

**ASESORÍA AL CONSEJO DEPARTAMENTAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES EN EL MARCO DE LA DECLARATORIA DE CALAMIDAD PÚBLICA N°D2018070001272 DE MAYO 14 DE 2018, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN QUE REPOSA EN EL PROYECTO HIDROELECTRICO ITUANGO, CON EL FIN DE PREVENIR Y/O MITIGAR LOS POSIBLES RIESGOS O DAÑOS GRAVES E IRREVERSIBLES A LAS VIDAS, BIENES, Y DERECHOS DE LAS PERSONAS Y A LOS ECOSISTEMAS**

**CONTRATO NO. 2018-SS-26-0001**

**RESUMEN EJECUTIVO**



GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA



**PIENSA EN GRANDE**



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**MEDELLÍN, OCTUBRE DE 2018**

**RESPONSABLES DEL PROYECTO DEPARTAMENTO  
ADMINISTRATIVO DEL SISTEMA PARA LA PREVENCIÓN,  
ATENCIÓN Y RECUPERACIÓN DE DESASTRES DE LA  
GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA (DAPARD)**



**PIENSA EN GRANDE**

**Dra. Juliana Palacio Bermúdez**  
Directora DAPARD



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA**

**Ing. Emmanuel Castrillón Cardona**  
Supervisores DAPARD

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COLOMBIA**  
**SEDE MEDELLÍN**

**Verónica Botero Fernandez**  
Ing. Civil, PhD  
Decana Facultad de Minas

**EQUIPO DE PROFESIONALES**

**LiLian Posada García**  
Ing civil, PhD  
Directora

**Navid Mojtabai, PhD**  
Professor, Department Chair Mineral Engineering  
New Mexico Institute of Technology and Mining  
Experto Internacional túneles y estabilidad de taludes

---

Asesoría al Consejo Departamental de Gestión del Riesgo de Desastres, en el marco de la declaratoria de calamidad pública No.D2018070001272 de mayo 14 de 2018, mediante el análisis de la información técnica que reposa en el proyecto hidroeléctrico Ituango, con el fin de prevenir y/o mitigar los posibles riesgos o daños graves e irreversibles a la vida, bienes y derechos de las personas y a los ecosistemas.

**Jaime Ignacio Vélez Upegui**  
Ing. Civil, PhD

**Gabriel Alfonso Rosado Cantillo**  
Ingo. Civil, MSc

**Santiago Pérez Ospina**  
Ing. Minas y Metalurgia, PhD

**Edward Julián Sánchez Trujillo**  
Ingo. Civil, MSc (c)

**Alvaro Castro Caicedo**  
Ing. Minas y Metalurgia, PhD

**Johan Ferney Tobón Agudelo**  
Ingo. Geólogo, Msc (c)

**Adrian Augusto Perpiñan Guerra**  
Ing. Ambiental y Sanitario, Msc, PhD (c)

**María Ligia Blanco Velásquez**  
Ingeniera Sanitaria, MSc (c)

**Cesar Julio Rodríguez**  
Ing. Geólogo, experto en Geomorfología

**Mario Enrique Lara Ocampo**  
Ingo. Geólogo, Msc (c)

**Jose Efrén Ortiz**  
Ing. Minas y Metalurgia, experto en  
voladuras

**Juan Fernando Urrea López**  
Ingo. Civil

**Alexandra Gómez Escobar**  
Inga. Geóloga, MSc

**Luis Alfredo Berrio Martínez**  
Ingo. Ambiental

**Andres Felipe Uribe Santa**  
Ingo. Civil, MSc

**Luis Frey Zapata Henao**  
Arquitecto

**Javier Valencia Gallego**  
Ingo. Civil, Especialista en Hidráulica

**Andrés Tabarez Chavarriaga**  
Abogado

**Ludger Suarez Burgoa**  
Ing Civil, PhD

Octubre de 2018

## GLOSARIO

**Carga cíclica:** aquella carga que no alcanza al punto de ruptura de los materiales pero que se repite durante periodos de tiempo.

**Cavitación:** es un efecto hidrodinámico que ocurre cuando un líquido, bajo ciertas condiciones, pasa a estado gaseoso y unos instantes después pasa nuevamente a estado líquido. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implosionan produciendo una estela de gas de gran energía sobre una superficie sólida que puede resquebrajar en el choque.

**Cizalla:** tipo de fractura o falla de materiales que corresponde a una deformación generada bajo condiciones dúctiles o dúctiles-frágiles. Zona de alta fracturación en un macizo rocoso.

**Desabombe:** Operación del ciclo de construcción de túneles consistente en la remoción por medios mecánicos o manuales de los bloques de roca o fragmentos remanentes de las voladuras que permanecen en el contorno excavado, esta operación se hace con el fin de definir mayor estabilidad.

**Dovela:** elemento constructivo en forma de arco.

**E:** símbolo para el punto cardinal este.

**E-W:** indica la dirección de cualquier estructura geológica en dirección este-oeste.

**Foliación:** es la disposición en láminas que adquiere una roca cuando ha sido sometida a grandes presiones durante el metamorfismo.

**Geological Stress Index (GSI).** Sistema de clasificación cuantitativo de la calidad de macizos rocosos asociado a la fracturación, meteorización y rugosidad de las discontinuidades.

**Gneis:** roca metamórfica formada en un proceso de metamorfismo regional.

**Gradación:** la proporción de tamaños en que se encuentran los distintos tamaños de partículas presentes en los suelos.

**Hastial:** uno de los nombres que se le asigna a la pared o lateral de los túneles.

**Módulo de deformación:** Medida de la rigidez. Es la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en un cuerpo sólido. Es uno de los parámetros que caracteriza el comportamiento de un material en el rango elástico.

**Peso específico:** es la relación que existe entre el peso y el volumen de los elementos.

**Presurizar:** mantener constante la presión en un espacio cerrado.

**Q de Barton.** Sistema de clasificación geomecánica de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos para túneles.

**Qls:** depósito de deslizamiento; la Q, indica el periodo Cuaternario que es una división de la escala temporal geológica.

**Qz-** abreviatura del mineral cuarzo.

**Reflexión:** fenómeno físico que ocurre cuando las ondas que viajan en un medio inciden sobre una superficie y se regresan al medio formando un ángulo igual al ángulo de incidencia.

**Refracción:** cambio de velocidad y dirección que experimentan las ondas al pasar de un medio a otro con propiedades diferentes.

**Resistencia a la compresión:** esfuerzo máximo que soporta una probeta de roca o suelo en un ensayo de compresión uniaxial en laboratorio siguiendo procedimientos estandarizados en normas.

**ROV:** Remotely Operated Vehicle – vehículo operado remotamente.

**Shotcrete (concreto lanzado):** sistema de colocación de mortero de cemento, fibras de refuerzo y/o aditivos que se aplica por lanzamiento neumático a través de un conducto que proyecta la mezcla sobre la superficie de suelos, roca o de elementos de soporte.

**Sinkhole (chimenea, sumidero):** cavidad o depresión de dirección verticalizada en el terreno que generalmente es causada por la erosión del agua o por el colapso de la capa superficial del suelo o roca.

**W:** es el símbolo para el punto cardinal del oeste.

# 1 RESUMEN EJECUTIVO

## 1.1 INTRODUCCION

A raíz de la contingencia generada en el Proyecto hidroeléctrico Ituango desde el día 28 de abril de 2018 y ante las situaciones anormales no consideradas en los planes de Contingencia, se tuvieron que implementar medidas no contempladas en los diseños (por ejemplo, permitir el flujo de agua por casa de máquinas, destrucción del tapón definitivo del túnel de desviación izquierdo, etc.); se tomaron decisiones sobre la marcha de acuerdo al ritmo que los procesos fueron generando (cambios en los diseños – por ejemplo el lleno prioritario y la pantalla corta-flujo en la presa); se dejaron de realizar otras actividades previstas (remoción de la capa boscosa en el embalse), etc.



Figura 1.1. Distintas etapas de la construcción del proyecto hidroeléctrico Ituango (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

Todo esto generó un mundo de interrogantes para la comunidad en general, que no alcanzaba a entender lo que mostraban los medios de comunicación, lo que vivían y viven las personas reubicadas en los albergues, las dificultades de movilidad de la población que transita por las vías del proyecto, afectadas por la contingencia. Pero

más incertidumbre generó en las entidades responsables de la gestión del riesgo de desastres (DAPARD) y en los dueños del proyecto la falta de información oportuna y acorde con la situación de día a día, dadas las dificultades crecientes que se presentaban para el manejo de la contingencia.

El gobernador de Antioquia, Dr. Luis Pérez Gutiérrez, decretó la calamidad pública el día 14 de mayo de 2018, después de la inundación de Puerto Valdivia que arrasó con un puente y amenazaba con la destrucción de viviendas e infraestructura de las localidades ubicadas aguas abajo de la presa. Ante este decreto de calamidad pública, la Facultad de Minas de la Universidad Nacional fue llamada a colaborar con el DAPARD, asesorando a los profesionales de la gobernación sobre los aspectos técnicos que conlleva la contingencia y las medidas que se iban implementando sobre la marcha.

El 7 de junio de 2018 se firmó el Contrato No. 2018-SS-26-0001, entre el DAPARD y la Universidad Nacional, sede Medellín, que tenía una duración de dos meses y cuyo objeto es:

ASESORÍA AL CONSEJO DEPARTAMENTAL DE GESTIÓN DEL RIESGO Y PREVENCIÓN DE DESASTRES, EN EL MARCO DE LA DECLARATORIA DE CALAMIDAD PÚBLICA No. D2018070001272 DE MAYO 14 DE 2018 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA QUE REPOSA EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO, CON EL FIN DE PREVENIR Y/O MITIGAR LOS POSIBLES RIESGOS O DAÑOS GRAVES E IRREVERSIBLES A LAS VIDAS, BIENES Y DERECHOS DE LAS PERSONAS Y A LOS ECOSISTEMAS.

Para lograr los objetivos del contrato, la Universidad estaba limitada a la información que se podía ir recopilando durante las visitas al sitio de las obras, además de la información que se solicitó a los diseñadores del proyecto (Integral, S.A.), a los interventores (INGETEC-SEDIC, LTDA.), a los constructores (Consortio CCC) y a Empresas Públicas de Medellín, EPM, como directo responsable del proyecto.

La información fue canalizada a través del DAPARD y la fluidez no fue la más efectiva debido a la cadena establecida para la entrega (Universidad – DAPARD- Integral o grupo dueño de la información – EPM – DAPARD- Universidad). A pesar de eso, se pudo obtener un gran volumen de información muy útil, pero se quedaron muchos documentos importantes solicitados al DAPARD que no lograron llegar al grupo asesor

de la Universidad para su análisis oportuno. A continuación se presenta un resumen de los productos finales del contrato.

## 1.2 ANTECEDENTES

El río Cauca fue desviado a través de los dos túneles de desviación izquierdo y derecho el 17 de febrero de 2014. Todo el caudal del río Cauca estuvo pasando a través de ellos durante casi cuatro años, hasta cuando se decidió cerrarlos con tapones de concreto (pretapones), ya que no contaban con compuertas de cierre. Primero se cerró el túnel izquierdo (Octubre de 2017) y luego el derecho (marzo de 2018). Cuando se decidió el cierre de los túneles se implementó una Galería Auxiliar de Desviación GAD. Para esta galería se aprovechaba un túnel de descarga de las turbinas (el número 4) que se conectaba a una nueva galería. La nueva galería, con el portal de entrada a 0,2 m por debajo de la cota de los túneles de desviación y unos cientos de metros aguas arriba de los mismos, contaba con compuertas de cierre de desviación y con un conducto con compuerta que podría funcionar como descarga de fondo. La GAD fue terminada y puesta en servicio en septiembre de 2017.

En octubre de 2017 se cerró el ingreso del agua al Túnel de Desviación Izquierdo (TDI), para la construcción de los pretapones de concreto (entre 6 y el 12 octubre ramal 1 y del 12 al 20 ramal 2) y posteriormente del tapón definitivo que fue entre el 13 de noviembre de 2017 y 18 de enero de 2018. Del 3 al 28 de febrero se construye el pretapón del ramal 3 (TDD); desde el 15 febrero se inició el cierre del ramal 4 de entrada del Túnel de Desviación Derecho (TDD) el respectivo pretapón se terminó el 18 de marzo de 2018. A partir del 28 de febrero 2018, la Galería Auxiliar de Desviación (GAD) opera como único túnel de desviación del río.

Las lluvias constantes del mes de abril (Figura 1.2) con sus caudales asociados, generaron deslizamientos en las laderas del cañón del río Cauca, aguas arriba de la presa, donde se estaba ejecutando la remoción masiva del material vegetal que cubría las empinadas laderas de la zona a embalsar por la represa de Ituango. El material vegetal removido y apilado para ser trasladado a su destino final fue transportado por las crecientes del Cauca hacia el sitio de presa (Figura 1.3). En la margen derecha de la presa, también se presentaron deslizamientos (Figura 1.4) del macizo rocoso en la zona de los portales de los túneles de desviación (probablemente activados por el desconfinamiento de la base del talud y/o por el aumento acelerado del nivel del

embalse) que obstruyeron el flujo del agua hacia los túneles y galerías. Por consiguiente, el embalse empezó a llenarse en forma imprevista y anticipada.

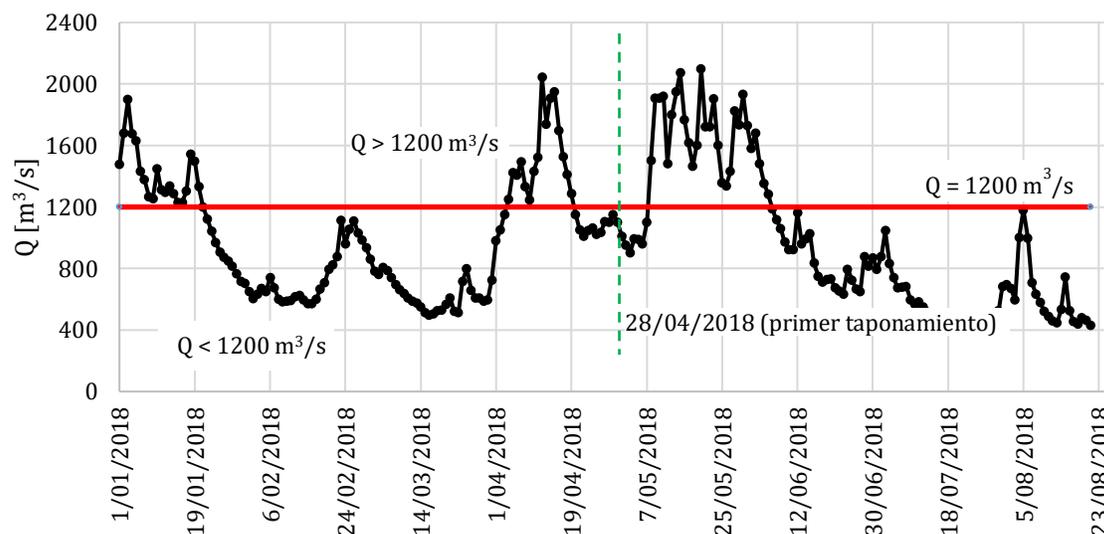


Figura 1.2. Registro de caudales en la estación Olaya (río Cauca) desde el mes de enero hasta el mes de agosto de 2018 (elaboración propia).

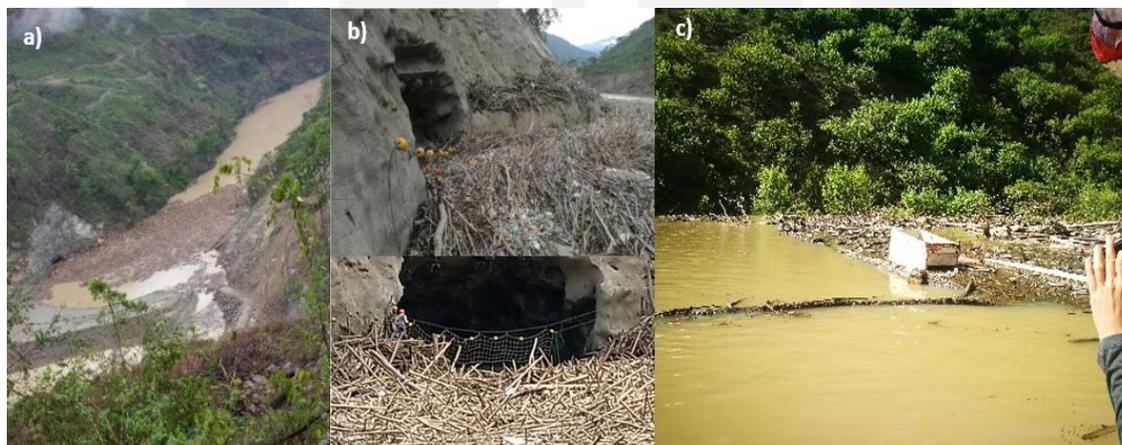


Figura 1.3. Residuos sólidos flotantes identificados en cercanías de la GAD: a) Zuleta, 2018, b) Múnera, 2018) y c) el embalse, autoría propia, mayo 2018.

A medida que el nivel del embalse aumentaba (llegó a 262.15 msnm el 13 de abril) por los caudales crecientes del río, el túnel GAD estaba evacuando un caudal mayor al de diseño ( $1.785 \text{ m}^3/\text{s}$ ), lo cual permite suponer que ya para estas fechas se estaba deteriorando el túnel GAD.



Figura 1.4. Deslizamiento del 21 de abril de 2018 (aproximadamente 25000 m<sup>3</sup>) sobre el portal de entrada de la descarga intermedia

El 28 de abril, el nivel del embalse estaba descendiendo (239,4 msnm; equivalente a una carga hidráulica de 19,6 m sobre la GAD); aun así, el túnel seguía trabajando a presión y estaba fluyendo un caudal de 1.248 m<sup>3</sup>/s. Hacia las 21:00 horas, la GAD presenta un taponamiento y el nivel del embalse comienza consecuentemente a aumentar hasta la cota 277,98 msnm cuando se destapona en forma súbita el día 29 de abril a las 20:00 horas (Q=2.086 m<sup>3</sup>/s) y el 30 de abril hacia las 12:30 horas colapsa el techo de la galería a unos 150 m de la entrada, formando un sumidero (sink hole o chimenea, Figura 1.5) que llega hasta la superficie de la ladera sobre el túnel.

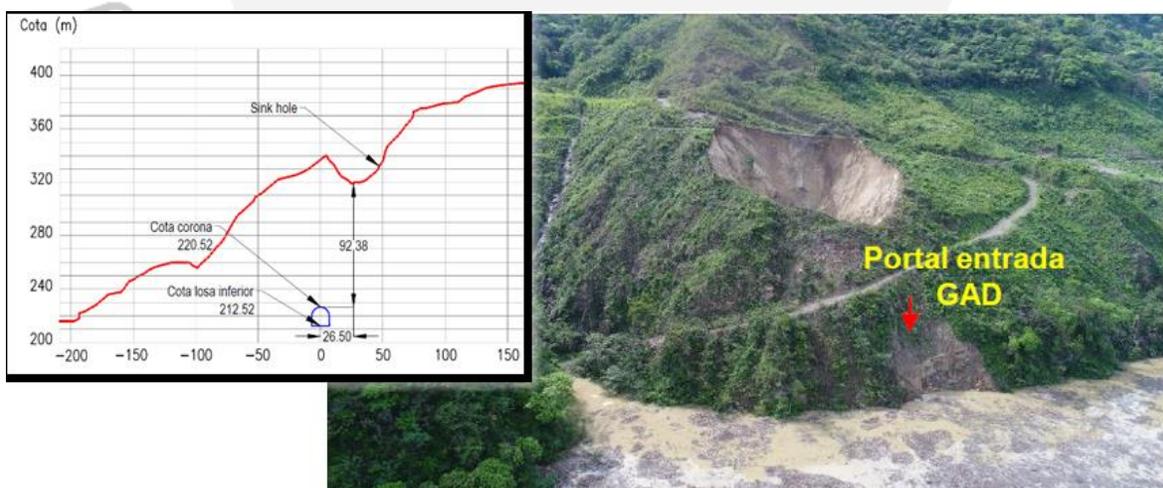


Figura 1.5. Vista de la chimenea o sumidero en la ladera cercana al portal de la GAD, el 30 de abril de 2018 (INGETEC-SEDIC, 2018). A la izquierda se muestra el perfil del terreno donde se ubica la chimenea, entre cotas 320 y 385 msnm.

Este suceso ocurre en un momento en que no se había terminado de conformar la presa (solo se había alcanzado el nivel 385 msnm); el vertedero estaba sin terminar (la cota de piso del vertedero excavado en la roca es la 401 msnm, pero faltaba terminar los canales de evacuación, colocar las compuertas); se había cerrado definitivamente el túnel de desviación izquierdo (TDI) y aun no se cerraba el (TDD) túnel de desviación derecho (solo tenía los pre tapones para facilitar los trabajos de construcción de un tapón en concreto similar al que ya se había colocado en el TDI) y; el túnel GAD (Galería auxiliar de desviación) ya estaba funcionando bien desde septiembre de 2017 y fue diseñado para evacuar 1.200 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, este túnel estuvo funcionando como único conducto de desviación después de que se taparon los túneles de desviación izquierdo y derecho. Esta galería ya tenía las compuertas de cierre instaladas y también estaban listas las galerías auxiliares de acceso para facilitar el cierre cuando estaba previsto.

El 7 de mayo se presentó un deslizamiento que cubrió los portales de entrada 1, 2 y 3 de los túneles de desviación. En ese momento el túnel de desviación derecho solo tenía los pre-tapone en los portales 3 y 4. El 9 de mayo, cuando el nivel del agua en el embalse alcanzó la cota de 340 msnm (114 m sobre el portal del túnel de desviación derecho), este se destaponó el TDD en forma natural, por un lapso de dos horas y se volvió a tapar en la misma forma.

El 12 mayo 2018 el TDD se destaponó en forma súbita y, aguas abajo, el río Cauca alcanzó un caudal arrasador de unos 6.000 m<sup>3</sup>/s ocasionando la destrucción de edificaciones y de un puente en puerto Valdivia. La mayor parte de este flujo era procedente del TDD y el resto procedente de la casa de máquinas (que ya había sido inundada desde el 10 de mayo). El gran flujo se mantuvo por unas cuatro horas, después de las cuales el caudal procedente del TDD se reduce a un rango entre 5 y 20 m<sup>3</sup>/s, lo que evidencia su obstrucción

Analizando los registros de caudal en el río Cauca (entre 1984 y 2013), se encuentra que en el mes de abril se han presentado caudales máximos anuales que van desde 625 m<sup>3</sup>/s hasta 3.512 m<sup>3</sup>/s (Figura 1.6) con un valor promedio de 1.556 m<sup>3</sup>/s que supera el valor del caudal de diseño de la GAD (1.200 m<sup>3</sup>/s). Los registros históricos muestran que durante el mes de abril en todos los años de registro, los caudales diarios que son mayores al caudal de diseño de la GAD (1.200 m<sup>3</sup>/s), tienen en la muestra una frecuencia relativa del 41,1%, lo que significa que el caudal de diseño tiene un 41,1%

de probabilidad empírica de ser excedido durante el mes de abril. Con base en lo anterior, la decisión de dejar trabajando solamente la GAD, sin la ayuda de otro túnel, termina siendo una decisión muy arriesgada.

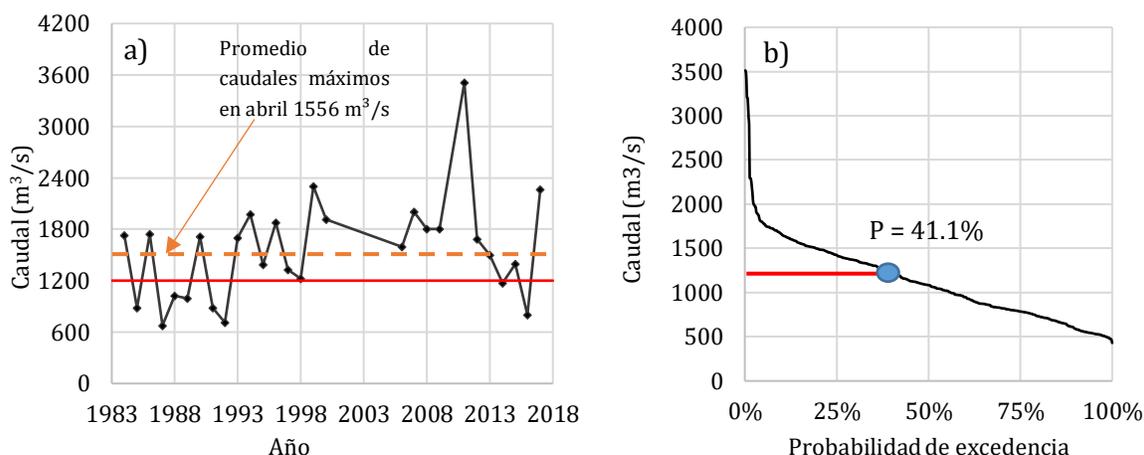


Figura 1.6. Registro de caudales en el río Cauca en el mes de abril, estación Olaya; a) Caudales máximos anuales, b) curva de excedencia de caudales en el mes de abril (Fuente: equipo técnico UNAL, 2018).

Inmediatamente se empezaron a ejecutar las medidas de contingencia propuestas por el diseñador INTEGRAL, S.A., los asesores de EPM, Interventoría y el grupo constructor. Estas medidas se resumen en **controlar el nivel del embalse, terminar el vertedero y continuar la construcción de la presa** hasta alcanzar un nivel por encima del piso de vertedero para que el flujo de entrada al embalse pudiera ser evacuado a través del vertedero.

## 1.3 MEDIDAS DE CONTINGENCIA

### 1.3.1 CONTROL DEL NIVEL DEL EMBALSE

El plan establecido para llenar el embalse era cerrar los túneles de desviación cuando la presa estuviera por encima de la cota 370 y dejar que el río escurriera solamente por el SAD (se contaba con que la presa estuviera terminada antes de que llegara el periodo de aguas altas en el río Cauca); por tanto, se cerraron los túneles de desviación izquierdo y derecho y el flujo del río fluyó continuamente por el SAD hasta que se presentó la emergencia (cuando el embalse estaba en la cota 248,25 msnm !!!).

El diseño del proyecto cuenta con cuatro conductos de desviación del flujo del río Cauca: Túnel de desviación izquierdo (TDI), túnel de desviación derecho (TDD), Galería Auxiliar de desviación (GAD) y túnel de descarga intermedia (DI). Las principales características de los túneles de desviación son:

TDI y TDD (Figura 1.7)

- Cota de entrada: 213 msnm.
- Cota de salida: 210 msnm
- Sección con forma de herradura modificada de 14 m x 14 m
- Capacidad de flujo 4.600 m<sup>3</sup>/s.
- Longitudes 1.115 m (TDI) y 1.322 m (TDD)
- Dos bocas de entrada para cada túnel, cerradas con pretAPONES.
- Un tapón definitivo en concreto (tapón No.9, en TDI), a sección completa, de 22 m de largo, cerca de la intersección con el eje central de la presa.
- Operaron en forma continua desde septiembre 2014
- TDI se cierra definitivamente en octubre 2017.
- TDD se colocan pretAPONES en marzo 2018, apertura súbita y colapso en mayo 2018.

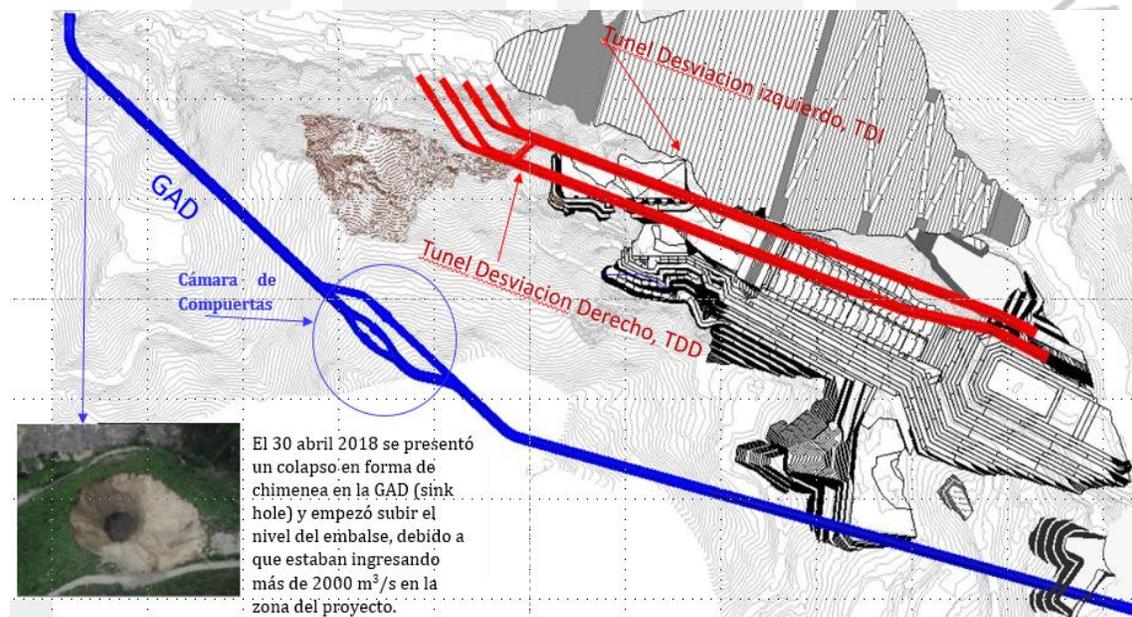


Figura 1.7. Localización túneles de desviación TDI, TDD y Sistema Auxiliar de desviación, SAD, propuesto y aprobado (Adaptado de OBRAS SUBTERRÁNEAS PLANTA Y 3D\_31\_05\_2018, EPM).

Galería Auxiliar de desviación, GAD (Figura 1.7).

- Cota de entrada: 212,84 msnm.
- Cota de salida: 207,0 msnm
- Sección abovedada de 14 m x 14 m
- Sistema de compuertas de guarda y de cierre en sección reducida de 7 m x 14 m
- Longitud total del sistema SAD (desde el embalse hasta la descarga en el río Cauca): 2.269,24 m, incluyendo los 124,0 m de los ramales
- Caudal de diseño (capacidad): 1.200 m<sup>3</sup>/s.
- Opera en forma continua desde septiembre 2017, simultáneamente con TDI y TDD
- Opera como único conducto de desviación desde febrero 28 de 2018
- Colapsa el 30 de abril de 2018.

Descarga intermedia, DI.

- Cota de entrada: 260 msnm
- Cota de salida: 257.8 msnm
- Longitud del túnel: 884 m
- Sección abovedada de 8 m x 8 m hasta aproximadamente el eje de la presa, (K0+444) seguida de una sección dividida en dos vanos de 3.0 m x 3.9 m para albergar compuertas de guarda planas y compuertas radiales, en cada vano.
- Sección aguas abajo de las compuertas provista de aireadores
- Capacidad de flujo 450 m<sup>3</sup>/s.
- Estructura de entrada provista de una reja de vigas y columnas de concreto reforzado, con aberturas de 1,15 x 1,15 m para evitar la entrada de troncos de árboles u otros elementos que puedan obstruir las compuertas.

El colapso y taponamiento de la GAD causa un llenado del embalse de forma anticipada e imprevista. Para el vaciado del embalse, se consideraron inicialmente tres alternativas:

- Plan A. Destrucción de los tapones y habilitar el túnel de desviación izquierdo.
- Plan B. Habilitar la descarga intermedia en caso de que el plan A no fuera satisfactorio
- Plan C. Evacuación de las aguas embalsadas a través de la casa de máquinas.

### 1.3.1.1 Plan A. Destrucción de los tapones para habilitar el túnel de desviación izquierdo.

La primera decisión fue romper el tapón del túnel izquierdo (tapón No. 9) para dejar pasar el caudal del río Cauca hacia aguas abajo de la presa, pero no se logra ese objetivo y las aguas continúan llenando el embalse con el riesgo de que llegue primero el nivel a la parte alta de la presa sin que se termine el vertedero y sin que se llegue a la cota del vertedero.

Con el fin de habilitar un camino para el vaciado del embalse, se decidió destruir el tapón de concreto del túnel de desviación izquierdo, TDI, cuyas dimensiones eran 14x14x22 m. Entre el 03 y el 12 de mayo de 2018 se realizaron voladuras para tratar de destruir el tapón No. 9, las cuales no fueron exitosas, principalmente por falla en las relaciones diámetro de barreno vs avance de la perforación (Figura 1.8). A raíz de este diseño se presentaron cargas instantáneas de aproximadamente 70 kg, que pudieron afectar el macizo rocoso y obras cercanas al lugar de dicha voladura (Figura 1.9). La Figura 1.10 muestra el resumen de las voladuras del tapón No. 9 del TDI.

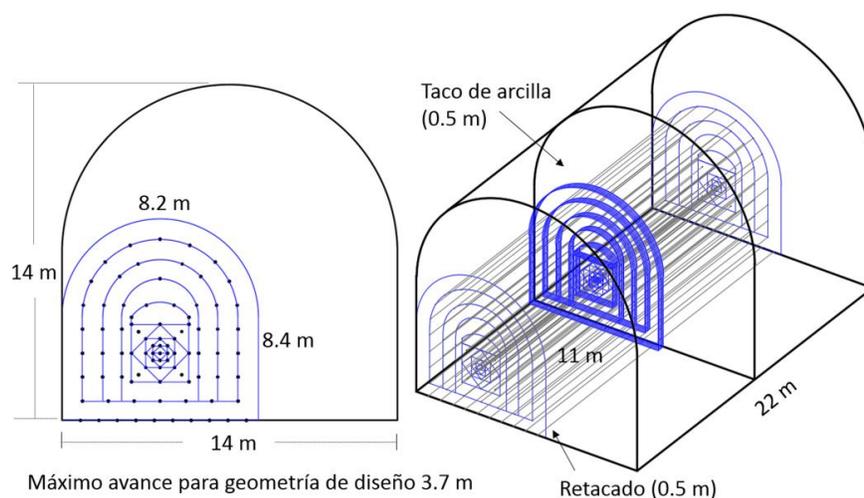


Figura 1.8. Diseño de voladuras para destruir el tapón No. 9 del TDI (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

El 10 de mayo EPM fue necesario inundar casa de máquinas puesto que la descarga intermedia no estaba terminada y no se logró avanzar con las voladuras del tapón No. 9 del TDI. El 12 de mayo se suspenden los trabajos de apertura del tapón No.9 del túnel

izquierdo, debido a que presentaba inundación dentro del túnel por el destaponamiento del TDD.

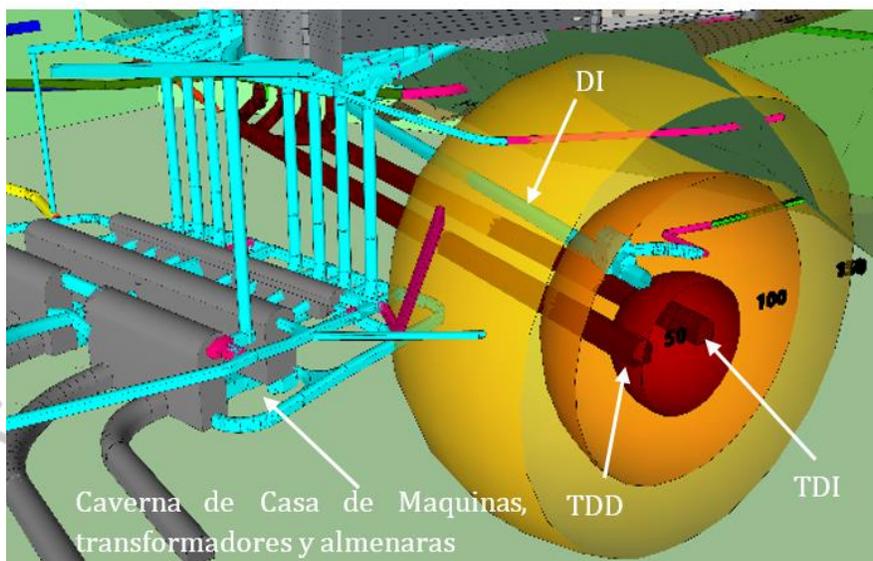


Figura 1.9. Radio de afectación de las voladuras del tapón No. 9 del TDI (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

NUMERO DE VOLADURA	FECHA DE EJECUCION	TURNO	MAXIMA CARGA INSTANTANEA		DISTANCIA ESCALADA PERMITIDA	CALCULO DE DISTANCIA SEGURA SIN DAÑOS POR VIBRACION (METROS)	NOTAS
			KILOS EMULIND - E	LIBRAS EMULIND - E			
1	Mayo 6 de 2018	Diurno	74	164	50 (ver nota abajo)	197	Fronton derecho. Se sopla. Avance 0,80 m
1A	Mayo 7 de 2018	Diurno	41	89	50 (ver nota abajo)	144	Reperforacion fronton derecho. 2,65m avance
2	Mayo 7 de 2018	Nocturno	73	160	50 (ver nota abajo)	193	Voladura fronton derecho. 2,0 m avance
3	Mayo 8 de 2018	Diurno	41	89	50 (ver nota abajo)	144	Voladura fronton izquierdo. Uso de "pachas". Avance 2,60 m
4	Mayo 9 de 2018	Nocturno	54	119	50 (ver nota abajo)	166	Se suspende cargue de voladura por destaponamiento súbito del tunel derecho ( 11:45 p.m hasta las 14:30 a.m. del 10 de Mayo). Se inunda parcialmente el tunel izquierdo. La voladura se hace en el turno diurno del 10 de Mayo con ayuda una lancha La voladura se sopló
4 Requema	Mayo 11 de 2018	Diurno					Frontón izquierdo. Avance 2,50 m
6	Mayo 12 de 2018	Diurno	Se suspende cargue a las 14:00 horas. Se evacúa el personal y se hace cierre total del frente				Piloto zona de bóveda

por destaponamiento súbito del tunel derecho que genera inundación del tunel izquierdo

Figura 1.10 Resumen de voladuras realizadas en el tapón No.9 del túnel de desviación izquierdo (Fuente: INGETEC-SEDIC, 2018).

Hasta el 22/10/2018 los túneles GAD y derecho se encontraban taponados pero prevalece, en ambos, el riesgo de destaponarse. Exploraciones realizadas (finales de agosto y septiembre) desde el túnel descarga intermedia hacia el TDD han encontrado

que el túnel no se encuentra presurizado y se han hecho inyecciones de un concreto especialmente preparado para el sello rápido pero no se ha tenido éxito. Se sigue en el trabajo de sellar ese túnel.

### 1.3.1.2 Plan B. Habilitación de la descarga Intermedia

La descarga intermedia está constituida por un túnel de unos 884 m de longitud, con un ancho de 8 m, paredes rectas de 4 m y bóveda semicircular de 4 m de radio (Figura 1.11). En un punto intermedio del túnel (K0+444), el túnel se divide en dos vanos de 3,00 x 3,90 m en los cuales se instalaron cuatro compuertas, dos radiales y dos planas de guarda.

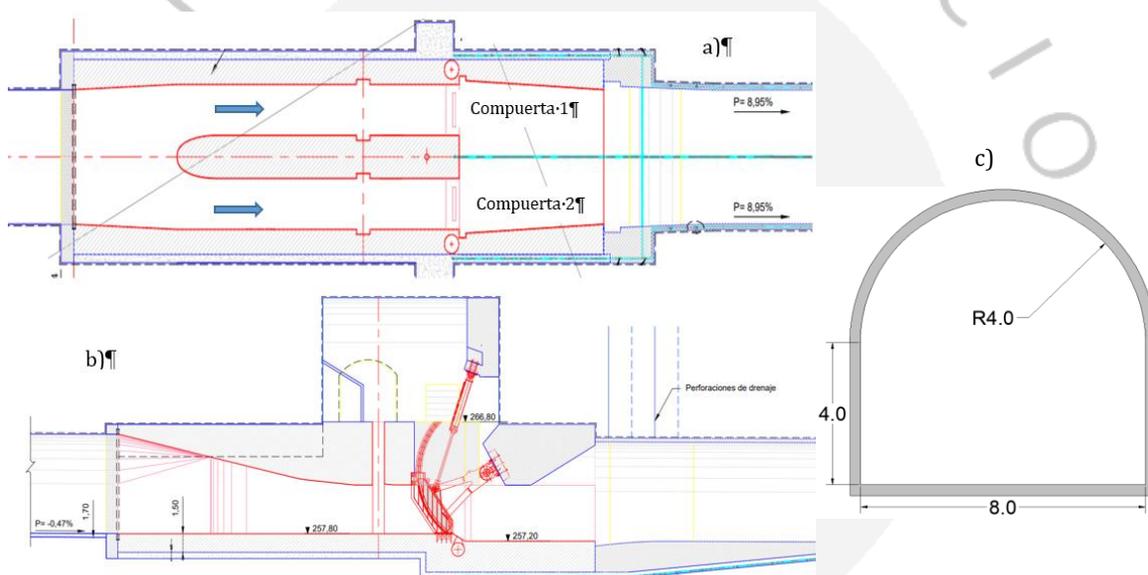


Figura 1.11. Túnel de descarga Intermedia. Cámara de compuertas. a) Vista en perfil, b) Vista en planta, c) sección transversal túnel antes de las compuertas (fuente: INTEGRAL S.A, 2018).

Para la descarga intermedia inicialmente el caudal de diseño era de 300 m<sup>3</sup>/s, y ante el requerimiento de la autoridad ambiental de un caudal de 450 m<sup>3</sup>/s, el diseñador evaluó la estructura dimensionada previamente y consideró que con algunos ajustes era adecuada para un nuevo caudal de diseño.

Se tenía contemplado que la descarga Intermedia operara durante la etapa de llenado del embalse y, además, podría ser utilizada durante la operación del proyecto en circunstancias eventuales, como por ejemplo cuando la central saliera de operación y el nivel del embalse se encontrara por debajo de la cresta del vertedero, evento en el

cual la única manera de evitar que el cauce del río Cauca quedara seco, aguas abajo de las obras, sería abrir la descarga Intermedia (se tenía previsto clausurar la descarga de fondo una vez se llenara el embalse).

El túnel de descarga intermedia no estaba completamente adecuado cuando se presentó la emergencia: tenía una compuerta plana anterior a la posición de la compuerta radial.

Se hizo el chequeo hidráulico del túnel DI por tramos separados que obedecen a las distintas condiciones de flujo (libre y a presión) que tendrán lugar en el conducto, así: en los primeros 444 m (antes de llegar a la compuerta radial, sección abovedada de 8.0 m x 8.0 m) el túnel trabajará a presión; después de las compuertas, el flujo será libre (Figura 1.11). En la zona de compuertas el túnel DI presenta una contracción a 3,0 m x 3,9 m.

Se consideraron tres escenarios de trabajo, todos con el nivel del embalse en la cota 406 msnm y en la salida del túnel DI en la cota 257,8 msnm:

- 1) Escenario 1: Flujo en el túnel con una sola compuerta abierta totalmente. Caudal aproximado de 576 m<sup>3</sup>/s, que desarrolla velocidades en el tramo a presión de 10,1 m/s y en el tramo libre, contiguo a las compuertas, velocidades de 49,2 m/s, (que son sumamente grandes y altamente erosionables). Estas altas velocidades obligan a un cambio de régimen, lo que significa que se vuelve a presurizar en el tramo final, para lo cual no fue diseñado.
- 2) Escenario 2: Flujo en el túnel con dos compuertas abiertas totalmente. Caudal aproximado del orden de 1.024 m<sup>3</sup>/s, que desarrollaría velocidades de 18 m/s (extremadamente alta) en el primer tramo y velocidades superiores a 43 m/s (extremadamente alta) justo al dejar la contracción (zona de compuerta).
- 3) Escenario 3: Flujo en el túnel solo con el caudal ecológico. Se calculó la apertura requerida de las compuertas para dejar pasar el caudal ecológico de 450 m<sup>3</sup>/s y se obtuvo una altura de 1,5 m. Con base en el informe D-PHI-ADM-C0314-Lote\_4-3, se obtuvo que el ángulo de la compuerta radial es de 60°, por lo tanto, el coeficiente de contracción es 0,66. Los resultados de la simulación del flujo indican que, a 246 m de la salida de la zona de compuertas, el flujo formaría un resalto hidráulico, que impactaría la cúpula del túnel. En la Figura 1.12 se observa el perfil longitudinal del flujo, con relación a la altura del muro vertical (4.0 m) y de la cúpula del túnel.

*Bajo las condiciones del proyecto en ese momento, no se podía abrir la descarga intermedia porque aún faltaban algunas obras de recubrimiento en los túneles y elementos de soporte y blindaje en la zona de compuertas, aún no se tenía la compuerta de control.*

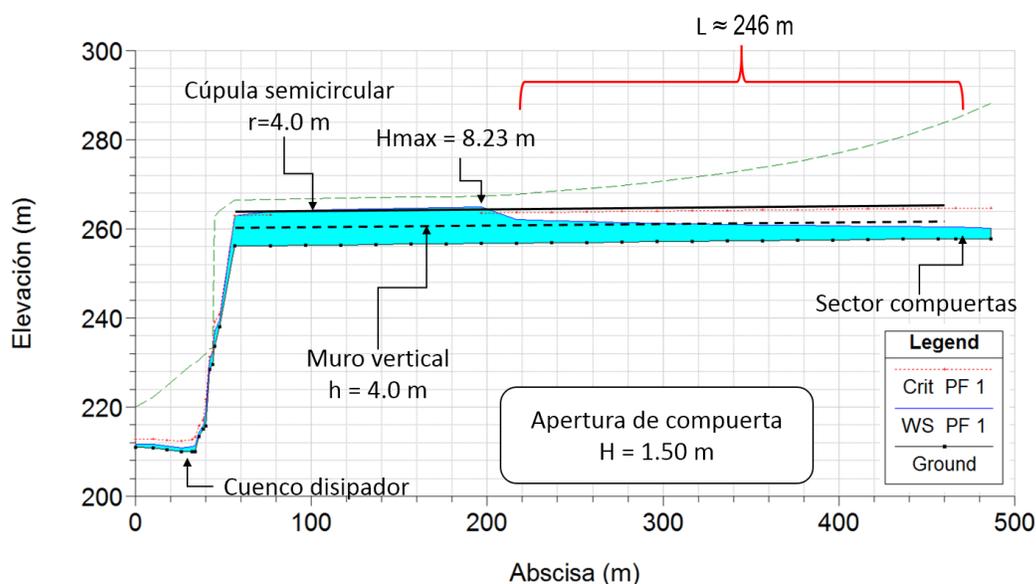


Figura 1.12. Descarga intermedia. Perfil longitudinal Escenario 3, dos compuertas parcialmente abiertas  $h = 1,50$  m para un caudal de  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

Además este túnel tenía un pre tapón de concreto y material de un deslizamiento impedía el acceso al portal.

*Se tenía una carrera contra el tiempo intentando reducir la tasa de ascenso del nivel del agua y se trabajaba a toda velocidad para elevar la cota de corona de la presa y llegar a una cota segura por encima de la del vertedero.*

En estas condiciones no era posible habilitar este túnel en el tiempo disponible sin comprometer seriamente su integridad. En el mejor de los casos, el caudal que podría evacuar era sensiblemente menor que el que estaba entrando al embalse y no sería suficiente. Terminaba siendo un sacrificio inútil.

Para la descarga intermedia, incluso, una vez terminada completamente la construcción e instaladas las compuertas, se considera que:

- *No es recomendable abrir las compuertas del túnel para que éste entre en operación con un caudal mayor que el de diseño.*
- *No es recomendable operar el caudal de diseño por largos periodos de tiempo, se recomienda hacer inspecciones periódicas de los recubrimientos en las zonas de mayor velocidad del flujo aguas abajo de las compuertas.*

### **1.3.1.3 Plan C: Evacuación de las aguas a través de la casa de máquinas.**

El 10 de mayo 2018 el agua en el embalse alcanzó la cota 350 msnm. En solo 12 días (desde el 28 de abril), el nivel del embalse aumentó a razón de 15 m/día, razón por la cual EPM autoriza inundar la casa de máquinas, abriendo las compuertas de captación de los túneles 1, 2, 7 y 8, con el fin de mitigar el riesgo de vertimiento del agua por encima de la presa. Hasta ese momento, se creía que la situación estaba completamente controlada, pero no se tenía el control natural de las aguas lluvias, que no paraban de caer.

Las estaciones de medición de caudal en Olaya y aguas abajo de la presa reportan que ingresaban al embalse unos 2.000 m<sup>3</sup>/s y salían por casa de máquinas unos 800 m<sup>3</sup>/s, por lo que los niveles crecientes del embalse amenazaban con alcanzar la cresta de la presa, que hasta ese momento solo llegaba a la cota 385 msnm.

El día 26 de mayo el equipo del Cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, USACE) recomendó restringir el acceso al túnel de plazoleta de compuertas por el riesgo de un deslizamiento. El mismo día entre las 12:00 y las 16:00 horas se cerraron las compuertas 7 y 8. A las 17:00 horas ocurrió un deslizamiento sobre el pozo 4 arriba del vertedero. Después de inspeccionar el túnel vial y el túnel de compuertas, el equipo USACE sugirió que cuando las compuertas se cerraron, el aire requerido por el sistema hidrodinámico interno en casa de máquinas fue removido (lo ahogó) y esto generó una reacomodación en el sistema.

Una vez la cota de la corona de la presa alcance una altura prudente sobre la cota del vertedero ya terminado, se puede considerar el cierre de compuertas para reducir y finalmente impedir ingreso del agua del río Cauca a la casa de máquinas. Por restricciones de tipo mecánico y de presurización, la cota máxima de operación las compuertas 1 y 2 del sistema de captación es la 380 msnm. Para garantizar el caudal ecológico, se puede empezar el cierre de una de las compuertas, por debajo de esta cota, una vez el nivel del agua y el caudal en el río, permitan garantizar que por una sola de

las compuertas puede ingresar un caudal mayor a 450 m<sup>3</sup>/s, se empezaría el cierre de la segunda compuerta apenas el nivel en el embalse alcance una cota en la que estén pasando 450 m<sup>3</sup>/s sobre el vertedero (401 msnm). Al momento (22/10/18) se tiene el embalse en la cota 391,34 msnm.

#### **1.3.1.4 Plan D. Otras alternativas para desembalsar**

Otra alternativa para desembalsar es hacer un túnel adicional paralelo al túnel de la descarga intermedia, dado que la descarga intermedia fue diseñada para una capacidad de 450 m<sup>3</sup>/s, que corresponde al caudal ecológico, el desembalse sería limitado por tiempo y capacidad; sin embargo, la idea de habilitar el túnel de descarga intermedia podría ser hoy, dado la contingencia, la solución más rápida, según los tiempos que implicaría construir un túnel nuevo en estos momentos el cual podría ser mínimo 1 año. La opción de construir un túnel paralelo fue descartada.

### **1.3.2 TERMINACIÓN DEL VERTEDERO Y LA PRESA.**

#### **1.3.2.1 Vertedero.**

El vertedero está completamente listo y construido (Figura 1.13). Las compuertas están listas en operación automática. Si se sube el embalse no hay ningún problema, podría verter perfectamente.



Figura 1.13. Obras de control del flujo del proyecto hidroeléctrico Ituango. Vertedero terminado y presa en su etapa final (Fuente: equipo técnico UNAL, 2018).

### 1.3.2.2 Terminación de la presa.

Cuando los niveles del embalse empezaron a subir rápidamente, se tomó la decisión de cambiar materiales en la parte superior de la presa para poder terminarla en el menor tiempo posible, evitando que los niveles de agua sobrepasaran la estructura de tierra si no se lograra llegar hasta el vertedero. Se trataba de llegar con los materiales disponibles y una capa impermeable cercana y paralela a la cara aguas arriba de la presa, con un espesor que requería menos cantidad de material impermeable, (**lleno prioritario**) desde la cota 385 hasta la 401 (nivel de la base del vertedero) y avanzar al menos hasta la cota 410 para que el exceso de agua que no lograra salir por la casa de máquinas fluyera por el vertedero. Para aumentar la protección se siguió hasta la cota 415. Cuando el lleno prioritario alcanzara la cota 418, la presa estaría protegida para un caudal de 500 años.

La Figura 1.14 muestra el perfil por el eje de la presa con los materiales inicialmente diseñados (antes de la emergencia) y la Figura 1.15 muestra los cambios en los materiales después de la emergencia – lleno prioritario.

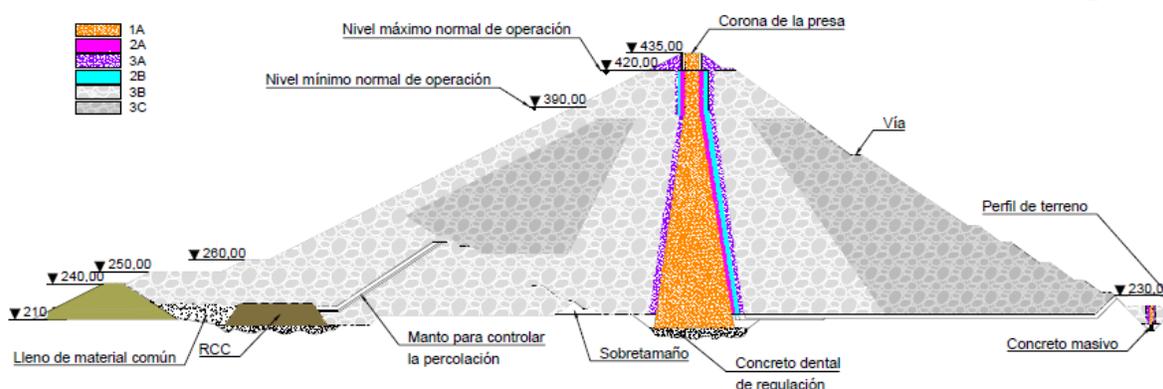


Figura 1.14. Perfil longitudinal por el eje de la presa, antes de la contingencia (Fuente: presentación hecha por INTEGRAL S.A, 2018).

El lleno prioritario consistió en una capa de material impermeable colocada horizontalmente en toda la cresta con un espesor de 4 m (que luego se redujo a 2,5 m), a partir de la cota 385 msnm. Encima de esta capa impermeable se colocó un material de filtro 3A (está constituido por materiales granulares con tamaño máximo de 25 cm, con un material que pasa la malla No. 100 menor al 15%; Integral, 2012).

Las condiciones climáticas no fueron favorables durante la colocación del lleno prioritario pues las lluvias no permitían lograr los niveles de humedad ideales para los materiales que se estaban colocando en la presa.

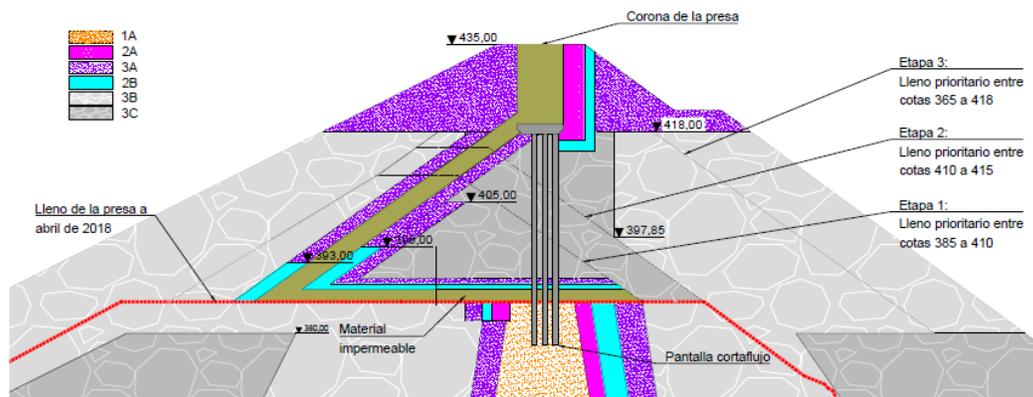


Figura 1.15. Esquema de la presa con los distintos tipos de materiales usados en construcción (Fuente: plano D-PHI-041-PRE-PC-C-010, INTREGRAL S.A, 2018).

Se analizaron los flujos de agua en el cuerpo de la presa (filtraciones) y en el sitio donde está la interfase del lleno prioritario hacia la corona. Los resultados del monitoreo indicaban que las infiltraciones no eran lo suficientemente presurizadas ni de magnitud apreciable como para generar un colapso ni del cuerpo de la presa ni del lleno prioritario. Se plantearon obras complementarias consistentes en inyecciones y barreras tipo pantallas corta flujo en el lleno prioritario para alcanzar un grado de estanqueidad considerado adecuado.

El lleno prioritario será reforzado con una pantalla de concreto plástico, hincada hasta la cota 380 msnm. Esta pantalla fue diseñada y está siendo construida por la empresa **Soletanche Bachy**, contratada por EPM. La pantalla será instrumentada y debidamente drenada con especial tratamiento en la zona de los estribos. La Figura 1.15 muestra la conformación de la presa en los últimos 50 m (cotas 385 a 435 msnm) donde se colocó el lleno prioritario, la pantalla de concreto plástico y las capas finales por encima de la pantalla cortaflujo.

Si bien para el grupo de la Universidad está claro que el lleno prioritario no cumplía con el diseño original y fue construido como una solución de emergencia, existe una preocupación de que haya un incremento en la tasa de filtración de la presa que pueda lavar el material y ocasionar un eventual colapso de la estructura. Es necesario

monitorear las diferentes filtraciones que se presentan en la presa; así mismo, se debe llevar un constante reporte de las mediciones de los piezómetros instalados. Efectivamente, se han observado (desde la cámara del SIATA) últimamente posibles zonas de humedad (filtraciones) en la cara externa del enrocado (aguas abajo de la presa) que merecen especial atención (Figura 1.16). Posiblemente estas filtraciones desaparezcan cuando la pantalla cortaflujos esté totalmente terminada, ya que el proceso constructivo que se está llevando a cabo deja tramos de discontinuidad por donde puede estar filtrando el agua a través del enrocado.



Figura 1.16. Estado actual de la presa donde se observan (círculos) las huellas de las filtraciones (Fuente: Registro SIATA, 24 de octubre de 2018)

Los materiales usados para la construcción del lleno prioritario y los niveles de compactación no cumplen con requerimientos de obra definitiva, como lo ha manifestado INTEGRAL. Para conocer el estado real de esta estructura que aparentemente ha funcionado de forma correcta (para el alcance provisional que tiene), se requiere que EPM suministre los informes de calidad de los materiales de construcción y los controles de compactación ejecutados durante su construcción.

Un aspecto determinante en la funcionalidad de la pantalla corta-flujo es la capacidad de deformación que tenga esta estructura sin generar niveles de agrietamientos que afecten su integridad. Adicionalmente la pantalla debe tener un nivel de deformaciones compatibles con los materiales que la rodean. En este aspecto EPM e INTEGRAL deben

suministrar informes de diseño donde se analicen estos aspectos, bajo condiciones normales de funcionamiento, bajo cargas hidráulicas máximas y bajo condiciones de cargas sísmicas.

## 1.4 ESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO (MARGEN DERECHA)

### 1.4.1 GEOMORFOLOGÍA

El análisis geomorfológico de la zona de estudio clasifica el sitio de presa en la margen derecha como un macizo rocoso alóctono; es decir, de un bloque basculado. En otras palabras, es un bloque caído, con movimiento lateral planar, afectando el curso del río Cauca a la altura de la confluencia con el río Ituango.

El análisis e interpretación de las diferentes imágenes, fotografías y planchas topográficas permitió concluir:

- El curso del río Cauca presenta una franja rectilínea en dirección sur-norte y, a la altura de la confluencia del río Ituango, tiene un fuerte quiebre en dirección oeste-este, considerado anómalo por cuanto no se insinúan estructuras geológicas en dicha dirección.
- El drenaje del macizo rocoso es ligeramente circular a partir de la cota 1400 msnm, controlando el curso de las quebradas Chontaduro hacia el norte y la Capitanes hacia el occidente.
- El macizo presenta pendientes escalonadas en dirección noroeste e indicios de asentamiento en los bloques y desplazamiento vertical no muy marcados (Figura 1.17).

Desde el punto de vista de la morfodinámica, los movimientos de masa tanto superficiales como sub superficiales están concentrados en las vertientes sur y occidente del macizo rocoso o sea en el bloque basculado (Figura 1.17).

En síntesis, el macizo rocoso donde se localiza la presa y las demás obras del proyecto es un bloque caído o basculado que en el glosario de términos geomorfológicos corresponde a un lomo de obturación. Este término se define como una prominencia topográfica de morfología alomada que ha sido desplazada lateralmente por fallamiento de rumbo y que ocasiona un bloqueo parcial o total de una corriente de agua; en este caso el río Cauca.

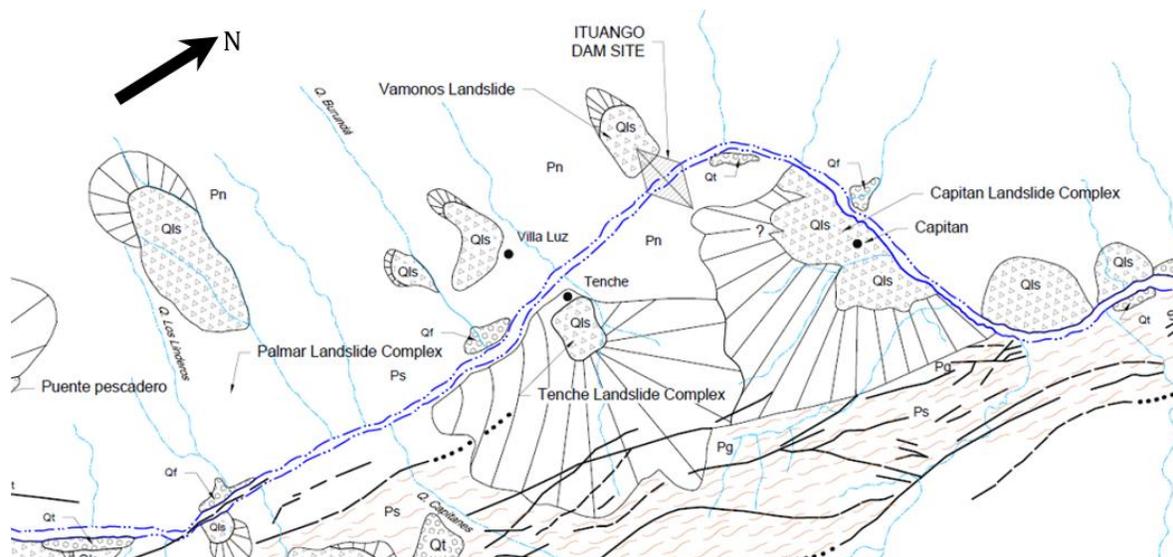


Figura 1.17. Procesos geomorfológicos cerca al sitio de presa (Woodward & Clyde, 1980).

*El estudio elaborado por Woodward & Clyde en 1980, cuyo mapa ha sido presentado en el año 2012 como plano N° D-PHI-GEO-MON-IN-ER-001, hubiera cambiado la decisión de ubicar las obras del proyecto Hidroeléctrico Ituango en el macizo que nos ocupa, ya que en este documento se muestran las características estructurales del macizo rocoso, la zona de influencia de la falla Santa Rita Este, el bloque basculado con todos los problemas de estabilidad y los movimientos en masa asociados.*

A manera de conclusión, se puede decir que **la emergencia ocasionada en el proyecto no se debe propiamente al bloque basculado per se; sin embargo, de haber sido reconocido en la etapa de factibilidad o de diseño, se hubiera procedido a realizar estudios de detalle (exploración geotécnica exhaustiva) para conocer el comportamiento de las estructuras que lo afectan (Figura 1.18).**

#### 1.4.2 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

La caracterización geomecánica del macizo rocoso destinado para alojar las obras subterráneas -en el sector de casa de máquinas, caverna de transformadores, almenaras, etc. - se basó en perforaciones exploratorias realizadas en las diferentes campañas de 1978, 2007, 2009 y 2017, y en las galerías exploratorias excavadas con este fin. En la Figura 1.19 se reproduce la localización de estas galerías.

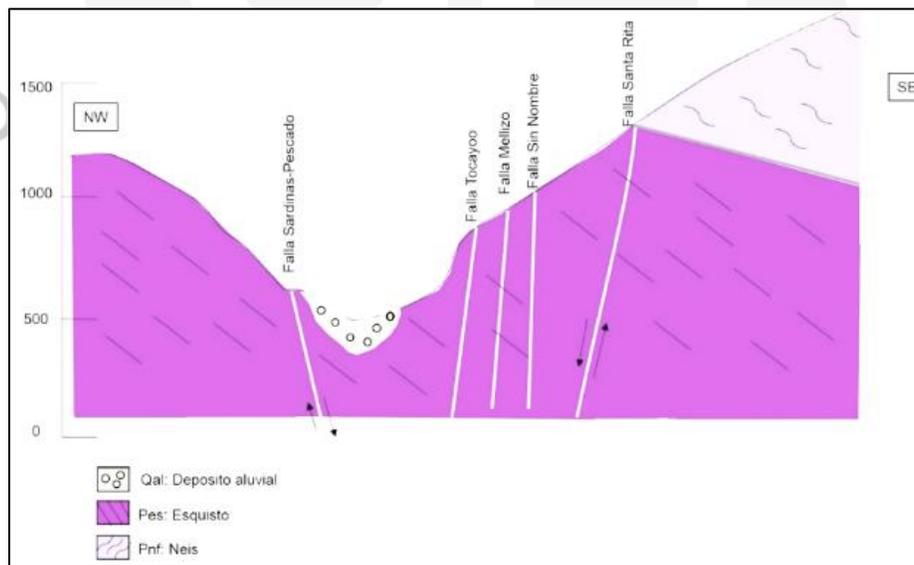
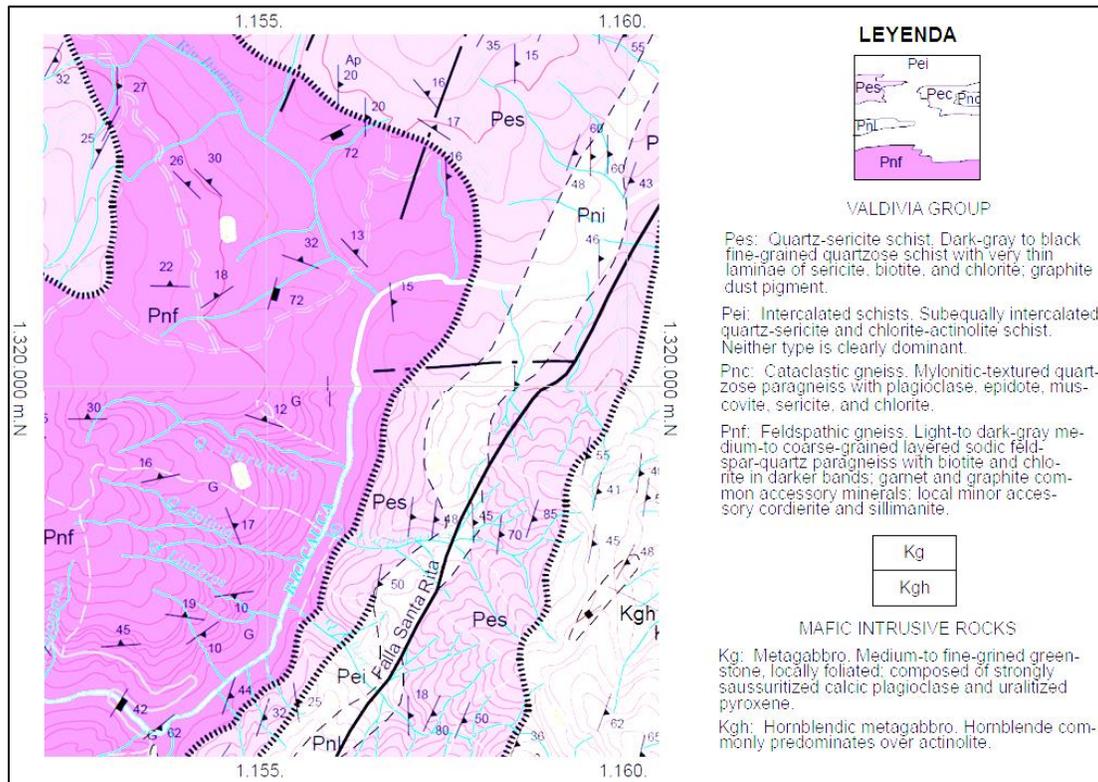


Figura 1.18. Mapa Geológico y Corte geológico regional de la zona de interés y esquema en profundidad en sentido NW-SE (Fuente: planchas 115 Toledo (1975) y 104 Ituango (1975) Ingeominas, escala 1:100000.

Galería	Cota	Coordenadas de entrada		Coordenadas de fondo		Longitud (m)	Sección (m)
		N	E	N	E		
Galería 2	290	1280929	1156749	1280473	1156741	685,0	3 X 3
Galería 3	500	1280669	1156761	1280422	1156783	515,0	2 X 2
Ramal Galería B	280	1280917	1156460	1280605	1156698	401,4	2 X 2
Galería C	330	1280868	1156463	1280837	1156559	100,0	2 X 2
Galería D	330	1280951	1156191	1280979	1156095	100,0	2 X 2
Galería E	280	1280924	1156282	1280953	1156186	100,0	2 X 2
Galería F	230	1280909	1156330	1280937	1156234	100,0	2 X 2

Poyeccion de Coordenadas: Colombia West Zone; Datum: Bogotá; Meridiano central: -77.0809, Latitud de origen: 4.5990, Unidades: metros.

Figura 1.19. Características de las galerías exploratorias (Fuente: D-PHI-CCE-ADM-C0082 “Caracterización geológica y geotécnica”).

La Figura 1.20 y Figura 1.21 son elaboradas para este estudio y presentan la cota, localización y longitud de las perforaciones y de las galerías exploratorias. Se puede observar que el volumen rocoso en el cual se alojaron las obras principales subterráneas se caracterizó parcialmente en la etapa de exploración.



Figura 1.20. Localización en planta de perforaciones en el complejo de casa de máquinas (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

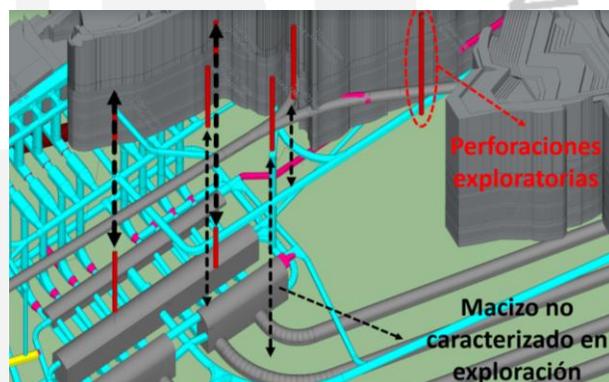


Figura 1.21 Macizo caracterizado durante la etapa de exploración (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018)

En el esquema isométrico (Figura 1.21) se aprecia la profundidad que alcanzaron las perforaciones, la cual es insuficiente para conocer con mejor alcance el macizo rocoso. Hubiera sido deseable explorar por lo menos hasta la cota de piso de la casa de máquinas.

Particularmente las perforaciones exploratorias, debieron alcanzar una cota inferior a la cota de piso de la casa de máquinas. Esto con el fin de conocer y caracterizar el macizo que se encontraría durante la construcción de obras subterráneas.

Para la fundación de la presa se considera que las perforaciones exploratorias fueron suficientes y con el nivel de profundidad adecuado (Figura 1.22); sin embargo para el macizo rocoso de la margen derecha donde se alojaron las obras principales de generación, las exploraciones fueron insuficientes en cantidad y en profundidad.

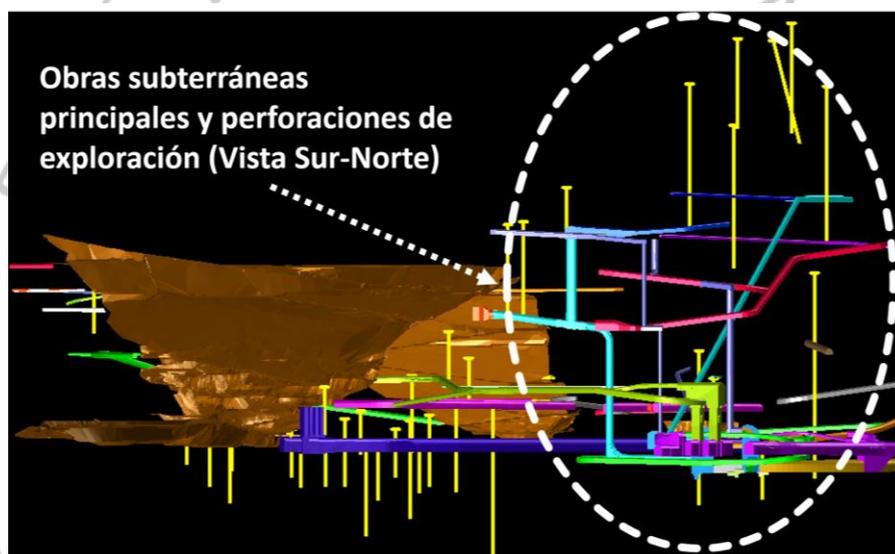


Figura 1.22 Vista de perfil de las perforaciones exploratorias en la ladera derecha (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

Considerando los resultados de los estudios geomorfológicos realizados en este estudio, en los cuales se concluye que el macizo rocoso en la zona del complejo subterráneo es alóctono (macizo desplazado), el programa exploratorio debió hacerse exhaustivo y sistemático, de forma que se pudiese obtener la mayor información para uso en el proyecto.

### 1.4.3 OBRAS SUPERFICIALES

En el talud de margen derecha, básicamente, podemos apreciar dos procesos superficiales (fallas de taludes) principales. Uno es el deslizamiento llamado Romerito y el otro es el deslizamiento Tenche que tuvo lugar inmediatamente encima de los portales de captación de la descarga intermedia (Figura 1.4) y los túneles de desviación

(Figura 1.23). Gran parte de este deslizamiento se encuentra sumergido bajo el agua del embalse y se ha monitoreado con algunas batimetrías (Figura 1.23).

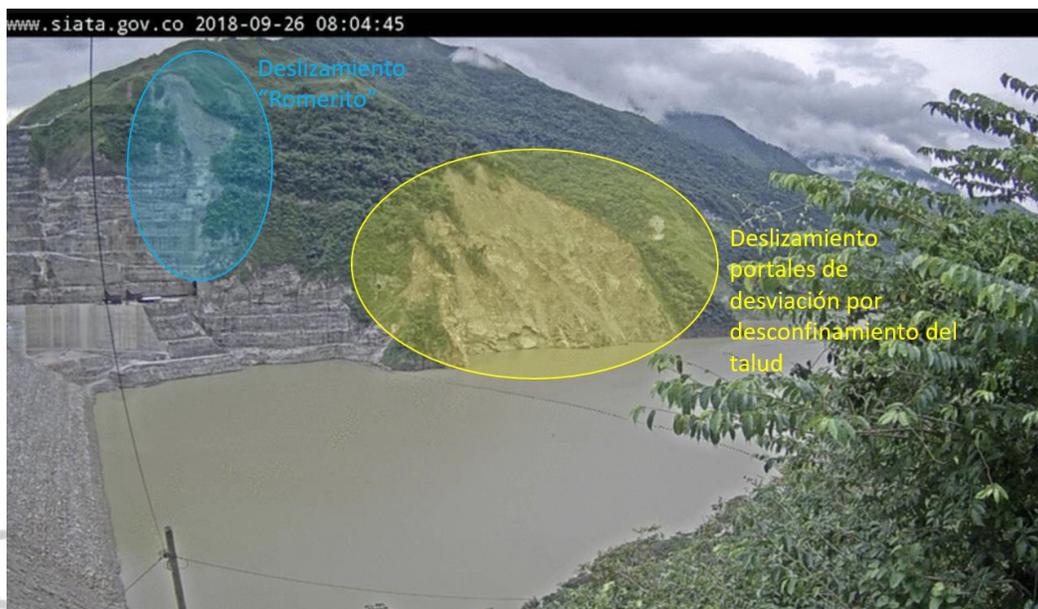


Figura 1.23. Deslizamientos margen derecha (Fuente: elaboración propia a partir de imágenes SIATA, 2018)

#### 1.4.3.1 *Deslizamiento Túneles de desviación*

De la Figura 1.24 se puede inferir claramente que el deslizamiento es superficial y sub-superficial y es controlado estructuralmente por una familia de discontinuidades que se encuentran buzando hacia la cara del talud (oeste). Actualmente este deslizamiento presenta gran caída de suelo y de los demás materiales que se encuentran en la parte superior del perfil de meteorización. Sin embargo, en la parte inferior ya se puede apreciar la roca expuesta, y es allí donde claramente se observa que el deslizamiento es controlado estructuralmente por una familia de diaclasas que buzan hacia afuera del talud.

En la parte media del deslizamiento, justo encima del nivel del embalse, se observan caídas de bloques de roca, los cuales forman la base del talud para los bloques en la parte alta del deslizamiento, lo cual implica alta probabilidad de caída de los bloques que se encuentran inmediatamente encima de los caídos (remonte del deslizamiento).



Figura 1.24 Vista de deslizamiento encima de túneles de desviación (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018)

La caída de estos bloques es altamente probable en la medida que el nivel del embalse aumente ya que el agua movilizará las discontinuidades y podría también lavar posibles rellenos que tengan las discontinuidades presentes en el talud. Las discontinuidades planares con buzamiento hacia la cara del talud, se observan resaltadas en amarillo.

#### **1.4.3.2 Deslizamiento Romerito**

En respuesta al suceso del 26 de mayo (movimiento en falla Romerito) se detectaron fisuras y grietas que mostraban el deterioro en diferentes obras subterráneas, siendo las de mayor magnitud las que se encontraban sobre el túnel vial y la galería de acceso a cámara de compuertas. Se encontraron desprendimientos del techo, fisuras y grietas y algunos soportes deformados, todos proyectados en la zona del trazo de la falla Mellizo y de la zona de deslizamiento de Romerito; en particular, el túnel vial se está tratando con pernos y marcos.

Para la estabilización de “Romerito”, se han previsto obras que consisten en: drenaje del talud, terraceo y colocación de pernos de anclajes, remoción de masas inestables por encima de plazoleta de compuertas, vía de acceso para la ejecución de las obras (Figura 1.25).

Las lluvias actuales son el detonante de los deslizamientos. En particular, la zona más crítica para el proyecto es la zona de Romerito, dado que provoca la caída de material sub-superficial, de grano fino a medio, a la plazoleta de compuertas. Para seguridad de

los trabajadores, se colocó un falso techo sobre la plazoleta de compuertas cubriendo las compuertas 1 y 2 para que proteja la operación. Se monitorea el comportamiento y evolución de los diferentes eventos de deslizamientos ocurridos a la fecha mediante el centro de monitoreo.

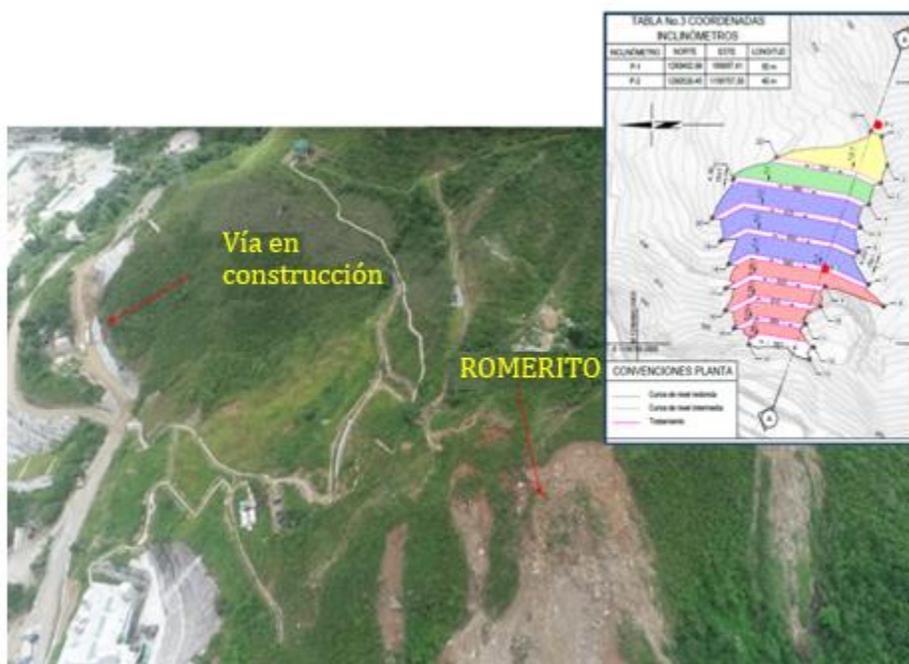


Figura 1.25. Obras de control Sector Romerito, Macizo rocoso margen derecha de la presa (Fuente: Presentación INTEGRAL S.A, junio 2018).

En resumen, los dos procesos de remoción en masa que se han desencadenado involucran directamente capas de suelos residuales, coluviones y parte de la transición suelo-roca, por lo que son de carácter “superficial”. Es probable que se generen desprendimientos de esta cuña ya fallada, los cuales no afectarán la estabilidad de la presa. Realmente es poco probable que se pueda generar una cuña inestable que tenga la capacidad de crear una ola que afecte la presa o cause un desbordamiento. Esta afirmación se sustenta con base en lo siguiente:

- No se evidencia una conexión entre los deslizamientos superficiales y las deformaciones internas del macizo como las que se han manifestado en el túnel vial.

- El patrón de agrietamiento que muestra la zona del deslizamiento “Romerito” es característico de un proceso remontante de suelos residuales y/o depósitos coluviales no consolidados.

#### 1.4.4 OBRAS SUBTERRÁNEAS

El estado de las obras subterráneas continúa siendo de diagnóstico limitado debido a la dificultad de acceso (Figura 1.26). Las obras con posibilidad de ingreso muestran diferentes grados de afectación desde ninguno hasta caídas de bloques de rocas de varios metros de extensión, definiendo sobreexcavaciones de dimensiones significativas con relación al tamaño de las excavaciones originales.

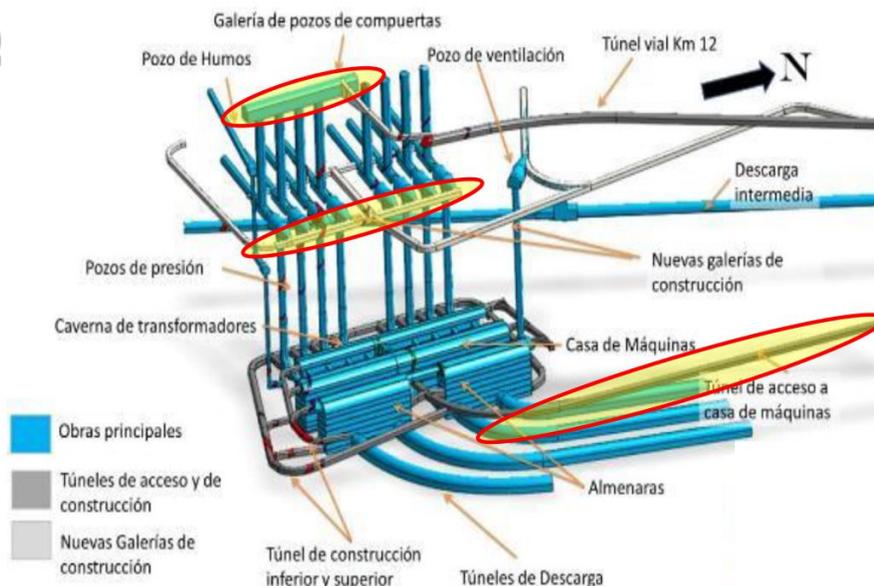


Figura 1.26. Obras subterráneas a las cuales se ha podido tener acceso (Fuente: Tomado y adaptado de Proyecto Hidroeléctrico Ituango, 2018a).

Debido al incremento del nivel del agua en el embalse y la necesidad de mantener un caudal aguas abajo de la presa, se adelantaron actividades relacionadas con la perforación y voladura del tapón del túnel de desviación izquierdo (TDI). Estas actividades se desarrollaron entre el 03 y el 12 de mayo de 2018 (Figura 1.27).

Las vibraciones por las voladuras realizadas pueden causar inestabilidad en el macizo rocoso (Figura 1.9).



Figura 1.27. Resultados de la voladura # 1 del Tapón No. 9, TDI (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018)

Para medir el efecto causado por una voladura sobre estructuras vecinas se emplea la distancia escalada, cuyo valor seguro es de 50. Con este valor de distancia escalada y la carga instantánea de 74,36 kg, se tendría que cualquier estructura a una distancia menor a 194 m, sufriría efectos destructivos por la vibración causada por dicha voladura (Guía del explosivista de INDUMIL página 29). Se sospecha que el macizo rocoso debe presentar daños significativos, especialmente en algunos puntos de la descarga intermedia y del túnel de desviación derecho debido a su cercanía con tapón No. 9 del TDI.

Respecto a la galería de acceso a la cámara de compuertas, se evidencia un deterioro progresivo de los frentes de trabajo. Se taponaron los ramales que comunican las compuertas con la galería de comunicación y no hay posibilidad de ingreso a la galería de acceso a la cámara de compuertas (Figura 1.32).

Como consecuencia del llenado anticipado e incontrolado del embalse, se han presentado filtraciones de agua en las obras subterráneas (galerías y túneles). Las filtraciones de mayor magnitud están en el túnel de la descarga Intermedia (Figura 1.28); dichas aguas provienen a) de la Galería 265 producto de las obras de inyección y drenaje que se están llevando a cabo (aguas de barrenado) para abatir presiones en la presa, b) de la compuerta plana de la descarga intermedia (que no se encuentra

completamente sellada). El manejo de estas aguas se hace a través una estructura de drenaje que descarga sus aguas en el pozo de disipación del vertedero.



Figura 1.28. Filtración de agua - Descarga Intermedia (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

#### **1.4.4.1 Túnel de acceso a casa de máquinas**

En el túnel de acceso a la casa de máquinas se informa de volúmenes caídos de roca a lo largo de varios metros de extensión, definiendo así sobre excavaciones considerables en la sección del túnel. La abscisa máxima posible de alcanzar está alrededor de K0+710 después de la cual los colapsos imposibilitan el tránsito. Se estima que el sistema de túneles y galerías de construcción, comunicado con el túnel de acceso, está presurizado debido a la fluctuación de los niveles del agua en la casa de máquinas, almenaras y cavernas de transformadores, por lo que se espera que otros sectores también puedan presentar la misma condición de sobre excavación.

La solera en concreto ha sido removida de la roca de piso, por los procesos de flujo de aguas que están ocurriendo al interior de las obras subterráneas, en aproximadamente las abscisas K0+255/300 y entre las abscisas K0+310/710 (Figura 1.29). Antes de la abscisa K0+380, el suelo del túnel presenta socavaciones de bloques de roca de hasta 2,0 m de profundidad (Figura 1.29). A partir de la abscisa K0+380, hay bloques de concreto depositados sobre el piso del túnel. La mayoría de estos presentan formas redondeadas lo que implica que hay fuertes procesos erosivos tomando lugar al interior de la casa de máquinas (Figura 1.29). La cantidad de sedimento y bloques caídos se incrementa en aproximadamente la abscisa K0+500 (Figura 1.29).

Se tiene conocimiento y evidencia fotográfica sobre una considerable sobreexcavación (Figura 1.29), tanto en el techo como en las paredes del túnel. Esta sobreexcavación puede tener aproximadamente 5 m tanto de alto como de ancho. En el suelo se pueden observar los bloques angulosos producto de la sobreexcavación.



Figura 1.29. Estado del túnel de acceso a casa de máquinas a) Piso y solera b) socavación (Fuente: Equipo UNAL, 2018).

En una visita posterior al túnel, se pudo avanzar más e inspeccionar desde aproximadamente la abscisa K0+500 hasta la K0+710. Cabe anotar que este nuevo recorrido se realizó sobre el techo del túnel, caminando sobre material allí depositado debido a las fluctuaciones del agua y a los bloques caídos del que fuese el techo del túnel original. La sección original del túnel está perdida. En aproximadamente la abscisa K0+710, se presenta un colapso del túnel de acceso. En dicho sitio es perceptible el sonido del agua que hace presencia detrás de ese material caído.

Se puede observar una capa de concreto lanzado (shotcrete) en las paredes irregulares del túnel (Figura 1.30). Es importante tener en cuenta que las irregularidades que quedan después del perfilado y desabombe en las paredes de los túneles no son una condición óptima para que el shotcrete se desempeñe correctamente, debido a la fragilidad que presenta el mismo en superficies angulosas. La máxima funcionalidad del shotcrete se alcanza cuando se tienen superficies regulares y lisas.



Figura 1.30 Concreto lanzado en túnel de acceso a casa de máquinas (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

#### 1.4.4.2 Casa de Máquinas

Controlar el nivel del embalse abriendo las compuertas de los conductos 1, 2, 7 y 8 de casa de máquinas desde el día 10 de mayo de 2018, llevó finalmente a su inundación y sigue fluyendo agua por ella hasta la fecha. Permitir el flujo del río Cauca por casa de máquinas, más que una decisión, fue una obligación.

Inicialmente es necesario describir la calidad del macizo rocoso en las condiciones antes de la emergencia. De la Figura 1.31 se puede inferir que la calidad del macizo es media a baja en el sector sur de casa de máquinas, medido por el GSI Índice Geológico de Resistencia, con 85% de valores en los rangos de 40 a 60 (sobre 100).

Un factor adicional para prever condición de daños importantes en las diferentes cavernas es que, una evaluación de las presiones de agua indica que estas son altas si comparados con la resistencia de materiales geológicos débiles (cizallas, rellenos de fisuras, minerales blandos, etc.), pues si la cota inferior en casa de máquinas es 190 msnm, con el embalse a 390 msnm se producen cabezas de 200 metros columna de agua (mca), esfuerzo hidrostático alto (2 MPa), con relación a la resistencia de estos materiales débiles.

De otro lado, dado que las cavernas presentan volúmenes mayores a los ductos de circulación previos de donde proviene el agua, estas actuarán como disipadores de

energía, hecho que en parte disminuye el efecto de las presiones y velocidades de salida, pero haciendo que estos gradientes se concentren en las paredes de las cavernas.

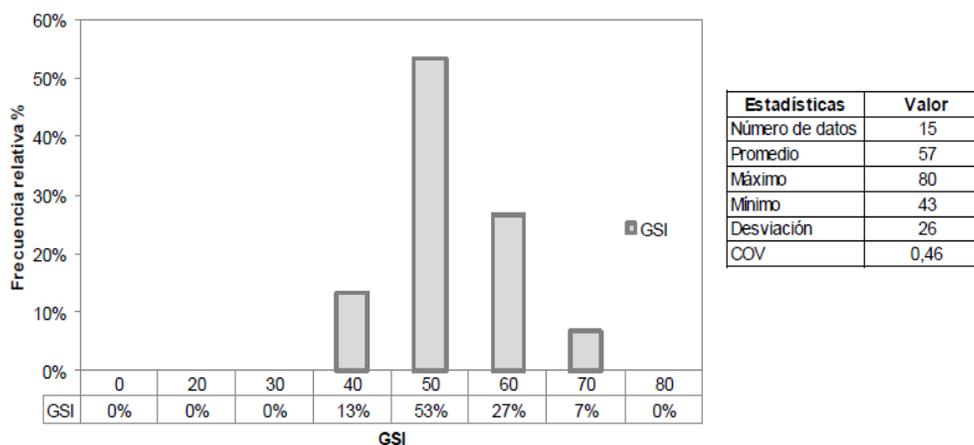


Figura 1.31. Índice GSI (Geological Strength Index) en la zona sur de Casa de Máquinas (Fuente: I-2194-GYG-MR-R0\_Parámetros macizo rocoso).

Por tanto, es de esperar que en la casa de máquinas existan daños de la misma o mayor magnitud a los presentados en el túnel de acceso a casa de máquinas. También la acción del agua, tanto por presión como por arrastre, puede ser sumamente perjudicial para la integridad estructural de los contornos rocosos y del soporte. Adicionalmente, es altamente probable que se presente daño interno en el macizo (abertura y propagación de discontinuidades, principalmente) debido al flujo a alta presión, el cual continuara hasta que no se cierren las compuertas que permiten el flujo de agua por la casa de máquinas.

#### 1.4.4.3 Túnel vial

Las reparaciones realizadas al túnel vial y el monitoreo constante que se le está realizando sugieren que la deformación del mismo solo se presentó durante un periodo de tiempo en que los esfuerzos en el macizo rocoso estaban distribuidos de manera anormal.

Las deformaciones pudieron estar ligadas a las oscilaciones que presentaba el macizo (efecto martillo) cuando los caudales de entrada del río eran más altos y el flujo de casa de máquinas no se consideraba estable.

Medidas de reparación como el cambio de los hastiales y la colocación de pernos en la sección del túnel incrementan la seguridad del mismo y lo habilitan para ser utilizado

de manera constante por el personal del proyecto y por las caravanas de la comunidad que van y vienen desde Ituango.

#### 1.4.4.4 Galerías de pozo de compuertas y de comunicación entre pozos de compuertas

A continuación, se hace un informe del estado de las obras subterráneas asociadas a la zona de los pozos de compuertas.

##### ➤ Galería de Pozos de compuertas

Dentro del programa de inspección sistemático que realiza la Interventoría, se ha visitado la galería de comunicación entre pozos de compuertas en múltiples oportunidades. En los recorridos de inspección realizados se evidencia un deterioro progresivo de los frentes de trabajo. En los ramales 1 y 2 (R1, R2 en Figura 1.32) se presentan cada vez más bloques caídos provenientes de las sobreexcavaciones previamente registradas.

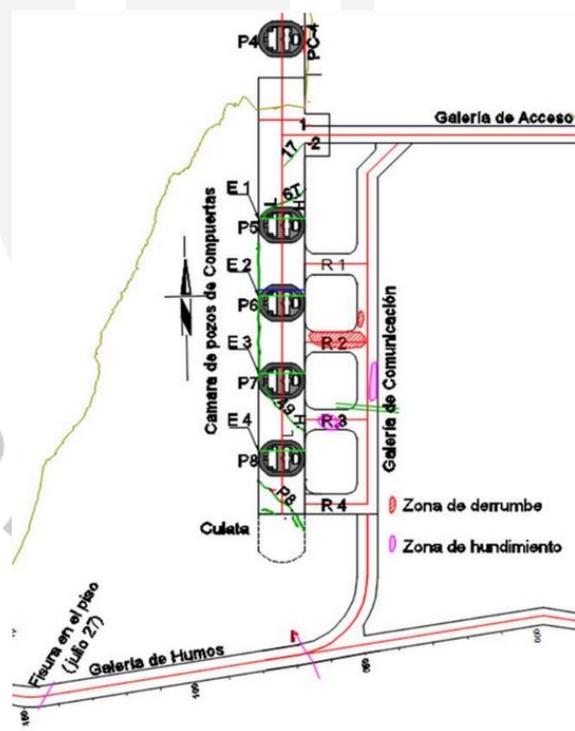


Figura 1.32. Afectaciones galería de pozo de compuertas, levantados por la Interventoría (Fuente: PHI-INO-LC1-058-R0)

Con base en el incremento en la apertura de algunas grietas, el aumento en los desprendimientos de concreto lanzado y roca en el Ramal 2, el incremento en el desplazamiento vertical de algunos puntos de control, el registro progresivo de las deformaciones en los extensómetros (E3-P1 y E4-P2) y el hundimiento en el piso del Ramal 3 (R3 en la Figura 1.32), se puede concluir que hay un movimiento con componente vertical del macizo rocoso en este sector, localizado en la Figura 1.34 como zona de hundimiento.

La magnitud y demás características de este hundimiento puede ser informada por la Interventoría o Consorcio CCC con mayor detalle debido a que es un proceso de monitoreo continuo. Sin embargo, es importante recordar que este túnel está muy cerca de superficie (<40m) lo cual también incrementa el desconfinamiento de la roca y así también se incrementa la probabilidad de caídas de rocas.

#### ➤ Galería de comunicación entre Pozos de Compuertas

La galería de comunicación entre pozos presenta un deterioro progresivo, especialmente en los Ramales 1 y 2, donde se observan bloques caídos de roca que pronuncian cada vez más las sobreexcavaciones identificadas y que merecen registro de su evolución. También se observan fisuras y grietas en el piso, lo que indica un posible hundimiento de esta galería (Figura 1.33).

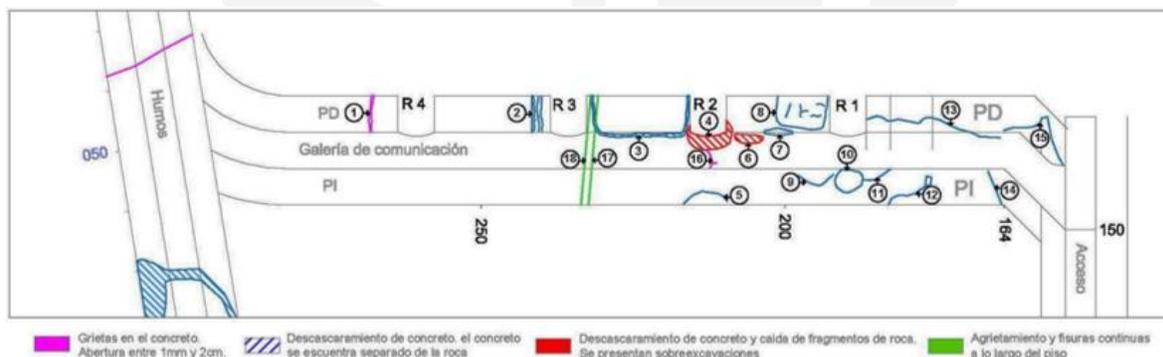


Figura 1.33. Daños levantados en Galería de comunicación entre pozos de compuertas (Fuente: PHI-INO-LC1-054-R0).

#### ➤ Galería de acceso a Pozos de Compuertas

Debido a la confluencia de diversas excavaciones subterráneas y su cercanía con la superficie, el sector señalado en la Figura 1.34 -zona verde- se considera crítico por la inestabilidad del macizo. De acuerdo con los documentos elaborados por Interventoría

y Asesoría, dicho sector presenta alto grado de agrietamientos, descascaramiento de concreto lanzado, deformación plástica y continua expansión de las grietas además tiene una relación espacial con el evento ocurrido el día 26 de mayo por inicio desprendimiento Romerito -zona roja de Figura 1.34- así como con la afectación de la zona de codos superiores #5-#8. Es por esto que constituye una de las zonas que requiere monitoreo y observación periódicas.



Figura 1.34 Galería de pozos de compuertas (Fuente: PHI-INO-LC1-054-R0).

### ➤ Conclusiones

Aparte de trabajar en el mantenimiento de los procesos de soporte de los túneles que comprenden esta zona, la solución que se considera más plausible es el cierre de las compuertas 1 y 2. Con esta acción se interrumpiría el flujo de agua por los codos superiores, inmediatamente debajo de la zona que presenta hundimiento, que está debilitando el macizo.

#### 1.4.4.5 Túnel de desviación derecho - TDD

Las actividades exploratorias de esta galería (Figura 1.35) sugieren que 10 de los 14 m de altura del túnel están llenos de material y escombros transportados a lo largo de esta estructura durante los dos destaponamientos que ha tenido a lo largo de la

contingencia. Adicionalmente, todo el material que ha caído al embalse, por deslizamiento en la zona de los portales de captación, bloquea el paso de un volumen grande de agua. A diferencia de la GAD, el túnel de desviación derecho ha mantenido una descarga constante de agua entre 6 y 11 m<sup>3</sup>/s lo que dificulta la inyección de materiales para la ejecución de un tapón definitivo.

Podría suponerse que el agua que hoy se observa por la descarga proviene de filtraciones a través del material que bloquea la captación de estas galerías. Con las medidas de recuperación adelantadas actualmente, tales como la inyección de concretos para la consolidación de material y la apertura de una galería nueva (Figura 1.35) para la construcción del pre-tapón se reducirá el riesgo de un destaponamiento. Sin embargo, como estas actividades aún están en ejecución siguen siendo un factor crítico de riesgo en el proyecto.



Figura 1.35. Medidas tendientes a taponar el túnel de desviación derecho, TDD (Foto tomada en el campamento a plano pdf de INTEGRAL).

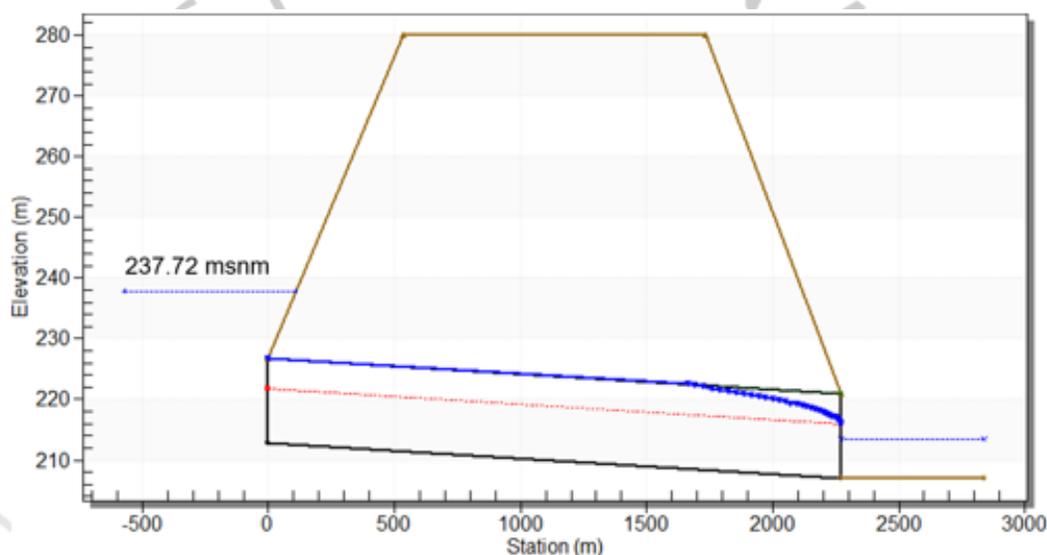
#### 1.4.4.6 Galería Auxiliar de Desviación, GAD

Al momento de comparar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno, se puede apreciar que la GAD, ni siquiera era capaz de descargar sin trabajar a presión, ninguno de los caudales máximos calculados (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno (elaboración propia).

Tr (años)	2.33	5	10	25	50	100	500
Q (m <sup>3</sup> /s)	2660	3270	3716	4240	4700	5126	6116

Con el fin de conocer a detalle el comportamiento hidráulico del túnel auxiliar de desviación (GAD), se hizo una verificación mediante el programa HY-8 (desarrollado por la Federal Highway Administration, Department of Transportation USA), bajo cuatro escenarios de funcionamiento que se resumen en la Figura 1.36.



Caudal de entrada	m <sup>3</sup> /s	400	1200	2046	3500
Nivel del embalse	msnm	220,62	237,72	275,74	385,27
Profundidad normal	m	5,27	13,98	13,98	13,98
Profundidad Crítica	m	4,37	8,97	11,94	13,98
Diámetro del túnel	m	14	14	14	14
Profundidad a la salida	m	4,37	8,97	11,94	13,98
Profundidad en la Descarga	m	3,23	6,49	9,19	2,84
Velocidad a la salida	m/s	5,42	6,91	11,78	20,16
Cota de entrada	msnm	212.8	212.8	212.8	212.8
Cota de la salida	msnm	207	207	207	207
Pendiente del túnel	m/m	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026

Figura 1.36. Funcionamiento hidráulico de la GAD con diferentes caudales de entrada (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

Para calibrar el modelo HY-8 se adoptaron los mismos parámetros utilizados por el Instituto LACTEC (Curitiba, Brasil), donde para un caudal de 1.200 m<sup>3</sup>/s, se reportaba una carga hidráulica aguas arriba del túnel de 217,7 msnm (212,8 msnm es la cota de piso de la GAD); el coeficiente de rugosidad es 0,02822, igual al reportado por el estudio de LACTEC.

Los resultados de la simulación corroboran el reporte de LACTEC para un caudal de 1.200 m<sup>3</sup>/s donde afirman que la GAD funciona casi el 80 % como un conducto a presión. Bajo este escenario, la velocidad del flujo en el tramo a presión sería de unos 6,91 m/s (valor que está en el límite de las velocidades admisibles para un concreto lanzado como revestimiento del túnel), mientras a la salida del túnel se presentarían velocidades del orden de 9,60 m/s, valor que supera el valor máximo admisible reportado en la literatura técnica.

Para el segundo escenario, se escogió un caudal igual a 400 m<sup>3</sup>/s (caudal mínimo registrado en la estación Olaya), para el cual la velocidad de flujo (Figura 1.36) es 5,42 m/s. En el mismo orden de ideas, el esfuerzo tractivo presenta valores desde 180.98 Pa hasta 207.03 Pa.

En el tercer escenario se seleccionó un caudal igual a 2.046 m<sup>3</sup>/s (caudal máximo presentado el 12 de abril de 2018) y se obtuvo una velocidad de superior a la permisible (según la literatura técnica, 11,78 m/s >> 8 m/s) a lo largo del túnel. Los esfuerzos cortantes a lo que se vio sometido la estructura oscilaron entre 734,7 Pa hasta 817 Pa, desde la entrada hasta la salida de la estructura (Figura 1.36)

En el cuarto escenario se simuló un caudal de 3.500 m<sup>3</sup>/s (máximo valor registrado en el mes de abril, 2.011), para el cual, el conducto GAD hubiera funcionado a presión a lo largo de todo el túnel y las velocidades hubieran sido superiores a 20 m/s (extremadamente altas para el tipo de revestimiento del túnel).

De acuerdo con Chen (2015) la velocidad de flujo permitida en un túnel hidráulico soportado por pernos y concreto lanzado debe ser inferior a 8 m/s; sin embargo, tal y como se pudo apreciar, bajo los diferentes escenarios de simulación, la GAD estuvo trabajando durante 15 días del mes de abril con velocidades superiores a este valor.

En la Figura 1.37 se presenta una comparación entre los caudales de entrada al proyecto, medidos en la estación Olaya, con las velocidades de flujo en la entrada y salida de la GAD; como se puede apreciar, entre el 05 de abril hasta el 19 de abril de

2018, se presentaron velocidades en la entrada de la GAD ( $V > 12$  m/s), que superaron el máximo límite permisible (8 m/s) para el revestimiento del túnel (shotcrete). Con base en lo anterior, se puede concluir que con estos rangos de velocidad el túnel fue susceptible a desprendimientos del recubrimiento, y con ello, a dejar expuesta la roca.

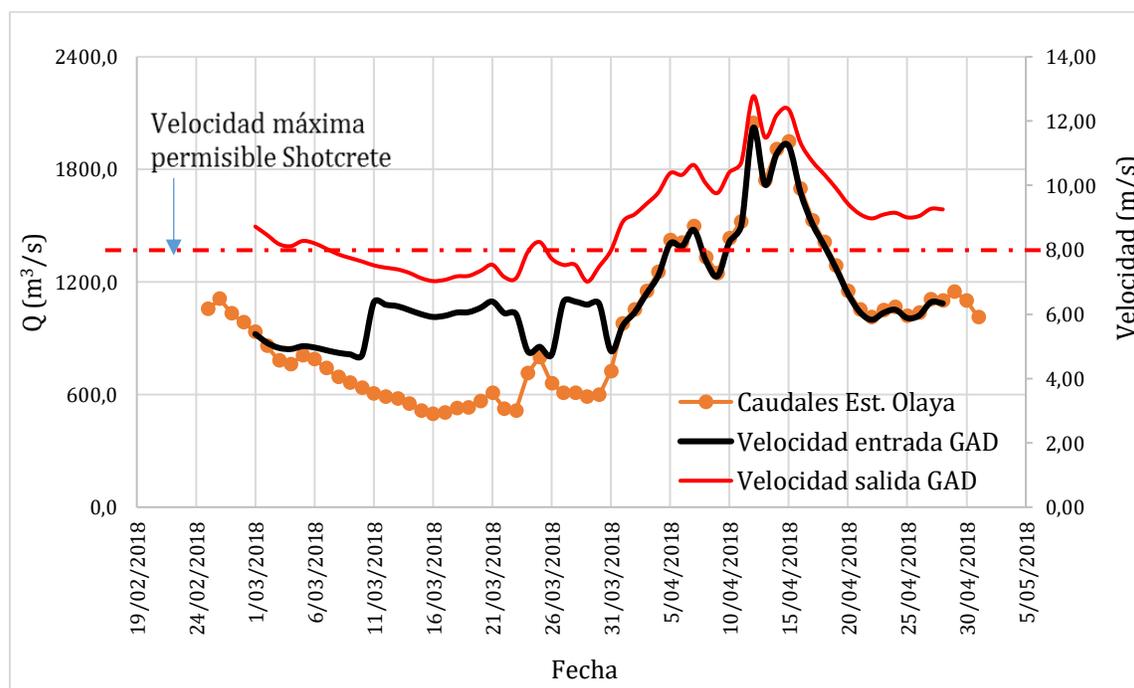


Figura 1.37. Variación de caudales de entrada al embalse y velocidades del flujo en la GAD, entre el 19 de febrero y el 05 de mayo, 2018 (Equipo técnico UNAL, 2018).

Los trabajos de seguimiento (Figura 1.38) que se han realizado a la GAD y el monitoreo constante de la misma sugieren que esta estructura se encuentra llena de material casi en su totalidad y un destaponamiento natural de la misma por la presión del río o embalse es poco probable.

La posibilidad de que todo este material distribuido en los dos kilómetros de longitud de la GAD sea removido y lavado naturalmente para destaponar el túnel es muy baja.

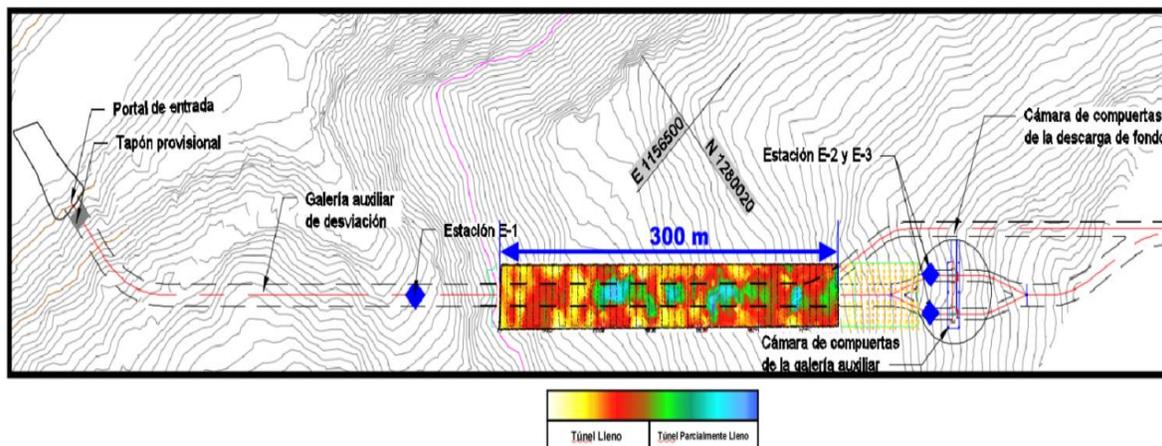


Figura 1.38 Levantamiento geofísico sección de GAD (Fuente: Fuente: Integral-Mapa de interpretación sísmica GAD.pdf)

#### 1.4.5 SUMMARY OF GENERAL OBSERVATIONS FROM THE VISIT TO THE ITUANGO DAM CONSTRUCTION SITE. Navid Mojtabai

##### Surface features and slope stability problems

From the aerial view of the site it appears that such slope movements as seen near the dam site are common in the region. The mountain ranges are relatively steep and the top soils layers are not very thick. This creates a favorable condition for the soil layers slip along the side of the rock formation. From the failure surface near dam, a dominant and steeply dipping joint set is daylighting. It appears that the failure took place along these joints. There is a good chance that these joints are daylighting at other locations as well. The failure could have been initiated as the result of water level rising as the dam was filling. The toe of the slope was saturated and was weakened or washed away and the failure took place. Such conditions could be present and an event like that could be likely.

##### Tunnel collapses

It appears that most tunnel collapses followed a slow deterioration of the shotcrete and as the result the support system was compromised. Sections of the tunnel were classified as Type II and Type III rock mass where only shotcrete or combinations of shotcrete and bolting is used. This is a typical recommendation from the Q-system. In several locations cracking is observed in the shotcrete. It is argued if the cracks extend into the rock or not. It does not appear that is the case, but this could be investigated. If the shotcrete is not placed properly

and uniformly it will not perform as expected and it will easily experience bending and hence tension which will crack easily. One argument is that the drilling and blasting was not done carefully, and too much damage was imposed on tunnel periphery. The other side effect of poor blasting is the boundary of the tunnel is very jagged and not nearly smooth. This makes the shotcrete distribution to be very uneven and as the result it will not perform well. Once the shotcrete is lost the rest will follow. There are evidence of some tunnels that the smooth blasting was used and the boundary of the tunnels were relatively smooth. Half-barrels of smooth blasting holes are present at most locations which is the sign of successful control blasting. No sign of failure at these tunnel with no or little support was visible.

There are records of strong seismic events as the result of collapses. These high energy events can cause damage to the shotcrete layer, but hardly on the rock mass itself. However, once the shotcrete is damaged, the rock is not capable of supporting itself.

These comments are based on very limited observations and the situations mentioned above must be looked at and be re-evaluated.

## **1.5 ACTUACIONES AMBIENTALES FRENTE A LA CONTINGENCIA DEL 28 DE ABRIL**

### **1.5.1 CONSIDERACIONES SOBRE LA LICENCIA AMBIENTAL**

El proyecto hidroeléctrico “PESCADERO – ITUANGO” cuenta con licencia ambiental otorgada por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial a la empresa HIDROELÉCTRICA PESCADERO ITUANGO S.A. E.S.P., mediante la Resolución 0155 del 30 de enero de 2009 para las fases de construcción, llenado y operación. Hasta el 4 de mayo de 2018, dicha licencia ha tenido 22 modificaciones, una de las cuales autoriza la construcción y operación del Sistema Auxiliar de Desviación (SAD) y su infraestructura asociada (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, ANLA, Resolución 01139 del 30 de septiembre de 2016).

Respecto a la licencia para la construcción de las obras del SAD, es importante destacar, que de acuerdo al informe de la Interventoría del proyecto INT-OC-EPM-339-18 pág. 419, del 14 de junio de 2018, la construcción de dicho sistema inició el 14 de octubre de 2015; es decir, 11 meses antes de obtener la respectiva autorización.

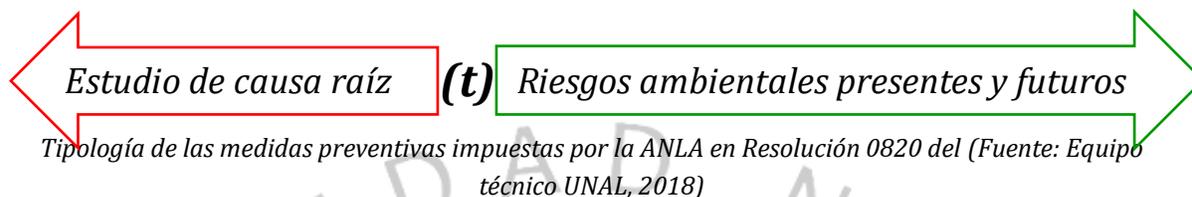
Entre el 2009 y el 30 de septiembre de 2016 se presentaron modificaciones a la licencia ambiental que no estaban relacionadas con las obras principales del proyecto hidroeléctrico, sino que estaban relacionadas con los campamentos, zonas de préstamo, vías de acceso, permisos de uso y aprovechamiento o afectación de recursos naturales, manejo del recurso íctico, construcción de túneles viales, talleres, campamentos y proyectos de apoyo para el manejo del medio social, monitoreo del subsuelo y de aguas subterráneas en el relleno sanitario de Valdivia.

A raíz de la contingencia generada en el proyecto desde el día 28 de abril de 2018, la ANLA impuso a la sociedad Hidroeléctrica Ituango S.A. E.S.P. medidas de manejo y control ambiental mediante la Resolución No. 642 del 4 de mayo de 2018. Ante las situaciones anormales de desarrollo del proyecto -no previstas en el Estudio de Impacto Ambiental- y, dadas las dificultades crecientes que se presentaron para manejo de la contingencia, la ANLA impuso nuevas medidas a través de la Resoluciones 720 del 16 de mayo de 2018 y 0796 del 29 de mayo de 2018.

Posteriormente, con fundamento en el análisis de riesgos contenido en el EIA (Estudio de Impacto Ambiental) bajo el cual se soportó parcialmente el otorgamiento de la licencia ambiental y, ante el desconocimiento de los posibles efectos de la contingencia sobre la infraestructura del proyecto y sobre el medio ambiente, la ANLA invocó el *Principio de precaución* para imponer la **Medida preventiva** mediante Resolución 0820 del 1 de junio de 2018, la cual ordena la suspensión inmediata de todas las actividades regulares relacionadas con etapa de construcción, llenado y operación del embalse que no sean requeridas para la atención de la contingencia presentada desde el día 28 de abril de 2018. Dicha resolución permite ejecutar las medidas del plan de seguimiento y monitoreo, así como todas aquellas actividades que sean necesarias para mitigar los riesgos.

Las medidas preventivas impuestas por la ANLA, se han planteado como un condicionamiento de la Licencia ambiental, para tener un mejor conocimiento de la magnitud de los riesgos e impactos ambientales susceptibles de ocurrir y de sus medidas de manejo y control bajo las nuevas condiciones del proyecto. Aunque no se dio un plazo perentorio para el levantamiento de la medida, lo requerido a la Sociedad Hidroeléctrica Ituango S.A. E.S.P. se fundamenta en adelantar una serie estudios que marcan dos líneas de tiempo a saber: 1) Reconstruir mediante un estudio de causa-raíz para conocer los orígenes de la contingencia y 2) Adelantar los estudios de detalle que

permitan reevaluar las condiciones de riesgo actuales y futuras que puedan derivar en impactos ambientales.



Posteriormente, la ANLA emitió las Resoluciones 0845 del 07 de junio de 2018, 0910 del 18 de junio, 0948 del 28 de junio y 01231 del 3 de agosto de 2018. En esta última se modifican las frecuencias de monitoreo de algunas variables ambientales, se dan por cumplidas algunas obligaciones impuestas en resoluciones anteriores y se establecen medidas adicionales para un total de 46 exigencias, que en caso de no subsanarse en los plazos establecidos, dará lugar a las acciones legales que se estimen pertinentes. Para conocer en detalle las medidas preventivas y de manejo y control ambiental impuestas por la ANLA se recomienda al lector consultar cada una de las Resoluciones aquí mencionadas.

### 1.5.2 SOBRE EL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA)

El Estudio de Impacto Ambiental, EIA, es un instrumento fundamental para la obtención de la Licencia Ambiental del proyecto Hidroeléctrico Ituango. Estructuralmente está subdividido en una serie de capítulos entre los cuales se destacan: el capítulo 5. Evaluación Ambiental; el capítulo 7, Plan de Manejo Ambiental y el capítulo 9, Plan de Contingencia. Luego de la revisión de este estudio se destacan los siguientes aspectos:

- ❖ En el capítulo de Evaluación ambiental no se consideraron los impactos ambientales de **Desestabilización del macizo rocoso** y **Alteración de los procesos morfodinámicos**, impactos que son comunes a este tipo de proyectos, y que se han manifestado de manera sinérgica durante la contingencia.
- ❖ En consecuencia de lo anterior, las medidas de manejo establecidas en el Plan de Manejo Ambiental, no fueron efectivas para la respectiva prevención, mitigación y control de los impactos que agudizaron la contingencia del 28 de abril, tal y como lo reveló la ANLA en el Concepto técnico No. 02674 del 28 de mayo de 2018.
- ❖ El proyecto cuenta con un Plan de Contingencia General para toda la obra actualizado al 2011 (PC-2011) y el Plan de Contingencias específico para el SAD

formulado en el 2016 (PC SAD-2016). Los aspectos más importantes se resaltan a continuación

En ambos planes se realizó el respectivo análisis de riesgos a partir del cual se formularon las medidas de acción y la estructura de gestión de las contingencias. En la revisión de dichos planes se evidencia que no se contempló el colapso u obstrucción de los túneles de desviación, ni la situación de llenado anticipado del embalse y, mucho menos, la desviación del río Cauca a través de la casa de máquinas; adicionalmente se destaca que algunas amenazas y riesgos fueron subestimadas, tal y como se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Algunas amenazas evaluadas en los Planes de Contingencia del proyecto, PC (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).

Evaluación de Amenazas PC- 2011			Evaluación de Amenazas PC SAD- 2016		
Amenazas	Categoría	Puntaje	Amenazas	Categoría	Puntaje
Crecientes e inundaciones aguas abajo del sitio de presa.	Remota	2	Subsistencia o hundimiento.	Improbable	1
Desprendimientos de bloques, deslizamientos, derrumbes y desestabilización de taludes.	Remota	2	Crecientes e inundaciones aguas arriba del SAD	Ocasional	3
Subsistencia o hundimiento.	Improbable	1			
Falla de la presa.	Improbable	1			
Fallas operativas o estructurales en el vertedero.	Improbable	1			
Inundación de cavernas o casa de máquinas	Improbable	1			
Disminución del caudal del río por debajo del caudal ecológico.	Remota	2			

Categoría de la amenaza	Puntaje
Frecuente	5
Probable	4
Ocasional	3
Remota	2
Improbable	1

Además de lo anterior, el análisis de riesgos de los dos PC no adoptó el modo de manifestación y no tuvo en cuenta la interacción entre sucesos o tipos de amenaza. Sólo tuvo en cuenta el contexto espacial genérico de las amenazas. Ello posiblemente conllevó a no establecer las medidas de prevención efectivas para evitar o mitigar los daños derivados de la contingencia del 28 de abril.

En cuanto a las medidas de actuación es importante destacar que los dos Planes de Contingencia (PC) del proyecto consideran tres tipos de medidas o niveles de actuación: Nivel Preventivo, Nivel de atención y Nivel de Recuperación. La ejecución de dichas medidas se formuló bajo una estructura de gerencia piramidal, la cual para esta contingencia ha funcionado según el esquema propuesto.

Finalmente se destaca que si bien el nivel preventivo de actuación no fue realmente efectivo, el nivel de atención se ha llevado a cabo según la estructura jerárquica de prioridades establecida en los PC, la cual comprende en orden de importancia

1. Protección de vidas humanas
2. Protección de la salud pública
3. Protección al medio ambiente
4. Protección de la infraestructura del Proyecto y bienes públicos
5. Daños por destrucción de infraestructura productiva.

Hasta la fecha se están adelantando diversas labores para recuperar el control pleno del proyecto y de los riesgos asociados.

## **1.6 CONDICIONES ACTUALES DE AMENAZA**

EPM y su equipo de consultores está realizando diversas actividades en pro de disminuir el riesgo para las comunidades aguas abajo del sitio de presa. Estas actividades comprenden diferentes frentes de trabajo.

Ahora cuando el vertedero y la presa están listos para manejar los caudales del río Cauca, las medidas de contingencia son otras:

1. Construir verdaderos tapones para el paso del flujo (controlar los conductos taponados accidentalmente).
2. Conducir el flujo a través del vertedero.
3. Cerrar la entrada de agua por casa de máquinas. Hoy día no se sabe aún con claridad cómo proceder a cerrar la casa de máquinas, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
  - Ya están habilitadas las compuertas operativas de los túneles 1 y 2 de la plazoleta de compuertas, pero no se sabe si resisten las presiones de agua para garantizar el cierre definitivo.
  - No se puede dejar seco el río Cauca aguas abajo de la presa; se debe garantizar, al menos, el caudal ecológico del río. Se requiere habilitar un conducto para evacuar el caudal ecológico cuando se presente una sequía excepcional que obligue al descenso del nivel del embalse por debajo de la cota del vertedero.

4. Entrar a Investigar el estado de las cavernas y recuperar, reparar, o reconstruir. Probablemente el peor panorama está del lado sur. Se sabe que hay derrumbes en el túnel de acceso a la central y que los codos superiores de las unidades 5 y 6 podrían estar colapsados. Las amenazas actuales se pueden agrupar de la siguiente forma.

#### 1.6.1 Filtraciones.

La pantalla corta-flujo está siendo pre excavada con almeja desde la cota 418 hasta la cota 380 msnm en el eje de la presa y e incrustándose 5 m sobre núcleo original de la misma. Está siendo construido con una mezcla de bentonita, cemento y agua (según plano E-PHI-041-PRE-PR-C-006 R4, suministrado por INTEGRAL). En toda la longitud de la presa se está construyendo una pantalla principal de un metro de espesor y en las zonas de los estribos se tiene prevista la construcción de dos pantallas (adicionales adelante y detrás de la pantalla principal) en cada uno de los estribos.

No se tuvo acceso al diseño de esta estructura ni a la selección de los materiales que la componen, ni a las obras complementarias (filtros, drenajes, juntas de construcción, etc.), ni a los procesos constructivos. ***Por tanto, no se tienen herramientas para realizar una evaluación integral de esta estructura, bajo condiciones normales de funcionamiento, bajo cargas hidráulicas máximas de funcionamiento y bajo condiciones de cargas sísmicas.***

Se espera que con esta pantalla se reduzcan significativamente las filtraciones a través del lleno prioritario y en su contacto con los estribos.

A medida que sube el nivel en el embalse y cómo aún no se ha terminado la pantalla corta flujo (discontinuidad en la construcción de la pantalla en el ancho de la presa y en altura, aún persiste la amenaza de filtraciones a través del lleno prioritario. Aún no se conoce el número, la ubicación, la efectividad de los dispositivos de medición de filtraciones y sus resultados. Esta amenaza se debe reducir una vez terminada la pantalla.

Es importante un monitoreo de filtraciones y de niveles o presiones en cuerpo de la misma, especialmente sobre la cota 380. Las mediciones de los piezómetros de hilo vibrátil que registran datos en la zona de configuración inicial y en el lleno prioritario, antes y después del núcleo, aparentemente mientras el embalse estuvo en cotas

superiores a la 380 msnm indicaron que las filtraciones presentadas estuvieron por debajo de los niveles máximos normales de operación esperados. Las presiones de poro medidas en los espaldones de la presa en la configuración inicial y en el lleno prioritario se presentaron en niveles adecuados.

En ambos estribos hay filtraciones, esto es normal en presas de este tipo. En la rocas del estribo izquierdo las filtraciones son mayores que en el derecho, si bien los valores aún no son significativos, ni preocupantes, si es recomendable su monitoreo permanente ya que pueden aumentar con el ascenso del nivel en el embalse.

### 1.6.2 Deslizamientos

- Deslizamiento “Romerito” de la margen derecha hasta tanto no se terminen los terracedos propuestos se deben mantener las compuertas del vertedero abiertas.
- Deslizamientos a lo largo de la vía de acceso que pueden afectar la continuidad de los diferentes frentes de obra

Es claro que el macizo rocoso está relativamente fracturado, presenta zonas de cizalla y está influenciado por las fallas Mellizo, Tocayo y sus ramificaciones (Figura 1.39).



Figura 1.39. Movimientos superficiales en la margen derecha de la presa (Fuente: presentación de Integral "PH\_Ituango\_proceso\_recuperación 7jun18).

Adicionalmente el macizo que rodea la casa de máquinas se encuentra presurizado y sometido a vibraciones, factor que modifica las condiciones de resistencia iniciales (Figura 1.40). Sin embargo, no es probable que estas condiciones induzcan una configuración de falla profunda que desencadene un deslizamiento de grandes proporciones. Es muy probable que se presenten procesos sobre los deslizamientos activos y adicionalmente se amplíen las zonas afectadas.

El plan de monitoreo de la estabilidad de los taludes a través del CMT (Centro de Monitoreo Técnico) es adecuado y efectivo como mecanismo de alerta temprana para mitigar el riesgo del personal que labora en la zona del vertedero y presa.

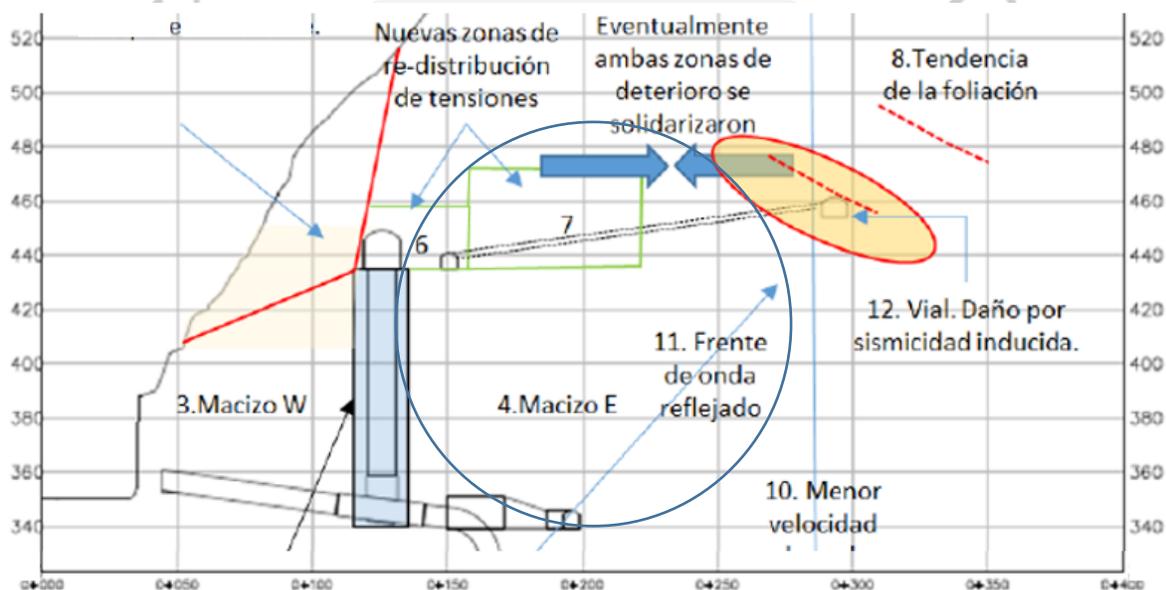


Figura 1.40. Zona de la plazoleta de compuertas sometida a esfuerzos importantes que merecen atención especial (Fuente: Proyecto Hidroeléctrico Ituango, 2018).

De esta forma, se considera necesario profundizar en el mapeo y ubicación de eventos microsísmicos generados en el macizo rocoso de la margen derecha en general y de este volumen en particular, especialmente de eventos localizados en cercanías de los pozos de compuertas y pozos de presión, cavernas de transformadores, de generación y de almenaras. Este estudio permitiría localizar la distribución espacial de los focos de emisión de energía (eventos microsísmicos) y así corroborar la integridad geomecánica del macizo, que hasta el momento se asume con información escasa.

### 1.6.3 Destaponamiento de túneles

#### 1.6.3.1 TDD

La perforación dirigida desde la Galería Intermedia hacia el TDD se terminó a los 32 m; se han hecho otras cuatro perforaciones en la misma área y se ha concluido lo siguiente:

El túnel tiene una carga de sedimentos de 10 m (de los 14 m de altura del túnel), hay zonas con sobre excavación de la bóveda. Hay flujo de agua (verificado por la salida de agua por la descarga), pero no tiene sobrepresión.

Se hicieron ensayos de inyecciones con diferentes tipos de lechada para consolidar los sedimentos. A la fecha de este informe, no se han tenido los resultados esperados. De lograrse el éxito, éste sería el pretapón de aguas abajo. El pretapón de aguas arriba todavía está en estudio. Una vez construido el pretapón de aguas abajo se puede bajar el nivel de alerta actual.

*Ante un des-taponamiento del túnel de desviación derecho, se tienen el sistema de alertas tempranas, las manchas de inundación para diferentes caudales y el monitoreo continuo (24 horas) desde el centro de monitoreo.*

#### 1.6.3.2 GAD

Para el túnel de la GAD se ejecutaron ensayos geofísicos - sísmica de reflexión - para determinar qué tipo de material y cantidad está presente y como está distribuido. Los resultados previos indican que el túnel está completamente taponado y por ende el riesgo de destaponamiento natural es bajo.

Además, se ejecutaron perforaciones dirigidas desde el túnel vial hacia la bóveda del pozo de compuertas y se encontró que la bóveda está seca y, por tanto, sin sobrepresión.

#### 1.6.3.3 Túnel de construcción de la margen izquierda

Existe un túnel de construcción en la margen izquierda con portal de entrada en la cota 311 msnm. Dado que solo tiene pretapones, representa amenaza hasta que se coloque un tapón definitivo.

### 1.6.4 Incertidumbre por casa de máquinas

La calidad media del macizo (GSI bajo) sumado a los procesos hidrodinámicos y la falta de revestimientos, blindajes y refuerzos en algunos sectores son factores que tienen

clara incidencia negativa para el estado esperado de la caverna de generación (zona sur) y almenara sur.

Es de esperarse que la acción del agua sea sumamente perjudicial para la integridad estructural de los contornos rocosos y de su soporte. Adicionalmente, es altamente probable que se presente daño interno en el macizo -abertura de discontinuidades- debido al flujo a alta presión por las mismas, el cual continuara hasta que no se cierren las compuertas 1 y 2 que permiten el flujo de agua por la casa de máquinas.

El estado del complejo de cavernas continúa siendo de difícil diagnóstico hasta que no se pueda tener acceso directo a él. Para lograrlo es necesario el cierre de las compuertas 1 y 2. Debido a la carga de agua sobre estas estructuras, se tiene incertidumbre sobre la operación de las mismas para lograr el cierre (fallas en anclajes, tablero, sellos, guías, etc.).

#### **1.6.5 Habilitar la Descarga Intermedia**

La descarga intermedia se ha estado utilizando como sitio de trabajo y vía de acceso en las labores de taponamiento definitivo de los túneles TDD y GAD.

En la descarga intermedia, DI, las obras están prácticamente terminadas: ya se instaló la compuerta radial, se terminaron los muros en concreto aguas abajo de las compuertas, el portal de entrada del túnel DI ya está listo, incluido el tapón y rejilla; tiene un pre tapón que ya tiene las perforaciones para la voladura, pero hay material de un deslizamiento sobre el portal de entrada.

El túnel DI permitiría el cierre de casa de máquinas y el desembalse, sin dejar seco el río. Para la continuidad de la obra y puesta en funcionamiento de la hidroeléctrica es necesario el destaponamiento de la descarga intermedia.

Para habilitar la descarga intermedia, solamente se requiere la voladura del tapón, actividad que puede hacerse en forma sub-acuática desde el embalse (caso que exige la remoción del material deslizado en el sector de Tenche) ó desde el interior, con un diseño tipo lake tapping. (Figura 1.41).

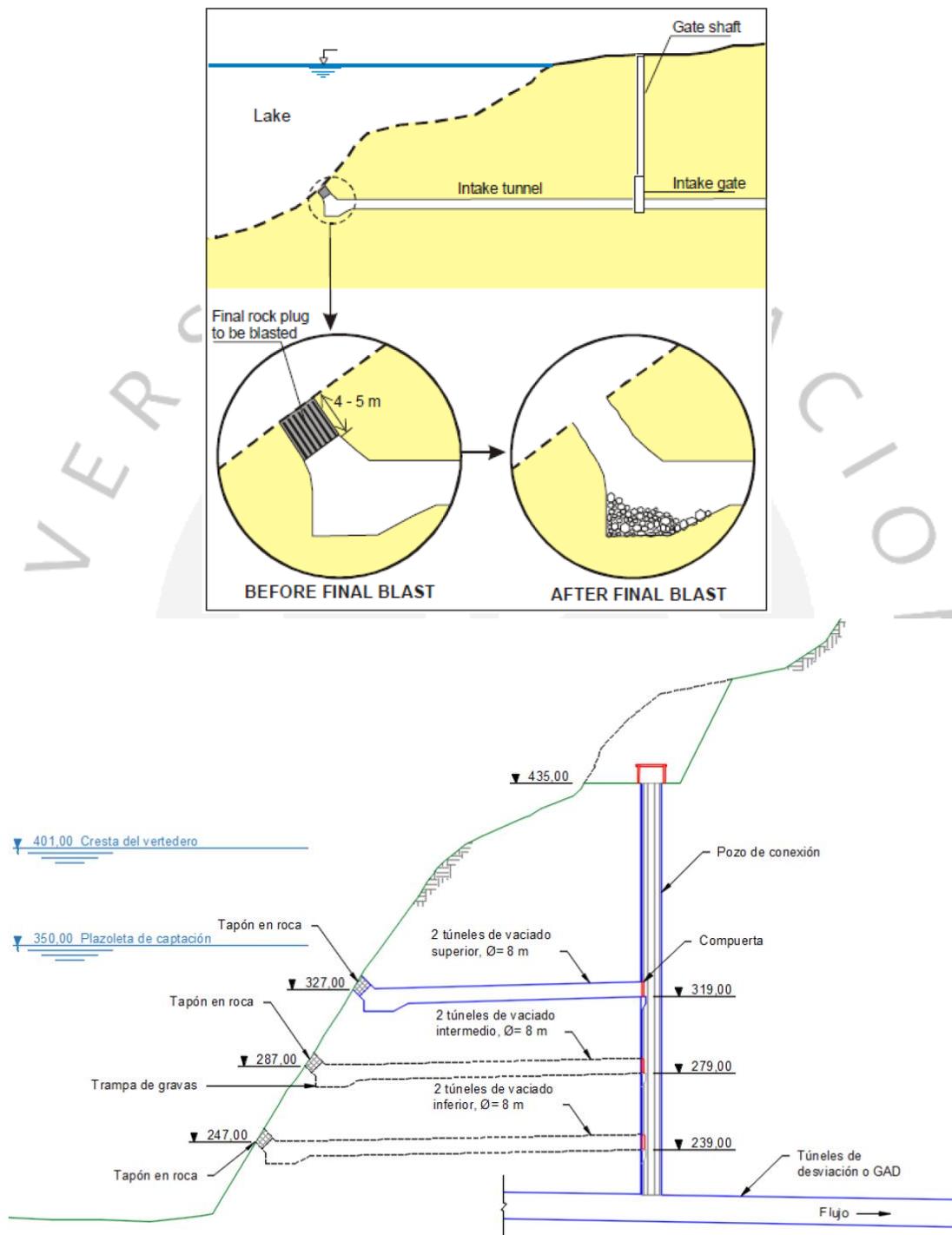


Figura 1.41. Proceso alternativo de habilitar el flujo por el túnel DI. (Fuente: Presentación Dr. Fernando Restrepo INTEGRAL S.A, junio 2018).

En el destaponamiento de la descarga intermedia hay ciertos elementos de incertidumbre, los relativos a la voladura y los asociados a posibles deslizamientos encima del portal y el comportamiento del material (procedente de movimientos en masa) que actualmente está sobre él.

El caudal máximo de diseño de la descarga intermedia (DI) debe garantizar, como mínimo, el caudal ecológico para que en la eventualidad que se cierren compuertas en casa de máquinas y no se tenga flujo por el vertedero, este túnel cumpla con el requerimiento ambiental de descargar un caudal de 450 m<sup>3</sup>/s.

En la descarga intermedia no es prudente que se exceda mucho el caudal de diseño (450 m<sup>3</sup>/s), ya que con caudales mayores, en el tramo aguas arriba de la compuerta se tendrían velocidades del flujo mayores a 8 m/s (velocidad máxima recomendada en la literatura para túneles con recubrimiento de concreto lanzado), lo que podría causar deterioro del recubrimiento y de la roca subyacente y comprometer la estabilidad del túnel en éste tramo.

Este túnel se bifurca en la zona de las compuertas donde se reduce el área total de la sección transversal del flujo en un 40% lo que implica un incremento de la velocidad del flujo. Para el caudal de diseño circulando por los dos brazos se alcanzan valores cercanos a 20 m/s. En esta zona, las especificaciones de los recubrimientos y de los anclajes parecen adecuados para estas velocidades.

A medida que aumenta el nivel en el embalse, para regular el caudal es necesario cerrar parcialmente las compuertas y en la contracción del flujo, aguas abajo, se alcanzan velocidades muy altas. Con el embalse lleno en la cota 406 y con apertura de compuertas para el caudal ambiental (450 m<sup>3</sup>/s) en la zona de la contracción del flujo se alcanzan velocidades cercanas a 50 m/s.

En esta zona de altas velocidades, inmediatamente aguas abajo de la compuerta, se tienen recubrimientos en concreto reforzado con espesores de 2,5 m y 15 m aguas abajo se tiene un aireador, esto permite que en esta zona se puedan tener altas velocidades sin el colapso de la estructura. Sin embargo en el túnel aguas abajo de la compuerta, cuando las velocidades exceden 20 m/s, el flujo puede erosionar el fondo y las paredes del conducto y no es recomendable la operación continua por períodos muy prolongados, periódicamente se debe suspender el flujo para revisar el estado de las

estructuras y si es del caso proceder a mantenimiento o reparación de los recubrimientos.

## **1.7 CENTRO DE MONITOREO**

A principios del mes de junio, se creó, en las instalaciones del campamento Tacuú, el Centro de Monitoreo con un funcionamiento 24 horas en el que profesionales de diferentes áreas evalúan siete componentes del proyecto hidroeléctrico Ituango (Presa, vertedero, caudal de descarga, portal de desviación, captación/compuertas, descarga del proyecto, descarga del túnel de desviación derecho y túnel vial).

Los reportes del centro de monitoreo se entregan, en la mañana y en la tarde, con la información recopilada de las diferentes fuentes de información con el objetivo de brindar información precisa sobre el estado del proyecto al Puesto de Mando Unificado. Es importante mencionar que la información de monitoreo se basa en los reportes de instrumentación diarios enviados por la asesoría, el constructor y/o la interventoría.

El plan de monitoreo de la estabilidad de los taludes a través del CMT (Centro de Monitoreo Técnico) es adecuado y efectivo como mecanismo de alerta temprana para mitigar el riesgo del personal que labora en la zona del vertedero y presa.

### **1.7.1 MONITOREO DE LA PRESA**

El centro de monitoreo recibe la información diaria de las mediciones de la instrumentación instalada tales como: piezómetros, celdas de asentamiento, celdas de presión, puntos de control e infiltraciones. Así mismo, se instaló un radar SSR (Slope Stability Radar) de frente a la cara aguas abajo de la presa para reportar velocidades de deformación. Con el monitoreo de la presa también se reportan los caudales de entrada y de salida al proyecto.

El monitoreo constante de la instrumentación de la presa permite concluir, a día de hoy, lo siguiente para cada instrumentación instalada:

- Piezómetros de cuerda vibrátil - Fundación: De forma general estos instrumentos presentan variaciones pequeñas en la cabeza de presión, como respuesta a la reducción del nivel del embalse. No obstante, algunos piezómetros, en el costado aguas abajo de la cortina impermeable presentan un aumento 1,22 mca, alcanzando la cota 270,59. Actualmente, para mantener

el control y remediar estos cambios, se están ejecutando perforaciones de drenaje y trabajos de refuerzo de las inyecciones de la cortina profunda desde la galería 250 de la Margen Izquierda, lo cual puede generar cambios en las líneas de flujo, por lo que se deberá continuar analizando el comportamiento de estos instrumentos a medida que avanzan las inyecciones.

- Piezómetros de cuerda vibrátil - Núcleo: Las lecturas de algunos piezómetros presentan valores oscilantes. En general, el comportamiento es aceptable y se encuentra dentro de los rangos esperados para las condiciones actuales de la presa.
- Piezómetros de cuerda vibrátil - Estribos: Los piezómetros localizados en el estribo izquierdo se encuentran secos. Se realizó lectura de los piezómetros del estribo derecho, los cuales muestran un aumento máximo de 0,12 mca.
- Celdas de presión - Núcleo: En general los instrumentos localizados en la cota 360 muestran un aumento máximo de 8,25 kPa respecto a la lectura del día anterior, registrada en el sensor inclinado de la celda CP-4, ubicada en la abscisa 480. Estos elementos presentan un mayor incremento en las presiones verticales después del embalse no programado, las cuales son del orden de 752,98 kPa, las presiones inclinadas y horizontales se encuentran alrededor de los 212,65 kPa. Por otro lado, las celdas localizadas en el tercio inferior registran aumento de presión respecto a la lectura del día anterior, el aumento máximo fue de 1,19 kPa en el sensor horizontal de la CP-5; desde el inicio del llenado se registran presiones similares en todas las direcciones. Estas magnitudes responden al comportamiento esperado de la Presa teniendo en cuenta el material que se continúa colocando en la parte superior y la influencia del embalse.
- Celdas de Asentamiento: Las celdas en el material 1A son las que han mostrado los mayores asentamientos, principalmente en los elementos CA-10 y CA-19, ubicados en la cota 360, las cuales alcanzan valores de 68,25 cm y 97,03 cm respectivamente, desde el 27/abril. Valores de asentamientos que se encuentran dentro de los rangos esperados en una estructura como esta presa.
- Puntillas de control topográfico cota 370 - aguas abajo: Desde la primera lectura (8 de junio/2018), se registra un desplazamiento y asentamiento promedio de 17,15 cm y 23,33 cm respectivamente, siendo este un comportamiento dentro de lo esperado.
- Puntos de control superficial aguas arriba: Se instalaron tres nuevos puntos de control para monitoreo de deformaciones en el espaldón aguas arriba de la

Presa, en la cota 409, los cuales registran desplazamientos y asentamientos promedio de 1,30 cm y 9,33 cm respectivamente desde su fecha de instalación (19/08/2018). Estos valores se encuentran dentro de un rango aceptable y esperado.

La instrumentación disponible en los llenos de la Presa (antes de iniciar la colocación de la pantalla de concreto plástico) permite concluir que el comportamiento general de la estructura es adecuado. Se encuentran en observación los puntos de control superficial aguas abajo y aguas arriba y los piezómetros localizados en la cota 360 del núcleo

Con el fin de mantener un control de los avances que realiza el constructor en la presa y correlacionarlo con los niveles del embalse y el cumplimiento del cronograma, cada día el centro de monitoreo recibe la información correspondiente a los procesos constructivos de la presa.

Las infiltraciones que se han presentado en la margen derecha, izquierda y en la presa son medidas día a día. Actualmente (sept. 2018) no se reportan las infiltraciones en la margen derecha y en la presa. Las filtraciones de agua de la margen izquierda se resumen en una galería en la cota 250 y se realizan inyecciones para controlarlas.

### **1.7.2 VERTEDERO**

El vertedero por ser una de las estructuras principales del proyecto es constantemente monitoreado desde su construcción, en esta estructura se tienen instalada diferente instrumentación como inclinómetros, celdas de carga, extensómetros y piezómetros. Adicional, se implementó el monitoreo mediante Radar PMP (Probable Maximum Precipitation), el cual fue instalado aguas abajo de la presa.

Los reportes de las mediciones de la instrumentación se reciben a diario en el centro de monitoreo y son enviados al Puesto de Mando Unificado cada 12 horas. A la fecha todos los reportes de la instrumentación presentan un comportamiento estable y dentro de los rangos establecidos por el diseño, sin novedades.

### **1.7.3 OTROS PUNTOS DE MONITOREO**

El Centro de monitoreo recibe la información de la instrumentación instalada en la margen derecha del macizo sobre la plazoleta de captación de casa de máquinas

correspondiente a algunos inclinómetros, piezómetros, celdas de carga así como información sobre el derrumbe encima de los portales de los túneles de desviación, los cuales se monitorean con el radar LIDAR (Light Detection and Ranging), que entrega información de desplazamiento en milímetros por hora.

## 1.8 CONCLUSIONES FINALES

Los túneles de desviación se construyen para desviar el río durante la construcción de la presa y demás obras complementarias y deben cerrarse cuando se está terminando la construcción y se quiere iniciar el llenado del embalse. Para esta operación los túneles deben tener compuertas.

En el proceso de construcción del sistema de desviación del río Cauca, la empresa constructora SAINC INGENIEROS y FERROVIAL AGROMAN, empezó la construcción de los túneles en 2012 y la obra fue terminada en forma incompleta 14 meses después de lo planeado. También fue modificada (no se colocaron las compuertas que estaban planeadas) debido a los retrasos y a la ocurrencia de un derrumbe que impidió terminar las actividades en forma exitosa (invadió la zona para la ubicación de la compuerta).

Según EPM:

“Como resultado de las dificultades geológicas encontradas durante la construcción de las vías de acceso al proyecto, las situaciones de orden público y las dificultades para construir los emboquilles de los ramales de entrada de los túneles de desviación, si se continuaba con el diseño original, el proyecto se vería abocado a impactos programáticos severos que retrasarían la entrada en operación comercial prevista para el segundo semestre de 2018.”

“Esta situación condujo a EPM a evaluar acciones que permitieran mitigar los efectos generados por los retrasos y aportar elementos para la toma de decisiones enfocadas a desviar en febrero de 2014 (en el cronograma inicial la desviación debía iniciar en enero del 2013), resultado de las cuales se encontró, luego de evaluar el incremento en los costos por dificultades en la construcción de las compuertas en los ramales de entrada de los túneles, el sobre costo por el retraso a los contratistas de la presa, las posibles multas y el lucro cesante por el retraso del proyecto, que era necesario construir un sistema auxiliar de desviación (SAD)”, u otro túnel de desviación.

Con base en el cronograma inicial (tomada la decisión de construir la SAD) en julio de 2017, se tenía previsto el cierre del túnel izquierdo y en enero del 2018 el túnel derecho; sin embargo, la SAD solo inició a funcionar hasta septiembre de 2017. En ese entonces, los tres túneles funcionaron al mismo tiempo, y dado que para esa fecha el río Cauca comienza a presentar caudales altos, no era razonable tapar ninguno de los túneles. La GAD estuvo operando como único túnel de desviación desde marzo de 2018.

Las directivas del proyecto decidieron (febrero 2014) reemplazar las compuertas por tapones de concreto y construir la GAD, aguas arriba de los portales de los túneles TDI y TDD, que se conectara con un conducto de descarga de casa de máquinas (descarga 4), ya construido. Internamente la GAD se divide en tres galerías con compuertas para la operación de cierre y una de ellas tendría funciones permanentes como descarga de fondo; estos ramales se juntan en una galería que se conecta con uno de los túneles de descarga de las turbinas de la central, aguas abajo de la almenara.

Sin embargo, hay que considerar que el diseño inicial de tener los dos túneles de desviación con sus respectivas compuertas era una alternativa más robusta que la que consideraba la SAD, ya que, en caso de una contingencia en el túnel derecho, existía la posibilidad de abrir la compuerta que cerraba el túnel izquierdo. Mientras que, en el caso de la alternativa con la SAD, al presentarse una emergencia, la posibilidad de habilitar otro conducto de desviación era una tarea muy difícil de realizar en tiempo reducido, ya que implicaba la remoción de pre tapones y tapones definitivos de concreto.

En ambos casos, el análisis de riesgos se concentró en la variabilidad de los caudales en el Cauca y la capacidad de los conductos con distintos niveles de la presa en construcción, siempre contando con que las características de los túneles, la resistencia de las rocas con los recubrimientos colocados en el proceso de construcción, le permitían un buen desempeño durante este período de funcionamiento con todo el caudal del río Cauca.

De acuerdo con lo anterior se puede concluir que, la decisión de construir un nuevo túnel de desviación (SAD) fue netamente económica y que de no haber fallado la GAD, la decisión hubiera sido muy oportuna; sin embargo, al tomar la decisión no se consideró un plan de contingencia ante una falla del túnel; sino que se limitó a un análisis de crecientes en el Cauca.

Aunque los Planes de Contingencia General (2011) y del SAD (2016) se adelantaron de acuerdo con los términos de referencia emitidos por el MAVDT y la ANLA y contaron con su aval, se destaca que en el análisis de riesgos del proyecto se subestimaron las amenazas y los riesgos de los eventos que se materializaron en el proyecto y que efectivamente detonaron la emergencia desde el 28 de abril.

Haber subestimado en los Planes de Contingencia las amenazas y los riesgos que finalmente se materializaron o que incrementaron su categoría, probablemente conllevó a que no se establecieran previamente las medidas de prevención requeridas para evitar o mitigar los efectos de los eventos registrados desde la emergencia del 28 de abril.

En el análisis de los riesgos, no se adoptó el modo de manifestación, sino que sólo se tuvo en cuenta el contexto espacial genérico o específico según el tipo de amenaza evaluada.

En la evaluación del riesgo no se tuvo en cuenta la interacción entre sucesos o tipos de amenazas que conllevarían a incrementar la categoría de unas u otras, tal como sucedió a partir de la contingencia del 28 de abril.

Para las intervenciones de recuperación que se están adelantando y que en el futuro inmediato se deben adelantar en el proyecto se recomienda la actualización del análisis de riesgos el cual debe considerar la interacción de eventos de amenaza, además de tener en cuenta en los escenarios un enfoque de modo y lugar de manifestación del evento generador de amenaza.

Se pudo causar afectación a las excavaciones situadas a 100 m del sitio de voladura del tapón #9 del Túnel de Desviación izquierdo (TDI). Hubo premura por volar el tapón # 9.

El macizo ha recibido una afectación significativa por la energía de las voladuras que se realizaron en el tapón #9 del túnel de desviación izquierdo y por las pulsaciones que generaron en su momento el complejo subterráneo de generación. Esa afectación se pudo dar en forma de creación de microgrietas en el macizo rocoso ubicado entre la voladura del tapón y la excavación a una distancia de 100 metros. Es necesario tener en cuenta al momento de evaluar la competencia del macizo rocoso ante un eventual cierre de las compuertas 1 y 2, ya que dicho cierre demandara altas cantidades de aire

que de no ser suministradas podrían generar concentración de esfuerzos en el macizo rocoso e incluso falla del mismo.

Se requiere control especial en la vía de acceso al embarcadero El Bombillo (últimos 200 m) dados los deslizamientos de la banca de la vía y el agrietamiento continuo en la misma. Ya hubo que hacer un desvío por hundimiento de la vía actual. Los vehículos livianos (incluyendo buses de pasajeros) deben parquearse sobre la vía esperando el turno para pasar en el ferry.

Para investigar la **causa-raíz** del problema del proyecto hidroeléctrico Ituango (evento de taponamiento del Sistema Auxiliar de Desviación), EPM decidió contratar la firma Chilena SKAVA CONSULTING, como firma independiente, la cual deberá concluir porqué razón se generó la contingencia del proyecto Hidroeléctrico Ituango.

Esta empresa deberá tener a disposición toda la información técnica necesaria y desplazarse a la zona del proyecto para encontrar las causas del problema y los factores determinantes que detonaron las situaciones de emergencia. Para ello empresas como Integral S.A han venido realizando una serie de perforaciones exploratorias dirigidas al sistema auxiliar de desviación (SAD) que permitan recolectar información geológica del sitio y complementar la información a entregar a esta empresa.

El grupo de profesionales de la Universidad Nacional, conformado para analizar los procesos que se estaban presentado después de la emergencia, su evolución y las medidas de control **no** contó con toda la información necesaria solicitada; tampoco el tiempo de duración (dos meses) del contrato hubiera sido suficiente para llegar a tener respuestas similares a las que se esperan de la firma SKAVA; además, estimar la causa raíz no era el objeto del estudio de este grupo de la Universidad.

La pregunta que se hacen todos los colombianos del común es si el proyecto sigue siendo viable después de todos los problemas que se han presentado a raíz de la emergencia y después de todas las modificaciones que se han implementado para recuperar el proyecto. Ese interrogante está siendo analizado por la firma Suiza POYRY que tendrá la responsabilidad de informar si el proyecto es viable y a qué costo.

## 1.9 REQUERIMIENTO DE INFORMACIÓN.

### ***Estudios y diseños para conformación de taludes y excavaciones superficiales en la margen derecha***

- Geología estratigráfica local. Descripción y distribución de suelos en el área.
- Criterios de selección del sitio de las obras principales.
- Consideraciones de cálculo y resultados de modelos de diseño de taludes, cortes y demás elementos de incidencia en la estabilidad del terreno de la margen derecha. Elementos de refuerzo y contención. Obras de drenaje.

### ***Estudios y diseños para construcción de las cavernas principales, pozos, túneles de desviación y galería auxiliar de desviación***

- Geología estructural local. Descripción y análisis de discontinuidades del macizo rocoso
- Resultados de estudios de exploración directa e indirecta, anteriores y en obra.
- Criterios de selección del sitio de las obras subterráneas principales.
- Evaluación de la heterogeneidad del macizo rocoso en el volumen de la obra. Clasificaciones geomecánicas.
- Medición de esfuerzos in situ.
- Consideraciones de cálculo y resultados de modelos de diseño resultados de modelos numéricos utilizados.
- Consideraciones y resultados de modelos de diseño de sistemas de refuerzo y soporte de las excavaciones subterráneas, con especial detalle en las obras colapsadas GAD-TD.

### ***Estudios y diseños para la fundación de la presa***

- Exploración realizada
- Geología estratigráfica del sitio de presa.
- Diseño de la cimentación y sus tratamientos.
- Diseño sísmico de la cimentación.

### ***Estudios y diseños para la construcción del lleno de la presa***

- Diseño del cuerpo de la presa: sistema de defensa contra problemas hidráulicos, entre otros.

- Especificaciones de construcción.
- Control de construcción y bitácora por parte de la interventoría.
- Informe de diseño.

***Estudios y diseños para la construcción del Lleno prioritario de la presa***

- Control de construcción por la interventoría.
- Control de calidad por el contratista.
- Especificaciones constructivas para la inyección de la lechada de bentonita al llenado prioritario.
- En cuanto al lleno prioritario, queda pendiente de entrega los planos finales (lo que realmente se construyó “as Built”), debido a que se llevaron a cabo cambios en la ejecución de la obra. se realizó un llenado con el material 1A desde la cota 385 a la 385.8.

***Estudios y diseños geotécnicos relacionados que puedan ser usados para la evaluación del estado del terreno en superficie y bajo tierra.***

- Reportes históricos de instrumentación de la zona (inclinómetros y piezómetros) reportes de sismicidad de la zona.
- Datos de presiones de inyección en la presa incluida las presiones de las nuevas medidas correctivas aplicadas con bentonita.
- Fotografías de los históricos de construcción de los túneles de desviación izquierdo y derecho, GAD o SAD, vertedero, plazoleta de captación de casa de máquinas, otras excavaciones en margen derecho y obras y túneles adelantadas en margen izquierda.
- De ser posible, informes de los asesores independientes externos que han visitado y emitido concepto del proyecto: Barton, Donald Bruce, Jean Launay y otros relevantes.
- Informes y planos de los diferentes escenarios de riesgo evaluados por parte de EPM, con los cuales se hecho la caracterización de las zonas afectadas.

## CONTENIDO

1	RESUMEN EJECUTIVO.....	31
1.1	INTRODUCCION.....	31
1.2	ANTECEDENTES.....	33
1.3	MEDIDAS DE CONTINGENCIA.....	37
1.3.1	CONTROL DEL NIVEL DEL EMBALSE.....	37
1.3.2	TERMINACIÓN DEL VERTEDERO Y LA PRESA.....	46
1.4	ESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO (MARGEN DERECHA).....	50
1.4.1	GEOMORFOLOGÍA.....	50
1.4.2	PROGRAMA DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA .....	51
1.4.3	OBRAS SUPERFICIALES .....	54
1.4.4	OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	58
1.4.5	SUMMARY OF GENERAL OBSERVATIONS FROM THE VISIT TO THE ITUANGO DAM CONSTRUCTION SITE. Navid Mojtabei .....	71
1.5	ACTUACIONES AMBIENTALES FRENTE A LA CONTINGENCIA DEL 28 DE ABRIL.....	72
1.5.1	CONSIDERACIONES SOBRE LA LICENCIA AMBIENTAL.....	72
1.5.2	SOBRE EL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) .....	74
1.6	CONDICIONES ACTUALES DE AMENAZA.....	76
1.6.1	Filtraciones.....	77
1.6.2	Deslizamientos.....	78
1.6.3	Destaponamiento de túneles .....	80
1.6.4	Incertidumbre por casa de máquinas.....	80
1.6.5	Habilitar la Descarga Intermedia.....	81
1.7	CENTRO DE MONITOREO.....	84
1.7.1	MONITOREO DE LA PRESA.....	84
1.7.2	VERTEDERO .....	86
1.7.3	OTROS PUNTOS DE MONITOREO.....	86

1.8	CONCLUSIONES FINALES .....	87
1.9	REQUERIMIENTO DE INFORMACIÓN .....	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Distintas etapas de la construcción del proyecto hidroeléctrico Ituango (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	31
Figura 1.2.	Registro de caudales en la estación Olaya (río Cauca) desde el mes de enero hasta el mes de agosto de 2018 (elaboración propia).....	34
Figura 1.3.	Residuos sólidos flotantes identificados en cercanías de la GAD: a) Zuleta, 2018, b) Múnera, 2018) y c) el embalse, autoría propia, mayo 2018.....	34
Figura 1.4.	Deslizamiento del 21 de abril de 2018 (aproximadamente 25000 m <sup>3</sup> ) sobre el portal de entrada de la descarga intermedia .....	35
Figura 1.5.	Vista de la chimenea o sumidero en la ladera cercana al portal de la GAD, el 30 de abril de 2018 (INGETEC-SEDIC, 2018). A la izquierda se muestra el perfil del terreno donde se ubica la chimenea, entre cotas 320 y 385 msnm.....	35
Figura 1.6.	Registro de caudales en el río Cauca en el mes de abril, estación Olaya; a) Caudales máximos anuales, b) curva de excedencia de caudales en el mes de abril (Fuente: equipo técnico UNAL, 2018).....	37
Figura 1.7.	Localización túneles de desviación TDI, TDD y Sistema Auxiliar de desviación, SAD, propuesto y aprobado (Adaptado de OBRAS SUBTERRÁNEAS PLANTA Y 3D_31_05_2018, EPM). .....	38
Figura 1.8.	Diseño de voladuras para destruir el tapón No. 9 del TDI (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	40
Figura 1.9.	Radio de afectación de las voladuras del tapón No. 9 del TDI (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	41
Figura 1.10	Resumen de voladuras realizadas en el tapón No.9 del túnel de desviación izquierdo (Fuente: INGETEC-SEDIC, 2018).....	41
Figura 1.11.	Túnel de descarga Intermedia. Cámara de compuertas. a) Vista en perfil, b) Vista en planta, c) sección transversal túnel antes de las compuertas (fuente: INTEGRAL S.A, 2018).....	42
Figura 1.12.	Descarga intermedia. Perfil longitudinal Escenario 3, dos compuertas parcialmente abiertas h = 1,50 m para un caudal de 450 m <sup>3</sup> /s (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	44

Figura 1.13. Obras de control del flujo del proyecto hidroeléctrico Ituango. Vertedero terminado y presa en su etapa final (Fuente: equipo técnico UNAL, 2018).....	46
Figura 1.14. Perfil longitudinal por el eje de la presa, antes de la contingencia (Fuente: presentación hecha por INTEGRAL S.A, 2018).....	47
Figura 1.15. Esquema de la presa con los distintos tipos de materiales usados en construcción (Fuente: plano D-PHI-041-PRE-PC-C-010, INTEGRAL S.A, 2018).....	48
Figura 1.16. Estado actual de la presa donde se observan (círculos) las huellas de las filtraciones (Fuente: Registro SIATA, 24 de octubre de 2018) .....	49
Figura 1.17. Procesos geomorfológicos cerca al sitio de presa (Woodward & Clyde, 1980).....	51
Figura 1.18. Mapa Geológico y Corte geológico regional de la zona de interés y esquema en profundidad en sentido NW-SE (Fuente: planchas 115 Toledo (1975) y 104 Ituango (1975) Ingeominas, escala 1:100000. ....	52
Figura 1.19. Características de las galerías exploratorias (Fuente: D-PHI-CCE-ADM-C0082 “Caracterización geológica y geotécnica”).....	53
Figura 1.20. Localización en planta de perforaciones en el complejo de casa de máquinas (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	53
Figura 1.21 Macizo caracterizado durante la etapa de exploración (Fuente: Equipo técnico UNAL,2018).....	53
Figura 1.22 Vista de perfil de las perforaciones exploratorias en la ladera derecha (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	54
Figura 1.23. Deslizamientos margen derecha (Fuente: elaboración propia a partir de imágenes SIATA, 2018) .....	55
Figura 1.24 Vista de deslizamiento encima de túneles de desviación (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	56
Figura 1.25. Obras de control Sector Romerito, Macizo rocoso margen derecha de la presa (Fuente: Presentación INTEGRAL S.A, junio 2018).....	57
Figura 1.26. Obras subterráneas a las cuales se ha podido tener acceso (Fuente: Tomado y adaptado de Proyecto Hidroeléctrico Ituango, 2018a).....	58
Figura 1.27. Resultados de la voladura # 1 del Tapón No. 9, TDI (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018) .....	59
Figura 1.28. Filtración de agua - Descarga Intermedia (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	60
Figura 1.29. Estado del túnel de acceso a casa de máquinas a) Piso y solera b) socavación (Fuente: Equipo UNAL, 2018).....	61
Figura 1.30 Concreto lanzado en túnel de acceso a casa de máquinas (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	62

Figura 1.31. Índice GSI (Geological Strength Index) en la zona sur de Casa de Máquinas (Fuente: I-2194-GYG-MR-R0_Parámetros macizo rocoso).....	63
Figura 1.32. Afectaciones galería de pozo de compuertas, levantados por la Interventoría (Fuente: PHI-INO-LC1-058-R0).....	64
Figura 1.33. Daños levantados en Galería de comunicación entre pozos de compuertas (Fuente: PHI-INO-LC1-054-R0).....	65
Figura 1.34 Galería de pozos de compuertas (Fuente: PHI-INO-LC1-054-R0).....	66
Figura 1.35. Medidas tendientes a taponar el túnel de desviación derecho, TDD (Foto tomada en el campamento a plano pdf de INTEGRAL).....	67
Figura 1.36. Funcionamiento hidráulico de la GAD con diferentes caudales de entrada (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	68
Figura 1.37. Variación de caudales de entrada al embalse y velocidades del flujo en la GAD, entre el 19 de febrero y el 05 de mayo, 2018 (Equipo técnico UNAL, 2018).....	70
Figura 1.38 Levantamiento geofísico sección de GAD (Fuente: Fuente: Integral-Mapa de interpretación sísmica GAD.pdf).....	71
Figura 1.39. Movimientos superficiales en la margen derecha de la presa (Fuente: presentación de Integral "PH_Ituango_proceso_recuperación 7jun18).....	78
Figura 1.40. Zona de la plazoleta de compuertas sometida a esfuerzos importantes que merecen atención especial (Fuente: Proyecto Hidroeléctrico Ituango, 2018). .....	79
Figura 1.41. Proceso alterno de habilitar el flujo por el túnel DI. (Fuente: Presentación Dr. Fernando Restrepo INTEGRAL S.A, junio 2018). .....	82

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno (elaboración propia).....	68
Tabla 1.2 Algunas amenazas evaluadas en los Planes de Contingencia del proyecto, PC (Fuente: Equipo técnico UNAL, 2018).....	75

