tratamiento de aguas y frentes de obras activos relacionados a tratamientos de taludes y vías. El polígono de la zona industrial del proyecto tiene un área de 5,76 ha con un grado de amenaza media y, por último, se tiene un área de 1,61 ha del relleno sanitario Bolivia que se encuentra con una amenaza baja, en donde igualmente se cumplen con todas las medidas y controles de bioseguridad para la protección de los colaboradores del proyecto dada la situación epidemiológica actual (ver Tabla 2-159).

Tabla 2-159 Calificación del grado de amenaza por emergencias sanitarias en cada área de afectación

Resumen
---------

Polígono	Grado de Amenaza	Calificación	Área (ha)
Campamentos - Obras subterráneas - Variante San Andrés	Amenaza muy alta	5	45,85
Plantas de tratamiento de campamentos - Frente de obras activos	Amenaza alta	4	5,76
Zona Industrial	Amenaza media	3	8,07
Relleno Sanitario Bolivia	Amenaza baja	2	1,61

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

#### 2.2.4.14 Caracterización de amenaza por orden público y social

Durante décadas el departamento de Antioquia, puntualmente los municipios del área de influencia del Proyecto han sido escenario del desarrollo de actividades relacionadas con el conflicto armado interno colombiano, la zona ha sido utilizada como corredor estratégico de los grupos al margen de la ley, tanto guerrillas como en su momento de grupos paramilitares, hoy Bandas Criminales – BACRIM, así como Grupos Armados Organizados, y actualmente con reductos o disidencias de las FARC-EP tanto para llevar a cabo actividades relacionadas a cultivos ilícitos, transporte de sustancias ilícitas y en general ejercer el control de territorios, cubriendo los municipios del norte como Ituango, San Andrés de Cuerquia, Briceño y Valdivia.

Por esta razón las tasas de delitos relacionados a hurtos, homicidios, amenazas, entre otros en estas municipalidades de Antioquia son frecuentes y por ende son motivo de diagnóstico.

Dadas las características sociopolíticas de la zona, existe la probabilidad que se presenten eventos que alteren el orden público tales como:

**Homicidios:** Situación violenta detonada por grupos armados presentes en el territorio que pone en riesgo al personal del proyecto y los habitantes de los municipios y zonas rurales aledañas, principalmente a los líderes sociales y defensores de los derechos humanos y del medio ambiente.

**Asaltos o robos:** Fenómeno que puede suceder principalmente si no se cuenta con la seguridad necesaria en el sitio del proyecto y puede generar pérdida de maquinaria y equipos, daño de infraestructura y toma de campamentos, oficinas, polvorines, puestos de seguridad, vulneraciones a la integridad física del personal, entre otros.

**Sabotaje:** Se basa en la destrucción, daño o sabotaje parcial o total de infraestructura, equipos de construcción, centros de combustibles, vías y demás instalaciones fundamentales con el fin de desestabilizar el normal desarrollo del proyecto.

**Amenazas:** Debido a la presencia de grupos al margen de la ley en el territorio se pueden presentar situaciones amenazantes para difundir miedo, con el objetivo intimidar para fines lucrativos y ganar control social.

**Secuestros o retenciones:** Conducta delictiva frecuentemente implementada por grupos guerrilleros que se asocia al lucro y beneficio económico que puede llegar a generarse al momento de la puesta en libertad de la víctima (personal de planta participante en el proyecto).

**Huelgas:** Por inconformidad, expectativas e incumplimientos hacia el personal/contratistas que ejecutan labores durante construcción del proyecto puede ocasionar manifestaciones que resulten en cese de actividades parcial o totalmente, lo cual generaría retrasos en los cronogramas, con extra costos y bloqueos.

**Paros armados, retenes ilegales e incineraciones de vehículos:** Limitaciones de movilidad aplicados por grupos armados, generalmente se presentan sobre vías de importancia para el normal desarrollo del proyecto y las dinámicas de desplazamiento de las comunidades de la zona con el objetivo de fomentar temor e incertidumbre sobre el control del territorio a los trabajadores del proyecto y la población en general.

**Paros cívicos/protestas:** Se presenta como la reacción de la comunidad del área de influencia por inconformismo, incumplimientos y expectativas generadas frente al proyecto o por cambios en las dinámicas de poder dentro de las comunidades. Esto se puede inducir a manifestaciones como protestas hasta bloqueos de vías, ocasionando retrasos en cronogramas por cese parcial o total de actividades, extra costos y deterioro de las relaciones proyecto – comunidad.

**Atentado a la infraestructura asociada al proyecto:** Esta amenaza puede resultar en un escenario de falla de presa, la cual contempla las consecuencias más graves en términos de magnitud e impactos. Es posible que estos atentados generen afectaciones por uso de artefactos explosivos o fallas inducidas externamente a equipos de gran importancia (principalmente la presa y sus componentes). En la Figura 2-266 se muestran los sitios en donde se pueden presentar esta amenaza.

A partir de la identificación de la amenaza (Tabla 2-160) y con el apoyo de los reportes de eventos relacionados a alteraciones de orden público y social durante las diferentes etapas constructivas del proyecto, se realizó la caracterización de la amenaza y su naturaleza, la cual permite determinar las características y extensión espacial de la afectación de las mismas identificadas para el estado actual del PHI (expresada como un mapa de espacialización en caso de manifestación de la amenaza, ver Figura 2-266).

Tabla 2-160. Amenaza por alteración de orden público y social del Proyecto Hidroeléctrico Ituango \_PHI - Estado actual

Tipo de amenaza	Amenazas	Natural	Antrópico	Socionatural	Operacionales
-----------------	----------	---------	-----------	--------------	---------------

Endógena	Alteración del orden público y social		X	X	
----------	---------------------------------------	--	---	---	--

Fuente: Consorcio Generación Ituango\_CGI, 2022.

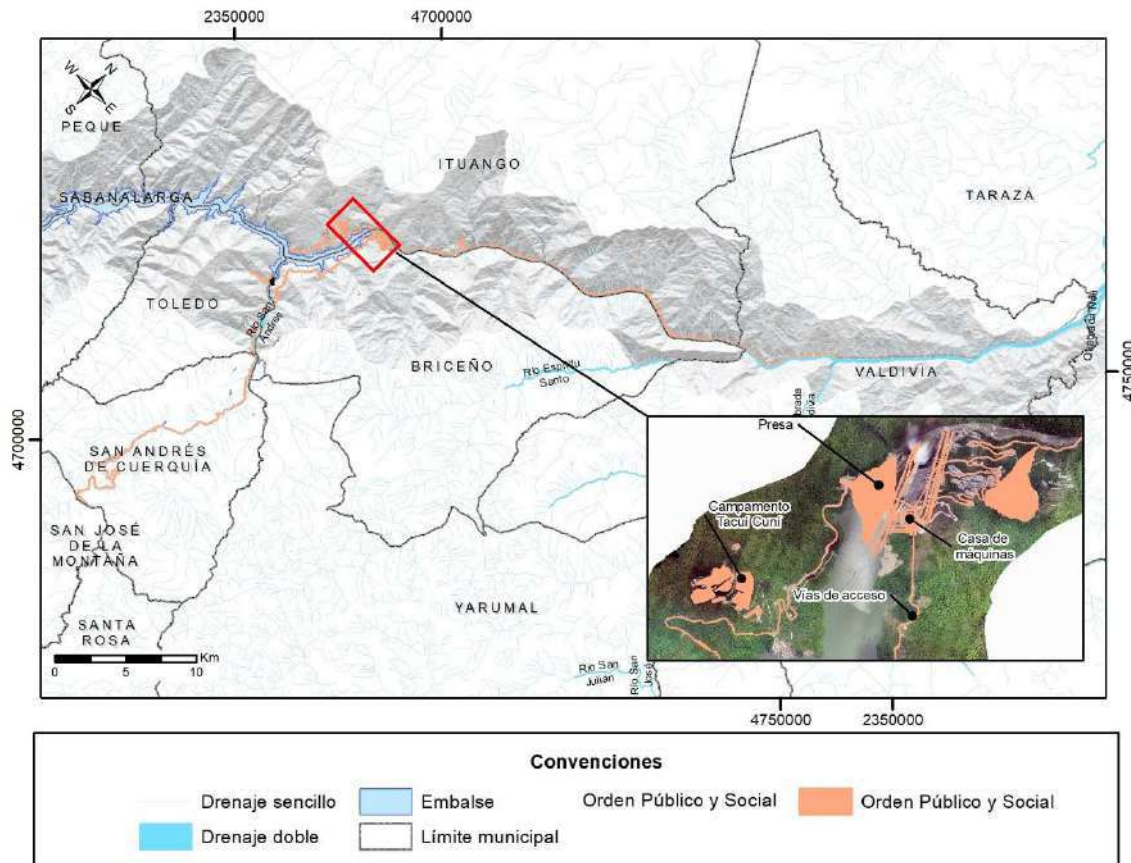


Figura 2-266 Espacialización dentro del PHI de la probabilidad de amenaza por Orden Público y social

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

#### 2.2.4.14.1 Evaluación de la amenaza

De acuerdo con la caracterización realizada para la amenaza, se determinó la calificación de éstas en términos de probabilidad de ocurrencia, de acuerdo a los rangos establecidos en la Tabla 2-158, que asignan un valor según la frecuencia de manifestación de los eventos caracterizados:

Tabla 2-161 Criterios de calificación de probabilidad de ocurrencia de las amenazas

Valor	Clasificación	Probabilidad estadística	Descripción	Frecuencia
5	Muy alta	Mayor del 84%	El evento ocurre permanentemente	Más de 10 veces al año.



Valor	Clasificación	Probabilidad estadística	Descripción	Frecuencia
4	Alta	50.1% - 84%	El evento se presenta con cierta regularidad. Ocurre muchas veces	Entre 1 vez y 10 veces al año.
3	Media	16.1% - 50%	Evento que se presenta en forma esporádica. Ocurre varias veces.	Una vez entre 1 y 5 años.
2	Baja	2.1% - 16%	Evento no habitual. Poco frecuente	Una vez entre los 5 y los 20 años.
1	Muy baja	Menor o igual al 2%	Evento que ocurre en forma excepcional. Muy difícil que ocurra	Una vez en 20 o más años.

Fuente: Guía Metodológica para la Gestión Integral de Riesgos, 2020

Según los criterios de calificación de la amenaza y los reportes relacionados a la alteración de orden público y social, se determinó que la calificación predominante para la amenaza en el área de afectación tiene una probabilidad de ocurrencia muy alta, donde los elementos a usar para caracterizar la amenaza se rigieron por la infraestructura del proyecto (vías de comunicación, puentes y líneas vitales), ya que en el último año se reportaron alrededor de 35 eventos relacionados a incineraciones de vehículos, amenazas, protestas, bloqueos, emboscadas, masacres, activación de artefactos explosivos, entre otros, principalmente sobre las vías que comunican el proyecto con Ituango, San Andrés de Cuerquia y Puerto Valdivia. (ver Figura 2-267 y mapa anexo M-PHI-111-TRA-OPS-X-010).

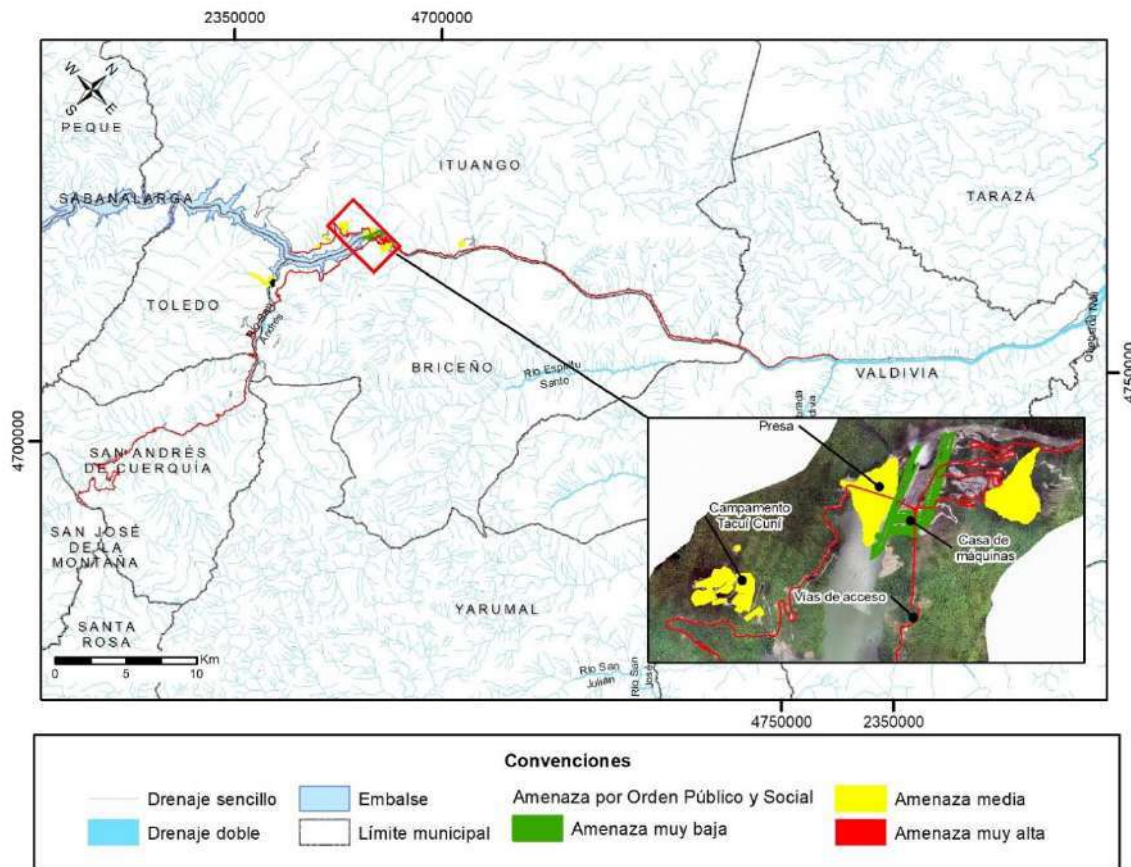


Figura 2-267 Espacialización de la calificación de amenaza por Orden Público y Social

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

En las 86,24 ha del polígono de las vías principales con grado de amenaza muy alto, se encuentran 84,20 km de vías y 0,06 km de líneas vitales construidas del PHI altamente amenazadas por alteraciones de orden público y social. Además, se tienen 111,95 ha en las áreas de los campamentos, sitio de presa y zona industrial del PHI con un grado de amenaza media, en las que se le sobreponen 3,43 km de vías, caminos y senderos, y 0,25 km de líneas vitales. Por último, se tienen 11,53 ha con un grado de amenaza muy bajo en las áreas de las obras subterráneas (ver Tabla 2-162, Tabla 2-163 y Tabla 2-164).

Tabla 2-162 Calificación del grado de amenaza por orden público y social en cada área de afectación.

Resumen			
Polígono	Grado de Amenaza	Calificación	Área (ha)
Vías Principales	Am amenaza muy alta	5	86,24
Vía de la Zona Industrial-Campamentos-Presa	Am amenaza media	3	111,95

Obras Subterráneas	Amenaza muy baja	1	11,53
--------------------	------------------	---	-------

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Tabla 2-163 Calificación del grado de amenaza por orden público y social en cada línea vital dentro del área de afectación.

Resumen			
Infraestructura Lineal	Grado de Amenaza	Calificación	Longitud (km)
Vías principales	Amenaza muy alta	5	84,20
Líneas vitales (líneas de transmisión y tuberías)			0,06
Vías, caminos, senderos	Amenaza media	3	3,43
Líneas vitales (líneas de transmisión y tuberías)			0,25

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

Tabla 2-164 Calificación del grado de amenaza por orden público y social para sitios puntuales dentro del área afectación.

Resumen			
Infraestructura Puntual	Lugar	Grado de Amenaza	Calificación
Construcciones PHI (postes y antenas)	Vías	Amenaza muy alta	5
Tanque PHI	Campamento Tacuí Cuní	Amenaza media	3
	Campamento Villa Luz		
Helipuerto PHI	Campamento Tacuí Cuní		
Construcciones PHI	Campamento Tacuí Cuní		
	Presa		
	ZODME-TICUITA2		
Torre de energía	Relleno sanitario Bolivia		

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022

#### 2.2.4.15 Caracterización de amenaza por cambio climático

Para la determinación de caudales de diseño, ya sea para condiciones máximas o condiciones mínimas, es común encontrar en el medio de la ingeniería la utilización de aproximaciones estadísticas, que utilizan los registros históricos con el fin de establecer valores de caudal asociados a diferentes periodos de retorno, en función de una distribución de probabilidad determinada. Los análisis de frecuencia hacen parte de las aproximaciones estadísticas más utilizadas.

Por otro lado, el análisis de eventos máximos por análisis no estacionarios ampliados proporciona un enfoque alternativo para una estimación fiable de eventos de diseño, pues da una idea de efectos del impacto del cambio climático/de uso del suelo en la ocurrencia y magnitud de las inundaciones. También sirve como herramienta para estudiar escenarios de

cambio climático junto con simulaciones de modelos macroclimáticos (He, Bárdossy, & Brommundt, 2006).

En este capítulo se presenta un análisis asociado a la estimación de la variabilidad de los eventos máximos y mínimos de caudal en el río Cauca, a partir de los registros de la estación hidrológica Puerto Valdivia [2623704], propiedad del IDEAM, por ser esta una estación representativa del comportamiento de los caudales del río Cauca en un punto cercano al proyecto y con una buena cantidad de registros históricos. Además, se trata de una estación hidrométrica relativamente estable con una buena correlación entre el caudal y los niveles del río. Para la estación Puerto Valdivia fueron analizados los registros de caudal para un periodo comprendido entre enero de 1965 y diciembre de 2021.

#### 2.2.4.15.1 Análisis de resultados

En este apartado se presenta los resultados más relevantes asociados a las estimaciones realizadas. Por un lado, se presentan los resultados asociados al análisis de caudales máximos y, por otro lado, los resultados asociados al análisis de caudales mínimo (ver mapa anexo M-PHI-111-TRA-CC-X-010).

##### A. Caudales máximos

A continuación, se presenta el análisis de frecuencia de caudales máximos para los 53 datos de la serie comprendida entre 1.965 y 2.021. La Figura 2-268 muestra el ajuste de los datos a las distribuciones de probabilidad Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson, Gumbel y Log-Gumbel. De igual forma, la Tabla 2-165 presenta los caudales máximos esperados para diferentes periodos de retorno en función de la respectiva distribución de probabilidad.

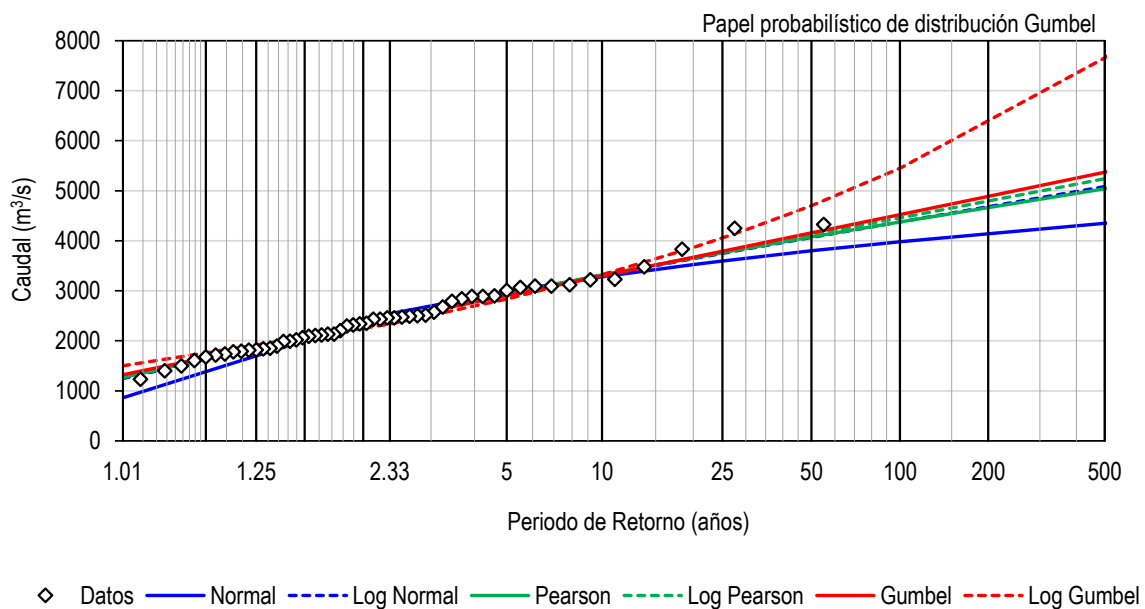


Figura 2-268 Análisis de Frecuencia de Máximos - Estación Puerto Valdivia [2623704].

Fuente: Integral S.A., 2.022.

Tabla 2-165 Caudales Máximos Esperados - Estación Puerto Valdivia [2623704].

Periodo de Retorno (años)	Valor Esperado (m <sup>3</sup> /s)					
	Normal	Log Normal	Pearson	Log Pearson	Gumbel	Log Gumbel
1,01	860	1.245	1.267	1.269	1.321	1.499
2,33	2.541	2.451	2.449	2.441	2.422	2.337
5	2.986	2.932	2.941	2.928	2.904	2.837
10	3.281	3.302	3.316	3.310	3.296	3.323
20	3.524	3.642	3.656	3.668	3.672	3.866
25	3.595	3.748	3.761	3.780	3.792	4.057
30	3.651	3.833	3.845	3.871	3.889	4.218
50	3.798	4.067	4.075	4.122	4.159	4.704
100	3.981	4.378	4.376	4.460	4.524	5.449
500	4.351	5.082	5.041	5.239	5.368	7.653
1.000	4.493	5.381	5.317	5.578	5.730	8.856
1.0000	4.915	6.377	6.204	6.733	6.934	14.382

Fuente: Integral S.A., 2.022.

A partir de los resultados asociados para el análisis de frecuencia con la totalidad de los registros anuales, se define la distribución Gumbel como aquella que mejor se ajusta al conjunto de datos analizados. Con esta distribución se realizan entonces los análisis por ventanas móviles.

A continuación, la Figura 2-269 y la Figura 2-270 presentan los resultados del análisis de frecuencia de caudales máximos por ventanas móviles para los datos de la estación Puerto Valdivia, considerando un enfoque “progresivo” y “regresivo”, respectivamente, y una distribución de probabilidad Gumbel. De este punto en adelante, para todos los resultados presentados en cuanto a caudales máximos se refiere, se consideran los periodos de retorno de 2,33 años, 25 años y 100 años, y se muestran además las variaciones en la media y desviación estándar según la ventana de tiempo considerada.



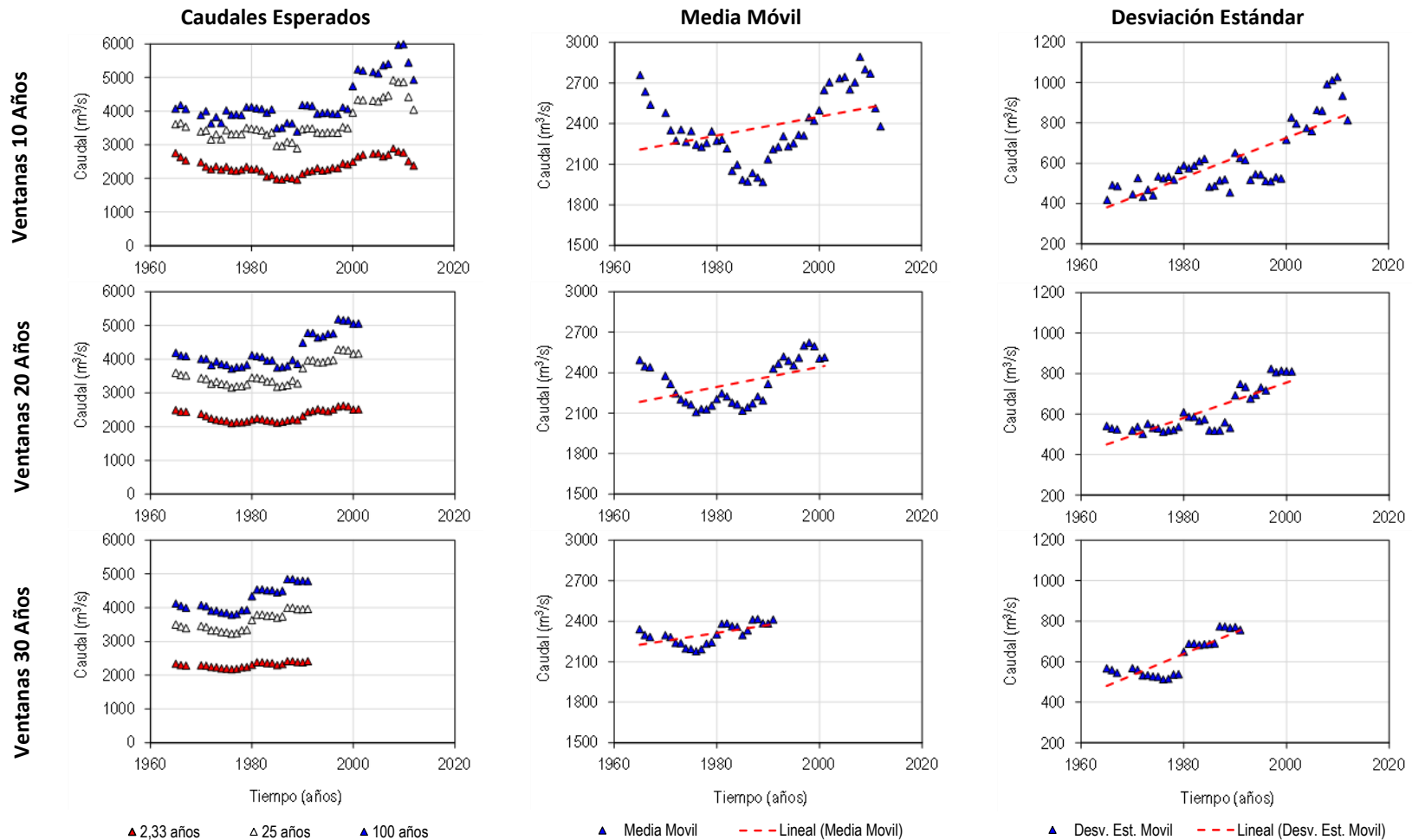


Figura 2-269 Análisis de Frecuencia para Caudales Máximos por Ventanas Móviles - Estación Puerto Valdivia. Distribución de Probabilidad Gumbel. Año de inicio de ventana: 1.965 (progresivo).



**Caudales Esperados**

**Media Móvil**

**Desviación Estándar**

Fuente: Integral S.A., 2.022.

**HIDROELÉCTRICA ITUANGO S.A. E.S.P.**

Naturalmente... ¡Buena energía!



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



<http://www.hidroituango.com.co>



[info@hidroituango.com.co](mailto:info@hidroituango.com.co)



PBX: (574) 5203160

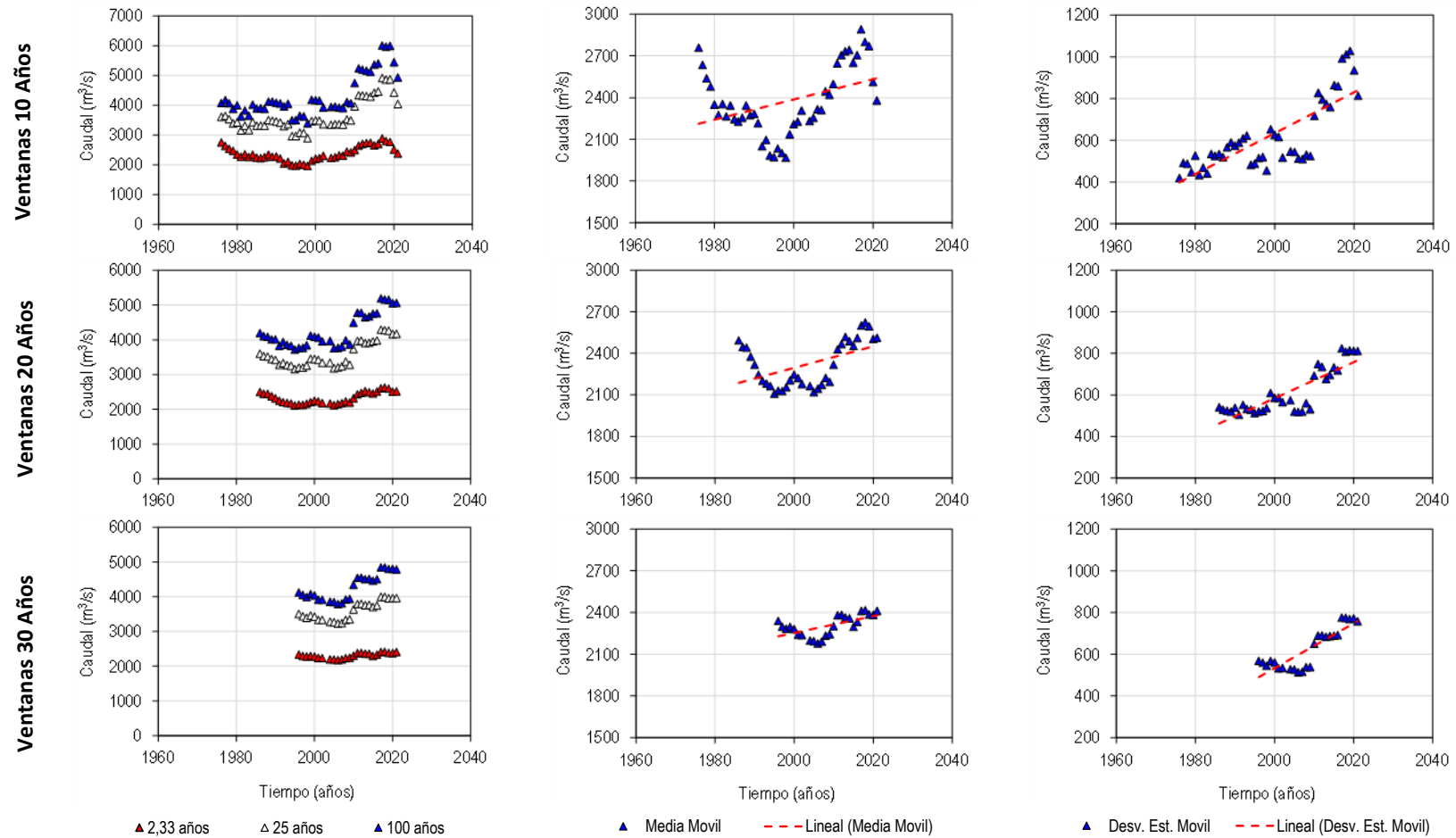


Figura 2-270 Análisis de Frecuencia para Caudales Máximos por Ventanas Móviles - Estación Puerto Valdivia. Distribución de Probabilidad Gumbel. Año de Inicio de Ventana: 2.021 (regresivo). Fuente: Integral S.A., 2.022.

Como puede observarse, una ventana de tiempo mayor parece atenuar la tendencia, en todos los casos creciente, de la media y desviación estándar de los datos. Por otro lado, una menor ventana de tiempo favorece el incremento de los caudales máximos esperados. Esto puede deberse al “enmascaramiento” de los eventos macroclimáticos (eventos asociados al ENSO) si se consideran mayores ventanas de tiempo. Sin embargo, en el caso particular de los datos analizados, de manera generalizada se muestra que los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno analizados tienden a incrementarse con el paso del tiempo. Esto va de la mano con las mencionadas tendencias crecientes en la media y desviación estándar de los datos. Finalmente, la Tabla 2-166 presenta el valor de la pendiente de la línea de tendencia para los estadísticos asociados al análisis de caudales máximos. Lo anterior hace referencia a la línea roja punteada presentada para la media móvil y la desviación estándar móvil en la Figura 2-269 y Figura 2-270.

Tabla 2-166 Pendiente de la Línea de Tendencia para Estadísticos Asociados a Caudales Máximos.

Ventana	Análisis Progresivo		Análisis Regresivo	
	Media Móvil	Desv. Est. Móvil	Media Móvil	Desv. Est. Móvil
10 años	6,94	9,81	7,28	9,81
20 años	7,43	8,74	7,75	8,68
30 años	5,87	10,58	6,04	10,74

Fuente: Integral S.A., 2.022.

#### B. Caudales mínimos

A continuación, se presenta el análisis de frecuencia de caudales mínimos para los 53 datos de la serie comprendida entre 1965 y 2021. La Figura 2-271 muestra el ajuste de los datos a las distribuciones de probabilidad Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson, Gumbel y Log-Gumbel. De igual forma, la Tabla 2-167 presenta los caudales máximos esperados para diferentes periodos de retorno en función de la respectiva distribución de probabilidad.

Tabla 2-167 Caudales Mínimos Esperados - Estación Puerto Valdivia [2623704].

Periodo de Retorno (años)	Valor Esperado (m <sup>3</sup> /s)					
	Normal	Log Normal	Pearson	Log Pearson	Gumbel	Log Gumbel
1,01	918	1.133	781	1212	786	852
2,33	434	401	465	395	468	431
5	306	305	322	304	329	320
10	221	254	211	257	216	252
20	151	218	108	224	108	199
25	130	209	76	216	74	185
30	114	202	50	210	46	174
50	72	184		194		148
100	19	165		176		118
500		131		146		70
1.000		120		137		56
10.000		93		112		27

Nota: celdas vacías dan cuenta de valores inferiores a cero, que no se consideran físicamente posibles.

Fuente: Integral S.A., 2.022.

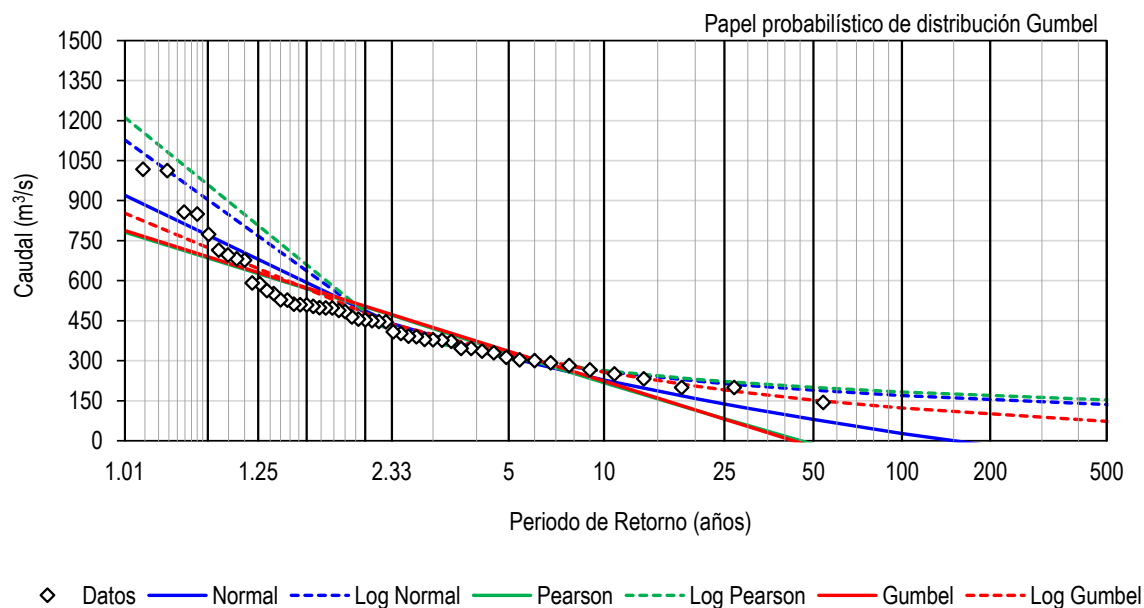


Figura 2-271 Análisis de Frecuencia de Mínimos - Estación Puerto Valdivia [2623704].

Fuente: Integral S.A., 2.022.

A partir de los resultados asociados para el análisis de frecuencia con la totalidad de los registros anuales, se define la distribución Log-Gumbel como aquella que mejor se ajusta al conjunto de datos analizados. Con esta distribución se realizan entonces los análisis por ventanas móviles para caudales mínimos.



De manera similar a lo presentado en el numeral anterior, la Figura 2-272 y Figura 2-273 presentan los resultados del análisis de frecuencia de caudales mínimos por ventanas móviles para los datos de la estación Puerto Valdivia, considerando un enfoque “progresivo” y un enfoque “regresivo”, respectivamente, y una distribución de probabilidad Log-Gumbel.

Como se mencionó en el numeral anterior, para todos los resultados presentados se consideraron los periodos de retorno de 2,33 años, 25 años y 100 años, y se muestran además las variaciones en la media y desviación estándar según la ventana de tiempo considerada.



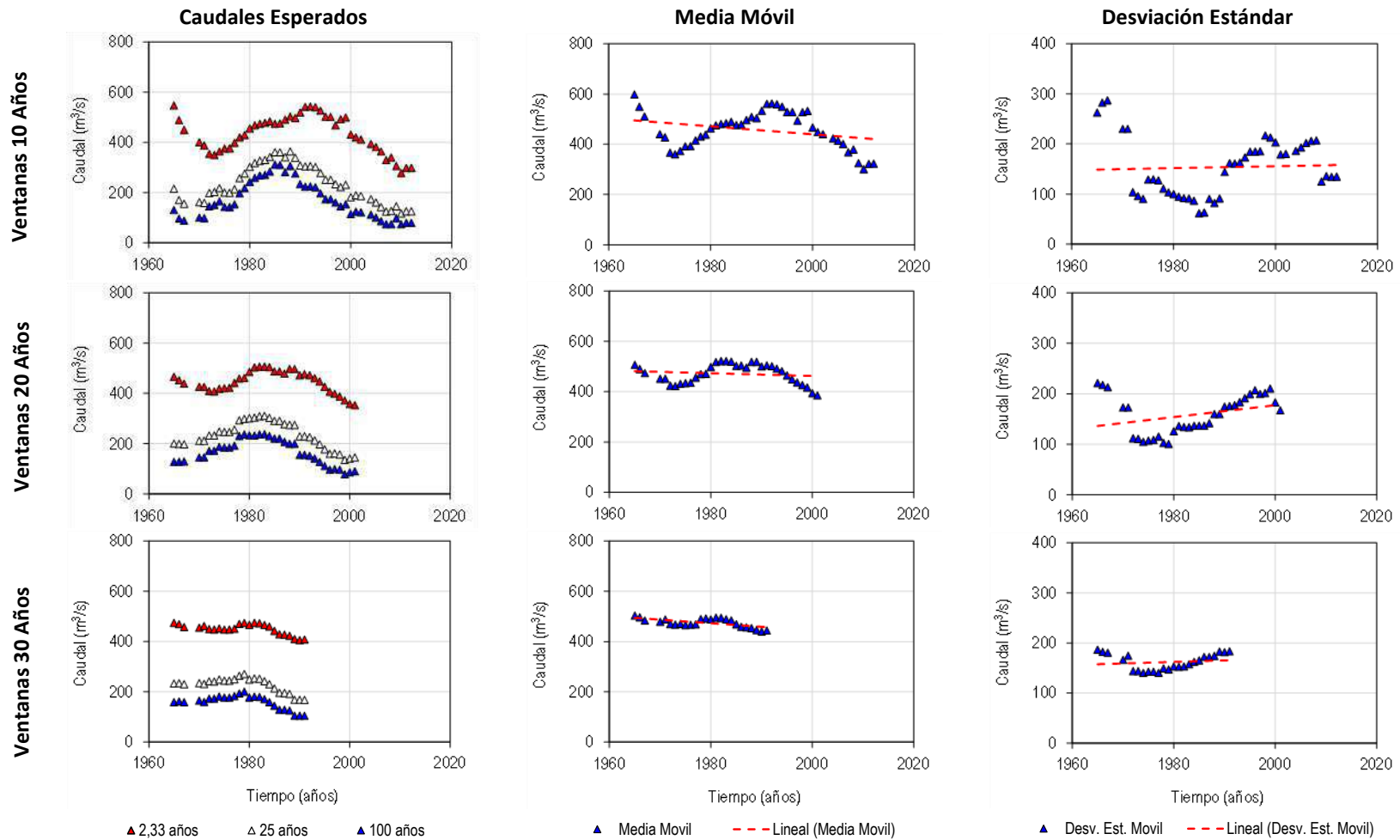


Figura 2-272 Análisis de Frecuencia para Caudales Mínimos por Ventanas Móviles - Estación Puerto Valdivia. Distribución de Probabilidad Gumbel. Año de inicio de ventana: 1.965 (progresivo).



Fuente: Integral S.A., 2.022.



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



info@hidroituango.com.co



<http://www.hidroituango.com.co>



PBX: (574) 5203160

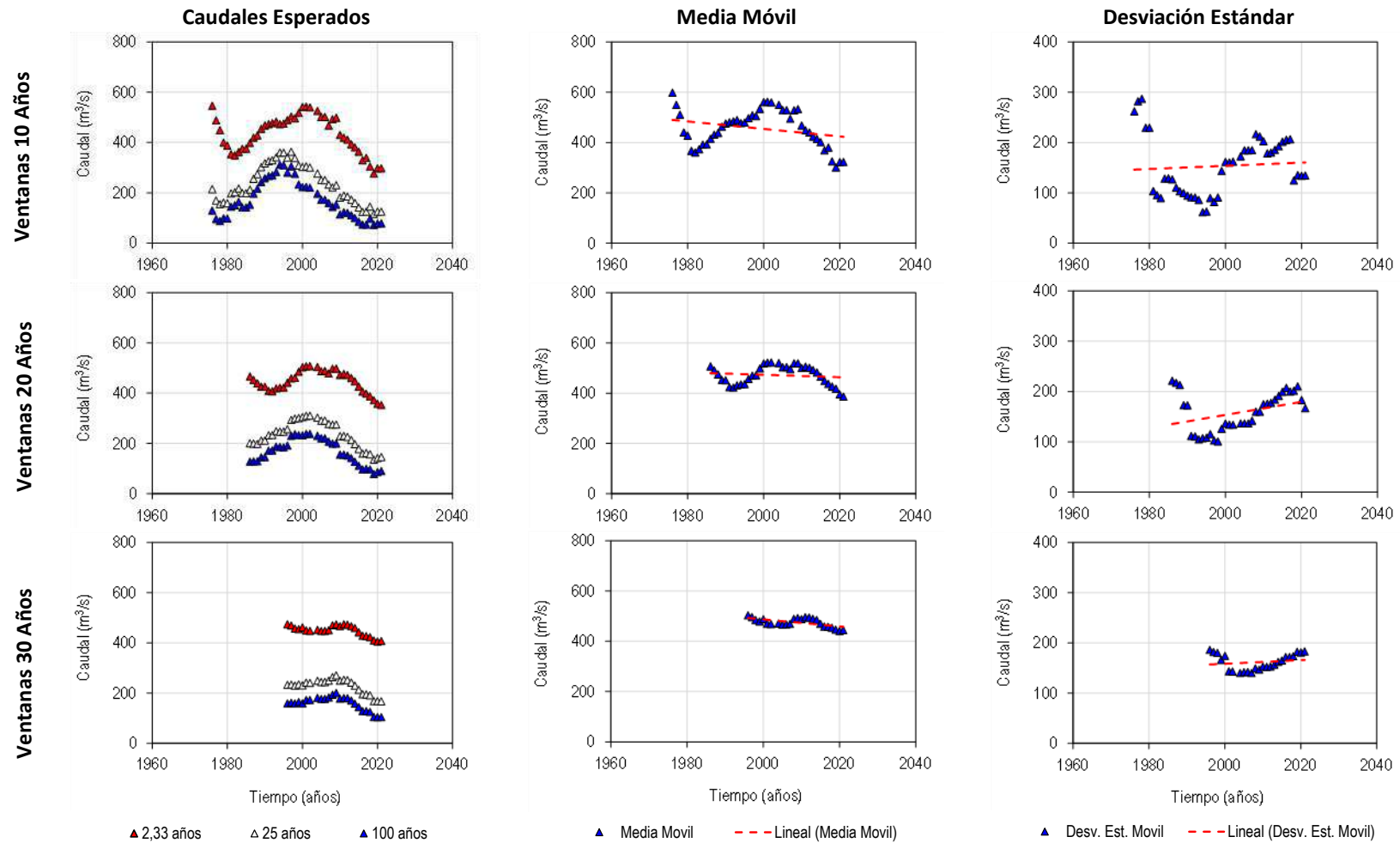


Figura 2-273 Análisis de Frecuencia para Caudales Mínimos por Ventanas Móviles - Estación Puerto Valdivia. Distribución de Probabilidad Gumbel. Año de Inicio de Ventana: 2.021 (regresivo).



Fuente: Integral S.A., 2.022.



Calle 7 sur No 42 70 Edificio Fórum, of, 2202



info@hidroituango.com.co



<http://www.hidroituango.com.co>



PBX: (574) 5203160



Nuevamente, con los datos asociados a eventos mínimos, también se da cuenta de que una ventana de tiempo mayor atenúa la tendencia decreciente de la media, y creciente de la desviación estándar de los datos. Similar a lo presentado para el caso de los caudales máximos, una menor ventana de tiempo favorece el incremento de los caudales esperados. En este caso, para los datos analizados, de manera generalizada se muestra que los caudales mínimos para los diferentes periodos de retorno analizados tienden a disminuir con el paso del tiempo. Esto va de la mano con la mencionada tendencia decreciente en la media. En la Tabla 2-168 presenta el valor de la pendiente de la línea de tendencia para los estadísticos asociados al análisis de caudales mínimos. Lo anterior hace referencia a la línea roja punteada presentada para la media móvil y la desviación estándar móvil en las Figura 2-272 y Figura 2-273.

Tabla 2-168 Pendiente de la Línea de Tendencia para Estadísticos Asociados a Caudales Mínimos.

Ventana	Análisis Progresivo		Análisis Regresivo	
	Media Móvil	Desv. Est. Móvil	Media Móvil	Desv. Est. Móvil
10 años	-1,59	0,19	-1,49	0,32
20 años	-0,55	1,17	-0,50	1,31
30 años	-1,44	0,31	-1,41	0,38

Fuente: Integral S.A., 2.022.

#### 2.2.4.15.2 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que, en términos de caudales máximos, el estadístico asociado a la media de los registros varía a una tasa aproximada de 7 m<sup>3</sup>/s y la desviación estándar en unos 10 m<sup>3</sup>/s. Lo anterior implica que una creciente podrá incrementarse más de 200 m<sup>3</sup>/s para el año 2050.

En el caso de los caudales mínimos, el estadístico asociado a la media de los registros varía a una tasa aproximada de -1 m<sup>3</sup>/s. Una tasa de variación similar presenta la desviación estándar, ubicándose en 1 m<sup>3</sup>/s. Los mínimos parecen mostrar una tasa de variación mucho más baja que los caudales máximos. Para el año 2050, se podrían presentar disminuciones de los caudales mínimos de hasta -30 m<sup>3</sup>/s.

El vertedero tiene capacidad para evacuar caudales mayores a la variabilidad que puedan representar el cambio climático sobre los diferentes crecientes. Para ello hay que tener presente que las compuertas del vertedero se abren para evacuar las crecientes y mantener un nivel de embalse cercano a la cota 420 m.s.n.m. Si por ejemplo el caudal de la creciente de 50 años (4700 m<sup>3</sup>/s) varía en un futuro unos 200 m<sup>3</sup>/s en los próximos 30 años (de 4700 a 4900 m<sup>3</sup>/s), las compuertas radiales del veredero en vez de abrir en 6,5 m se abrirían hasta unos 7,0 m, lo cual es factible en términos de la operación del vertedero y el proyecto.

Respecto al impacto climático por caudales mínimos, las unidades de generación se adaptarían también para evacuar el caudal que el río tenga en ese momento. Hay que recordar que el caudal mínimo turbinado por una unidad es de unos 80 m<sup>3</sup>/s y puede alcanzar los 168 m<sup>3</sup>/s,



generando flexibilidad para manejar o evacuar los caudales mínimos alterados por el cambio climático.

Por ejemplo, hoy en día, durante una sequía con una recurrencia de 50 años de período de retorno, el caudal mínimo se estima en unos 200 m<sup>3</sup>/s; por lo que, de acuerdo con las proyecciones de cambio climático, este valor puede descender hasta los 170 m<sup>3</sup>/s en el año 2050 (una reducción de 30 m<sup>3</sup>/s aproximadamente). En este orden de ideas, ese caudal mínimo que hoy en día sería evacuado por 2 unidades de generación turbinando un caudal de unos 100 m<sup>3</sup>/s por cada una, en 2050 se realizaría de la misma manera, pero turbinando 170 m<sup>3</sup>/s por 2 unidades de generación, (turbinando 85 m<sup>3</sup>/s por cada unidad).

