

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 1 de 98	

**ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA,
HIDROGEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA RELACIONADA CON EL MACIZO
ROCOSO Y CON LA ESTABILIDAD DEL PROYECTO HIDROITUANGO**

ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS

ELABORADO POR:

Julio Fierro Morales

Geólogo MSc. Geotecnia U.N.

David Aponte Rojas

Ingeniero civil MIC Geotecnia U.N.

Eduardo Quintero Chavarría

Ingeniero civil MSc Geofísica U.N.

22 de julio de 2019

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 2 de 98	

TABLA DE CONTENIDO

ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA, HIDROGEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA RELACIONADA CON EL MACIZO ROCOSO Y CON LA ESTABILIDAD DEL PROYECTO HIDROITUANGO	1
1. CONCLUSIÓN GENERAL	4
2. ASPECTOS TÉCNICOS INICIALES Y REFERENCIAS TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS	7
2.1 NORMATIVA TÉCNICA NACIONAL	7
2.1.1 Resolución 364 de 2000. Modificada por la Res. 227 de 2006 Modificada por la resolución 110 de 2014- Por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C.-IDIGER de Bogotá DC.	7
2.1.2 Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA – Proyectos de Explotación Minera – Bogotá 2016	11
3.1 INFORMACIÓN REVISADA	15
3.1.1 Diseño	15
3.1.2 Construcción y Contingencia	15
3.2 ENTENDIMIENTO DEL PROBLEMA	15
3.2.1 Diseño	15
3.2.2 Construcción y Contingencia	33
4. NEOTECTÓNICA Y ASPECTOS DE SISMICIDAD.....	47
4.1 CANTIDAD Y CALIDAD DE INFORMACIÓN.....	47
4.1.1 Diseño	47
4.1.2 Construcción y Contingencia	47

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 3 de 98	

4.2 ENTENDIMIENTO DEL PROBLEMA	47
4.2.1 Diseño	47
4.2.2. Construcción y Contingencia	49
5. HIDROGEOLOGÍA.....	57
5.1 CANTIDAD Y CALIDAD DE INFORMACIÓN.....	57
5.1.1 Diseño	57
5.1.2 Construcción y Contingencia	58
5.2 ENTENDIMIENTO DEL PROBLEMA	60
5.2.1 Inferencias basado en los datos levantados	61
5.2.2 Diseño	65
5.2.3 Construcción y Contingencia	66
5.3 HALLAZGOS DE LOS ESTUDIOS DE HIDROGEOLOGÍA.	73
6. GEOTECNIA RELACIONADA A LA ESTABILIDAD	75
6.1 CANTIDAD Y CALIDAD DE INFORMACIÓN.....	75
6.1.1 Diseño	75
6.1.2 Construcción y Contingencia	83
6.2. ENTENDIMIENTO DEL PROBLEMA	87
6.3 HALLAZGOS DE LOS ESTUDIOS DE GEOTECNIA RELACIONADA A LA ESTABILIDAD.	91
7. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS TÉCNICO A LOS DOCUMENTOS COMO SOPORTE DE LA CONCLUSIÓN GENERAL.....	94

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 4 de 98	

1. CONCLUSIÓN GENERAL

Según el requerimiento realizado a la mesa técnica, el objetivo general del subcomité técnico es determinar si la información disponible, a la fecha es suficiente para la evaluación de la estabilidad del macizo rocoso en la zona de estudio y, de ser suficiente, parcial o totalmente, estudiarla de forma rigurosa con el objetivo de definir si el macizo rocoso en el área de influencia del estudio es estable o no.

En tal sentido, es importante destacar que todo proyecto de ingeniería se centra en el análisis de la obra puntual que se pretende realizar, de la zona donde esta se dispondrá y su área de influencia. Para el caso puntual del proyecto hidroeléctrico Hidroituango, de forma simplificada, se tiene como obra principal el cuerpo de la presa (y las estructuras complementarias a ésta como el vertedero). Esta zona comprende el macizo rocoso debajo del cuerpo de presa, el estribo derecho e izquierdo de la presa y los taludes que colindan con el embalse formado en la zona de influencia del mismo.

Así pues, con el objetivo de dar respuesta a la pregunta planteada sobre la estabilidad del macizo, es indispensable poder diferenciar el problema en 4 zonas de estudio:

- Macizo rocoso correspondiente a la cimentación de la presa
- Macizo rocoso correspondiente al estribo derecho de la presa
- Macizo rocoso correspondiente al estribo izquierdo de la presa.
- Macizo rocoso en el área de influencia del embalse.

Adicionalmente, debido a que cualquier afectación al cuerpo de la presa puede afectar de forma directa la estabilidad del macizo rocoso en el área de estudio, también se analizará la información disponible respecto a la estabilidad de la presa.

Este análisis se realiza con el objetivo de evaluar rigurosamente los documentos técnicos en cuestión, respondiendo la pregunta formulada y proyectando las posibles implicaciones que los hallazgos generen. El análisis, dado que fue requerido centrado en el macizo rocoso, contiene evaluación preliminar (no ha sido posible revisar en profundidad la totalidad de los estudios remitidos por cuestiones del corto tiempo) de aspectos de geología, geomorfología, hidrogeología, neotectónica y sismicidad y geotecnia. En dicha revisión se transcribe de manera literal en letra cursiva, para poder distinguir fácilmente la

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 5 de 98	

descripción de las observaciones hechas por el grupo de trabajo técnico de apoyo a las víctimas.

Luego de la revisión de los estudios geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y geotécnicos, **los profesionales que elaboramos el presente informe contamos con la suficiente argumentación para plantear que el macizo rocoso en el margen derecho del proyecto hidroeléctrico Hidroituango es inestable.** Los modelos utilizados en los estudios y diseños no suplen los requerimientos técnicos necesarios para brindar certeza respecto a la estabilidad del macizo y en tal sentido las obras propuestas por EPM – Hidroituango y referidas en los estudios analizados no permiten tener seguridad en relación a su correcto funcionamiento. Adicional a lo anterior, es importante anotar que el sistema que constituye el proyecto Hidroituango no ha sido exigido para condiciones por encima de las normales (hidrológicas y sísmicas) ni en condiciones extremas. No obstante, ya ha mostrado inestabilidad.

Por consiguiente, los niveles de amenaza asociada a fallas totales o parciales de las estructuras y zonas aledañas al proyecto hidroeléctrico continúan siendo altos, y no hay argumentos suficientes que permitan asegurar lo contrario, ni información respecto de las 4 zonas mencionadas que permita resolver las incertidumbres.

A día de hoy se tiene especial preocupación sobre:

- El macizo rocoso que colinda con el embalse en las zonas aledañas a la presa tanto en la margen derecha (con estudios parciales deficientes), como en la margen izquierda (sin estudios y sin disponibilidad de análisis de estabilidad de la zona).
- El comportamiento de la presa frente a aumentos de presiones de poros que pueden llevar a la falla en un evento sísmico. En los diseños entregados no se lograron identificar estructuras que permitieran el control de estas sobrepresiones.
- Sobre el alcance de los estudios de riesgos que no contemplan la pérdida de vidas y alteraciones socio-eco sistémicas ocasionadas por eventos relacionados con la falla total o parcial de las estructuras. Que es en últimas la perspectiva con que se deben acometer los estudios de estabilidad general del proyecto. No debe reducirse la determinación de la estabilidad al análisis aislado del macizo correspondiente al estribo derecho en donde se localizan las obras de captación y generación. El objeto de los análisis no es determinar las afectaciones al proyecto y de

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 6 de 98	

sus componentes sino de la integralidad del mismo con respecto a la amenaza que representa para las comunidades y el ecosistema.

Adicional a lo anterior, es importante plantear que los estudios de subsuelo no pueden brindar certeza científica absoluta, pues estamos hablando de materiales que se han conformado a lo largo de millones de años, con involucramiento de presiones de la parte más baja de la corteza (lugares a los cuales nunca ha llegado una perforación) y que el levantamiento tectónico opera también en la escala de los millones de años, razón por la cual la complejidad es inabarcable en las escalas espaciales y temporales que logramos los seres humanos. De hecho, dentro de esa complejidad geológica, quizá el aspecto de mayor dificultad para el modelamiento son las fracturas, elementos fundamentales a su vez para el modelamiento de los macizos rocosos. Las fracturas son justamente discontinuas, tienen un comportamiento no lineal y pueden enmarcarse dentro de patrones de fractalidad. Si a esa complejidad, se le suma la de los fluidos dentro de ellas, el comportamiento puede llegar a ser caótico, tal como lo han establecido eminentes conocedores de los medios fracturados como Ingraffea, profesor emérito de la Universidad de Cornell.

A pesar de lo anterior, es necesario realizar estudios para reducir la incertidumbre o para plantear en escenarios muy complejos que las certidumbres no son suficientes para la toma de decisiones y apelar al principio de precaución.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 7 de 98	

2. ASPECTOS TÉCNICOS INICIALES Y REFERENCIAS TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS

2.1 Normativa Técnica Nacional

Las normativas de carácter técnico recogen el estado del arte del conocimiento técnico que verse respecto a diferentes materias y por ello consideramos pertinente incluir este numeral como demostración que para la fecha de realización de los estudios de diseño del proyecto Hidroituango Sí existía un estado del arte que permite confrontar los contenidos técnicos de los estudios presentados con las exigencias en otros lugares del país.

Si bien actualmente Colombia no cuenta con una normativa específica la cual contenga los mínimos requeridos de información primaria, secundaria y análisis que conduzcan a los estudios de detalle de presas (en el contexto de proyectos de generación eléctrica).

No obstante, técnicamente, es importante referir tres normas vigentes las cuales pueden dar contexto de estos mínimos.

2.1.1 Resolución 364 de 2000. Modificada por la Res. 227 de 2006 Modificada por la resolución 110 de 2014- Por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C.-IDIGER de Bogotá DC.

Si bien la resolución 364 de 2000 ha sido modificada, no hay modificaciones técnicas respecto a la exigencia de estudios básicos. El objeto de la resolución es el siguiente:

Prevenir la ocurrencia de daños que afecten la habitabilidad, funcionalidad y confiabilidad estructural de nuevas edificaciones o de las existentes, así como de la funcionalidad y permanencia de la infraestructura nueva y existente de servicios públicos, de vías, etc., que pueda verse afectada por el desarrollo propuesto, como resultado de la reactivación de fenómenos de remoción en masa existentes o el desencadenamiento de otros nuevos, por medio de:

- i. La identificación y evaluación de la amenaza por eventos de esa naturaleza en el sitio del nuevo desarrollo urbanístico o construcción y en su área de influencia.*
- ii. El diseño de un plan de medidas de prevención y mitigación, complementadas con la formulación de planes de seguimiento y*

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 8 de 98	

monitoreo, de acuerdo con las características de los fenómenos. Todo ello deberá garantizar la seguridad de las edificaciones en análisis durante un período de exposición no menor a 50 años, mediante acciones y obras de estabilización que deberá ejecutar el responsable del proyecto con carácter obligatorio.

Tampoco ha habido modificación en el numeral 3.2.1 (Estudios Básicos), el cual presenta los requerimientos básicos de los estudios y de información previa a los análisis y niveles de detalle para el desarrollo de los estudios:

2.1.1. Geología

Se realizará el levantamiento geológico, utilizando una base cartográfica a escala 1:1000 ó 1:500 y con curvas de nivel cada 1.0 metro como mínimo, el cual deberá acompañarse de una descripción geológica que contemple la siguiente información:

i. Estratigrafía

Descripción litológica, referencia de edad y origen, espesor, distribución y posición en la secuencia de las distintas unidades litológicas en el área de estudio.

Teniendo en cuenta el nivel de detalle, la geología se debe realizar en unidad de roca, preferiblemente asociándola a la formación a la que pertenece.

ii. Geología Estructural

Identificación de fallas (locales y regionales, si las hay), estructuras anticlinales y sinclinales, y diaclasas cuando se trate de un macizo rocoso, en especial con afloramientos en el área de estudio y establecer la diferenciación de bloques estructurales.

El responsable del estudio deberá complementar la información anterior con planos en planta, secciones transversales y elementos geológicos de carácter regional, si éstos son esenciales para la conformación del modelo geológico-geotécnico local.

3.2.1.2. Geomorfología

Se efectuará una caracterización de las geoformas y de su dinámica en el área de estudio, considerando la génesis de las diferentes unidades y su evolución.

De manera precisa serán cartografiados los procesos, con énfasis en los de remoción en masa y erosión. Se efectuará un análisis multitemporal que permita evaluar la dinámica de dichos procesos, considerando como mínimo dos fechas (actual y 20 ó 30 años atrás). El levantamiento geomorfológico con énfasis en la localización de los procesos de inestabilidad por remoción en masa identificados será trabajado y

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 9 de 98	

presentado sobre una base cartográfica a escala 1:1000 ó 1:500, con curvas de nivel cada 1.0 metro como mínimo.

3.2.1.3. Hidrogeología

El estudio deberá determinar y evaluar las condiciones del agua subsuperficial en condiciones normales y extremas más probables en el período de análisis del proyecto, esto es 50 años.

Este estudio se hará a partir de un análisis de las características:

- i. Topográficas del terreno*
- ii. De uso actual*
- iii. De textura de los materiales presentes (depósitos, suelos residuales, rocas) y sus rasgos macroestructurales y/o de fracturamiento.*
- iv. Climatológicas y pluviométricas del área.*
- v. De los resultados de las observaciones y mediciones pertinentes (niveles de agua, niveles piezométricos) durante la etapa de investigación y exploración de campo.*

Como conclusión del análisis del marco hidrogeológico del área, el estudio fijará los parámetros correspondientes a:

- i. Posición(es) de niveles de agua o factores ru (relación presión de poros/esfuerzo total vertical) en condiciones normales.*
- ii. Posición(es) de niveles de agua o factores ru en condiciones extremas de lluvias críticas y el período de recurrencia de esta situación.*

Finalmente, el estudio hidrogeológico fijará los criterios para definir y diseñar el tipo de medidas de drenaje que mejor se adecuen a los rasgos hidrogeológicos y topográficos del sitio y que harán parte del plan de obras de prevención y estabilización, estableciendo el rango de eficacia de las mismas en términos de su efecto sobre los parámetros iniciales (niveles de agua o factores ru), valores que se tendrán en cuenta en los análisis requeridos en el numeral 3.8 de esta Resolución.

3.2.1.4. Evaluación del Drenaje Superficial

El estudio deberá incluir una evaluación hidrológica e hidráulica del drenaje superficial, tanto natural como artificial (sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial) dentro de la zona de influencia del proyecto, de manera de establecer su posible incidencia en los fenómenos de remoción en masa que afectan el área o que se podrían generar.

Cuando se presenten ríos, caños, quebradas o canalizaciones dentro de las áreas de estudio, sus zonas de ronda y no intervención serán marcadas en los planos correspondientes de zonificación, a la luz de la información

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 10 de 98	

expresamente solicitada por el interesado a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB SA ESP sobre el particular y cuya documentación deberá anexarse al estudio.

3.2.1.5. Sismología

Las condiciones de amenaza sísmica a utilizar serán las obtenidas de la aplicación de los resultados del estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá 1997 para el sitio de interés, o la que resulte aplicable a la luz de las modificaciones que en la normatividad se introduzcan progresivamente y que estén vigentes al momento de un estudio específico.

Se tomará el valor de aceleración máxima (A_m) correspondiente para un período de análisis de 50 años y una probabilidad de excedencia no mayor al 10%.

La resolución tiene en cuenta la complejidad de las unidades de roca y suelo que se pretenden caracterizar y estudiar y en tal sentido propone en el numeral 3.3.3 (Exploración Geotécnica):

(...) Para la exploración geotécnica se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- i. Deberá contarse como mínimo con un **sondeo por cada 1500 m²** de área de terreno, su ubicación deberá justificarse en términos del adecuado cubrimiento de las áreas de interés, incluyendo el área de influencia definida en la FASE I del Estudio. La exploración deberá soportar adecuadamente el modelo geológico-geotécnico de cada sector o zona de interés.*
- ii. Cuando los mecanismos de falla consecuentes con el modelo geológico-geotécnico propuesto permitan inferir la ubicación más probable de las superficies o zonas de falla, más de 2/3 de las exploraciones realizadas deberán llevarse como mínimo tres metros por debajo de dichos rasgos.
*De no ser viable una aproximación como la anterior, la profundidad de al menos 2/3 de las perforaciones deberá involucrar todos los materiales de interés para el estudio, de acuerdo con el modelo geológico-geotécnico propuesto, según el numeral 3.3.2.**

La resolución entiende que la caracterización de la amenaza es uno de los componentes del análisis y que se requieren análisis de vulnerabilidad física y de riesgo para que las medidas planteadas estén de acorde con la importancia o magnitud del proyecto. Así es como la resolución desarrolla los numerales 3.4 (Análisis de estabilidad-Evaluación de Amenaza), 3.5 (Evaluación de la Vulnerabilidad Física), 3.6 (Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 11 de 98	

masa), el numeral 3.7 (plan de medidas de reducción de riesgos) y el numeral 3.8 (Evaluación de la condición de amenaza con medidas de mitigación).

Destacando la importancia de estos cinco numerales, el 3.8 resume el resultado final al que se quiere llegar en los análisis, el cual se modificó en la Resolución 227 de 2006 y cuyos criterios no han sido modificados por la resolución Idiger 110 de 2014. La amenaza establecida por la Resolución 227 de 2006 son los siguientes:

(...) 3.8. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE AMENAZA CON MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Los diseños básicos de las obras se deberán respaldar con los análisis que demuestren que con el plan de obras de mitigación y control propuesto se logra que la condición de amenaza por eventos de remoción en masa se ajusta a los siguientes criterios de admisibilidad:

<i>Nivel de Amenaza</i>	Cond. Normales - FS
<i>Amenaza Baja</i>	> 1.9
	Cond. Extrema - FS
<i>Amenaza Baja</i>	> 1.30

Para esta evaluación se deberá conservar la misma metodología de evaluación utilizada en la evaluación del numeral 3.4

2.1.2 Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA – Proyectos de Explotación Minera – Bogotá 2016

En el numeral 5.1.7 Geotecnia se indica que para el área donde se implantarán las obras y actividades del proyecto se debe presentar la siguiente información: Estudio de amenaza sísmica, teniendo en cuenta las normas de sismoresistencia vigentes NSR-10¹ o la que las remplace o modifique. En caso de que existan estudios locales de microzonificación sísmica, éstos deben ser considerados en el estudio.

¹ Decreto 926 del 19 de marzo de 2010, modificado por el Decreto 092 de 2011, por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes NSR-10. Bogotá, D. C.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 12 de 98	

(...) La Geotecnia debe evaluarse en tres vías diferentes para el proyecto minero:

- 1. Geotecnia para las áreas de influencia de las obras subterráneas. (contornos del macizo), en el caso de minería subterránea*
- 2. Geotecnia para las áreas de influencia de las labores mineras a cielo abierto, incluyendo los frentes de explotación, zonas de depósitos, presas, áreas industriales, etc.*
- 3. Geotecnia para los corredores de las vías de acceso (en superficie).*

Por lo anterior, los análisis que se realicen deben contemplar lo siguiente:

- 1. Geotecnia obras subterráneas: Con base en los análisis cinemáticos y la caracterización geológica local de los túneles, pozos, inclinados, etc, se debe hacer la respectiva caracterización geotécnica identificando los diferentes niveles de estabilidad de las excavaciones en función de la probabilidad de falla por caída de cuñas, abombamiento u otros procesos que impliquen redistribución de esfuerzos posterior a la construcción del túnel.*
- 2. Geotecnia áreas de influencia de las labores mineras a cielo abierto: conjugar cartográficamente las variables de geología, sísmica geomorfología, suelos de ingeniería, hidrología y meteorología, entregando como resultado la homogenización de polígonos en cuanto al grado de estabilidad de los suelos y susceptibilidad por procesos morfodinámicos e hidrodinámicos. Para el suelo de fundación de presas de relaves (en el caso de metales), el análisis debe incluir lo referente a la condición geológico estructural y la situación sísmica local e igualmente los análisis de estabilidad Global en condición estática y pseudoestática de los taludes de empotramiento de la presa.*
- 3. Geotecnia para corredores de acceso: conjugar cartográficamente las variables de geología, sísmica geomorfología, suelos de ingeniería, hidrología y meteorología, entregando como resultado la homogenización de polígonos en cuanto al grado de estabilidad de los suelos y susceptibilidad por procesos morfodinámicos e hidrodinámicos. El análisis debe incluir los respectivos análisis de estabilidad en condición estática y pseudoestática de los taludes de corte y rellenos que se realicen en las vías a media ladera.*

La evaluación de la amenaza se debe realizar para la situación actual, bajo las condiciones normales y extremas de niveles de agua y de sismo a las que podrá estar expuesta el área de estudio. La aceleración crítica a ser considerada en los análisis de tipo pseudo-estático no podrá ser menor a 2/3 de la aceleración máxima (Am), debidamente justificada.

En la evaluación de la amenaza para la condición más extrema se elaborarán y presentarán mapas de amenaza en escala adecuada que permita realizar la correspondiente lectura y curvas de nivel en lo posible cada 1.0 m, clasificando el área con base en los siguientes criterios:

Grado de amenaza	Condiciones normales FS	Condiciones extrema (500 años) FS
<i>Amenaza Baja</i>	>1.9	>1.9
<i>Amenaza Media</i>	1.2 – 1.9	1.2 – 1.9
<i>Amenaza Alta</i>	<1.2	<1.0

La información geotécnica se debe presentar en planta y perfil en escala 1:5.000 o más detallada, considerando siempre que se debe brindar la suficiente claridad, ilustración y comprensión de las condiciones geotécnicas evaluadas.

Se debe presentar la metodología utilizada para realizar la caracterización geotécnica, incluyendo las conclusiones obtenidas a partir de los análisis geotécnicos realizados como parte de la línea base del proyecto. Las condiciones sísmicas deben estar descritas adecuadamente en particular cuando el proyecto incluya depósitos de relave (presas o embalses).

Se deben desarrollar los ítems necesarios para garantizar la estabilidad física de los taludes definitivos y depósitos o botaderos, y la estabilidad frente a la ocurrencia de procesos de remoción en masa en la etapa de cierre y rehabilitación, para lo cual se utilizarán métodos de análisis y cálculo de reconocida validez aplicables a los mecanismos de falla que han sido identificados.

Con base en lo definido a través del análisis de estabilidad geotécnica, se presentarán los diseños finales de conformación del terreno. La evaluación de la estabilidad geotécnica para la etapa de C&R minera debe incluir los siguientes escenarios:

- Situación de cierre, bajo las condiciones normales y extremas de niveles de agua y de sismo a las que podrá estar expuesta el área de estudio. La aceleración horizontal (Ah) considerada en los análisis de tipo pseudo-estático no podrá ser menor al 50% de la aceleración máxima esperada en roca (Am = PGA), debidamente justificada. El sismo con el cual debe realizarse este análisis corresponde al Sismo de Operación con un período de retorno no menor a 50 años.*
- Situación post-cierre, bajo condiciones normales y extremas. Se entiende por condición extrema, un fenómeno inusual que puede experimentar los taludes y laderas de la mina como lo son: (1) aumento del nivel freático y saturación*

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 14 de 98	

de la masa de suelo por la ocurrencia de lluvias extremas o (2) sismo. No es necesario evaluar la estabilidad bajo la superposición de los dos eventos extremos anteriores. El sismo con el cual debe realizarse este análisis corresponde al Sismo Máximo de Diseño con un período de retorno no menor a 475 años.

Adicionalmente, en el caso de taludes definitivos, se deben realizar análisis de estabilidad a escala local (a nivel de bancos entre bermas) y a escala global del talud (“overall”).

Como se ve, en los criterios de la ANLA para taludes mineros, los valores de amenaza baja, al igual que en Bogotá, son factores de seguridad mayores de 1,9. Con estos criterios, que se puede observar que son aceptados por autoridades de diverso orden, enmarcaremos nuestras observaciones a ese respecto, en el entendido que los taludes en un proyecto hidroeléctrico, y particularmente en adyacencias a una zona embalsada ubicada aguas arriba de poblaciones ribereñas donde habitan miles de personas, deben corresponder a criterios exigentes de seguridad, correspondientes a amenaza baja ante movimientos en masa.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 15 de 98	

3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

3.1 Información revisada

3.1.1 Diseño

Para este ítem se revisó el estudio de DISEÑO DETALLADO/ITUANGO/D-PHI-CCE-ADM C0314. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA elaborado por Hidroeléctrica Ituango – Integral Solingral el 30 marzo 2010 y la EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL COMPONENTE ABIÓTICO DEL EXPEDIENTE LAM 2233 DEL PROYECTO HIDROELÉCTRO ITUANGO elaborado por la Corporación Geoambiental Terrae en agosto de 2017.

3.1.2 Construcción y Contingencia

Para este ítem se revisó el estudio DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO CONTINGENCIA. EPM – INTEGRAL. INFORME GEOLOGÍA Y GEOTECNIA I-I-2194-062018-01-R2 entregado en enero de 2019.

3.2 Entendimiento del problema

3.2.1 Diseño

DISEÑO DETALLADO/ITUANGO/D-PHI-CCE-ADM C0314

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA.

Hidroeléctrica Ituango – Integral Solingral

30 marzo 2010

2.5.1 Litología

A continuación se presenta una descripción de las principales unidades litológicas encontradas en zona del embalse, de acuerdo a su origen y en orden de antigüedad (ver Plano D-PHI-012- GEN-GE-B-010):

2.5.1.1 Rocas Metamórficas del Paleozoico

Corresponden a unidades originadas durante eventos tectónico-metamórficos durante el Paleozoico en la cordillera Central. Tienen un origen netamente regional y variaciones de metamorfismo desde grado muy alto hasta medio. Se incluyen las siguientes unidades:

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 16 de 98	

• Gnéis (Pznl, Pznl). Conjunto de gneises cuarzofeldespáticos (Pznl) y aluminicos (Pznl), con una estructura que varía entre esquistosa, gnéica y migmatítica; plegados y con diferenciaciones mineralógicas y texturales debido a la variabilidad del metamorfismo y a la heterogeneidad de los sedimentos originales. Un cuerpo de estos gneises corresponden a la unidad litológica sobre la que se desarrollarán las obras del proyecto.

• Esquistos (Pze). Se localizan intermitentemente a lo largo de la zona de influencia del embalse, al sur en Santa Fe de Antioquia, y en el centro y norte, desde los alrededores del caserío de Orobajo hasta la quebrada Sardinias. Los esquistos presentan intercalaciones de diferentes composiciones, encontrándose cuarzo sericíticos, cloríticos, y grafitosos, en orden de decrecimiento en cuanto a sus propiedades geotécnicas. Las relaciones de éstos con los cuerpos ígneos son en general de tipo intrusivo, mientras que con los gneises es de tipo gradacional a normal, como en cercanías a la zona de la presa. Sobre estas rocas, en las zonas de inundación del embalse, se han desarrollado zonas de alteración, que se caracterizan por un incremento en el grado de fracturamiento, en la oxidación y meteorización de los macizos. El desarrollo de suelos residuales es escaso, con espesores inferiores a los 10 m.

(...)

El párrafo subrayado es todo lo que un documento denominado geología incluye sobre los materiales geológicos rocosos sobre los que se va a desarrollar el proyecto. En el caso de lo que denominan gneises, se trata de todas las rocas a ser excavadas para las infraestructuras subterráneas. Sobre los esquistos se desarrollan las laderas de la zona de embalse. Como es evidente, acercarse al conocimiento de los materiales rocosos es importante para disminuir la incertidumbre sobre los materiales excavados o que van a ser cargados con eventos como oleaje, ascenso del nivel freático, etc. para las laderas del embalse.

La descripción, que refleja lo anotado en estudios de 2010 es muy incompleta, pues no incluye aspectos que van a ser útiles para disminuir la incertidumbre sobre los materiales excavados, tanto en términos de estabilidad como de las eventuales transformaciones que pueden sufrir por la entrada de aire a un sistema que previamente a las excavaciones funcionaba en ausencia del oxígeno del aire. No existen reportes en los estudios previos a la construcción sobre petrografía, mineralogía, caracterización de minerales arcillosos, contenido de sulfuros, entre otros, pero en relación con la ingeniería del proyecto.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 17 de 98	

2.5.2 Marco tectónico

Como se mencionó en el numeral 2.3, el cañón del río Cauca coincide con una importante sutura regional en la que convergen los ambientes de origen marino de la cordillera Occidental y continental de la cordillera Central. La principal estructura de la zona la constituye el sistema de fallas Cauca-Romeral, que atraviesa el país de sur a norte, pero que se encuentra segmentado localmente en numerosas fallas de menor recorrido. Entre éstas cabe mencionar:

- Falla Cauca W. Falla de orientación general norte-sur, inversa de alto ángulo, con buzamiento desde 80°E, hasta verticales. Observable en Bolombolo, Liborina y más hacia el norte se confunde con las fallas de Sabanalarga. Cruza terrenos constituidos por los esquistos y anfibolitas del paleozoico, y por los sedimentos del Terciario.*
 - Falla Sucre. Falla de orientación general N35°W, que se desprende de la falla de Romeral, con buzamiento mayor de 65° al Este y con el bloque oriental cabalgando sobre el occidental. Afecta terrenos de esquistos del paleozoico, rocas volcánicas del cretáceo, rocas ígneas del Batolito de Sabanalarga y sedimentos del Terciario. Cruza al este de la población de la que toma su nombre.*
- (...)

Al igual que en el caso de los materiales geológicos a ser sometidos a diferentes tipos de carga por el proyecto, la descripción sobre fallas geológicas es completamente precaria. No se incluye el tipo de falla o si ello existe, se encuentran contradicciones no solucionadas ni expuestas como incertidumbre (fallas geológicas de tipo inverso pero de alto ángulo como se describe la Falla Cauca W viola las consideraciones básicas de la mecánica de rocas). Esta falta de acercarse al entendimiento de las fallas se reflejará en todo el desconocimiento de la complejidad del fracturamiento de los macizos rocosos.

No obstante, se esperaría que en desarrollo de los estudios más localizados, y por lo tanto, más detallados se tuvieran consideraciones que disminuya la incertidumbre, pero la lectura de los numerales de los estudios locales (los enfocados a la zona de proyecto) tampoco disminuyen la incertidumbre:

2.6.2 Geología Local

Las obras serán construidas en su totalidad en paragneises cuarzo feldespáticos, localmente de textura esquistosa, cubiertos en ocasiones

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 18 de 98	

por coluviones en las vertientes y por un depósito aluviotorrencial sobre la vertiente derecha del cañón, frente a la desembocadura del río Ituango. La geología de los sitios de obra y la localización de la exploración, se presentan en el plano D-PHI-012-GEN-GE-B-020.

2.6.2.1 Roca.

Los gneises, dado su protolito sedimentario, presenta una alta variabilidad textural en distancias muy cortas. Se encuentran desde rocas grueso granulares de bandas decimétricas que intercalan cuarzo y feldespato con bandas de biotita y anfíboles; hasta láminas milimétricas de grano fino con intercalaciones similares (ver análisis petrográficos en anexo 3).

La foliación del gneis tiene rumbo paralelo al tren estructural regional N-S, con buzamiento general entre 20o y 30o E, aunque se presentan repliegues locales, que evidencian una amplia historia de afectaciones tectónicas; a nivel de muestra de mano se pueden apreciar repliegues milimétricos, mientras que a nivel de afloramiento se presentan pliegues de gran apertura, que sin embargo no afectan por grandes extensiones la tendencia general de buzamiento Este.

La tendencia regional de la foliación influencia directamente el relieve del cañón, pues la ladera izquierda se encuentra más tendida debido a su posición relativa desfavorable, mientras que la ladera derecha genera mayor resistencia a los agentes formadores del relieve debido a su contrapendiente estructural. La disposición de las estructuras también explica entonces la presencia de bloques rocosos rodados en la ladera izquierda, obedeciendo a la acción combinada de la denudación y la fuerza de la gravedad.

Estos tres párrafos son todo lo que consideró EPM – Hidroituango como suficientes para describir los materiales rocosos que iban a soportar tanto la mayor parte de los cortes en ladera como todas las excavaciones subterráneas. Por supuesto, no es aceptable este desconocimiento en términos de mineralogía, transformaciones con la meteorización, minerales arcillosos que se forman por alteración a partir de los minerales originales, la variación de la foliación, la cuantificación de las orientaciones de los replegamientos, entre otros.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 19 de 98	

2.6.2.2. Sobrecapa de meteorización

En este numeral, al horizonte III se le llama “Roca completamente sana” lo cual también evidencia una gran confusión conceptual, pues la roca sana es la que no tiene fracturas, que obviamente NO es el caso de los materiales geológicos de la zona del proyecto.

También anuncian que la falla Mellizos influencia de una manera fuerte la resistencia geomecánica del macizo rocoso y que por ella, “el corredor de pobres características” ha sido “ampliamente estudiado”:

Hacia las partes intermedias y altas de los flancos del cañón aumenta el espesor de la sobrecapa de meteorización, de acuerdo a los horizontes descritos. El espesor de la roca meteorizada y fracturada aumenta notoriamente en los alrededores de la falla Mellizos, como lo han evidenciado las perforaciones ejecutadas. Allí se pueden encontrar hasta 100 m de roca con RQD menor del 20% y con relleno de suelo en sus discontinuidades. Tal corredor de pobres características geomecánicas ha sido ampliamente estudiado dada su influencia en la parte alta de los taludes del vertedero.

No obstante, veremos a continuación que las descripciones de las fallas son casi inexistentes, pues en el estado del arte al respecto es necesario incluir al menos su dirección, inclinación, sentido, desplazamiento, actividad, volumen o espesor de afectación, arquitectura (cartografía) en planta y profundidad (incluyendo caracterización de su zonificación en núcleo de falla y zona de daño), los cambios en las características del macizo rocoso y de la hidrogeología por su influencia.

A pesar de lo anterior, la descripción de fallas, que luego se supo eran fundamentales para el entendimiento del macizo rocoso, es omisivo y deficiente (se transcribe la totalidad del numeral respecto a fallas en la zona del proyecto, destacando en subrayado la descripción de la Falla Tocayo, a manera de ilustración):

2.6.3 Características estructurales

La principal característica estructural del macizo rocoso la constituye los planos de debilidad generados por la foliación, de tendencia general N10°-30°E / 15°-30° SE, aunque ocasionalmente y por procesos puntuales tales como plegamiento, el buzamiento varía.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 20 de 98	

Además de ser el principal sistema de diaclasas, esta estructura ha permitido la liberación de esfuerzos que se han traducido en zonas de cizalla paralelas a los mismos, las cuales se encuentran, de manera aleatoria y con muy diversas persistencias, a todo lo largo de las vertientes estudiadas, y se caracterizan por su escaso espesor centimétrico y pinchamiento súbito, por lo que no se correlacionan de perforación a perforación cuando aparecen en éstas.

Durante el desarrollo de los estudios de diseño detallado fueron refinados los datos estructurales, con un programa intensivo de levantamientos superficiales. Se encontraron los siguientes sistemas predominantes:

- El sistema estructural de discontinuidades corresponde a la foliación. Este sistema es el de mayor continuidad, menor espaciamiento promedio y mayor persistencia. La rugosidad varía con la textura, cuando compromete material de grano fino es lisa, mientras que en sectores grueso granulares es rugosa, en ambos casos desde planar hasta ondulada.*
- Un sistema con dirección NS con buzamientos subverticales, siempre convergiendo hacia el río Cauca. Este sistema define las paredes del cañón y controla el cauce del río.*
- Un sistema de menor importancia presenta dirección este - oeste con buzamientos verticales a subverticales, y sirve de control de los cauces y caños del sector: quebrada Tenche, Burundá, y otros menores.*
- Un sistema con dirección NS y buzamiento 60° W que controla la caída de bloques en la margen derecha del río.*

La continuidad a todo lo largo del macizo de los anteriores sistemas de discontinuidades, se ha estudiado por medio de exhaustivos levantamientos sistemáticos sobre todos los afloramientos disponibles.

Desde el trabajo de factibilidad (Integral, 1982), se registra en los mapas geológicos la presencia de un par de fallas menores de alto ángulo, aflorantes sobre la margen derecha y transversales a la dirección del río. Presentan las siguientes características:

La falla Tocayo es una falla que cruza la foliación, con una disposición aproximada general N70°W/65°SW y un espesor que varía entre 1 y 3 m; su expresión geomorfológica es baja a moderada y aflora en varios sitios del caño del cual toma su nombre.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 21 de 98	

La falla Los Mellizos cruza la foliación, con disposición general N50°-70°E/60°-70°SE y se reconoce en varios sitios del cauce de la quebrada de la cual toma su nombre, con un espesor entre 3 a 10 m de cizallamiento directo. Su expresión geomorfológica es mayor que la de la falla Tocayo,

En la galería 3 sobre la abscisa 400 m fue interceptada una falla que coincide con la tendencia y características estructurales de la cizalla en superficie de la falla Tocayo, de unos 3 m de espesor. Como medida de tratamiento en la excavación para este nivel exploratorio, bastó con un entibado en madera. Unos 60 m más delante de la misma galería, aflora una segunda falla, correlacionable con la falla Mellizos, con unos 5 m de espesor, sobre la que se hizo un nicho para la ejecución de la perforación PI-CM-PI-1, la cual sólo pudo avanzar 94 m de profundidad durante los cuales registró un muy intenso fracturamiento de la roca y un bajo porcentaje de recuperación, aunque sin presencia de lisos de falla en el material recuperado. Esta vez, el nicho se estabilizó con pernos y malla.

Estos resultados parciales indicarían que la Falla Mellizos se verticaliza en profundidad, por lo que se hace muy importante esperar su interceptación con las galerías que actualmente avanzan por cotas inferiores (galerías 2 y ramal galería B).

Cuando se proyecta a superficie la traza de la falla Mellizos, luego de abandonar el cauce que controla y adentrarse en la vertiente derecha del río Cauca, el corredor alrededor de la misma presenta una zona donde el fracturamiento y meteorización del macizo aumenta en espesor respecto a los promedios que se tienen a todo lo largo de la zona del proyecto. Al parecer el relajamiento del macizo posterior a la profundización del cañón, afectó con mayor intensidad los alrededores de la falla Mellizos. La identificación de este corredor, de unos 100 m de amplitud y que se va estrechando en profundidad, ha sido posible gracias al programa de perforaciones, pues no tiene asociadas características geomorfológicas o de afloramientos superficiales que permitieran intuirlo en las anteriores etapas de los estudios. Adicionalmente, se llevó a cabo un programa de líneas de refracción sísmica para que, junto a la exploración directa, permitiera reconocer mejor las características de esta zona y por ende su modelación para el adecuado diseño de los taludes del vertedero y de soporte de la caverna de casa de máquinas.

Evidentemente EPM – Hidroituango no sabía, ya para su etapa final de diseño, si las fallas geológicas se cruzaban con sus galerías, pues menciona que habría

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 22 de 98	

“que esperar” que la falla Mellizos interceptará las galerías y no hay mención al respecto de la falla Tocayo. Si hicieron exploración directa e indirecta (de ésta no hay mención en los estudios revisados y de aquella consideramos que fue muy insuficiente y poco usada) para definir las fallas geológicas, la revisión de los estudios que hizo Terraes en 2017 (antes de que se hicieran públicas las deficiencias y los desastres) ya determinaba su insuficiencia.

Posterior a esta descripción incompleta de las fallas geológicas, donde la omisión es inaceptable pues ya habían definido su importancia en los aspectos de resistencia del macizo, no hay nada respecto a las fallas geológicas con posterioridad. Y no solamente se trata de la resistencia para establecer la viabilidad del proyecto, sino también las bases para establecer la amenaza sísmica en la zona, detallando el contexto que brindan los estudios del orden nacional, como los Mapas de amenaza que ha generado el Servicio Geológico. Los sismos son uno de los detonantes que se usa para el análisis de estabilidad.

De hecho, en los mapas geológicos anexos, las fallas geológicas son expresadas como líneas, sin definir tampoco allí el tipo de falla. Tampoco se presentaron para la obtención de licencia ambiental mapas y perfiles geológicos detallados que permitieran observar, además de los perfiles de meteorización, las características del macizo rocoso ni aspectos de arquitectura de las fallas en planta y perfil para definir los volúmenes de materiales brechados (molidos por la acción de la falla) ni las zonas de daño (rocas intensamente fracturadas por acción de la falla)

La incertidumbre de la falta de conocimiento del medio natural intervenido por el proyecto no puede ser disminuida en el caso del fracturamiento tectónico, entre el cual se incluyen las fallas geológicas.

5 ANÁLISIS GEOTÉCNICOS

5.1 ESTRATIGRAFÍA DEL MACIZO ROCOSO

A partir de mapeos geológicos de superficie y de la extensa campaña exploratoria realizada en la zona, se han definido los perfiles de meteorización del terreno.

Los perfiles de meteorización se han descrito mediante la metodología propuesta por Deere & Patton, 1971, los cuales se ilustran de la Figura 5-1 a la Figura 5-3.

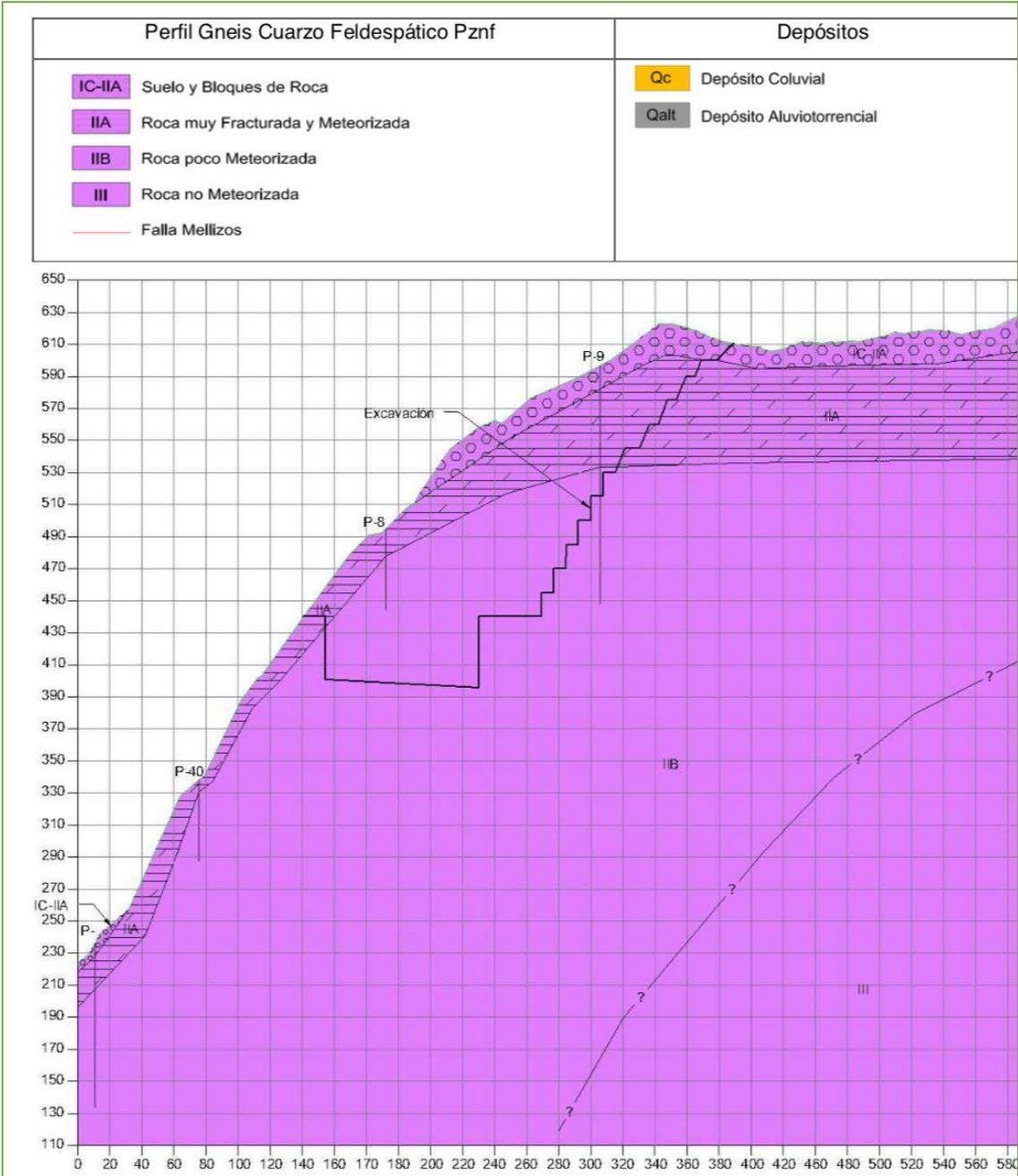
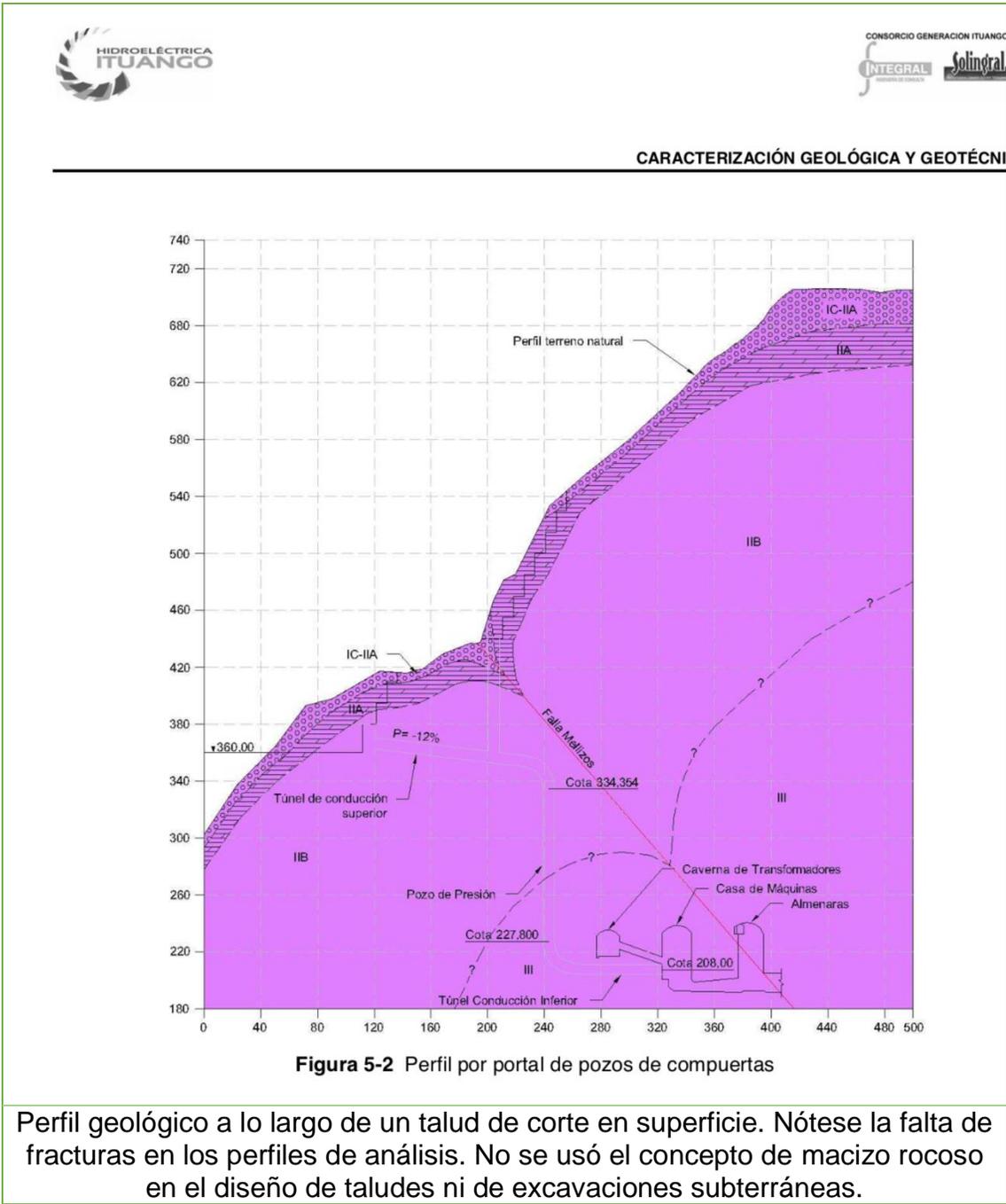


Figura 5-1 Perfil por el corte más alto del vertedero

Perfil geológico a lo largo de un talud de corte en superficie. Nótese la falta de fracturas en los perfiles de análisis. No se uso el concepto de macizo rocoso en el diseño de taludes.



CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 25 de 98	

La meteorización o intemperismo es un proceso natural en el cual las rocas expuestas a los agentes ambientales (aire, agua, sol, etc.), es decir a la intemperie, cambian sus características mineralógicas, lo cual se expresa en cambios de resistencia de los materiales. Al final del proceso, las rocas (generalmente duras) se transforman en suelos (blandos), que se denominan residuales. Obviamente es útil expresar los materiales a intervenir en términos de los materiales en función de la meteorización y por ello los perfiles y modelos que se observan en este y otros estudios tienen tipologías que van del I (suelos) al III (roca fresca). No obstante, los materiales III -roca fresca- y IIB -roca poco meteorizada- (e incluso IIA, roca meteorizada) deben ser descritas en función del fracturamiento en el contexto de lo que es un macizo rocoso.

El macizo rocoso es la suma de masas rocosas (no meteorizadas) y las discontinuidades que lo afectan. Las masas rocosas son la roca sin fractura y se describen en función del tipo de roca, los minerales que las componen, su cementación y sus características de resistencia. Las discontinuidades incluyen, en el caso de las rocas metamórficas que interesan en Hidroituango, la foliación (superficies formadas por la alineación o el aplastamiento de cristales causado por grandes presiones en las profundidades de la corteza terrestre) y las fracturas, que su vez incluyen fallas (fracturas con desplazamiento a lo largo del plano) y diaclasas (fracturas sin desplazamiento).

Los estudios para el diseño consideran el perfil de meteorización pero consideran todos los niveles de roca sin fracturas, lo cual es absolutamente omisivo cuando se trata de estudiar el comportamiento de las rocas ante cargas como el corte de taludes y las excavaciones subterráneas que incluyen galerías, casas de máquinas y túneles viales entre otros. Si bien se llamó la atención respecto a la falta de estudio de fallas geológicas (Terra, 2017) en la fase de diseño hoy sabemos por los estudios de EPM que las fracturas, y particularmente las fallas geológicas (que incluyen las zonas de cizalla) son la principal causa de los problemas del proyecto en lo que a estabilidad se refiere.

5.5.5 Resultados del diseño

En los siguientes numerales se hace una breve descripción de las obras, la descripción detallada se puede ver en el manual de características de cada sitio en particular. Dadas las características geológico-geotécnicas particulares de la casa de máquinas y almenaras, se hace una descripción más detallada.

- *Sistema de desviación del río*

Los túneles son de 830 m y 1000 m de longitud aproximada. Los dos túneles con sección hidráulica de 14 m de ancho, hastiales verticales de 7m de altura y bóveda de 7 m de radio. La cota de piso a la entrada y salida de los túneles se tiene prevista a 219 y 215 msnm, respectivamente.

Tabla 5-12 Soporte sistema de desviación

Túnel de Desviación (Sección 7x14)	
Soporte Tipo	Q (GSI)
I	Q>10 (GSI>65)
II	2<Q<10 (56<GSI<65)
III	Q<2 (GSI<50)

Túnel de Desviación (Sección 14x14)	
Soporte Tipo	Q (GSI)
I	Q>30 (GSI>75)
II	4<Q<30 (56<GSI<75)
III	Q<4 (GSI<56)

En zonas de presencia de depósito aluviotorrencial se utilizará para el tipo de soporte el rango indicado en la Tabla 5-13.

Tabla 5-13 Soporte depósitos aluviotorrenciales

Depósito Aluvio-Torrencial (Sección 14x14)	
Soporte Tipo	Q (GSI)
I	Q>10 (GSI>65)
II	2,5<Q<10 (52<GSI<65)
III	Q<2 (GSI<52)

Los parámetros Q y GSI fueron concebidos y son utilizados ÚNICAMENTE para macizos rocosos y no para suelos transportados como lo son los depósitos aluviales. Si esta es la caracterización geológica más detallada, obviamente es posible afirmar que no hubo el detalle anunciado. Contrariamente, este aparte demuestra también una inmensa deficiencia en los diseños y una caracterización geológica y geotécnica absolutamente inadecuada.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 27 de 98	

En el siguiente aparte, correspondiente a “Sistemas de conducción y descarga” (pp. 141) no hay una sola mención a la geología.

- *Obras de casa de máquinas*

Diseño geotécnico de las cavernas de las obras de generación.

Localización. La localización del complejo de generación (caverna de transformadores, casa de máquinas y almenara) a nivel macro, es decir, del esquema del proyecto, fue definido sobre la margen derecha con el fin de aprovechar las ventajas topográficas y de la forma del cauce del río. La localización final en el estribo derecho fue definida con la pretensión de minimizar el potencial impacto de las principales estructuras geológicas que se han identificado en el sitio las fallas Mellizo Tocayo. Estas estructuras se consideraron como de mayor trascendencia y significado para el comportamiento del macizo rocoso, y son de extensión limitada como se explicó en la sección de geología.

Orientación. *En esta etapa de los diseños y con base en el conocimiento que se tiene del macizo en el cual se localizan, se ha escogido la orientación norte sur para los ejes longitudinales de las cavernas por las siguientes razones geotécnicas, además de las hidráulicas y de la conveniencia de contar con conducciones iguales para todas las unidades, ya expuestas:*

Disponer las cavernas con sus ejes perpendiculares a las estructuras geológicas más importantes reduce la posibilidad de conformación de cuñas de roca de gran tamaño, potencialmente inestables. Se considera que las estructuras geológicas más importantes en la zona son las denominadas fallas Mellizo y Tocayo, las cuales son aproximadamente perpendiculares al eje de las cavernas.

Las zonas de foliación que pueden encontrarse paralelas al eje de las cavernas son de extensión limitada y por lo tanto de poca trascendencia.

Los esfuerzos principales in situ posiblemente se encuentran actuando alineados con un plano aproximadamente perpendicular al eje de las cavernas. Esta consideración se hace teniendo en cuenta el alivio de esfuerzos causado por la rápida incisión del cauce, lo cual hace que el esfuerzo principal menor se oriente perpendicular a la cara del talud cerca al cañón del río. El programa de ensayos tipo overcoring e hidrofracturamiento, en etapa de ejecución, a realizarse en campo tiene como fin corroborar esta hipótesis.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 28 de 98	

En la presente etapa de diseño no se ha (sic) concluido los ensayos en las galerías con el propósito de medir la magnitud y orientación de los esfuerzos principales in situ, con base en los cuales se confirmaría la localización, orientación y geometría de las cavernas y/o los tratamientos necesarios para garantizar la estabilidad de estas estructuras así como la longitud del blindaje de los túneles de presión inferior.

Forma y geometría de las excavaciones y separación entre ellas. Se han seleccionado cavernas de paredes rectas verticales y techo abovedado, con base en los siguientes aspectos:

- **Modelo geológico del sitio de las obras.** Los resultados de la exploración a la fecha indican que las condiciones geológicas, litología y estructura geológica del sitio del proyecto es simple y corresponde con el modelo geológico establecido en la etapa de actualización de factibilidad.

La casa de máquinas es el corazón de un proyecto de generación de energía hidroeléctrica y por ello este aparte de los estudios de geología de 2010, cuando ya Hidroituango había culminado sus diseños e incluso ya se había realizado la subasta para la construcción del megaproyecto.

Es evidente de lo consignado en este informe del 30 de marzo de 2010 que la geología y su complejidad no se han entendido, que no se le dio nunca en esta fase la importancia al concepto de macizo rocoso, que las fracturas no solamente son las fallas geológicas, que las fallas geológicas no corresponden a planos dentro del subsuelo sino que son volúmenes que era necesario haber investigado con anterioridad a ubicar la casa de máquinas atravesada por una de las fallas geológicas locales existentes y que la foliación en las rocas metamórficas NO es de poca trascendencia.

Por otra parte, lo aquí anotado entra en contradicciones con lo que se había anotado en el numeral 2.6.3. de este mismo informe, pues allí se plantea, de manera incompleta y deficiente (por ejemplo, no se expone su longitud de manera numérica), que la falla Mellizo aflora en varios sitios y que debía afectar las galerías trazadas mientras aquí se lee que en la sección de geología se estableció que eran de extensión limitada.

Es posible concluir que EPM – Hidroituango minimizó los problemas relacionados con las discontinuidades, es decir, con la parte fundamental del macizo rocoso para el caso del proyecto Hidroituango, con opiniones de sus técnicos de diseño en el sentido de que ni la foliación ni las fallas geológicas eran importantes en cuanto a la inestabilidad.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 29 de 98	

Evidentemente, todo su diseño planteado para que no se dieran problemas de estabilidad en relación con las fallas geológicas Mellizo y Tocayo (prácticamente invisibilizada en el diseño) fue completamente inadecuado, como es evidente de lo que ha venido sucediendo en los últimos dos años.

Se resumen las deficiencias de conocimiento de EPM – Hidroituango al respecto, en la frase que cierra el aparte que cierra el numeral de **Resultados del diseño** en el apartado de **Obras de casas de máquinas:**

- **Modelo geológico del sitio de las obras.** *Los resultados de la exploración a la fecha indican que las condiciones geológicas, litología y estructura geológica del sitio del proyecto es simple y corresponde con el modelo geológico establecido en la etapa de actualización de factibilidad.*

En esta declaración de principios y basados en un casi total desconocimiento del medio geológico a intervenir, se niega la complejidad de los materiales y de su deformación (fallas, diaclasas, foliación), así como de la historia geológica y geomorfológica del cañón del río Cauca. Esta frase es la mejor ilustración de un proyecto irresponsable que si hubiese abordado de manera profunda la inmensa complejidad no solamente natural sino socio-cultural posiblemente habría intuido la inviabilidad.

6 DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES Y DE GRAN MAGNITUD

6.1 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS DE GRAN MAGNITUD

Durante los estudios de factibilidad del proyecto realizados entre los años de 1978 y 1982 se identificó que la cuenca del proyecto, debido a sus características geológicas, geomorfológicas y topográficas, además del potencial sísmico de la región, podía ser sometida a procesos de remoción en masa, algunos de ellos de gran magnitud. Con base en este criterio ISA, el dueño del proyecto en ese momento, asesorado por INTEGRAL Ltda., contrató con la firma Woodward Clyde Consultants de Estados Unidos, el estudio de estos procesos, cuyo informe, presentado en 1981, se titula Preliminary Study of Geomorphology and Quaternary Stratigraphy Ituango Project Colombia. Ese estudio concluyó que el área de influencia del proyecto es propensa a movimientos en masa, algunos de gran volumen, y que efectivamente existen en el área evidencias de grandes movimientos, entre los cuales los remanentes del deslizamiento de gran magnitud denominado El Guásimo, localizado en la margen izquierda del río, frente a la población de Sabanalarga, tienen una expresión morfológica

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 30 de 98	

marcada. El informe menciona otros procesos que también califica como grandes deslizamientos.

Aquí otra evidencia de la complejidad geológica y geomorfológica de la zona del proyecto, donde existen evidencias de deslizamientos de gran magnitud y donde se es claro que la zona es inestable. No obstante, con este marco de conocimiento, conforme avanza el estudio del proyecto surge la falta de rigor técnica:

El estudio de factibilidad avanzada del incluyó en los alcances del trabajo el estudio geomorfológico de la zona, entre cuyos fines se encuentra la evaluación de procesos de remoción de masa. Este estudio se realizó con base en trabajos de fotointerpretación e información secundaria, y se apoyó en un sobrevuelo en helicóptero. (subrayados fuera de texto)

6.3 ESTUDIO DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS DE GRAN MAGNITUD

El estudio de estabilidad de taludes en roca que puedan ser propensos al movimiento de grandes volúmenes de material se puede hacer desde dos enfoques diferentes. El primero es suponer que el macizo rocoso es supremamente débil. El segundo es evaluar la estabilidad de bloques definidos por estructuras mayores como planos de falla o combinación de estos planos con sistemas de diaclasas.

El primer enfoque o mecanismo no aplica al sitio, puesto que la roca ha sido afectada de manera puntual por fallas, pero no se presentan áreas extensas ni grandes volúmenes triturados o fraccionados como para que se comporten como un suelo y por lo tanto apliquen mecanismos como fallas circulares. El segundo enfoque sí se considera aplicable al estudio, pues las combinaciones estructurales que requiere aparecen dentro del cañón que contendrá el embalse, pudiendo generar, como ya ha ocurrido en el pasado movimientos de gran volumen por el desplazamiento de una cuña dadas las discontinuidades y zonas de falla.

(...)

Para estimar el sismo que es capaz de movilizar una nueva cuña de gran magnitud, es decir, se excluye la reactivación de viejos deslizamientos, se tomó como base el sismo que fue capaz de movilizar el deslizamiento del Guásimo y se hizo la siguiente reflexión. Cuando se produjo este

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 31 de 98	

deslizamiento no se generó otro deslizamiento de proporciones similares, lo cual se puede afirmar dado que no se encuentran evidencias de su ocurrencia, lo que implica que los taludes que existían en ese entonces fueron capaces de resistir este incremento en las fuerzas desestabilizadoras sin fallar.

También aquí son evidentes las falencias técnicas del proyecto. Se omiten análisis con base en opiniones y no en datos y hoy es evidente que las opiniones eran equivocadas. Es interesante destacar que se plantea en 2010 que se opinó que no existían grandes volúmenes de roca triturados, cuando esa situación es hoy la principal amenaza para la infraestructura del proyecto.

En cuanto a las “reflexiones” para la toma de decisiones, ellas son la base de las hipótesis y sobre ella se construyen modelos cualitativos que deben ser posteriormente parametrizados. No obstante ello no existe en el diseño del proyecto y hoy no es posible tener certeza sobre las probabilidades que existen de que se generen deslizamientos de magnitudes suficientes para generar sobrepaso de la presa, tal como se discutirá cuando se analicen los estudios de 2019. En este aspecto tampoco existe certeza científica absoluta dado el nivel de conocimiento que tenemos sobre sismos históricos y sismos antiguos en Colombia y del aún menor conocimiento en sismogeneración para el área de estudio.

El estudio detallado de inestabilidad necesita del control de campo, de la existencia de estudios topográficos detallados, de perforaciones y de exploración geofísica, de una cartografía geológica y de datos hidrogeológicos de apoyo. Ya Terrae (2017) había establecido respecto a la falta de ligar la geomorfología con aspectos como riesgo:

Si bien el ítem de geomorfología es desarrollado de manera detallada, relacionando las geoformas y procesos presentes con características ambientales como la erosión, no se relaciona con otros aspectos fundamentales como la susceptibilidad de las aguas a infiltrarse o a escurrir, ni con el riesgo que puede desencadenar la ocurrencia de deslizamientos grandes o incluso la reactivación de megadeslizamientos (que son descritos para la zona embalsada) dando lugar a la falla de la presa. Este tipo de omisiones se detecta tanto en los estudios de Hidroituango-Integral (2007) como en los de Hidroituango-Integral-Solingral (2010) y EPM Ituango-Integral-Solingral (2011).

En la Figura 4 se cruzó la información del mapa geomorfológico y de la zona a embalsar presentada por Hidroituango en 2007 y permite observar deslizamientos (puntos y polígonos en rojo), algunos de ellos de gran magnitud, que pueden llegar a afectar el cuerpo de agua embalsado (polígono azul), con la consiguiente de generación de riesgo y también una eventual disminución de la vida útil del proyecto.

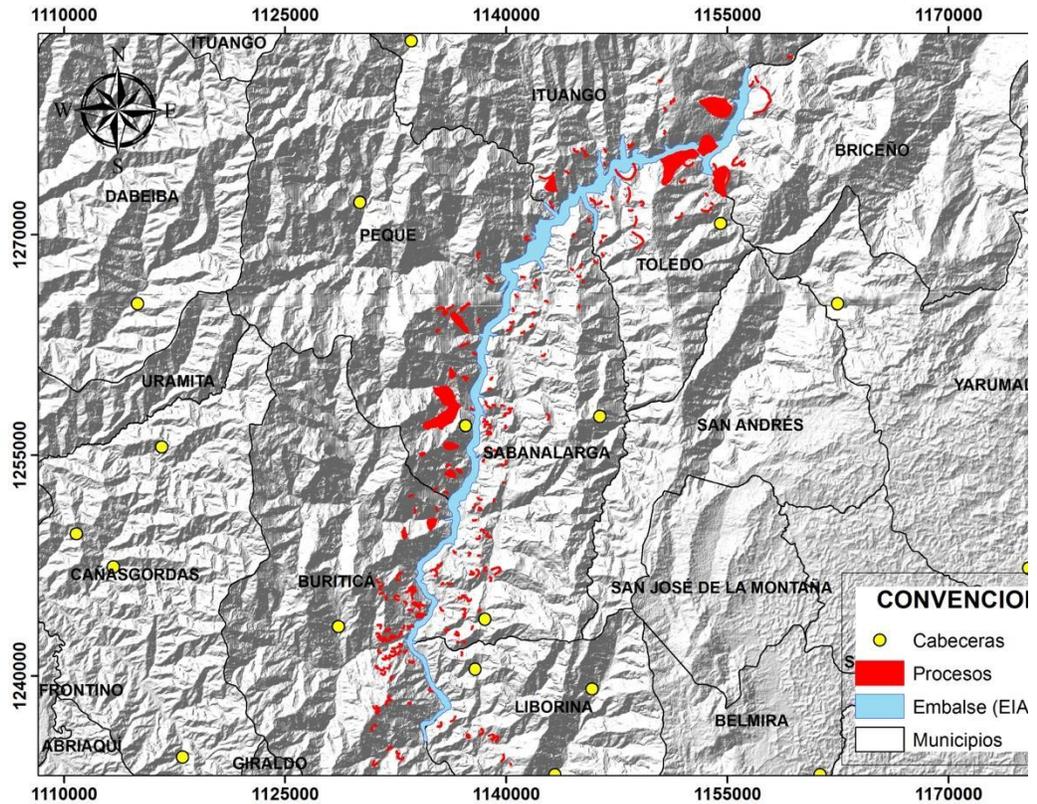


Figura 4. Procesos morfodinámicos y zona embalsada presentados por Hidroituango y graficados sobre modelo digital de elevación de la zona. Fuente: elaboración propia con información del EIA-2007.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 33 de 98	

3.2.2 Construcción y Contingencia

DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO CONTINGENCIA. EPM – INTEGRAL INFORME GEOLOGÍA Y GEOTECNIA I-I-2194-062018-01-R2 (ENERO 2019).

A lo largo de ese proceso se realizaron intensas campañas de investigación geológico- geotécnica, cuyos números en términos de intensidad de exploración se resumen a continuación:

- Perforaciones corazonadas (7 898 m): De los cuales 3 547 m se hicieron en factibilidad (1978-1982), 450 m en actualización de la factibilidad (2006-2007) y 3902 m en diseño (2008-2009).*
- Galerías exploratorias (2001 m): De los cuales 1 107 m se hicieron en factibilidad (1978-1982) y 894 m en diseño (2008-2009).*
- Otras exploraciones: 78 líneas de refracción sísmica, 14 sondeos eléctricos verticales, 264 m de pozos exploratorios, 67 m3 de excavación de apiques, 30 m3 de excavación de trincheras y 250 m de perforaciones a percusión.*

La información es insuficiente si se contrasta con las solicitudes que para proyectos de vivienda hace la Norma Sismo Resistente de 2010. Dentro de la información en el informe no hay descripciones o resúmenes sobre los tipos de roca y sus características, ni sobre los espesores y las características de las rocas meteorizadas ni tampoco un criterio objetivo y muy útil para establecer la densidad el fracturamiento y que es conocido como RQD (Rock Quality Dessignation). Llama la atención que al parecer no se orientaron los recobros de roca en las perforaciones, con lo cual no es posible obtener información adicional sobre direcciones de diaclasas, diaclasas abiertas o planos de falla con sus estrías.

No obstante, puede verse que los flujos de agua se encuentran a presión casi en todas las perforaciones, lo cual no ha sido bien explicado en términos de la hidrogeología que puede haber sido completamente modificada por las excavaciones subterráneas.



PROYECTO HIDROELECTRICO ITUANGO
DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO
CONTINGENCIA

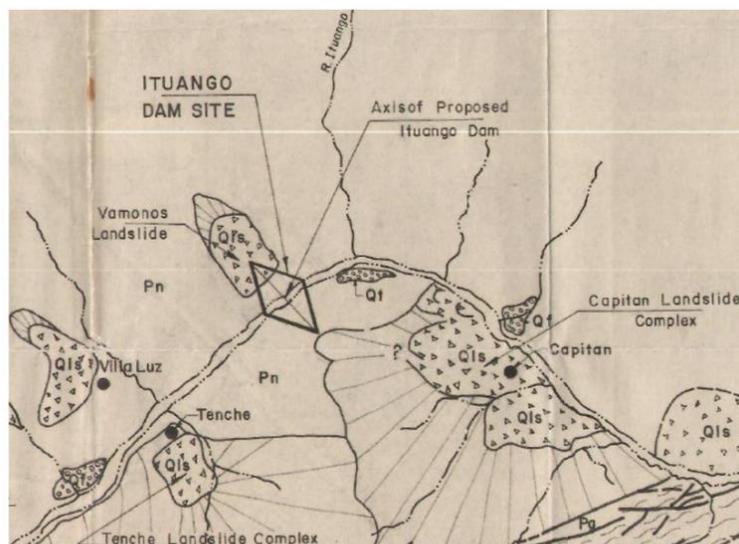


Figura 2-2. Mapa del área de estudio de riesgo sísmico plate 3 (Woodward Clyde, 1980)

El informe incluye un levantamiento antiguo de la zona de presa de Hidroituango, realizado por Woodward – Clyde para Integral en 1980. De su observación, surgen preguntas clave en términos de riesgo para las poblaciones:

¿Por qué no se evalúan los deslizamientos e inestabilidad de la margen izquierda (Deslizamiento vámonos, cartografiado por Woodward & Clyde en sus estudios de 1980?

¿Cuáles son las condiciones de estabilidad y resistencia del macizo rocoso en la margen izquierda?

Estos importantes aspectos continúan siendo desconocidos a la fecha dado que solamente fueron remitidos estudios de diseño y de construcción/contingencia del margen derecho, como si continuaran planteándose la totalidad de estudios y de generación de conocimiento para la estabilidad del proyecto pero no para asegurar la protección del derecho fundamental a la vida de las comunidades ubicadas en inmediaciones a la represa y agua abajo.

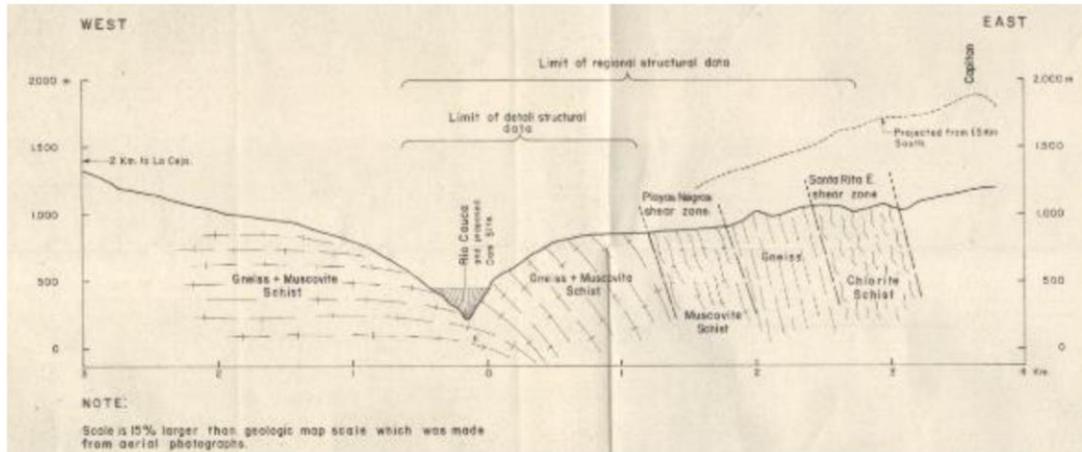


Figura 2-6. Perfil geológico-estructural por la presa (Woodward Clyde, 1980)

De la remisión de los estudios de los años 70, entregados a inicios de los años 80 se extrae información geológico estructural. Si bien esta información es una base importante, llama la atención la falta de actualización de dichos estudios y la ausencia de perfiles geológico – estructurales que muestren el subsuelo con toda la información generada por casi 50 años y que haya sido compilada. Por otra parte, los estudios de Woodward – Clyde son regionales, y no la información más actual no ha mejorado las escalas, al menos en términos de perfiles geológicos, los cuales son la base tanto para la geotecnia como para la hidrogeología.

“Finalmente se encontró que para activar uno de estos eventos, se requiere una aceleración por lo menos igual a la que se necesitó para movilizar el Guásimo (deslizamiento antiguo de mayor tamaño en la zona de influencia del proyecto) que se estima se encuentra entre 0,6 y 0,68 g,

por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de estos movimientos de gran magnitud está entre 0,013 % y el 0,02%. De cada uno de estos posibles deslizamientos, se hizo un análisis para calcular la ola que llegaría a la presa y se obtuvo que las generadas por el deslizamiento de Chirí y el Guásimo serían las mayores, con una altura de 6,0 m que es inferior a los 15 m de altura libre que hay entre el embalse y la corona del talud.”

Este tipo de afirmaciones no tiene unos soportes donde se muestran los modelamientos para llegar a plantear estos valores, donde tampoco son claras las inferencias e incertidumbres con las cuales han trabajados.

4.3.2.6.5 Análisis de estabilidad derrumbe desviación

Finalmente, se presentan los resultados de los análisis tendientes a determinar la probabilidad de falla en el talud que corresponde al derrumbe de desviación. El perfil de análisis es el que se muestra en las siguientes figuras.

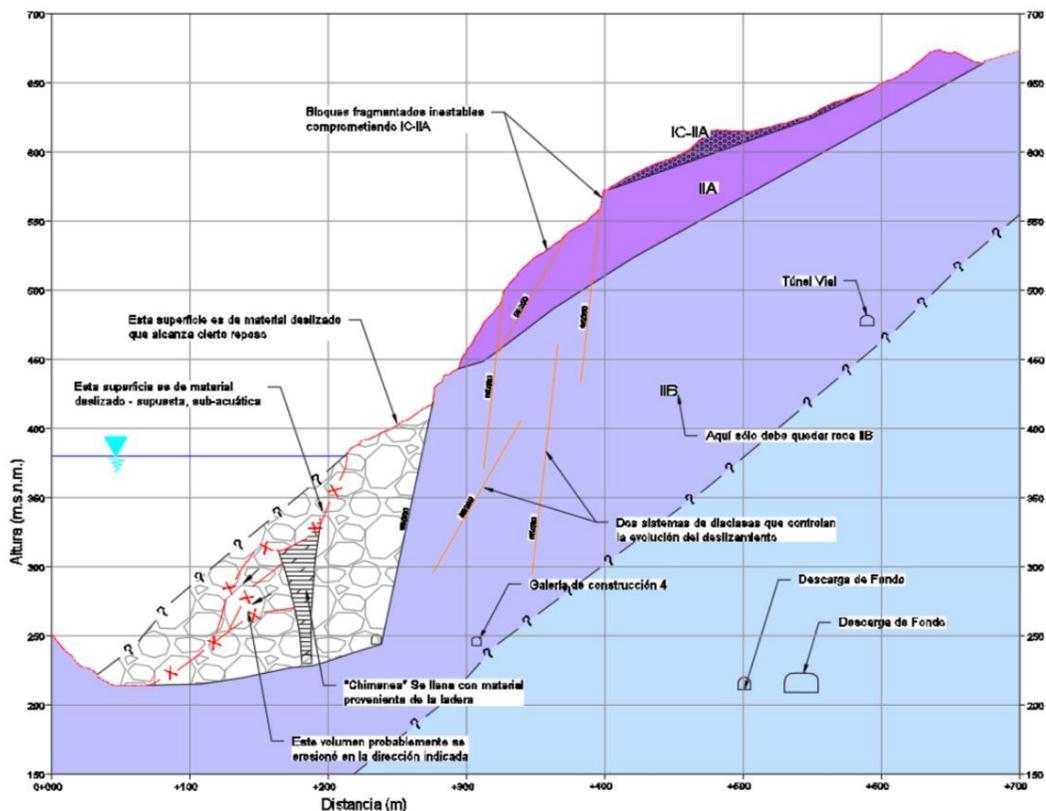


Figura 4-33. Perfil de análisis talud derrumbe de desviación

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 37 de 98	

Continúan presentándose incertidumbres totales (marcadas con una línea con signos de interrogación) entre los materiales IIB y III. Este límite era fundamental para evaluar la estabilidad de las estructuras como las descargas de fondo, la casa de máquinas y la mayor parte de las galerías. Además, de acuerdo con la clasificación de Deere & Patton, que recoge las divisiones que generan diferenciales de comportamiento geomecánico en rocas frescas (III), rocas meteorizadas (II) y suelos residuales (I), los materiales IIB y III (e incluso parte de las IIA) deben ser trabajadas como macizos rocosos y por lo tanto, caracterizadas en función de las discontinuidades que presentan.

En este caso, es evidente que los perfiles de análisis NO corresponden a macizos rocosos.

4.4.1 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LAS DISCONTINUIDADES

La caracterización de las discontinuidades se realizó, como se mencionó anteriormente, a partir de los levantamientos geológicos tomados en las excavaciones superficiales realizadas en la ladera de la margen derecha: galería de pozos de compuertas, desviaciones, vertedero y núcleo de la presa.

En la Tabla 4-5 se presentan los datos de la actitud estructural media de las discontinuidades principales del macizo en la margen derecha y la desviación estándar. Se han incluido los porcentajes de frecuencia de cada tipo de discontinuidad. Como se puede apreciar, la foliación es la estructura claramente dominante con una frecuencia total de 51,2%, de los cuales 12% corresponden a casos en los cuales se presentan zonas de cizalla asociadas a la foliación.

Tabla 4-5. Actitud estructural media de las principales discontinuidades del macizo-margen derecha

TIPO DE ESTRUCTURA	BUZAMIENTO	AZIMUT DEL BUZAMIENTO	FRECUENCIA (%)
Foliación (F1)	20 ± 8	090 ± 30	39,5
Diaclasa 1 (D1)	70 ± 10	275 ± 10	4,8
Diaclasa 2 (D2)	60 ± 10	145 ± 7	3,8
Diaclasa 3 (D3)	65 ± 7	345 ± 7	3,3
Diaclasa 4 (D4)	70 ± 8	235 ± 5	2,8
Cizalla de foliación 1 (C1)	25 ± 10	095 ± 25	9,2
Cizalla de foliación 3 (C3)	70 ± 5	095 ± 7	2,5
Cizalla no asociada a la foliación (C2)	55 ± 7	155 ± 8	5,5
Estructuras aleatorias			28,6

Informe Geología y Geotecnia
Enero, 2019

I-I-2194-062018-01-R2
4.83

De igual manera, se realizó un análisis estadístico de las persistencias de cada una de las discontinuidades, con el fin de conocer cuáles son las que se presentan con mayor frecuencia (Figura 4-40). De este análisis puede observarse que las cizallas no asociadas a la foliación (C2) son las que presentan mayores persistencias, de alta a muy alta. Lo anterior debido a que en este grupo se encuentran los planos correspondientes a las fallas dominantes del macizo que presentan buzamiento hacia el sur. Por su parte, las diaclasas presentan persistencias entre baja y moderada, y la foliación presenta una persistencia moderada a alta.

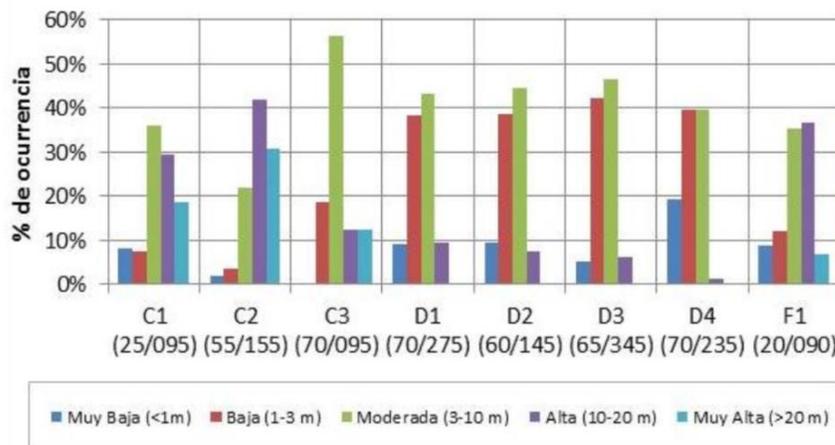


Figura 4-40. Análisis estadístico de la persistencia

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 39 de 98	

Los datos demuestran que el macizo está afectado por fallas geológicas, que estas son persistentes y que además el patrón predominante es subvertical, con inclinaciones típicas de fallas con componente principal de rumbo.

4.4.2 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

En los levantamientos de macizo rocoso de las excavaciones superficiales, se toman las propiedades geomecánicas en campo a través del criterio de falla de Barton & Bandis; sin embargo, para efectos de modelamiento se pasa al criterio de Mohr- Coulomb.

De acuerdo con el sistema de clasificación Q, se toma el parámetro J_a , con el cual se halla el σ residual. De igual manera se determinan los valores típicos de JRC y JCS. Lo anterior se realiza para cada tipo de estructura geológica (foliación, cizallas y diaclasas), y se presentan regresiones lineales por medio de las cuales se obtienen los parámetros bajo el criterio Mohr-Coulomb. Véase Tabla 4-6 y Figura 4-41.

No llevaron a cabo ensayos de laboratorio para determinar la resistencia geomecánica de las fracturas cuando es evidente que el modo de falla más importante es justamente a lo largo de las fracturas.

4.4.3.2 Escenario 1

De acuerdo con las familias de discontinuidades descritas en la Tabla 4-6, se realizó un análisis cinemático. Este análisis indica que solamente la combinación de las diaclasas D3 y D4 y de las diaclasas D1 y D4, formaría una cuña desfavorable la cual deslizaría hacia el W.

La línea de intersección entre estas familias, de acuerdo con los rangos de variación presentados en la Tabla 4-6, oscilan entre 45° y 64° para la combinación D3-D4 y entre 60° y 80° para la combinación D1-D4.

Lo anterior significa que para ambos casos se tiene una superficie de deslizamiento superior a 45°, que de acuerdo con la disposición de la ladera y las excavaciones ejecutadas, indican cuñas de poco volumen. La Figura 4-46 presenta los vectores-cuña que representan las combinaciones anteriormente mencionadas.

Del numeral 4.4.3.2.3 Resultados Zona 3 – Vertedero

(...)

La única manera de que ocurran cuñas de gran tamaño (formadas por la conjunción de diaclasas con persistencias mayores que 200 m de longitud), es mediante el encadenamiento de cuñas menores en planos compuestos (escalonados) tal como se presenta en la Fotografía 4-5. En estos casos, nunca se presenta un deslizamiento de un bloque masivo

sino el desprendimiento secuencial de las cuñas menores que, en el largo plazo, van configurando la superficie final escalonada.

Se concluye finalmente, que en este escenario de análisis, no hay probabilidad de formar cuñas de gran volumen que puedan afectar con severidad la integridad física de las obras localizadas en la zona de influencia de las zonas analizadas (captación, compuertas y vertedero).

5.3.4.2 Parámetros de resistencia de las discontinuidades

De acuerdo con los datos recolectados de geología y geotecnia durante la excavación del complejo cavernas, se tienen los siguientes datos estructurales como los datos relevantes y representativos del comportamiento geológico estructural del macizo.

Tabla 5-6. Sistemas de discontinuidades

Tabla 5-6. Sistemas de discontinuidades

ID	Dip (°)	Dip direction (°)	Tipo de discontinuidad	Persistencia (m)
Falla	60°-70°	160°-170°	Falla	>20
F1	20°-30°	100°-110°	Foliación	>20
D1-roldan	60°-70°	260°-270°	Diaclasa	>20
D1	60°-70°	350°	Diaclasa	>20

Con relación a los parámetros geo mecánicos, se retoman los parámetros geo mecánicos y de caracterización de las discontinuidades del informe de diseño:

Tabla 5-7. Parámetros de resistencia de las discontinuidades

Conjunto	JSC (MPa)	JRC	Phi residual
Foliación	50	6	23
Diaclasa	60	8	26

Tabla 5-7. Parámetros de resistencia de las discontinuidades

Para la falla se consideran unos parámetros con base en el criterio Mohr Coulomb, con un ángulo de fricción de 15° y una cohesión nula.

No parece que los parámetros presentados resulten de análisis de laboratorio, pues no existen anexos que así lo ratifiquen. ¿Por qué no hacer análisis geomecánicos de fracturas si ya es claro que las fracturas lo primordial?

7.3 CONTEXTO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO

Las condiciones geológicas para el sector aguas arriba de la GAD, en la zona donde se estima ocurrió el taponamiento, corresponden en la ladera

y a nivel superficial a la presencia de varios tipos de material, entre los que se encuentran depósitos antrópicos, aluviales y de vertiente, los cuales reposan sobre un basamento metamórfico de neises cuarzo-feldespáticos.

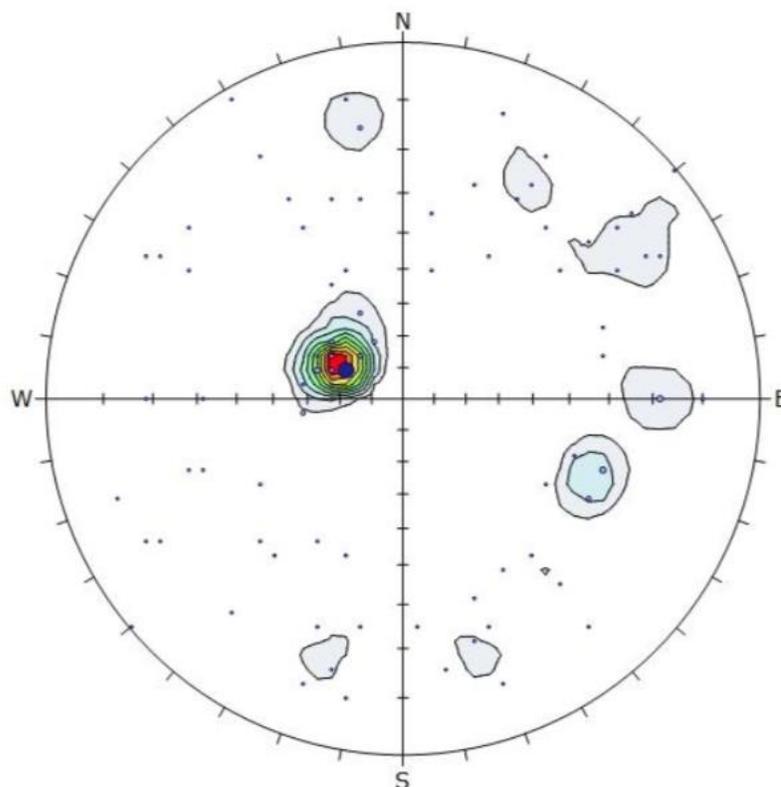


Figura 7-4. Estereograma Completo

No presentan anexos con los datos completos de discontinuidades. No parece que se haya medido una cantidad significativa, de acuerdo con los criterios de Hoek para el número de datos en análisis de excavaciones subterráneas.

El tramo subterráneo de la GAD cercano a la zona del desprendimiento fue excavado utilizando el método de perforación y voladura, aplicando sostenimientos definidos con base en el diseño (anexo A) y relacionado en el plano para construcción (D-PHI-034- TUN-EX-C-010), el cual fue designado según la valoración geomecánica del macizo rocoso mediante el índice Q, propuesto por el Instituto Noruego de Geotecnia (NGI). En este tramo se realizaron recomendaciones adicionales de soporte, el cual constó en la instalación de pernos BRL8 de incinados 20°hacia el frete

(sic), de 6,0 m de longitud y espaciados cada 0,8 m (véase notas de campo NC-489-16 y NC-013)-17.

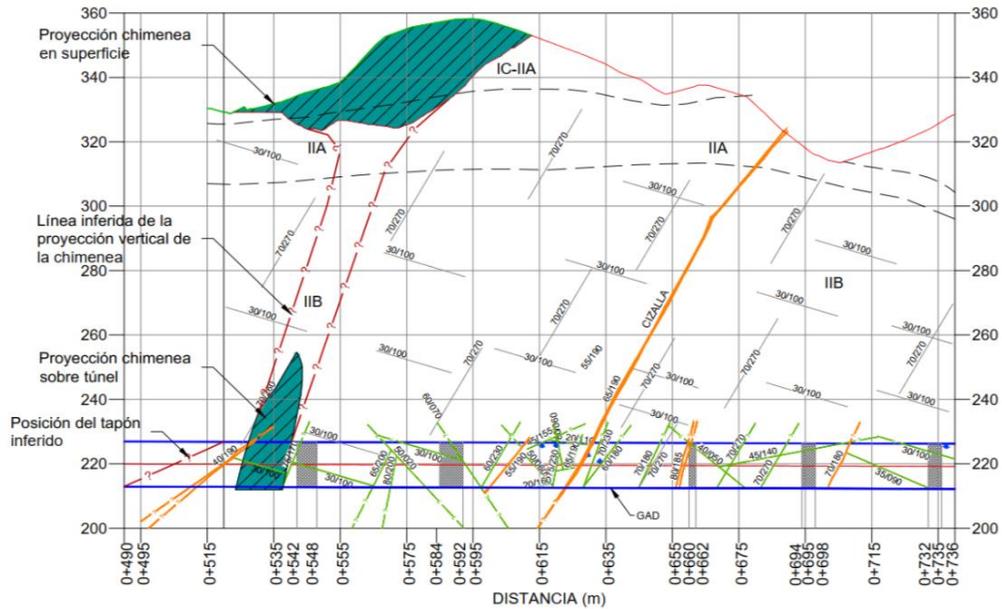


Figura 7-9. Perfil geológico longitudinal por el eje de la Galería Auxiliar de Desviación

Las direcciones de cizalla coinciden con los problemas de estabilidad más graves. Obviamente las fallas geológicas de diferentes escalas gobiernan la estabilidad, pero no se levantaron este tipo de datos para el diseño de la presa.

9 DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO PARA EL CIERRE DEFINITIVO

Llama la atención que Ingetec presente estudios en los temas de galerías dado su carácter de interventor de los diseños del proyecto.

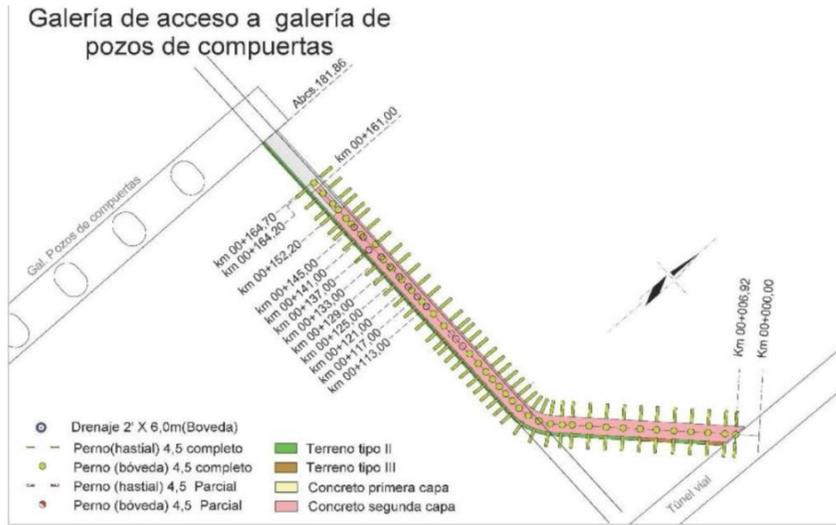


Figura 9-22 Reparaciones en galería de acceso a galería de los pozos de compuertas
 Fuente: Consorcio Ingetec-Sedic. (2018)

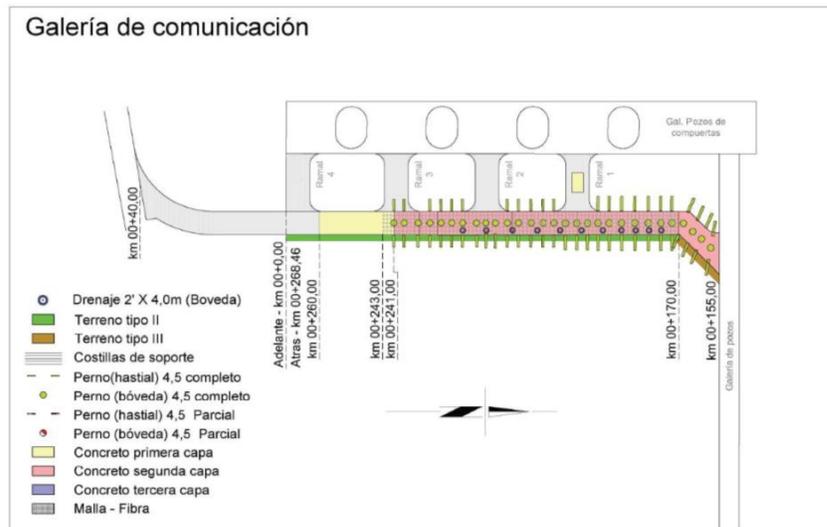


Figura 9-23 Reparaciones en galería de comunicación (paralela) a galería de los pozos de compuertas
 Fuente: Consorcio Ingetec-Sedic. (2018)

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 44 de 98	

9.2 MARCO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE DAÑOS

Después del cierre de las compuertas de las conducciones N°7 y N°8 se pudo constatar que existen afectaciones tales como grietas, desprendimientos parciales de lanzado y caída de bloques en las galerías de acceso y galería de pozos de compuertas (ramales N°5 a N°8), así como en el túnel vial a la altura del km 12 (que coincide con porciones excavadas en terrenos Tipo IV, hacia el km 12+270 se encuentra la traza principal de la falla Mellizo, desde km 12+170 a 12+270 el material corresponde a planos de debilidad). En la galería C y D-sur se observan colapsos de bloques de roca, la mayoría de aspecto intacto y cuyos tamaños pueden alcanzar hasta 1,00 m. Las inspecciones mediante cámaras de video mostraron el final de los codos superiores de los pozos de presión N°5 a N°8 obstruidos con bloques de roca de características similares a las mencionadas antes.

En cuanto a las condiciones geológicas del sitio, cabe resaltar que el pozo de presión N°5 está afectado directamente por la traza principal de la falla Mellizo, tal y como se muestra en la Figura 9-25 y Figura 9-26. Otras obras tales como la galería D-norte, la galería C, la galería A y el túnel vial también eran intersectadas por la misma estructura geológica, tal y como se muestra en la Figura 9-24. Hacia el sur (pozos de presión N°6 a N°8) existían otras trazas que condicionaban el comportamiento geológico del sitio.

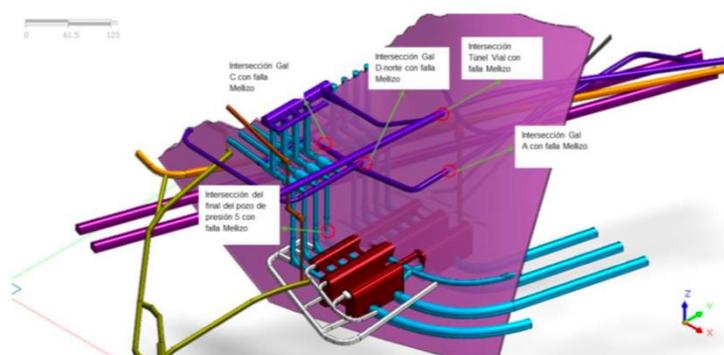


Figura 9-24 Afectación de la traza principal de la falla Mellizos en pozo de presión N°5, galería C, galería D-norte y túnel vial
Fuente: Integral S.A. (2018).

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 45 de 98	

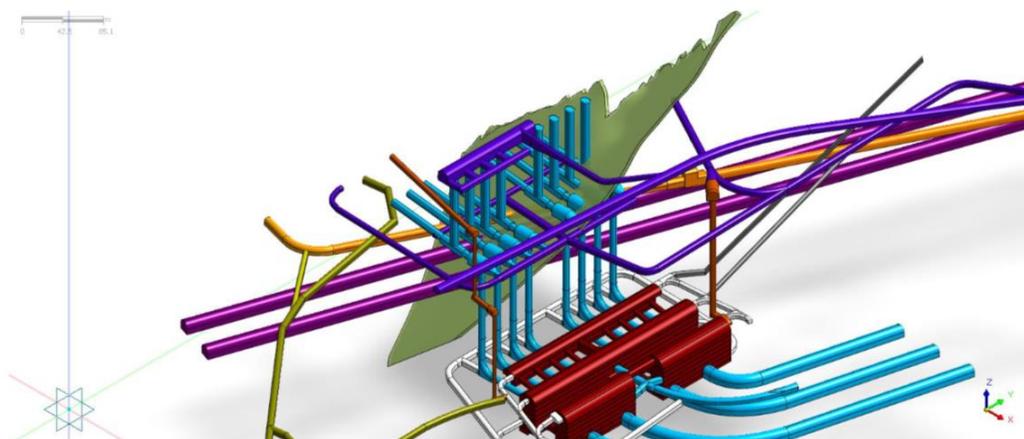


Figura 9-27 Afectación de la traza principal de la falla Tocayo hacia la zona norte, galería D-norte y túnel vial
Fuente: Integral S.A. (2018)

Es inaceptable que un proyecto de esta envergadura no haya contado con estudios geológicos que previeran que una falla geológica disminuye de manera dramática las características de resistencia del macizo rocoso. Los estudios de 2010 concluyeron sobre la inocuidad de la falla Mellizo y desconocieron totalmente la influencia de la falla Tocayo en la estabilidad de las obras.

11 CONCLUSIONES

A partir de los análisis presentados en los Capítulos 2 a 10 se proponen las siguientes conclusiones:

- *La campaña de investigación geológico-geotécnica del proyecto, desde sus etapas tempranas en el año 1978, fue robusta y acorde con los lineamientos de la buena práctica de la ingeniería.*
- *Los grandes deslizamientos encontrados en el cañón del río Cauca, entre Santafé de Antioquia y la zona del proyecto, se localizan principalmente en la margen izquierda; se trata de eventos probablemente detonados por grandes sismos. Todos fueron identificados, estudiados y tenidos en cuenta para la localización de las obras del proyecto.*

En contraste con las conclusiones de EPM – Hidroituango, es evidente de esta revisión rápida, que si bien los estudios se denominan geológicos, solamente consignan aspectos introductorios de geología, basados en información antigua y no detallada. No muestran una caracterización completa del macizo rocoso, ni

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 46 de 98	

en términos de los estudios para masa rocosa (petrografía, caracterizaciones mineralógicas, geoquímica de arcillas, etc.) ni de la deformación (dirección de esfuerzos, interpretación de datos de fractura, caracterización del macizo rocoso, ni para geotecnia ni para hidrogeología.

La falla Mellizo es mencionada, pero continúa sin caracterizar, exceptuando aspectos generales como su dirección en inclinación. Las incertidumbres respecto a las caracterizaciones de las discontinuidades del macizo rocoso continúan, particularmente por la falta de datos recogidos de manera intensa, completa y sistemática.

Las opiniones de EPM – Hidroituango respecto a la geología y la geomorfología (particularmente lo referente a los deslizamientos) vertidas en sus conclusiones no tienen ningún asidero. Ya se ha ilustrado en esta revisión rápida la gran cantidad de errores, contradicciones y omisiones en los aspectos geológicos y geotécnicos. En la fase de diseño se operó sin considerar el concepto de macizo rocoso, puesto que no fueron tenidas en cuenta las discontinuidades y se planteó de manera completamente equivocada que la foliación y las fallas geológicas no eran importantes para el proyecto. Obviamente una investigación geológica y geotécnica adecuadas habrían permitido establecer la complejidad del macizo y se habrían obviado algunas de las incertidumbres, como por ejemplo del carácter y la geometría de las fallas geológicas, el contacto entre la roca fresca y la no meteorizada, el intenso fracturamiento del macizo rocoso y la presión, dirección y controles geológicos del agua subterránea dentro del macizo (aspecto del cual no hubo ningún modelamiento para el diseño).

En cuanto a los deslizamientos, se actuó bajo reflexiones y sin hipótesis sustentadas en un modelamiento preciso. No se tuvo un control de campo adecuado y aún hoy se omiten estudios sobre deslizamientos en la margen izquierda en la zona de presa que fueron identificados y cartografiados en los estudios de los años 80.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 47 de 98	

4. NEOTECTÓNICA Y ASPECTOS DE SISMICIDAD

4.1 Cantidad y calidad de Información

4.1.1 Diseño

Se revisó de manera preliminar el estudio de Woodward-Clyde Consultants – Integral Ltda. – ISA PRELIMINARY SEISMIC HAZARD STUDY. ITUANGO PROJECT. COLOMBIA con fecha Septiembre de 1980.

4.1.2 Construcción y Contingencia

Se revisó el estudio de Hidroituango – Integral – Solingral NEOTECTÓNICA Y RED LOCAL DE SISMÓGRAFOS. DISEÑO DETALLADO/ITUANGO/D-PHI-CCE-ADM C0375 entregado el 30 de junio de 2010.

Para tener un marco de referencia internacional, el Comité Internacional de Grandes Represas (ICold por sus siglas en inglés), estableció la necesidad de estudios detallados sobre las fallas geológicas, particularmente en las recomendaciones del Boletín 112² (1998).

4.2 Entendimiento del problema

4.2.1 Diseño

PRELIMINARY SEISMIC HAZARD STUDY
ITUANGO PROJECT
COLOMBIA
Woodward-Clyde Consultants – Integral Ltda. – ISA
Septiembre de 1980

Estudio realizado para ISA con el fin de evaluar el riesgo sísmico del proyecto hidroeléctrico de Ituango en su fase de factibilidad.

Marco tectónico

“(...) el sitio de presa de Ituango está ubicado a 9 km al este de la zona de falla de Romeral, a 10 km al norte de la zona de falla Espiritu Santo, y 1.5 km al oeste de la zona de falla de Playa Negra, una traza secundaria de la

² ICold-International Committee on Large dams (1998). Neotectonics and dams. Bulletin 112.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 48 de 98	

falla Santa Rita Este. Los esfuerzos tectónicos sn de tipo compresional y contienen componentes siniestrolaterales.”

Sismicidad Historica (sic)

(...)

La region (sic) de Ituango está situada en una zona de actividad sísmica (sic) transicional con terremotos que poseen focos de profundidad alta e intermedia. Al sur y oeste de la region (sic) de Ituango se extiende hacia el continente una vasta zona de actividad, localizada en su mayor parte debajo de la corteza superior. Al noreste se ha registrado una menor actividad en su mayoría localizada a poca profundidad. El mayor terremoto sucedido en la región de Ituango tuvo una magnitud de 6.75 el 14 de febrero de 1952 y se localizo (sic) a unos 90 km al oeste del sitio de presa, a una profundidad de 24 km y probablemente se genero (sic) en la falla Murri-Mutata (sic). (...)

El terremoto de foco superficial ocurrido el 3 de diciembre de 1970 se utilizo (sic) para evaluar el mecanismo focal. Este terremoto tiene una solución (sic) moderadamente bien definida, la cual, cuando se combina con un conocimiento de la geología (sic) del area (sic), indica que el plano de falla sobre el cual se produjo el mismo, tiene una dirección norte y buzamiento de 70 grados al este, con movimiento siniestrolateral y un componente vertical menor hacia el oeste.

Geología (sic)

Los estudios geológicos de la Fase I identificaron cuatro zonas de falla significativas para el sitio de Ituango denominadas Naranjo-Sardinas, Espiritu Santo, Santa Rita Este y Santa Rita Oeste. La falla Naranjo-Sardinas, la cual es un ramal de la zona de falla Romeral, esta (sic) situada en superficie a unos 9 km del sitio de presa y la falla Espiritu Santo, situada a 10 km del mismo, se consideran como activas; además, las fallas Santa Rita Este y Oeste son probablemente activas (...) (resaltado fuera de texto)

Geología (sic) del Cuaternario

Para evaluar las tasas de desplazamiento durante el Cuaternario tardío (sic) y para estimar la cantidad probable de desplazamiento durante un solo terremoto, se estudiaron los depósitos cuaternarios en la región de Ituango y se compararon con los de Canafisto (sic).

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 49 de 98	

(...)

Miles de deslizamientos, incluyendo el gran deslizamiento de Guasimo (sic) localizado cerca de la población de Sabanalarga, ocurren en la región de Ituango y muchos de ellos se encontraron en el sitio de presa de Ituango. Algunos de los grandes deslizamientos al igual que los abanicos mixtos flujos de lodo-aluviales, aparentemente represaron el río Cauca en varias oportunidades durante los últimos (sic) siglos.

Los estudios de Woodward – Clyde en 1980 son el único acercamiento que se hizo a establecer un campo de esfuerzos tectónicos actuante y aunque NO contó con dataciones de actividad de fallas, si hubo correlaciones con datos del proyecto Cañafisto. Estos estudios constituían una base adecuada pero que complementar con información de dataciones en la zona del proyecto y con datos de la actual Red sismológica nacional de Colombia (RSNC) y que actualizar con las mejoras en el estado del arte en temas como el establecimiento del campo de esfuerzos con medición de fallas geológicas de escala mesoscópica (métricas). No obstante, nada de esto habría sido hecho, de acuerdo con los informes que han sido revisados.

4.2.2. Construcción y Contingencia

DOCUMENTO
NEOTECTÓNICA Y RED LOCAL DE SISMÓGRAFOS
DISEÑO DETALLADO/ITUANGO/D-PHI-CCE-ADM C0375
HIDROITUANGO – INTEGRAL – SOLINGRAL
30 de junio de 2010

Las fallas geológicas tienen cierta información, aunque deficiente, en su descripción, pero los mapas y gráficos (ver las dos figuras siguientes), que son el compilado del conocimiento, muestran fallas únicamente como líneas sin ninguna información respecto al tipo de falla. Evidentemente la escala en la cual se muestra la información es regional, y no se han remitido estudios que permitan ver la cartografía de las fallas Mellizo y Tocayo.



NEOTECTÓNICA Y RED LOCAL DE SISMÓGRAFOS

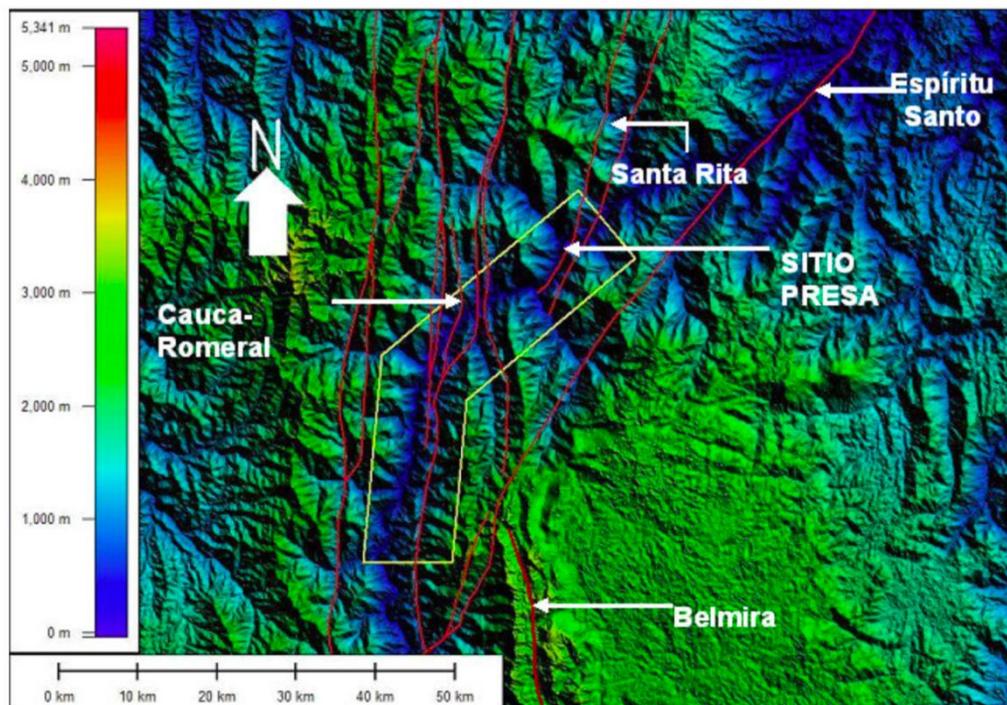
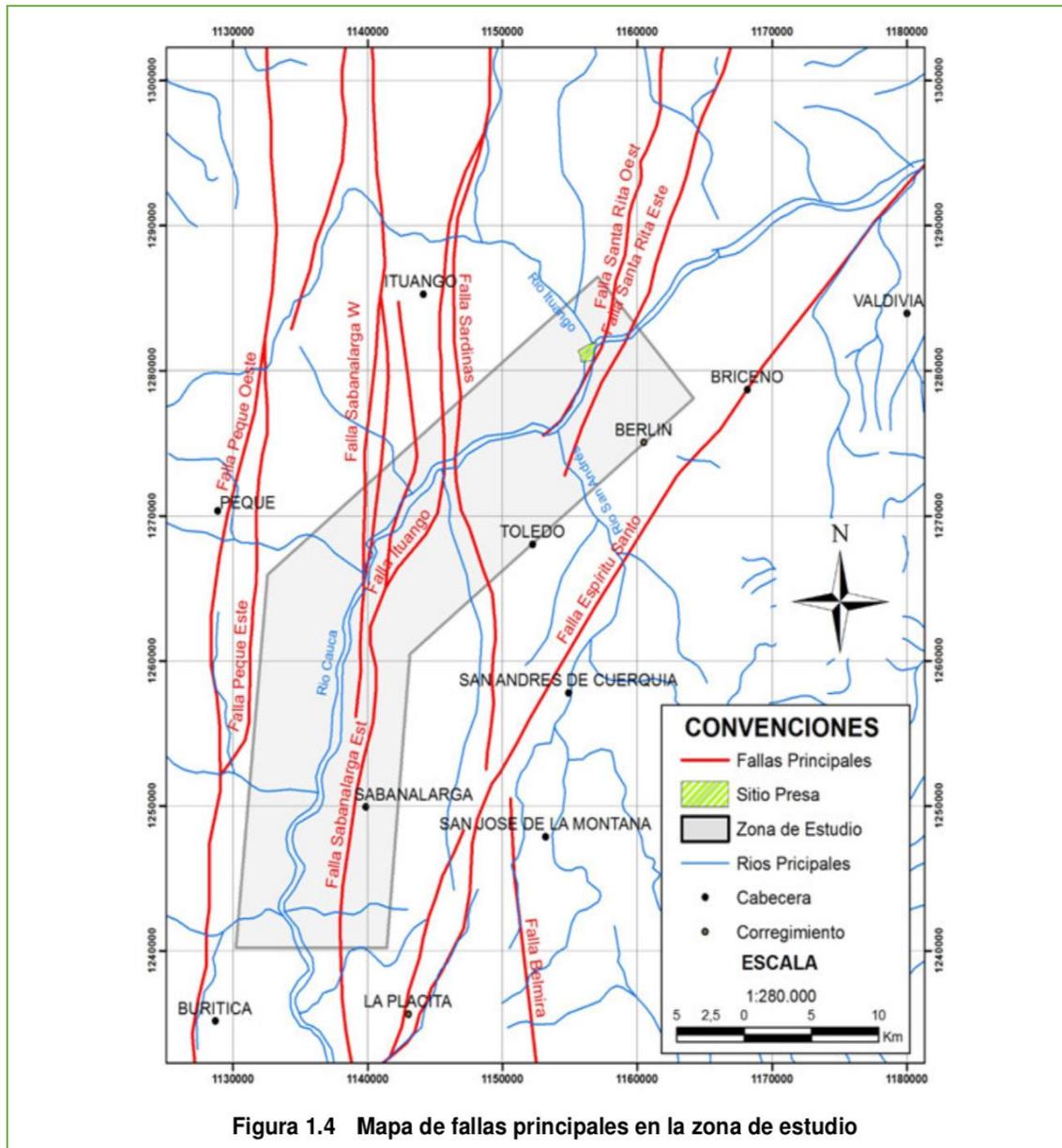
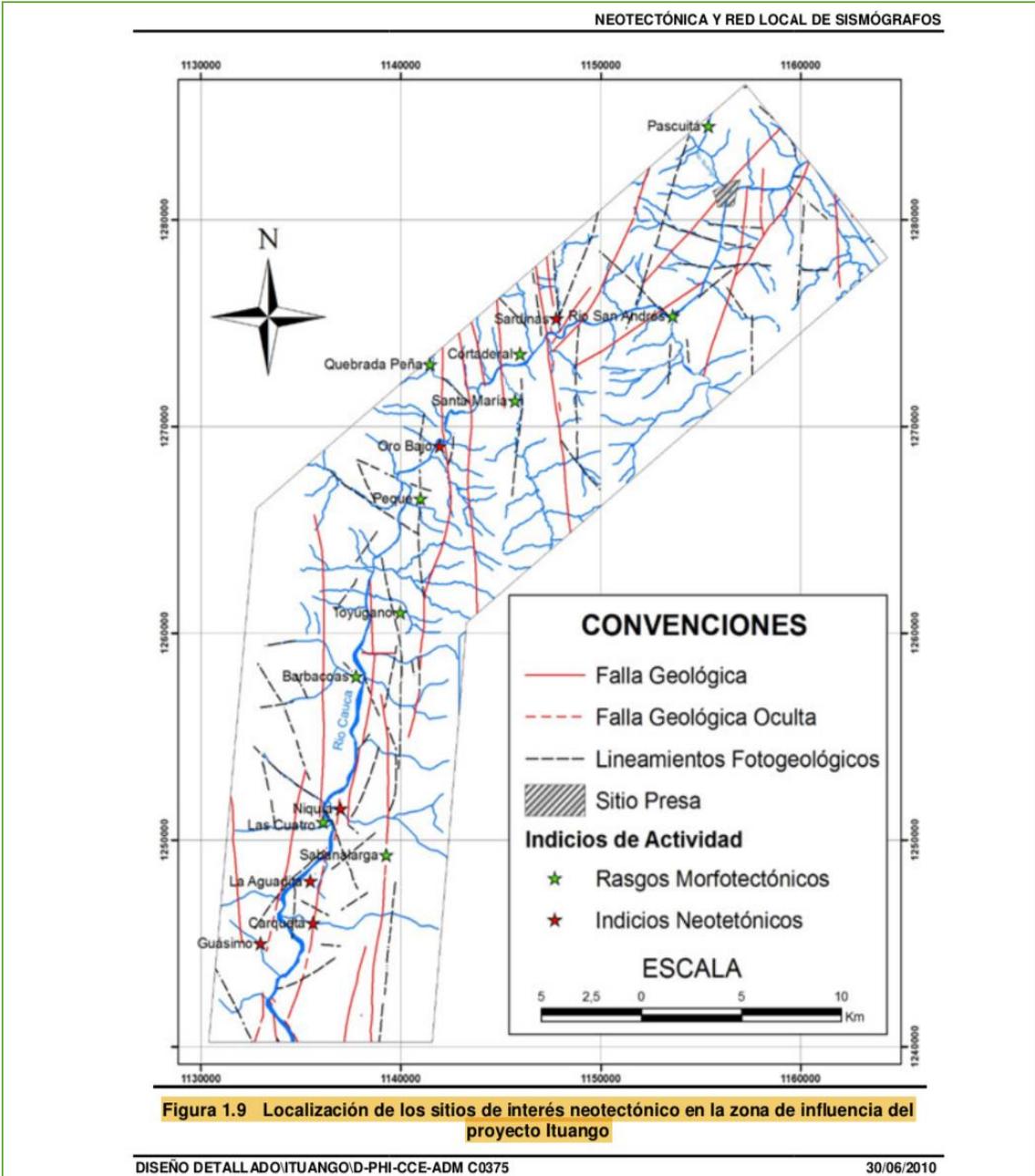


Figura 1.3 Modelo de elevación digital donde se enmarcan las principales fallas en la zona de influencia del proyecto Ituango



Nótese que las fallas no presentan ningún indicio que permita establecer a qué tipología pertenecen, ni se muestran aquí las fallas de Mellizos y Tocayo, probablemente por la escala de los mapas. Desafortunadamente, no hay cartografía en planta de dichas fallas.



En este esquema, además de la dificultad para ubicar la presa, causa extrañeza que el proyecto no se encuentre centrado en la zona analizada. Pueden existir fallas activas más al norte, aun en cercanías a la presa, que no hayan sido analizadas.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 53 de 98	

En general, el trabajo que se realizó para el diseño en términos de neotectónica es únicamente geomorfológico, tanto a nivel de interpretación de fotografías aéreas como de trabajo de campo. Es ilustrativo que ante evidencias geomorfológicas muy fuertes de neotectónica, no se haya buscado medir rasgos cinemáticos y realizar trincheras de trabajo, sino que Hidroituango – Integral – Solingral (2010) hayan omitido la importancia de esa información (pp. 42):

“Los depósitos de la quebrada Sardinias están ligados a tectónica reciente, aunque en el detalle es complejo ver si estos muestran evidencias de desplazamientos, debido a que son depósitos espesos y su estratigrafía caótica (sin estratificación) y grueso granular no es la indicada para la realización de trincheras. La realización de un estudio paleosísmico detallado no es recomendable, pues la información no sería determinante. Finalmente se debe mencionar que el escaso suelo formado sobre los depósitos es un indicador de una corta edad relativa de los materiales y por ende de sus rasgos de deformación.”

Al omitir la realización de estos trabajos de soporte que son necesarios para establecer de mejor manera la actividad de las fallas y que además ya contaban con metodologías bien establecidas en el estado del arte, incluso con trabajos realizados en nuestro país (como ejemplo, la caracterización de paleosismología de la Falla de Ibagué hecha por el Ingeominas en 2008, la incertidumbre en aspectos de sismogeneración continua, pues solo se encuentran opiniones y meras aproximaciones:

Debido a la dificultad para la realización de trincheras y las subsecuentes dataciones por las características de los materiales que componen los depósitos recientes, sólo es factible concluir a partir de los rasgos e indicios neotectónicos identificados, que el sistema de fallas Sardinias presenta una excelente expresión morfotectónica y tiene como mínimo un moderado grado de actividad.

OBSERVACIONES CON REFERENCIA A LO ESTABLECIDO POR ICOLD

Para tener un marco de referencia internacional, el Comité Internacional de Grandes Represas (ICold por sus siglas en inglés), estableció la necesidad de estudios detallados sobre las fallas geológicas, particularmente en las recomendaciones del Boletín 112³ (1998) denominado Neotectonics and dams,

³ ICold-International Committee on Large dams (1998). Neotectonics and dams. Bulletin 112.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 54 de 98	

que se presenta una metodología para investigación sobre la actividad de las fallas geológicas, la cual incluye:

- Determinación del sistema de fallas y rupturas

Debido a que la aproximación al potencial de ruptura de una falla que cruza la fundación de la presa es una de las características más complejas e importantes en el diseño de presas, las investigaciones deben incluir la totalidad del campo de la información y el trabajo de campo en geología, sismología, geofísica y geodesia, incluyendo la elaboración de trincheras, galerías y pozos exploratorios. También se menciona la importancia de la fotointerpretación detallada y/o la fotogrametría terrestre y la interpretación de imágenes de satélite.

Se explicita la importancia de enfocar en detectar trazos de fallas con posible actividad en el Holoceno (los últimos 12.000 años) pues dicha información es decisiva para la determinación del potencial de ruptura presente de las fallas geológicas.

- Determinación de actividad neotectónica

Implica inicialmente el análisis geomorfológico cualitativo de fotografías aéreas y mapas donde se deben registrar signos de erosión o depositación anómala (incremental), discrepancia en superficies comparativas (terrazas de ríos y lagos, llanuras aluviales, etc.). Esto debe seguirse de análisis cuantitativos de modelos digitales.

- Determinación de actividad tectónica reciente

Comprende el análisis de relaciones cronológicas entre el sistema de rupturas y las unidades geológicas afectadas por dicha ruptura. Se proponen métodos de análisis de poblaciones de fallas pertenecientes al área considerada y se destaca el estudio de perturbaciones en las formas superficiales del Holoceno: trazas de rupturas superficiales como la más violenta de las formas de tectonismo, así como otras manifestaciones como el creep a lo largo de líneas de falla.

Junto con la superposición estructural estratigráfica y geomorfológica, se sugieren técnicas isotópicas para la investigación de la temporalidad de los eventos tectónicos.

- Determinación de actividad contemporánea de las fallas

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 55 de 98	

Además de lo descrito en los numerales anteriores, la información histórica e instrumental completa el cuerpo de investigación acerca de la amenaza de rupturas asociadas por fallas geológicas en la fundación de la presa.

No caracterizar las fallas geológicas puede tener las siguientes implicaciones:

- Actividad sísmica natural y actividad sísmica inducida INESPERADAS con efectos de sacudimiento de las estructuras
- Efectos hidrogeológicos que incluyen la posible pérdida de almacenamiento
- Problemas de estabilidad de laderas
- Fenómeno de creep que puede influenciar los sitios de presa
- Ruptura de falla en la fundación de la presa que podrían ser de peligro para la seguridad de la presa

(Comité Internacional de Grandes Represas ICold, 1998)

Si bien el estudio de Woodward-Clyde Consultants – Integral Ltda. – ISA es anterior a la expedición del Boletín en comento, no es así para la totalidad de estudios realizados para el diseño de presa y la obtención de licencia ambiental. Por ello, para esos estudios se puede plantear:

Deficiencias en la determinación del sistema de fallas y fracturas

Las determinaciones de los tipos de falla solamente fueron realizados en el marco de los trabajos del año 1980, pero únicamente para las fallas principales. No obstante, no se han actualizado con trabajo de campo ni con la revisión de los sismos de la Red Sismológica Nacional de Colombia, lo cual permitiría establecer de una manera menos incompleta el campo de esfuerzos y definir un contexto para las deformaciones frágiles que caracterizan el macizo rocoso. Tampoco se han llevado a cabo determinaciones en fallas y fracturas de menor tamaño, como las de Mellizo y Tocayo, que han sido las que han causado problemas en las estructuras del proyecto, cuando es posible medir con brújula y obtener, además de aportes al campo de esfuerzos, ciertos criterios sobre la actividad de la falla en términos temporales gruesos (actividad posterior o anterior a la exhumación de las rocas).

Deficiencias en la determinación de la actividad tectónica reciente

Se llevaron a cabo dataciones para los informes de los años 70 para el proyecto Cañafisto. Hidroituango no ha remitido dataciones de actividad tectónica para las fallas que afectan este proyecto.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 56 de 98	

Deficiencias en la determinación de la actividad contemporánea de las fallas

Idem consideración anterior. Los estudios más recientes (2019) siguen mostrando los datos de los estudios de 1980.

Inexistencia de datos geológicos de campo

Puede verse que no existen datos geológicos sobre planos de fallas geológicas, ni caracterizaciones cinemáticas suficientes. No se encuentran datos medidos con brújula ni cuantificación de espesores de zonas de brecha o zonas de daño para cualquiera de las fallas geológicas. También preocupa la falta de trabajo de campo y de caracterización de las fallas de Espíritu Santo así como la de Santa Rita Este, las cuales se ubican a 10 km y 1,5 km de la zona de presa, respectivamente.

Falta de coherencia de los levantamientos tectónicos locales y regionales

Las fallas de Romeral, Espíritu Santo y Santa Rita muestran inferencias de movimientos que no son coherentes ni que se explican en términos del marco tectónico y su dirección de esfuerzos. La falla Naranjo – Sardinias, ubicada por Woodward – Clyde a menos de 10 km del a presa y calificada como activa, no es luego retomada en los estudios de detalle. Por otra parte, muchas de las fallas presentadas en los planos geológicos no son caracterizadas ni siquiera consideradas en el estudio de amenaza sísmica. Tampoco hubo avances en la conceptualización de sismicidad inducida respecto de los avances técnicos y científicos para ese tema.

Inexistencia de dataciones de actividad de las fallas

No se cumple con lo expuesto por el Comité Internacional de Grandes Represas en el sentido de determinar la edad de las deformaciones, aspecto clave para determinar su actividad sismogeneradora. Se determinaron edades para el proyecto Cañafisto y hubo correlaciones con materiales ubicados en inmediaciones de Hidroituango, pero no existen dataciones que hayan sido remitidas en los estudios revisados.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 57 de 98	

5. HIDROGEOLOGÍA

Es común pensar que varios de los problemas enfrentados en las obras civiles tienen total certeza, pero con respecto al flujo en fracturas no se tiene una metodología única que se capaz de predecir el flujo de un fluido con total certidumbre. Es común, entonces, en los estudios hidrogeológicos, y como parte de las simplificaciones que se hacen para entender el flujo de aguas subterráneas, suponer un medio homogéneo que considere zonas con variadas conductividades hidráulicas que representen las diferencias de fracturamiento (las cuales pueden tener efectos en escala de centímetro a kilómetro).

El flujo en el medio fracturado es de vital importancia al evaluar las condiciones de estabilidad del macizo rocoso, lo cual en parte es abordado por Hidroituango. En este caso existen variadas condiciones a tener en cuenta al momento de revisar la información suministrada a la submesa técnica:

- primero, se tiene la suficiente información (número de perforaciones, tipo de ensayos y distribución de las muestras);
- segundo, se está analizando adecuadamente la información y generando los modelos que representen lo mejor posible la realidad;
- tercero, los problemas que influyen en la estabilidad del macizo rocoso son adecuadamente considerados (o ignorados); y como es la temporalidad de los estudios generados.

A la luz de estas premisas se realiza la evaluación, teniendo en cuenta que los modelos construidos son dos principalmente, uno en la presa (que involucra fundación y estribos) y uno en el macizo rocoso de la margen derecha.

5.1 Cantidad y calidad de Información

5.1.1 Diseño

No existe sustento geológico enfocado a la hidrogeología, ni en los estudios básicos de diseño hasta 2010. La única información que se pudo consultar en este sentido y que da una idea de las características hidráulicas del medio y condiciones hidrogeológicas durante la fase de diseño son los estudios de impacto ambiental presentado por Hidroituango para obtener la licencia ambiental, EIA-2007⁴ y en modificaciones posterior (Hidroituango-Integral--

⁴ Hidroituango-Integral (2007). Estudio de Impacto Ambiental Hidroeléctrica Ituango Pescadero. Código documento Z:\2001-E-Ituango\EstAmbientales\05-Entrega Final\01-EIA\informe\F-PHI-EIA-C11-R0A-PC.doc.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 58 de 98	

2010⁵), en dichos estudios no se presenta el componente hidrogeológico pese a que es requerido por los términos de referencia de la ANLA (H-TER-1-01 de 2016).

5.1.2 Construcción y Contingencia

Dentro de los estudios realizados se puede diferenciar igualmente entre antes de la contingencia y después de la contingencia. Previo a la contingencia existe alguna información al respecto en Hidroituango-Integral-Solingral(2010b)⁶. El único documento hidrogeológico en sentido estricto que ha sido remitido es: Determinación del origen de las aguas infiltradas en el túnel auxiliar de desviación del proyecto hidroeléctrico Ituango elaborado por SHI Servicios Geológicos Integrales – Integral en agosto de 2017.

En Hidroituango-Integral-Solingral(2010b)⁷ solo se hacen algunas alusiones con respecto al flujo de aguas subterráneas como se ilustra en el siguiente párrafo:

“5.5.1.1 Tipos de roca a analizar

- *Roca sana, Roca sana, masiva, dura, donde se puede avanzar sin soporte en el frente. Las discontinuidades pueden ser desde planas rugosas hasta onduladas rugosas. Las paredes de las discontinuidades carecen en su gran mayoría de relleno y pueden presentar pátinas. **La excavación puede estar seca, presentar pequeños flujos de menos de 5 l/min ó infiltraciones altas a través de facturas que no afectan la estabilidad de la excavación. Dependiendo de la sección posee valores de Q mayores o iguales a 10.**” Pág 132. Hidroituango-Integral-Solingral(2010b)*

No obstante, relacionar directamente el flujo en el medio con la calidad del macizo no es lo más adecuado en un medio tan fracturado. Adicionalmente, se menciona para el caso de definir el revestimiento de los tuneles lo siguiente con respecto a la sobre presión:

⁵ Hidroituango-Integral-Solingral (2010a). Complementos al Estudio de Impacto Ambiental Hidroeléctrica Ituango. Código documento DISEÑO DETALLADO\ITUANGO\D-PHI-EAM-EIA-CAP05-C0002

⁶ Hidroituango-Integral-Solingral(2010b). CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA. Numero de documento: **D-PHI-CCE-ADM-C0082.**

⁷ Hidroituango-Integral-Solingral(2010b). CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA. Numero de documento: **D-PHI-CCE-ADM-C0082.**

“5.5.2.1 Parámetros geotécnicos

- **Cargas hidrostáticas y/o hidrodinámicas:** Para el diseño de túneles húmedos se determinan las presiones internas de operación, presiones debidas a fenómenos transitorios (golpe de ariete); para ambos tipos de túneles se obtienen las presiones externas debidas a flujos hidráulicos en el suelo y la roca. La presión de poros se determina mediante el programa Phase2.” Tomado de Hidroituango-Integral-Solingral(2010b)

Dicho programa calcula la distribución del agua en un macizo asumiendo que el medio es un continuo, y no es claro en todo caso los parámetros que se consideran alimentar los modelos de flujo de aguas subterráneas.

Posterior a la contingencia se presenta tres informes orientados a hidrogeología, uno de ellos orientado a evaluar el flujo de aguas subterráneas en el estribo derecho (EPM-Integral, 2019⁸) teniendo como base 141 pruebas de bombeo tipo Lugeon. el segundo de estos estudios enfocado en entender el flujo en la presa (EPM-Integral, 2016⁹) agrupando los materiales en 7 capas con propiedades que se indican en la siguiente tabla:

Elemento	Permeabilidad (m/s)
IC-IIA	1×10^{-4}
IIA	1×10^{-6}
IIB	1×10^{-6}
Fallas	1×10^{-5}
Enrocado	$K_x = K_y = 1 \times 10^{-1}$ $K_z = 1 \times 10^{-2}$
Núcleo	1×10^{-8}
Cortina de inyección	1×10^{-7}

Tabla 1. Valores de conductividad hidráulica para los elementos del modelo. Tomado de EPM-Integral(2016) Tabla 1.3.

⁸ EPM-Integral (2019), Proyecto hidroeléctrico Ituango flujo macizo margen derecha, documento no. I-I-2194-Res0037_N3_info1

⁹ EPM-Integral (2016), Consideraciones iniciales sobre análisis de flujo a través de la presa y su fundación. Documento no: I-2194-AnálisiFlujo-PresaVMOD-110716

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 60 de 98	

De esta tabla se justifica como base las 141 pruebas Lugeon mencionadas anteriormente, pero no se indica de donde se obtiene los parámetros del enrocado, núcleo y cortina de inyección.

El último de estos estudios se realizó teniendo en cuenta la huella química del agua (SHI-Integral, 2017¹⁰), siendo este estudio redundante en el sentido que comprueba que las fracturas dominan el flujo de las aguas subterráneas en esta área. Adicionalmente, destaca que los tiempos de residencia del agua en el medio son cortos, lo cual se asocia con recargas y drenajes rápidos. Sin embargo, no se aborda el análisis de las facturas en términos de geometría, distribución espacial e interconexión.

5.2 Entendimiento del problema

En este caso se tiene dos posibles problemas que se van ver ligados directamente con la estabilidad del macizo rocoso, de una parte, las sobrepresiones generados por el agua subterránea y de otra parte la erosión interna. En cuanto a esta última, diversos autores (BRW¹¹ y Xiao¹²) ilustran la complejidad del problema y como el tema de la erosión interna presenta avances en el estado del conocimiento preliminares. Por tanto es común encontrar metodologías empíricas (comparación de parámetros con curvas o índices mínimos, como los citados por EPM Benson(1989), (Cruz, Materón & Freitas, 2014) las cuales resultan muy vagas y tienen total incertidumbre.

Por otro lado, en la modelación de aguas subterránea en medios fracturados es de vital importancia conocer la red de fracturas, lo cual lleva a que se den zonas preferenciales de flujo. En este sentido se tienen dos posibilidades: 1) que se haga una modelación muy detallada considerando redes de fracturas discretas, para lo cual es necesario un número significativo de datos de fracturas (abertura, persistencia, orientación); 2) que se modele considerando un medio continuo en donde se consideran volúmenes que representa implícitamente las diferencias de fracturamiento, en cuyo caso es necesario conocer la orientación preferencial a fluir el agua y ver eventualmente si se puede incluir esto en los modelos (ver Singhal y Gupta (2010)¹³).

¹⁰ SHI-Integral (2017). Determinación del origen de las aguas infiltradas en el túnel auxiliar de desviación del proyecto hidroeléctrico ituango. Informe final.

¹¹ Bureau of reclamation (2015)n, 4. Internal Erosion risks for embankments and foundations. Capitulo 4.

¹² Xiao (2018), Particle transport in porous media in geotechnical engineering: a review of challenges and cross-disciplinary applications. Innovations ingeotechnical engineering.

¹³ Singhal y Gupta (2010), Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 61 de 98	

5.2.1 Inferencias basado en los datos levantados

Es claro en la descripción del medio geológico, detallada en Hidroituango-Integral-Solingral(2010b), que los sistemas de discontinuidades son de dos tipos principalmente: la foliación del medio(discontinuidades generadas por orientación de los cristales en un sentido preferencial) y fracturas (asociadas éstas a esfuerzos tectónicos), a este respecto se menciona en el documento:

- El sistema estructural de discontinuidades corresponde a la foliación. Este sistema es el de mayor continuidad, menor espaciamiento promedio y mayor persistencia. La rugosidad varía con la textura, cuando compromete material de grano fino es lisa, mientras que en sectores grueso granulares es rugosa, en ambos casos desde planar hasta ondulada.
- Un sistema con dirección NS con buzamientos subverticales, siempre convergiendo hacia el río Cauca. Este sistema define las paredes del cañón y controla el cauce del río.
- Un sistema de menor importancia presenta dirección este - oeste con buzamientos verticales a subverticales, y sirve de control de los cauces y caños del sector: quebrada Tenche, Burundá, y otros menores.
- Un sistema con dirección NS y buzamiento 60° W (.....) ^{SEE}La falla Los Mellizos cruza la foliación, con disposición general N50°-70°E/60°-70°SE (...). Su expresión geomorfológica es mayor que la de la falla Tocayo. ^{SEE}En la galería 3 sobre la abscisa 400 m fue interceptada una falla que coincide con la tendencia y características estructurales de la cizalla en superficie de la falla Tocayo, de unos **3 m de espesor**. (...), aflora una segunda falla, correlacionable con la falla Mellizos, con unos **5 m de espesor**,(.....). Pág 43 vol 3.

De estas fracturas es importante tener en cuenta que tienden a ser muy verticales (situación propia de deformación por cizalla) y que los espesores de las zonas de daño en el caso de las fallas son de orden métrico. Complementado esto se encuentra a varias profundidades la presencia de fracturas de variaba intensidad la cual se detalla en las perforaciones suministradas en los anexos de 1978, de las cuales se ha digitalizado los resultados en términos de RQD y REC que se indican en la siguiente figura:

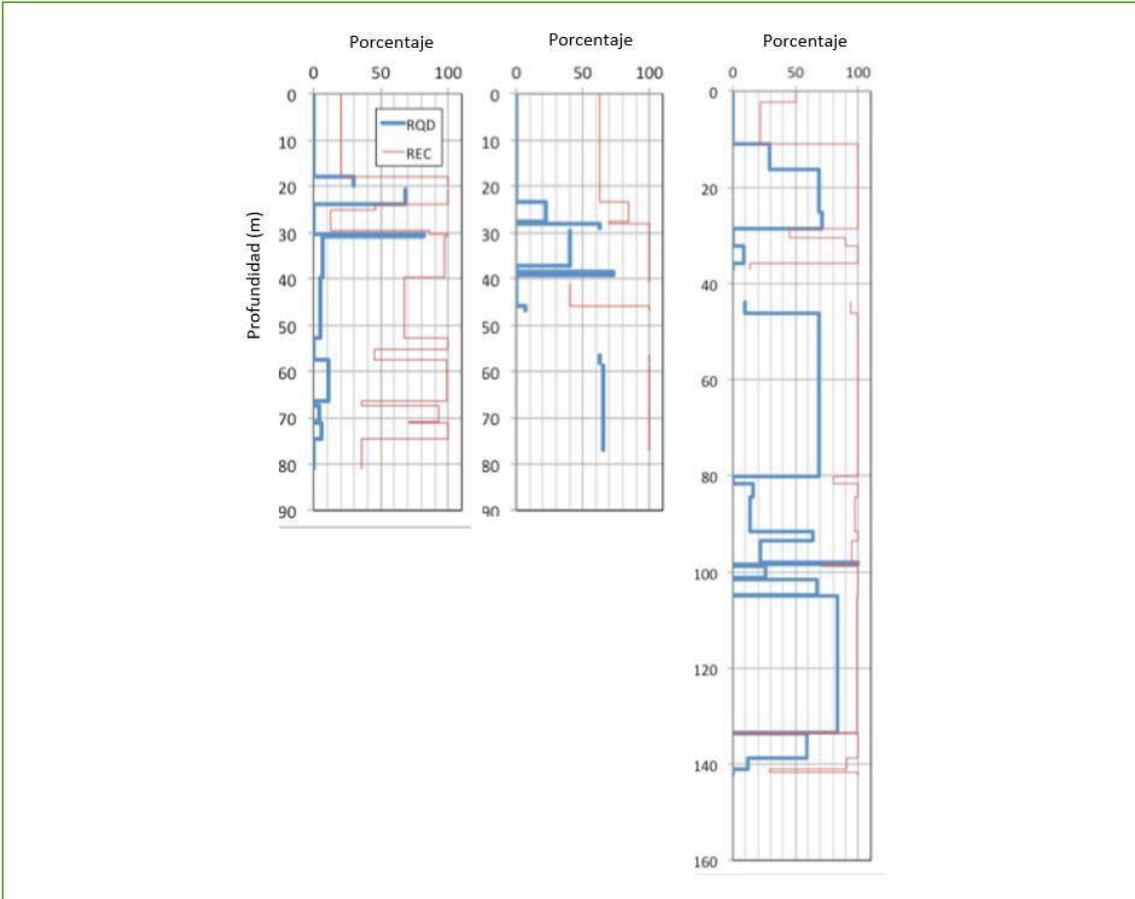


Figura 1. RQD y REC¹⁴ de perforaciones realizadas en 1982, de izquierda a derecha se tiene, F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-1, F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-1A, F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-9.

No se evidencia en estas perforaciones una tendencia a mejorar el RQD con la profundidad de hecho se evidencia intercalación de zonas de menor y mayor fracturamiento. Estas evidencias indican el tipo de modelo a considerar, por tanto se esperaría un modelo que represente estos intercalamientos, sin embargo, en la siguiente figura se puede ver uno de los modelos considerados para la evaluación de la estabilidad geotécnica (la distribución en capas se considera igualmente en los modelos hidrogeológicos).

¹⁴ El RQD es un índice que mide la intensidad del fracturamiento mientras menor sea más fracturado se encuentra el macizo rocoso, el REC indica la cantidad de material recuperado en la perforación. De estos parámetros resulta más representativo el RQD para el caso de Hidroituango.

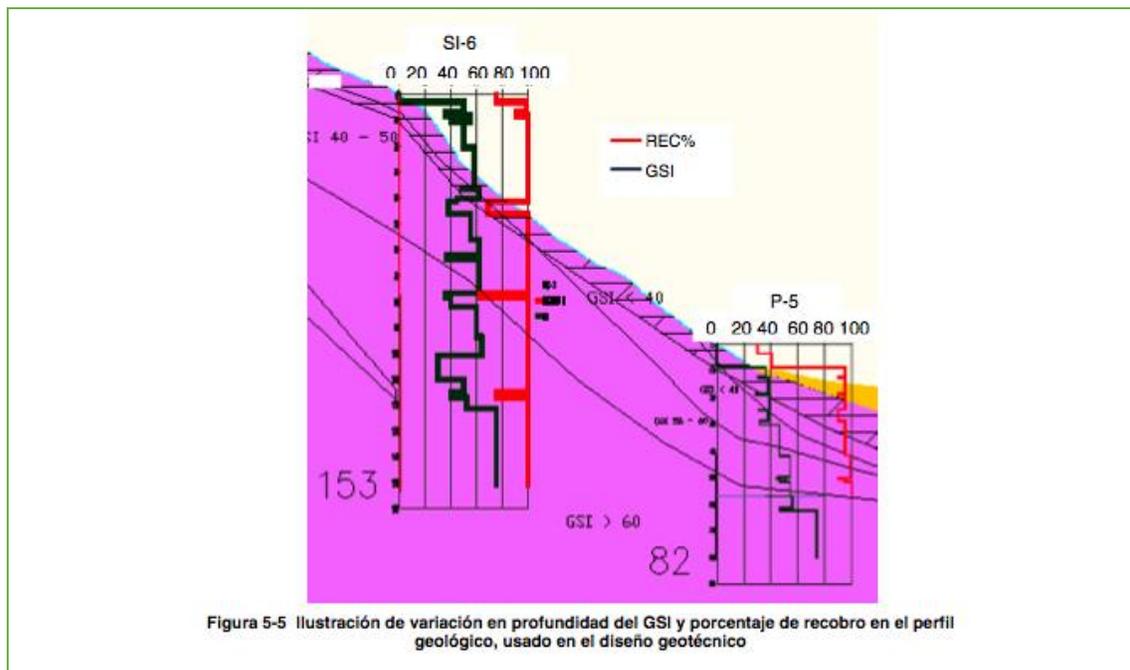


Figura 2. Ejemplo de modelos geológicos-geotécnicos construidos a partir de GSI¹⁵ y REC, En el documento se indica una tendencia a mejorar las características mecánicas con la profundidad, indicando roca sana a más de 200m (horizonte 3). Tomado Hidroituango-Integral-Solingral(2010b). Pág. 95.

Es de resaltar que el índice usado para caracterizar el medio es inadecuado, de hecho, no se evidencia las intercalaciones entre diferentes grados de fracturamiento. Este patrón que presentan los perfiles se encuentra asociado a varios factores: la metodología que se usó para clasificación del macizo rocoso (Deere y Patton), la variación del GSI con la profundidad (ver Figura anterior), y las pruebas de carga puntual¹⁶. Estos factores llevan a concluir que las condiciones mecánicas mejoran con la profundidad, sin embargo, en este caso lo más importante es representar adecuadamente el grado de fracturamiento (representación de zonas de diferentes conductividades hidráulicas) o entender la red de fracturas del medio.

Adicional a estas características identificadas de este estudio, ya luego de la contingencia, se detalla en el informe de Integral conducciones 1 y 2¹⁷ la

¹⁵ el GSI es un índice de calidad del macizo, mayor detalle se encuentra en el componente de geotecnia.

¹⁶ la prueba de carga puntual se realiza sobre la masa de roca y no tiene en cuenta la interacción con las fracturas que hay en el macizo.

¹⁷ Integral conducciones 1 y 2, Análisis de la socavación en la zona de las conducciones 1 y 2. Anexo a la comunicación D-PHI-CCE-ADM-1-C4303.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 64 de 98	

existencia de vacíos en la roca identificados directamente por medio de perforaciones, en el documento se encuentra menciones como las siguientes:

“Perforación P-EX-GD-PZP-02: Localización: Ramal 1

Azimut: 290°

Inclinación: 80°

Longitud explorada: 51,60 m Hallazgos:

- *A partir de 18 m se registra salida de agua a nivel del inicio del pozo.*
- *A partir de 50,90 m se detecta un vacío de 0,7 m con presencia de agua a presión.*
- *Se finaliza debido a que la presión del agua no permite continuar”*
tomado de Integral conducciones 1 y 2 pag. 5

Estas de una parte dan una idea del tamaño de vacíos generados (escala de centímetros) y adicionalmente indica un fenómeno de inestabilidad muy importante, el transporte de sedimento y fragmentos de roca producidos por el flujo de agua a altas velocidades en el medio. En este sentido debería como mínimo hacer un estudio y modelamiento que considere este problema.

En cuanto a la red de fracturas se encuentra en este mismo informe los siguiente:

“1.2 Hipótesis preliminares de hallazgo:

** Sobre-excavación o deterioro del macizo rocoso cercano a los pozos de conducción 1 y 2.*

** Presencia de diaclasas abiertas (situación observada durante la excavación de las conducciones superiores con aperturas de hasta 30 cm) o cizalla con lavado de finos, más no pérdida de macizo rocoso in-situ(...).”* Integral conducciones 1 y 2 pág. 6

En el análisis posterior se consideran las oquedades (grandes vacíos) en la evaluación de la estabilidad geotecnia. Esto último es en lo que se ha centrado el análisis de estabilidad geotécnico, sin embargo, el último apartado llama la atención puesto que indica la presencia de diaclasas abiertas en escala de centímetro (30 cm), lo que lleva a cuestionarse sobre la forma en que las zonas preferenciales de flujo han sido consideradas en los modelos hidrogeológicos y como se han estimado las propiedades hidráulicas.

Igualmente, luego de la contingencia en EPM-Integral (2019b)¹⁸ se resalta las características y distribución espacial de los vacíos encontrados en el macizo rocoso estos se ilustran en la siguiente figura:

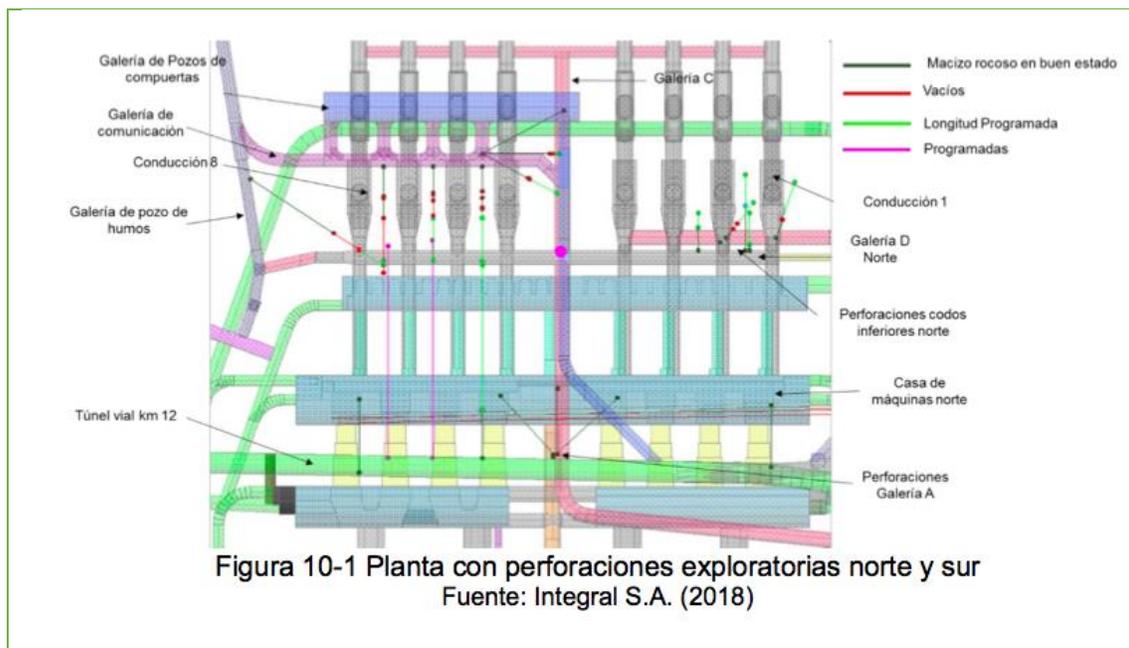


Figura 3. Planta con perforaciones exploratorias norte y sur, Tomado de EPM-Integral (2019)

Esto da una idea de la distribución espacial de los vacíos que coincide con lo evidenciado en el informe de las conducciones 1 y 2.

5.2.2 Diseño

No existe sustento geológico enfocado a la hidrogeología, ni en los estudios básicos de diseño hasta 2010 ni en lo presentado durante la fase de construcción/contingencias.

¹⁸ EPM-Integral (2019b), PROYECTO HIDROELECTRICO ITUANGO DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO CONTINGENCIA. Documento no: I-I-2194-062018-01-R2. Vol 1

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 66 de 98	

5.2.3 Construcción y Contingencia

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LAS AGUAS INFILTRADAS EN EL
TÚNEL AUXILIAR DE DESVIACIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO
ITUANGO
SHI SERVICIOS GEOLÓGICOS INTEGRALES – INTEGRAL
AGOSTO 2017

3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Durante este estudio no se realizará un levantamiento de información geológica e hidrogeológica en campo, sin embargo mediante la información secundaria disponible se enmarcará el conocimiento de la zona para correlacionar la proveniencia de los flujos al interior del túnel con las características del macizo rocoso, esto complementado con datos de hidrogeoquímica, permite construir hipótesis acerca las filtraciones de agua en las obras del proyecto. En este capítulo se retoma y analiza la información más relevante referente a dichos temas, con el fin contextualizar la problemática dentro del marco hidrogeológico.

Dado que ya se analizó la información geológica que se generó en el proyecto, no se reiterará sobre las deficiencias y omisiones, pero sí es evidente que con esa base de conocimiento precaria, particularmente en las fracturas, que se constituyen en los espacios del agua en el tipo de roca que se estudia, es difícil obtener hipótesis para disminuir las incertidumbres respecto al agua subterránea y sus implicaciones en la estabilidad y en el impacto ambiental del proyecto. Llama la atención que el informe no establezca la escala de trabajo, ni para su acercamiento a las aguas subterráneas ni que mencione las escalas de los insumos geológicos y geomorfológicos.

3.1.1 Estructuras geológicas

Aunque el macizo rocoso es cristalino su permeabilidad primaria es muy bajas, as características estructurales locales cobran importancia debido a que esta son las que permiten el flujo de agua en el medio, brindando una permeabilidad secundaria al macizo que es el la (sic) causante de los flujos observados al interior del túnel. El marco estructural está definido por la presencia de las siguientes estructuras geológicas: foliación, diaclasas, fallas Tocayo y Mellizo, y fallas/zonas de cizalla satélites a Tocayo y Mellizo (Hidroeléctrica Ituango S.A., E.S.P., 2016).

Aquí se pone de presente que son las discontinuidades (foliación y fallas geológicas) las que deben ser estudiadas para acercarse al entendimiento de los

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 67 de 98	

espacios del agua en el tipo de roca que ha sido afectada por las obras en el caso de Hidroituango. No obstante, se reitera que para el diseño, nunca se contó con un conocimiento básico de dicho tipo de estructuras y que en la actualidad, la base de conocimiento geológico no muestra un avance que se apareje con el reto del riesgo del proyecto. La deformación frágil de los macizos rocosos (fallas, que incluyen zonas de cizalla, y diaclasas) responde a una configuración de esfuerzos tectónicos que sigue siendo ignorada y omitida incluso en los estudios más recientes (solamente aparecen soluciones teóricas de mecanismos focales en los estudios de Woodward-Clyde de 1980 pero muestran grandes contradicciones) y el número de datos de estos rasgos que han sido medidos sigue siendo insuficiente de acuerdo con lo establecido por autoridades en el tema (Hoek & Brown, 1980. Underground excavations in rock) y la caracterización de fracturas no se ha hecho en función del estudio de aguas subterráneas.

Por parte de EPM en el caso de la presa (EPM-Integral, 2016) se busca garantizar que el enrocado de la presa abata el nivel freático de tal forma que no se genere un proceso de tubificación. Considera para su modelación un medio continuo que incluye parte de las laderas, la fundación de la presa (hasta 50 metros de profundidad hasta donde se encuentra la cortina de inyección) y la presa. Como se indica en la sección 1.3.2. de dicho estudio, se considera una división en capas que proviene de la geotecnia o división en capas en función de la meteorización, el modelo se puede ver en la siguiente figura.

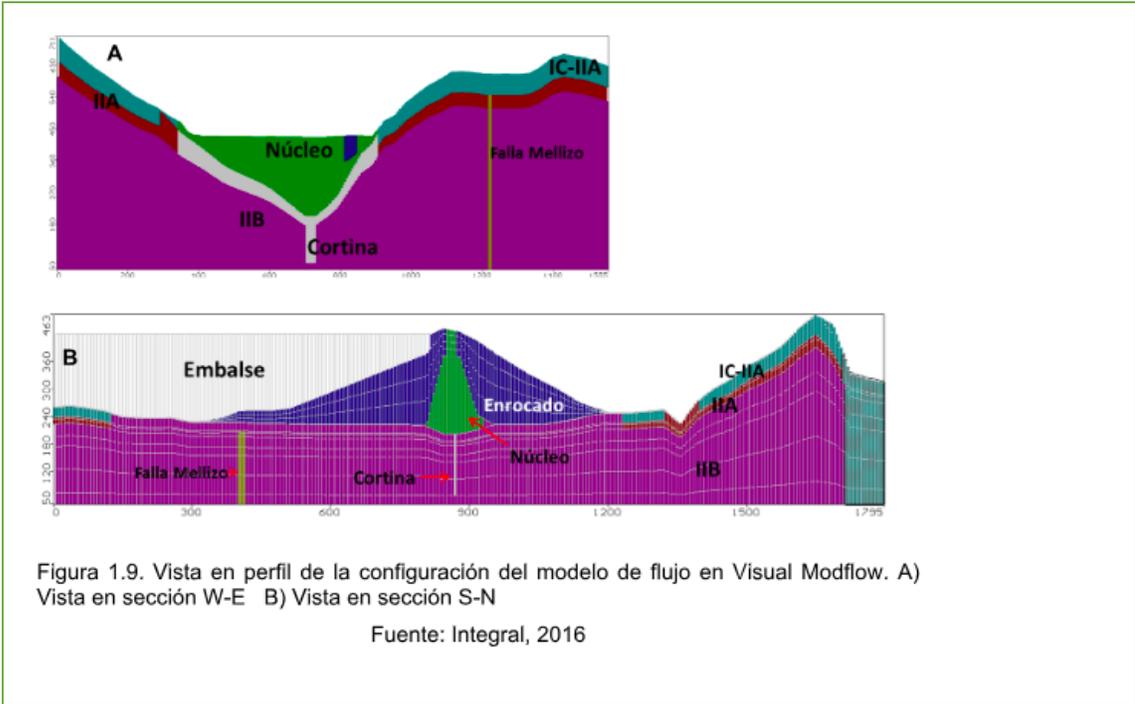


Figura 5. Vista del modelo construido en Vmodflow. Tomado de EPM-Integral (2016)

A estas capas es necesario definirle las propiedades hidráulicas y la orientación preferencial del flujo, siendo esta una de las principales incertidumbres en un medio fracturado ya que la dirección en que se puede mover una gota de agua dependerá de la conectividad del medio y la orientación de las fracturas. Adicionalmente, con pruebas tipo Lugeon se obtiene una conductividad hidráulica representativa del volumen estudio sí direcciones de flujo preferencial . A este respecto se indica en el documento lo siguiente:

“Adicionalmente, en la dirección ky, la cual representa la dirección de las principales discontinuidades y los planos de foliación, se le otorgó una permeabilidad 10 veces a la dirección kx”. pág. 13 EPM-Integral (2016)

Esto ilustra cómo la conductividad hidráulica en la dirección preferencial en que están orientadas las fracturas es asumida. Adicionalmente, para poder utilizar los modelos construidos es necesario realizar una fase de calibración, aunque los datos base son muy pocos, estos coinciden en un puñado de piezómetros ubicados en la periferia de la presa (6 piezómetros). En este sentido se debe mencionar que todo modelo se puede calibrar pero lo más importante es la

construcción de uno que trate de representar las condiciones imperantes en la zona. En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos por los modelos calibrados a lo largo de la presa.

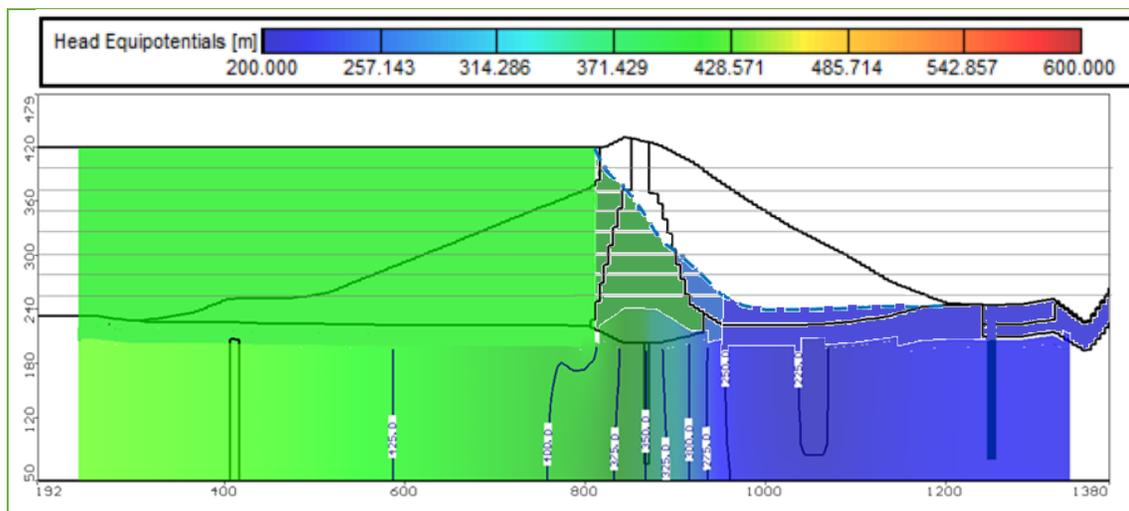


Figura 6. Líneas de potencial, tomado de EPM-Integral (2016),

En estos perfiles no se evidencia el grado de heterogeneidad del medio es por esto que las velocidades que puede alcanzar el agua son muy bajas ($4,7 \times 10^{-6}$ m/s tomado de informe pág. 26), al no predecir estas zonas preferenciales de flujo no se puede prever la erosión interna del medio, y de especial preocupación la erosión en la función de la presa.

Adicional a este análisis hidrogeológico, desligado totalmente del modelo de la presa, se presenta un modelo hidrogeológico del estribo derecho (EPM-Integral (2019)). inicialmente, el estudio en cuestión menciona lo siguiente con respectos a las evidencias encontradas en otros estudios:

*“Una vez **cerradas las compuertas 1 y 2**, se solicitó a la empresa ARPLAN realizar un levantamiento LIDAR en la oquedad norte. (...) Posteriormente, como complemento, se realizaron inspecciones **fílmicas y visuales en las que se observó que, a pesar de las dimensiones de la oquedad, la incidencia del flujo antes del cierre definitivo de las compuertas y de los cambios en los regímenes de presión que le dieron origen, las condiciones geomecánicas del macizo rocoso remanente no difieren en gran medida de lo visto durante la excavación de los pozos de presión 1 y 2(...)**”*

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 70 de 98	

*Aunque se identificaron infiltraciones, no son a presión, porciones de estas provienen de las compuertas y no se evidenció arrastre de material (Figura 2.4). Lo anterior, aunque no es una medida directa, se ve reflejado en el hecho de que en los aforos realizados en las conducciones inferiores 1 y 2, **la tendencia ha sido relativamente estable con medidas variando entre 10 l/s y 15 l/s, y entre 20 l/s a 30 l/s respectivamente para ambas conducciones** (Figura 2.4 a Figura 2.5). “Sección 2.1.1*

Es de resaltar que estas medidas son registradas una vez se cierran las compuertas 1 y 2, con flujos importantes y que representa condiciones en las que no se encontraría normalmente el macizo. En este sentido se restringe el análisis de las oquedades a zonas muy específicas, pero queda la duda de por qué estos vacíos no se encuentran en el macizo, en cuanto a esto se menciona:

- *“**En varias de las perforaciones ejecutadas desde niveles superiores (galería de acceso a galería de pozos de compuertas, galería de comunicación, galería de humos, galería A, galería D) hacia abajo, se han reportado intercalaciones entre vacíos y roca, lo que evidencia un reacomodamiento de bloques al interior del macizo, sin embargo, también se han realizado auscultaciones que no reportan vacíos en el macizo rocoso, lo que permite inferir un límite aproximado para la zona que fue perturbada durante los eventos asociados a la contingencia. (...)**”* pág. 10 EPM-Integral (2019)

Esta heterogeneidad inherente al medio fracturado, intercalación de zonas muy fracturadas o incluso abiertas con zonas con menor grado de fracturamiento, evidenciada en las perforaciones (visualmente y con RQD) no se evidencia en los resultados de las 141 pruebas hidráulicas tipo Lugeon¹⁹. Si bien se tiene un gran número de pruebas, es desconcertante que se definan sólo tres áreas en el macizo rocoso y tomen los máximos de las pruebas encontradas, como se puede ver en la siguiente tabla:

¹⁹ En cuanto a estas pruebas se debe señalar que estas son un promedio de una zona específica de la perforación, ya que el método consiste en ingresar agua a alta presión en la perforación y medir los cambios de presión necesarios para inducir un flujo. Introducir esta agua requiere de obstruir en la parte superior el pozo, el límite en donde se coloca esta obstrucción varía pero puede ser de orden métrico (1-10m). Además, por la rapidez con que se realiza la prueba el resultado es representativo de una zona muy local.

Zona	Promedio (cm/s)	Promedio (m/s)
Macizo	9,54E-06	9,54E-08
Zona de influencia fallas	7,70E-05	7,70E-07
Fallas	2,85E-04	2,85E-06

Tabla 2. Valores de permeabilidad pruebas Lugeon valores promedio por zona/grupo. Tabla 3.4 EPM-Integral (2019) Tabla 3.4

Zona	(cm/s)	(m/s)
Macizo	2,21E-05	2,21E-07
Zona de influencia fallas	3,91E-05	3,91E-07
Fallas	1,60E-04	1,60E-06

Tabla 3. Valores de permeabilidad pruebas Lugeon valores máximos por zona/grupo. Tomado de EPM-Integral (2019) Tabla 3.5

No se da mucho detalle de las áreas, pero la mayor cantidad del estribo derecho podría considerarse macizo, puesto que en la zona solo se identifican algunas zonas de fallas que en general son zonas restringidas a líneas en los modelos. No se evidencia consideración alguna con respecto a las diaclasas abiertas y vacíos detectados en la exploración (fuera de las oquedades). Estas consideraciones llevan a que los resultados sean muy homogéneos en el sentido de que no se ven zonas en que el flujo tiende a canalizarse tal y como se muestra en la siguiente figura:

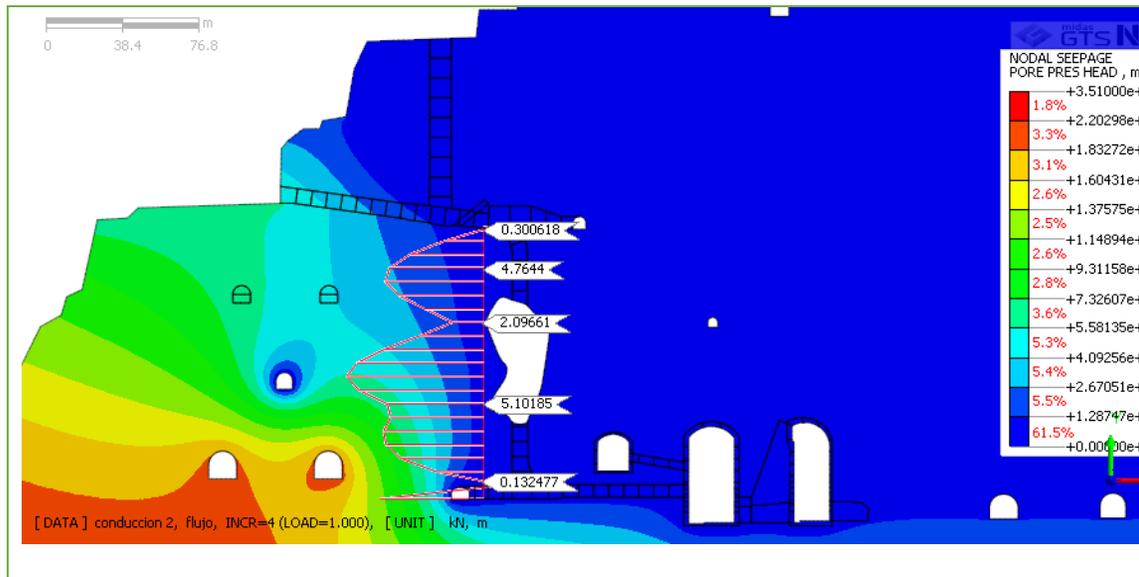


Figura 7. Cabezas de presión de poro en los alrededores de la oquedad norte (pozos 1 y 2)-condición actual. Tomado de EPM-Integral (2019) Figura 4.2

Al ser el resultado tan homogéneo y en cierta forma predecible (flujo hacia las excavaciones), estos resultados no dan cuenta del potencial que tiene el medio de erosionar internamente el medio. De hecho, en los escenarios que incluyen la oquedad parecería que ninguna está expuesta a altas velocidades del medio. Adicionalmente, en el informe se presentan modelos de tres dimensiones para predecir el volumen que debe a ser drenado de las obras, sin embargo, presenta las misma deficiencias modelos muy homogéneos en los que no se hace un esfuerzo por predecir la distribución del flujo y canalización en el macizo. Ligado con este tema, erosión interna, se encuentra lo siguiente:

*“En la condición a largo plazo, considerando los niveles más críticos, la estructura que mayor gradiente soportaría (después de reparada la oquedad) es la galería de construcción inferior de casa de máquinas. **Se calculan gradientes del orden de 12,3 m.c.a/m en algunos puntos del hastial occidental de dicha galería, en los demás puntos del contorno se estiman gradientes variando entre 7 y 9 m.c.a/m.**” (ver figura 4.6 EPM-Integral (2019))*

Con respecto a estos gradientes y el potencial de generar inestabilidad en el medio, únicamente se hace una comparación de la calidad del macizo rocoso (RMR).

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 73 de 98	

5.3 Hallazgos de los estudios de Hidrogeología.

Teniendo en cuenta la temporalidad de los estudios, se evidencia que análisis hidrogeológicos de detalle se tiene a partir de 2010, teniendo en cuenta la información consignada en el EIA (con fechas desde 2007) y la información de detalle suministrada por EPM (con fechas desde 2010 hasta 2019), igualmente, dentro de la información suministrada por EPM se ve una calidad de información antes de la contingencia y luego de la contingencia. Todo esto indicaría que debido a la falta de estudio del régimen de flujo en el medio fracturado se actuó ignorando parte de la problemática (en la fase de diseño), en algunos casos este desconocimiento continúa a día de hoy en especial en términos de erosión interna del macizo rocoso de fundación de la presa y estribos. En detalle se puede mencionar con respecto a cada una de los sectores afectados por el proyecto que sigue.

- Macizo rocoso correspondiente a la cimentación de la presa y cuerpo de la presa

El flujo de aguas subterráneas puede erodar la cimentación de la presa, en este sentido EPM presenta un estudio que aborda parcialmente este tema (EPM-Integral, 2016), de este se puede concluir, con base en lo analizado previamente, que hay una incapacidad en representar adecuadamente el grado de heterogeneidad del macizo rocoso (Intercalaciones de zonas muy fracturadas con zonas menos fracturadas), así como insuficiencia de información puesto que existen parámetros hidráulicos definidos cualitativamente (conductividad vertical 10 veces la horizontal). Todo esto lleva a que los resultados obtenidos en términos de presiones, velocidades y áreas saturadas se encuentren desligados del proceso que impera en la zona (flujos concentrado en algunas zonas, oquedades en el macizo rocoso etc.) afectando por tanto la capacidad de estimar la tubificación (arrastre de material de la cola de la presa) y erosión interna de la función de la misma (pese a la existencia de una inyección impermeabilizante)

- Macizo rocoso correspondiente al estribo derecho de la presa

Este es el foco principal de mucha de la información con que se contaba, se puede decir al respecto que se tiene información en términos de pruebas hidráulicas y datos de RQD, pero esta información es usada parcialmente (se consideran únicamente los máximos de la conductividad) haciendo simplificaciones tan fuertes que los modelos construidos se desligan de la realidad (los modelos no perciben adecuadamente las fracturas), lo cual lleva a que la incertidumbre y en cierta forma precisión de las estimaciones sea mínima. Puntualmente, esto lleva a que no se identifique zonas preferenciales de flujo que

ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA, HIDROGEOLOGÍA Y GEOTÉCNICA RELACIONADA CON EL MACIZO

ROCOYO Y CON LA ESTABILIDAD DEL PROYECTO HIDROITUANGO

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 74 de 98	

están directamente ligadas con las oquedades encontradas en las perforaciones, esta incertidumbre continúa hoy en día.

- Macizo rocoso correspondiente al estribo izquierdo de la presa.

No se tiene información suficiente para establecer características de flujo de las aguas subterráneas de la margen izquierda, esto es abordado someramente en el estudio de flujo de la presa (estudio flujo en la presa)

- Macizo rocoso en el área de influencia del embalse.

No se tienen datos

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 75 de 98	

6. GEOTECNIA RELACIONADA A LA ESTABILIDAD

Son los aspectos geotécnicos relacionados con estabilidad los que brindan luces respecto de los alcances de las falencias en las diferentes fases del proyecto y que han sido evidentes en los procesos de inestabilidad identificados en los dos estribos de la presa, los túneles de captación y casa de máquinas y en el cuerpo mismo de la presa.

El presente numeral presenta los hallazgos relacionados con esta temática, agrupando los hallazgos identificados y tratados en el capítulo de geología e hidrogeología, y cuantificando las posibles incidencias de éstos hacia futuro.

6.1 Cantidad y calidad de Información

6.1.1 Diseño

Los estudios realizados y entregados a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales presentan muy poca de la información base que a la fecha estaba disponible para la realización de los diseños. Los diseños y análisis presentados están en una escala de prefactibilidad y en el mejor de los casos en escalas de factibilidad.

La Contraloría General de la República en el informe entregado en agosto de 2018²⁰ relaciona parte de estos hallazgos y comenta de forma puntual:

*(...) A modo de síntesis, **dentro del EIA ningún Impacto Ambiental -IA- es crítico**, no se valora el IA por cambio en la calidad del agua, no se hace la contrastación CON/SIN proyecto, no se realiza una estimación de Ecosistemas Estratégicos (como el Bosque Seco tropical - BsT), etc., lo cual a juicio de la CDMA-CGR es una deficiencia técnica muy seria.*

(...) El Ministerio de Minas y Energía -MME-, señaló que la Comisión de Regulación de Energía y Gas -CREG- a través de una auditoría externa a cargo de Deloitte Asesores y Consultores Ltda., realiza un seguimiento estrictamente al cumplimiento del cronograma de obras y actividades del proyecto. En dicha Auditoría la revisión del componente ambiental se ha realizado sin el rigor requerido y sobre los hechos reales, como puede

²⁰ Informe auditoría de cumplimiento: gestión de las autoridades ambientales en el proceso de licenciamiento proyecto hidroeléctrico Ituango ADS-ANLA –CORANTIOQUIA –CORPOURABA con corte a mayo de 2018. Agosto 2018 .Contraloría General de la República.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 76 de 98	

observarse en los “Informes de la Auditoría a la Obligación de Cumplir con la Curva S y el Cronograma para la Construcción y Puesta en Operación Comercial de la Hidroeléctrica Ituango”.

*(...) la revisión realizada por la Auditoría externa Deloitte, contratada por MINMINAS, carece de rigurosidad y NO presento la información que correspondiera a la realidad del proyecto, especialmente frente al cumplimiento ambiental del proyecto. Un análisis de los dos pronunciamientos de la ANLA²¹, mencionados anteriormente, hubiese permitido a la Auditoría evidenciar un grave incumplimiento de la legislación por parte del proyecto Hidroituango (**inicio de obras del Sistema Auxiliar de Desviación, sin los permisos ambientales requeridos – Modificación de la licencia**), teniendo en cuenta que era de pleno conocimiento por parte de la Auditoría, el grado de avance de las obras del SAD.*

*(...) Al verificar los TdR de código HE-TER-1-01 de 2006, adoptados mediante Resolución 1280 del mismo año, se desprende que **NO se cuenta con Estudios Detallados para Estimación de Factores de Riesgos por Fallamiento y Geológico y Neo-tectónica** en el EIA para estos Proyecto Hidroeléctricos. Este aspecto, aunado con lo señalado en el numeral anterior sobre la ausencia de Control y Vigilancia Técnico-Operativa de este tipo de proyectos **constituye una seria falencia para la toma de decisiones sobre estos y para su posterior seguimiento y control.***

En el numeral 1.8 (página 22 a 28) la CGR menciona: (...) *Este riesgo, sumado a la inestabilidad, profundidad y alta pendiente de los taludes, no fue estudiado en forma adecuada.*

b. Los puntos relacionados con el peligro potencial de falla de la presa, que tienen incidencia grave sobre la emergencia actual, no fueron objeto de análisis adecuado, ni se actualizaron a partir de la elaboración del Informe de Diligencia Debida en comento; ellos son:

²¹ Auto No. 1784 del 16 mayo del 2016, en el cual la autoridad ambiental (ANLA) **negó la modificación de la licencia ambiental, para la construcción de las obras del SAD.**

Resolución 1139 del 30 de septiembre de 2016, por la cual se modifica la licencia ambiental otorgada mediante Resolución 0155 de 2009, autorizando la construcción del SAD.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 77 de 98	

- *El riesgo de falla por ondas generadas dentro del embalse por derrumbes de gran magnitud en las paredes del vaso: Por lo menos dos estudios geotécnicos realizados para el proyecto demuestran que esos derrumbes pueden ocurrir en cualquiera de las dos márgenes y en cualquier punto a lo largo del vaso que es bastante largo, (79 Km).*
- *Como lo señala el informe de Diligencia Debida, los cálculos realizados son insuficientes en cuanto a la magnitud de la amenaza resultante, aún para el análisis del único derrumbe teorizado, a gran distancia de la presa; no se menciona la energía de la onda de llegada a la presa, ni el daño que dicha energía pueda causar a las compuertas o a la misma estructura de la presa, ni la posibilidad de que la gran velocidad de aproximación permita que la onda supere la altura de la presa y origine una falla parcial o total de la misma; tampoco se calcula el impacto de la ola hacia aguas arriba del sitio del derrumbe, cuando en realidad las ondas viajarían en ambas direcciones. Hoy día sabemos que los derrumbes pueden ocurrir muy cerca de la presa y no se consideró nunca esa posibilidad.*

(...) El análisis de rotura de presa - falla estructural - falla catastrófica de la presa -, como se anota en el informe de Diligencia Debida es incompleto y no cumple con las especificaciones necesarias dada la gravedad del problema que se puede causar. La onda de rotura se considera compuesta únicamente de agua, y sin sedimentos, como ocurriría al ensanchar el río su sección transversal debido al enorme caudal movilizado por la ruptura; el caudal de rotura calculado es del orden de 70,000 m³/seg, cuando recientemente el IDEAM ha calculado el mismo caudal en 263,000 m³/seg. Tampoco se hace un análisis exhaustivo de la longitud de viaje de la onda ni de los daños potenciales que se pueden causar a las poblaciones en riesgo ni al medio ambiente. Se requiere la realización de este análisis para tomar las medidas necesarias tendientes, en principio, a la protección de vidas humanas, ante el riesgo de falla de la presa, terminada con un diseño de emergencia -relleno prioritario-, como lo muestra el esquema enviado por el Ministerio de Minas y Energía (2018).

Ahora bien, el riesgo de derrumbes causados por eventos sísmicos, accidentes naturales o por el desarrollo de las obras no se consideró entre las amenazas al proyecto, dentro del análisis de planes de contingencia, y han venido sucediendo desde que se originó la emergencia como se ha anunciado repetidamente en los comunicados de la propia EPM.

Los planes de contingencia eran esquemáticos en el momento del estudio de Diligencia Debida, cuando el proyecto superaba ya el 35% de avance, demostrando que las posibles contingencias por accidentes naturales o debidos al propio proyecto no fueron consideradas con la debida profundidad.

En el estudio técnico entregado por EPM como parte del Estudio de Impactos Ambientales²², en el numeral 3.1.1 (clasificación del macizo rocoso) se comenta:

“Se realizó la clasificación del macizo rocoso con varios objetivos: tener una primera aproximación al comportamiento esperado del macizo rocoso cuando se intervenga con las obras, generar parámetros para diseño, y estimar de manera preliminar los requerimientos de refuerzo en las obras subterráneas. Esta clasificación se realizó con base en la evaluación y registro de las galerías exploratorias realizada durante esta etapa y en los datos consignados en los registros de perforación del informe realizado por INTEGRAL LTDA, también complementados durante esta etapa. El macizo rocoso fue clasificado por el sistema NGI que utiliza el índice Q, y mediante correlación empírica ($RMR = 9 \cdot \ln Q + 44$) (INTEGRAL, 1982; PRIEST, S.D., HUDSON, 1976), se estimó el índice RMR (véase Tabla 5.1). Las conclusiones de esta actividad son:”

Tabla 5.1. Calidad del macizo rocoso en las galerías exploratorias.

Galería (longitud, m)	Clasificación NGI (%)		
	Buena ($q > 10$)	Regular ($1 < q < 10$)	Mala ($0.4 < q < 1$)
1 (470)	0,0	100,0	0,0
2 (230)	95,7	4,3	0,0
3 (407)	38,1	59,0	2,9

“Es evidente entonces que la calidad del macizo rocoso encontrada en las galerías, en general, es de regular a buena, y que la calidad del estribo derecho (galerías 2 y 3) es superior a la del estribo izquierdo. “

“El RQD encontrado en las perforaciones es variable, pero de los valores registrados puede concluirse que su valor es mayor en la roca fresca y disminuye con el grado de meteorización de la roca. En general, el valor

²² EIA-(2007-2008)-F-PHI-EIA-C03-R0B-LB-MAbiotico

de RQD en las perforaciones aumentó con la profundidad y en las perforaciones superficiales o paralelas a la cara del talud su valor fue el menor registrado. Esto permite concluir que en el horizonte IIB y roca fresca la calidad del macizo rocoso es excelente, excepto en los tramos de alivijs de esfuerzo, donde la calidad será menor.”

Lo anterior contrasta con la información base relacionada con las perforaciones realizadas en 1978 pero que los registros, al parecer se actualizaron hasta el 2006. En la siguiente tabla se listan los anexos suministrados para el análisis técnico.

Tabla 5.2 Listados de las perforaciones realizadas en 1978 de las cuales se tienen registros actualizados o presentados en el 2006

Perforación	RQD -PROM	Longitud (m)
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-1	7.0	81.0
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-1A	32.6	77.0
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-1B	48.5	157.2
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-2	61.5	199.7
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-3	10.0	0.0
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-4	17.7	125.7
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-5	41.5	148.2
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-6	56.0	151.4
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-7	40.0	157.5
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-8	69.6	301.4
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-9	1.8	142.3
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-10	16.8	151.1
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-11	27.2	100.1
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-12	42.2	300.0
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-13	75.9	292.1
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-14	65.4	150.1
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-15	9.7	80.8
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-16	38.9	290.6
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-17	45.1	80.0
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-18	56.3	120.4
F-PHI-ALT-C0105-ANB-SI-19	79.6	200.0

En los registros entregados se presentan los valores de RQD los cuales muestran largos tramos con valores de 0%. De los 21 registros solo 7 tienen valores de

RQD mayores al 50% (valores ponderados por longitud de perforación). La siguiente figura muestra los valores de RQD ponderados por la longitud del tramo analizado y por la longitud total de la perforación en cuestión.

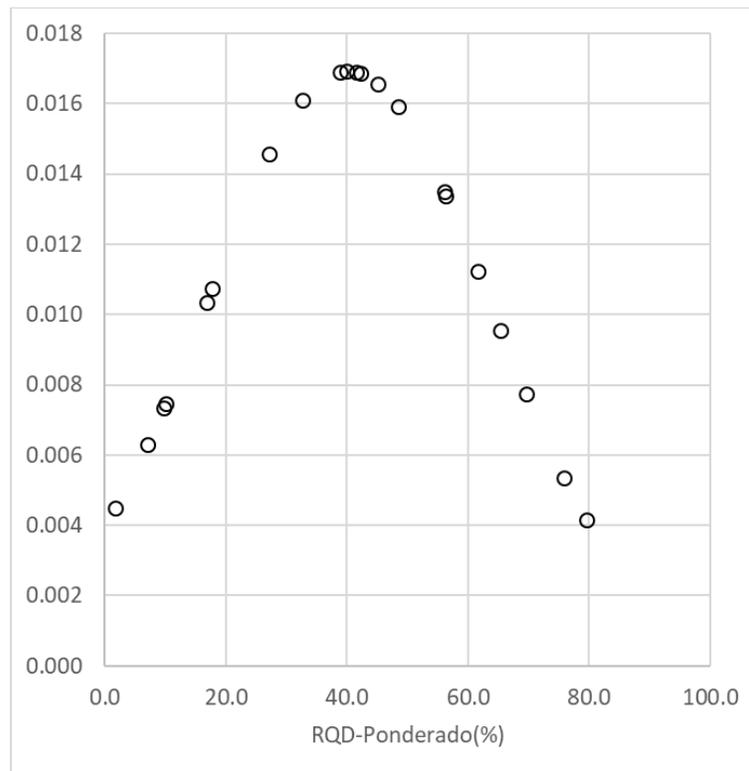


Figura 5-1: RQD ponderado por longitud para los registros de perforaciones suministrados – perforaciones del año 1978

En el mismo documento²³, se comenta (EIA-(2007-2008)-F-PHI-EIA-C03-R0B-LB-MAbiótico):

*“(...) Durante la presente etapa del proyecto se realizaron **cinco ensayos de compresión simple** sobre núcleos de roca obtenidos de las perforaciones, seleccionados con el objeto de proveer un rango de valores probables. Adicionalmente, con los datos tomados durante los ensayos, se calcularon los módulos de deformación de la roca intacta. Las resistencias a la compresión simple medidas variaron entre 42 y 121 MPa y los módulos de deformación calculados variaron entre 4,1 y 10,9 MPa. Debe notarse que los núcleos fueron extraídos hace aproximadamente **25 años** y permanecieron en las cajas porta núcleos bajo condiciones no*

²³ EIA-(2007-2008)-F-PHI-EIA-C03-R0B-LB-MAbiótico

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 81 de 98	

controladas todo este tiempo. Los valores medidos en estos ensayos fueron verificados con base en resultados de ensayos presentados en la literatura internacional (LAMA, R. D. and VUTUKURI, V.; INTEGRAL, 1982)."

Siendo que el Estudio de Impacto Ambiental es un documento con el cual se analizarán los impactos que el proyecto pueda tener en su construcción y operación. La escasa información analizada y la precariedad en la toma de información básica como los ensayos de laboratorio (5 según comentan en el documento entregado) denota una gran falencia.

En la actualización realizada al Estudio de Impacto Ambiental ²⁴ realizada en el 2010 se comenta en el numeral 3.1.2.1.1.1 (Estimación de parámetros):

" Luego de estimar la estratigrafía se definen los parámetros que caracterizan cada uno de los estratos que intervienen en la estabilidad de los cortes. Dichos parámetros son GSI, resistencia a la compresión inconfiada, mi (factor que depende del tipo de roca) y afectación por el proceso de voladura (D).

De las perforaciones realizadas en los años 1978, 2006 y 2009, se construyeron figuras de la variación en profundidad del GSI, RQD y recobro de todas las perforaciones realizadas.

Se han definido intervalos para el proyecto que dan una idea de la calidad del macizo rocoso en función del GSI y es la siguiente:"

Calidad buena a muy buena: $60 \leq GSI \leq 80$

Calidad regular a buena: $35 \leq GSI \leq 60$

Calidad regular a mala: $20 \leq GSI \leq 35$

Calidad muy mala: $0 \leq GSI \leq 20$

"En la parte baja de la ladera, el GSI alcanza valores altos más rápidamente que en la parte alta. Es así como para la parte baja se alcanzan valores de GSI por encima de 60 a profundidades de máximo 20 m y en la parte alta el GSI mayor de 60 aparece a lo sumo a los 60 m de profundidad. Las perforaciones ubicadas cerca de la zona afectada por

²⁴ EIA-(Actualización EIA-2010)-D-PHI-EAM-EIA-CAP03A-C0002

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 82 de 98	

las fallas Tocayo y Mellizo también muestran un espesor mayor de la zona fracturada en los primeros metros.”

Estos valores de GSI no concuerdan con los registros de las perforaciones. El argumento que se desarrolla en el documento no permite entender el porqué de estos valores adoptados. No se habla de la actualizar la base de ensayos de laboratorio que para la fecha correspondían a cinco ensayos realizados ni del análisis en los modelos de estabilidad de las discontinuidades identificadas.

En los estudios entregados como parte del Estudio de Impacto Ambiental no se lograron identificar los análisis de estabilidad de la presa que condujeron a los diseños actuales. Tampoco a las obras propuestas para la estabilización de los taludes de corte que conforman el estribo derecho e izquierdo de la presa.

No se identificó el análisis de capacidad portante en donde se analizara la estabilidad del macizo rocoso en base de la presa y la incidencia del flujo de aguas subterráneas en la base de la presa.

No se identificó el análisis de estabilidad de las laderas aledañas a la zona de estudio ni estudios detallados que permitieran evaluar la incidencia de deslizamientos sobre el embalse, presa y estribos derecho e izquierdo.

El estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia²⁵ y entregado en octubre de 2018 se comenta en el numeral 1.5.2 (Sobre el Estudio de Impacto Ambiental EIA):

“(…) En consecuencia, de lo anterior, las medidas de manejo establecidas en el Plan de Manejo Ambiental, no fueron efectivas para la respectiva prevención, mitigación y control de los impactos que agudizaron la contingencia del 28 de abril, tal y como lo reveló la ANLA en el Concepto técnico No. 02674 del 28 de mayo de 2018”.

En el estudio realizado por Woodward-Clyde consultants, en el mapa del área de presa de Hidroituango en la plancha 3 se presentan los procesos geomorfológicos en cercanías del sitio de presa. En la siguiente imagen se copia parte del plano en cuestión.

²⁵ CONTRATO No. 2018-SS-26-0001

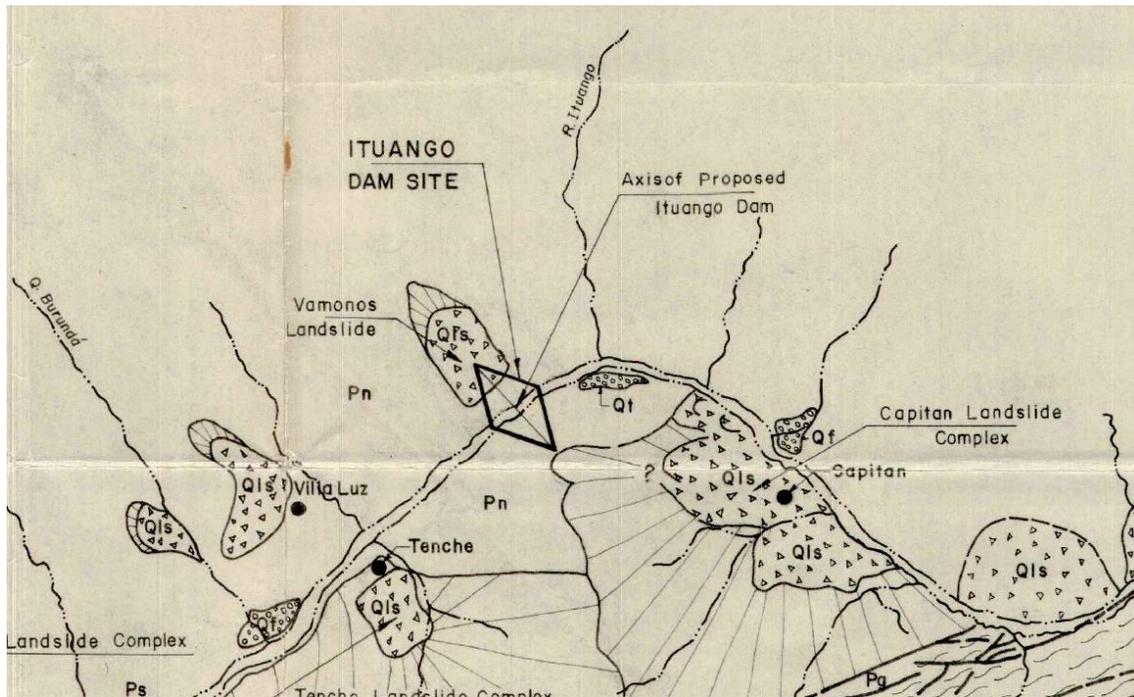


Figura 5-3: Geomorfología en el sitio de presa de Woodward-Clyde-1981

Se puede notar que en los taludes que componen la margen izquierda de la zona de presa se observa el deslizamiento nombrado como “Vámonos”. No se logra evidenciar el análisis de estabilidad de esta margen aun cuando en los estudios identifican estas zonas inestables y que, según la escala, movilizan volúmenes de material considerable. Lo mismo se puede notar de los depósitos coluviales Treche (margen derecha) y el depósito Villa luz (margen derecha).

6.1.2 Construcción y Contingencia

Posterior a los estudios disponibles relacionados con los diseños. En este numeral se tienen en cuenta la información disponible posterior a la etapa de diseños y, más recientemente, relacionados con las afectaciones desde abril de 2018.

Debido a los problemas de estabilidad que se hicieron evidentes el 28 de abril de 2018, EPM desarrolla el presente informe a modo de diagnóstico de la situación²⁶.

²⁶ Diagnóstico geológico geotécnico contingencia volumen de junio de 2019

En el capítulo 2.2 (Análisis de Estabilidad y Estabilización de la parte Alta) se presenta la figura 2-6 la cual contiene la planta proyectada de la plazoleta de compuertas. Se identifica como proyectada toda vez que la topografía allí presentada no se ve reflejada en los perfiles A y B que aparecen en la planta y que se presentan en la figura 2-7 y 2-8. Esta condición se puede notar al revisar la cota 600 msnm en donde se identifica una berma de 13 metros de ancho (valor aproximado medido en la zona de los perfiles A y B), dicha berma no se hace evidente en las figuras 2-7 y 2-8 (Perfiles A y B).

A continuación, se presentan los parámetros de análisis utilizados en los modelos y presentados en la tabla 2-1. En cuanto a esta tabla harían falta dos parámetros determinantes para los modelos, a saber: los valores de **mi** y **D** para las unidades con criterio de falla Hoek-Brown.

Tabla 5.3: Parámetros de análisis utilizados en los modelos de estabilidad

Material	Color	Densidad (kN/m ³)	Criterio	Cohesión (kN/m ²)	Phi (°)	UCS (MN/m ²)	GSI
Qv	■	18	Mohr-Coulomb	20 +/-5	30 +/-10		
IC-IIA	□	19	Mohr-Coulomb	35 +/-15	35 +/-10		
IIA - Fracturado	■	23	Hoek-Brown			50 +/-10	35 +/-15
IIA	■	24	Hoek-Brown			70 +/-10	48 +/-12
IIB	■	26	Hoek-Brown			80 +/-10	50 +/-12
Falla	■	18	Mohr-Coulomb	5 +/-3	20 +/-5		

Fuente: EPM- Diagnóstico geológico geotécnico contingencia volumen de junio de 2019-tabla 2-1

Es de destacar también que en la página 23 del documento (22 en el consecutivo de página) se presentan las discontinuidades identificadas y los estereogramas de la foliación y de las diaclasas. Con los parámetros de resistencia relacionados en cada caso.

En el capítulo no se presentan los análisis de estabilidad en la condición actual de los taludes de corte. Solo se presenta la condición tras la ejecución de las obras planteadas y que se suponen son las presentadas en la planta de la figura 2-6 del documento en cuestión.

En los modelos de estabilidad planteados y que llevan a la conclusión de la necesidad de las obras para la estabilización de los taludes actuales presentados en la página 25 (24 en el consecutivo de página), no se utilizan las discontinuidades en los modelos de estabilidad aun cuando las identifican y cuantifican. El Software utilizado, Slide V6 roscience (referido en la página 135

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 85 de 98	

del documento (134 en el consecutivo de página) permite el uso de discontinuidades en los modelos, así mismo el uso de superficies de falla no circulares, típicas de macizos rocoso fracturados. Lo anterior marca un error conceptual grave y que conduce a explicar el porqué de las fallas que se han identificado.

La estabilidad de los taludes y en general de cualquier obra geotécnica, está directamente influenciada por los factores detonantes de inestabilidad de la zona en particular. Los factores detonantes típicos son el agua, como presión de poros o presión intrafractura, y el sismo. Se destaca que en el documento no se mencionan los parámetros utilizados en los modelos de estabilidad de estos dos factores detonantes y que además amplían:

Página 25 del documento (24 en el consecutivo de página)

“Teniendo en cuenta que los análisis consideran condiciones mínimas de presiones intersticiales, se requiere la instalación sistemática de perforaciones de drenaje en los horizontes de suelo, transición y macizo rocoso moderadamente meteorizado. En el caso del macizo levemente meteorizado estas podrán ser localizadas.”

Respecto al sismo, en el numeral 2.2 del documento en cuestión, no se hace comentario alguno.

Parte de la información presentada en el informe ya comentado se amplía en el documento I-2194-PHI-051-GEO-MDC-001²⁷. En los análisis de estabilidad actual de las condiciones de la ladera se llega a la conclusión que la ladea es inestable y que en tal sentido requiere la ejecución de obras para su estabilización. En el numeral 4.3.2.3 del informe, en su página 57 (página 52 de la numeración interna del documento) se presentan los análisis de estabilidad en condiciones pseudoestáticas. Allí se puede evidenciar la modelación de la estabilidad de los taludes utilizando superficies de falla circulares que no representan los mecanismos observados en los eventos que se han presentados. Tampoco se observa el análisis de la incidencia de las presiones de poros, presiones de poros que fueron modeladas en los documentos relacionados con hidrogeología y que se revisaron y comentaron en el aparte de Hidrogeología. Los resultados obtenidos en los análisis realizados se presentan en la tabla 4-6 la cual se presenta a continuación.

²⁷ ESTABILIDAD MARGEN DERECHA POR OPERACIÓN DURANTE CONTINGENCIA-EPM-2019

ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA, HIDROGEOLOGÍA Y GEOTÉCNICA RELACIONADA CON EL MACIZO

ROCOSO Y CON LA ESTABILIDAD DEL PROYECTO HIDROITUANGO

Sector de análisis	Sin tratamiento (FS/PF)	Estático con tratamiento (FS/PF)	Seudo-estático con tratamiento (FS/PF)
Global estático Perfil A	2,9/0,0	2,9/mínima	2,0/mínima
Global estático Perfil B	3,2/0,0	3,2/mínima	2,3/mínima
Superior (Qdv y IC-IIA) Perfil A	1,4/0,12	1,5/0,1	1,0/0,55
Superior (Qdv y IC-IIA) Perfil B	1,7/mínima	2,2/mínima	1,0/0,41
Medio (IIA) Perfil A	3,7/0,0	3,7/mínima	2,6/mínima
Medio (IIA) Perfil B	3,9/0,0	3,8/mínima	2,7/mínima
Inferior (IIB) Perfil A	3,3/0,0	3,2/mínima	2,3/mínima
Inferior (IIB) Perfil B	6,2/0,0	6,7/mínima	2,8/mínima

Tabla 5 – Tabla 4-6-Resumen de factores de seguridad mínimos (FS) y probabilidades de falla- I-2194-PHI-051-GEO-MDC-001

Allí se puede notar que hay factores de seguridad en condiciones dinámicas que son iguales a 1.0, condición claramente inestable y que corresponde con un nivel de amenaza alta según los lineamientos de la resolución 227 de 2006 en su numeral 3.8. Lo anterior teniendo en cuenta que los modelos aportados para el análisis no tienen en cuenta la red de fracturas medias y que el software utilizado permite su modelación. De tener un modelo más adecuado a las condiciones del macizo, los factores de seguridad obtenidos podrían reducirse hasta en un 50%, haciendo inviables las obras planteadas por EPM.

En el numeral Normativa de referencia respecto de aspectos técnicos, se listan tres documentos los cuales tienen carácter legal e injerencia técnica en aspectos relacionados con estabilidad de taludes. Se comentó del factor de seguridad y su relación con la estabilidad de las estructuras y taludes de corte en general. A medida que el factor de seguridad se acerca a 1.0 esta condición refleja una falla inminente de la obra, así mismo el nivel de amenaza se asocia con el factor de seguridad, siendo amenaza alta una condición de inestabilidad (dependiendo del escenario de análisis) y amenaza baja una condición de estabilidad satisfactoria.

Siguiendo este criterio referido por la normativa en cuestión, se replican los modelos de estabilidad presentados por EPM y se amplían los escenarios de análisis, se analiza la estabilidad de los taludes en su condición actual en presencia de agua y de sismo.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 87 de 98	

El valor de RU, ya que EPM no presenta algún valor medido, calculado, modelado o estimado, se hace variar entre 0,0 (ausencia de absoluta de presión de poros) hasta 0,3 (valor razonable y considerado como un valor medio para el análisis). Respecto a la condición de aceleración sísmica, nuevamente, en los modelos no se observó el uso de la misma. La NSR-10²⁸ señala que la zona de Ituango tiene una aceleración Aa de 0,2 g para un periodo de retorno de 475 años. En la página 115 del documento²⁹ (114 en el consecutivo de página) se comenta:

*“El análisis realizado consistió en un análisis de sensibilidad variando los parámetros de la zona de debilidad de acuerdo con lo relacionado en la Tabla 7-2. Para la condición pseudoestática se consideró una aceleración de **0,34g** para un periodo de retorno de 1000 años. A pesar de haberse utilizado este período de retorno, esto está aún en proceso de estudio, por lo que este análisis puede evolucionar con el tiempo. Para el diseño definitivo se hará sensibilidad a otros períodos de retorno.”*

En tal sentido, se considera que los análisis del factor de seguridad en su condición dinámica deberían tener condiciones de sismo que como mínimo ascendieran hasta 0,30g.

6.2. Entendimiento del problema

Los modelos de análisis construidos por EPM y entregados en el informe son demasiado simplificados para los procesos observados y para la información básica presentada en el informe. Los modelos de análisis no tienen en cuenta las discontinuidades al momento de analizar el factor de seguridad en las condiciones actuales ni tampoco en el análisis de las obras propuestas. Esto por sí solo es una enorme falencia técnica al momento de modelar el comportamiento del macizo rocoso y proponer obras correctivas a inestabilidades detectadas.

Este tema lo aborda a profundidad V.Marino, P.Marinos y E.Hoek³⁰ (siendo este último uno de los dos científicos que crearon el criterio utilizado en el análisis de estabilidad en cuestión (Criterio de falla de Hoek-Brown)) y afirman:

²⁸ Decreto 926 del 19 de marzo de 2010, modificado por el Decreto 092 de 2011, por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes NSR-10. Bogotá, D. C.

²⁹ Diagnóstico geológico geotécnico contingencia volumen de junio de 2019

³⁰ The geological strength index: applications and limitations. V.Marino, P.Marinos y E.Hoek.2005

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 88 de 98	

(...) Por lo tanto, es claro que el Sistema GSI no debe aplicarse en aquellas masas rocosas en donde exista una orientación estructural predominante claramente definida³¹.

Y continúa:

(...) También es inadecuado asignar valores de GSI a caras excavadas en roca dura con discontinuidades espaciadas a tasas similares a las dimensiones de los del túnel o talud en consideración.³²

Para el caso específico de estabilidad de taludes, en el mismo artículo afirman:

(...) para el análisis de estabilidad de un talud, la evaluación se basa en anticipar la zona por la cual la superficie de falla potencial cortará el macizo rocoso. La estimación de valores de GSI en estos casos requiere un juicio considerable, particularmente cuando el plano de falla puede pasar por varias zonas de diferente calidad. Los valores medios pueden no ser apropiados en estos casos.³³

(...) Sin embargo, en análisis numéricos que contemplan discontinuidades únicas y bien definidas como zonas de corte o zonas de falla, a veces es apropiado aplicar el criterio de Hoek-Brown a la masa de roca y superponer la discontinuidad como un elemento significativamente más débil.³⁴

Estas deficiencias son reiteradas en los análisis de estabilidad presentados. También son evidentes en los análisis tridimensionales que presentan. Como el del numeral 3 del informe I-2194-PHI-051-GEO-MDC-001, en el numeral 3 (modelo numérico de la zona de captación). Allí se plantea un análisis numérico

³¹ (...) therefore, it is clear that the GSI system should not be applied to those rock masses in which there is a clearly defined dominant structural orientation.

³² (...) It is also inappropriate to assign GSI values to excavated faces in strong hard rock with a few discontinuities spaced at distances of similar magnitude to the dimensions of the tunnel or slope under consideration.

³³ (...) For stability analysis of a slope, the evaluation is based on the rock mass through which it is anticipated that a potencial failure plane could pass. The stimation of GSI values in these cases requires considerable judgment particularly when the failure plane can pass through several zones of different quality. Mean values may not be appropriate in this case.

³⁴

(...) However, in numerical analysis involving a single well-defined discontinuity such as a shear zone or fault, it is sometimes appropriate to apply the Hoek-Brown criterion to the overall rock mass and to superimpose the discontinuity as a significantly weaker element ...

muy precario según la información necesaria para la construcción de este tipo de modelos y para el estado del arte del proyecto. El modelo no tiene en cuenta ninguna discontinuidad y los análisis de estabilidad frente a la eventualidad de un evento sísmico presentados en la tabla 3-2 del informe arrojan factores de seguridad muy por debajo de la unidad, refiriendo una inminente falla. La tabla en cuestión se presenta a continuación.

Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Factor de seguridad Estático	Factor de seguridad Seudo-estático
5	1	1,13	0,56
10	1	1,15	0,60
20	1	1,52	0,61

Tabla 6: Tabla 3-2- Resultados análisis factor de seguridad global de la ladera (sensibilidad parámetros iniciales de la zona de debilidad)- I-2194-PHI-051-GEO-MDC-001

Otro punto importante es la forma como se incorporan las condiciones hidrogeológicas ya referidas en los modelos de análisis y estabilidad. Ya se ha mencionado que la condición del agua subsuperficial es uno de los factores que deben ser considerados como detonantes. En el I-2194-PHI-051-GEO-MDC-001 se presenta la figura 3-19 la cual se presenta a continuación.

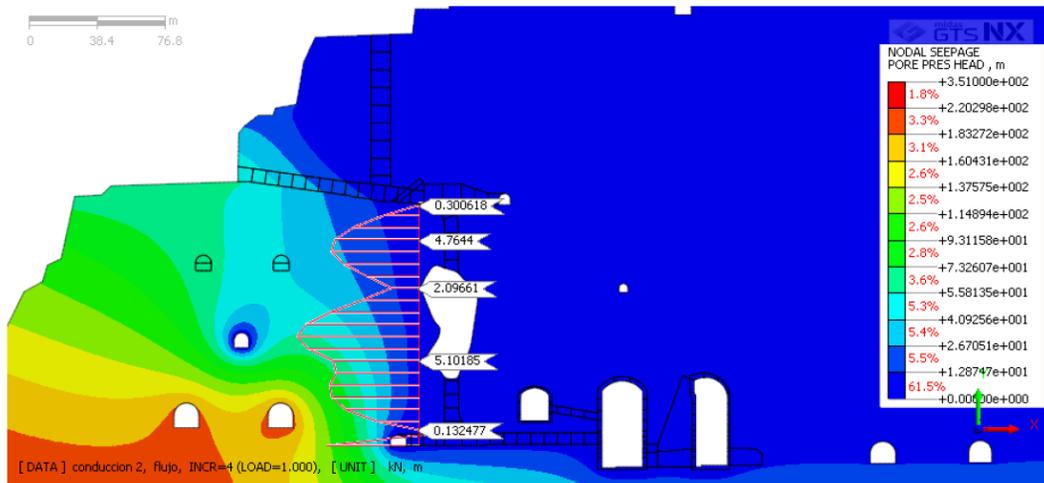


Figura 5-2: Figura 3-19. Cabezas de presión de poro en los alrededores de la oquedad norte (pozos 1 y 2)-condición actual- I-2194-PHI-051-GEO-MDC-001

En la figura se presenta parte del modelo utilizado para el análisis de las presiones de poros que se desarrollan en el macizo rocoso. Se puede notar que

en la base de los taludes de corte se modelaron presiones de poros de alrededor de 4,0 metros. Estos modelos no se utilizaron en los análisis de estabilidad de taludes, ni como presiones de poros, ni como nivel freático. Esto deja ver una nueva falencia en la modelación, en detrimento del entendimiento del comportamiento del macizo rocoso y en la posibilidad de predecir nuevas condiciones o posibles afectaciones a la estabilidad.

Un aspecto adicional de los informes geotécnicos es el relacionado con el informe de diseño geotécnico para la terminación de la presa³⁵. En el se presentan los análisis de estabilidad de la presa en la tabla 3-1 presenta factores de seguridad de 1,4 en condiciones estáticas al finalizar la construcción y con el embalse en la cota 410 msnm (cota final 420 msnm). En operación se esperan factores de seguridad de 1,3 y 1,2 y en presencia de sismo (solo modelando la aceleración como una fuerza y obviando el aumento en la presión de poros) un factor de seguridad de 1,0.

Estos criterios, teniendo en cuenta la velocidad con que se desarrollaron las obras, condición que repercute en errores constructivos, son considerablemente bajos. Presas con factores de seguridad calculados mucho mayores han fallado. En la siguiente tabla se presentan algunos de estos factores de seguridad.

Dam	Seismic coefficient	Computed factor of safety	Effect of earthquake
Sheffield Dam	0.1	1.2	Complete failure
Lower San Fernando Dam	0.15	1.3	Upstream slope failure
Upper San Fernando Dam	0.15	≈2 to 2.5	Downstream shell including crest slipped about 6 ft downstream
Tailings Dam (Japan)	0.2	≈1.3	Failure of dam with release of tailings

Tabla 7: Análisis pseudoestático de taludes con fallas durante terremotos³⁶

En el informe ya mencionado se realiza un análisis de los asentamientos del cuerpo de la presa tras la construcción. En la siguiente imagen se pueden ver los contornos presentados.

³⁵ I-I-2194-072018-01-R2-2018

³⁶ Seed, H.B.1979. Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams

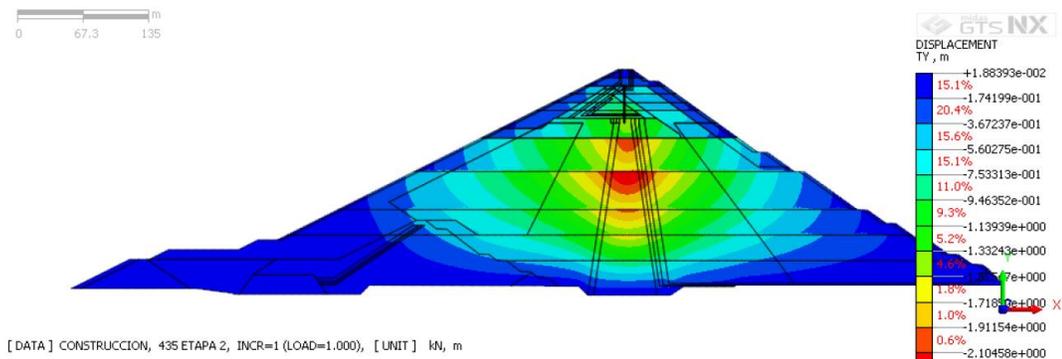


Figura 5-2: Figura 6-6. Contornos de desplazamientos al final de la secuencia constructiva-I-I-2194-072018-01-R2-2018

Según lo indicado, se espera que el cuerpo de la presa presente un desplazamiento de hasta 2,0 metros. Esto puede ser un indicador directo de que el sello hidráulico es susceptible de fallar y sorprende que no se comente al respecto en el informe.

6.3 Hallazgos de los estudios de Geotecnia relacionada a la estabilidad.

- Macizo rocoso correspondiente a la cimentación de la presa

No se lograron identificar los diseños y análisis iniciales de capacidad portante del macizo rocoso que compone la cimentación de la presa. No se encontraron análisis de estabilidad que lo comprometan ni la influencia de aumentos en la presión de poros en esas zonas debido a eventos sísmicos. Lo anterior en referencia a los estudios en la fase de diseño, en las modificaciones en la fase de construcción y en lo relacionado con las fallas presentadas en abril de 2018 y a la fecha.

- Macizo rocoso correspondiente al estribo izquierdo de la presa.

No se lograron identificar los diseños y análisis de estabilidad del estribo izquierdo de la presa ni del macizo que colidan con el espejo de agua en cercanías de la presa. Este desconocimiento, sumado a que es el estribo izquierdo, puede ser potencialmente más inestable, debido a que la foliación de las unidades de roca

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 92 de 98	

está en una dirección desfavorable a la estabilidad, reflejan un nivel de amenaza que no ha sido evaluado y que según la evidencia es potencialmente alto.

- Macizo rocoso correspondiente al estribo derecho de la presa

Posiblemente es esta zona la que tienen mayor cantidad de información base. No obstante, los análisis de estabilidad muestran una deficiencia en el entendimiento de los modelos que se traducen en las fallas de los taludes observadas. Ejemplos claros son el no uso de condiciones de presión de poros en los análisis de estabilidad, el uso de superficies de falla circulares para el modelamiento de macizos fracturados controlados con discontinuidades y la ausencia de criterios técnicos para analizar el factor de seguridad al momento de proponer obras de estabilización.

Los análisis de estabilidad realizados para los diseños, debido a su precariedad no permitieron prever las potenciales fallas de la unidad coluvial Trenché (identificada desde 1987) pero modelada solo después del abril de 2018. El análisis posterior adolece de un correcto entendimiento del macizo rocoso, así como de las posibles fallas que allí se pueden presentar.

Actualmente el macizo rocoso en el estribo derecho de la presa y en la zona aledaña colindante con el vaso es inestable. Esto se puede ver en la necesidad de EPM de proponer obras de estabilización. En concordancia, las obras propuestas no suplen las falencias en los modelos y tal como están proyectadas tienen un alto riesgo de que se puedan fallar frente a factores detonantes como sismos, aumento de presiones de poros, o combinaciones de factores.

- Macizo rocoso en el área de influencia del embalse.

Como se ha mencionado, es de vital importancia estudiar en detalle los movimientos en masa que colinda de forma directa con el embalse, tanto por condiciones de exceso de sedimentos como para el análisis de la generación de olas debidas a deslizamientos.

No se encontraron análisis de esta índole en la fase de estudios y diseños de la obra, ni en los análisis realizados con posterioridad, sólo abordan de manera parcial la margen izquierda del embalse creado.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 93 de 98	

- Cuerpo de la presa

Es preocupante que en los análisis de estabilidad que de lo que fue llamado en su momento relleno prioritario y en concordancia con la presa no incluya la afectación más crítica en este tipo de presas, a saber: el aumento en la presión de poros debido a eventos sísmicos. Aguas abajo de la presa, específicamente los materiales 3B y 3C, son materiales granulares con una cohesión muy baja (en los análisis de estabilidad se presentan como materiales con una cohesión de 1 kN/m²). En los modelos de estabilidad solo se presentan análisis de la influencia del sismo como una fuerza equivalente obviando esta condición.

El no tener modelos que permitan definir el comportamiento de la presa frente a eventos sísmicos que se traduzcan en un aumento súbito y considerable de presiones de poros en la presa deja en claro las incertidumbres que se tiene respecto a la posibilidad de falla esta estructura. Los factores de seguridad obtenidos en los análisis son muy bajos y esta condición podría suponer un descenso mayor al esperado en los modelos presentados ocasionando daños graves a la estructura.

No se logró identificar los análisis y diseños tridimensionales que permiten prever posibles efectos locales. Los análisis tridimensionales se presentan en fases posteriores a la de los diseños, pero las conclusiones suelen ser escuetas en el análisis de los resultados presentados.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 94 de 98	

7. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS TÉCNICO A LOS DOCUMENTOS COMO SOPORTE DE LA CONCLUSIÓN GENERAL.

- La zona de estudio es de gran complejidad, tanto en términos de materiales geológicos (existen rocas, rocas meteorizadas, suelos residuales y depósitos, tanto coluviales como aluvio-torrenciales) como en términos de deformación tectónica (existen fallas geológicas en direcciones norte – sur, este – oeste, noreste – suroeste y noroeste – sureste) que generan un territorio frágil en términos de estabilidad de sus laderas y resistencia de sus macizos rocosos. Además, los detonantes de la inestabilidad como sismos y eventos hidrometeorológicos no están suficientemente estudiados, y en el caso de los sismos, su cuantificación histórica solo puede remontarse menos de 100 años, con lo cual la incertidumbre no puede ser evitada.
- Las incertidumbres sobre la arquitectura de las fallas geológicas en profundidad, el contacto entre rocas alteradas y rocas frescas, el comportamiento del macizo rocoso ante las cargas, la sismogeneración y el comportamiento de las aguas subterráneas no han sido resueltas y algunos no podrán serlo debido a su recurrencia y al limitado registro que tenemos de algunos como los sismos. Por ello, no es posible reducir la condición de riesgo del proyecto sobre las comunidades ubicadas aguas abajo.
- A pesar de que el estado del arte en los estudios geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y geotécnicos ya había sido recogido por reglamentaciones locales y por los términos de referencia de la ANLA, el proyecto hidroituango no contó con una calidad suficiente en ninguno de estos aspectos.
- EPM – Hidroituango no caracterizaron el macizo rocoso para sus diseños finales. La totalidad de perfiles, tanto de taludes como de obras subterráneas (galerías, casas de máquinas, almenaras, pozos, etc.) corresponden a perfiles de meteorización, divididos en función de la intensidad de dicho proceso, usando la nomenclatura propuesta por Deere & Patton (Suelos como I, Rocas meteorizadas como II y Roca fresca como III). No obstante, la definición entre los horizontes IIB y III son expresadas con líneas con interrogantes, lo cual comprueba que incluso en esta división había incertidumbre.
- El estado del arte en la geología y la geotecnia muestran que tanto las rocas poco meteorizadas (tipo IIB) como las rocas frescas (tipo III) están gobernadas en su estabilidad ante los cortes por las discontinuidades. Para las rocas en

ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA, HIDROGEOLOGÍA Y GEOTÉCNICA RELACIONADA CON EL MACIZO

ROCOSO Y CON LA ESTABILIDAD DEL PROYECTO HIDROITUANGO

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 95 de 98	

Hidroituango, que corresponden a neises y esquistos, dichas discontinuidades son la foliación y las fracturas tectónicas (que incluyen fallas geológicas, zonas de cizalla y diaclasas). No existió para el diseño, ni existe luego de la contingencia, un estudio comprehensivo que disminuya la incertidumbre respecto a los esfuerzos tectónicos y a la deformación frágil que ellos generan.

- La incertidumbre y el desconocimiento de las fracturas se refleja en caracterizaciones omisivas o deficientes del macizo rocoso (suma de masa rocosa, fracturas y foliación) y en las aguas subterráneas (dirección, presiones, direcciones de flujo, etc.).
- A pesar de que las aguas subterráneas son un aspecto fundamental en el entendimiento de la estabilidad de excavaciones, tanto subterráneas como superficiales, el diseño del proyecto no parece contar con estudios de hidrogeología.
- Los estudios geológicos y geomorfológicos no solamente son omisivos, sino en ocasiones son contradictorios. Como ejemplo, se definen fallas geológicas en estudios en los años 70 y 80 que luego no son retomados a pesar de que se ha establecido su importancia en términos de sismogeneración; o se identifican deslizamientos en la zona de presa que luego son también dejados de lado obviando su íntima relación con los riesgos al proyecto y sobre todo a los pobladores aguas abajo.
- EPM – Hidroituango no se acogió a las determinaciones del Comité internacional de grandes represas (Icold) en lo referente al estudio de fallas geológicas activas y su relación con la sismicidad. Esto a pesar de que el documento de Icold al respecto es de 1998.
- El estudio de fallas geológicas y fracturas que componen el macizo rocoso fue de tal calidad que EPM – Hidroituango no conocía sobre su influencia en infraestructuras tan estratégicas como las galerías de captación y la casa de máquinas.
-
- EPM – Hidroituango, aún en 2010 obviaba la complejidad de la zona de estudio, planteando que la estructura geológica del sitio del proyecto era “simple”, lo cual ha sido completamente desechado con las realidades de la complejidad del macizo rocoso. En su hipótesis de simplicidad establecieron que la foliación y las fallas geológicas no eran importantes para el diseño del proyecto.

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 96 de 98	

- Es inaceptable que un proyecto de esta envergadura no haya contado con estudios geológicos que previeran que una falla geológica disminuye de manera dramática las características de resistencia del macizo rocoso. Los estudios de 2010 concluyeron sobre la inocuidad de la falla Mellizo y desconocieron totalmente la influencia de la falla Tocayo en la estabilidad de las obras.
- EPM – Hidroituango continúa modelando sin datos de soporte los macizos rocosos. No se han allegado datos de resistencia en las discontinuidades.
- En aguas subterráneas, los pocos estudios vienen de 2010 hacia acá, pero por un lado no han mejorado los estudios geológicos deficientes del diseño y por otro, se usan metodologías muy preliminares y simples en temas tan críticos para la estabilidad del proyecto como la erosión interna del macizo rocoso de fundación de la presa y estribos.
- No es posible haber establecido los impactos ambientales sobre el ciclo del agua sin estudios hidrogeológicos. No obstante, estas omisiones no fueron detectadas por la ANLA, pues obtuvieron la licencia ambiental.
- En los estudios de impacto ambiental que dieron lugar a la licencia ambiental que viabilizó el proyecto, no había sustentos geotécnicos en términos de ensayos de laboratorio, ni se ve coherencia entre valores presentados (GSI) y los registros de perforación.
- En los estudios entregados como parte del Estudio de Impacto Ambiental no se lograron identificar los análisis de estabilidad de la presa que condujeron a los diseños actuales. Tampoco a las obras propuestas para la estabilización de los taludes de corte que conforman el estribo derecho e izquierdo de la presa.
- No se identificó el análisis de capacidad portante para la determinación de la estabilidad del macizo rocoso en la base de la presa y la incidencia del flujo de aguas subterráneas en la base de la presa.
- No se identificó el análisis de estabilidad de las laderas aledañas a la zona de estudio ni estudios detallados que permitieran evaluar la incidencia de deslizamientos sobre el embalse, presa y estribos derecho e izquierdo.
- En los modelos de estabilidad planteados luego de las contingencias y que llevan a la conclusión de la necesidad de las obras para la estabilización de

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 97 de 98	

los taludes actuales, no se utilizan las discontinuidades en los modelos de estabilidad aun cuando las identifican y cuantifican. Eso significa que se sigue omitiendo el concepto de macizo rocoso.

- La estabilidad de los taludes y en general de cualquier obra geotécnica, está directamente influenciada por los factores detonantes de inestabilidad de la zona en particular. Los factores detonantes típicos son el agua, como presión de poros o presión intrafractura, y el sismo. En los estudios posteriores a la contingencia no se mencionan los parámetros utilizados en los modelos de estabilidad de estos dos factores detonantes.
- Los análisis de estabilidad y los factores de seguridad resultantes no consideran de manera adecuada la incorporación de condiciones hidrogeológicas.
- Los factores de seguridad, que son una expresión de la estabilidad de las laderas, de los taludes o de las excavaciones, son preocupantes, pues en condiciones dinámicas muestran valores de 1,0 (estabilidad crítica). Considerando las deficiencias en la modelación, que si son corregidas pueden llevar a determinar estado crítico de estabilidad aun en condición estática. Por lo tanto, no es posible que EPM – Hidroituango puedan asegurar que el proyecto es estable.
- Los criterios de estabilidad que usa EPM – Hidroituango no corresponden a amenaza baja en las reglamentaciones de estabilidad de taludes de Bogotá ni de la ANLA en su reglamentación de taludes mineros.
- De acuerdo con modelamientos recientes de estabilidad de la presa (2018), se espera que el cuerpo de la presa presente un desplazamiento de hasta 2,0 metros. Esto puede ser un indicador directo de que el sello hidráulico es susceptible de fallar y sorprende que no se comente al respecto en el informe.
- No se lograron identificar los análisis de capacidad portante del macizo rocoso que compone la cimentación de la presa. No se encontraron análisis de estabilidad que lo comprometan ni la influencia de aumentos en la presión de poros en esas zonas debido a eventos sísmicos.
- No se lograron identificar los análisis de estabilidad del estribo izquierdo de la presa ni del macizo que colinda con el espejo de agua en cercanías de la presa. Este desconocimiento, sumado a que es el estribo izquierdo puede ser potencialmente más inestable debido a que la foliación de las unidades de roca

CÓDIGO: 001	ASESORÍA TÉCNICA A LAS VÍCTIMAS-PROYECTO HIDROELECTRICO HIDROITUANGO ARTICULADAS EN RÍOS VIVOS
VERSIÓN: 1	
Página 98 de 98	

está en una dirección desfavorable a la estabilidad reflejan un nivel de amenaza que no ha sido evaluado y que según la evidencia es potencialmente alto.

- Para el macizo del estribo derecho, los análisis de estabilidad muestran una deficiencia en el entendimiento de los modelos que se traducen en las fallas de los taludes observadas. Ejemplos de claros son el no uso de condiciones de presión de poros en los análisis de estabilidad, el uso de superficies de falla circulares para el modelamiento de macizos fracturados controlados con discontinuidades y la ausencia de criterios técnicos para analizar el factor de seguridad al momento de proponer obras de estabilización.
- No se encontraron análisis de estabilidad del macizo rocoso que conforma las laderas en la zona de embalse en la fase de estudios y diseños de la obra ni en los análisis realizados con posterioridad sólo abordan de manera parcial la margen izquierda del embalse creado.
- Es preocupante que en los análisis de estabilidad que de lo que fue llamado en su momento relleno prioritario y en concordancia con la presa no incluya la afectación más crítica en este tipo de presas: el aumento en la presión de poros debido a eventos sísmicos. Aguas abajo de la presa, específicamente los materiales 3B y 3C, son materiales granulares con una cohesión muy baja (en los análisis de estabilidad se presentan como materiales con una cohesión de 1 kN/m²). En los modelos de estabilidad solo se presentan análisis de la influencia del sismo como una fuerza equivalente obviando esta condición.