

Ésta es una traducción del documento en inglés preparado por el Panel de Asesores Independientes de BID Invest. En caso de discrepancia entre esta versión y la original, prevalecerá lo sostenido en el documento original.

**Panel de Asesoramiento Independiente de BID Invest,  
Informe del IAP n.º 1, septiembre de 2018**

**Proyecto Hidroeléctrico Ituango,  
Colombia**

**Final\_181004**

**Federico Ciampitti**

*Equipos hidráulicos, mecánicos y  
eléctricos*



Via L Tolstoi 72, 20146 Milano Italia  
Tel. +39 335 1007517  
Federico.ciampitti@gamil.com

**Pavlos Marinos**

*Ingeniería Geológica y Geotécnica*



23A, Penetoliou str. 11741, Atenas, Grecia  
Tel. +30 694 4301993  
marinos@central.ntua.gr

**Alessandro Palmieri**

*Ingeniería y Seguridad de Presas (Presidente)*



Via Massini 25, 00136 Roma, Italia  
Tel. + 39 063 5400737  
Arp.palmieri@gmail.com

## Índice

Resumen ejecutivo .....	i
1 Introducción .....	1
2 Eventos de la primavera de 2018 .....	2
2.1 Cronología de eventos.....	2
2.2 Consideraciones geotécnicas.....	3
2.3 Manejo de emergencias .....	6
2.4 Balance de los eventos de la primavera de 2018.....	8
2.5 Fortalecimiento del equipo del diseñador .....	8
3 Evaluación de ingeniería .....	9
3.1 Condiciones geológicas de ingeniería del sitio del Proyecto.....	9
3.2 Evaluación geotécnica .....	12
3.2.1 Sitio de la represa.....	12
3.2.2 Medidas de protección de pendientes.....	14
3.2.3 Complejo de cavernas de la sala de máquinas .....	17
3.2.4 Posibles desprendimientos en el embalse .....	20
3.3 Condiciones de la represa.....	21
3.4 Equipos hidráulicos, mecánicos y eléctricos .....	23
3.4.1 3.4.1 Compuertas.....	23
3.4.2 Equipo de la sala de máquinas.....	24
3.5 Gestión de seguridad de la represa .....	30
4 Planes para la continuación del proyecto .....	31
4.1 Análisis del modo de falla potencial .....	31
4.2 Medidas estructurales relacionadas con la seguridad.....	32
4.3 Implicaciones de costes y cronogramas .....	33
4.3.1 Estimaciones de costes.....	33
4.3.2 Consideraciones del cronograma.....	34
5 Sostenibilidad del proyecto.....	35
5.1 Salida de nivel medio.....	35
5.2 Gestión de la sedimentación.....	37
5.3 Evaluación de opciones para la finalización del proyecto.....	40

6	Conclusiones y recomendaciones del IAP .....	41
6.1	Principales conclusiones del IAP .....	41
6.2	Recomendaciones del IAP .....	45

#### *Anexos*

1. *Atendencia reuniones en Medellín, julio 30 y 31*
2. *Lista de documentos puestos a disposición del IAP*
3. *Reconstrucción detallada de los eventos de la primavera de 2018*
4. *Matriz de nivel de respuesta*
5. *Detalle Costo Ituango BID 36 meses (EPM agosto 2108)*
6. *Cronograma de recuperación y puesta en servicio (EPM septiembre 2018)*

#### **Glosario de acrónimos**

ADT: túnel de desvío auxiliar

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

CAP: capacidad del embalse

EPM: Empresa Pública Medellín

FEM: análisis de elementos finitos

GAD: galería auxiliar de desviación - SAD: sistema alternativo de desviación

GSI: índice de fortaleza geológica

IAP: Panel Asesor Independiente de BID Invest

IDG: galería de descarga intermedia

MAF: flujo medio anual

MAS: producción media anual de sedimentos

MLO: salida de nivel medio

PFMA: análisis del modo de falla potencial

RESCON: conservación del embalse

TD2: túnel de desvío 2

XLPE HV: cables de polietileno reticulado de alta tensión

## *Resumen ejecutivo*

El proyecto hidroeléctrico Ituango está en construcción en el noroeste de Colombia desde 2009. En la primavera de 2018, cuando se había completado más del 84 % de las obras, una serie de eventos pusieron en grave peligro la represa de Ituango, durante las fases finales de la construcción del dique.

El presente Informe contiene los hallazgos y las recomendaciones del Panel Asesor Independiente que BID Invest designó para revisar la situación e informar a la Institución sobre las lecciones aprendidas y las opciones viables para la continuación y finalización del Proyecto.

El evento que originó la emergencia fue un colapso del túnel con un sumidero que obstruyó el túnel de desvío del río (GAD). El colapso fue causado por la interacción del agua con el macizo rocoso. Es muy probable que la irregularidad local del revestimiento, debido a la estructura del macizo rocoso y, posiblemente, a la roca muy débil en el área sobre el túnel, que no se detectó durante la excavación, haya favorecido la rápida propagación de la erosión localizada y, en consecuencia, la falla progresiva. Los posteriores movimientos masivos, que tuvieron lugar en diferentes partes de los canales de agua, fueron consecuencia del flujo incontrolado de agua a través de galerías interconectadas, algunas de las cuales nunca fueron diseñadas para la conducción de agua.

La emergencia se enfrentó a medidas extremas, que involucraron el uso del complejo de la sala de máquinas subterránea para fines de descarga de agua, una medida inevitable, ya que la represa, en construcción, no había alcanzado el nivel del aliviadero. Las medidas resultaron exitosas, a expensas de costes adicionales significativos y un retraso en el cronograma para el Proyecto. La advertencia oportuna de las comunidades río abajo evitó víctimas y permitió contener los daños económicos.

El IAP no tiene comentarios importantes sobre el diseño de la represa. Con base en los datos proporcionados, el núcleo de arcilla, la zonificación, el diseño del filtro, los materiales, el análisis estático y dinámico y la instrumentación de la represa de Ituango responden a las mejores prácticas de ingeniería en el diseño de represas. La zonificación de la represa se modificó, por encima de la altitud de 385 metros sobre el nivel del mar (msnm), para acelerar el aumento del dique durante la respuesta de emergencia. Se está construyendo un diafragma de plástico para mejorar la hermeticidad de la zona. El Diseñador está investigando la estabilidad global de esa parte de la represa. Los resultados son razonables e indican las condiciones de estabilidad marginalmente aceptables del relleno adicional, que generalmente son satisfactorias para el estado de emergencia.

El Complejo de cavernas de la sala de máquinas mostró un comportamiento satisfactorio del macizo rocoso, con una deformación máxima, localizada solamente, del orden de 100 mm. Se monitorearon las infiltraciones y se realizó el enrutamiento de consolidación. Los análisis FEM mostraron que no es probable que cualquier colapso extendido afecte la estabilidad de la pendiente parietal y el túnel de acceso adyacente. Las condiciones posteriores a la inundación se evaluarán cuando el área sea accesible. El abandono de la caverna es poco probable, pero podrían ser necesarios importantes trabajos de refuerzo y reconstrucción.

Durante la operación del embalse, se producirán pequeños desprendimientos a nivel local, en las zonas

erosionadas y desgastadas de las pendientes, a lo largo del borde del lago. Se considera que tales movimientos masivos no generan ondas de impacto peligrosas, sino que contribuyen lentamente a la sedimentación del embalse. El Diseñador ha llevado a cabo un análisis de ondas de impacto para verificar la idoneidad del francobordo de la cresta de la represa disponible (15 m) para contener las subidas de las olas. Los resultados indican que dicho francobordo es adecuado.

La inspección visual de las compuertas del aliviadero y de la IDG no evidenció motivos de preocupación. Las compuertas están operativas y probadas. En el momento de la visita del IAP, las obras de acabado y la implementación del sistema de control estaban en curso.

El desvío del río a través del complejo de la sala de máquinas sin duda ha causado daños a las obras subterráneas y a los equipos ya instalados. El nivel de dichos daños no se puede predecir antes de la inspección visual de las obras subterráneas. Recientemente (septiembre de 2018) los orificios perforados han revelado que el macizo rocoso sobre el techo de la caverna está en buenas condiciones. La fecha de acceso se puede estimar, como muy pronto, en marzo de 2019 (muy optimista), y de manera más realista en diciembre de 2019.

Aunque no es muy común, la inundación de la Central Eléctrica Ituango tiene precedentes. El equipo rehabilitado después de la inundación no debe estar sujeto a riesgos residuales significativos durante el funcionamiento de la planta. El cronograma general del proyecto, con una importante rehabilitación de obra civil, la disponibilidad en inventario de al menos un conjunto completo de equipos electromecánicos para instalar las dos primeras unidades, son elementos que pueden reducir los riesgos residuales durante la operación.

El Diseñador opera un sistema de seguridad de represas satisfactorio en el sitio. Las medidas implementadas hasta la fecha, así como los trabajos en curso relacionados con la seguridad y el mantenimiento, permiten expresar una evaluación positiva sobre la seguridad del proyecto en su configuración actual.

Los trabajos de taponamiento en el TD2 y la GAD representan la actividad más urgente para la continuación del Proyecto. Los tratamientos de inyección de lechada son una operación bastante impredecible y es probable que requieran series de prueba y error significativas, así como una gestión adaptativa; como tal, su duración es muy difícil de predecir.

Por el momento, se debe asumir con prudencia que la puesta en marcha de la planta se puede retrasar de 3 a 4 años a partir de la fecha prevista de diciembre de 2018.

Es de esperar que, después de unos 50 a 60 años, la planta tendrá que ser operada como una central de pasada, y los sedimentos gruesos tendrán que ser manejados. La hidroaspiración o el dragado táctico frente a las entradas pueden prolongar aún más la vida útil de la planta. El desmantelamiento será necesario cuando la gestión de sedimentos gruesos ya no sea económica. Es demasiado prematuro analizar posibles escenarios de desmantelamiento en esta etapa, pero será necesario que EPM reserve un fondo de desmantelamiento durante la vida útil de la planta.

Además de varias medidas no estructurales, las principales recomendaciones del IAP son:

- Extender el mismo tratamiento y la misma protección corriente arriba de las pendientes del aliviadero, hasta

la entrada de la galería de descarga intermedia (IDG) y el área desestabilizada sobre los dos túneles de desvío, así como sobre los pozos de entrada de alimentación.

- Agregar una salida de nivel medio (MLO) entre la IDG y el nivel de entrada, por razones de seguridad y operativas.
- Colocar un revestimiento de acero en los codos superior e inferior del eje de la tubería forzada; extender el revestimiento de acero por encima del codo inferior. Considerar la oportunidad de extender aún más el revestimiento de acero para evitar fugas de los canales de agua de presión que perjudicarían el funcionamiento de las compuertas de entrada de alimentación (diseñadas para funcionar bajo presión equilibrada).
- Completar las inyecciones de contacto entre el revestimiento de acero y la roca en la parte corriente arriba de la IDG; sellar los orificios de inyección; fortalecer el revestimiento existente mediante hormigón proyectado reforzado con malla.
- Considere la posibilidad de instalar piezas incrustadas o crear superficies de contacto adecuadas para permitir la futura instalación de un dispositivo temporal para el mantenimiento de emergencia de las compuertas corredizas de emergencia de la IDG.

# **PANEL ASESOR INDEPENDIENTE (IAP) PARA BID INVEST**

## **Informe n.º 1, septiembre de 2018, Proyecto Hidroeléctrico Ituango – Colombia**

### **1 Introducción**

El proyecto hidroeléctrico Ituango está en construcción en la cuenca del río Cauca en la región noroeste de Colombia desde 2009. En abril de 2018, durante la fase de llenado del embalse, movimientos masivos provocaron la obstrucción del túnel de desvío del río. Ese evento provocó que el nivel del embalse subiera sin control, amenazando con sobrepasar la represa en construcción. Se activaron acciones de emergencia tanto para reducir la probabilidad de desbordamiento como para minimizar las posibles consecuencias para las comunidades río abajo en caso de que se produjera una descarga incontrolada de agua del embalse. Los eventos y las acciones implementadas se describen en el Anexo 3. La situación está actualmente bajo control y la emergencia se está gestionando adecuadamente. Sin embargo, quedan muchos desafíos para reanudar la finalización del proyecto, y los impactos del incidente serán importantes sobre el cronograma de implementación y los costes.

Dada su participación en el Proyecto, BID Invest, miembro del Grupo del Banco Interamericano de Desarrollo, decidió nombrar un Panel Asesor Independiente (IAP) para revisar la situación e informar a la Institución sobre las lecciones aprendidas y las opciones viables para la continuación y finalización del Proyecto.

El objetivo del IAP es asesorar a BID Invest sobre:

- una comprensión basada en hechos de lo que ha sucedido;
- lecciones aprendidas del incidente;
- evaluar críticamente las opciones para la finalización del proyecto, incluida la reingeniería, el cronograma revisado y los riesgos potenciales para la finalización exitosa del proyecto.
- evaluar la seguridad general de la infraestructura;
- evaluar la probabilidad de un posible abandono del proyecto, incluido el riesgo de una eventual falla de la represa.

El presente Informe se articula en 6 capítulos que abarcan:

- Introducción
- Eventos de la primavera de 2018
- Evaluación de ingeniería
- Planes para la continuación del proyecto
- Sostenibilidad del proyecto
- Conclusiones y recomendaciones del IAP

Seis anexos complementan el Informe.

Los miembros del IAP visitaron Colombia del 30 de julio al 4 de agosto. Reuniones con el Propietario (EPM),

el Diseñador (Integral), el Ingeniero (Ingetec) y el Contratista (Carmago Correa y Constructora Concreto) se llevaron a cabo en Medellín los días 30 y 31 de julio. La visita al sitio tuvo lugar del 1 al 3 de agosto.

El IAP informó a BID Invest y a EPM sobre sus hallazgos y recomendaciones preliminares el 4 de agosto y partió de Colombia el 5 de agosto (Sr. Ciampitti) y el 6 (Sres. Palmieri y Marinos). El IAP presentó un informe de visita al sitio en formato PPT el 15 de agosto.

Los miembros del IAP desean reconocer la interacción abierta y franca con las partes mencionadas anteriormente, su aporte profesional y la amable hospitalidad brindada en el sitio.

## 2 Eventos de la primavera de 2018

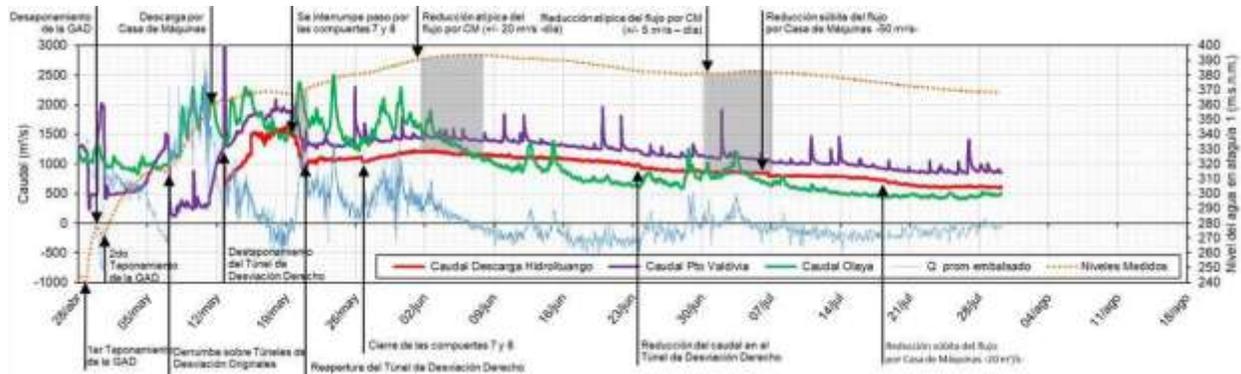
### 2.1 Cronología de los eventos

El Anexo 3 incluye una reconstrucción detallada de los eventos.

La siguiente tabla resume la secuencia de los eventos clave; las fechas más críticas se muestran en rojo y las medidas de respuesta de emergencia se resaltan en amarillo.

Day	Key Events
April 28	Rock mass failure in the Galeria Auxiliar de Desviacion (GAD) stopped water flow.
April 29	Reservoir pressure removed the plug
April 30	Second massive rock mass and soil failure blocked the GAD and a sinkhole appeared at the surface above the tunnel. At this point, there was no control on reservoir level and dam top had not yet reached the level of spillway engagement (410). Risk of dam overtopping and consequent breach.
May 7	A third rock mass failure affected the gallery through which the water was flowing into de ADT, and caused the flow to stop again.
May 9	Partial failure of the Right Diversion Tunnel's plug started water flow in the tunnel, reduced after few hours; a second sink hole and a land slide appeared on the surface above the tunnel entrance
May 10	To avoid dam overtopping EPM let open Intake Tunnel 1 and 2 as well as 7 and 8; reservoir started flowing through the Power House. Control on reservoir level regained.
May 12	An abrupt and wash-out of Right Diversion Tunnel's obstruction caused a flow in excess of 4,000 m <sup>3</sup> /s, which lasted about 4 hours, causing serious consequences downstream; a significant land slide in the area of the tunnel portal reduced flow to approximately 100 m <sup>3</sup> /s.
May 17	Tailrace Tunnel 3 reduced its flow that subsequently will stop.
May 20	EPM closed Intake Tunnel 7 and 8; few hours later a land slide in the area above these tunnel occurred.
June 1	Irregular reduction of the flow through the Power House
June 5	Dam crest level reached elevation 410 m a.s.l. allowing operation of the surface spillway. Risk of dam overtopping averted.
June 24	Reduction of the flow through Right Diversion Tunnel
July 1 to 18	Irregular reduction of the flow through the Power House
August 2	IAP visit: situation under control, reservoir 370 masl, river discharge 600 m <sup>3</sup> /s

La siguiente placa muestra gráficamente la descarga del río en la represa y otras ubicaciones relevantes, junto con los niveles del embalse. También se representan los principales eventos para resaltar su efecto sobre los parámetros hidráulicos.



## 2.2 Consideraciones geotécnicas

El túnel de desvío auxiliar (ADT) se puso en funcionamiento en agosto de 2017, inicialmente junto con el túnel de desvío derecho, mientras que el izquierdo ya estaba taponado. A partir de marzo de 2018, la GAD se operó sola.

La GAD se encuentra a la misma altura de los dos túneles de desvío y tiene el mismo tamaño de 14 m. Los túneles de desvío y la GAD se diseñaron de la misma manera, tanto en términos de geometría como de medidas de soporte.

Los dos túneles de desvío habían funcionado satisfactoriamente durante 3 años, bajo cargas hidráulicas más bajas; se esperaba que la GAD funcionara durante un período mucho más corto.

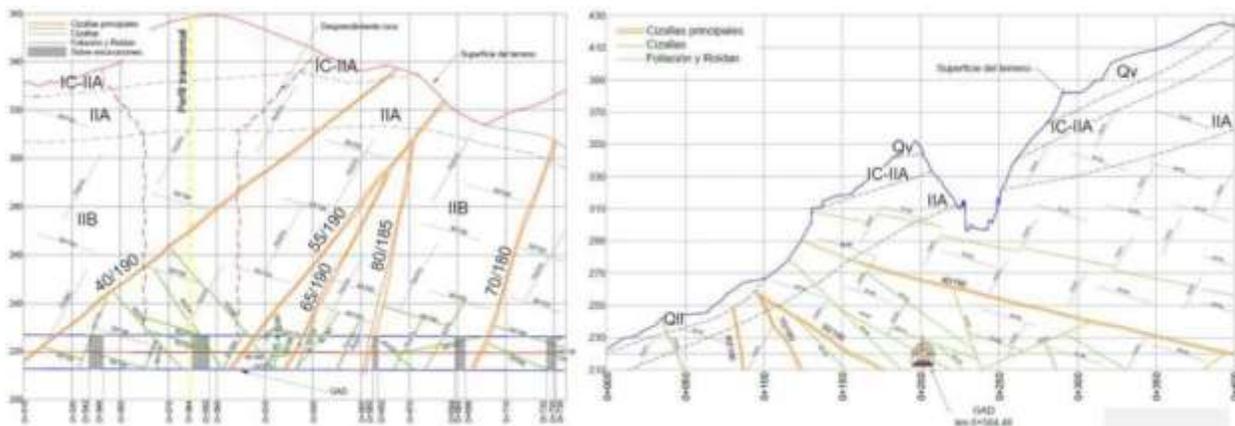
El túnel fue excavado a través de la formación gnéissica de la zona. A partir de los datos informados, y revisados por el IAP, el macizo rocoso fue de buena calidad geotécnica, con uniones moderadas. El cruce de dos fallas principales encontró zonas débiles pero, al parecer, no fueron problemáticas. La inclinación pronunciada de las fallas fue favorable, y el espesor de las zonas cizalladas fue limitado. No se podía desarrollar inestabilidad dependiente del estrés y solo podían ocurrir fallas estructurales de cuñas controladas por gravedad. La excavación se estabilizó eficazmente mediante anclajes de roca y hormigón proyectado. Este soporte resultó apropiado para la excavación del túnel y se retuvo para la operación del túnel.

La zona desgastada, altamente articulada, suelta y erosionada que se desarrolla en la parte de la pendiente cercana a la superficie afectó las áreas de portal, pero no se considera que haya alcanzado la alineación de la GAD. Sin embargo, no se puede excluir que la profundidad de la zona desgastada podría haberse acercado localmente a la roca sólida sobre el túnel.



**Figura n.º 1: 30 de abril de 2018. El sumidero del colapso de la chimenea frente al área del portal de la GAD (fotografía de los archivos del proyecto)**

La zona donde se produjo el colapso y el sumidero (figura n.º 1) consiste en gneis ligeramente a moderadamente erosionados, levemente a altamente articulados, con algunas cizallas y foliación subhorizontal (tipo IIB en la figura n.º 2). No había terreno débil en la alineación (IC, zona de transición suelo-roca IIA).



**Figura n.º 2: Sección longitudinal y transversal de la GAD en la zona del colapso. De los datos de construcción (de “Análisis de taponamiento de la galería auxiliar de desviación”, mayo de 2018)**

La GAD se construyó mediante perforación y voladura y el soporte aplicado siguió las recomendaciones del método "Q": 2 capas de 5 cm cada una de hormigón proyectado de fibra y pernos de roca de 6 m de longitud con una separación de 1,5 m y 2 m en la bóveda o los lados del túnel (soporte tipo III). En algunos puntos, se trató la sobreexcavación para restablecer, en la medida de lo posible, la sección de diseño (consulte las figuras n.º 3 y n.º 4).



**Figura n.º 3: Excavación en avance y destroza durante la construcción de la GAD. Pequeñas sobreexcavaciones presentes (fotografía del informe de la Junta de Asesores n.º 12, febrero de 2017)**



**Figura n.º 4: Portal de la GAD. La rugosidad que forma el macizo rocoso gnéisico de buena calidad (fotografía del informe de la junta de asesores n.º 13, julio de 2017)**

El Diseñador realizó un análisis de estabilidad de tipo cuña (estructuralmente controlado) y encontró amplios factores de seguridad ("Análisis de taponamiento de la galería auxiliar de desviación", mayo de 2018). El Diseñador consideró que el soporte instalado era capaz de sostener los bloques inestables también durante la operación.

La falla que tuvo lugar sugiere que otros elementos entraron en juego, como la ocurrencia ocasional de sobreexcavaciones, que podrían haber causado condiciones de flujo altamente turbulento. La subida y bajada del nivel del embalse también debe haber empeorado las condiciones de estabilidad subterránea.

El flujo probablemente desencadenó presiones pulsantes, penetró a través de las juntas dentro del macizo rocoso y desestabilizó las cuñas. La rugosidad de la periferia del túnel y las anomalías de la sobreexcavación pueden, de hecho, provocar subpresiones. Después del primer colapso más pequeño el 28 de abril, el principal del 30 de abril fue un desarrollo inevitable en una zona ya afectada. La presencia de una zona desgastada posiblemente gruesa sobre el túnel, posiblemente asociada con una zona de roca particularmente débil en este lugar, podría ser un factor imprevisto y la razón de la propagación del sumidero a la superficie del suelo. La figura n.º 5 muestra la localización de los eventos en el lado derecho del proyecto. El desprendimiento sobre los pozos de admisión del 26 de mayo de 2018 aún no se había desarrollado, pero ya hay grietas en esa zona.



Figura n.º 5: Fotografía de un archivo PPT del Prof. G. Fernández, junio de 2018

La Junta de Asesores analizó la necesidad de tener un revestimiento de hormigón en su 12.º informe de febrero de 2017, después de un colapso importante (cuñas grandes) que tuvo lugar durante la construcción, en el portal del túnel. Además del fortalecimiento de esta zona, la Junta señaló la necesidad de tener un "revestimiento de hormigón hidráulico a una distancia prudente de la entrada del túnel".

### 2.3 Manejo de emergencias

Desde el comienzo de la situación de emergencia, EPM, el Diseñador, el Contratista y el Supervisor de construcción idearon un conjunto de actividades y tareas en un Comité de Crisis permanente

designado por EPM para evaluar y tratar la situación. Se tuvo que emitir una advertencia corriente abajo debido a las descargas incontroladas del túnel de desvío 2. La advertencia oportuna evitó víctimas y permitió contener los daños económicos.

La siguiente tabla ilustra cinco planes que se consideraron, las razones por las que algunos fueron rechazados y la elección final del curso de acción preferido que incluía la implementación paralela de los planes C y D.

<b>Plan</b>	<b>Descripción</b>	<b>Observaciones</b>
<b>A</b>	Perforación y voladura del tapón provisional de hormigón en el desvío derecho. Crear un túnel con el fin de bajar el nivel del embalse.	Los planes A y A' comenzaron a implementarse, pero en breve una serie de dificultades relacionadas con la cantidad de infiltraciones a través de los tapones de hormigón dificultaron la voladura del tapón de hormigón provisional en el túnel de desvío derecho. La perforación y voladura del tapón principal de hormigón en el túnel izquierdo avanzaba a un ritmo de unos pocos metros por día, pero en este momento y debido a ambos desprendimientos en la entrada, estos dos planes fueron abandonados.
<b>A'</b>	Perforación y voladura del tapón principal de hormigón y el tapón provisional de hormigón en el túnel de desvío izquierdo, con el fin de utilizar este túnel para bajar el nivel del embalse.	
<b>B</b>	Actividades en la galería intermedia para ponerla en funcionamiento, con el fin de utilizar este túnel para bajar el nivel del embalse.	La galería intermedia tiene una capacidad nominal de descarga de 450 m <sup>3</sup> /s, que no es suficiente para controlar el nivel del embalse.
<b>C</b>	Actividades en el aliviadero y la represa para hacerlos operativos y capaces de manejar, en una primera etapa, una descarga de flujo correspondiente a un período de retorno de 2,33 años, y en una segunda etapa, descargar un flujo correspondiente a un período de retorno de 50 años.	En el momento de la emergencia, el nivel del umbral del aliviadero estaba en 401 msnm, y la represa estaba en 385 msnm, siendo necesario elevarla por vía rápida. Para ello, se diseñó un dique prioritario (consulte el capítulo 3) y su construcción se inició a partir del 1 de mayo. Una vez construido, a una altura de 418 msnm, el aliviadero puede soportar una descarga de unos 500 años (período de retorno).
<b>D</b>	Desviar el flujo a través de la sala de máquinas.	El Plan D, que presentaba la inundación del complejo de la sala de máquinas, era el curso de acción más apropiado e inevitable, lo que permitía recuperar el control sobre los niveles del embalse. La elevación de la cresta de la represa de 410 msnm se alcanzó el 5 de junio permitiendo la operación del aliviadero de la superficie y evitando el riesgo de desbordamiento del dique.

El 2 de agosto, durante la visita del IAP, la situación estaba totalmente controlada, con el nivel del embalse a 370 msnm y la descarga del río a 600 m<sup>3</sup>/s.

La siguiente tabla sintetiza las medidas de respuesta durante y después de la emergencia. Se espera que vuelva a la normalidad alrededor de fin de año, con la excavación exitosa del túnel de desvío n.º 2 y el GAD.

Emergency phase	Dates	Emergency response
During	30 April to May 10	Reservoir allowed to flow through the Power House. Control on reservoir level regained.
After	May 10 to June 5	Dam crest level reached elevation 410 m <u>a.s.l.</u> , allowing operation of the surface spillway. Risk of dam overtopping averted.
Return to normal	December 2018	Essential tasks: safely plug Diversion Tunnel 2 and GAD.

#### 2.4 Balance de los eventos de la primavera de 2018

Con base en los hechos ocurridos en abril y mayo de 2018, el IAP puede hacer las siguientes observaciones.

- i. Los túneles de desvío y la GAD se diseñaron de la misma manera, tanto en términos de geometría como de medidas de soporte.
- ii. Los dos túneles de desvío habían funcionado satisfactoriamente durante 3 años, bajo cargas hidráulicas más bajas; se esperaba que la GAD funcionara durante un período mucho más corto.
- iii. En vista de eso, cambiar el control del río a la GAD era un riesgo calculado.
- iv. El cierre de la GAD (sumidero) fue la consecuencia del flujo de agua que provocó subpresiones y probablemente penetró dentro del macizo rocoso y desestabilizó las cuñas. Así, la energía del agua interactuó directamente con el macizo rocoso y provocó la falla progresiva del mismo.
- v. La roca muy débil en el área del sumidero puede haber iniciado una falla progresiva.
- vi. Los posteriores movimientos masivos, que tuvieron lugar en diferentes partes de los canales de agua, fueron consecuencia del flujo incontrolado de agua a través de galerías interconectadas, algunas de las cuales nunca fueron diseñadas para la conducción de agua.

#### 2.5 Fortalecimiento del equipo del Diseñador

Durante y después de las emergencias, el equipo del Diseñador ha estado asumiendo la doble tarea de elaborar el diseño del proyecto y responder a las condiciones de emergencia. Si bien el equipo del Diseñador ha asumido satisfactoriamente ambas tareas, la doble tarea ha estresado al equipo. El IAP recomienda que Integral esté respaldado por una empresa que se haga cargo de la parte de ingeniería de la gestión de emergencias.

Integral debe designar un personal de enlace para garantizar la coordinación entre el Diseñador y

la Empresa de apoyo.

### 3 Evaluación de ingeniería

#### 3.1 Condiciones geológicas de ingeniería del sitio del Proyecto

Una formación gnéissica domina el área de la represa y sus estructuras anexas; también están presentes pasajes de gneis anfibolítico y gneis esquistoso. Estas rocas, cuando están libres de la intemperie, constituyen masas rocosas moderadamente unidas y de buena calidad. Los valores de GSI son de buenos a muy buenos, y van de 50 a 70. Existen pasajes débiles con cizallas pero no son frecuentes. La siguiente tabla<sup>1</sup> informa la calidad del macizo rocoso evaluada en varias partes diferentes del Proyecto; solo la roca tipo IV corresponde a un macizo rocoso débil.

Tabla 5-26 Porcentajes de ocurrencia para los diferentes tipos de soporte

Túnel		TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV				
		%	%	%	%				
Sistema desviación del río	Galería acceso a descarga intermedia	50%	25%	20%	5%				
	Galería acceso a descarga de fondo								
	Descarga intermedia	50%	20%	22%	8%				
	Desviación Oeste (14x14)								
	Desviación Este (14x14)	65%	20%	15%	0%				
	Desviación No 1 (7x14) (Portal Norte)								
	Desviación No 2 (7x14)								
	Desviación No 3(7x14)								
Desviación No 4(7x14) (Portal Sur)	40%	40%	16%	4%					
Fuentes de materiales, zonas de depósito y obras de infraestructura					Túnel vial a margen izquierda, subestación, acceso a casa de maquinas y a Puerto Valdivia.				
Sistema de Captación y conducción					Galería de pozos de compuertas	60%	24%	16%	0%
					Pozo de compuerta No 1. (Extremo Norte.				
					Pozo de compuerta No 2.				
					Pozo de compuerta No 3.				
					Pozo de compuerta No 4.				
					Pozo de compuerta No 5.				
Sistema de Captación y conducción	Pozo de compuerta No 6.	60%	20%	20%	0%				
	Pozo de compuerta No 7.								
	Pozo de compuerta No 8. (Extremo Sur).								
	Conducción superior No 1.								

DISEÑO DETALLADO/UTUANGO/ D-PHI-CCE-ADM C8314

30/03/2010

Las pocas fallas principales son de inmersión pronunciada, y su zona perturbada y cizallada es limitada (escala de decenas de cm). Tales condiciones generales no favorecen las inestabilidades a gran escala de pendientes y estribos y son generalmente favorables para las bases de represas de gravedad. Se necesitan mayores medidas de soporte cuando las obras subterráneas atraviesan tales estructuras geológicas.

Sin embargo, el macizo rocoso tiene desgaste en las pendientes, a menudo en un grado importante. Esto es debido

<sup>1</sup> Extracto del informe "Caracterización Geológica y Geotécnica", 2010

a la descompresión y la liberación de tensiones en pendientes de carácter relativamente joven en su historia geológica. Esta zona altamente fracturada, junto con la erosión de la superficie, puede exhibir un espesor de pocas a algunas decenas de metros. En varios lugares, los depósitos coluviales y la sobrecarga de mala calidad en las pendientes aún no han encontrado el equilibrio y, como tales, están sujetos a desmoronamientos y desprendimientos de tierra. La inestabilidad de las pendientes y los desprendimientos de tierra son locales y se desencadenan por cortes o excavaciones.

Esta zona desgastada y débil exige tratamiento o eliminación en cimientos importantes, cortes de construcción y pendientes sobre las entradas. Estas zonas pueden albergar acuíferos encaramados. Las siguientes imágenes (n.º 6, 7 y 8) proporcionan ejemplos de zonas rocosas desgastadas.



**Figura n.º 6: Masa gnéissica desgastada y muy fracturada. Fotografía del 2 de agosto de 2018**



**Figura n.º 7: Macizo rocoso desgastado y zona erosionada. Desprendimiento sobre la zona de 2 túneles de desvío. Fotografía del 3 de agosto desde un helicóptero.**



**Figura n.º 8 El sitio del proyecto al inicio de la construcción, 2014. Deslizamiento en pendiente pronunciada, detrás de los cortes del aliviadero. En esta área, ocurrieron los eventos de inestabilidad en la primavera de 2018. Fotografía de Google.**

La buena calidad del macizo rocoso gnéisico se puede observar, tanto a pequeña como a gran escala, en los cortes del aliviadero modelados y expuestos después de la eliminación de la zona desgastada y los

depósitos coluviales, que no era particularmente gruesa aquí (Figura n.º 9).



**Figura n.º 9: Macizo rocoso bueno y sólido bajo la zona desgastada en pendiente. Cortes para el aliviadero. Fotografía del 3 de agosto desde un helicóptero.**

## 3.2 Evaluación geotécnica

### 3.2.1 Sitio de la represa

La represa está construida sobre una formación gnéisica. El perfil geológico actualizado en una sección transversal del sitio de la represa (figura n.º 10), indica que la zona de material de cobertura, depósitos coluviales, depósitos aluviales y roca suelta se ha eliminado en la zona de cimentación del núcleo. Solo una zona débil, con macizo rocoso cizallado y fragmentado y relleno arcilloso, está presente en parte del estribo izquierdo.



### 3.2.2 Medidas de protección de pendientes

Las condiciones de las pendientes corriente arriba del aliviadero son inestables, como lo destacan los recientes movimientos de masa. Parte de ellas se desestabilizó por los eventos en la zona por encima de los túneles de desvío, que siguieron al colapso de la GAD principal. Estas inestabilidades afectan la cubierta y la zona de roca desgastada, no eliminada ni modelada. Dichos movimientos se verían reforzados por la fluctuación del embalse durante su funcionamiento, o en caso de una reducción.

El IAP recomienda extender el mismo tratamiento y protección corriente arriba de las pendientes del aliviadero, hasta la entrada de la galería de descarga intermedia y la zona desestabilizada sobre los dos túneles de desvío.

La extensión corriente arriba de las medidas de protección de pendientes también es necesaria para salvaguardar la entrada a la sala de máquinas (zona “El Romerito”) así como la entrada de la nueva galería de descarga intermedia programada. Partes de estas pendientes ya se encuentran en una condición metaestable y están evolucionando de forma regresiva. El deslizamiento que ocurrió el 26 de mayo sobre las compuertas de entrada es un ejemplo de ello.



**Figura n.º 12: Desprendimiento en “El Romerito”. Fotografía del 28/05/2018 (del PPT del Prof. G. Fernández, junio de 2018)**

Los trabajos de protección deben tener como objetivo eliminar la mayor cantidad posible de la zona en dificultades y proceder con el proceso de destroza. El anclaje con cables se podría utilizar principalmente en la parte inferior, según corresponda. Afortunadamente, la morfología de la pendiente finaliza cuesta arriba donde la geomorfología exhibe una concavidad que probablemente puede estar asociada a un antiguo desprendimiento de tierra (consulte las figuras n.º 12 y 13).

Un drenaje de agua de captura es una medida esencial para limitar el acceso de aguas superficiales a las pendientes. El monitoreo debe extenderse en el área, al igual que para otras pendientes alrededor de la represa.



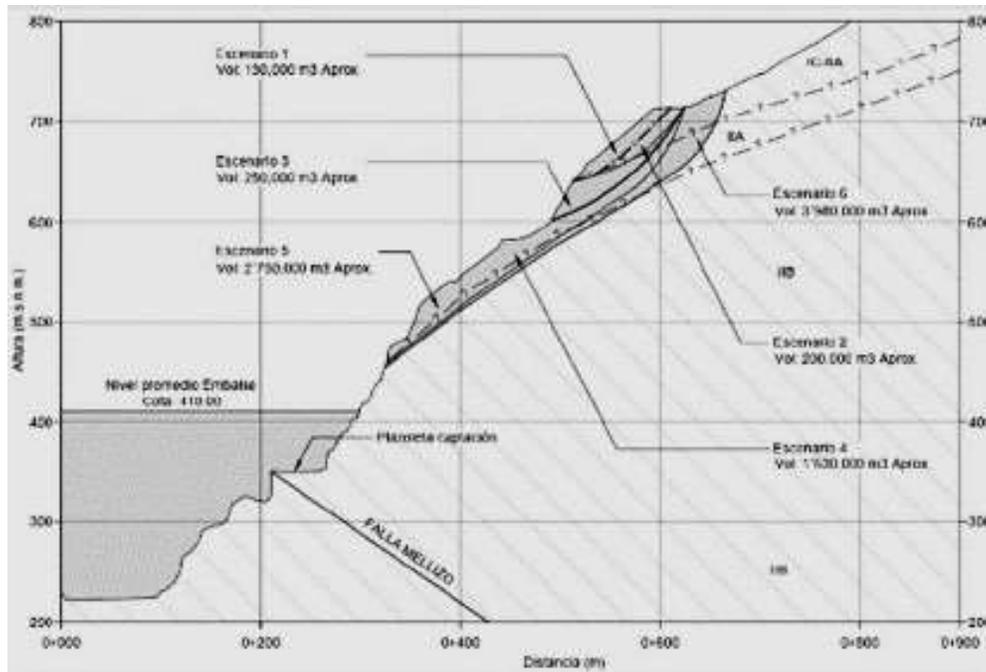
**Figura n.º 13: El desprendimiento de tierra sobre la estructura de entrada ocurrió el 26 de mayo. Una forma cóncava del terreno cuesta arriba puede denotar la presencia de un deslizamiento anterior (fotografía desde helicóptero, 3 de agosto de 2018)**

Para investigar los posibles modos de falla y los volúmenes asociados, el Diseñador realizó dos tipos de análisis para la zona de desprendimientos en “El Romerito”: determinístico y probabilístico. La Figura n.º 14 ilustra los escenarios de superficie deslizante considerados.

El primer grupo de análisis modeló dos grupos de superficie deslizante:

- superficies poco profundas, prácticamente dentro del manto superficial del suelo (escenarios 1 a 3), y
- superficies más profundas que atraviesan el macizo rocoso subyacente desgastado y erosionado (escenarios 4 a 6).

Aunque no está familiarizado con este tipo de análisis, el IAP entiende que es una estimación aproximada del alcance potencial de los movimientos de desprendimientos de tierra, que se compara cualitativamente con la evidencia de campo. Con base en esta comparación, el Diseñador considera que la posibilidad de una falla más profunda, que involucre una parte significativa del lecho rocoso erosionado, es insignificante. Esta conclusión debe validarse teniendo en cuenta el estado de equilibrio actual y los movimientos de pendientes futuros (si los hubiera). La participación de una masa más grande podría manifestarse en una etapa posterior, debido a los movimientos de fluencia y la transición gradual a la resistencia al cizallamiento residual de los materiales.



**Figura n.º 14: Sección de los análisis del desprendimiento en “El Romerito” (Informe del Diseñador de junio de 2018, “Diagnóstico Geológico Geotécnico de la Contingencia”).**

El Diseñador también llevó a cabo una serie de análisis probabilísticos de estabilidad de las pendientes para evaluar la probabilidad de que se produzcan deslizamientos poco profundos, es decir, los escenarios 1 a 3. El IAP tiene las siguientes observaciones/sugerencias:

- El análisis de sensibilidad examina tres casos principales: condiciones secas, condiciones húmedas con elevación del agua subterránea a 700 msnm y condiciones sísmicas sin agua.
- Se debe investigar la sensibilidad de los resultados a la posición de la superficie de contacto entre el suelo y la roca, ya que los factores de seguridad actuales no son particularmente cómodos.
- Los materiales por encima de la elevación de la napa subterránea también pueden estar parcialmente saturados, lo que se puede modelar suponiendo una relación de presión de poro ( $R_u$ ). Esto es particularmente importante cuando se verifica la estabilidad solo en condiciones secas de carga sísmica. Se espera que, durante un terremoto, sea bastante probable que los geomateriales contengan agua, ya sea en forma de napa subterránea o no. Del mismo modo, también es posible un terremoto de menor magnitud con carga de agua completa.
- La metodología para definir y examinar las superficies de falla por escenario no está clara en el informe. Las imágenes disponibles ilustran una superficie de falla representativa para cada escenario, junto con algunos conjuntos de superficies de falla muy diferentes. El IAP sugiere enfocar los análisis de sensibilidad en superficies similares a la representativa. Esto se puede hacer dibujando más superficies o utilizando la herramienta de optimización del software. La herramienta en particular hace que los ajustes geométricos

a las superficies críticas, en busca de una superficie potencialmente más crítica.

- El IAP considera demasiado grande la diferencia entre las probabilidades de falla del escenario 1 y los escenarios 2 y 3. El Diseñador debe verificar si en los escenarios 2 y 3 la parte inferior y exterior de la superficie de falla considerada está en roca erosionada, lo que mejoraría drásticamente el factor de seguridad en caso de que el software no tenga la "libertad" para ajustar las superficies como se mencionó anteriormente.
- También se deben considerar las superficies combinadas que se extienden dentro del suelo y la roca. No está claro por qué se ha buscado una falla de tipo cuña para una sola pendiente específica.

Finalmente, el IAP recomienda la ejecución de un par de orificios perforados en la zona de "El Romerito", en lugares donde el acceso sea posible, para reducir incertidumbres e informar el diseño de las medidas de protección.

### 3.2.3 Complejo de cavernas de la sala de máquinas

La excavación de la caverna solo encontró fallas de cuña, en algún momento significativas, desde el techo de la caverna, lo que requirió el fortalecimiento del refuerzo (Figura n.º 15).



**Figura n.º 15: Desprendimiento de la bóveda de la sala de máquinas – Costado norte**

La convergencia y las lecturas del extensómetro mostraron un comportamiento satisfactorio del macizo rocoso, antes de los eventos de abril y mayo de 2018. El mecanismo de falla controlado por estrés no fue un problema.

Las deformaciones fueron insignificantes o mínimas y, en casi todos los casos, estuvieron controladas eficazmente por el soporte aplicado. Solo en la caverna del transformador, en las áreas de concentración de tensión en la intersección con las galerías de barras colectoras, pequeñas deformaciones causaron descamación del hormigón proyectado. Se informó la aplicación de refuerzo local.

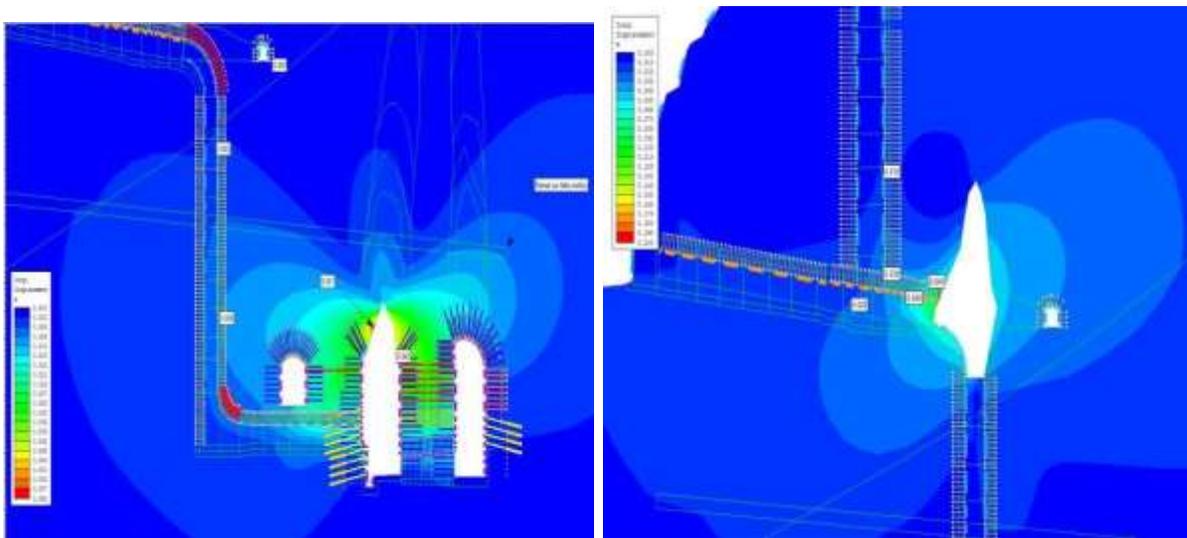
En la caverna de máquinas, la deformación máxima fue de aproximadamente 100 mm, medida solo en un

par de puntos, incluido el cruce de la zona de la falla de Mellizo. Se monitorearon las infiltraciones y se realizó la lechada de consolidación.

El Diseñador realizó algunos análisis para evaluar las posibles condiciones de estabilidad de las obras subterráneas en presencia de inundación por agua de la sala de máquinas. No se puede esperar que los análisis de FEM específicos, con presiones de agua internas estáticas en la abertura subterránea, produzcan resultados que muestren algún efecto de deterioro. Los principales factores desestabilizadores son la erosión por flujo de agua y los transitorios hidrodinámicos (tipo golpe de ariete). Además, no se debe esperar que los análisis con módulo de roca y resistencia de roca reducidos para modelar indirectamente los efectos de fatiga debido a los efectos dinámicos produzcan resultados diferentes, porque el software necesita una modificación del estado de tensión para producir nuevos resultados. En la vista del IAP, los análisis no son fiables, en las condiciones actuales, para evaluar la estabilidad de las obras subterráneas.

Basado en la experiencia, y dada la calidad del macizo rocoso gnéisico, el IAP reconoce que el daño a la caverna, causado por los flujos de agua y las oscilaciones de presión, puede ser en forma de desprendimientos de bloques y cuñas de diferentes tamaños. Esto también fue reconocido por el Diseñador (Diagnóstico Geológico y Geotécnico de la Contingencia, junio 2018) e informado por los asesores (Prof. Gabriel Fernández, junio 2018, PPT, 2018).

Los análisis de FEM (consulte la figura n.º 16) muestran que no es probable que algún colapso extendido afecte la estabilidad de la pendiente parietal y el túnel de acceso adyacente.



**Figura n.º 16: Estabilidad global de las cavernas y posible influencia sobre la pendiente parietal (del informe del Diseñador, “Diagnóstico Geológico y Geotécnico de la Contingencia” junio de 2018)**

En septiembre de 2018, EPM perforó tres orificios de la Galería A con el objetivo de atravesar un área considerable de macizo rocoso por encima de la corona de la caverna de la sala de máquinas. La siguiente figura muestra la ubicación de los tres orificios perforados que fueron totalmente recuperados.

## PERFORACIONES EXPLORATORIAS Gal A – CM

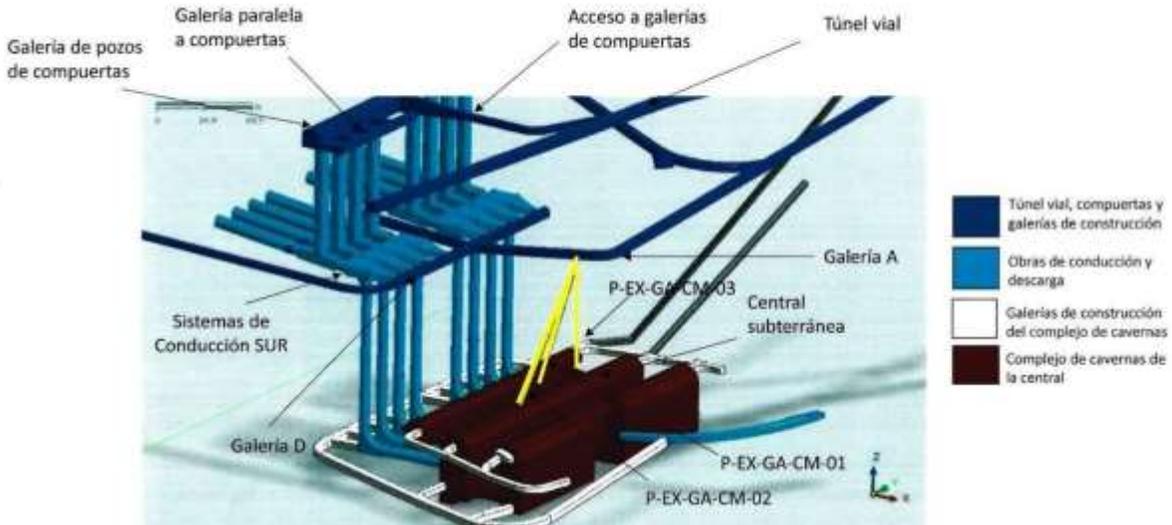


Figura n.º 17: Perforaciones exploratorias en el área del techo de la sala de máquinas

En los tres pozos, la recuperación del núcleo fue del 100 %; la RQD generalmente estuvo entre el 60 y el 70 %, con valores del 80 % en las proximidades del techo de la caverna; no se produjeron pérdidas de agua en ningún momento durante la perforación. Tales observaciones indican que el macizo rocoso sobre la caverna no ha sido afectado en el lugar investigado. Ni siquiera en la zona atravesada por la falla de Mellizo (orificio perforado 03). El orificio perforado 02 perforó el techo de la caverna y pudo obtener muestras de 20 cm de revestimiento de hormigón proyectado hasta el techo de la caverna (consulte la figura n.º 18).

### P-EX-GA-CM-02 (Gal A – CM – Sistema de conducción 5)



Figura n.º 18: Orificio perforado 02 donde se obtuvo una muestra de hormigón proyectado para revestimiento del techo

La información proporcionada por los tres orificios es positiva pero, como es normal con los orificios perforados, está localizada. Sin embargo, dada la buena calidad del macizo rocoso y el tamaño de las estructuras, es muy poco probable que el colapso extendido o general haya tenido lugar en la caverna de la sala de máquinas. EPM continúa con la perforación exploratoria, que agregará información valiosa antes de que la inspección directa de la caverna permita realizar una evaluación final de las condiciones subterráneas.

Queda por ver cuál es la extensión de los desprendimientos locales de bloques/losas (controlados por gravedad) que pueden haber sido desencadenados por el flujo de agua, subpresiones, vórtices, etc. Ningún modelo matemático puede predecir tales efectos.

El hecho de que el orificio perforado CM-02, al entrar en la cavidad de la caverna, experimentara la entrada de aire y agua significa que, como era de esperar, la caverna se ve afectada por el flujo mixto de aire y agua, lo que hace que cualquier pronóstico de comportamiento sea aún más desafiante, y muy probablemente imposible.

El abandono de la caverna es poco probable, pero podrían ser necesarios importantes trabajos de refuerzo y reconstrucción.

#### 3.2.4 Posibles desprendimientos de tierra en el embalse

Es cierto que, durante la operación del embalse, se producirán pequeños desprendimientos de tierra a nivel local, en la zona erosionada y desgastada de las pendientes, a lo largo del borde del lago. Tales eventos ya están teniendo lugar, como se observó desde el helicóptero el 3 de agosto (consulte la figura n.º 19).

Se considera que tales movimientos masivos no generan ondas de impacto peligrosas, sino que contribuyen lentamente a la sedimentación del embalse.



**Figura n.º 19: Pequeños desprendimientos de tierra en el margen del embalse.**

La cuestión de los grandes desprendimientos de tierra, a escala de toda la pendiente, aún no se ha resuelto. Se informa que existen megadesprendimientos antiguos (probablemente de mil años de antigüedad), y estos se están monitoreando por satélite. El Diseñador ha llevado a cabo un análisis de ondas de impacto para verificar la idoneidad del francobordo de la cresta de la represa disponible (15 m) para contener las subidas de las olas. Los resultados indican que dicho francobordo es adecuado. La cuestión de dichos desprendimientos se incluyó en el informe de 2010 “Caracterización Geológica y Geotécnica”.

En el transcurso de la visita de agosto de 2018, durante el viaje en helicóptero de regreso a Medellín, el IAP no observó características geomorfológicas importantes que pudieran asociarse con

movimientos masivos en las pendientes y una amenaza importante potencialmente relacionada. El IAP desea realizar un vuelo en helicóptero dedicado, durante su próxima visita al sitio, para revisar los supuestos utilizados en el estudio en consulta con el Diseñador. Los supuestos clave para el análisis son el volumen de desprendimiento de tierra, la distancia a la represa, la naturaleza en bloques (frágil) o masiva (dúctil) y la velocidad de movimiento esperada.

### 3.3 Condiciones de la represa

El IAP no tiene comentarios importantes sobre el diseño de la represa. Con base en los datos proporcionados, el núcleo de arcilla, la zonificación, el diseño del filtro, los materiales, el análisis estático y dinámico y la instrumentación de la represa de Ituango responden a las mejores prácticas de ingeniería en el diseño de represas.<sup>2</sup>

Las características de los materiales, según lo determinado por las pruebas de laboratorio y de campo, son adecuadas. Las zonas de filtro y transición cumplen con las especificaciones de clasificación.

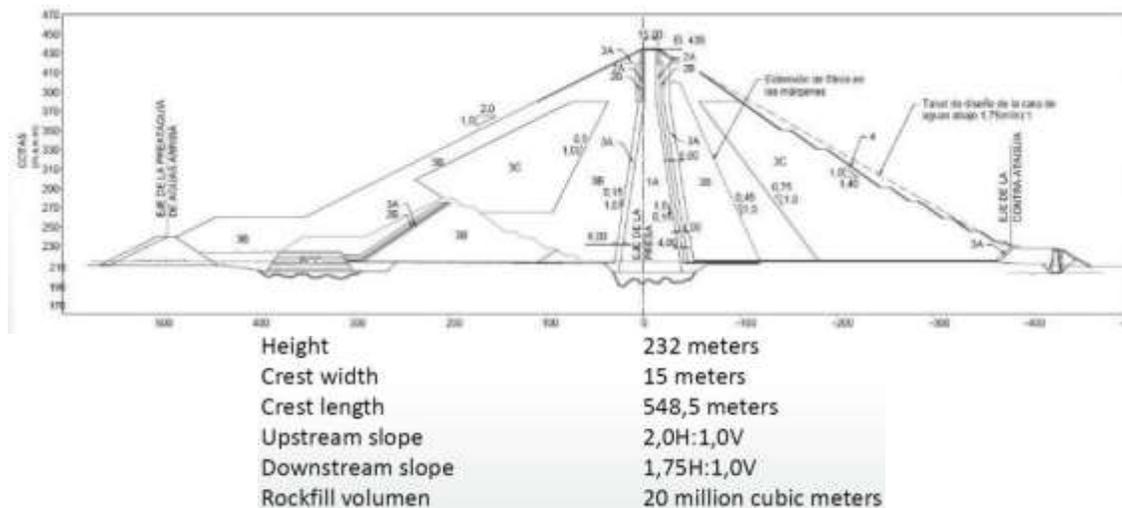


Figura n.º 20: Represa con núcleo de roca Ituango - Sección típica y parámetros

El IAP entiende que los comentarios realizados sobre los cimientos correctos del núcleo se abordaron adecuadamente ("Control de elaboración, revisión, verificación, aprobación y distribución de informes", 18/8/16). El IAP también está de acuerdo con las sugerencias de la Junta de Asesores (informe 12, febrero de 2017) sobre la plasticidad de la base del núcleo, el ancho de los filtros y la extensión corriente arriba de los filtros.

Bajo el cabezal del embalse experimentado hasta la fecha<sup>3</sup>, la cortina de lechada parece funcionar satisfactoriamente. En particular, los piezómetros muestran una clara disminución de los niveles corriente abajo de la represa. La filtración en el estribo derecho es de unos 30 l/seg. Por otro lado, en el estribo izquierdo la filtración total alcanzó los 80 l/seg. Aunque no es excesivo, las medidas correctivas han

<sup>2</sup> Geotechnical Behavior of Ituango Earth Core Rockfill Dam, Herrera J.D., Sierra M.C., Velazquez M. - May 2017)

<sup>3</sup> El nivel de embalse 394, correspondiente al 87 % del cabezal máximo de diseño, se alcanzó el 6 de junio; el rendimiento hasta la fecha es satisfactorio.

identificado y planificado. El origen de dicha filtración es la galería de drenaje izquierda en el nivel +250, donde los orificios de inyección de lechada de la cortina no estaban orientados para interceptar las juntas subverticales; se planea una inyección de lechada adicional. Toda el agua filtrada está limpia, según el informe.

El asentamiento máximo del dique, a su altura casi final, se informa como 1,2 m, un valor normal para una represa tan alta. No se observaron ni informaron deformaciones en la cara corriente abajo.

Cuando se abrieron los túneles de entrada a la sala de máquinas, se produjo un breve flujo de salida incontrolado desde la galería de ventilación 283. El evento no produjo ninguna erosión en el pie de la represa.

Las pendientes del aliviadero se han comportado satisfactoriamente hasta la fecha. Los bancos están bien definidos y las pendientes están ancladas y totalmente hormigonadas cuando corresponda. Las lecturas del inclinómetro, según lo informado, indican un rendimiento satisfactorio; las condiciones generales se ven bien.

La zonificación de la represa se modificó, por encima de 385 msnm, para acelerar la elevación del dique durante la respuesta de emergencia. Se está construyendo un diafragma de plástico para mejorar la hermeticidad de la zona (consulte la figura n.º 21).

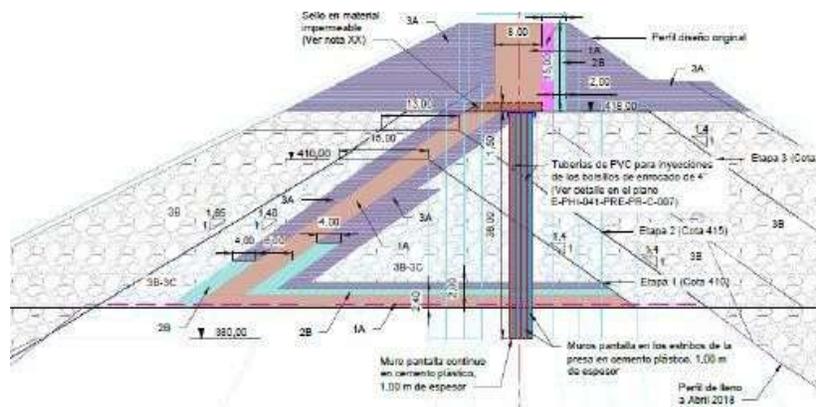


Figura n.º 21: Diseño prioritario del dique

El Diseñador está investigando la estabilidad global de esa parte de la represa (Diagnóstico Geológico y Geotécnico de la Contingencia, junio de 2018).

El IAP tiene los siguientes comentarios sobre el resultado de los análisis realizados hasta el momento:

- La investigación numérica sobre el gradiente hidráulico y la evaluación del riesgo asociado con la erosión interna indican que la decisión de construir la pared del diafragma es apropiada.
- Los parámetros de material asumidos para la parte del cuerpo impermeable y granular del relleno prioritario son razonables.
- Los resultados son razonables e indican condiciones de estabilidad marginalmente aceptables para el relleno adicional, que generalmente son satisfactorias para este tipo de emergencia.

- El IAP sugiere realizar análisis de estabilidad también para la configuración final (elevación de la cresta de 435 msnm), lo que puede ser menos favorable para la pendiente corriente abajo de la represa.
- Debido a la orientación de los diferentes materiales, también se deben examinar las superficies prismáticas, para asegurarse de que no produzcan factores de seguridad más bajos.

### 3.4 Equipos hidráulicos, mecánicos y eléctricos

#### 3.4.1 3.4.1 Compuertas

Se realizó una inspección visual detallada del equipo accesible que actualmente no está bajo el agua.

La inspección visual de las compuertas del aliviadero no evidenció motivos de preocupación para este equipo hidromecánico. Las compuertas están operativas y probadas. En el momento de la visita del IAP, se estaban realizando las obras de acabado, y la implementación del sistema de control estaba en curso.

Merecía más atención la situación de la galería de descarga intermedia (IDG). EPM y el Contratista (ATB Riva Calzoni S.p.A.) estaban trabajando para completar el montaje y las pruebas de las compuertas radiales y de las compuertas corredizas de emergencia. La inspección visual de las compuertas y de sus sistemas de control no evidenció motivos de preocupación. Sin embargo, el IAP tiene algunas preocupaciones con respecto al diseño y la finalización del sistema de la IDG. En particular, la ausencia de mamparos o ataguías en la entrada puede complicar el mantenimiento futuro de las compuertas. En el momento de retirar los escombros y el tapón del portal y la entrada de la IDG, el Diseñador debe reconsiderar la oportunidad de instalar piezas incrustadas o crear superficies de contacto adecuadas para permitir la futura instalación de un dispositivo temporal para el mantenimiento de las compuertas corredizas de emergencia. En caso de que se proporcione ese dispositivo o no, se debe incluir un procedimiento relevante para el cierre de la entrada en el manual de operación y mantenimiento de la planta.

La siguiente tabla resume los comentarios del IAP sobre las compuertas del aliviadero y de la IDG.

Hydro Mechanical Equipment	Progress of installation and testing	Remarks
<b>Spillway Gates</b> Four Radial Gates (two with flap for debris) 15 m x 19,50 m Discharge capacity: 22.600 m <sup>3</sup> /s (PMF) Operation: oleodynamic servomotors, single control and oleodynamic stations for each gate + common control	Already in operation (August 1), finishing and common control ongoing	No reasons of concern from visual inspection
<b>Gates to Intermediate Discharge Gallery</b> Two Radial Gates + two Emergency Sliding Gates Size: 3 m x 3.90 m (Radial gates) Design capacity: 450 m <sup>3</sup> /s with both gates in operation Operation: oleodynamic servomotors, single control and oleodynamic stations for each gate.	Erection under completion (August 1); commissioning expected within the end of August. Contact injections at the upstream steel transition (15m long) remain to be done, including sealing of the associated 400 plugs.	No reasons of concern from visual inspection. Absence of bulkheads or stoplogs at the intake can complicate future gate maintenance.

Las compuertas de entrada y las ataguías de servicio no eran accesibles debido al desprendimiento de tierra. Las compuertas y las ataguías se colocaron o levantaron utilizando grúas móviles y se mantuvieron en su posición utilizando dispositivos de retención.

Las compuertas de entrada están diseñadas para funcionar bajo presión equilibrada. El cierre de las compuertas anulares de la turbina permite equilibrar las presiones pero, en caso de grandes fugas de los canales de agua, sería imposible lograr condiciones hidrostáticas. Por lo tanto, en caso de colapso en cualquier parte del sistema de entrada que provoque un flujo incontrolado de agua, no será posible detener dicho flujo. Teniendo en cuenta el cabezal de la planta y el hecho de que la mayoría de las tuberías forzadas no están revestidas de acero, existe el riesgo de que las debilidades del macizo rocoso, posiblemente afectadas por la descarga de emergencia, puedan iniciar posibles mecanismos de falla. El IAP recomienda que dicho evento se examine en el taller de PFMA propuesto (consulte el párrafo 4.1), y que la extensión del revestimiento de acero de los canales de agua se reconsidere según corresponda. En cualquier caso, el Plan de Preparación para Emergencias del Proyecto debe incluir un procedimiento para enfrentar la situación descrita anteriormente.

Las compuertas de desvío y las compuertas de salida de fondo tienen un interés limitado porque lo más probable es que no se utilicen en el futuro.

La siguiente tabla resume los comentarios del IAP sobre las compuertas de entrada.

Hydro Mechanical Equipment	Progress of installation and testing	Remarks
<b>Intake Gates</b> Height Sliding Gates, 5.03 x 6.87 m, with stoplogs Operation: oleodynamic servomotors	The area had limited access due to incumbent landslide. Gates were lowered using mobile crane. Installation of servomotors and rods.	Gates close under balanced pressure conditions
<b>Diversion gates</b> Two wheel gates, 9 m x 18 m	Currently not accessible and most probably not utilized in the future	
<b>Bottom Outlet gates</b>	Currently not accessible and most probably not utilized in the future	

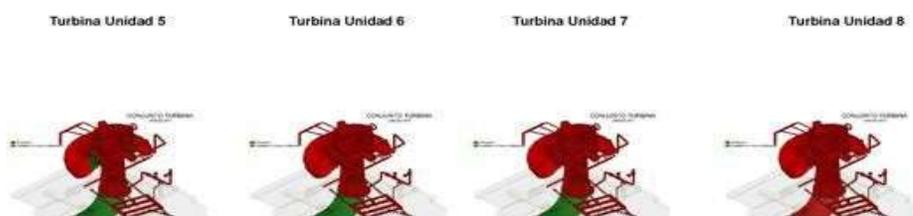
### 3.4.2 Equipo de la sala de máquinas

En el momento de la inundación de la sala de máquinas, el progreso de la instalación de los equipos electromecánicos fue como se muestra en la figura n.º 22 (el color verde muestra los equipos instalados).

***Progress of installation at the time of flooding the north power house***



***Progress of installation at the time of flooding the south power house***

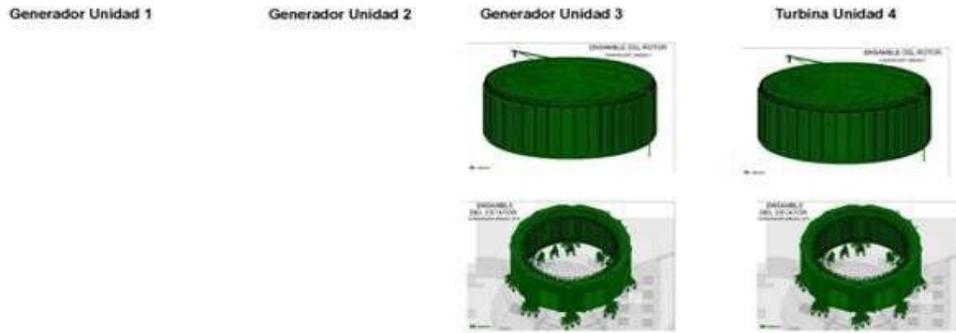


**Figura n.º 22: Avance de la instalación de turbinas en la sala de máquinas**

La instalación de las turbinas del lado norte estaba muy avanzada, especialmente la Unidad 3 y la Unidad 4 que se iban a poner en marcha primero. En el lado sur (unidades 5 a 8) solo se habían instalado tres tubos de aspiración.

La colocación de los generadores, ensamblados completamente en el sitio, y de los conductos colectores de fase aislada se limitó, en consecuencia, a las unidades 3 y 4. La figura n.º 23 muestra el avance de la instalación de los generadores y las barras colectoras; el color verde designa las piezas instaladas.

**Progress of installation at the time of flooding the north power house**



**Progress of installation at the time of flooding the north power house**



**Figura n.º 23: Avance de la instalación de generadores en la sala de máquinas**

La instalación de los transformadores monofásicos estaba más avanzada.

Los 12 transformadores monofásicos de la sala de máquinas norte, y el de repuesto, estaban completamente montados, incluidas las piezas auxiliares y el lavado con aceite dieléctrico (consulte la figura n.º 24).

**Progress of installation at the time of flooding the north power house**



**Figura n.º 24: Avance de la instalación de transformadores**

Dos transformadores monofásicos de la sala de máquinas sur se encontraban en condiciones similares; cuatro se encontraban en condiciones de transporte (con nitrógeno); y seis se encuentran actualmente en espera en un puerto colombiano.

Ya estaban instalados los 13 cables XLPE HV correspondientes en el transformador de la sala de máquinas norte.

Aunque no es muy común, la inundación de la Central Eléctrica Ituango tiene precedentes. La información que a veces se mantiene confidencial sobre incidentes similares puede dar una idea de los daños esperados. El siguiente cuadro ilustra cuatro casos.

---

*Incidentes de inundaciones en centrales eléctricas - Historiales de casos*

---

*En febrero de 1998, las fuertes lluvias provocadas por El Niño en el área de Machu Picchu (Perú) causaron el colapso de una represa hidroeléctrica: la principal planta hidroeléctrica en Cuzco estaba bajo 60 metros de agua y permaneció inundada durante varios meses.*

*En el año 2007, el efecto combinado de la tormenta tropical Noel y del paro del generador diésel de emergencia ocasionó la inundación, a través de la galería de acceso, de la Central Hidroeléctrica Aguacate de 52 MW (República Dominicana), propiedad de la Corporación Dominicana de Empresas Eléctricas Estatales y su filial hidrogenadora Empresa de Generación Hidroeléctrica (EGEHID), por aproximadamente 4 meses. La planta de energía estuvo fuera de servicio durante cinco años y fue rehabilitada con la asistencia del Banco Mundial.*

*La Central Hidroeléctrica Gibe 2 en Etiopía se inundó breve y parcialmente mientras estaba en funcionamiento pocos años después de su puesta en marcha debido al mal funcionamiento de una compuerta del tubo de aspiración.*

*La construcción de la Central Hidroeléctrica Rogun (Tayikistán) comenzó en 1982, pero se detuvo con la desintegración de la Unión Soviética en 1991 y los consiguientes disturbios civiles en Tayikistán (1992-1997). La mayor parte de la sala de máquinas se había completado en 1992, y se midió una convergencia de hasta 600 mm en las paredes de la caverna. No se había instalado ningún equipo. En 1993, se arrastró el compartimiento estanco existente y se dañaron los túneles construidos en la década de 1980. La sala de máquinas subterránea se inundó y permaneció en condiciones hidrostáticas durante 15 años, hasta que el gobierno de Tayikistán comenzó la rehabilitación de los túneles existentes y las obras civiles subterráneas en 2008. Una evaluación técnica del Proyecto (Banco Mundial 2014) concluyó que las condiciones de la caverna de la sala de máquinas no se habían visto afectadas significativamente por la larga permanencia bajo el agua y que la abertura podría salvarse con la instalación de refuerzo de roca adicional. La geología de la sala de máquinas comprende arenisca de calidad buena a decente y limolita de calidad decente, sin duda de menor calidad en general que la caverna de Ituango.*

Las siguientes consideraciones reflejan la experiencia directa y las lecciones aprendidas de tales incidentes.

Aparte de su duración (los casos de inundaciones a corto plazo son más comunes), cada inundación tiene sus propias características y la experiencia se contextualizará.

La inundación de la Central Eléctrica Ituango tiene varios aspectos peculiares. De hecho, los operadores de EPM estaban al tanto con varias horas de antelación de la posibilidad de que la planta de energía estuviera expuesta a un evento tan dramático.

Se adoptaron medidas de protección antes de la inundación de emergencia de la sala de máquinas, a la mayor capacidad del operador y con el tiempo disponible. Vale la pena mencionar que ninguna de los casos mencionados en el recuadro presentaba medidas de protección.

En el caso de Ituango, todos los transformadores fueron sellados por el personal de EPM con especial cuidado en el punto de fuga sensible, los grifos del tanque de aceite y los relés Buchholz para evitar o reducir la infiltración de agua. Un transformador estaba anclado mecánicamente.

El equipo móvil de alto valor del sistema de control fue retirado de la sala de máquinas.

Las dos grúas estaban soldadas entre sí, fijadas a los rieles y con cables a un rotor.

Otro aspecto peculiar es que las unidades no estaban en funcionamiento, es decir, no giraban, cuando la sala de máquinas fue inundada por agua cargada de escombros (grandes cantidades de lodo y, probablemente, pedazos de roca). En consecuencia, la contaminación del aceite lubricante no debería haber causado daños mecánicos en las superficies de contacto de los cojinetes.

Los daños físicos debidos a golpes o desplazamientos de rocas solo pueden evaluarse mediante inspección.

El componente mecánico giratorio e incrustado de las turbinas debería estar bien, con excepción de los cojinetes de la unidad. El metal blanco también debería estar bien debido a su composición química, sin embargo, los componentes extremadamente sensibles y algunos elementos podrían haber sufrido corrosión o podrían ser demasiado difíciles de limpiar.

Se espera que los generadores se reemplacen por completo y que su montaje requiera mucho tiempo en la ruta crítica. Sin embargo, hay alguna esperanza de que puedan recuperarse parcialmente. Cualquier intento de este tipo debe coordinarse en el programa general de finalización y puesta en marcha de la planta. La disponibilidad de equipos para reemplazar los inundados puede sugerir reemplazarlos cuando no estén en la ruta crítica. Teóricamente, pueden incluso rehabilitarse y reinstalarse en una unidad diferente. El material de acero de laminación del estator se puede someter provisionalmente a tratamiento criogénico, y las barras o incluso los devanados se pueden limpiar, secar y volver a probar provisionalmente.

Los dispositivos auxiliares eléctricos deben reemplazarse por completo.

El conducto colector de fase aislada puede dar una sorpresa positiva, siempre que no esté físicamente dañado, lo que no se puede descartar.

Los transformadores son una interrogación porque, si se sumerge el tanque de aceite, que está más expuesto a la infiltración, a menudo resulta en contaminación o daños. El hecho de que se adoptaran medidas da cierta esperanza en este caso.

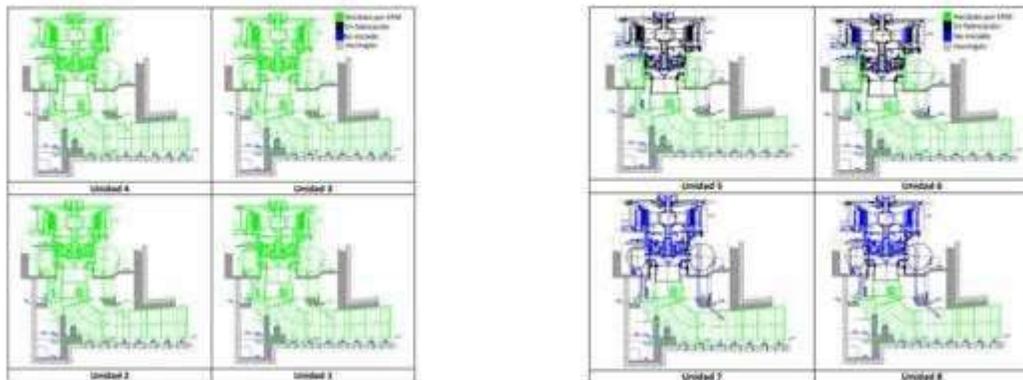
Hay casos de transformadores que cayeron al mar cuando se bajaron de los barcos; en dos casos los intentos de recuperar su rendimiento a través de un lavado extensivo no tuvieron éxito. El agua del río debería ser más fácil de limpiar, pero la presión hidrostática máxima a la que estaban sometidos era bastante alta. En cualquier caso, los transformadores monofásicos, al ser máquinas más simples, son intrínsecamente más fáciles de recuperar que los trifásicos más comunes. Si ya se habían colocado cambiadores de tomas en carga o fuera de carga (no se mencionan explícitamente en los datos técnicos), ciertamente serán reemplazados.

Un cable de alta tensión ya estaba dañado físicamente por la caída de una roca durante una inspección parcial preliminar, y otros pueden haber sufrido daños. A menos que estén físicamente dañados, y después de reemplazar los terminales en sus dos extremos, los cables XLPE HV serán los equipos menos afectados por la inundación.

Las piezas mecánicas de las grúas también son una interrogación: si las grúas se caen, lo más probable es que las piezas mecánicas se pierdan; los componentes eléctricos y de control ciertamente se pierden como los de cualquier otro equipo.

El rescate del proyecto puede beneficiarse de la disponibilidad de todos los componentes necesarios para volver a montar al menos las dos primeras unidades que originalmente se esperaba que se pusieran en servicio a finales de este año. La figura n.º 25 muestra que dichos componentes constituyen la mayoría de los equipos.

### ***Equipment already delivered to EPM (August 1<sup>st</sup> 2018)***



**Figura n.º 25: Componentes de la turbina disponibles para EPM**

El equipo rehabilitado después de la inundación no debe estar sujeto a riesgos residuales significativos durante el funcionamiento de la planta.

No se espera que las deformaciones generales de las paredes de la caverna sean significativas, lo que debería limitar el daño a las partes incrustadas, pero no se pueden excluir los desprendimientos de rocas.

Los procedimientos de prueba para evaluar la fiabilidad del equipo inundado están disponibles y deben aplicarse.

EPM tiene la posibilidad de reemplazar, incluso temporalmente, por mantenimiento externo, cualquier equipo sin el estrés de posponer aún más el hito de las dos primeras unidades.

El cronograma general del proyecto, con una importante rehabilitación de obra civil, la disponibilidad en inventario de al menos un conjunto completo de equipos electromecánicos para instalar las dos primeras unidades, son elementos que pueden reducir significativamente los riesgos residuales durante la operación.

Una estimación conservadora del coste de reparación/reemplazo del equipo no debe exceder los 100 millones de dólares estadounidenses, incluido el valor de desguace del equipo, excluidos el coste interno de EPM y la modificación/extensión contractual de las garantías existentes.

### 3.5 Gestión de seguridad de la represa

El Diseñador opera un sistema de seguridad de represas satisfactorio en el sitio. Las lecturas de los instrumentos se toman e interpretan regularmente. El Manual de Instrumentación [6] está disponible y es utilizado en el sitio por personal competente.

Se dispone de diagramas de flujo para responder a diferentes condiciones de emergencia [8]. Los valores umbral que indican los niveles de alerta se proporcionan para los instrumentos clave; se muestra un ejemplo en la figura n.º 26.

Alertas Proyecto Ituango									
Reporte CMT:	7/06/2018	Hora de Corte:	8:00	Valores de Referencia para alertas:					Observaciones
RIESGOS	Medida	Variable	Estado	Normal	Amarilla	Roja			
Caudal	Descarga Ituango	(m <sup>3</sup> /s)	1154,24	<1700	>1700	>3000		Registro tomado a las 7:15	
	Puerto Valdivia	(m <sup>3</sup> /s)	1401,63	<2400	>2400	>3400		Registro tomado a las 7:15	
Presas	Piezómetros	Estado	Estable	Estable	En observación	Instable		No se presentan novedades	
	Inclinómetros	Estado	Estable	Estable	En observación	Instable		No se presentan novedades	
	Asentamientos	Estado	Estable	Estable	En observación	Instable		No se presentan novedades	
	Nivel de Embalse	(msnm)	393,59	<409 *	>409 *	>410		Se están presentando un descenso de 5cm en las últimas 6 horas	
	Infiltraciones en área total	(l/s)	32,60	<200	>200	>300		Sin evidencia de degradación de feno	
Deslizamientos	Volumen de desplazamiento taludes captación	(m <sup>3</sup> )	0	< 250.000 m <sup>3</sup>	>250.000 m <sup>3</sup>	>400.000 m <sup>3</sup>		Deformaciones no significativas	
	Volumen de desplazamiento vertedero	(m <sup>3</sup> )	0	< 250.000 m <sup>3</sup>	>250.000 m <sup>3</sup>	>400.000 m <sup>3</sup>		Deformaciones no significativas	
	Volumen de desplazamiento portal desviación	(m <sup>3</sup> )	0	<250.000 m <sup>3</sup>	>250.000 m <sup>3</sup>	>400.000 m <sup>3</sup>		Deformaciones no significativas	

\* Valores válidos para altura de la presa en la cota 412

Figura n.º 26: Niveles de alerta (muestra)

El IAP cree que la preparación de una matriz de nivel de respuesta será de gran ayuda durante la operación del Proyecto. El Anexo 4 muestra una plantilla típica.

La figura n.º 27 muestra el marco utilizado para informar y alertar a las comunidades corriente abajo, según corresponda.

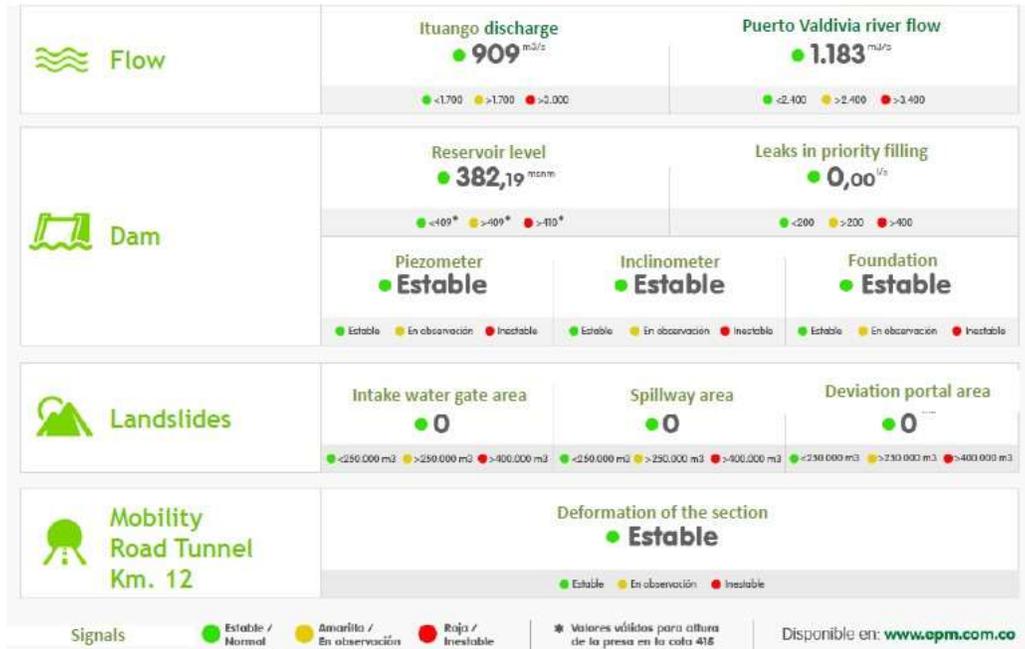


Figura n.º 27: Marco de información y alerta para las comunidades corriente abajo

El nivel de alerta de la advertencia temprana se puede reducir cuando tanto el túnel de desvío 2 (TD2) como la GAD se conecten de forma segura.

Las medidas implementadas hasta la fecha, así como los trabajos continuos relacionados con la seguridad y el mantenimiento, permiten expresar una evaluación positiva sobre la seguridad del proyecto en su configuración actual.

## 4 Planes para la continuación del proyecto

### 4.1 Análisis del modo de falla potencial

Desde 2002, el Análisis de Modos de Falla Potencial (PFMA) se ha introducido como parte de las inspecciones a los 5 años bajo las regulaciones de la Comisión Federal Reguladora de Energía (FERC) de EE. UU.<sup>4</sup> para las represas hidroeléctricas no federales en los EE. UU. Este método requiere que los propietarios de las represas realicen una evaluación cualitativa de los riesgos para identificar posibles modos de falla y evaluar los trabajos correctivos necesarios, el sistema de instrumentación de monitoreo, etc. El PFMA ha establecido una base para la evaluación del rendimiento de la seguridad de las represas y proporciona una oportunidad para mejoras integrales de la seguridad de las represas que podrían pasarse por alto por el enfoque tradicional basado en normas. Las Directrices de la FERC, Capítulo 14, proporcionan una descripción detallada del proceso del PFMA<sup>5</sup>, incluidos los objetivos clave y los resultados típicos, la revisión

<sup>4</sup> Código de Reglamentaciones Federales - Título 18: Conservación de Energía y Recursos Hídricos - Capítulo I: Comisión Federal Reguladora de Energía, Departamento de Energía - Subcapítulo B: Regulaciones bajo la Ley Federal de Energía - Parte 12: Seguridad de Proyectos de Energía Hídrica y Obras de Proyectos - Subparte D: Inspección por Consultor Independiente

<sup>5</sup> [www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide/chap14.pdf](http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide/chap14.pdf)

de información de antecedentes, la inspección del sitio, los talleres facilitados que incluyen sesiones de "lluvia de ideas" para identificar/evaluar posibles modos de falla, las consecuencias y las medidas de mitigación.

El PFMA tiene la intención de proporcionar una comprensión de cómo y por qué fallan las represas al comprender cómo estas se comportan normalmente las, enseñar a identificar las primeras señales de problema, explicar los peligros y riesgos impuestos por la represa y preparar para el comportamiento inesperado que conduce a la falla.

El IAP considera muy importante que el Diseñador, y otras partes relevantes, realicen un taller de PFMA teniendo en cuenta la experiencia y las lecciones aprendidas del rendimiento del Proyecto hasta la fecha. La siguiente tabla anticipa algunos PFM para la consideración e integración del Diseñador, según corresponda.

<b>Análisis de modos de fallo potenciales</b>	<b>Justificación/alcance</b>
Flujo saliente sostenible a través de los canales de agua de la sala de máquinas	Los túneles de fuga 1 y 2 pueden experimentar colapsos; el flujo de salida se reduciría; la fuga a través del TD2 o la GAD podría aumentar y afectar los tapones existentes.
Fuga elevada del revestimiento de la tubería forzada	En caso de colapsos en cualquier parte del sistema de entrada que causen un flujo incontrolado de agua, no será posible detener dicho flujo porque las compuertas de entrada solo pueden funcionar bajo presión equilibrada.
Resistencia a la erosión del revestimiento a la galería de descarga intermedia (IDG)	Corriente arriba de las compuertas de control, 400 m de la IDG están reforzados con pernos de roca y revestimiento de hormigón proyectado, y corren el riesgo potencial de erosión durante la operación de la IDG; no se puede instalar revestimiento de hormigón debido a las compuertas existentes.
Estructura de la cresta de la represa por encima de 418 msnm	Estabilidad posterremoto de la "estructura compuesta".
Desprendimiento de tierra por encima de los pozos de las compuertas de entada	Evaluar las medidas de estabilización de pendientes para mitigar el nivel de riesgo a largo plazo.
Posibles desprendimientos de tierra en el embalse y olas de impacto asociadas	Evaluación geotécnica. Análisis de olas de impacto. Altura de las olas. Desbordamiento de la represa.

#### 4.2 Medidas estructurales relacionadas con la seguridad

Se espera que el taller de PFMA identifique medidas relacionadas con la seguridad, tanto de naturaleza estructural como no estructural. Las conversaciones con profesionales en el sitio y la revisión de la documentación disponible le han permitido al IAP identificar las siguientes medidas estructurales:

- i. Galería de descarga intermedia (IDG): inyecciones de contacto completo entre el revestimiento de acero y la roca; sellado de los orificios de inyección; fortalecimiento del revestimiento existente.
- ii. Tuberías forzadas (cuando sea accesible): revestimiento de acero en los codos superior e inferior; extensión del revestimiento de acero por encima del codo inferior.
- iii. Ampliación de las medidas de perfilado y estabilización de las pendientes, corriente arriba del aliviadero

y sobre el área de los pozos de las entrada de alimentación

El Capítulo 6 resume y proporciona detalles sobre las recomendaciones del IAP.

### 4.3 Implicaciones de costes y cronogramas

#### 4.3.1 Estimaciones de costes

El Anexo 5 contiene la estimación actual de EPM de los costes asociados con la finalización del Proyecto (escenario de 36 meses). El IAP se ha concentrado en los costes asociados a las medidas de contingencia (Detalle inversión contingencia), y en los elementos resaltados en rojo.

La siguiente tabla compara las estimaciones de EPM con las del IAP para los elementos relevantes. Elemento 3. Las "Obligaciones adicionales, licencia ambiental" en la estimación de EPM no se consideran porque están fuera del conocimiento del IAP. En ausencia de un diseño conceptual y las cantidades asociadas, el IAP solo puede basar la estimación en la experiencia de otros proyectos hidroeléctricos con elementos de trabajo similares. Por lo tanto, la estimación del IAP se presenta como rangos, con la precaución de que las cifras pueden variar, incluso sustancialmente, cuando se definan las cantidades reales y los métodos de trabajo.

Los pesos colombianos se convierten en USD a una tasa de 2989 (COP).

DETALLE INVERSIONES CONTINGENCIA	COP	USD
1. Obra civil	369 000,00	123,00
2. Equipos (recuperación y reemplazos)	332 750,00	111,00
3. Taponamiento túnel derecho y SAD	100 000,00	33,00
4. Pantalla impermeable en la represa	150 000,00	50,00
5. Desembalse	300 000,00	100,00
<b>TOTAL ESTIMADO EPM</b>	<b>1 251 750,00</b>	<b>417,00</b>

ELEMENTO	mín.	máx.
<b>Obras civiles</b>		
Taponamiento túnel derecho y SAD	30,00	40,00
Pantalla impermeable en la represa	50,00	50,00
Extensión del tratamiento de las pendientes del aliviadero	25,00	50,00
Reparaciones y refuerzo de la caverna de la sala de máquinas	30,00	50,00
Mitigación del riesgo de desprendimientos en el embalse	10,00	15,00
Galería de descarga intermedia	3,00	5,00
Revestimiento de acero en los codos de la tubería forzada	10,00	15,00
Salida de nivel medio (desembalse)	100,00	100,00
<b>Subtotal de las obras civiles en millones de USD</b>	<b>258,00</b>	<b>325,00</b>

<b>Equipos</b>		
Equipos de generación	80,00	100,00
Saldo de la planta	10,00	20,00
Compuertas y válvulas	5,00	10,00
<b>Subtotal de los equipos en millones de USD</b>	<b>95,00</b>	<b>130,00</b>
<b>TOTAL EQUIPO + OBRA CIVIL EN MILLONES DE USD</b>	<b>353,00</b>	<b>455,00</b>

La estimación de EPM, equivalente a USD 419 M, está lo suficientemente cerca del límite superior del rango del IAP (USD 455 M).

Se hacen las siguientes observaciones:

- La estimación del IAP incluye trabajos adicionales, con respecto a los de EPM. Estos son:
  - Extensión del tratamiento de las pendientes del aliviadero
  - Reparaciones y refuerzo a la caverna de la sala de máquinas
  - Mitigación del riesgo de desprendimientos en el embalse
  - Galería de descarga intermedia (fortalecimiento del revestimiento)
  - Revestimiento de acero en los codos de la tubería forzada
- El coste de dichas obras adicionales es de USD 78 a 135 M; si estos elementos no están realmente incluidos en la estimación de EPM (el IAP no está seguro de ello), esto último se considera un cálculo conservador.
- El elemento "Desembalse" se refiere a la provisión de una salida de nivel medio
- ("Sistema Alternativo de Desviación, Desembalse Cota 340"); el IAP se complace en reconocer que este elemento esencial, analizado en el capítulo 5 a continuación, está siendo contemplado por EPM.

#### 4.3.2 Consideraciones del cronograma

Durante la visita del IAP, el Propietario y el Diseñador estaban trabajando en un plan integrado para la implementación de los trabajos correctivos y la finalización del Proyecto. Una versión preliminar de ese plan se ha puesto a disposición del IAP el 8 de septiembre, y el diagrama de Gantt relativo se muestra en el Anexo 6. Con base en ese Plan, y en las presentaciones orales recibidas durante la visita al sitio, el IAP ofrece los siguientes comentarios.

- i. Los trabajos de taponamiento en el TD2 y la GAD representan la actividad más urgente. Solo después de un tratamiento de lechada efectivo del área obstruida por escombros se pueden construir los tapones de hormigón finales. Los tratamientos de lechada son una operación bastante impredecible y es probable que requieran una fase de prueba y error significativa, así como un manejo adaptativo. La duración estimada es de 17,2 meses (523 días), con una evaluación provisoria del nivel de riesgo en las zonas corriente abajo a principios de noviembre de 2018. El IAP aprecia que la duración de las actividades es muy difícil de predecir, pero 17 meses parece una conjetura razonable. La reevaluación de los riesgos a principios de noviembre parece

un poco optimista.

- ii. Los trabajos de taponamiento se beneficiarían significativamente de niveles más bajos en el embalse. Actualmente, eso solo puede verse afectado después de completar la IDG, y solo en una medida limitada, debido a la limitada capacidad de descarga de la IDG, esencialmente en los meses secos.
- iii. El Plan actual cuenta con la construcción de una salida de nivel medio (“Sistema Alternativo de Desviación, Desembalse Cota 340”). El tiempo de implementación de 20 meses (625 días) parece corto, a menos que ya se haya preparado un diseño detallado y haya equipos de construcción disponibles en el sitio.
- iv. El desvío del río a través del complejo de la sala de máquinas ciertamente ha causado daños a las obras subterráneas, sin embargo, el nivel de dichos daños no se puede predecir antes de la inspección visual de las obras subterráneas. Acceder al área de la caverna a fines de febrero de 2019 es una estimación muy optimista; de manera más realista, eso podría requerir varios meses más, posiblemente diciembre de 2019.
- v. Por el momento, se debe asumir con prudencia que la puesta en marcha de la planta se puede retrasar de 3 a 4 años a partir de la fecha prevista de diciembre de 2018.

## 5 Sostenibilidad del proyecto

### 5.1 Salida de nivel medio

La posibilidad de controlar el nivel del embalse de Ituango es extremadamente limitada en la configuración actual. Solo la IDG, con umbral de 260 msnm, ofrece una capacidad parcial en ese sentido, y aún no se ha completado. Su capacidad nominal, 450 m<sup>3</sup>/s es menor que el flujo entrante en la estación seca, y ha sido diseñada solo para cumplir con el deber del dispositivo de descarga de agua ambiental.

El IAP cree que tener una salida de nivel medio (MLO) adicional es esencial en Ituango por, al menos, dos razones:

- Seguridad: la parte superior del embalse debe bajarse en condiciones de emergencia (por ejemplo, después de un terremoto o por manifestaciones de erosión interna).
- Operación: para acceder a las áreas de la compuerta de entrada, para mantenimiento o reparaciones extraordinarias.

La MLO debe ubicarse entre la IDG y el nivel de entrada, probablemente a alrededor de 320 msnm. Su capacidad de descarga debe complementar la de la IDG (450 m<sup>3</sup>/s, máximo) para permitir una bajada efectiva del embalse también en los meses húmedos; preferiblemente, la MLO debe tener una capacidad de descarga para hacerlo por sí solo. Según la Oficina de Recuperación de Estados Unidos (USBR)<sup>6</sup>, la inundación de la frecuencia seleccionada debe tener un periodo de retorno de cinco veces la duración del periodo de llenado con un periodo de retorno mínimo de 5 años. En general, las obras de la salida de bajo nivel en conjunto con otras instalaciones de descarga deben ubicarse y dimensionarse para bajar el embalse dentro de un periodo de 1 a 4

---

<sup>6</sup> USBR 1990 “Criteria and guidelines for evacuating storage reservoirs and sizing low-level outlet works”

meses, al menor de los siguientes niveles:

- a) Un nivel de embalse acorde con una capacidad de almacenamiento que sea el 10 por ciento de esto en el nivel inicial del embalse.
- b) Un nivel de embalse que sea inferior al 50 por ciento de la altura hidráulica de la represa.

La condición a) no es práctica para Ituango. Un nivel cerca de la condición b) parece factible.

El diseño preliminar probablemente revelará que un solo canal de agua tendría un diámetro impracticable para la técnica de construcción requerida. Por lo tanto, es probable que se requieran dos túneles de descarga.

La construcción de la MLO inevitablemente implicará alguna actividad acuática importante, por ejemplo, la técnica de extracción de agua de lagos o la salida del canal de agua protegido por mamparos. Cualquiera de las dos opciones implica grandes desafíos de diseño y construcción; por lo tanto, el diseño y la adquisición deben iniciarse lo antes posible.

Las figuras n.º 27 y 28 muestran, respectivamente, un esquema teórico de la técnica de extracción de agua del lago y una toma protegida por mamparo en el lago Mead (Nevada, EE. UU.)<sup>7</sup>.

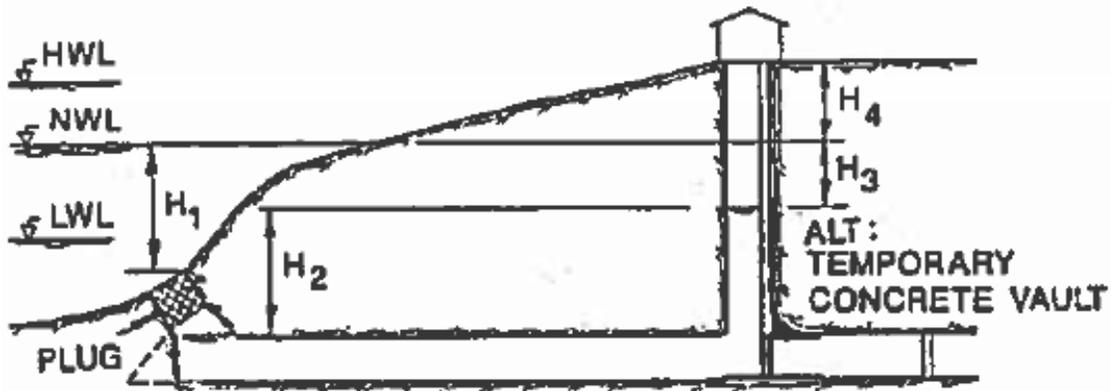


Figura n.º 27: Técnica noruega de extracción de agua de lagos

<sup>7</sup> North American Tunneling Journal (2015) "The Legacy of Lake Mead- making tunneling history in southern Nevada" [www.tunnelingjournal.com](http://www.tunnelingjournal.com) Feb/Mar 2015

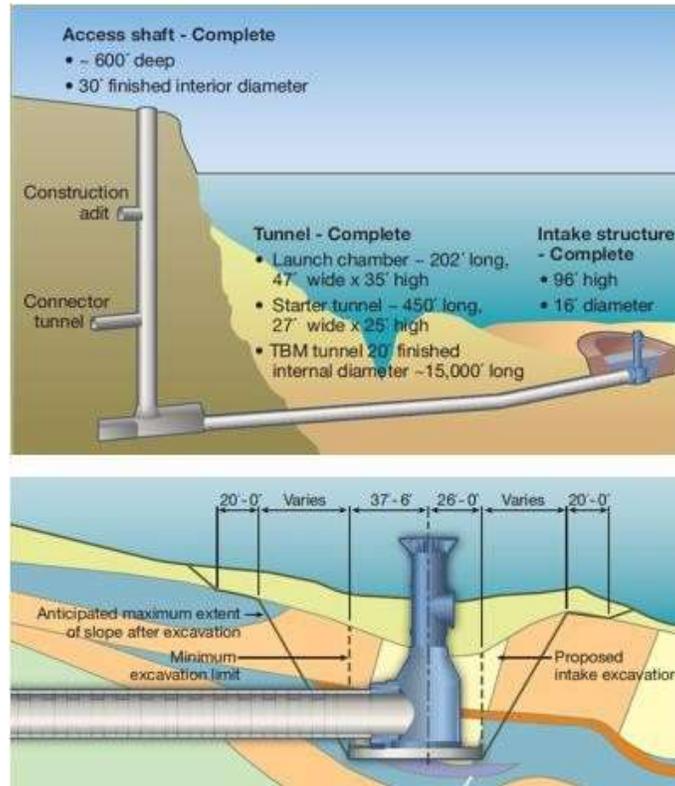


Figura n.º 28: Canal de extracción protegido por mamparo en el lago Mead

## 5.2 Gestión de la sedimentación

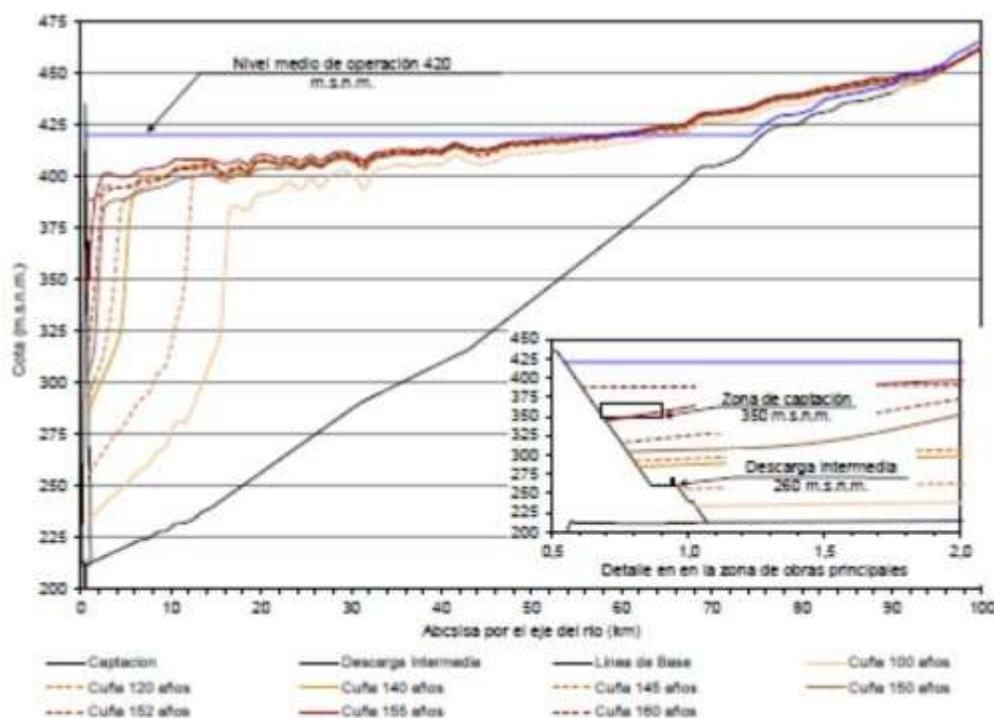
El IAP reconoce que las preocupaciones y los esfuerzos actuales para definir un curso de acción adecuado para completar el Proyecto y ponerlo en funcionamiento representan la prioridad para EPM y sus consultores. Al mismo tiempo, debido a su relevancia para la sostenibilidad del Proyecto, el IAP siente la necesidad de analizar el tema de la sedimentación del embalse.

La consideración del manejo de sedimentos es un tema importante para los proyectos hidroeléctricos en muchas partes del mundo y tiene una influencia significativa en el diseño de cada proyecto. Un importante trabajo de referencia sobre el tema es el enfoque RESCON<sup>8</sup> en el que los autores consideran el ciclo de vida completo de un embalse examinando tanto la sostenibilidad operativa como los problemas de seguridad. Tales cuestiones son de relevancia directa para el embalse de Ituango.

El Proyecto Ituango puede ofrecer grandes beneficios a corto plazo, pero la producción de energía puede verse limitada por la acumulación de sedimentos en tan solo 50 años. El enfoque de gestión de sedimentos utilizado determinará si Ituango hará la transición a un activo de generación de energía a largo plazo para Colombia, o la transición a pasivos a largo plazo muy grandes y costosos con potencial de problemas de seguridad de represas intratables.

<sup>8</sup> Palmieri A. et al (2003) "Reservoir Conservation- the RESCON Approach - economic and engineering evaluation of alternative strategies for managing sedimentation in storage reservoirs" Banco Mundial, Washington DC, junio de 2003

El Diseñador ha examinado el tema<sup>9</sup>, y la figura n.º 29 muestra el avance del delta de sedimento durante la vida operativa del embalse de Ituango.



**Figura n.º 29: Perfil del delta de sedimentos para los periodos de 25, 50 y 100 años de operación del embalse**

Las conclusiones del Diseñador son que los sedimentos gruesos del delta podrían alcanzar las entradas de potencia después de 150 años de operación de la planta, o 75 años en caso de que se duplique la producción de sedimentos.

El IAP desea analizar los supuestos de producción de sedimentos con el Diseñador y ofrece las siguientes reflexiones sobre el tema.

La viabilidad y los métodos más apropiados para gestionar los sedimentos del embalse dependen de muchos factores, el primero de los cuales es el "tamaño hidrológico" del embalse. Un embalse hidrológicamente pequeño tiene una capacidad pequeña en comparación con el caudal medio anual del río, y viceversa.

En el caso de Ituango:

MAF = 31 850 M m<sup>3</sup>/año (caudal medio anual)  
CAP = 2720 M m<sup>3</sup> (capacidad del embalse)

<sup>9</sup> Integral (2016) "Atención a Conclusiones y Recomendaciones del Documento – Evaluación Técnica del Proyecto Hidroeléctrico Ituango – Informe Final" 18 agosto 2016.

MAS = 40 M m<sup>3</sup>/año (producción media anual de sedimentos<sup>10</sup>)

Por lo tanto: CAP/MAF = 0,09; y CAP/MAS = 68

El punto representativo de Ituango se traza en la figura n.º 30<sup>11</sup>

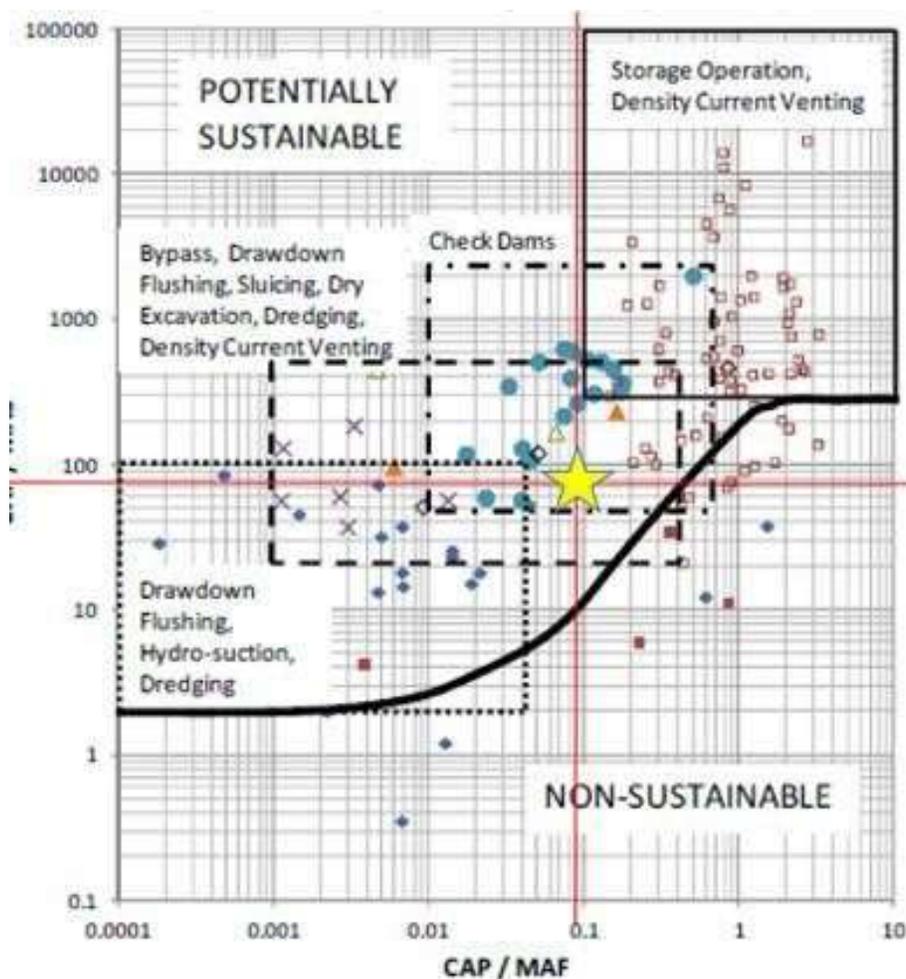


Figura n.º 30: Sedimentación del embalse – Caso Ituango

Una relación CAP/MAF inferior a 0,2 indica un embalse hidrológicamente pequeño. La relación CAP/MAS proporciona una estimación aproximada de la vida útil del embalse, sin tener en cuenta la eficiencia de la trampa del embalse. Teniendo en cuenta la eficiencia de la trampa, la vida media del embalse podría ser del orden de 50 a 60 años.

Antes de eso, se espera un paso de sedimentos finos a través de las turbinas, y los efectos asociados deben gestionarse adecuadamente.

Después de unos 50 a 60 años, cuando el delta se acerque a las entradas de alimentación, la planta deberá

<sup>10</sup> 46 M ton/año, densidad media de sedimentos 1,15 t/m<sup>3</sup>

<sup>11</sup> Annandale (2013) "Quenching the Thirst - ch. 6 Preserving Space" Create Space Independent Publishing Platform, North Charleston, SC.

ser operada como central de pasada, y los sedimentos gruesos deberán gestionarse en consecuencia. La hidroaspiración o el dragado táctico frente a las entradas pueden prolongar aún más la vida útil de la planta, pero el cierre de la planta será necesario cuando la gestión de sedimentos gruesos ya no sea económica.

El Diseñador ha descrito algunos posibles escenarios a largo plazo y al IAP le gustaría conversar con el Diseñador sobre el tema. En cualquier caso, será necesario que EPM reserve un fondo de desmantelamiento que se devengará durante la vida útil de la planta.

### 5.3 Evaluación de opciones para la finalización del Proyecto

Las opciones y los problemas relevantes para la finalización del Proyecto se resumen en la siguiente tabla. Para cada elemento, el IAP presenta hallazgos y recomendaciones basadas en su visita de agosto al Proyecto.

Algunos elementos aún son preliminares porque aún no se dispone de pruebas fácticas (por ejemplo, caverna de la sala de máquinas y canales inundados). En esos casos, el IAP ha ofrecido evaluaciones informadas basadas en el historial de casos y las experiencias pasadas.

Opciones y problemas	Hallazgos y recomendaciones de agosto de 2018
Revisión del proyecto de EPM – Planes de continuación	Las soluciones preliminares de diseño para la continuación del Proyecto son satisfactorias. EPM está progresando con el diseño detallado.
Análisis de la conveniencia o necesidad de desaguar el embalse.	El IAP considera que la posibilidad de controlar el nivel del embalse y de bajarlo cuando sea necesario, es una característica esencial de la Central Hidroeléctrica de Ituango. Para este propósito, el IAP recomienda encarecidamente añadir una salida de nivel medio de capacidad hidráulica adecuada.
Deben evaluarse los posibles daños y las opciones de limpieza y otras obras necesarias para completar la sala de máquinas.	Las opciones se revisarán cuando sea posible acceder a la caverna de la sala de máquinas. Las secciones 3.2.3 y 3.4 incluyen algunas reflexiones sobre el tema, basadas en gran medida en la experiencia y el historial de casos. Tres orificios perforados en septiembre revelaron buenas condiciones del macizo rocoso por encima de la corona de la caverna.
Principales implicaciones (financieras/de costes, técnicas, medioambientales y sociales) del cronograma de implementación asociado.	En ausencia de un diseño conceptual y las cantidades asociadas, el IAP solo puede basar la estimación en la experiencia de otros proyectos hidroeléctricos con elementos de trabajo similares. Por lo tanto, la estimación del IAP se presenta como rangos, con la precaución de que las cifras pueden variar, incluso sustancialmente, cuando se definan las cantidades reales y los métodos de trabajo.
Rehabilitación completa	Actualmente, es la opción preferible; la confirmación final será después de la evaluación de los daños en el complejo de la sala de máquinas.
Medidas estructurales y no estructurales	La rehabilitación y finalización del proyecto incluirá medidas estructurales y no estructurales, como se resume en el capítulo 6.

Opciones y problemas	Hallazgos y recomendaciones de agosto de 2018
Revisar el resultado del proyecto	No previsto en esta etapa.
Revisar los propósitos del proyecto	No es realista.
Reingeniería del proyecto	La adición de una salida de nivel medio y la extensión de los trabajos de tratamiento de la pendiente corriente arriba del área del aliviadero son medidas esenciales de reingeniería.
Cierre parcial/total	Muy poco probable, a menos que la caverna tenga que ser abandonada por daños excesivos. El Proyecto tendrá que ser desmantelado al final de su vida útil, cuando la gestión de los sedimentos gruesos, para sostener la operación de central de pasada, ya no será económica.

## 6 Conclusiones y recomendaciones del IAP

Para comodidad del lector, el presente capítulo resume las principales conclusiones del IAP que se encuentran dispersas en los capítulos anteriores.

Las recomendaciones del IAP también se resumen y elaboran según sea necesario.

### 6.1 Principales conclusiones del IAP

#### Lecciones aprendidas de los eventos de la primavera de 2018

- El cierre de la GAD (sumidero) fue la consecuencia del flujo de agua que provocó subpresiones y probablemente penetró dentro del macizo rocoso y desestabilizó las cuñas. Así, la energía del agua interactuó directamente con el macizo rocoso y provocó la falla progresiva del mismo.
- La roca muy débil en el área del sumidero puede haber iniciado una falla progresiva.
- Los posteriores movimientos masivos, que tuvieron lugar en diferentes partes de los canales de agua, fueron consecuencia del flujo incontrolado de agua a través de galerías interconectadas, algunas de las cuales nunca fueron diseñadas para la conducción de agua.

#### Tratamiento de emergencias

- Se tuvo que emitir una advertencia corriente abajo debido a las descargas incontroladas del túnel de desvío 2. La advertencia oportuna evitó víctimas y permitió contener los daños económicos.
- La inundación del complejo de la sala de máquinas era el curso de acción más apropiado e inevitable, lo que permitía recuperar el control sobre los niveles del embalse.
- La elevación de la cresta de la represa de 410 msnm se alcanzó el 5 de junio, lo que hizo que el aliviadero de la superficie fuera operable y evitó el riesgo de desbordamiento del dique.

## Represa

- Cuando está libre de la erosión, la formación de gneis que domina el sitio de la represa, está moderadamente unida, con valores de GSI que van de 50 a 70.
- Existen pasajes débiles con cizallas, pero están localizados.
- Las condiciones de la pendiente corriente arriba del aliviadero son inestables. Estas inestabilidades afectan la cubierta y la zona de roca desgastada, no eliminada ni modelada. Dichos movimientos se verán aumentas por la fluctuación del embalse, o en caso de una reducción del nivel.
- El IAP no tiene comentarios importantes sobre el diseño de la represa.
- Con base en los datos proporcionados, el núcleo de arcilla, la zonificación, el diseño del filtro, los materiales, el análisis estático y dinámico y la instrumentación de la represa de Ituango responden a las mejores prácticas de ingeniería en el diseño de represas.
- Las características de los materiales, según lo determinado por las pruebas de laboratorio y de campo, son adecuadas. Las zonas de filtro y transición cumplen con las especificaciones de clasificación.
- Bajo el cabezal del embalse experimentado hasta la fecha<sup>12</sup>, la cortina de lechada parece funcionar satisfactoriamente. Toda el agua filtrada está limpia, según el informe.
- El asentamiento máximo del dique, a su altura casi final, se informa como 1,2 m, un valor normal para una represa tan alta. No se observaron ni informaron deformaciones en la cara corriente abajo.
- Las pendientes del aliviadero se han comportado satisfactoriamente hasta la fecha. Los bancos están bien definidos y las pendientes están ancladas y totalmente hormigonadas cuando corresponda. Las lecturas del inclinómetro, según lo informado, indican un rendimiento satisfactorio; las condiciones generales se ven bien.
- La zonificación de la represa se modificó, por encima de 385 msnm, para acelerar la elevación del dique durante la respuesta de emergencia. Se está construyendo un diafragma de plástico para mejorar la hermeticidad de la zona. El Diseñador está investigando la estabilidad global de esa parte de la represa. Los resultados son razonables e indican las condiciones de estabilidad marginalmente aceptables del relleno adicional, que generalmente son satisfactorias para este caso de emergencia.

## Complejo de cavernas de la sala de máquinas

- La excavación solo encontró fallas en la cuña, a veces significativas, en el techo de la caverna, lo que requirió un fortalecimiento del refuerzo.
- La convergencia y las lecturas del extensómetro mostraron un comportamiento satisfactorio del macizo rocoso, antes de los eventos de abril y mayo de 2018. El mecanismo de falla controlado por estrés no fue un problema.
- Las deformaciones fueron insignificantes o mínimas y, en todos los casos, estuvieron controladas eficazmente por el soporte aplicado.

---

<sup>12</sup> El nivel de embalse 394, correspondiente al 87 % del cabezal máximo de diseño, se alcanzó el 6 de junio; el rendimiento hasta la fecha es satisfactorio.

- Se monitorearon las infiltraciones y se realizó el enrutamiento de consolidación.
- Los análisis FEM mostraron que no es probable que cualquier colapso extendido afecte la estabilidad de la pendiente parietal y el túnel de acceso adyacente.
- El abandono de la caverna es poco probable, pero podrían ser necesarios importantes trabajos de refuerzo y reconstrucción.

#### Desprendimientos en el embalse

- Durante la operación del embalse, se producirán pequeños desprendimientos de tierra a nivel local, en la zona erosionada y desgastada de las pendientes, a lo largo del borde del lago.
- Se considera que tales movimientos masivos no generan ondas de impacto peligrosas, sino que contribuyen lentamente a la sedimentación del embalse.
- El Diseñador ha llevado a cabo un análisis de ondas de impacto para verificar la idoneidad del francobordo de la cresta de la represa disponible (15 m) para contener las subidas de las olas. Los resultados indican que dicho francobordo es adecuado.
- El IAP desea realizar un vuelo en helicóptero dedicado, durante su próxima visita al sitio, para revisar los supuestos utilizados en el estudio en consulta con el Diseñador.

#### Equipos hidráulicos, mecánicos y eléctricos

- La inspección visual de las compuertas del aliviadero no evidenció motivos de preocupación. Las compuertas están operativas y probadas. En el momento de la visita del IAP, las obras de acabado y la implementación del sistema de control estaban en curso.
- Merecía más atención la situación de la galería de descarga intermedia (IDG) (consulte la sección Recomendaciones). EPM y el Contratista estaban trabajando para completar el montaje y las pruebas de las compuertas radiales y de las compuertas corredizas de emergencia. La inspección visual de las compuertas y de sus sistemas de control no evidenció motivos de preocupación.

#### Equipo de la sala de máquinas

- Aunque no es muy común, la inundación de la Central Eléctrica Ituango tiene precedentes. En general, los casos de inundaciones a corto plazo son más comunes, y cada inundación tiene sus propias características; por esto, la experiencia tiene que ser contextualizada.
- El equipo rehabilitado después de la inundación no debe estar sujeto a riesgos residuales significativos durante el funcionamiento de la planta.
- El cronograma general del proyecto, con una importante rehabilitación de obra civil, la disponibilidad en inventario de al menos un conjunto completo de equipos electromecánicos para instalar las dos primeras unidades, son elementos que pueden reducir significativamente los riesgos residuales durante la operación.

### Gestión de seguridad de la represa

- El Diseñador opera un sistema de seguridad de represas satisfactorio en el sitio.
- Las lecturas de los instrumentos se toman e interpretan regularmente. El Manual de Instrumentación está disponible y es utilizado en el sitio por personal competente.
- Se dispone de diagramas de flujo para responder a diferentes condiciones de emergencia. Se proporcionan valores de umbral que indican los niveles de alerta para los instrumentos clave.
- Las medidas implementadas hasta la fecha, así como los trabajos en curso relacionados con la seguridad y el mantenimiento, permiten expresar una evaluación positiva sobre la seguridad del proyecto en su configuración actual.

### Implicaciones de costes y cronogramas

- Los trabajos de taponamiento en el TD2 y la GAD representan la actividad más urgente. Solo después de un tratamiento de lechada efectivo del área obstruida por escombros se pueden construir los taponamientos de hormigón finales. Los tratamientos de inyección de lechada son una operación bastante impredecible y es probable que requieran series de prueba y error significativas, así como una gestión adaptativa; como tal, su duración es muy difícil de predecir.
- Los trabajos de taponamiento se beneficiarían significativamente de niveles más bajos en el embalse.
- Actualmente, eso solo puede verse afectado después de completar la IDG, y solo en una medida limitada, debido a la limitada capacidad de descarga de la IDG, esencialmente en los meses secos.
- El desvío del río a través del complejo de la sala de máquinas ciertamente ha causado daños a las obras subterráneas, sin embargo, el nivel de dichos daños no se puede predecir antes de la inspección visual de las obras subterráneas. La fecha de acceso se puede estimar, como muy pronto, en marzo de 2019 (muy optimista), y de manera más realista en diciembre de 2019.
- Por el momento, se debe asumir con prudencia que la puesta en marcha de la planta se puede retrasar de 3 a 4 años a partir de la fecha prevista de diciembre de 2018.

### Sostenibilidad del embalse

- Teniendo en cuenta la producción de sedimentos, el caudal medio anual del río, la capacidad del embalse y su eficiencia de captura, la vida media del embalse podría ser del orden de 50 a 60 años.
- Antes de eso, se espera un paso de sedimentos finos a través de las turbinas, y los efectos asociados deben gestionarse adecuadamente.
- Después de unos 50 a 60 años, la planta tendrá que ser operada como central de pasada, y los sedimentos gruesos tendrán que ser gestionados. La hidroaspiración o el dragado táctico frente a las entradas pueden prolongar aún más la vida útil de la planta.
- El desmantelamiento será necesario cuando la gestión de sedimentos gruesos ya no sea económica.
- Es demasiado prematuro analizar posibles escenarios de desmantelamiento en esta etapa, pero será necesario que EPM reserve un fondo de desmantelamiento durante la vida útil de la planta.

## 6.2 Recomendaciones del IAP

Las recomendaciones del IAP se resumen a continuación. Las medidas no estructurales y estructurales se presentan por separado.

<b>Medidas no estructurales</b>	
<b>Tema</b>	<b>Recomendación</b>
Gestión de emergencias	El Diseñador debe contar con el apoyo de una empresa que se haga cargo de la parte de ingeniería de la gestión de emergencias.
Análisis de estabilidad de pendientes	Consulte las recomendaciones detalladas en el punto 3.2.2.
Diseño prioritario del dique	El IAP sugiere realizar análisis de estabilidad también para la configuración final (elevación de la cresta de 435 msnm), lo que puede ser menos favorable para la pendiente corriente abajo de la represa. Debido a la orientación de los diferentes materiales, también se deben examinar las superficies prismáticas.
Gestión de seguridad de la represa	La preparación de una matriz de nivel de respuesta será de gran importancia durante la operación del Proyecto. El Anexo 4 muestra una plantilla típica.
Taller de Análisis del Modo de Falla Potencial (PFMA).	El Diseñador y otras partes relevantes deben llevar a cabo un taller de PFMA considerando la experiencia y las lecciones aprendidas del rendimiento del Proyecto a la fecha.

<b>Medidas estructurales</b>	
<b>Tema</b>	<b>Recomendación</b>
Protección y estabilización de las pendientes	Extender el mismo tratamiento y protección corriente arriba de las pendientes del aliviadero, hasta la entrada de la galería de descarga intermedia y la zona desestabilizada sobre los dos túneles de desvío. También cuesta arriba del área de los pozos de admisión (“El Romerito”). Realizar un par de orificios en la zona de “El Romerito” para reducir las incertidumbres e informar el diseño de las medidas de protección.
Galería de descarga intermedia (IDG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Completar las inyecciones de contacto entre el revestimiento de acero y la roca; sellar los orificios de inyección; fortalecer el revestimiento existente mediante hormigón proyectado reforzado con malla. Las obras deberán realizarse bajo la protección de un tapón temporal; por lo tanto, la gestión de la seguridad de los equipos de trabajo será una característica esencial.</li> <li>• La ausencia de mamparos o ataguías en la entrada de la IDG puede complicar el mantenimiento futuro de las compuertas corredizas de emergencia. El Diseñador debe considerar la posibilidad de instalar piezas incrustadas o crear superficies de contacto adecuadas para permitir la futura instalación de un dispositivo temporal para el mantenimiento de emergencia de las compuertas. Más allá de que se proporcione o no ese dispositivo, debe incluirse un procedimiento relevante para el cierre de la entrada en el manual de operación y mantenimiento de la planta.</li> </ul>
Tuberías forzadas (cuando sean accesibles)	Colocar un revestimiento de acero en los codos superior e inferior; extender el revestimiento de acero por encima del codo inferior.
Salida de nivel medio (MLO)	El IAP cree que tener una salida adicional es esencial en Ituango, por al menos dos razones: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguridad: la parte superior del embalse debe bajarse en condiciones de emergencia (por ejemplo, después de un terremoto o por signos de erosión interna).</li> <li>• Operación: para acceder a las áreas de la compuerta de entrada, para mantenimiento o reparaciones extraordinarias.</li> </ul>

<b>Medidas estructurales</b>	
<b>Tema</b>	<b>Recomendación</b>
Compuertas de entrada de alimentación	Las compuertas de entrada están diseñadas para funcionar bajo presión equilibrada. El cierre de las compuertas anulares de la turbina permite equilibrar las presiones pero, en caso de grandes fugas de los canales de agua, sería imposible lograr condiciones hidrostáticas. El IAP recomienda que dicho evento se examine en el taller de PFMA propuesto, y que la extensión del revestimiento de acero de los canales de agua se reconsidere según corresponda. En cualquier caso, el Plan de Preparación para Emergencias del Proyecto debe incluir un procedimiento para enfrentar la situación descrita anteriormente.

**Anexo 1: Asistencia a reuniones con el panel del BID, julio 30 y 31**

Debida Diligencia BID - Financiación proyecto Ituango - Reuniones con Asesores Técnicos del BID  
 Julio 30 de 2018 A.M.

Nombre/Name	Empresa/Company	Correo Electrónico/Email	Firma/Signature
LUIS J. VELEZ	EPM	LUIS.VELEZ.PUQUE	
Jorge Tabares	EPM		
ALVARO C OSPINA	EPM	alvaro.ospina.montoya	
Juan C. Sampedro	EPM	JUAN.SAMPEDRO@EPM	
Jairo H. Velásquez	EPM	jairo.velasquez@epm.com.co	
Manuel Peñacanda	EPM	MANUEL.GUILLELMO.PENACANDA @costatista.EPM.CO	
Juan Carlos Gutiérrez	EPM	juan.gutierrez@epm.com.co	
Luis Alberto Sierra	EPM	luis.sierra@epm.com.co	
Alessandro Palmieri	IDB Panel		
Paulo Merino	IDB Panel		
Federico Brampitti	IDB Panel		
Leopoldo Morán	IDB		
Marysol Andona	EPM	marysol.andona@epm.com.co	

Debita Diligencia RD - Financiación proyecto Itango - Resúmenes con Asesorías Técnicas del IAP  
 Juli 10 de 2018 P.M.

Nombre/Apellido	Empresa/Compañía	Correo Electrónico/Final	Firma/Signature
Luis M. Anselmi	Integral	luisanselmi@integral.com.ve	[Firma]
Ricardo González H.	"	ricardogonzalez@integral.com.ve	[Firma]
ARACELI ESPINOSA	"	araceli@integral.com.ve	[Firma]
Felix H. Chirara H.	"	fchirara@integral.com.ve	[Firma]
Gabriel Lacorte	Portugal	glacorte@portugal.com	[Firma]
Juan David Hueso C.	Integral	jdhuoso@integral.com	[Firma]
Hernán Martínez	Integral	hmartinez@integral.com.ve	[Firma]
Juan Carlos Belys C.	EPM	juan.carlos.belys@epm.com.ve	[Firma]
JUAN CARLOS ESPINOSA	EPM	juan.carlos.espinosa@epm.com.ve	[Firma]
Juan Carlos Jarama	EPM	juan.carlos.jarama@epm.com.ve	[Firma]
Alexandro Guebara	Integral	alexandro@integral.com	[Firma]
Luis F. Herrera	Integral	lherrera@integral.com	[Firma]
Juan Carlos Martínez	EPM	juan.carlos.martinez@epm.com.ve	[Firma]
Luis Alberto Sierra	EPM	luis.alberto.sierra@epm.com.ve	[Firma]
Juan Luis Castro	EPM	juan.luis.castro@epm.com.ve	[Firma]
Alfonso Sandoval	EPM	alfonso.sandoval@epm.com.ve	[Firma]
Alexandra Palacios	IDB		
Doris Medina	IDB		
Federico Ciampitti	IDB		
Jorge Luis Martínez	IDB		

Debita Dirección BID - Financiación proyecto Itzango - Reuniones con Asesores Técnicos del BID  
Julio 23 de 2018 A.M.

Nombre/Nombre	Empresa/Company	Correo Electrónico/Email	Firma/Signature
Alvaro Ochoa	Ingenier	alvaro.ochoa@ingte.com.co	[Firma]
Diego Guzmán	Ingenier	diego.guzman@ingte.com.co	[Firma]
José Guadalupe	EPM	[Firma]	[Firma]
Manuel Pizarro	EPM	manuel.pizarro@epm.com.co	[Firma]
Marysol Landrau	EPM	marysol.landrau@epm.com.co	[Firma]
Leopoldo Maldonado	BID		
Francisco P. ...	IOB Panel		
Alexandra de Polanco	IOB Panel		
Paola ...	IOB Panel		

Debita Dirección BID - Financiación proyecto Itzango - Reuniones con Asesores Técnicos del BID  
Julio 23 de 2018 P.M.

Nombre/Nombre	Empresa/Company	Correo Electrónico/Email	Firma/Signature
Jaime Guadalupe	EPM	jaime.guadalupe@epm.com.co	[Firma]
Marysol Landrau	EPM	marysol.landrau@epm.com.co	[Firma]
Manuel Pizarro	EPM	manuel.pizarro@epm.com.co	[Firma]
Santiago García	CCCI	santiago.garcia@ccci.com	[Firma]
Francisco ...	CCCI	francisco...@ccci.com	[Firma]
Juan C. Jaupala	EPM	juan.c.jaupala@epm.com.co	[Firma]
Jorge Tabares	EPM	jorge.tabares@epm.com.co	[Firma]
Leopoldo Maldonado	BID		
RODRIGO ...	P.O.E. BID		
ALEXANDRO ...	F.O.E. BID		
PAOLA ...	P.O.E. BID		

## **Anexo 2: Listado de documentos puestos a disposición del IAP**

- [1] Junta de Asesores de EPM: “Informes 1 a 14” febrero 2012 a enero 2018
- [2] Aqualogus y Artelia (2016) “Evaluación Técnica del Proyecto Hidroeléctrico Ituango - Informe Final”, marzo 2016.
- [3] Integral (2016) “Atención a Conclusiones y Recomendaciones del Documento – Evaluación Técnica del Proyecto Hidroeléctrico Ituango – Informe Final” 18 de agosto de 2016.
- [4] Integral (2017) “Proyecto Hidroeléctrico Ituango - Características”
- [5] Herrera J.D. et al. (2017) “Geotechnical behavior of Ituango Earth Core Rockfill Dam” IV Simposio Internacional sobre Represas con Relleno de Roca, 17-18 de mayo de 2017.
- [6] Integral (2018) “Monitoreo Geotécnico para el Llenado del Embalse, Conducción y Descargas” 06-03-2018
- [7] Integral (2018) “Análisis de Taponamiento de Galería Auxiliar de Desviación” mayo de 2018.
- [8] Integral (2018) “Diagramas de Flujo para Definición de Niveles de Alerta” 12 de junio de 2018.
- [9] Fernandez G. (2018) “Ituango Hydropower Project- Update on Technical Issues”, Washington DC, 27 de junio de 2018
- [10] Presentación del Grupo EPM (2018) “BID, BID Invest and B Lenders Meeting” Washington DC, 27 de junio de 2018
- [11] Integral (2018) “Presentation to IAB Invest's IAP” 27 de julio de 2018
- [12] Integral (2018) “Diagnóstico Geológico y Geotécnico de la Contingencia”, 27 julio 2018
- [13] Integral (2018) “Localización General de la Instrumentación en los Rellenos de Represa - Captación”, 25 de julio de 2018
- [14] Integral – Solingral (2010) “Caracterización geológica y geotécnica”
- [15] Integral – Perforaciones exploratorias - Galería A - CM SEPT18
- [16] Integral – Situación de la Casa de Máquinas 01-10-2018

### **Anexo 3 – Reconstrucción detallada de los eventos de la primavera de 2018**

El sistema de desvío fluvial original del proyecto preveía dos túneles de desvío con compuerta de un diámetro de 14 m cada uno, el túnel de desvío izquierdo y el túnel de desvío derecho. Su construcción se adjudicó como un contrato de obras preliminares (a la empresa conjunta Ferrovial Agroman, la empresa de construcción de ingeniería civil de Ferrovial, y la empresa de ingeniería local Sainc), con un contrato separado para las dos compuertas de desvío.

En 2013, el avance insatisfactorio del contrato y la compleja situación geotécnica en el área del portal, donde se deberían haber instalado las dos compuertas, hicieron que EPM cambiara de plan. Las actividades se concentraron en la represa, que estaba en la ruta crítica del proyecto, utilizando los dos túneles de desvío como túneles sin compuerta (a partir de febrero de 2014). El contrato principal fue adjudicado a la empresa conjunta CCC, liderada por la empresa brasileña Carmago Correa (55 %), y las empresas colombianas Constructora Concreto (35 %) y Coninsa Ramon H (10 %). Un plan de aceleración en el contrato principal preveía la construcción de un túnel de desvío auxiliar (ADT) con compuerta, con el portal ubicado corriente arriba de los dos túneles de desvío.

Las compuertas de desvío, originalmente diseñadas para instalarse en los túneles de desvío, y las compuertas de salida inferiores, se reubicaron en la GAD (la salida inferior se diseñó para funcionar solo durante unos días durante el llenado del embalse para garantizar el flujo de descarga de agua ambiental obligatorio de 450 m<sup>3</sup>).

Los dos túneles de desvío, el túnel de desvío auxiliar y los cuatro túneles de fuga son idénticos en términos de diseño y acabado, aunque los cuatro túneles de fuga funcionan en superficie libre.

El diseño de la galería de descarga intermedia, concebida para garantizar el flujo de descarga de agua ambiental obligatorio de 450 m<sup>3</sup>/s cuando la sala de máquinas y el aliviadero no están simultáneamente en funcionamiento, se mantuvo sin cambios (8 m de diámetro para una sección hidráulica de 57,6 m<sup>2</sup>).

La GAD entró en funcionamiento en agosto de 2017, en paralelo a los túneles de desvío derecho e izquierdo. Poco después, ambos túneles de desvío fueron tapados.

La temporada hidrológica en Ituango alterna tres meses secos y tres húmedos; el primer mes húmedo es enero.

El protocolo para el llenado del embalse preveía el cierre de las compuertas del túnel auxiliar de desvío en la última estación seca (originalmente programada para julio de 2018) antes de la operación de las dos primeras unidades (3 y 4) de la planta eléctrica (programada para diciembre de 2018/enero de 2019). Los túneles de desvío derecho e izquierdo debían cerrarse durante las dos temporadas secas anteriores, es decir, julio/septiembre de 2017 y enero/marzo de 2018. El cierre de los túneles de desvío derecho e izquierdo se logró según lo programado.

Después del cierre del túnel de desvío derecho, por primera vez, solo un túnel, GAD, estaba en funcionamiento. Al comienzo de la estación húmeda, el embalse se elevó por encima de los niveles anteriormente

registrados con dos túneles en operación (255 msnm frente a 277 msnm).

En el momento del primer colapso, los túneles de desvío principales estaban en el proceso final de ser sellados por tapones de hormigón: en el túnel izquierdo, se completaron un presello y un sello, mientras que en el túnel derecho solo se colocó un presello.

Uno de los dos accesos de la galería de construcción también estaba sellado, mientras que el segundo, a mayor altura, permanecía abierto.

En la noche del 28 de abril de 2018, alrededor de las 21:00, con una elevación del embalse de alrededor de 240 msnm, el agua dejó de fluir a través de la GAD repentinamente. De acuerdo con los procedimientos previamente establecidos, EPM activó un plan para analizar la situación, y un equipo de expertos de EPM y el Diseñador volaron al sitio para unirse a otros expertos del Diseñador, el Contratista y el Supervisor de construcción, que forman parte del personal permanente en el sitio.

La evaluación preliminar de la situación sugirió que se había producido un colapso inesperado cerca del portal de la GAD. Inmediatamente, se emprendieron varias tareas para manejar la situación, como revisión de la geología local, revisión del diseño de soporte del túnel, análisis de las condiciones operativas y activación de planes de emergencia según protocolos.

Esta situación se mantuvo hasta el 29 de abril por la noche, cuando la presión generada por el embalse (278 msnm) retiró repentinamente el tapón natural en el ADT, causando una recuperación gradual en el nivel de descarga normal en el túnel.

El 30 de abril a las 14:30, se produjo una nueva disminución del flujo que pasa a través de la GAD, y apareció un sumidero (con un diámetro de aproximadamente 12 m en su fondo más estrecho y hasta 100 m en el borde exterior) en la superficie de la montaña inmediatamente sobre el túnel (consulte la figura n.º 1). Unos 220 000 m<sup>3</sup> de suelo y roca bloquearon definitivamente la GAD.



**Imagen n.º 1: Sumidero por encima del ADT**

El nivel del embalse siguió aumentando hasta el 5 de mayo, cuando el flujo en la salida de la GAD (es decir, el túnel de fuga 4) mostró evidencia de que el agua fluía desde la galería de construcción hacia la GAD corriente abajo del bloqueo; en paralelo, el nivel del embalse disminuyó.

Sin embargo, esta situación no duró mucho, y el 7 de mayo una tercera falla afectó a la galería a través de la cual el agua fluía hacia la GAD, lo que provocó que el flujo se detuviera y el nivel del embalse aumentara nuevamente.

El 9 de mayo, un arrastre parcial del tapón del túnel de desvío derecho reinició el flujo en el túnel, que se redujo después de unas pocas horas.

Con el continuo aumento del nivel del agua, se arrastraron algunos finos y rocas, una vez más, el agua fluyó poco a poco a través del túnel de desvío derecho, hasta que se formó un nuevo sumidero sobre él, deteniendo el flujo de agua nuevamente (consulte la imagen n.º 2).



**Imagen n.º 2: Desprendimiento y sumidero en los portales del túnel de desvío**

En ese momento, los tres túneles de desvío del río (túnel principal izquierdo sellado y presellado, túnel derecho parcialmente bloqueado y GAD completamente bloqueada) estaban fuera de servicio. La cresta de la represa todavía estaba por debajo del nivel del aliviadero y la estructura del desagüe aún no estaba lista. EPM tomó la decisión de desviar el flujo a través del complejo de túneles y cavernas de la sala de máquinas, para evitar el desbordamiento de la represa y proteger a la población y la infraestructura corriente abajo del proyecto.

El 10 de mayo, para evitar el desbordamiento de la represa, EPM abrió los túneles de entrada 1 y 2, así como el 7 y el 8; esa noche el agua comenzó a fluir a través de la sala de máquinas.

Durante la mañana del 12 de mayo, el túnel de desvío derecho comenzó a funcionar repentinamente,

con un pico de descarga de 4000 a 5000 m<sup>3</sup>/s, causando algunos daños en la localidad de Puerto Valdivia. Sin embargo, esta situación no duró mucho porque, después de aproximadamente 4 horas un nuevo desprendimiento de tierra en el portal de desvío bloqueó la entrada nuevamente.

El 16 de mayo, antes del mediodía, una cantidad significativa de agua que transportaba pedazos de rocas salió del túnel de acceso de la sala de máquinas. El mismo día, salió algo de agua de otro túnel de construcción (284) ubicado en el pie de la represa.

El 17 de mayo, el túnel de fuga 3 redujo su flujo, el cual posteriormente se detuvo. Los codos de los sistemas de admisión 7 y 8, corriente arriba y corriente abajo de las tuberías forzadas de hormigón, no se completaron.

El 20 de mayo, se detuvo el flujo de agua a través del túnel de admisión 7 y 8; el 26 de mayo EPM cerró el túnel de admisión 7 y 8; pocas horas después se produjo un desprendimiento de tierra por encima de estos túneles que redujo el acceso a la zona.

El 1 de junio, se observó una reducción irregular del flujo a través de la sala de máquinas.

A principios de junio, el nivel de la cresta de la represa alcanzó una altura de 410 msnm, lo que permitió la operación del aliviadero de superficie. En ese momento, se realizaron esfuerzos intensos para elevar el nivel de la cresta de la represa a una altura de 410 msnm, para permitir que el flujo de entrada se evacuara a través del aliviadero de superficie. Ese objetivo se logró a principios de junio de 2018, y gracias a eso, la emergencia hidrológica terminó.

El 24 de junio se registró una reducción del flujo a través del túnel de desvío derecho. El 1 de julio, el 6 de julio y el 18 de julio, se registraron reducciones irregulares del flujo a través de la sala de máquinas.

### Anexo 4. Matriz de nivel de respuesta

La matriz de nivel de respuesta es una herramienta clave para el manejo de emergencias, que proporciona una guía clara para:

- Identificar una emergencia,
- Clasificarla en términos de nivel de respuesta,
- Iniciar las medidas de respuesta requeridas.

A continuación, se muestra una plantilla típica.

RESPONSE LEVEL	TYPE OF EVENT						
	Hydrological event/ Flooding	Emergency releases at upstream reservoirs	Earthquake	Excessive leakage/ internal erosion/ piping	Abnormal instrument readings	Gate failure/ power loss/ equipment failure/ fire	Sabotage/ accident
<b>Internal Alert</b> Situation can be managed internally. Outside notification NOT required	Reservoir level approaching design flood level. Outflows approaching channel capacity.	Upstream dam warns of imminent spill.	Earthquake less than DBE recorded	Excessive seepage		Failure of spillway gates	Any incident of threat of attack
<b>Response Level I</b> Conditions might lead to downstream flooding. Outside notification required	Reservoir level above design flood level, but below crest level.	Release in excess of channel capacity	Earthquake greater than DBE	Increasing rate of excessive seepage. Heavy seepage carrying fines.		-	Attack that threatens the integrity of the dam or spillway
<b>Response Level II</b> Prepare for evacuation	Reservoir level predicted to exceed dam crest level	Controlled releases likely to flood inhabited areas	Instability of dam resulting from earthquake	Seepage develops a major uncontrolled outflow		-	As above
<b>Response Level III</b> Evacuation is necessary	Overtopping imminent	As above	Integrity of dam jeopardized by earthquake	Dam collapse through piping imminent		-	As above

**Anexo 5: #Detalle Costo Ituango BID 36 meses (EPM agosto de 2108)**

Cuenta			
HSF	Proyecto Ituango		
315.00.506	CAPEX - INV M.EXT EN M. LOC/Ituango	\$ Millones	
315.00.508	CAPEX - INVERSION M. LOC/Ituango	\$ Millones	
315.00.700	CAPEX - TOTAL INVERSIONES/Ituango	\$ Millones	
<b>DETALLE INVERSIONES DIRECTAS</b>			
	Ingeniería y administración	\$ Millones	1.629.056
	Infraestructura	\$ Millones	1.794.812
	Obras principales	\$ Millones	3.397.196
	Equipos	\$ Millones	1.263.087
	Gestión ambiental y social	\$ Millones	890.942
	Conexión al STN	\$ Millones	60.375
	Tierras y servidumbres	\$ Millones	78.929
	Reajustes e Imprevistos	\$ Millones	275.000
	Inversiones post contingencia	\$ Millones	1.389.000
	<b>Total Inversiones</b>	<b>\$ Millones</b>	<b>10.778.398</b>
<b>DETALLE INVERSIONES CONTINGENCIA</b>			
	1. Obra civil	\$ Millones	369.000
	2. Equipos (recuperación y reemplazos)	\$ Millones	332.750
	3. Obligaciones Adicionales Licencia Ambiental	\$ Millones	137.250
	4. Taponamiento tunel derecho y SAD	\$ Millones	100.000
	5. Pantalla impermeable en la presa	\$ Millones	150.000
	6. Desembalse	\$ Millones	300.000
	<b>Total Inversiones Contingencia</b>	<b>\$ Millones</b>	<b>1.389.000</b>
<b>NOTAS:</b>			
* Se incluye inversión adicional por contingencia por valor \$1,39 Billones			
* Las inversiones antes de contingencia se distribuyeron a los diferentes lotes de forma proporcional con la inversión por lote de la versión del costo V144			

