



PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO - PHI PLAN DE GESTIÓN DEL RIESGO



2. CONOCIMIENTO DEL RIESGO



2.3 Monitoreo del Riesgo



MARZO, 2022

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
 PBX: (574) 5203160



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:	17/03/2022			
	RESPONSABLE POR REVISIÓN Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	Nombre:	B. Hernández A.			
		Firma:				
		Fecha:	17/03/2022			
	Vo. Bo. DIRECTOR DEL PROYECTO	Nombre:	L. F. Restrepo			
		Firma:				
		Fecha:	17/03/2022			



TABLA DE CONTENIDO

2	CONOCIMIENTO DEL RIESGO.....	7
2.3	MONITOREO DEL RIESGO.....	7
2.3.1	Protocolos o procedimientos de Monitoreo	7
2.3.2	Protocolos o procedimientos de notificación previos a emergencia.....	8
2.3.3	Parámetros e indicadores objeto de monitoreo	10
2.3.4	Diseño e instalación de la instrumentación.	10
2.3.5	Información adicional para mejorar la valoración del riesgo.	94
2.3.6	Lecciones a partir de eventos ocurridos.	95
2.3.7	Identificación riesgos futuros.	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1	Distribución de puntos de lectura para GML periódico.	59
Tabla 2-2.	Características generales de la red GNSS Trimble.....	74
Tabla 2-3.	Características generales de la red GNSS Navstar.	74
Tabla 2-4	Características generales de la red pasiva GNSS.....	74
Tabla 2-5	Coordenadas de los puntos monitoreados por los GNSS móviles.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1	Protocolo de notificación.....	9
------------	--------------------------------	---

0



Figura 2-2 Reporte de los parámetros e indicadores de monitoreo.....	10
Figura 2-3. CMT Medellín – CMT Ituango.....	11
Figura 2-4. Localización de las principales cámaras en las obras superficiales.....	12
Figura 2-5. Localización cámaras superficiales campamento y zonas aledañas.	13
Figura 2-6. Localización cámaras Subterráneas.....	13
Figura 2-7. 3D general subterráneo del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI), visualizado en Navisworks, mostrando la ubicación relativa de las cámaras más relevantes para el monitoreo en cavernas y túneles.....	14
Figura 2-8. Cámaras tipo AXIS, instaladas en el proyecto.....	14
Figura 2-9. Cámaras Monitoreadas en el PHI, A. Parte Alta Plazoleta de Compuertas, B. Vertedero, C. Caverna de Casa de Máquinas – Zona Norte, D. Zona de Descargas.....	15
Figura 2-10. Instrumento medidor de nivel – Radar VegaPuls 62.	17
Figura 2-11. Instrumento medidor de nivel – Radar Campbell Scientific CS475A	17
Figura 2-12. Instrumento medidor de nivel – Radar Vaisala QHR104.	18
Figura 2-13. Localización Estaciones de medición de nivel río Cauca.	19
Figura 2-14. Localización Estaciones Puente Metálico y Puente El Beso.....	19
Figura 2-15. Reporte diario de caudales a lo largo del río Cauca.....	20
Figura 2-16. Estaciones aguas arriba FEWS IDEAM.....	21
Figura 2-17. Radar Vaisala, nivel embalse Proyecto Hidroeléctrico Ituango.....	22
Figura 2-18. Gráfica registros caudales y nivel embalse Proyecto Hidroeléctrico Ituango.	23
Figura 2-19. Seguimiento a los caudales de vertimiento Proyecto Hidroeléctrico Ituango.	24
Figura 2-20 Visualización en Qlik Sense Caudales PHI.....	25
Figura 2-21. Visualización en Qlik Sense Nivel Embalse PHI.....	25
Figura 2-22. Resumen de Caudales y Nivel Embalse en Qlik Sense PHI.....	26
Figura 2-23. Visualización en Qlik Sense alerta por posible destaponamiento del TDD y/o GAD.....	27



Figura 2-24. Reporte de seguimiento de crecientes naturales en el río Cauca reportadas aguas arriba del Proyecto Hidroeléctrico Ituango.	28
Figura 2-25. Seguimiento a los caudales de vertimiento Proyecto Hidroeléctrico Ituango.	29
Figura 2-26. Protocolo para activación de alarmas por crecientes.	30
Figura 2-27. Instrumento medidor de presión – Piezómetro.	31
Figura 2-28. Correntómetro o molinete medidor de velocidad.	32
Figura 2-29. Transmisor de presión.	32
Figura 2-30. Medidor de nivel tipo radar.	33
Figura 2-31. Medidor de caudal ultrasónico.	33
Figura 2-32 Localización piezómetros aguas arriba de las compuertas del ramal izquierdo y derecho en la GAD.	34
Figura 2-33. Localización de transmisores de presión, medidor de nivel y medidor de caudal.	35
Figura 2-34. Visualización en la aplicación Qlik Sense de los niveles piezométricos aguas arriba de la GAD.	36
Figura 2-35. Visualización en la aplicación Qlik Sense de los caudales en el by-pass y el canal a flujo libre, GAD.	37
Figura 2-36. Visualización en la aplicación Qlik Sense de las presiones en el sistema de by-pass de la GAD.	37
Figura 2-37. Seguimiento al funcionamiento del By-Pass entre la GAD y la descarga intermedia.	38
Figura 2-38. Localización Instrumentación TDD.	39
Figura 2-39. Visualización en la aplicación Qlik Sense del nivel de los piezómetros en el TDD.	40
Figura 2-40. Visualización en la aplicación Qlik Sense de la velocidad en el TDD.	41
Figura 2-41. Visualización en la aplicación Qlik Sense del caudal evacuado por el TDD.	41
Figura 2-42. Reporte de seguimiento ante un posible destaponamiento súbito del TDD y/o GAD.	42
Figura 2-43. Alertas por destaponamiento TDD y GAD.	44



Figura 2-44. Protocolo para activación de alarmas por destaponamiento.....	44
Figura 2-45. Ubicación pluviómetro Base Militar Capitanes.....	45
Figura 2-46. Visualización en la aplicación Qlik Sense precipitación Proyecto Hidroeléctrico Ituango	45
Figura 2-47. Ubicación radar Vaisala nivel Río Ituango.....	46
Figura 2-48. Visualización en la aplicación Qlik Sense nivel río Ituango.	46
Figura 2-49. Ubicación radar Vaisala nivel Río Ituango.....	47
Figura 2-50. Reporte de seguimiento ante una posible creciente con afectación en las descargas del PHI.....	48
Figura 2-51. (A) Radar SSR528-FX, (B) GML, (C) Radar SSR410-SARX.	49
Figura 2-52. Principios interferométricos del radar SSR528 - FX.	49
Figura 2-53. Vista en planta información interferométrica.	50
Figura 2-54. Ubicación radar SSR528 - FX.	50
Figura 2-55. Zona de monitoreo – Margen derecha del embalse	51
Figura 2-56. Visual de deformaciones radar SSR528 - FX.	51
Figura 2-57. Ejemplo deformación zona del Portal de Desviación.....	52
Figura 2-58. Reportes emitidos con el radar SSR528 – FX.	53
Figura 2-59. Radar SSR410 - SARX.....	53
Figura 2-60. Ubicación radar SSR410 – SARX.....	54
Figura 2-61. Zona de monitoreo – visual del radar.	54
Figura 2-62. Visual de deformaciones radar SSR410 - SARX.	55
Figura 2-63. Ejemplo tendencias registradas por el radar SSR410 - SARX.	56
Figura 2-64. Reporte diario emitido con el radar SSR410 – SARX.	56
Figura 2-65. Radar GML	57
Figura 2-66. Imagen de escaneo del GML Casa de Máquinas Norte abscisa 0+078.....	58
Figura 2-67. Imagen de escaneo del GML Casa de Máquinas Sur abscisa 0+213. .	58
Figura 2-68. Imagen de escaneo del GML Caverna de transformadores 0+144.....	59



Figura 2-69. Visuales de deformación, radar GML.....	60
Figura 2-70. Deformación y tendencia identificadas, GML.....	60
Figura 2-71. Reporte diario emitido con el radar GML.....	61
Figura 2-72. A. Sismómetro. B. Sensor instalado y en funcionamiento.....	63
Figura 2-73. Instalación de estación sismológica, a. Gabinete con controlador solar, digitalizador y baterías de arriba a abajo, b. Panel solar, antena, gabinete y caneca contenedora con variación de recubrimiento de concreto alrededor de la caneca, y c. Detalle del sensor ubicado dentro de la caneca contenedora.....	64
Figura 2-74. Red sismológica Proyecto Hidroeléctrico Ituango.....	64
Figura 2-75. Visualización de la red sismológica del Proyecto Hidroeléctrico Ituango en el programa Swarm.....	65
Figura 2-76. Señal asociada al paso de agua por el complejo de cavernas. (Cierre de compuerta de Captación N°2).....	66
Figura 2-77. Señal asociada al paso del agua por el Vertedero.....	67
Figura 2-78. Señales asociadas a operación de maquinaria.....	67
Figura 2-79. Señal asociada a desprendimiento de material superficial en el antiguo deslizamiento del Portal de los túneles de Desviación.....	68
Figura 2-80. Señal asociada a tormenta eléctrica con presencia de truenos sobre el proyecto.....	68
Figura 2-81. Señal originada por el movimiento de placas tectónicas en territorio colombiano (Los Santos, Santander).....	68
Figura 2-82. Gráfica histórica de amplitud Vs. Caudal de Descarga Hidroituango ...	69
Figura 2-83. Gráfica histórica de RSAM Vs. Frecuencia de la señal de fondo asociada al paso de agua por Casa de Máquinas.....	69
Figura 2-84. Reporte diario del monitoreo sismológico de la señal asociada al paso del agua por el Vertedero.....	70
Figura 2-85. Nivel de alerta en el monitoreo sismológico, definido a partir del rango frecuencial.....	71
Figura 2-86. Protocolo de actuación – Monitoreo Sismológico.....	72
Figura 2-87. Imágenes de referencia de los instrumentos GNSS utilizados para el monitoreo. (A) Receptor GNSS Trimble NETR9 (B) Antena Trimble. (C)	



Receptor GNSS NavStar FLP100 (D) GNSS móvil armado sobre el trípode para la captura de datos.....	74
Figura 2-88. Localización de red GNSS Trimble.....	75
Figura 2-89. Localización de red GNSS Navstar.	76
Figura 2-91 Localización de puntos monitoreados por los GNSS móviles. Fuente: EPM, 2021	77
Figura 2-91. Series temporales de posición generadas para la estación HI03 de la Red Trimble en las tres componentes del GNSS (Norte, Este y Vertical).	79
Figura 2-92. Serie temporal de posición para la resultante de las componentes horizontales del GNSS P2 (Red NavStar).....	80
Figura 2-93 Plantilla reporte mensual GNSS CORS.	81
Figura 2-94. Plantilla reporte quincenal GNSS NavStar.	82
Figura 2-95 Reporte Mensual de la red GNSS Móvil.	83
Figura 2-96. Contornos de desplazamiento registrados en los diferentes frentes a partir de la técnica InSAR. RR – Línea de visión derecha (en azul) y RL – Línea de visión izquierda (en rosado).	84
Figura 2-97. Mapa de calor de las tasas de desplazamiento. En rojo las zonas que presentan mayores desplazamientos superficiales.....	85
Figura 2-98. Imagen de referencia del satélite ALOS - 2.....	86
Figura 2-99. Las huellas de ALOS-2 (blanco) y el área analizada (amarillo) se muestran sobre las imágenes ópticas de Google Earth.....	87
Figura 2-100 La tasa de desplazamiento absoluto sobre la presa de Ituango, a una escala de ± 50 cm por año visto en Google Earth.....	87
Figura 2-101 Plantilla del reporte quincenal InSAR.....	88
Figura 2-102 Plantilla de reporte completo InSAR.....	89
Figura 2-103. Tablero de instrumentación geotécnica superficial.	91
Figura 2-104. Tablero de instrumentación geotécnica subterránea.....	91
Figura 2-105. Instrumentación geotécnica PHI. A.	92
Figura 2-106. Protocolo general de actuación ante registro de eventos relevantes.	93
Figura 2-107. Localización de SAT, puntos de encuentro y rutas de evacuación en caso de emergencia.	94



LISTA DE ANEXOS

I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16



1 INTRODUCCIÓN

2 CONOCIMIENTO DEL RIESGO

2.3 MONITOREO DEL RIESGO

2.3.1 Protocolos o procedimientos de Monitoreo

La Gestión Integral de Riesgos se apoya en algunos mecanismos para realizar el monitoreo y revisión de los riesgos, a continuación, se mencionan algunos de ellos:

Por medio de los indicadores de cada nivel de gestión los responsables de los riesgos pueden obtener información sobre los mismos, sobre si funcionan las medidas de tratamiento y si los riesgos están controlados, lo cual facilita la revisión y su contribución a la gestión. El suministro de los datos para calcular los indicadores está a cargo de los responsables de los riesgos, quienes deben detectar las señales de alerta y definir los correctivos necesarios, y si es pertinente, analizar la inclusión de nuevas acciones en un plan de mejoramiento.

El objetivo de este mecanismo es efectuar un análisis independiente que aporte un mayor nivel de objetividad. Los resultados de la evaluación independiente pueden dar señales acerca de la efectividad de los controles existentes, la correcta aplicación de los controles o la necesidad de establecer nuevas acciones de mejoramiento que deben emprender los líderes de los diferentes niveles de gestión para mejorar el desempeño.

Las revisiones son un mecanismo de monitoreo que se aplica en los diferentes niveles de gestión de la GIR en intervalos planificados. El responsable del nivel de gestión deberá realizar la reunión de revisión de los riesgos, convocando a los responsables involucrados en la gestión de los riesgos y en la implementación de las acciones de tratamiento, para actualizar los análisis de riesgos, revisar la implementación efectiva de las acciones de mejoramiento propuestas, identificar nuevos riesgos y definir estrategias y planes de acción para la mejora continua.

La información relacionada con protocolos o procedimientos de monitoreo se presentan en el archivo “Formato Planes de Acción Ituango” incluido en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16.



2.3.2 Protocolos o procedimientos de notificación previos a emergencia.

El protocolo o procedimiento para la notificación previa a una emergencia, contiene instrucciones específicas para la comunicación en términos de contactos, cadena de notificación, SAT y las demás que faciliten la atención de la emergencia.

2.3.2.1 Proceso y difusión de alertas compresibles a las autoridades y población

El proceso de difusión de alertas de emergencias tanto para la población como para las autoridades competentes se esquematiza en la Figura 2-1, adicionalmente, se incluye el archivo “CAD LLAMADAS PHI V-7 Noviembre 22_2021” incluido en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16.

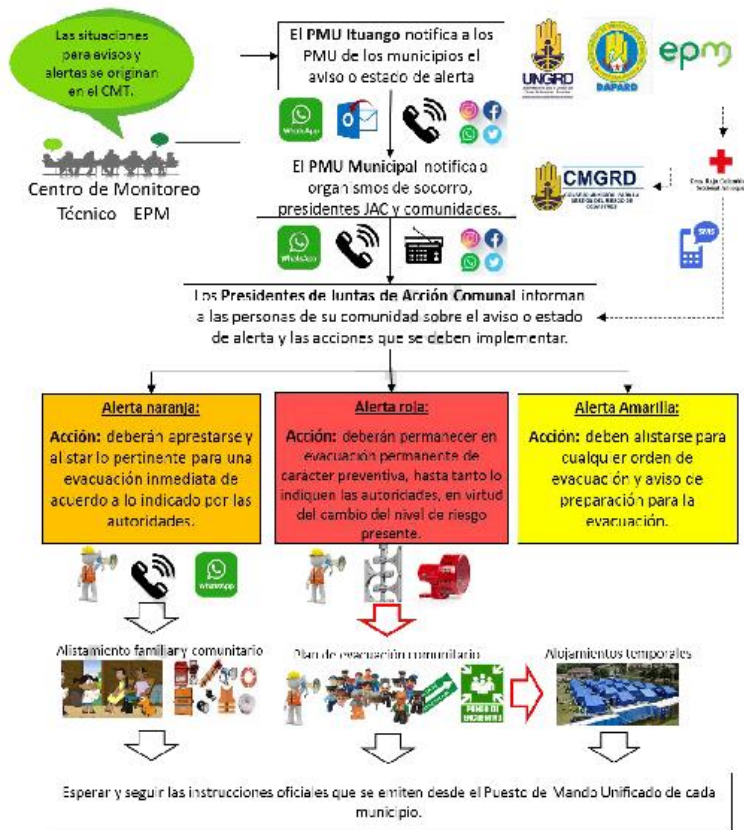


Figura 2-1 Protocolo de notificación.

Fuente: EPM.

2.3.2.2 Adopción de medidas apropiadas y oportunas en respuesta a tales alertas.

Las medidas adoptadas en este plan buscan atender de manera oportuna las alertas y emergencias que se plantan, enfocando la atención en un orden prioridades, así:

1. Salvar las vidas de las comunidades aguas abajo de la presa.
2. Salvaguardar los medios de vida de las comunidades aguas abajo de la presa.
3. Salvaguardar la infraestructura vital y de las comunidades aguas abajo de la presa.
4. Salvaguardar los bienes de las comunidades aguas abajo de la presa.
5. Protección del medio ambiente.



Adicionalmente se consideran algunas actividades críticas para la atención de la emergencia:

- Los daños y las afectaciones que interrumpan la prestación de los servicios básicos de respuesta; Evacuación, Coordinación, Búsqueda y rescate, Salud y saneamiento básico, Servicios públicos, EDAN, Logística, Información pública, Seguridad y convivencia, Administración y finanzas, Ayuda humanitaria, Medios de vida, Ayuda no alimentaria, Alojamientos temporales, Agua y saneamiento, Accesibilidad y transporte, Telecomunicaciones.
- Identificación de las necesidades de recursos humanos y materiales para la evaluación y el análisis de la emergencia.
- Las prioridades de respuesta según la información consolidada.
- La activación de las medidas necesarias para el plan de continuidad de negocio.
- La ejecución de recursos de acuerdo con las prioridades.

2.3.3 Parámetros e indicadores objeto de monitoreo

El monitoreo del riesgo se hace mediante un tablero de seguimiento en el que se registra el resultado de la evaluación de riesgo para un evento o escenario de riesgo determinado en la Figura 2-2 se presenta un ejemplo de los reportes que se generan y analizan.

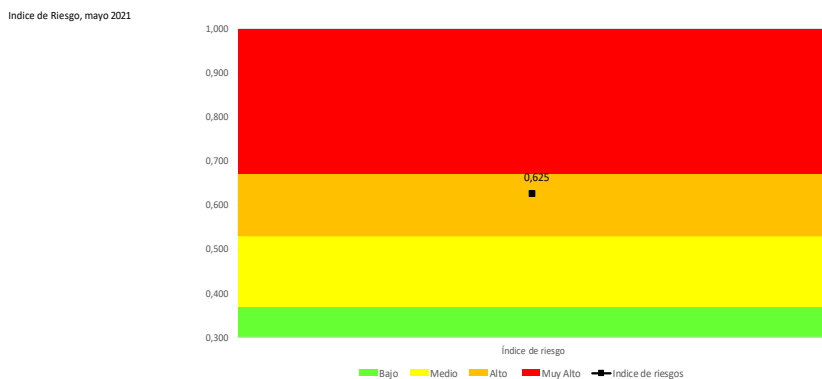


Figura 2-2 Reporte de los parámetros e indicadores de monitoreo.

Fuente: EPM

2.3.4 Diseño e instalación de la instrumentación.

Durante la etapa de construcción de la Presa y Central Subterránea, se instalaron diferentes elementos de medida que han permitido evaluar constantemente el comportamiento de la



fundación, el cuerpo que compone la Presa y paredes de excavación del complejo de cavernas y las Obras asociadas.

Durante la etapa de construcción de la Presa y Central Subterránea, se instalaron diferentes elementos de medida que han permitido evaluar constantemente el comportamiento de la fundación, el cuerpo que compone la Presa y paredes de excavación del complejo de cavernas y las Obras asociadas.

La instrumentación geotécnica está instalada en diferentes zonas de la Presa que comprenden niveles de la cimentación, contacto entre cimentación y lleno, zona intermedia del lleno y zona superior del lleno.

El Centro de Monitoreo Técnico (C.M.T.) (Figura 2-3), es el centro de operación y análisis primario de cerca de 3000 variables que se monitorean constantemente en el Proyecto Hidroeléctrico Ituango. La estructura organizacional está conformada por cinco estaciones con énfasis diferentes y correlacionables entre sí (Circuito Cerrado de Televisión, Hidrometría, Interferometría, Sismología y Geodesia), que, junto con la instrumentación geotécnica, permite evaluar la estabilidad del Proyecto y brindar una interpretación más asertiva al momento de realizar un análisis.

El monitoreo se realiza las 24 horas al día, los siete días de la semana, garantizando el seguimiento continuo y en tiempo real de las variables, para así emitir alertas y/o activar protocolos, en caso de presentarse novedades.

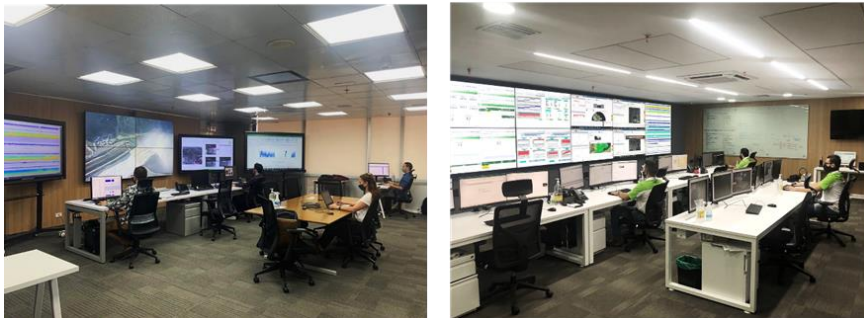


Figura 2-3. CMT Medellín – CMT Ituango.

Fuente: EPM

A continuación, se describe para cada una de las estaciones los instrumentos instalados, su localización, las variables que se monitorean, los reportes que se emiten y los protocolos de alerta que se tienen actualmente establecidos. Es importante mencionar que el Centro de Monitoreo Técnico se encuentra en constante actualización, por lo cual la información

consignada en este documento es a corte de octubre de 2020 y puede presentar ajustes por implementación de nuevos instrumentos o por ajustes indicados por la Asesoría del Proyecto.

2.3.4.1 Circuito Cerrado de Televisión (CCTV)

Es una estación de monitoreo en tiempo real con 46 cámaras que permiten realizar un seguimiento continuo a los principales frentes de obra. Este recurso facilita la interpretación de eventos que se presentan en el proyecto, a partir de la correlación con la información obtenida en las demás estaciones del CMT (Interferometría, Hidrometría, Sismología y Geodesia).

2.3.4.1.1 Localización

Las cámaras están ubicadas en puntos estratégicos y de interés para el proyecto, teniendo un total de siete cámaras instaladas en superficie, entre las cuales están: Plazoleta de captación, Subestación 500 Kv, Mirador Presidencial, Descargas y Acceso a Casa de Máquinas, Vertedero - Puente Vehicular, Galería Auxiliar Descarga 4 – GAD, Puente el Beso 2 – Puente metálico; y un total de 14 cámaras instaladas en las obras subterráneas, entre las cuales se destacan: Casa de Máquinas Norte y Sur, Almenara Norte, Caverna de Transformadores inferior y superior, Descarga Intermedia, Galería D, que permiten monitorear los avances de las obras y los cambios que se puedan presentar (Figura 2-4 a Figura 2-7) (ver archivo *Tabla_resumen_localización_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16).



Figura 2-4. Localización de las principales cámaras en las obras superficiales.

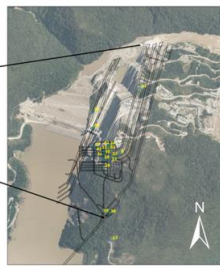
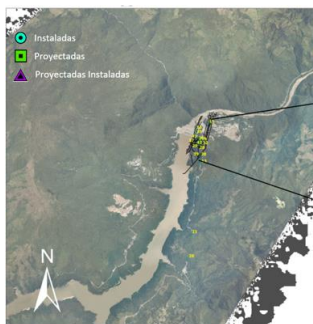
Fuente: EPM



ID	NOMBRE
6	La Urriaga
8	Portería Tacuí
17	Puente San Andrés
19	Portería Cuní
16	Helipuerto

Figura 2-5. Localización cámaras superficiales campamento y zonas aledañas.

Fuente: EPM



ID	NOMBRE
39	GAD 2
29	Galería Transformadores Inferior
34	Casa de Maquinas Norte
33	Casa Maquinas Zona Sur
35	Descarga Intermedia
38	GAD 1
30	Caverna Transformadores Superior
37	Galería D
36	Túnel de Desvío Izquierdo-TDI
32	Almenara Norte
31	Celda de Transformadores
28	Cav. Transformadores zona Sur
42	Culata Norte Transformadores Inferior
41	Culata Norte transformadores superior

Figura 2-6. Localización cámaras Subterráneas.

Fuente: EPM

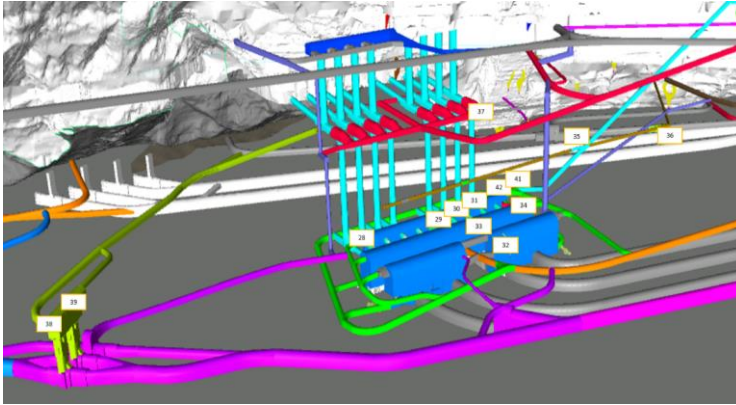


Figura 2-7. 3D general subterráneo del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI), visualizado en Navisworks, mostrando la ubicación relativa de las cámaras más relevantes para el monitoreo en cavernas y túneles.

Fuente: EPM

2.3.4.1.2 Instrumentos

Las cámaras son de tipo IP, marca AXIS y Hikvision (Figura 2-8), con rotación de 360°, permitiendo un control total de la zona monitoreada, con un *zoom* de alta resolución que permite ver con mejor detalle el área de seguimiento. Adicionalmente, es posible realizar grabación de videos por tiempo limitado mediante el software Securos. El procedimiento para la instalación de la instrumentación mencionada anteriormente puede ser consultada en el archivo *Procedimiento_instalación_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16.



Figura 2-8. Cámaras tipo AXIS, instaladas en el proyecto.

Fuente: EPM

En las zonas donde se puedan presentar desprendimientos de material, grietas o cualquier evento importante, se realizan seguimientos y análisis multitemporales de imágenes con el objetivo de identificar los principales cambios. Adicionalmente, se hace un seguimiento a las actividades en la Presa, Vertedero, tratamientos de la parte alta de Plazoleta de compuertas,

14

Descargas, Casa de Máquinas, Descarga Intermedia, Almenaras, Transformadores, Galería Auxiliar de Desviación, entre otros, con el fin de conocer el avance y el estado de todas las obras que se ejecutan.

En la Figura 2-9 se presentan ejemplos de las imágenes captadas por las cámaras.



Figura 2-9. Cámaras Monitoreadas en el PHI, A. Parte Alta Plazoleta de Compuertas, B. Vertedero, C. Caverna de Casa de Máquinas – Zona Norte, D. Zona de Descargas.

Fuente: EPM

2.3.4.2 Hidrometría

La estación de Hidrometría monitorea el comportamiento de las variables hidrológicas e hidráulicas del Proyecto, focalizándose en los siguientes frentes: Niveles río Cauca, Nivel embalse, Túnel de Desviación Derecho (TDD) y Galería Auxiliar de Desviación (GAD). A su vez, se tienen registros de variables tales como: la precipitación, infiltraciones de la presa, nivel del río Ituango e infiltraciones en las obras subterráneas.

A continuación, se presenta para todos los frentes de monitoreo, la localización de la instrumentación, la descripción del monitoreo de las variables, un ejemplo del reporte de seguimiento que se genera desde la estación, descripción de los niveles de alerta y el protocolo para la activación de alarmas.

Por último, se hará una breve descripción de las demás variables que no generan alertas, de las cuales se lleva un seguimiento en la estación.



2.3.4.2.1 Niveles río Cauca y Nivel Embalse

Se realiza el monitoreo de los caudales aguas arriba del proyecto con las estaciones La Pintada y Olaya. En el sitio de proyecto, específicamente para la descarga, se cuenta con las estaciones redundantes Puente Metálico y Puente El Beso. Finalmente, aguas abajo del proyecto se tienen las estaciones Puerto Valdivia, Espíritu Santo, Apaví (Tarazá) y Margento (Caucasia). Cabe resaltar que las estaciones mencionadas anteriormente son provistas por Empresas Públicas de Medellín (EPM).

Por otro lado, se cuenta con la medición del nivel del embalse en el sitio de presa y en el río Ituango.

La información de caudales aguas arriba y aguas abajo del proyecto es complementada con los registros del sistema de monitoreo hidrológico del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), por medio de su plataforma en línea FEWS.

A. Instrumentación

Para la medición de niveles en el río Cauca, se cuenta con distintos radares, dentro de las cuales podemos encontrar las estaciones aguas arriba La Pintada y Olaya; y aguas abajo, las estaciones de Puerto Valdivia, Apaví y Margento.

Por otro lado, para los niveles registrados en la descarga del proyecto, se cuenta con radares Vaisala localizados en las estaciones Puente Metálico y Puente El Beso.

Por último, para la medición del nivel del embalse se cuenta con otro radar Vaisala.

A continuación, se dará una breve descripción de la instrumentación mencionada anteriormente:

- **Radar VegaPuls 62:** el sistema de antena emite pulsos de microondas hacia el elemento por medir, que son reflejados por la superficie y son recibidos de nuevo por el sistema de antena. El tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de las señales depende del nivel en el interior del contenedor. Un procedimiento especial de prolongación del tiempo permite la medición exacta y segura de los tiempos, así como la conversión de estos en la medida del nivel. Los sensores de radar operan con una potencia de emisión reducida en el rango de frecuencia de banda C y K (Figura 2-10). Este radar es utilizado en la estación La Pintada, aguas arriba del proyecto.



Figura 2-10. Instrumento medidor de nivel – Radar VegaPuls 62.

Fuente: EPM

- *Campbell Scientific CS475A y CS475*: estos sensores monitorean el nivel de agua en ríos, lagos, mar y embalses. Son ideales para instalar en áreas con altos niveles de corrosión y contaminación (Figura 2-11). Emiten pulsos de microondas cortos y luego miden el tiempo transcurrido entre la emisión y el retorno de los pulsos. La medición del tiempo transcurrido se utiliza para calcular la distancia entre el sensor y el objetivo. El valor de la distancia se puede utilizar para determinar la profundidad del medio.

Estos radares se tienen instalados en las estaciones de Olaya, Puente El Beso y río Ituango.



Figura 2-11. Instrumento medidor de nivel – Radar Campbell Scientific CS475A

Fuente: EPM

- *Radar Vaisala QHR104*: el radar QHR104 es un sensor de nivel de agua por radar utilizado para la medición continua de nivel. El sensor utiliza el principio de pulso por medio del radar para determinar el nivel del agua sin hacer contacto directo con el

fluido. Es insensible al barro, material a la deriva, malezas y sustancias agresivas como aguas residuales y agua salada (Figura 2-12).

La precisión de la medida no se ve afectada por la humedad del aire (incluida niebla), precipitación o las fluctuaciones de temperatura dentro del rango de medición.

El principio de medición se basa en los pulsos por medio de radar, donde un transmisor envía un pulso corto de microondas, seguido del periodo cuando el receptor capta las señales reflejadas por el agua. El tiempo de viaje del pulso corresponde a la distancia recorrida desde y hacia la superficie del agua.

Este radar es utilizado en la estación localizada en Puente Metálico, medida Backup de la descarga del proyecto, en la estación Pto Valdivia y en la estación Apaví.



Figura 2-12. Instrumento medidor de nivel – Radar Vaisala QHR104.

Fuente: EPM

Los procedimientos de instalación de la instrumentación mencionada anteriormente, puede ser consultada en el archivo *Procedimiento_instalación_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16.

B. Localización

Para el monitoreo de crecientes, se cuenta con dos estaciones medidoras de nivel localizadas aguas arriba del proyecto (La Pintada y Olaya) y tres aguas abajo del proyecto (Puerto Valdivia, Apaví y Margento). Cabe resaltar que las estaciones anteriormente mencionadas, son operadas por las Empresas Públicas de Medellín, EPM. (ver archivo *Tabla_resumen_localización_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16).

A continuación, se presenta la localización y un resumen de distancias de las estaciones aguas arriba y aguas abajo del proyecto operadas por EPM (Figura 2-13 y Figura 2-14).

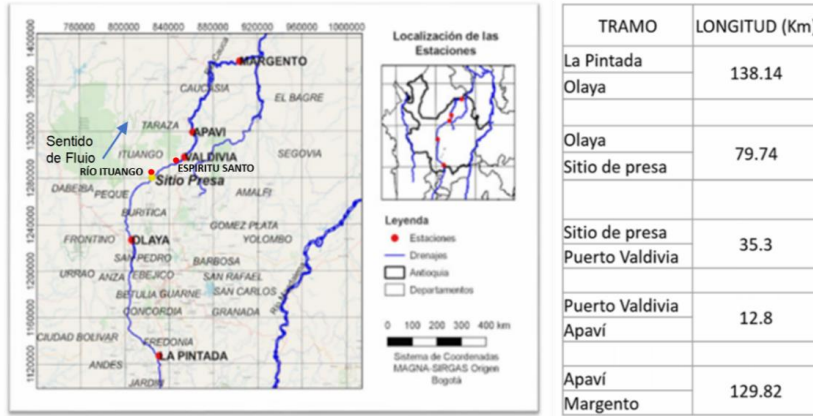


Figura 2-13. Localización Estaciones de medición de nivel río Cauca.

Fuente: EPM



Figura 2-14. Localización Estaciones Puente Metálico y Puente El Beso.

Fuente: EPM

Por otro lado, diariamente (dos veces al día) se reportan los caudales propios de cada estación, teniendo en cuenta los municipios en donde se encuentran localizadas. Entre paréntesis, se presenta el nombre del municipio, mientras que las estaciones La Pinta, Olaya y Puerto Valdivia, llevan el nombre de su respectivo municipio de localización (Figura 2-15).



Figura 2-15. Reporte diario de caudales a lo largo del río Cauca

Fuente: EPM

Además, se cuenta con el apoyo del sistema de monitoreo hidroclimatólogico suministrado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), por medio de su plataforma en línea FEWS (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

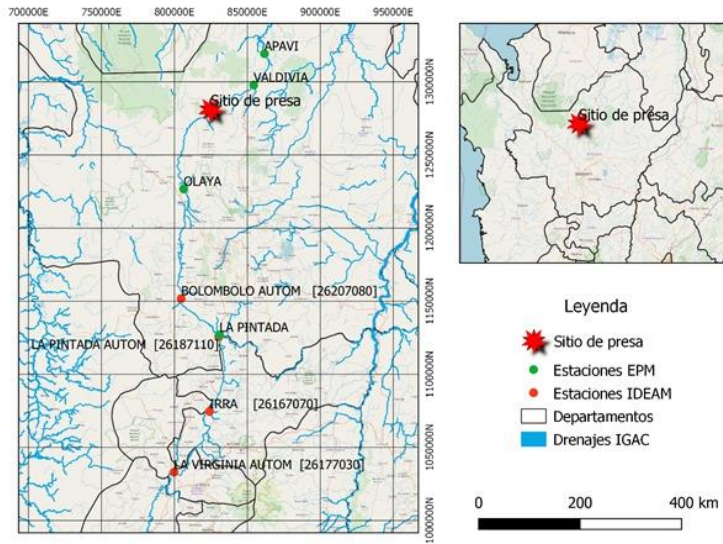


Figura 2-16. Estaciones aguas arriba FEWS IDEAM.

Fuente: IDEAM

La localización del radar Vaisala, con el cual se realiza el seguimiento y monitoreo del nivel del embalse se presenta a continuación (Figura 2-17):



Figura 2-17. Radar Vaisala, nivel embalse Proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Fuente: EPM

C. Variables Monitoreadas

Como se mencionó en el anterior numeral, en el proyecto se tienen registros de niveles y caudales aguas arriba y aguas abajo de la presa, permitiendo conocer el caudal de arriba al sitio de Presa y de esta forma realizar las maniobras de compuertas en el vertedero necesarias para dejar transcurrir el agua sin llegar a embalsar, cumpliendo con la regla de operación actual, que establece que los caudales de llegada deben ser los mismos de salida. Además, con el conocimiento de los caudales aguas arriba y el nivel del embalse, se pueden definir los cambios de canal (del canal izquierdo al derecho y viceversa) garantizando el salto de ski suficiente para proteger las bermas del Vertedero.

Es por esto, que es de vital importancia conocer el comportamiento y la dinámica de los caudales en el río Cauca y el nivel del embalse, para tener un margen de tiempo prudente que permita realizar la activación de alertas por creciente en caso de ser necesario, por lo cual siempre se busca identificar las crecientes del río lo más aguas arriba posible. Para ello, se cuenta con la estación La Pintada donde se estima un tiempo de arribo de creciente al proyecto de 10 a 12 horas. Siguiendo la trayectoria del río, aguas abajo encontramos la estación Olaya que nos proporciona un tiempo estimado de llegada del agua de 3 a 5 horas.

Las variables de caudal anteriormente mencionadas tienen una periodicidad de 15 minutos en tiempo de recarga.

A su vez, se cuenta con el apoyo de la herramienta en línea FEWS desarrollada por el IDEAM, proporcionando información de nivel y caudal para estaciones localizadas aguas arriba de las

mencionadas anteriormente, permitiéndonos conocer en tendencia el comportamiento de los niveles y caudales del río Cauca.

Finalmente, aguas abajo se cuenta con las estaciones en Puente Metálico y Puente El Beso, las cuales nos muestran el nivel del río por medio de dos radares Vaisala y el caudal de descarga del proyecto. Luego encontramos las estaciones Puerto Valdivia, Apaví y Margento operadas por EPM. Estas estaciones tienen una periodicidad de 2 minutos en tiempo de recarga de información proyecto. Luego encontramos las estaciones Puerto Valdivia, Apaví y Margento operadas por EPM.

Estas estaciones tienen una periodicidad de 2 minutos en tiempo de recarga de información.

En cuanto al nivel del embalse, se tiene una periodicidad de 5 minutos en tiempo de recarga de información.

Cabe resaltar que los registros de estas variables son recibidos por un datalogger y posteriormente es enviada al servidor de epm, de donde es obtenida para la realización del monitoreo y análisis de cada variable.

En las siguientes figuras se muestran las gráficas del nivel del embalse y los caudales a lo largo del río Cauca en la zona de influencia del Proyecto, los cuales se monitorean en tiempo real desde el CMT (Figura 2-18).

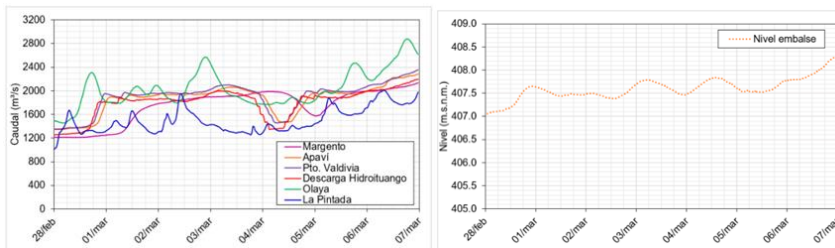


Figura 2-18. Gráfica registros caudales y nivel embalse Proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Fuente: EPM

Para observar de una forma más detallada el comportamiento del caudal en el Vertedero, el cual, depende directamente de los caudales aguas arriba y del nivel del embalse, a continuación, se presenta una imagen en donde se evidencian las maniobras de compuerta tanto de apertura como de cierre según sea el caso (Figura 2-19). Actualmente se encuentra en funcionamiento el Canal Derecho del Vertedero (compuertas 2, 3 y 4), cuyas variaciones (aumentos y disminuciones de caudal descargado) son verificadas y generadas por el personal que opera las compuertas mediante la información enviada por el equipo de Hidrometría del CMT, durante las 24 horas del día.

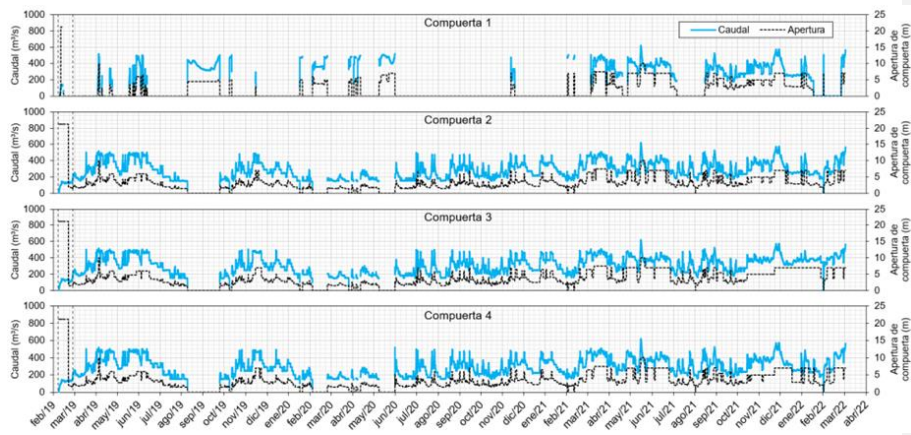


Figura 2-19. Seguimiento a los caudales de vertimiento Proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Fuente: EPM

Para el seguimiento en tiempo real de las variables de caudal y nivel del embalse se cuenta con una plataforma donde se facilita el análisis y la interpretación de los datos obtenidos, teniendo la facultad de comparar datos históricos con datos tomados en tiempo real, reconociendo posibles tendencias que puedan afectar la estabilidad de los distintos frentes monitoreados por la estación de hidrometría. La aplicación es conocida como Qlik Sense®, la cual permite tener el recaudo de los datos en una nube de almacenamiento, permitiendo generar diferentes gráficas y reportes.

A continuación, se presentan ejemplos de visualización de variables en la plataforma Qlik Sense® para caudales y nivel del embalse (Figura 2-20, Figura 2-21 y Figura 2-22).

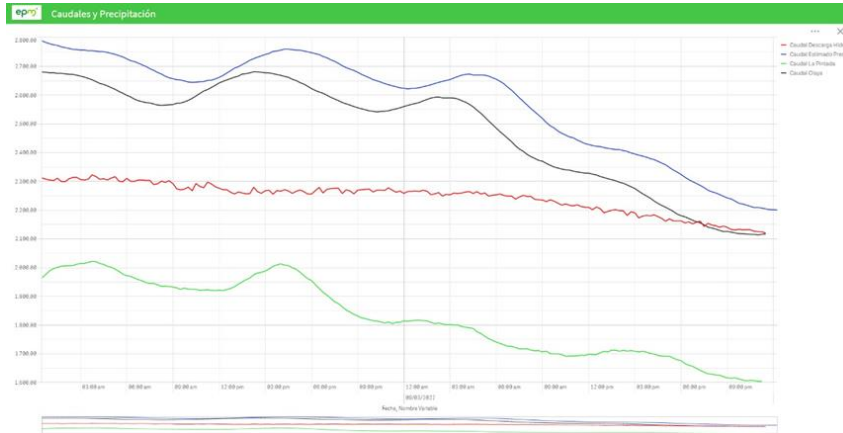


Figura 2-20 Visualización en Qlik Sense Caudales PHI

Fuente: EPM

↓ Variación Nivel Embalse últimas 24 horas (mts)

0,41

Nivel de Embalse (msnm) **408,12** 



Figura 2-21. Visualización en Qlik Sense Nivel Embalse PHI

Fuente: EPM



Figura 2-22. Resumen de Caudales y Nivel Embalse en Qlik Sense PHI

Fuente: EPM

Con la aplicación Qlik Sense, también se realiza seguimiento a la diferencia entre el caudal de descarga del proyecto (el cual tiene en cuenta el aporte del río Ituango, las infiltraciones descargadas por el TDD y la GAD y el caudal de bombeo de Casa de Máquinas), con el caudal de vertimiento, permitiendo conocer un posible aumento en este delta que puede permitirnos inferir un mayor aporte de las infiltraciones en la GAD y/o TDD y por ende, un posible destaponamiento en los túneles mencionados. A continuación, se presenta el gráfico visualizado en Qlik Sense (Figura 2-23).

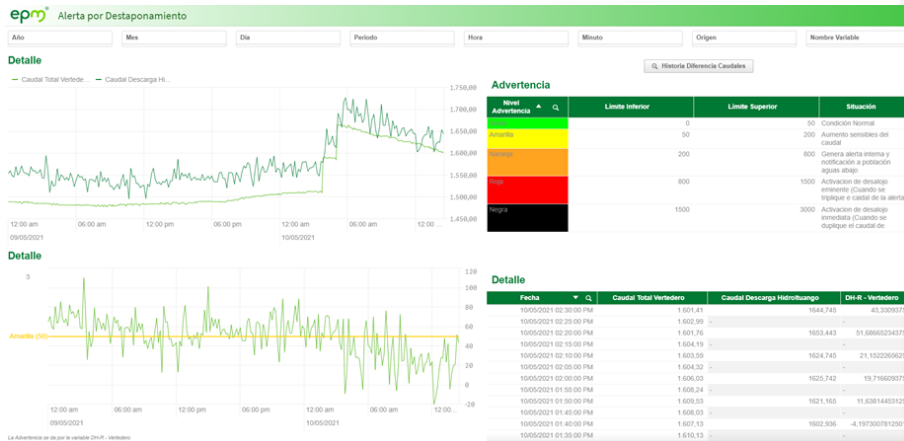


Figura 2-23. Visualización en Qlik Sense alerta por posible destaponamiento del TDD y/o GAD

Fuente: EPM

D. Reporte generado

- *Reporte de creciente*

Desde la estación de Hidrometría se emite un reporte de seguimiento (Figura 2-24) ante una posible inundación en puerto Valdivia por crecientes naturales en el río Cauca reportadas aguas arriba del proyecto, la periodicidad de envío está en función del límite de la alerta verde del caudal en el vertimiento (3140 m³/s), para caudales inferiores a 2500 m³/s se envía el reporte de forma semanal, cuando se supere este límite se enviará de forma diaria en la jornada de la tarde (ver archivo *Listado_reportes_informes_y_presentaciones_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16).

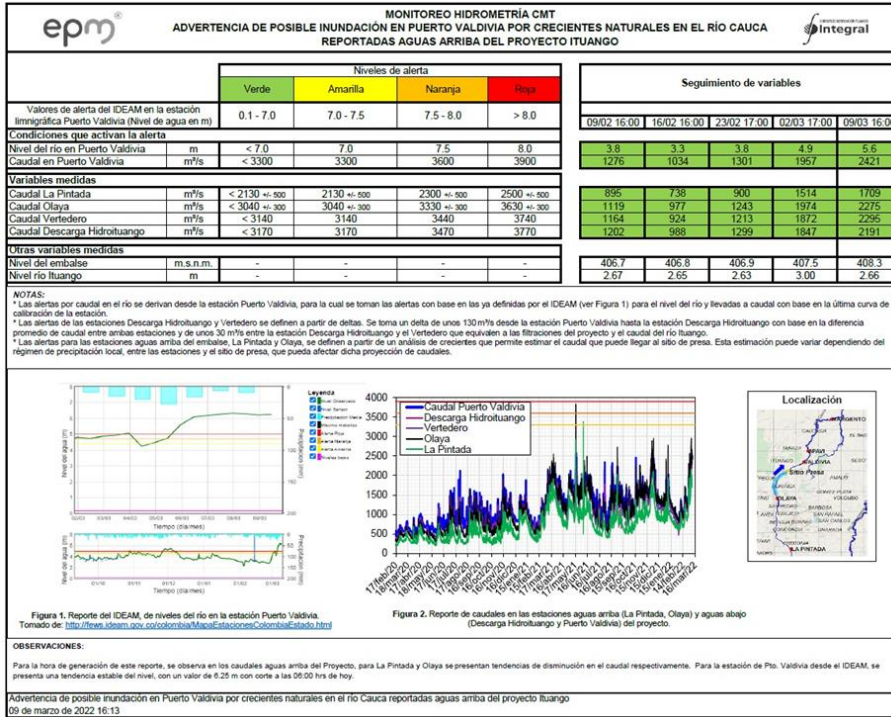


Figura 2-24. Reporte de seguimiento de crecientes naturales en el río Cauca reportadas aguas arriba del Proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Fuente: EPM

A continuación, se describen los niveles de alerta que se tienen incluidos en el reporte

E. Protocolos de Alerta

Al realizar seguimiento del caudal del río Cauca, uno de los afluentes más grandes y extensos de Colombia, se pueden presentar repentinas variaciones o crecientes en el caudal de arribo al Proyecto, causadas por precipitaciones altas en cualquiera de los municipios y poblaciones aguas arriba del proyecto, por esta razón se genera un reporte de alerta de crecientes que, además de ser utilizado como sistema informativo para el manejo de las compuertas del Vertedero, avisan a las comunidades pesqueras y mineras aguas abajo sobre aumentos en el caudal del río Cauca.



Las alertas por caudal en el río se derivan desde la estación Puerto Valdivia, para la cual se toman como base los niveles de alerta ya definidas por el IDEAM y se convierten a unidades de caudal teniendo en cuenta la última curva de calibración de la estación.

Las alertas de las estaciones Descarga Hidroituango y Vertedero se definen a partir de deltas; se toma un delta de 130 m³/s desde la estación Puerto Valdivia hasta la estación Descarga Hidroituango con base en la diferencia promedio de caudal entre ambas estaciones. De igual manera se toma un delta de 30 m³/s entre la estación Descarga Hidroituango y el Vertedero, que equivale a las filtraciones del Proyecto y el caudal del río Ituango.

El límite de la alerta verde del caudal descargado por el Vertedero es de 3140 m³/s; sin embargo, se debe tener en cuenta que las alertas para las estaciones aguas arriba del embalse, La Pintada y Olaya, se definen a partir de un análisis de crecientes que permite estimar el caudal que puede llegar al sitio de presa. Esta estimación puede variar dependiendo del régimen de precipitación local, entre las estaciones y el sitio de presa, que pueda afectar dicha proyección de caudales. A continuación, se presentan los diferentes niveles de alerta definidos por la Asesoría (Figura 2-25) y a su vez, el protocolo de activación de alarmas por crecientes (Figura 2-26).

		Niveles de alerta			
		Verde	Amarilla	Naranja	Roja
Valores de alerta del IDEAM en la estación limnigráfica Puerto Valdivia (Nivel de agua en m)		0.1 - 7.0	7.0 - 7.5	7.5 - 8.0	> 8.0
Condiciones que activan la alerta					
Nivel del río en Puerto Valdivia	m	< 7.0	7.0	7.5	8.0
Caudal en Puerto Valdivia	m ³ /s	< 3300	3300	3600	3900
Variables medidas					
Caudal La Pintada	m ³ /s	< 2130 +/- 500	2130 +/- 500	2300 +/- 500	2500 +/- 500
Caudal Olaya	m ³ /s	< 3040 +/- 300	3040 +/- 300	3330 +/- 300	3630 +/- 300
Caudal Vertedero	m ³ /s	< 3140	3140	3440	3740
Caudal Descarga Hidroituango	m ³ /s	< 3170	3170	3470	3770
Otras variables medidas					
Nivel del embalse	m. s. n. m.	-	-	-	-
Nivel río Ituango	m	-	-	-	-

Figura 2-25. Seguimiento a los caudales de vertimiento Proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Fuente: Consorcio Generación Ituango

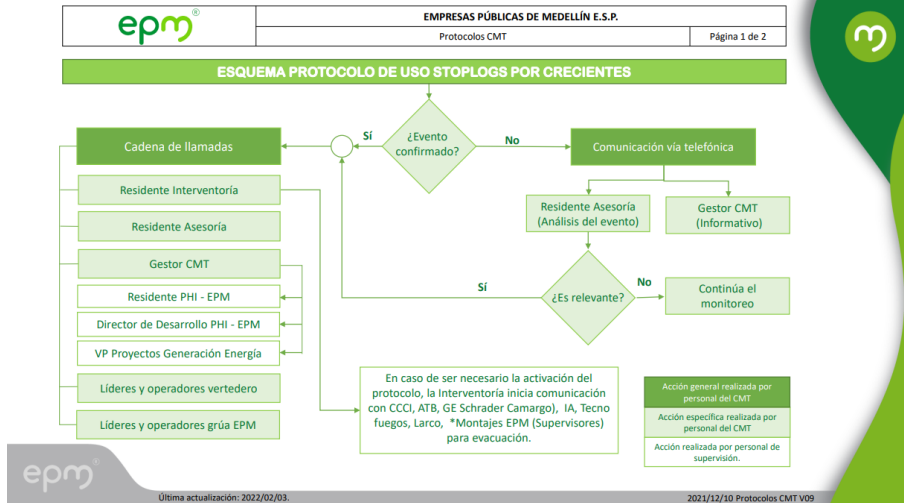


Figura 2-26. Protocolo para activación de alarmas por crecientes.

Fuente: EPM

2.3.4.2.2 Monitoreo ante un posible destaponamiento de túneles

Teniendo en cuenta que la Galería Auxiliar de Desviación (GAD) se encuentra obstruida por un tapón natural desde el 30 de abril del 2018, actualmente se realiza un seguimiento continuo a las condiciones del flujo dentro de la galería, con el fin de poder generar alertas tempranas ante un eventual destaponamiento. En esta galería actualmente se tiene una probabilidad de destaponamiento menor, debido al cierre en las compuertas de los ramales izquierdo (29/05/2019) y derecho (18/12/2019), así como la puesta en funcionamiento del sistema del By-pass de la GAD directo a la Descarga Intermedia desde el 21/12/2021.

Por otro lado, y a raíz de las condiciones generadas por el taponamiento de la GAD, desde el 12 de mayo de 2018, el Túnel de Desviación Derecho (TDD) se encuentra igualmente obstruido con un tapón natural, por lo cual, actualmente está siendo monitoreado en tiempo real por medio del caudal que está pasando a través de este, 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 variación darían una señal de advertencia.

A continuación, se describen los tipos de instrumentos con los que se cuenta para el monitoreo de estos túneles. Posteriormente, se indicará para cada uno de los túneles, la localización de

dichos instrumentos y las variables que se monitorean. Finalmente, se presentarán los reportes generados y los protocolos de alertas con los que se cuenta ante un eventual destaponamiento de la GAD y del TDD:

A. Instrumentación

- *Piezómetro*: s un instrumento que se sumerge y mide la cabeza de agua que tenga por encima hasta la lámina de agua. El piezómetro se conecta al datalogger que toma el valor de la corriente enviada y traduce esta señal en presión. En el caso de la GAD se cuenta con dos piezómetros, uno aguas arriba de la compuerta derecha y otro en la compuerta izquierda, mientras que, en el TDD, se cuenta con piezómetros en las abscisas del TDD K0+687, K0+858, K0+915 y K1+085 (Figura 2-27).



Figura 2-27. Instrumento medidor de presión – Piezómetro.

Fuente: EPM

- *Correntómetro o Molinete*: Consiste en un molinete cuyas aspas son impulsadas por la corriente de agua. Se basa en un principio de proporcionalidad entre la velocidad del agua y la velocidad angular resultante del rotor. Para medir la velocidad se cuenta el

31

número de revoluciones del rotor en un tiempo determinado. Actualmente el molinete se encuentra localizado en la abscisa del TDD K1+082 (Figura 2-28).



Figura 2-28. Correntómetro o molinete medidor de velocidad.

Fuente: EPM

- *Transmisor de presión:* Un transductor o transmisor de presión es un sensor que convierte la presión en una señal eléctrica. Esta señal eléctrica puede ser una tensión o corriente (una señal analógica proporcional a la presión), digital, e incluso una compuesta. Es decir, puede ser tanto analógica como digital (Figura 2-29).



Figura 2-29. Transmisor de presión

Fuente: EPM

- *Medidor de nivel:* El instrumento de medición envía una señal de microonda desde arriba hacia el producto, que refleja dicha señal. Mediante las señales de microonda recibidas por el instrumento de medición se calcula la distancia hasta la superficie del producto y el nivel (Figura 2-30).



Figura 2-30. Medidor de nivel tipo radar

Fuente: EPM

- *Medidor de caudal:* Los medidores de flujo ultrasónicos son medidores inferenciales que utilizan la tecnología ultrasónica para medir la velocidad de un líquido conductor acústico que se desplaza a través del medidor. Existen dos tipos de tecnologías de medidores de flujo ultrasónico: de desplazamiento de Doppler y de tiempo de tránsito. Estos medidores son soluciones ideales cuando no es posible hacer contacto con el fluido que se mide (Figura 2-31).



Figura 2-31. Medidor de caudal ultrasónico

Fuente: EPM

Los procedimientos de instalación de la instrumentación mencionada anteriormente, puede ser consultada en el Anexo 2.

B. Monitoreo Galería Auxiliar de Desviación GAD

La GAD cuenta con tres piezómetros y un radar Vaisala, con los cuales es posible conocer el comportamiento del flujo en la galería y generar las alertas correspondientes ante un eventual

destaponamiento. A continuación, se presenta la localización de estos instrumentos y las variables que se monitorean.

1) Localización

Dos de los piezómetros se encuentran localizadas aguas arriba de las compuertas derecha e izquierda, y el otro, se encuentra en la ventana de construcción, junto con el radar Vaisala.

A continuación, se presenta la localización de la instrumentación allí instalada (Figura 2-32 y Figura 2-33).

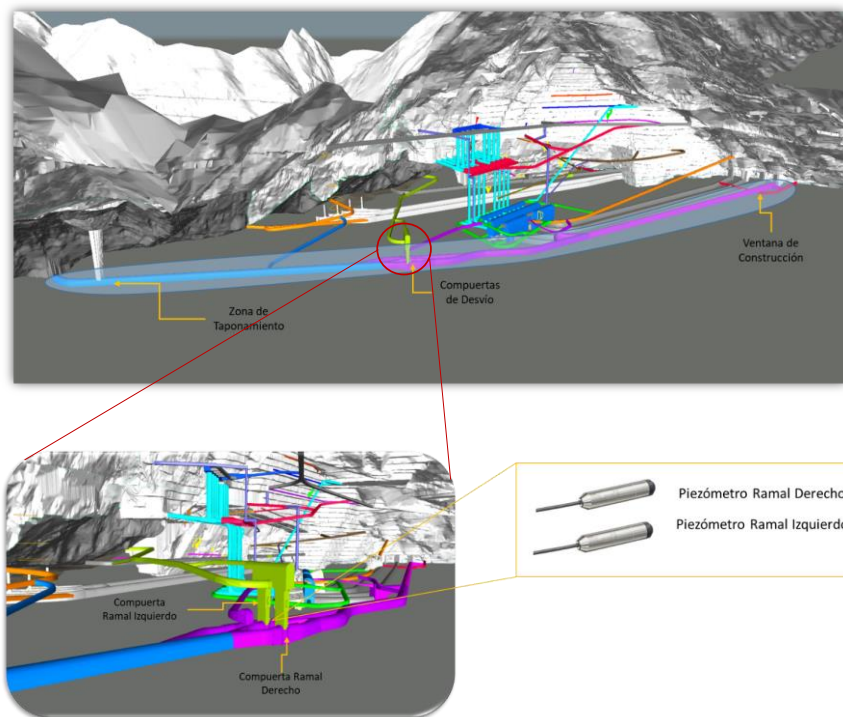


Figura 2-32 Localización piezómetros aguas arriba de las compuertas del ramal izquierdo y derecho en la GAD

Fuente: EPM.

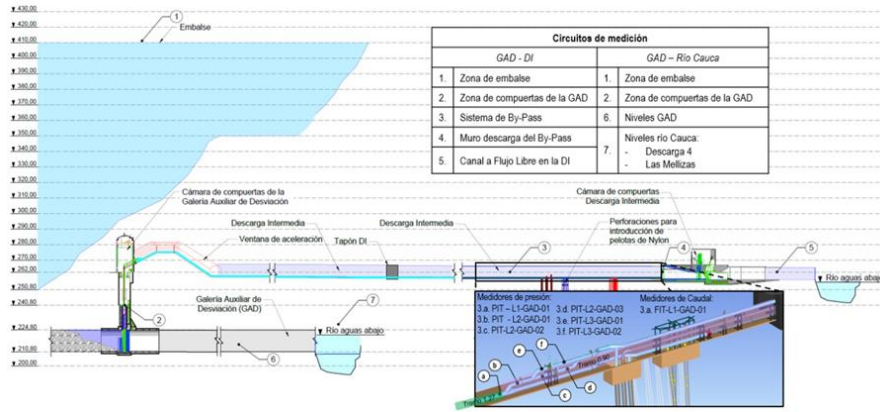


Figura 2-33. Localización de transmisores de presión, medidor de nivel y medidor de caudal.

Fuente: EPM

2) Variables Monitoreadas

En la Galería Auxiliar de Desviación, se cuenta con dos transductores de presión localizados en la zona de compuerta de la GAD, instalados uno en cada ramal, con el objetivo de realizar el monitoreo y seguimiento al comportamiento hidráulico de la Galería. Además, se cuenta con 13 indicadores de presión, un caudalímetro y un medidor de nivel tipo radar, instrumentos instalados para realizar el seguimiento continuo al By-pass de la GAD a la Descarga Intermedia.

Para el caso de la GAD, actualmente se tiene una probabilidad de destaponamiento menor, debido al cierre en las compuertas de los ramales izquierdo (29/05/2019) y derecho (18/12/2019), así como la puesta en funcionamiento del sistema del By-pass de la GAD directo a la Descarga Intermedia desde el 21/12/2021.

Los registros de las variables para el monitoreo de la GAD se reciben en tiempo real y se visualizan en la aplicación Qlik Sense, lo cual hace más efectivo el monitoreo y seguimiento de cualquier evento que se presente en la galería (Figura 2-34 a Figura 2-36).

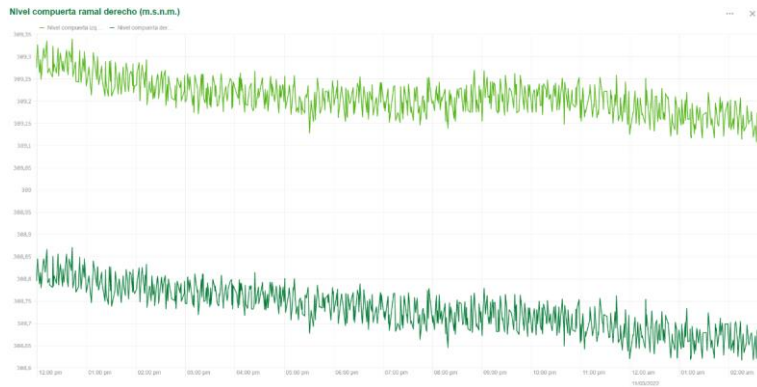
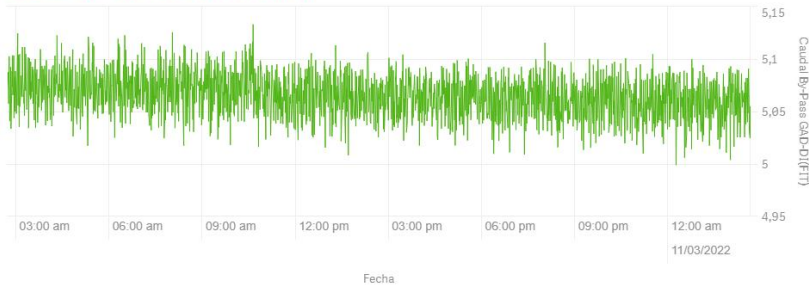


Figura 2-34. Visualización en la aplicación Qlik Sense de los niveles piezométricos aguas arriba de la GAD

Fuente: EPM

Caudal By-Pass GAD-DI-FIT (m³/s)



Caudal en el Canal DI-LIT (m³/s)

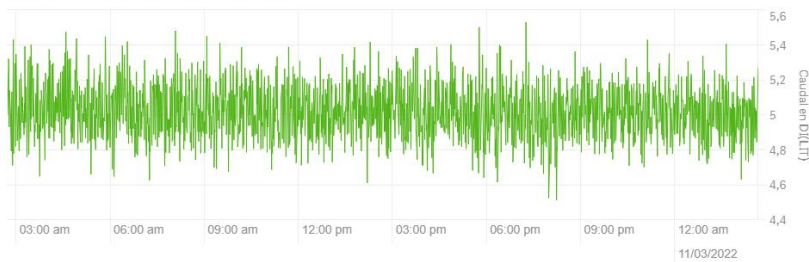


Figura 2-35. Visualización en la aplicación Qlik Sense de los caudales en el by-pass y el canal a flujo libre, GAD

Fuente: EPM

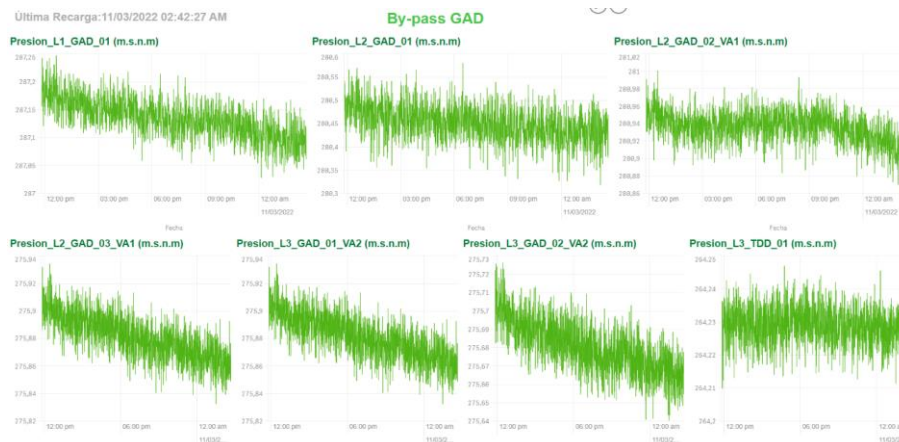


Figura 2-36. Visualización en la aplicación Qlik Sense de las presiones en el sistema de by-pass de la GAD.

Fuente: EPM

De igual forma, la estación de hidrometría realiza el registro y seguimiento diario de las variables monitoreadas en la GAD, con el fin de identificar posibles tendencias que nos den indicios de comportamientos anormales en el frente, y de esta forma, poder actuar y dar aviso oportunamente en el caso que se requiera. A continuación, se presenta el reporte de seguimiento realizado (Figura 2-37).

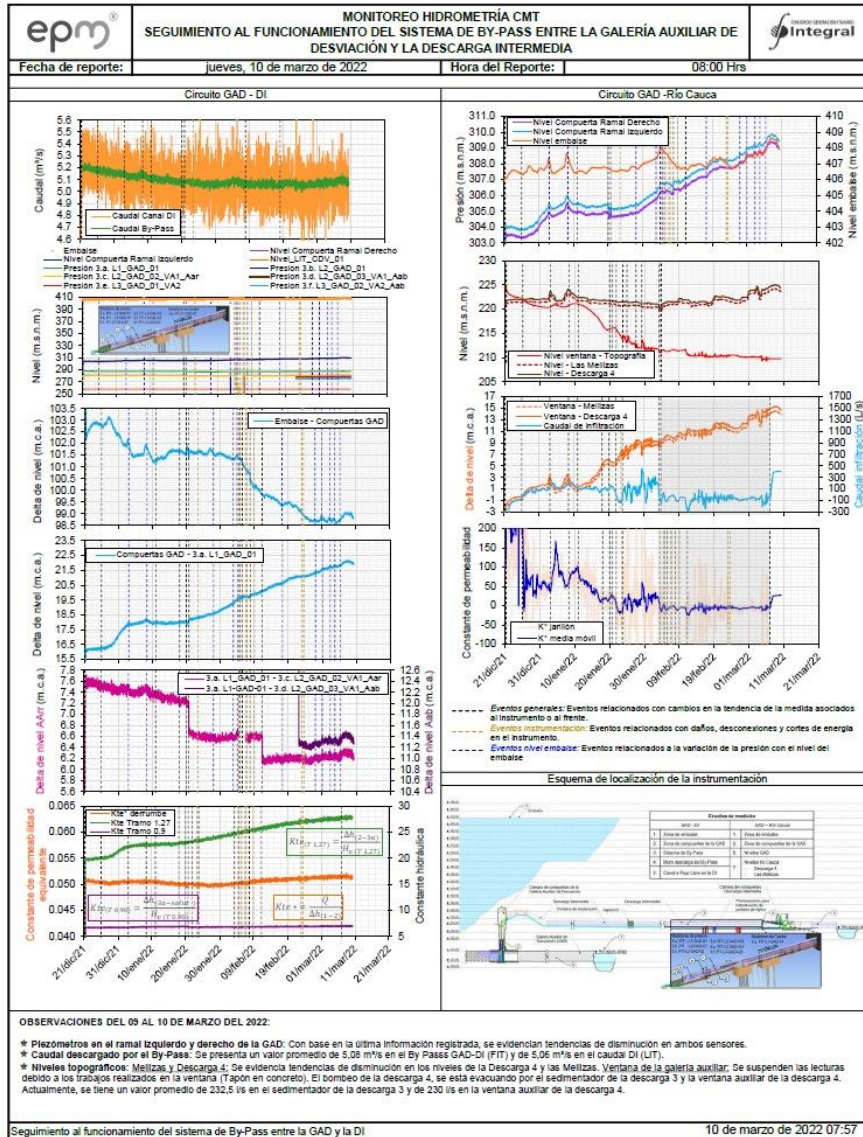


Figura 2-37. Seguimiento al funcionamiento del By-Pass entre la GAD y la descarga intermedia.

Fuente: EPM

C. Monitoreo Túnel de Desviación Derecho TDD

El TDD cuenta actualmente con cuatro piezómetros, los cuales permiten conocer los niveles dentro del túnel y un molinete que permite determinar la velocidad del flujo en un punto definido. Los cuatro instrumentos, correlacionando los registros, permiten conocer el estado del flujo dentro del TDD, permitiendo identificar por medio de las tendencias observadas, un eventual destaponamiento.

A continuación, se presenta la localización de estos instrumentos y las variables monitoreadas en detalle.

3) Localización

La instrumentación para el monitoreo del TDD se encuentra dispuesta a lo largo del túnel; no obstante, debido a que es imposible acceder a este, fue necesario que su instalación se realizara por medio de perforaciones desde la Descarga Intermedia, la cual se encuentra en una cota superior y con el acceso habilitado. Las abscisas de localización de los piezómetros en el TDD son K0+687, K0+858, K0+915 y K1+085. Por otro lado, el correntómetro o molinete se encuentra localizado en la abscisa K1+082.

La siguiente imagen presenta la localización de la instrumentación instalada para realizar el respectivo seguimiento de este frente (Figura 2-38):

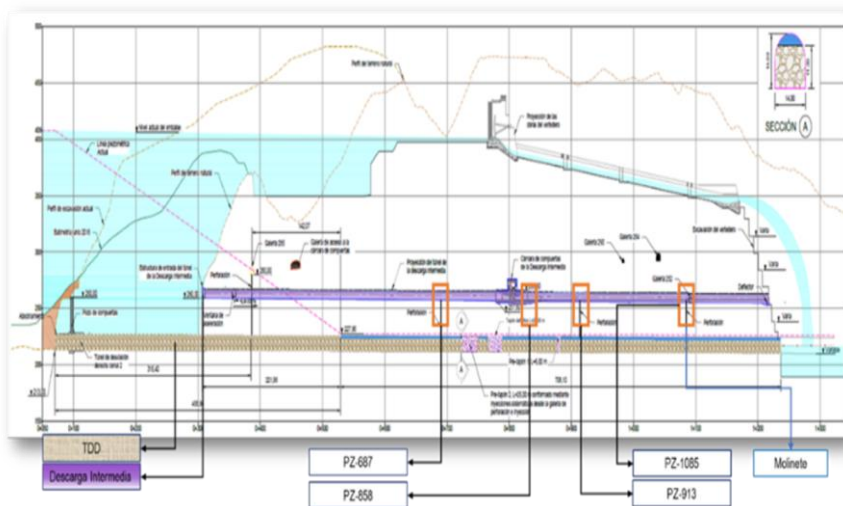


Figura 2-38. Localización Instrumentación TDD.

Fuente: EPM

4) Variables Monitoreadas

Los registros de niveles y velocidad nos indican el comportamiento del flujo que actualmente pasa por el TDD, permitiendo identificar de forma oportuna un posible destaponamiento del túnel y ejecutar los protocolos establecidos ante una eventual alerta.

Desde el taponamiento natural del TDD se ha realizado un seguimiento continuo del frente, teniendo alertas definidas para los cuatro piezómetros y el correntómetro instalados actualmente en el túnel, con el objetivo de dar alertas tempranas en caso de un destaponamiento del mismo.

El caudal en el TDD se estima a partir de los registros de velocidad medidos por el correntómetro, para lo cual también se tienen definidos diferentes niveles de alerta, presentados en el numeral 3.2.4 más adelante en este documento.

Cabe destacar que el registro de los piezómetros y del molinete, tienen una frecuencia de actualización de datos de 20 segundos. Estos datos son enviados a un datalogger, para luego ser enviados al servidor de EPM, de donde son extraídos para realizar el monitoreo y los distintos análisis que se desarrollan en la estación.

Los registros de niveles y velocidad se reciben en tiempo real y se visualizan en la aplicación Qlik Sense, lo cual, hace más efectivo el monitoreo y seguimiento de cualquier evento que se presente en el túnel. A continuación, se presenta un ejemplo de visualización de las variables anteriormente mencionadas (Figura 2-39 a Figura 2-41).

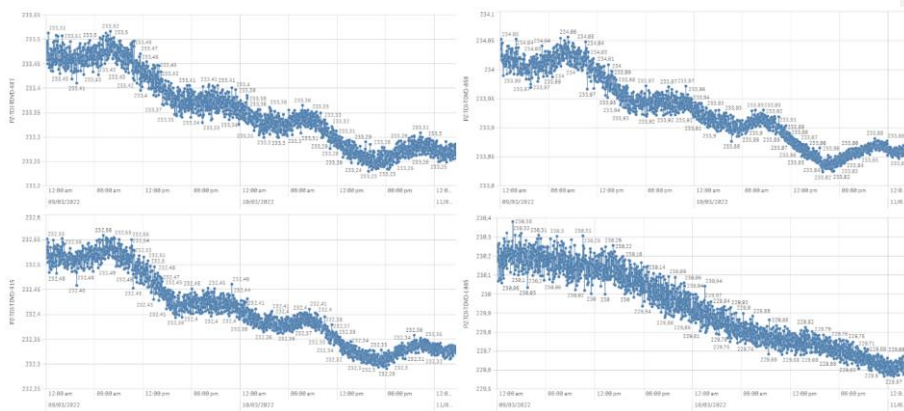


Figura 2-39. Visualización en la aplicación Qlik Sense del nivel de los piezómetros en el TDD

Fuente: EPM



Para el riesgo de Destaponamiento del Túnel de Desviación Derecho (TDD) y/o la Galería Auxiliar De Desviación (GAD) se implementó como plan de acción y prevención el monitoreo constante de estos dos túneles a partir de la instalación de diferentes instrumentos hidrométricos mencionados anteriormente. Las mediciones que se obtienen en tiempo real buscan inferir el caudal que pasa por cada túnel y el caudal que se reporta en la estación aguas abajo de la descarga del proyecto.

Para el caso de la GAD se tiene ubicada instrumentación hidrométrica en la piscina formada en la ventana de construcción, permitiendo medir el nivel del agua. Adicionalmente, se monitorea el nivel en el río Cauca donde descargan las tuberías que se conocen como “las mellizas”, localizadas en la salida de la ventana de construcción. Con las mediciones de los niveles descritos anteriormente, es posible estimar cuál es el caudal descargado por la GAD en función del tipo de flujo con el que se encuentren trabajando “las mellizas”, es decir, si el nivel del río se encuentra por encima o por debajo de la cota de la clave de las tuberías.

La estación aguas abajo de la descarga del proyecto que se encuentra ubicada sobre el puente El Beso, permite obtener la diferencia entre el caudal vertido y el caudal registrado en la “Descarga Hidroituango”, en esta diferencia se tienen en cuenta los aportes del río Ituango, filtraciones de la presa, el TDD y la GAD, esta diferencia de caudal permite detectar alguna anomalía de los caudales descargados.

Teniendo en cuenta que un posible destaponamiento de estos túneles no se daría de manera súbita sino que se trataría de un evento progresivo, los niveles de alerta no corresponden a un valor único, por el contrario, corresponden a un rango, debido a que si una de las variables que estiman el caudal que pasa por estos túneles sobrepasa un valor de referencia que active algún nivel de alerta, se debe realizar un análisis de la evolución de la medición, su tendencia, el funcionamiento del equipo, inspecciones visuales realizadas por cámaras en tiempo real y posibles interferencias con trabajos de obra, de manera que se tenga seguridad al momento de un evento de destaponamiento sin generar falsas alarmas. A continuación, se presentan los diferentes niveles de alerta definidos por la Asesoría (Figura 2-43) y el protocolo de activación de alarmas por destaponamiento (Figura 2-44).

Nivel de Advertencia	Situación	Caudal que genera la advertencia (m³/s)		
		TDD Medición indirecta a través de velocidad y presión	GAD Medición de caudal en descarga	Q río – Q vert. Resta de caudales
0	Condición normal	<10 Caudal nominal actual	<10 Caudal nominal actual	<30 Delta nominal
1	Aumento sensible en el caudal.	20 Se duplica la velocidad en el TDD	14 Corresponde a la aleta naranja interna	200 Valor sensible según medida histórica
2	Genera de alerta interna y notificación a población aguas abajo.	50 Caudal asociado con el Gradiente crítico en el TDD	18 Caudal asociado con el Gradiente crítico en el TDD	300
3	Activación de desalojo eminente, Cuando se triplique el cual de aleta interna	150	60	800
4	Activación de desalojo inmediato Cuando se duplique el caudal de desalojo eminente	300	120	1500

Figura 2-43. Alertas por destaponamiento TDD y GAD

Fuente: CGI

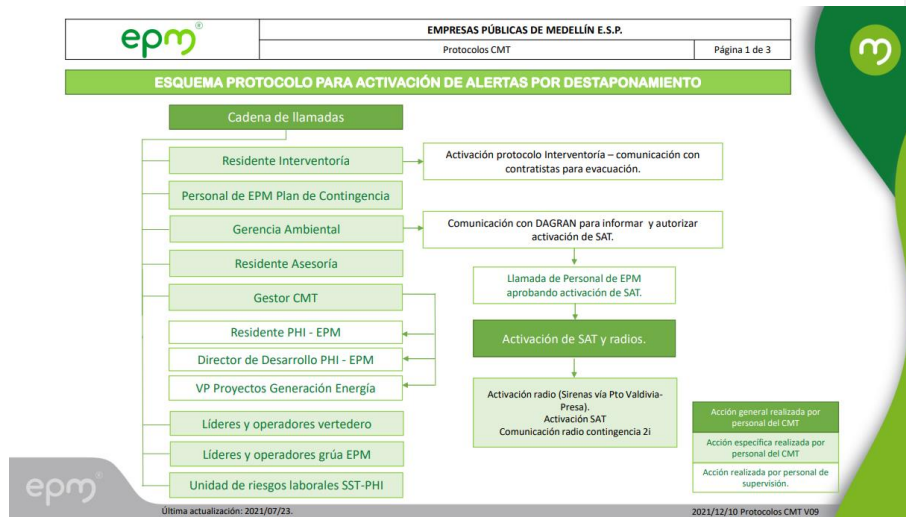


Figura 2-44. Protocolo para activación de alarmas por destaponamiento.

Fuente: EPM

2.3.4.2.3 Precipitación

En el sitio de presa del proyecto se tiene ubicado un pluviómetro el cual registra la cantidad de agua lluvia presentada en la zona del proyecto (Figura 2-45).

El monitoreo de esta variable se realiza mediante la plataforma de Qlik Sense y la periodicidad de la variable es de 15 minutos (Figura 2-46).



Figura 2-45. Ubicación pluviómetro Base Militar Capitanes

Fuente: EPM

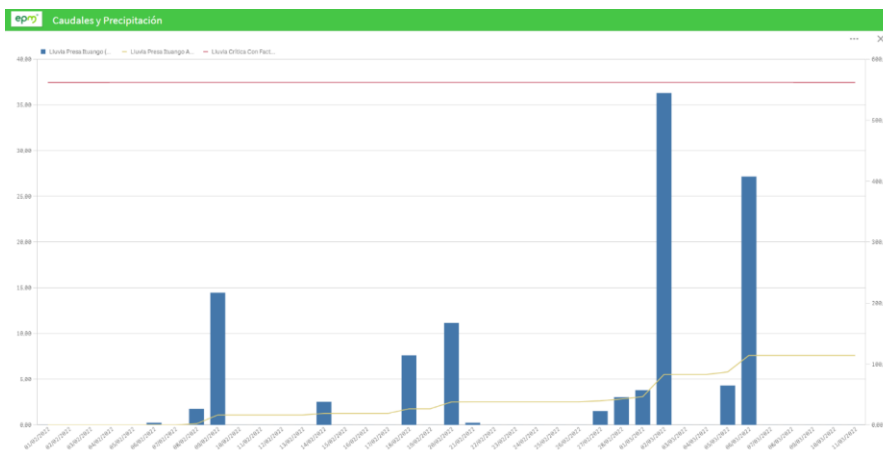


Figura 2-46. Visualización en la aplicación Qlik Sense precipitación Proyecto Hidroeléctrico Ituango

Fuente: EPM

2.3.4.2.4 Nivel río Ituango.

El río Ituango es el afluente más cercano a la zona de descarga del proyecto. Para el monitoreo de esta variable se cuenta con un radar Vaisala (Figura 2-47), los datos registrados por el

instrumento se visualizan a través de la plataforma Qlik Sense. La periodicidad de registro de esta variable es de un minuto (Figura 2-48).



Figura 2-47. Ubicación radar Vaisala nivel Río Ituango.

Fuente: EPM

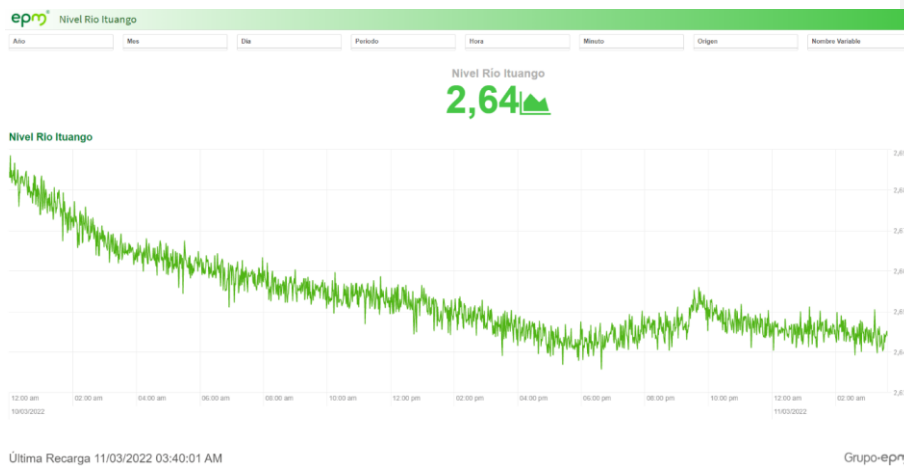


Figura 2-48. Visualización en la aplicación Qlik Sense nivel río Ituango.

Fuente: EPM

2.3.4.2.5 Niveles de agua en las Descargas.

Desde la estación se realiza el seguimiento al comportamiento de los niveles del agua en el río Cauca en la zona de las descargas, se reciben datos topográficos con periodicidad de una hora.



Figura 2-49. Ubicación radar Vaisala nivel Río Ituango.

Fuente: EPM

A. Reporte generado

- *Reporte Alertas Descarga 3*
- Desde la estación de Hidrometría, se emite un reporte de seguimiento ante una posible creciente con afectación en las descargas del PHI, (Figura 2-50 y ver archivo *Listado_reportes_informes_y_presentaciones_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16). La frecuencia de envío es de la siguiente forma:
 - a. Caudales menores a 1000 m³/s a las 17:00 hrs, los miércoles de cada semana.
 - b. Caudales mayores a 1000 m³/s a las 17:00 hrs, todos los días

Variable	Niveles de alerta				
	Verde	Amarilla	Naranja	Rojo	Negra
Probabilidad de ocurrencia y acciones a tomar					
Acciones a tomar	Monitoreo cotidiano	Se intensifica monitoreo y se realiza proyección de caudales	Se inicia el cierre con base en proyecciones	Acceso a casa de máquinas ya debe estar cerrado	
Ti años	< 2.33	2.33	6.5	16	25
Probabilidad de ocurrencia %	< 43%	43%	15%	6%	4%
Variables principales					
Nivel Descarga 3	m s.n.m. <= 227.1	227.1	228.4	229.6	230.0
Borde libre *	> 2.9	2.9	1.6	0.4	0.0
Estadabilidad del dique **	N/A	E (estable)	DM (deterioro menor)	PE (estabilidad)	IN (inestable)
Caudal	m³/s <= 2660	2660	3400	4000	4240
Nivel Embalse	m s.n.m. <= 409.1	409.1	410.5	411.5	411.9
Apertura compuertas	m FL	FL	FL	FL	FL
Otras Variables					
Caudal La Pintada	m³/s <= 1800 +/- 300	1800 +/- 300	2300 +/- 300	2650 +/- 300	2800 +/- 300
Caudal Obaya	m³/s <= 2540 +/- 300	2540 +/- 300	3300 +/- 300	3850 +/- 300	4060 +/- 300
Nivel en el embalse	m s.n.m. <= 409.1	409.1	410.5	411.5	411.9
Caudal vertedero	m³/s <= 2660	2660	3417	3964	4240
Nivel descarga N°1	m s.n.m. <= 228.5 (+/- 0.6)	228.5 (+/- 0.6)	229.9 (+/- 0.6)	230.9 (+/- 0.6)	231.2 (+/- 0.6)
Nivel descarga N°2	m s.n.m. <= 227.6 (+/- 0.6)	227.6 (+/- 0.6)	229.1 (+/- 0.6)	230.1 (+/- 0.6)	230.5 (+/- 0.6)
Nivel descarga N°3	m s.n.m. <= 227.1 (+/- 0.6)	227.1 (+/- 0.6)	228.6 (+/- 0.6)	229.6 (+/- 0.6)	230.0 (+/- 0.6)
Nivel descarga N°4	m s.n.m. <= 226.5 (+/- 0.6)	226.5 (+/- 0.6)	227.9 (+/- 0.6)	228.9 (+/- 0.6)	229.3 (+/- 0.6)
Nivel "Las melicatas"	m s.n.m. <= 226.0 (+/- 0.6)	226.0 (+/- 0.6)	227.4 (+/- 0.6)	228.4 (+/- 0.6)	228.8 (+/- 0.6)
Nivel río Ituango	m				
Caudal puente Metálico	m³/s <= 2690	2690	3447	4024	4270
Nivel puente Metálico	m <= 12.1	12.1	14.1	15.5	16.1
Caudal puente El Beso	m³/s <= 2690	2690	3447	4024	4270
Nivel puente El Beso	m <= 12.1	12.1	14.0	15.4	15.9
Tasas de ascenso					
Nivel descarga N°3	m/día >= 2.9	2.9	1.6	0.4	0.0
Embalse	m/día >= 2.8	2.8	1.4	0.4	0.0

Seguimiento de variables				
05/05 18:00	06/05 20:00	14/05 17:00	08/05 17:00	09/05 17:00
1.1	1.1	1.1	1.0	1.0
89%	94%	94%	96%	96%
224.9	224.7	224.8	224.7	224.6
5.1	5.3	5.2	5.3	5.4
DM	DM	DM	DM	DM
1746	1599	1598	1491	1490
407.1	407.0	407.0	406.9	406.9
7.027.027.044.68	7.023.787.048.98	7.023.787.048.98	7.023.787.048.7	7.023.787.048.79
05/05 18:00	06/05 20:00	07/05 17:00	08/05 17:00	09/05 17:00
1155	1103	1149	1149	1127
1635	1696	1731	1731	1650
407.1	407.0	407.0	406.9	406.9
1746	1599	1598	1491	1490
226.3		226.4	226.4	226.3
225.9	226.4	226.4	226.4	226.3
224.9	224.7	224.6	224.7	224.6
224.2	224.0	224.1	223.8	223.8
223.3	223.0	223.1	222.8	222.9
1.7	2.0	1.9	1.9	1.9
1769	1674	1655	1566	1571
9.3	9.0	8.9	8.6	8.7
1730	1639	1618	1539	1562
9.4	9.1	9.0	8.9	8.8
6.7	2.9	3.4	-1.2	2.4
0.4	0.0	0.1	-0.1	0.0

Notas:
 - El borde libre hace referencia al borde que se hace para el nivel en el río de cada alerta para llegar a la cota de la cresta del muro.
 - La estabilidad del dique se refiere a las condiciones presentadas en el diagrama más detallado de las alertas.
 - Las tasas de ascenso corresponden a valores necesarios para alcanzar la cota de alerta negra cuando se está en un determinado nivel de alerta.

Acciones a tomar para la activación de alertas:
Verde:
 - Monitoreo habitual de variables y videos de drone con reporte diario.
 - Reconocimiento y vuelo de drone diario para la verificación del estado del dique de protección.
Amarilla:
 - Se intensifica el monitoreo con dos reportes diarios.
 - Reconocimiento, por lo menos, cada 12 horas para la verificación del estado del dique de protección.
 - Se deben realizar proyecciones de caudal por parte de EPM.
 - La grúa debe estar en disponibilidad de ser trasladada al portal de manera inmediata.
Naranja:
 - Se intensifica monitoreo con al menos cuatro reportes diarios.
 - Se deben realizar proyecciones de caudal, cada dos veces al día.
 - Reconocimiento, por lo menos, cada 6 horas para la verificación del estado del dique de protección.
 - Alzamiento al inicio de los preparativos para el cierre en caso de pasar a alerta roja.
 - Se debe disponer la grúa en el sitio indicado en la posición para la ejecución de la maniobra de cierre.
Rojo:
 - Se instalan taloneros en la descarga 3 en cuando se proyecten las condiciones de caudal o nivel que activen esta alerta.
Negra:
 - La descarga 3 debe estar operando y se debe haber retirado todo el personal y maquinaria de la zona con anterioridad.

OBSERVACIONES:
 Desde las estaciones aguas arriba del proyecto operadas por el IDEAM, se observa que La Virgen, Itra, La Pintada y Bolombito presentan una tendencia de aumento de caudal. Cabe resaltar que las estaciones presentan su última actualización a las 00:00 hrs del presente día.
 Según información recibida por el topógrafo de turno se realizó un ajuste en la cota de referencia del mojón PHI-4, esto con base en la comunicación D-PHE-COP-8353-2021.
 Por malas condiciones en la descarga 3 no se hicieron cobros desde el 05 de mayo de 2021 a las 00:00 horas.
 Según el pronóstico de lluvias presentado por el IDEAM, se esperan precipitaciones de intensidad media entre la cuenca alta y media del río Cauca, por lo que es posible que aumenten las caudales de arriba al proyecto.

ESTADO DEL ENROSCADO:
 Se observa una descarga de agua en el jardín entre la ventana de salida número 2 y 3, la cual está asociada a la salida del nuevo sistema de bombeo de aguas de infiltración de la central. Se continúa con el seguimiento del nivel de enroscado reportado desde el día 14 de abril, zona ubicada en río. El día 01 de mayo del 2021 se evidenció el inicio de trabajos de inyecciones de consolidación frente al nivel de descarga 3.
 El día 30 de abril del 2021 a las 00:00 hrs, se realizó la apertura de la compuerta 1, quedando en operación el canal izquierdo y derecho del vertedero. (Comparta No. 1.2.3 y 4)



Reporte de niveles en la descarga N°3
 06 de mayo de 2021 17:56

Figura 2-50. Reporte de seguimiento ante una posible creciente con afectación en las descargas del PHI

Fuente: EPM

2.3.4.3 Interferometría

Desde la estación de radares se realiza el monitoreo en tiempo real de los diferentes frentes de obra, como complejos subterráneos y taludes naturales que han sufrido afectaciones desde el inicio de la contingencia en el 2018, esto con el fin de garantizar la seguridad del personal que se encuentra trabajando a lo largo del proyecto, así como las comunidades aguas abajo.

Actualmente, se cuenta con tres tipos de radares: SSR528FX, SSR410SAR-X y GML, instalados a lo largo del proyecto, los cuales fueron adquiridos con la firma australiana GroundProbe (Figura 2-51).

Los radares con los que se cuenta poseen distintos tipos de tecnologías que tienen como objetivo detectar variaciones en la deformación superficial del área y así, identificar posibles

tendencias que puedan afectar la estabilidad de la zona monitoreada. A continuación, se presentan las especificaciones generales de cada radar.



Figura 2-51. (A) Radar SSR528-FX, (B) GML, (C) Radar SSR410-SARX.

Fuente: EPM

2.3.4.3.1 Radar SSR528 – FX

El radar SSRFX (Slope Stability Radar) es una tecnología creada con el fin de determinar en tiempo real deformaciones en taludes de suelo y roca; este se basa en principios interferométricos, con los cuales, se miden pequeños cambios en la distancia de la antena del radar al talud monitoreado a través de ondas electromagnéticas. En la Figura 2-52 se muestra el cambio de fase (1) entre la señal recibida (2) y la señal remitida (3), el cual es directamente proporcional al movimiento (4) que hubiese ocurrido entre los escaneos.

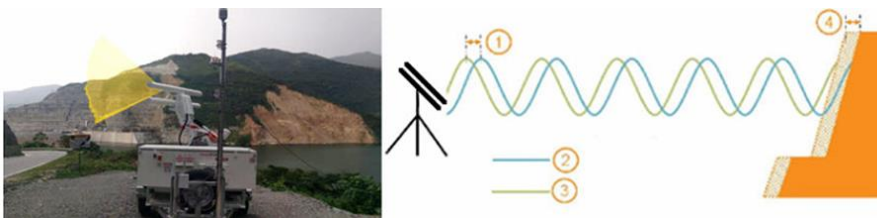
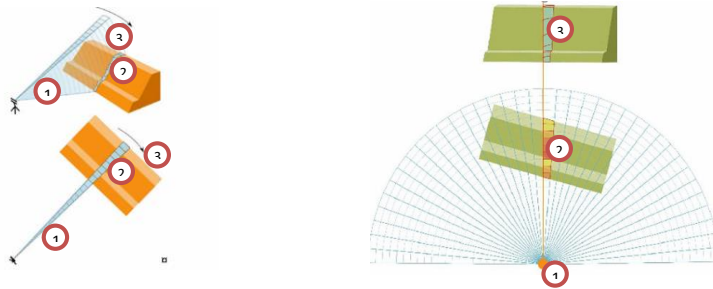


Figura 2-52. Principios interferométricos del radar SSR528 - FX.

Fuente: EPM

Este radar utiliza un haz de luz angosto, enfocándose en el talud y en un patrón de escaneo de manera directa, clasificándose así, como un radar de apertura real (RAR). Por otro lado, utiliza la técnica de apertura “fan-beam”, la cual consiste en una serie de haz de luz largo estrecho emitido en barridos horizontales (tipo abanico), donde esta huella consigue registrar las deformaciones de todos los pixeles contenidos en ella, desde la base hasta la cresta del talud, de forma rápida (40 segundos para 180° de apertura horizontal), proporcionando así una imagen 2D del talud en estudio (Figura 2-53).



Vista general del tipo de escaneo: (1) fan beam, configuración de píxel (2) y barrido del azimut (3)

Ubicación del radar (1). Las dimensiones del píxel (2) permanecen iguales en espesor, pero incrementa el ancho a mayor rango, a su vez la huella o iluminación (3) incrementa con la pendiente del talud.

Figura 2-53. Vista en planta información interferométrica.

Fuente: EPM

A. Localización

El radar SSR528FX se encuentra ubicado en la margen izquierda de la presa, con vista hacia el talud de la margen derecha del embalse (Figura 2-54), donde se monitorea el deslizamiento del Portal de Desviación (subdividido en 4 zonas: B1, B2, B3 y B4), talud de Captación (zona D y G), zona alta de Plazoleta de Pozos de Compuertas (Tratamiento Romerito), Plazoleta Pozos de Compuertas y bermas del Vertedero como se muestra en la Figura 2-55 (ver archivo *Tabla_resumen_localización_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16).



Figura 2-54. Ubicación radar SSR528 - FX.

Fuente: EPM



Figura 2-55. Zona de monitoreo – Margen derecha del embalse

Fuente: EPM

B. Variables Monitoreadas

Con el radar SSR528 - FX se monitorea específicamente las deformaciones superficiales de los diferentes sectores del talud de la margen derecha del embalse (Figura 2-56), sus tendencias y tasas de deformación.

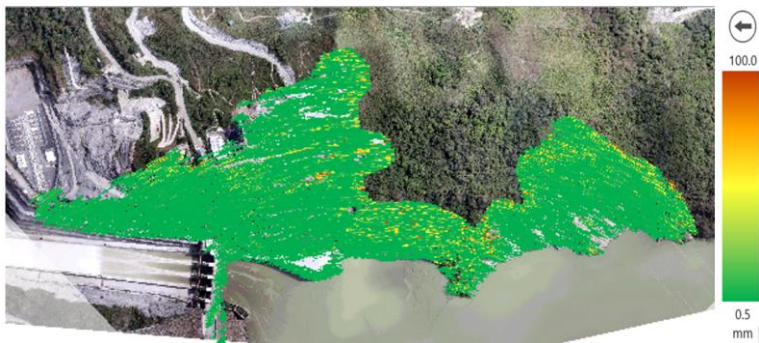


Figura 2-56. Visual de deformaciones radar SSR528 - FX.

Fuente: EPM

Para el análisis integrado de información, los datos de deformación son apoyados por parámetros secundarios de confiabilidad como la coherencia y amplitud de onda, junto con detonantes externos como variables hidrométricas (pluviosidad, nivel de embalse, humedad) y desarrollo de obra (trabajos cercanos), como se muestra en la Figura 2-57, donde se caracteriza la zona del Portal de Desviación a través de sus diferentes sectores y como lo eventos de precipitación afectan las deformaciones.

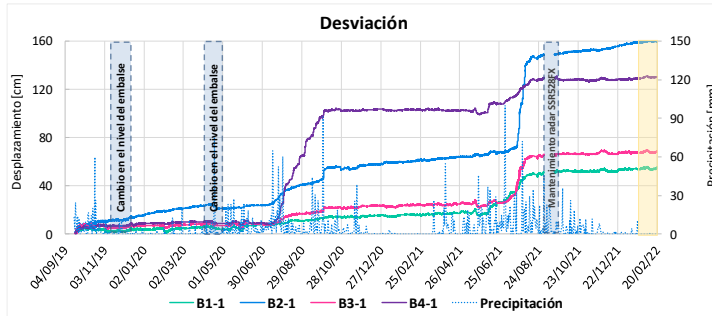


Figura 2-57. Ejemplo deformación zona del Portal de Desviación.

Fuente: EPM

C. Reportes generados

Con la información obtenida mediante el radar SSR528 – FX en conjunto con el análisis detallado de los registros, se emiten diferentes reportes e informes, con el objetivo de llevar un control y seguimiento de las variaciones que se identifiquen (Ver Anexo 3); dichos reportes se estructuran para entes externos (ANLA, Reaseguradores, etc.), Asesoría y de control interno, y se desglosan como: reportes horarios, informes quincenales y requerimientos mensuales, (ver Figura 2-58).

a) Reporte quincenal GML

b) Requerimiento 48, acta 212 ANLA.

Figura 2-58. Reportes emitidos con el radar SSR528 – FX.

Fuente: EPM

2.3.4.3.2 Radar SSR410 – SARX

El SSR410 - SARX, es un radar que emite una señal que cubre el escenario completo con cada lectura, no enfoca su energía específicamente a un punto en particular, sino que la distribuye a través de toda el área de escaneo, contando con una resolución de apertura de píxeles de 0,083 grados por 75 centímetros. Es ideal para el monitoreo de presas y taludes con deformaciones lentas (milímetros en años) a largo plazo (meses y años).

El radar SSR410-SARX es un radar de apertura sintética, el cual, mediante su antena recopila diferentes capturas a lo largo de su riel de tres metros de longitud (Figura 2-59), con el fin de realizar una “superposición” de escaneos, los cuales son procesados mediante algoritmos para obtener una imagen virtual del comportamiento de la estructura monitoreada. Del procesamiento de datos, se obtienen diferentes parámetros que permiten analizar el comportamiento en tiempo real de la estructura monitoreada tales como: deformación, azimut, coherencia, rango y amplitud.



Figura 2-59. Radar SSR410 - SARX.

Fuente: EPM

A. Localización

El radar SSR410 - SARX se encuentra ubicado sobre las bermas del Vertedero en cercanía a la subestación 500 kV (Figura 2-60), permitiendo el monitoreo del espaldón de la Presa, machón izquierdo del Vertedero y tratamiento de la Margen Izquierda (ver Figura 2-61) (ver archivo *Tabla_resumen_localización_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16).



Figura 2-60. Ubicación radar SSR410 – SARX.

Fuente: EPM



Figura 2-61. Zona de monitoreo – visual del radar.

Fuente: EPM

B. Variables Monitoreadas

Con el radar SSR410 - SARX se monitorea específicamente las deformaciones superficiales de los diferentes sectores del espaldón de la Presa (Figura 2-62), sus tendencias y tasas de deformación.



Figura 2-62. Visual de deformaciones radar SSR410 - SARX.

Fuente: EPM

Para el análisis integrado de información, los datos de deformación son apoyados por parámetros secundarios de confiabilidad como la coherencia y amplitud de onda, junto con detonantes externos como variables hidrométricas (pluviosidad, nivel de embalse, etc.) y desarrollo de obra (trabajos cercanos). En la Figura 2-63, se presentan las tendencias históricas registradas por el radar SSR410 – SARX.

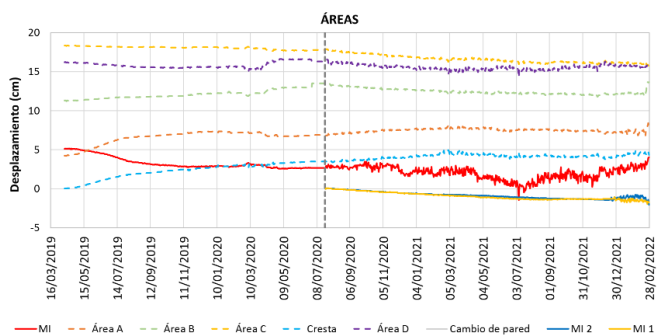


Figura 2-63. Ejemplo tendencias registradas por el radar SSR410 - SARX.

Fuente: EPM

C. Reportes generados

En conjunto con el análisis detallado de los registros y la información obtenida a través del radar SSR410 - SARX, se emiten diferentes reportes e informes con el objetivo de llevar un control y seguimiento de las variaciones que se identifiquen (Ver Anexo 3); dichos reportes se estructuran para entes externos (ANLA, Reaseguradores, etc.), Asesoría y de control interno, dividiéndose en: reportes diarios e informes quincenales (ver Figura 2-64).



Figura 2-64. Reporte diario emitido con el radar SSR410 – SARX.

Fuente: EPM

2.3.4.3.3 Radar GML

Desarrollado específicamente para el monitoreo de convergencias en obras subterráneas; el sistema GML (Geotech Monitoring Lidar, Figura 2-65) es un complemento para el monitoreo y control de deformaciones. El procesamiento integrado en la unidad permite la transmisión de datos en vivo a la superficie. La convergencia, amplitud, coherencia, imagen por escaneo y demás datos registrados, se transfieren en tiempo real al Centro de Monitoreo Técnico,

permitiendo que diferentes usuarios puedan acceder a los datos completamente procesados en sitio o de forma remota.

Este instrumento tiene una cobertura máxima de área de escaneo, de 360° en azimut y 270° de elevación, con un movimiento horizontal que abarca toda el área de monitoreo y un alcance de hasta 40 metros con un grado de incertidumbre confiable. El monitoreo puede realizarse de forma periódica (lecturas puntuales que se realizan manualmente, ya sea empotrados en el hastial tipo bracket o posicionado en un trípode) y de manera continua (donde el equipo hace escaneos cada 30 minutos y envía información procesada a través de acceso remoto).

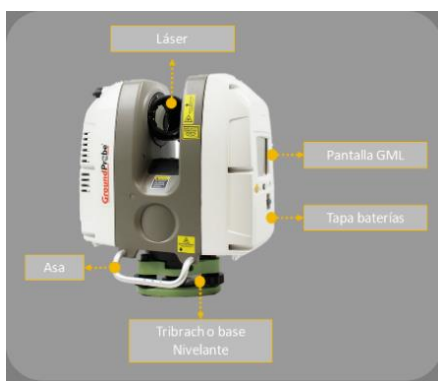


Figura 2-65. Radar GML

Fuente: EPM

A. Localización

Actualmente, se cuenta con tres GML continuos, ubicados en Casa de Máquinas sector norte (Figura 2-66), Casa de Máquinas sector sur (Figura 2-67) y caverna de transformadores (Figura 2-68). Adicionalmente, se cuenta con monitoreo periódico de aproximadamente 53 puntos de lectura, distribuidos en los diferentes frentes del complejo subterráneo como se especifica en la Tabla 2-1 (ver archivo *Tabla_resumen_localización_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16).



Figura 2-66. Imagen de escaneo del GML Casa de Máquinas Norte abscisa 0+078.

Fuente: EPM

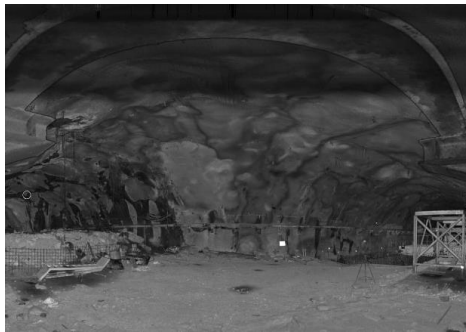


Figura 2-67. Imagen de escaneo del GML Casa de Máquinas Sur abscisa 0+213.

Fuente: EPM

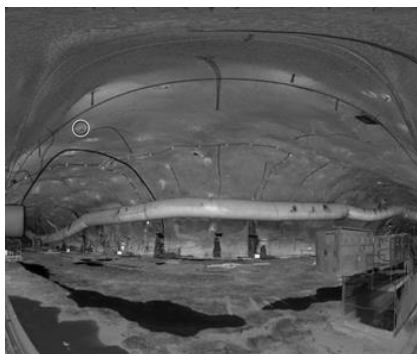


Figura 2-68. Imagen de escaneo del GML Caverna de transformadores 0+144.

Fuente: EPM

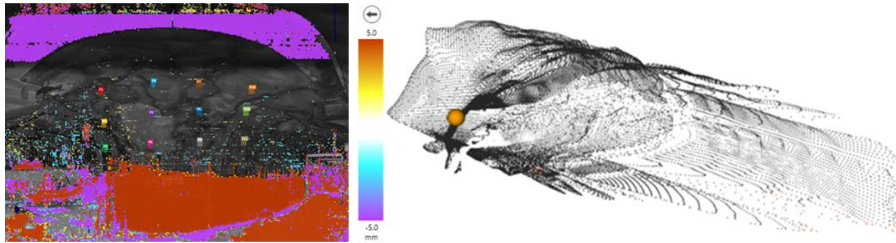
Tabla 2-1 Distribución de puntos de lectura para GML periódico.

FRENTE MONITOREADO	CANT. PUNTOS DE LECTURA		TOTAL
	TRIPODE	BRACKET	
Galería acceso a pozos de compuertas	0	5	5
Galería pozos de compuertas	0	5	5
Pozo de humos	0	2	2
Túnel vial	7	2	9
Caverna de Transformadores Superior e Inferior	5	0	5
Caverna Casa de Máquinas	0	3	3
Caverna Almenara	3	1	4
Galería A y D	4	3	7

Fuente: EPM

B. Variables Monitoreadas

El radar GML permite el monitoreo de deformaciones superficiales de los diferentes frentes del complejo de cavernas del proyecto (Figura 2-69), sus tendencias y tasas de deformación, acompañado de variables de confiabilidad como coherencia, rango y amplitud de onda.



a) Deformación GML Casa Máquinas Sur abscisa 0+213

b) Levantamiento nube de puntos de deformación GML Casa Máquinas Sur abscisa 0+213

Figura 2-69. Visuales de deformación, radar GML.

Fuente: EPM

Con el fin de conseguir un análisis completo, los datos de deformación son apoyados por variables externas como nivel de embalse, humedad y perturbaciones por el avance de las obras de estabilización. Toda esta información es complementaria al monitoreo geotécnico que se lleva a cabo a lo largo de la obra con la instrumentación tradicional. En la Figura 2-70, se presentan las tendencias históricas registradas por el radar GML.

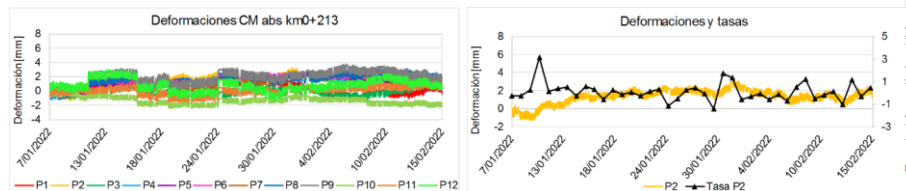


Figura 2-70. Deformación y tendencia identificadas, GML.

Fuente: EPM

C. Reportes generados

En conjunto con el análisis detallado de los registros y la información obtenido a través del radar GML, se emiten diferentes reportes e informes, con el objetivo de llevar un control y seguimiento de las variaciones que se identifiquen (Ver Anexo 3); dichos reportes se estructuran para entes externos, Asesoría y de control interno y se dividen en: reportes diarios e informes quincenales (Figura 2-71).

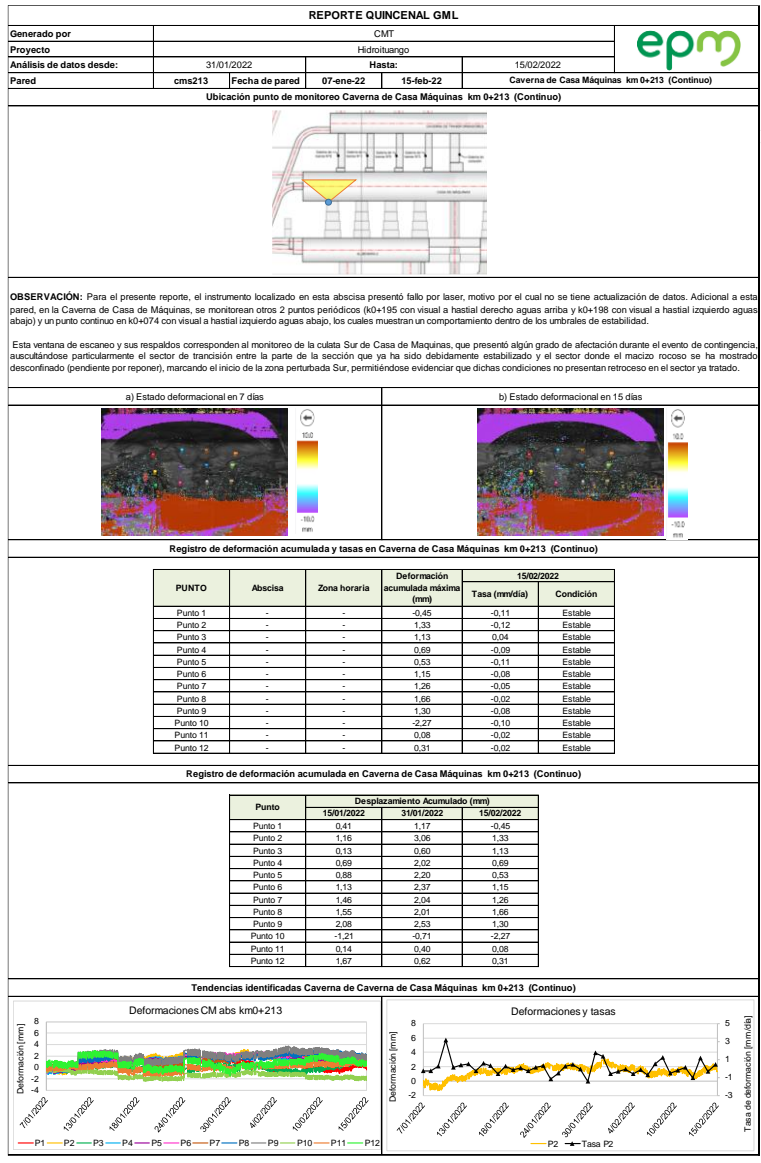


Figura 2-71. Reporte diario emitido con el radar GML.

Fuente: EPM



2.3.4.4 Sismología

El monitoreo sismológico del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI) se viene realizando desde julio del año 2016 a través de una red sismológica local, conformada por 12 estaciones, con el fin de monitorear la actividad sísmica de la zona de influencia del proyecto antes, durante y después del llenado del embalse.

A raíz de los sucesos que comenzaron el día 28 de abril de 2018, la red local se complementó con 8 estaciones sismológicas instaladas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) desde junio de 2018, con el fin de analizar con mayor detalle todos los procesos y eventos acontecidos en la zona de las obras principales ya que son fenómenos de difícil caracterización con la red sismológica local del proyecto, dada la distancia de los sensores a las obras.

A partir de la conformación del Centro de Monitoreo Técnico (CMT), localizado en los campamentos de EPM, se realiza un monitoreo de los fenómenos asociados al estado actual del proyecto, así como la actividad sísmica cercana y lejana que es detectada por las redes existentes.

2.3.4.4.1 Instrumentación

Las redes de estaciones sismológicas que monitorean el PHI, están compuestas por un instrumento principal denominado sismómetro, el cual tiene una alta sensibilidad y permite el registro de ondas asociadas a cualquier evento que libere energía, proveniente de una fuente natural o antrópica, y que se propaguen por el subsuelo.

El registro obtenido del sismómetro proporciona información de la fuente de liberación de energía (hipocentro o epicentro), la energía liberada y frecuencia asociada.

En la Figura 2-72 se muestra un sismómetro y en la Figura 2-73 se muestra la instalación completa de una estación sismológica, la cual incluye la alimentación de energía y los componentes necesarios para la recepción y transmisión de los datos. Los procedimientos de instalación de la instrumentación mencionada anteriormente, puede ser consultada en el archivo *Procedimiento_instalación_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16.



Figura 2-72. A. Sismómetro. B. Sensor instalado y en funcionamiento.

Fuente: EPM



Figura 2-73. Instalación de estación sismológica, a. Gabinete con controlador solar, digitalizador y baterías de arriba a abajo, b. Panel solar, antena, gabinete y caneca contenedora con variación de recubrimiento de concreto alrededor de la caneca, y c. Detalle del sensor ubicado dentro de la caneca contenedora.

Fuente: EPM

2.3.4.4.2 Localización

El PHI cuenta con dos redes de estaciones sismológicas, una denominada red local del PHI, conformada por 12 sismómetros, localizados alrededor de toda la zona de influencia del embalse y distribuidas desde La Granja hasta Liborina. Adicionalmente, desde el año 2018, se cuenta con una red instalada por el SGC, la cual comprende ocho estaciones instaladas en zonas estratégicas de las obras principales (ver archivo *Tabla_resumen_localización_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16).

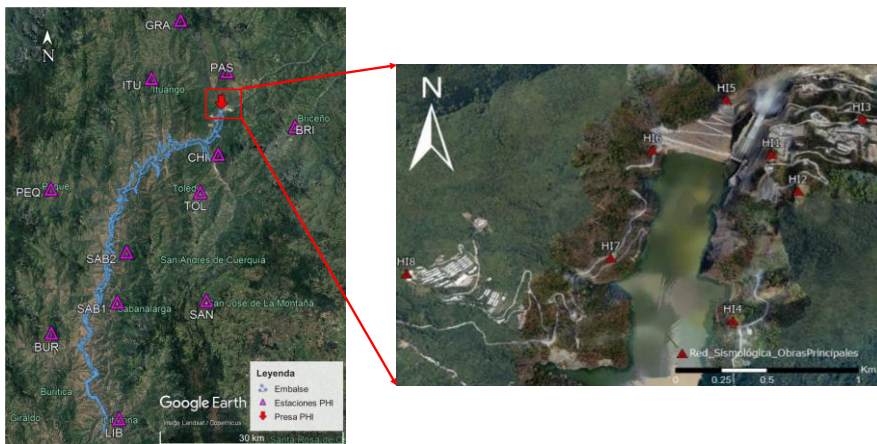


Figura 2-74. Red sismológica Proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Fuente: EPM

2.3.4.4.3 Variables Monitoreadas

Por medio del monitoreo sismológico es posible realizar la caracterización de señales asociadas a movimiento de placas tectónicas, fenómenos climáticos (como por ejemplo truenos), actividades en los diferentes frentes de la obra (tránsito de vehículos, personal, uso de maquinaria, etc.) y de las señales asociadas a eventos de interés para el proyecto, como desprendimientos de material y variaciones en la señal de fondo (señal que ha estado asociada

principalmente al paso de agua por el complejo de cavernas y al paso del agua por el Vertedero).

Para realizar una caracterización de los eventos mencionados anteriormente, es fundamental la identificación y el análisis de los parámetros tales como: forma de onda, frecuencia, tipo de onda (S, P, superficial), duración y tiempos de arribo.

Las redes sismológicas registran eventos que son duraderos a través del tiempo como la señal de fondo asociada en su momento al paso de agua por la caverna de Casa de Máquinas y la actual asociada al proceso de vertimiento. Para el análisis y el monitoreo de este tipo de eventos se evalúan variables como la amplitud Real Time Seismic Amplitud Measurement (RSAM) o la amplitud en nm/s y la frecuencia (Hz), adicionalmente, se tiene la visualización en el programa (Swarm) en tiempo real de la red sismológica como se muestra en la Figura 2-75.

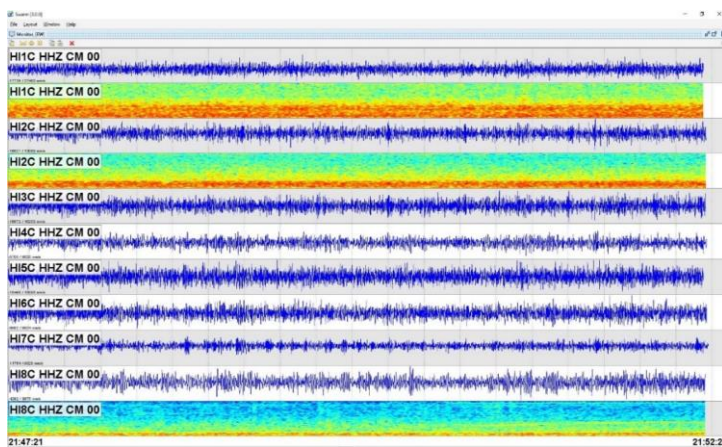


Figura 2-75. Visualización de la red sismológica del Proyecto Hidroeléctrico Ituango en el programa Swarm.

Fuente: EPM

A continuación, se muestran ejemplos de señales registradas por la red sismológica del Proyecto Hidroeléctrico Ituango, tanto de origen natural como antrópico (Figura 2-76 a Figura 2-81):

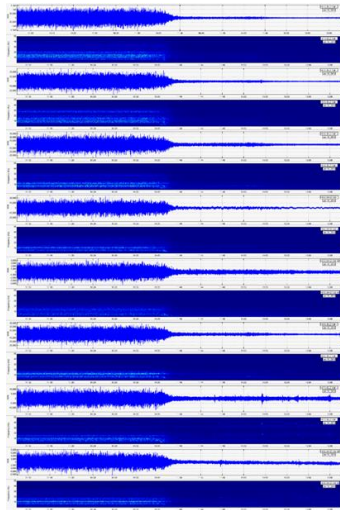


Figura 2-76. Señal asociada al paso de agua por el complejo de cavernas. (Cierre de compuerta de Captación N°2).

Fuente: EPM

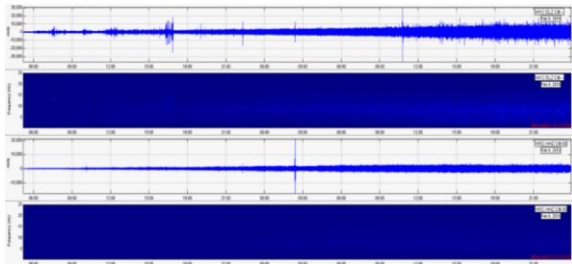


Figura 2-77. Señal asociada al paso del agua por el Vertedero.

Fuente: EPM

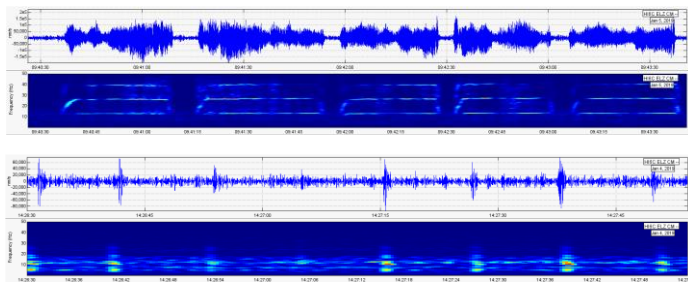


Figura 2-78. Señales asociadas a operación de maquinaria.

Fuente: EPM

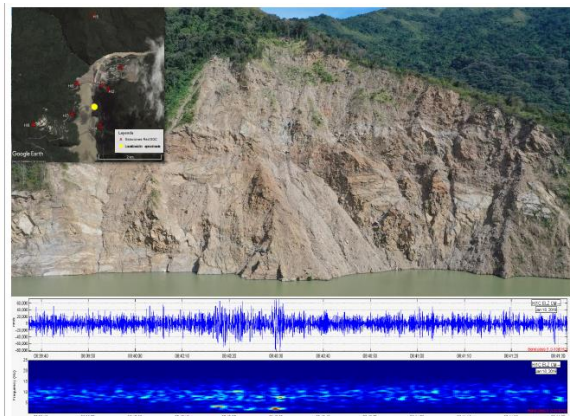


Figura 2-79. Señal asociada a desprendimiento de material superficial en el antiguo deslizamiento del Portal de los túneles de Desviación.

Fuente: EPM

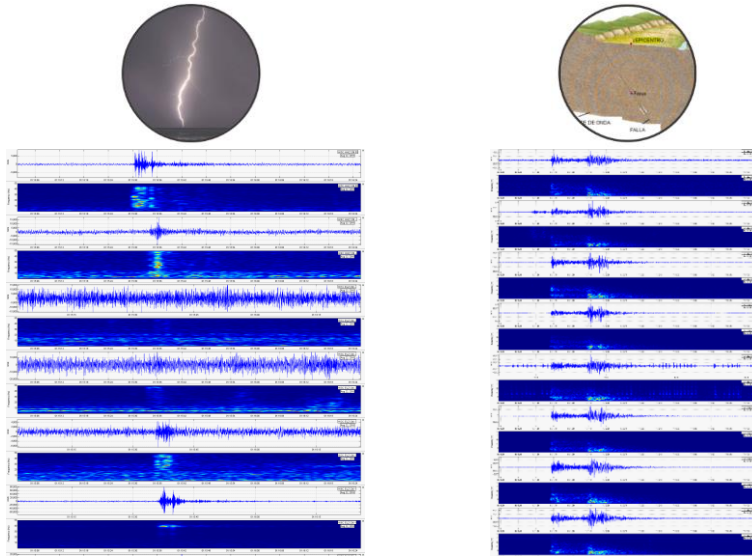


Figura 2-80. Señal asociada a tormenta eléctrica con presencia de truenos sobre el proyecto

Fuente: EPM

Figura 2-81. Señal originada por el movimiento de placas tectónicas en territorio colombiano (Los Santos, Santander).

Fuente: EPM

Desde la estación de Sismología del Centro de Monitoreo Técnico, también se realizan correlaciones entre las variables sísmicas y las variables hidrométricas, por ejemplo, los comparativos entre la amplitud en nm/s de la señal de fondo en la estación sismológica HI1Z asociada tanto al paso de agua por casa de máquinas en su momento y la señal asociada al proceso de vertimiento actual vs los caudales y nivel del embalse, para el caso ilustrado en la Figura 2-82 se muestra el caudal de descarga Hidroituango vs la amplitud sísmica en nm/s de la estación de referencia HI1Z y en la Figura 2-83 la *amplitud RSAM vs Frecuencia*.

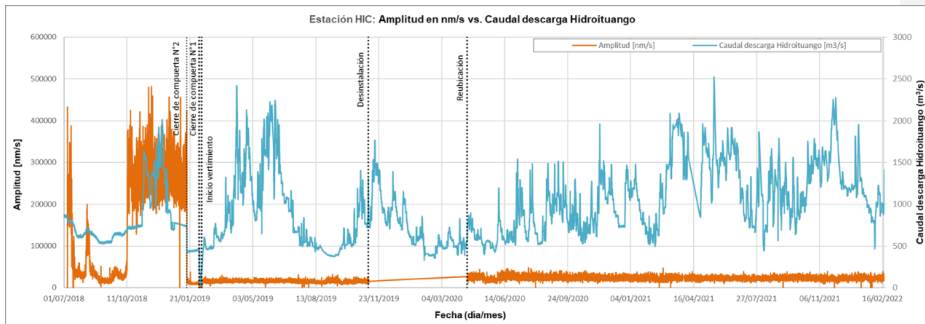


Figura 2-82. Gráfica histórica de amplitud Vs. Caudal de Descarga Hidroituango

Fuente: EPM

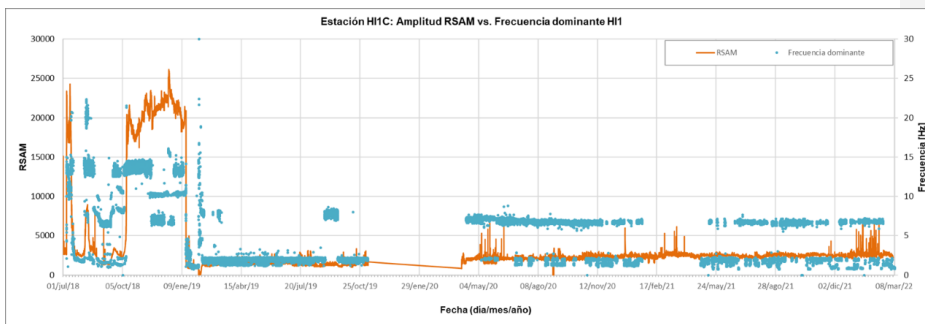


Figura 2-83. Gráfica histórica de RSAM Vs. Frecuencia de la señal de fondo asociada al paso de agua por Casa de Máquinas.

Fuente: EPM

A. Reportes generados

Para el monitoreo puntual de la señal de fondo asociada al Vertedero se realiza un reporte cada 12 horas (ver archivo *Listado_reportes_informes_y_presentaciones_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16); los parámetros presentados son: la amplitud máxima, la frecuencia dominante y una breve descripción del comportamiento en el periodo analizado. (Ver Figura 2-84).

Ante el registro de cualquier otro evento relevante que sobrepase los registros históricos y después de evaluar el fenómeno y la naturaleza de este, se emiten reportes extraordinarios. Los parámetros reportados son: amplitud máxima de la señal, frecuencia dominante, clasificación y génesis.

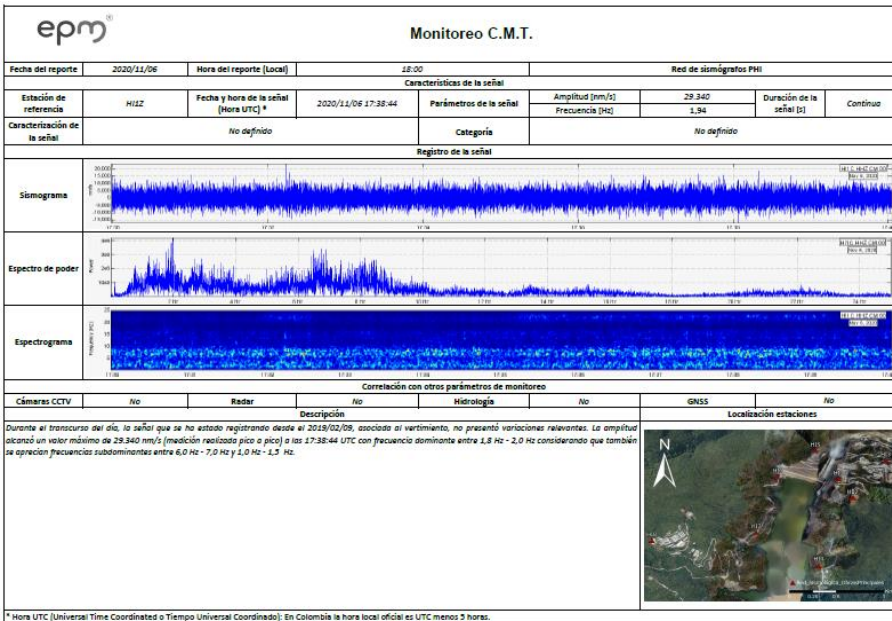


Figura 2-84. Reporte diario del monitoreo sismológico de la señal asociada al paso del agua por el Vertedero.

Fuente: EPM

B. Protocolos de Alerta

En el monitoreo sismológico se tienen definidos umbrales en cuanto al rango frecuencial (Ver Figura 2-85), con el fin de mantener un seguimiento continuo al comportamiento del macizo por el paso del agua por Vertedero y un protocolo de actuación ligado al protocolo de eventos relevantes, partiendo de una caracterización de las señales que se presentan, evaluando en conjunto con la Asesoría y, en caso de requerirse activación de protocolo de llamadas, se procede con el protocolo general para eventos relevantes mostrado en la Figura 2-106.

Nivel	Rango frecuencial (Hz)
Alerta	>22
En evaluación	>16 - <22
Normal	>1.5 - <16
En evaluación	>0.8 - <1.5
Alerta	0 - < 0.8

Alerta	Alerta por parte del líder técnico, residentes Geotécnica e Instrumentación.
En evaluación	En evaluación por parte del CMT y coordinadores.

*Niveles de alerta definidos por la asesoría.

Figura 2-85. Nivel de alerta en el monitoreo sísmológico, definido a partir del rango frecuencial.

Fuente: EPM

En general, cuando se presentan cambios en las variables sísmológicas se procede con la caracterización de los eventos según sea su origen, se realizan las correlaciones pertinentes y se comunica a quien corresponda, como se muestra en la Figura 2-86.

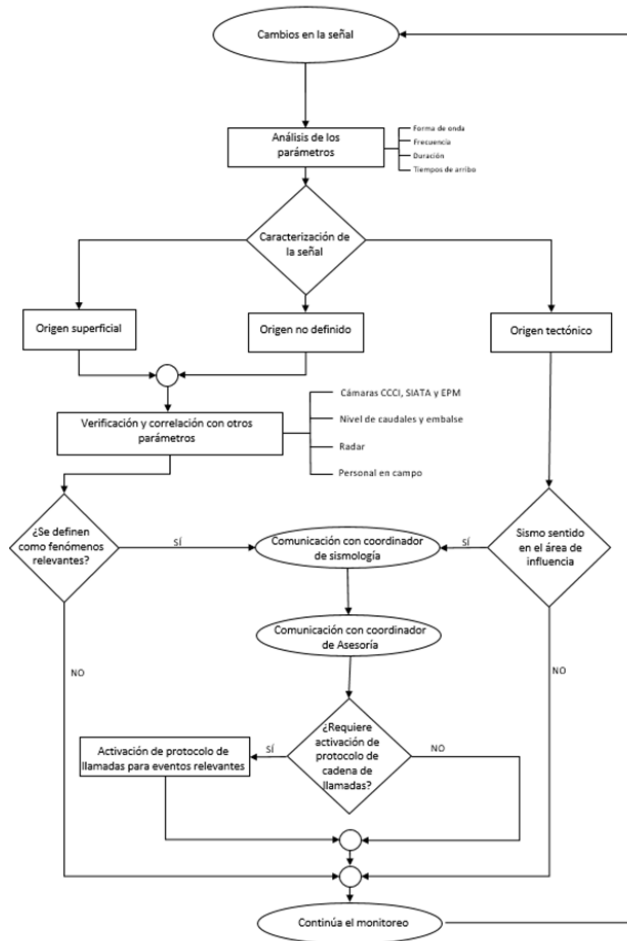


Figura 2-86. Protocolo de actuación – Monitoreo Sísmológico.

Fuente: EPM

2.3.4.5 Geodesia

La estación de geodesia inició su operación en el Centro de Monitoreo Técnico (CMT) durante el mes de marzo de 2020, con el objetivo de fortalecer el monitoreo del Proyecto



Hidroeléctrico Ituango (PHI) a través del uso de técnicas satelitales que proporcionan mayor precisión en zonas de difícil acceso para la instalación de otro tipo de instrumentación.

Dentro de sus funciones principales, se encuentra el monitoreo de los desplazamientos y deformaciones superficiales del PHI a través de dos técnicas satelitales: los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS por sus siglas en inglés), para los que se utilizan dos redes con cobertura de las obras principales y zonas aledañas; y el sistema de radar interferométrico de apertura sintética (InSAR por sus siglas en inglés), el cual cubre desde la cola del embalse hasta 10 km aguas abajo de la presa, en la zona de los ZODME de Humagá.

2.3.4.5.1 Monitoreo GNSS

Actualmente, el PHI cuenta con tres redes GNSS que consisten en una serie de receptores, instalados en diferentes puntos de interés, los cuales miden constantemente su posición sobre la superficie terrestre en términos de longitud (X), latitud (Y) y altura (Z). La primera red fue instalada por el Servicio Geológico Colombiano y consta de cinco (5) estaciones marca Trimble, de operación permanente y continua (CORS), de las cuales cuatro (4) de ellas se denominan “estaciones objetivo” y la restante se denomina “estación de referencia o base” (Figura 2-88).

La segunda red fue instalada por la compañía GroundProbe y consta de seis (6) estaciones marca Navstar, operando en modo RTK (*Real Time Kinematics*) de las cuales cinco (5) de ellas se denominan “rovers” y la restante se denomina “estación base” (Figura 2-89). Este monitoreo tiene como objetivo la identificación de procesos deformativos mediante el análisis de las **series temporales de posición** y cálculo de **velocidades** para cada estación, removiendo el efecto tectónico local, de manera que solo se observen los cambios asociados netamente a episodios deformativos que se presenten en el proyecto.

Las series temporales de posición de las diferentes estaciones se obtienen a partir del procesamiento de los datos obtenidos en los levantamientos “estático diferencial” de precisión milimétrica y “cinemático en tiempo real (RTK)” de precisión centimétrica.

Para robustecer el monitoreo de deformaciones a lo largo de las obras principales del PHI, se dispone de una red pasiva compuesta por dos receptores GNSS Móviles de referencia R12i, los cuales, utilizan tecnología Trimble Inertial Platform (TIP), lo que permite la compensación de la inclinación basada en el IMU con inmunidad magnética para mediciones topográficas y replanteo. Estos equipos cuentan con un motor de posicionamiento GNSS Trimble ProPoint, diseñado para proporcionar una mejor exactitud en entornos GNSS difíciles. Además de esto, estos GNSS ofrecen una precisión de nivel RTK rápida en todo el mundo vía satélite.

A. Instrumentación

El instrumento utilizado para este monitoreo es una estación GNSS, la cual se encuentra conformada por un receptor y una antena geodésica (

Figura 2-87A y 71B). Dichos elementos permiten adquirir las señales emitidas por los diferentes satélites, con el objetivo de determinar la posición de un punto sobre la superficie terrestre. Para el caso de los GNSS Navstar y móviles tanto el receptor como la antena vienen integrados en un solo dispositivo (

Figura 2-87C y 83D).



Figura 2-87. Imágenes de referencia de los instrumentos GNSS utilizados para el monitoreo. (A) Receptor GNSS Trimble NETR9 (B) Antena Trimble. (C) Receptor GNSS NavStar FLP100 (D) GNSS móvil armado sobre el trípode para la captura de datos

Fuente: EPM

Cada instrumento cuenta con una serie de características específicas, las cuales determinan en conjunto con otros aspectos la calidad del dato. En la Tabla 2-2, Tabla 2-3 y Tabla 2-4, se presentan las características generales de las redes GNSS instaladas en el PHI.

Los procedimientos de instalación de la instrumentación mencionada anteriormente, puede ser consultada en el archivo *Procedimiento_instalación_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16.

Tabla 2-2. Características generales de la red GNSS Trimble.

Cantidad	Instrumentos	Referencia	Software de Monitoreo
1	Estación Base GNSS	Trimble NetR9	GAMIT/GLOBK
4	GNSS	Trimble NetR9	GAMIT/GLOBK

Fuente: EPM

Tabla 2-3. Características generales de la red GNSS Navstar.

Cantidad	Instrumentos	Referencia	Software de Monitoreo
1	Estación Base GNSS	GPM200 RTK	GeoExplorer
5	GNSS	FLP100	GeoExplorer

Fuente: EPM

Tabla 2-4 Características generales de la red pasiva GNSS

Cantidad	Instrumentos	Referencia	Software de Monitoreo
2	GNSS	R12i	Trimble Business Center

Fuente: EPM

B. Localización

- *Red Geodésica Trimble*: la estación base de referencia se denominó HITU y las estaciones objetivo se denominaron HI01, HI02, HI03 y HI04 (Figura 2-88) (ver archivo *Tabla_resumen_localización_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16).

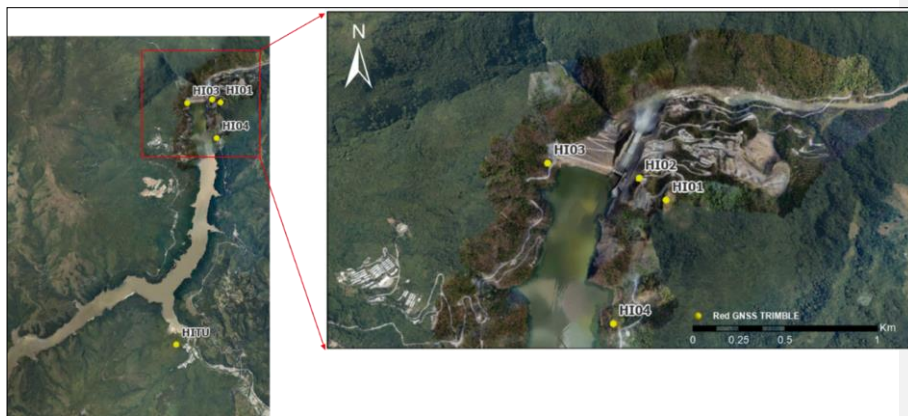


Figura 2-88. Localización de red GNSS Trimble.

Fuente: EPM

- *GNSS NavStar*: la estación base se denomina P0 y las estaciones objetivo o rovers, se denominaron P1, P2, P3, P4 y P5 (Figura 2-89).



Figura 2-89. Localización de red GNSS Navstar.

Fuente: EPM

- Red Pasiva GNSS



Figura 2-90 Localización de puntos monitoreados por los GNSS móviles. Fuente: EPM, 2021

Fuente: EPM

En la Tabla 2-5 se describen las ubicaciones de los PCS principales monitoreados con la red pasiva

Tabla 2-5 Coordenadas de los puntos monitoreados por los GNSS móviles

ID	Coordenada Este	Coordenada Norte	Altura Ortométrica (H)	Ubicación
PCS-HLP-01	1155245.00	1279369.30	633.32	Helipuerto
PCS-HLP-06	1155226.32	1279400.67	637.37	Helipuerto
PCS-HLP-08	1155176.34	1279390.75	639.21	Helipuerto
PCS-HLP-09	1155290.03	1279419.01	629.21	Helipuerto
PCS-KM0.9-03	1155813.40	1280274.08	479.98	Km 0+900
PCS-KM0.9-04	1155777.47	1280229.52	489.89	Km 0+900
PCS-KM0.9-05	1155749.50	1280177.19	495.14	Km 0+900
PCS-KM0.9-08	1155590.85	1280015.85	516.18	Km 0+900

77



ID	Coordenada Este	Coordenada Norte	Altura Ortométrica (H)	Ubicación
PCS-KM0.9-10	1155736.68	1280058.30	462.50	Km 0+900
PCS-KM0.9-11	1155562.48	1279994.85	520.15	Km 0+900

Fuente: EPM

C. Variables Monitoreadas

Por medio de los GNSS se monitorean los desplazamientos superficiales puntuales en términos de longitud (X), latitud (Y), altitud (Z) y tiempo (T), obteniendo gráficas de cada estación con sus componentes vertical, norte y este (Figura 2-91).

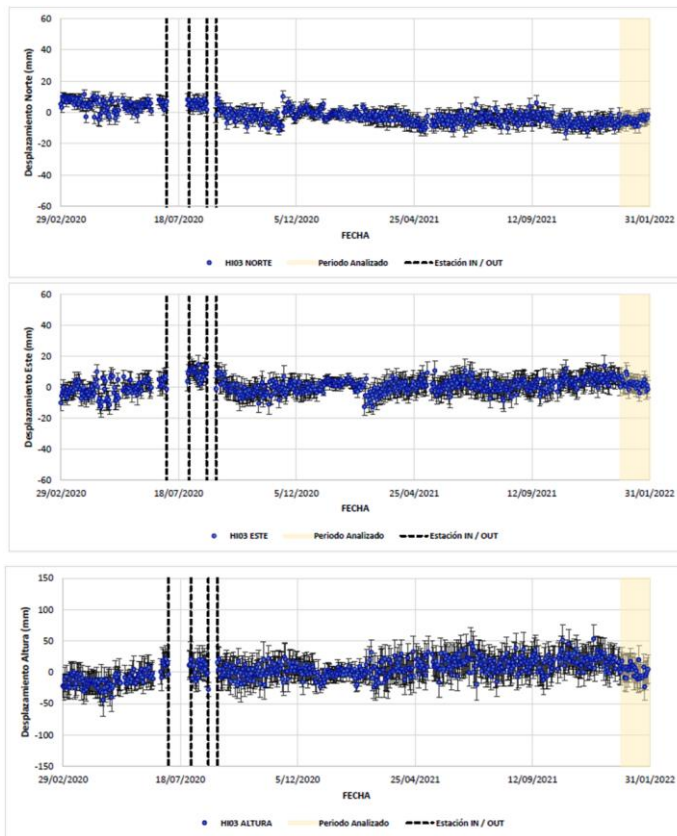


Figura 2-91. Series temporales de posición generadas para la estación HI03 de la Red Trimble en las tres componentes del GNSS (Norte, Este y Vertical).

Fuente: EPM

Teniendo en cuenta la dirección de desplazamiento de las componentes horizontales se calcula la resultante, que indica el desplazamiento total generado en el sitio de monitoreo (Figura 2-92).

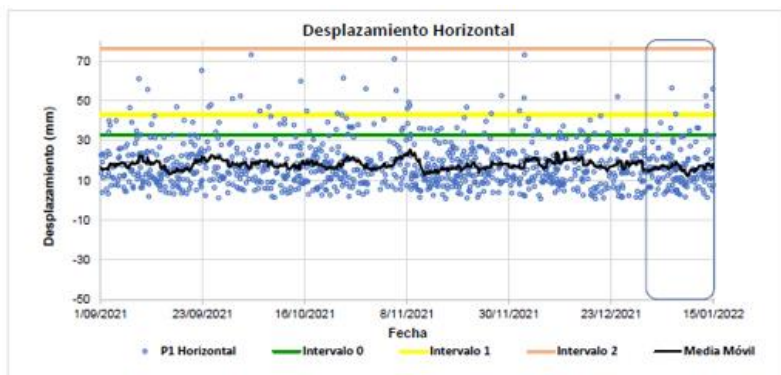


Figura 2-92. Serie temporal de posición para la resultante de las componentes horizontales del GNSS P2 (Red NavStar).

Fuente: EPM

D. Reportes generados

- *Reporte GNSS CORS*

Con la información obtenida y analizada, se remite un reporte con periodicidad mensual (ver archivo *Listado_reportes_informes_y_presentaciones_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16), el cual contiene información relacionada con los GNSS tipo CORS que registran deformaciones superficiales puntuales (Figura 2-93).

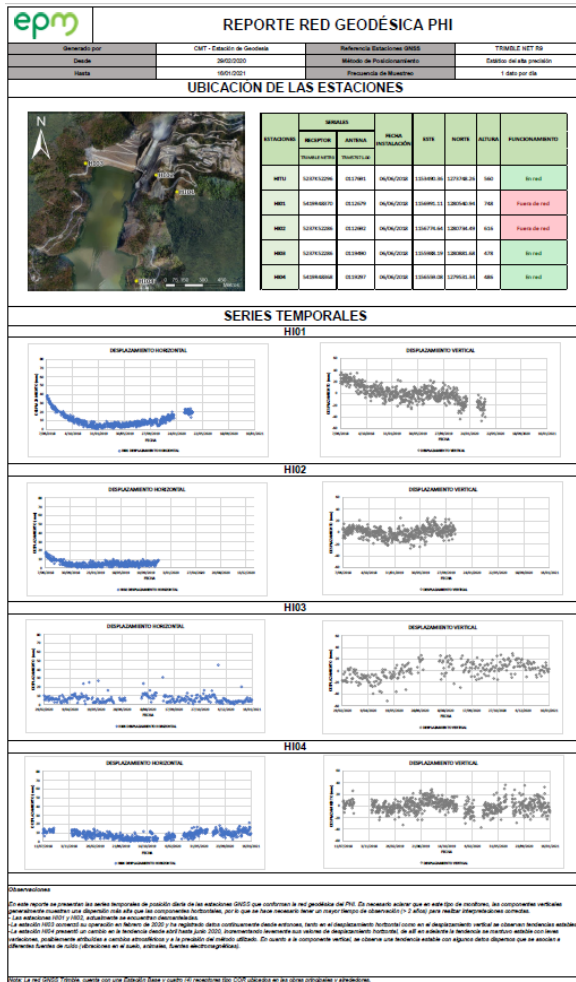


Figura 2-93 Plantilla reporte mensual GNSS CORS.

Fuente: EPM

- *Reporte GNSS Navstar*

Con la información obtenida y analizada, se remite un reporte con periodicidad quincenal, el cual contiene información relacionada con los GNSS RTK que registran deformaciones superficiales puntuales (Figura 2-94).

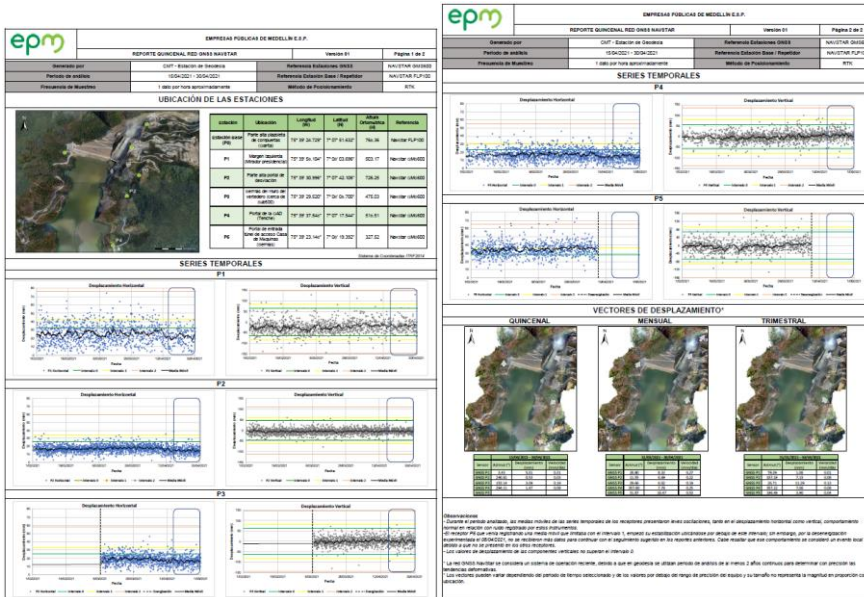


Figura 2-94. Plantilla reporte quincenal GNSS NavStar.

Fuente: EPM

- **Reporte GNSS Móviles**

Con la información obtenida y analizada, se remite un reporte con periodicidad mensual, de las series temporales de posición, el cual contiene información relacionada con los GNSS Móviles que registran deformaciones superficiales puntuales (Figura 2-95).

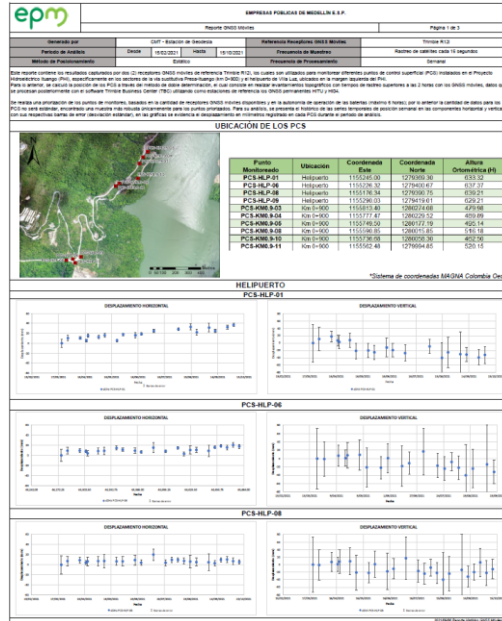


Figura 2-95 Reporte Mensual de la red GNSS Móvil.

Fuente: EPM

2.3.4.5.2 Monitoreo InSAR

Este monitoreo está enfocado en la detección y seguimiento a procesos deformativos superficiales, a través de la identificación de desplazamientos y fases de aceleración en áreas de gran extensión con ayuda de imágenes satelitales de alta resolución.

Actualmente, el PHI cuenta con un contrato con la empresa canadiense 3vGeomatics, la cual realiza envíos periódicos de información procesada. 3vG hace entrega de dos tipos de productos: Rapid Reports (periodicidad quincenal) y Comprehensive Report (periodicidad semestral).

Como resultado de este monitoreo se obtienen una serie de contornos que indican la presencia de desplazamientos o posibles desplazamientos en el área de estudio, los cuales se presentan en los Rapid Report (Figura 2-96).



Figura 2-96. Contornos de desplazamiento registrados en los diferentes frentes a partir de la técnica InSAR. RR – Línea de visión derecha (en azul) y RL – Línea de visión izquierda (en rosado).

Fuente: EPM

Para el caso de los Comprehensive Report, se presentan mapas de calor que permiten la identificación de tasas de desplazamiento en donde cada píxel tiene un valor, es decir, una zona nos muestra un promedio de desplazamientos con valores entre 0 y 50 cm por año (Figura 2-97). Así también es posible generar gráficas con series temporales por píxel o grupo de píxeles analizados.

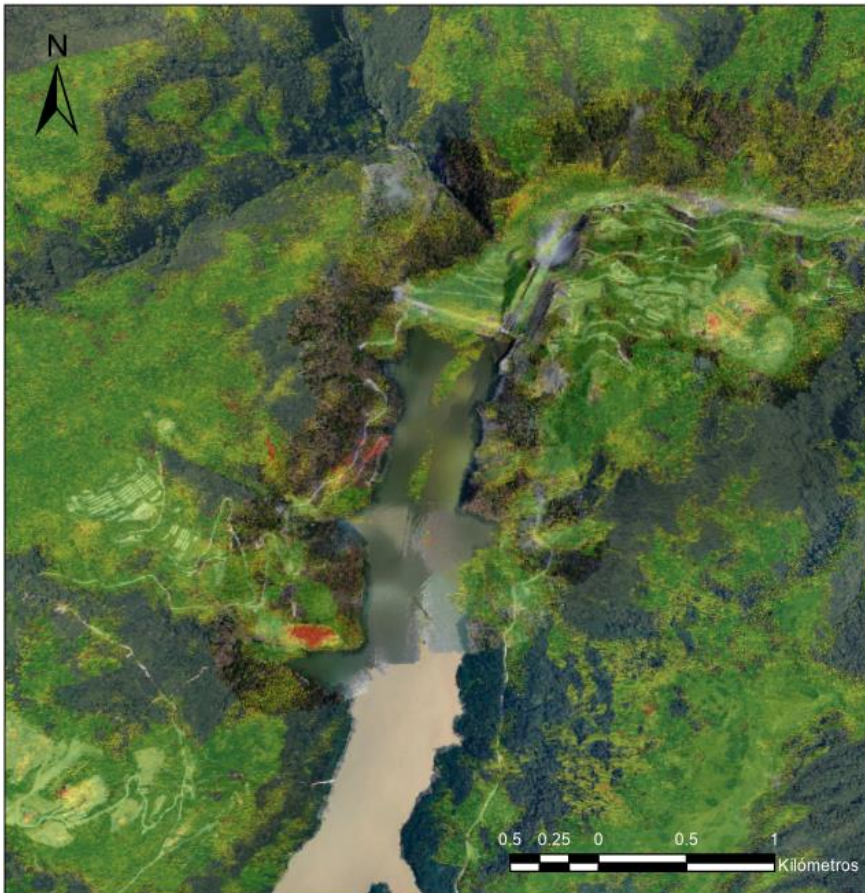


Figura 2-97. Mapa de calor de las tasas de desplazamiento. En rojo las zonas que presentan mayores desplazamientos superficiales.

Fuente: EPM

A. Instrumento

Los datos SAR utilizados para monitorear el proyecto Ituango son adquiridos por el satélite japonés ALOS-2 que opera en la banda L en modo Stripmap, con resolución de 3 m, una huella de imagen de 55 km x 70 km, una longitud de onda de 22,9 cm y un tiempo de revisita de 14 días en sentido ascendente (sentido sur-norte).

El satélite es un sensor activo, es decir, no requiere de luz solar para adquirir imágenes, sino que se alimenta de la misma energía que percibe con las señales captadas durante el día. Adicionalmente, se debe resaltar que opera en la banda L, lo cual permite que las señales emitidas puedan atravesar la vegetación y de esta manera registrar datos confiables sobre los desplazamientos del terreno. (Figura 2-98).

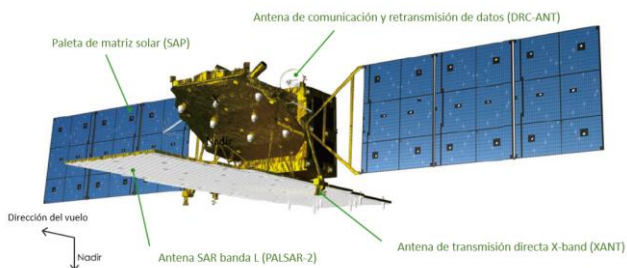


Figura 2-98. Imagen de referencia del satélite ALOS - 2.

Fuente: Astrofísico Daniel Marín, Eureka (Traducida al español).

B. Localización

La huella del satélite corresponde al área de cobertura del monitoreo, la cual es de 55 x 70 km, abarca desde la cola del embalse (municipio de Liborina) hasta los depósitos de Humagá (10 km aguas abajo de la presa) y cubre la delimitación del área de análisis (Figura 2-99) (ver archivo *Tabla_resumen_localización_instrumentación_CMT(3)* en el Anexo I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16).



Figura 2-99. Las huellas de ALOS-2 (blanco) y el área analizada (amarillo) se muestran sobre las imágenes ópticas de Google Earth.

Fuente: EPM

C. Variables monitoreadas

Por medio de la técnica de InSAR se monitorean movimientos en la superficie, a través de la identificación de desplazamientos y fases de aceleración en áreas de gran extensión con precisión milimétrica, como se observa en la Figura 2-100. Esta información es extraída de las señales electromagnéticas recibidas por el satélite.

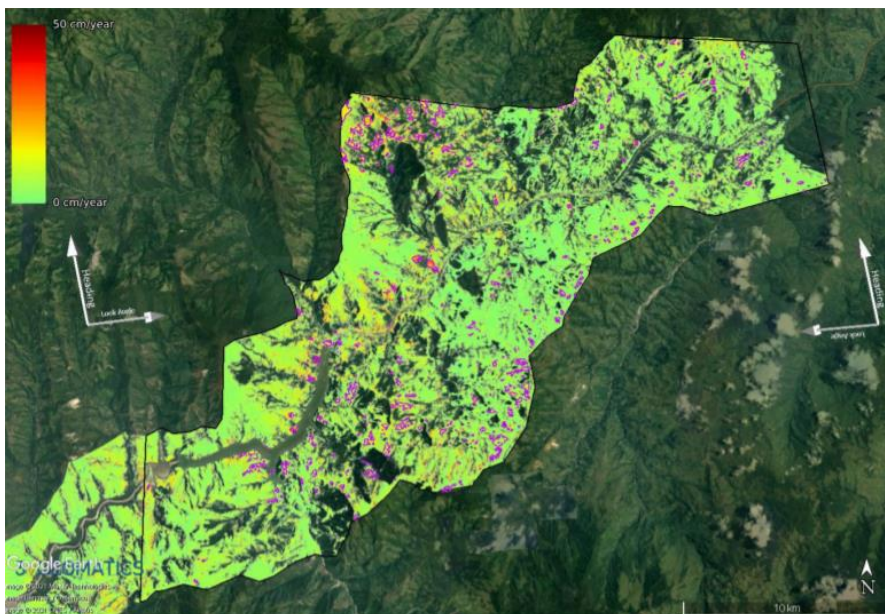


Figura 2-100 La tasa de desplazamiento absoluto sobre la presa de Ituango, a una escala de \pm 50 cm por año visto en Google Earth

Fuente: EPM

Con estos dos insumos, se correlaciona la información espacial del PHI, tales como: ortofotos, modelos digitales de elevación, KMZ, entre otros; que permiten realizar una adecuada interpretación de los datos obtenidos por el satélite, de este modo, es posible realizar un análisis interpretativo en las obras principales y las zonas circundantes al mismo e identificar las zonas críticas, en donde se presentan altas tasas de deformación.

D. Reportes generados

Dentro del marco metodológico utilizado para el análisis, se utiliza la información reportada por el proveedor (3VGeomatics) en los reportes mencionados previamente. A partir de estos, se generan los siguientes reportes desde el CMT:

- **Reporte Rápido InSAR:** este reporte se genera a partir de los datos presentados en los informes de desplazamiento utilizados para la detección y alerta inmediata de deformaciones en laderas de ocurrencia repentina o progresiva, los cuales son generados aproximadamente cada 15 días, dependiendo de la trayectoria del satélite (Ver Anexo 3). En promedio se reciben dos Rapid Report durante esta ventana de tiempo (Figura 2-101).

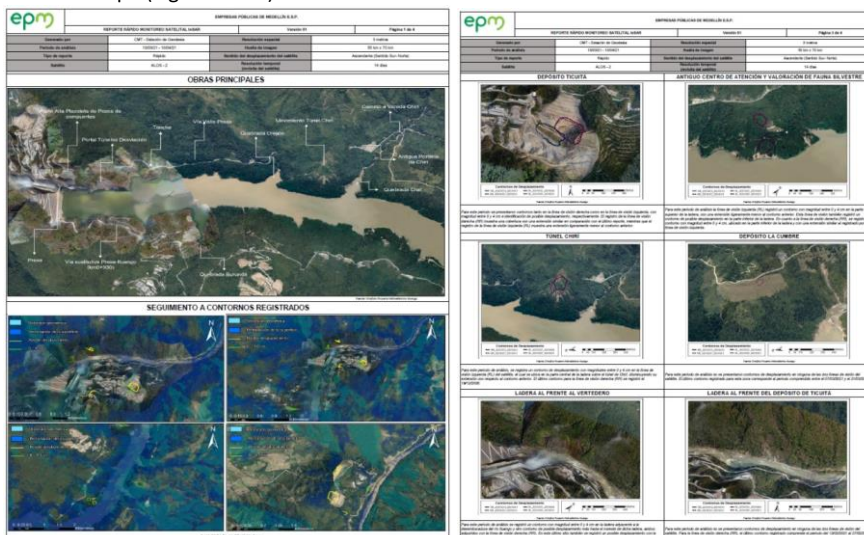


Figura 2-101 Plantilla del reporte quincenal InSAR.

Fuente: EPM

- **Reporte completo (Comprehensive Report):** Los informes completos se basan en análisis de InSAR del conjunto completo de imágenes SAR disponibles en un área de interés definida (AOI). Este enfoque, combinado con técnicas de Procesamiento avanzadas, genera decenas de millones de puntos de datos en el AOI, cada uno con mediciones de desplazamiento a través del tiempo (Ver Anexo 3). Son mediciones precisas del desplazamiento sutil, incluido el desplazamiento acumulado total durante el período analizado (Figura 2-102Figura 2-97).

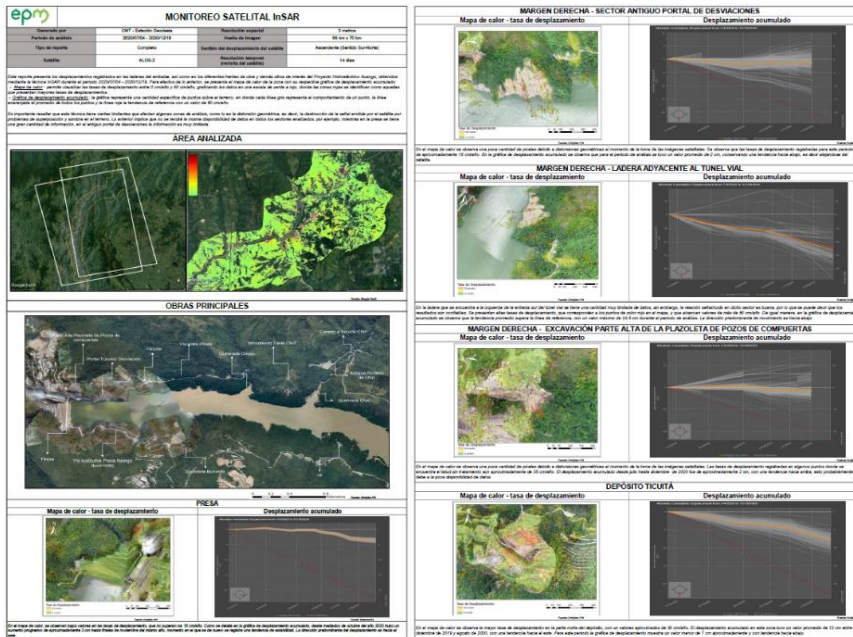


Figura 2-102 Plantilla de reporte completo IN SAR

Fuente: EPM

2.3.4.6 Instrumentación Geotécnica

Además de realizar el monitoreo continuo de las variables mencionadas hasta ahora, el personal del CMT realiza un seguimiento continuo de la instrumentación geotécnica del Proyecto, no obstante, la Asesoría es la encargada de realizar las actividades de medición, procesamiento, y quien emite las recomendaciones y alertas.

Este seguimiento se realiza con el propósito de correlacionar los resultados obtenidos en el CMT, con los resultados de la instrumentación geotécnica, de tal manera que se pueda obtener información suficiente para actuar preventivamente en caso de una eventualidad y desplegar los protocolos necesarios para velar por la seguridad de los trabajadores y las comunidades aguas abajo.

La instrumentación geotécnica y los ensayos geotécnicos, permiten realizar un monitoreo en una escala temporal amplia, permitiendo definir el estado de estabilidad de los frentes y zonas monitoreadas, en conjunto con las demás estaciones de monitoreo (CCTV, Hidrometría, Interferometría, Sismología y Geodesia).



Actualmente se tienen cerca de 2854 instrumentos, instalados desde antes de iniciar la contingencia y robustecidos posteriormente, para garantizar un monitoreo detallado. Se tienen aproximadamente 1156 instrumentos asociados a frentes u obras superficiales, como el Vertedero, Presa y obras anexas, incluyendo algunas zonas de las vías; por su parte se tienen aproximadamente 1698 instrumentos en cavernas y demás obras subterráneas. Varios de estos instrumentos se encuentran en proceso de automatización, por medio del sistema SADIGH, con el fin de tener la información en tiempo real.

2.3.4.6.1 Instrumentos:

Se utilizan instrumentos convencionales como inclinómetros, piezómetros de cuerda vibrátil y de tubo abierto, puntos de control superficial (incluyendo dianas, puntillas, prismas, etc), anillos y argollas de convergencia en cavernas, celdas de presión, celdas de asentamiento, extensómetros de posición múltiple, extensómetros magnéticos y celdas de carga, entre otros.

2.3.4.6.2 Localización:

La instrumentación geotécnica está instalada en todo el proyecto, tanto en obras superficiales como subterráneas, focalizándose mayormente en las obras principales (Presa, Vertedero, Margen Derecha, Margen Izquierda, etc.) y en las cavernas de mayor interés (Casa de máquinas, Almenaras, etc.).

La espacialización de esta información se realiza con herramientas de Sistemas de Información Geográfica, en donde se utiliza el dato de posición de cada instrumento y se estructura en Bases de Datos Geográficas para garantizar la integridad del dato. Las capas de información geográficas que se generan a partir de esta estructuración cuentan con los atributos que describen técnicamente la información de cada registro.

Posteriormente, es posible desplegar esta información a través de servicios web geográficos para la consulta en tiempo real de esta información, la cual se hace a través de diferentes aplicativos y tableros de control construidos con este fin.

Para el desarrollo de este flujo de trabajo se utiliza la plataforma geográfica ArcGIS de esri®, la cual contempla diferentes softwares y aplicaciones como ArcGIS Desktop (ArcMap y ArcGIS Pro), ArcGIS Online, ArcGIS Dashboard, Web ApplicationBuilder, Survey 123 for ArcGIS, entre otros.

En la Figura 2-103 y Figura 2-104 y, se observa la interfaz gráfica de algunas de las aplicaciones descritas previamente, en donde se visualizan la ubicación de la instrumentación a través de un mapa web y algunas estadísticas básicas de la instrumentación de las obras superficiales y subterráneas respectivamente, las cuales se generan también a partir de filtros y otras funcionalidades configuradas.



Figura 2-103. Tablero de instrumentación geotécnica superficial.

Fuente: EPM



Figura 2-104. Tablero de instrumentación geotécnica subterránea.

Fuente: EPM

2.3.4.6.3 Variables monitoreadas:

Los instrumentos monitoreados se podrían catalogar según las variables medidas, en los siguientes grupos:

- Movimiento profundo: Inclínómetros y Extensómetros de posición múltiple.
- Movimiento superficial: Prismas y Puntos de control superficial.
- Fuerza/Presión: Celdas de asentamiento, celdas de carga, celdas de presión y extensómetros magnéticos.
- Convergencia: Argollas y Dianas.
- Hidrométricos: Piezómetros de cuerda vibrátil y piezómetros de tubo abierto.

A continuación, se presentan gráficas típicas de registros de la instrumentación (Figura 2-105)

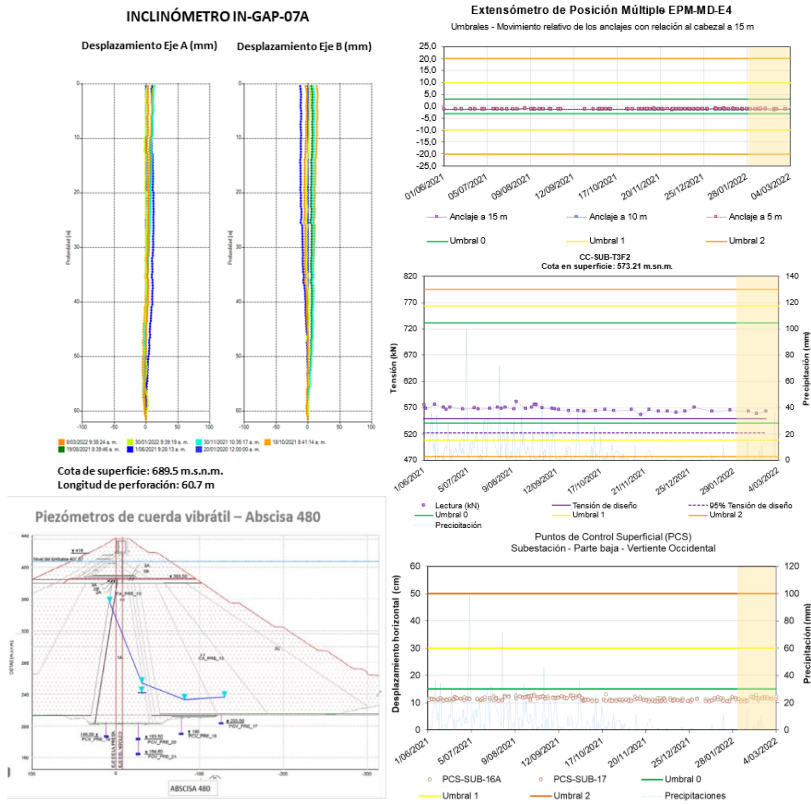


Figura 2-105. Instrumentación geotécnica PHI. A.

Fuente: EPM

El monitoreo que se realiza desde cada una de las estaciones del CMT, el seguimiento a la instrumentación geotécnica y los análisis presentados por la Asesoría por medio de los informes quincenales de la instrumentación, permite identificar los eventos relevantes, adicionalmente, es posible realizar una continua retroalimentación con los profesionales encargados de evaluar la matriz de riesgos del proyecto para mantener una actualización de la misma y ser posteriormente compartida con las entidades competentes.

2.3.4.7 Protocolo general y Sistema de Alerta Temprana

2.3.4.7.1 Protocolo general de actuación

En caso de identificar eventos relevantes en el proyecto a partir del monitoreo que se realiza desde las estaciones de Hidrometría, Interferometría, Geodesia, Sismología, CCTV, se tiene el protocolo general de actuación que se muestra en la Figura 2-106.

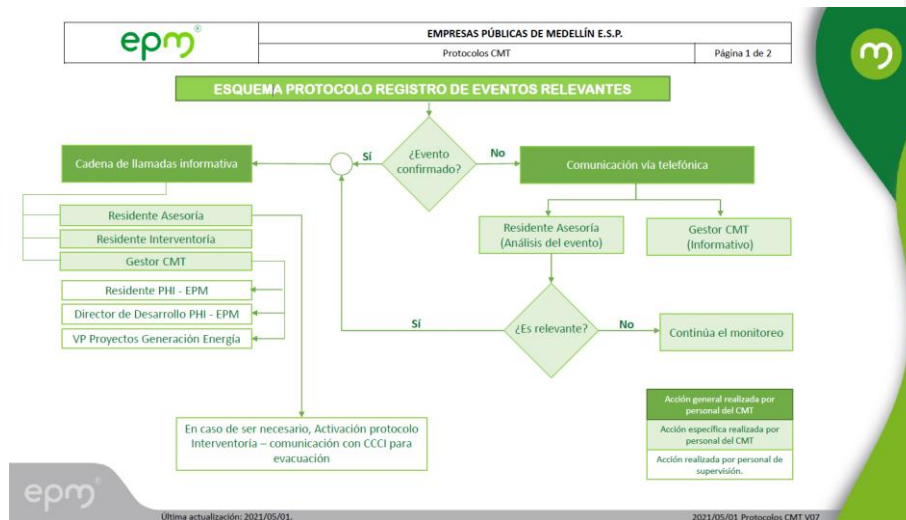


Figura 2-106. Protocolo general de actuación ante registro de eventos relevantes.

Fuente: EPM

2.3.4.7.2 Sistemas de Alerta Temprana (SAT)

El protocolo general del Proyecto Hidroeléctrico Ituango, se estableció teniendo en cuenta los escenarios de riesgo, las entidades competentes para establecer la comunicación, las medidas pertinentes, el protocolo interno del CMT y protocolos de cada empresa y entidad involucrada. (Ver Anexo 4, **Cadena de notificación general pliego 20210429**).

Comentado [NCR1]: Anexo no incluido en envío de EPM. Incluir en carpeta I-I-2194-PHI-111-AMB-PGRD-001_A16

A. Mapa de localización de los SAT

Los SAT están conformados por múltiples estaciones de sirenas de activación remota y manual ubicados en zonas estratégicas, para garantizar que las ondas sonoras lleguen hasta las vías cercanas y poblaciones vulnerables ante un escenario de riesgo asociado al Proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Se inició la instalación antes de la contingencia, en abril de 2018 y actualmente se cuenta con una amplia red, instalada con el apoyo de la Cruz Roja y el SIATA, que cubre desde la zona más al sur, el sitio de presa del PHI, Briceño, hasta la zona más al norte, en la confluencia entre los ríos Nechí y Cauca, en Nechí – Las Flores, Antioquia. Se tienen establecidos 83 SAT (Sistemas de Alerta Temprana), 100 puntos de encuentro y 269 rutas de evacuación (Figura 2-107).

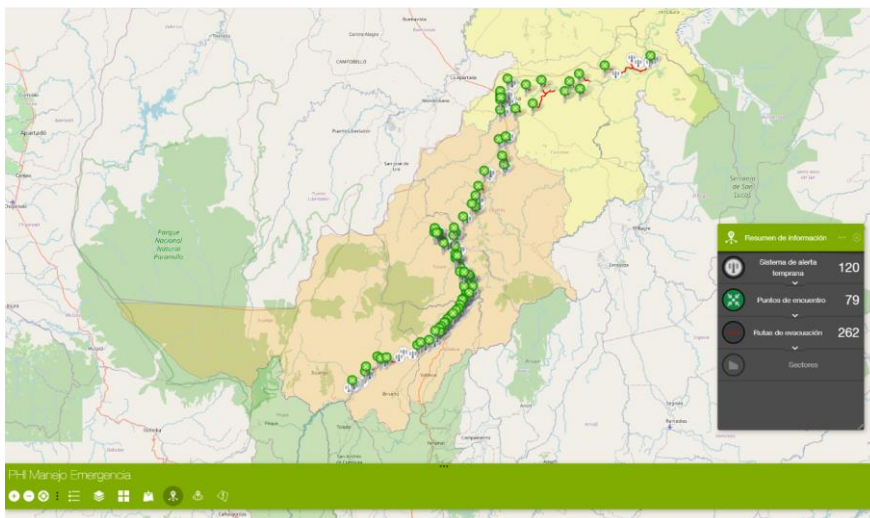


Figura 2-107. Localización de SAT, puntos de encuentro y rutas de evacuación en caso de emergencia.

Fuente: EPM

2.3.5 Información adicional para mejorar la valoración del riesgo.

Los responsables de los diferentes niveles de gestión documentarán y mantendrán actualizada toda la información de los riesgos en el sistema de información definido para tal fin y mantendrán actualizados los registros. Además, deberán comunicar los riesgos y acciones de tratamiento a todos los involucrados en el nivel de gestión.



Los responsables de los diferentes niveles de gestión documentarán y mantendrán actualizada toda la información de los riesgos en el sistema de información definido para tal fin y mantendrán actualizados los registros. Además, deberán comunicar los riesgos y acciones de tratamiento a todos los involucrados en el nivel de gestión.

2.3.6 Lecciones a partir de eventos ocurridos.

El inventario de eventos ocurridos toma como base las lecciones aprendidas, este inventario es una herramienta que permite ajustar el riesgo riesgos riesgo riesgos acordes a los antecedentes de eventos ocurridos.

La información puede ser obtenida de diferentes fuentes tales como:

- Reportes de accidentes de trabajo o investigación de los mismos.
- Reportes de choques y daños.
- Otras bases de datos existentes en la propia sede o área operacional.
- Situaciones ocurridas en la sede e identificadas como emergencias.

2.3.7 Identificación riesgos futuros.

Como resultado de la preparación del plan de gestión de riesgos se identificaron necesidades de identificación y evaluación de riesgos futuros relacionados con el cambio climático, una nueva revisión de los riesgos potenciales para la etapa de operación, así como también es pertinente complementar la evaluación de riesgos para el sector aguas arriba de la presa.