CPS No. 1020 DE 2016

APOYO AL DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN PARA EL FORTALECIMIENTO DE LOS PROCESOS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL EMBALSE DEL QUIMBO

Cumplimiento de la obligación contractual 3

Verificación y revisión de los componentes geoambientales, hidrológicos y de riesgos del embalse El Quimbo y su área de influencia

Elaborado por

Julio Fierro Morales, Geólogo MSc. Geotecnia
Milena Ordoñez Potes, Ingeniera Civil MSc. Geotecnia
Diana Patricia Lozano Zafra, Geóloga MSc. Geoinformación
Ana María Llorente Valbuena, Ingeniera Ambiental MSc Geomática (a)
Eduardo Quintero Chavarría, Ingeniero Civil MSc. Geofísica (a)
Andrés Castillo, Ingeniero Civil Esp. Recursos hidráulicos
David Aponte, Ingeniero civil MSc. Geotecnia (a)
Erika Cuida López, Geóloga
Angie Ramírez Huerta, Geóloga
Daniela Mateus Zabala, Geóloga
Juan Francisco Díaz González, Geólogo
Javier Valencia, Ingeniero Civil

Con la colaboración de los miembros del Grupo de Investigación Geoambiental TERRAE

José Sebastián Gómez Romero, Estudiante de Geología
Jeremy Audrey León, Estudiante de Geología
Vivian González Aldana, Estudiante de Geología
Xiomara Triana Parra, estudiante de Geología
Nathalia Cerón Espejo, estudiante de Geología
María Alejandra Ramos Gámez, estudiante de Geología

Bogotá D.C, 25 de diciembre de 2016

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 6

2 OBJETIVOS 8

2.1 GENERAL 8
2.2 ESPECÍFICOS 8

3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS 10

4 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE FALLA DE REPRESAS 11

5 IDENTIFICACIÓN DE INCERTIDUMBRES DE LA LÍNEA BASE Y DISEÑOS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO. 17

5.1 GEOLOGÍA 17
5.1.1 Análisis de los términos de referencia 17
5.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 25
5.2.1 Ausencia de características de macizo rocoso 25
5.3 ROCAS Y SEDIMENTOS COMO FUENTES DE MATERIAL PARA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS 26
5.3.1 Caracterización de los materiales 28
5.3.2 Irregularidades en el proceso de aprobación y ejecución de extracción de materiales 31
5.4 GEOMORFOLOGÍA 36
5.4.1 Análisis de los términos de referencia 36
5.4.2 Análisis del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) 36
5.5 HIDROLOGÍA 43
5.5.1 Análisis y pertinencia de los TDR 43
5.5.2 Caracterización hidrológica del área de influencia indirecta. 47
5.6 CLIMA 53
5.7 HIDROGEOLOGÍA 55
5.7.1 Análisis de los términos de referencia 55
5.7.2 Impactos ambientales 57
5.7.3 Análisis del componente hidrogeológico del EIA del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo 58
5.8 GEOTECNIA 63
5.8.1 Análisis del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) 63
5.8.2 Análisis de los informes de diseños para licitación del 2009 68
5.8.3 Análisis de las condiciones actuales de obra y requerimientos mínimos necesarios para el correcto funcionamiento 73
5.8.4 Túnel de descarga de fondo y túnel de captación y conducción hacia la casa de maquinas 84
5.8.5 Presa de tierra y enrocado con cara de concreto 84
5.9 AMENAZA VOLCÁNICA 86

6 IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES IMPACTOS NEGATIVOS NO PREVISTOS EN LA LICENCIA AMBIENTAL .. 90

6.1 EVALUACIÓN DE IMPACTOS EN HIDROLOGÍA 90
6.1.1 Análisis de impacto alteración del clima 90
6.1.2 Plan de manejo del impacto y recomendaciones al PMA 91
6.2 EVALUACIÓN DE IMPACTOS HIDROGEOLÓGICOS 92
6.2.1 Conclusiones del modelo hidrogeológico presentado por EMGESA – INGETEC (2008) 92

6.3 EVALUACIÓN DE IMPACTOS EN CALIDAD DE AGUA 93

7 CONFIGURACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES 93

7.1 DEFINICIONES 93
7.2 CONFIGURACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE POR FALLA DE LA REPRESA 95
7.2.1 Incertidumbres identificadas en los documentos de soporte presentado por EMGESA en el EIA 2008 96
7.2.2 Amenaza por falla del dique principal (presa) – Inundación súbita 101
7.2.3 Condiciones hidrogeológicas de la zona de estudio y consideraciones acerca del estudio del área 112
7.3 IMPACTOS POR CAMBIOS DE NIVEL FREÁTICO: CASOS DE ESTUDIO 115
7.3.1 Tubificación 115
7.3.2 Cambios en los niveles freáticos e inestabilidad de taludes 116
7.3.3 Sismicidad inducida por hidroeléctricas, asociado al flujo preferencial en medios fracturados o calcáreos. 117
7.3.4 CONSIDERACIONES GENERALES RESPECTO DEL DISEÑO DE PRESAS 118
7.4 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD 123
7.4.1 Exposición 123
7.4.2 Vulnerabilidad física 123
7.4.3 Vulnerabilidad social 124
7.5 CONFIGURACIÓN DEL RIESGO 126
7.6 IMPLICACIONES EN LA GESTIÓN DEL RIESGO EN EL TERRITORIO 128

8 CONCLUSIONES 129

9 RECOMENDACIONES 134

REFERENCIAS CITADAS 137

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE LA REPRESA DE EL QUIMBO 7
FIGURA 2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS 10
FIGURA 3. PORCENTAJE DE CAUSAS DE FALLAS EN PRESAS EN TIERRA 12
FIGURA 4. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL A ESCALA 1:75.000. 19
FIGURA 5. MAPA GEOLÓGICO REGIONAL DEL EMBALSE A ESCALA 1:75.000 20
FIGURA 6. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DETALLADA LEVANTADA EN LA ZONA DE CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA A LA MARGEN DERECHA DEL RÍO MAGDALENA 23
FIGURA 7. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE OBRAS A ESCALA 1:2.000 24
FIGURA 8. ÁREAS DE FUENTES DE MATERIALES UTILIZADOS PARA OBRAS PRINCIPALES DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO (ICA NO. 14, 2016) SOBRE GEOLOGÍA REGIONAL A ESCALA 1:75.000 (EN EL EIA PRESENTADO EN 2008) 28
FIGURA 9. ESQUEMAS DE ESTRUCTURAS DE MINERALES ARCILLOSOS TIPO 1:1 Y 2:1 29
FIGURA 10. AUMENTO DEL ANCHO DE LAS LÁMINAS EN RELACIÓN CON LA MAGNITUD DE HIDRATACIÓN DE LOS CATIONES 30
FIGURA 11. ÁREAS DE FUENTES DE MATERIAL, ÁREA INTERVENIDA POR FUERA DE ÁREAS AUTORIZADAS Y TÍTULO MINERO KI0-08302X SOBRE IMAGEN SATELITAL DE GOOGLE EARTH DE FEBRERO DE 2014 32
FIGURA 12. ZONAS DE DISPOSICIÓN DE MATERIAL DE EXCAVACIÓN AUTORIZADAS A EMGESA A MARZO DE 2016 34
FIGURA 13. MAPA GEOMORFOLÓGICO EN ESCALA 1:75.000, MAPA DE ZONAS INESTABLES A ESCALA 1:25.000 Y MAPA DE PENDIENTES 38
FIGURA 14. ZONA INESTABLE ACTIVA 3 UBICADA EN IMAGEN DE GOOGLE EARTH 2016. ÁREA REPORTADA POR EL EIA, A LA DERECHA ÁREA REAL AFECTADA. 40
FIGURA 15. INVENTARIO DE ZONAS INESTABLES PRESENTADO POR EMGESA-INGETEC (2008) EN EL EIA 40
FIGURA 16. INVENTARIO DE PROCESOS HECHO EN GOOGLE EARTH PARA ESTE ESTUDIO. PROCESOS RECIENTES Y PROCESOS ANTIGUOS YA CICATRIZADOS Y CON VEGETACIÓN 41
FIGURA 17. CAUDALES MÁXIMOS, MEDIO Y MÍNIMOS MENSUALES MULTIANUALES 46
FIGURA 18. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES EN EL SITIO DE LA ZONA DEL PROYECTO 58
FIGURA 19. UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS, PRESA, DIQUE, ATAGUÍA CON RESPECTO AL AII Y AID 59
FIGURA 20. EROSIÓN MARGEN IZQUIERDA DE LA ZONA DE PRESA. 66
FIGURA 21. PROCESOS EROSIVOS EN LA PARTE BAJA DEL VERTEDERO EN LA PRESA BETANIA 66
FIGURA 22. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ARRIBA – ANÁLISIS SIN AGUA Y SIN SISMO 76
FIGURA 23. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ARRIBA – ANÁLISIS SIN AGUA Y CON SISMO 77
FIGURA 24. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ARRIBA – ANÁLISIS CON AGUA Y SIN SISMO 78
FIGURA 25. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ABAJO – ANÁLISIS SIN AGUA Y SIN SISMO 79
FIGURA 26. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ABAJO – ANÁLISIS SIN AGUA Y CON SISMO 80
FIGURA 27. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ABAJO – ANÁLISIS CON AGUA Y CON SISMO 81
FIGURA 28. PROBLEMAS EN LA CIMENTACIÓN DEL DIQUE AUXILIAR-MASA MOVILIZADA. CIMENTACIÓN DEL DIQUE AUXILIAR, CERCA AL EJE DEL DIQUE 82
FIGURA 29. FISURAS LONGITUDINALES EN LA CARA AGUAS DEBAJO DEL DIQUE AUXILIAR-TOMADO DEL DOCUMENTO NO. QD-ITE-16C-009 –INGETEC-2015 83
FIGURA 30. MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA POTENCIAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADO DEL HUILA 88
FIGURA 31. TABLA DE RESUMEN DE CAMBIO CLIMÁTICO DEPARTAMENTALES 2011-2100 92
FIGURA 32. ANÁLISIS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DESASTRES. 95
FIGURA 33. ESQUEMA DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL 103
FIGURA 34. ZONA DE LA MODELACIÓN 104
FIGURA 35. SECCIONES TRANSVERSALES PROPUESTAS PARA LA MODELACIÓN. 105
FIGURA 36. HIDROGRAMA SIMPLIFICADO ASOCIADO CON LA RUPTURA DE UNA REPRESA 106
FIGURA 37. HIDROGRAMA ASOCIADO A LA RUPTURA DE LA REPRESA. 107

FIGURA 38. ZONAS PROBABLEMENTE INUNDADAS DEBIDO A LA EVENTUAL RUPTURA DE LA REPRESA. 109
FIGURA 39. SECCIONES TRANSVERSALES DEFINIDAS PARA LA MODELACIÓN CONDICIONES DE FLUJO PERMANENTE Y UNIFORME ASOCIADA CON LA EVENTUAL RUPTURA DE LA REPRESA EL QUIMBO 111
FIGURA 40. INTERPRETACIÓN DE LINEAMIENTOS Y DENSIDAD, EN LA GRÁFICA SE MUESTRA LA UBICACIÓN DE LÍNEAS SÍSMICAS .. 112
FIGURA 41. INTERPRETACIÓN DE LÍNEAS SÍSMICAS UBICADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO 114
FIGURA 42. ESQUEMA DE LA FALLA DE LA PRESA BAJA DE SAN FERNANDO 116
FIGURA 43. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD 116
FIGURA 44. RESISTENCIA AL CORTE EN ENROCADOS. DATOS OBTENIDOS DE TRIAXIALES DE GRAN TAMAÑO 121

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CAUSAS DE LAS FALLAS 11
TABLA 2. EDAD DE LAS PRESAS EN TIERRA Y SUS FALLAS 12
TABLA 3. INVENTARIO DE FALLAS EN PRESAS. 14
TABLA 4. VOLUMEN DE MATERIAL EXTRAÍDO DE CADA UNA DE LAS ÁREAS DE FUENTES MATERIALES 33
TABLA 5. SUBCUENCA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO 49
TABLA 6. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO-DATOS 64
TABLA 7. INFORMES DE DISEÑOS PARA LICITACIÓN EVALUADOS 68
TABLA 8: RELACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO-TÚNEL DE DESVIACIÓN 69
TABLA 9. BLOQUES CRÍTICOS, DIMENSIONES Y SOPORTES REQUERIDOS 70
TABLA 10. DEFORMACIONES ESPERADAS EN EL TÚNEL 71
TABLA 11. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PRESENTADOS EN EL INFORME PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL CUERPO DEL DIQUE 72
TABLA 12. FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS PARA LA ESTABILIDAD DEL DIQUE 72
TABLA 13. VALORES DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDOS PARA EL PRESENTE ANÁLISIS 73
TABLA 14. VALORES DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDOS PARA EL PRESENTE ANÁLISIS 75
TABLA 15. ANÁLISIS DE DEBILIDAD E INCERTIDUMBRES IDENTIFICADAS Y POSIBLES CONSECUENCIAS EN LA ESTABILIDAD DE LAS OBRAS PRINCIPALES DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO. 96
TABLA 16. FACTORES DE EROSIÓN. 106
TABLA 17. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN PARA CONDICIONES DE FLUJO PERMANENTE Y UNIFORME ASOCIADA CON LA EVENTUAL RUPTURA DE LA REPRESA EL QUIMBO 111
TABLA 18. EFECTO DE DESASTRES NATURALES SOBRE EL BIENESTAR SOCIAL Y ECONÓMICO 124

1 INTRODUCCIÓN

La Corporación TERRAE fue contratada por la Gobernación del Huila para apoyar procesos de planificación territorial en el área de influencia del Quimbo. Dada la centralidad del proyecto en aspectos de amenaza y riesgo para una amplia área del Departamento del Huila, se hace necesario un análisis profundo desde la perspectiva geoambiental de los documentos técnicos remitidos por EMGESA S.A., así como una revisión de la información geológica, geomorfológica, hidrogeológica y geotécnica existente para la zona y aspectos de amenaza y riesgo relacionados con la construcción y funcionamiento de represas en zonas sísmicamente activas.

A nivel internacional, la comprensión del riesgo de desastre asociado a la construcción y puesta en funcionamiento de proyectos hidroeléctricos ha tomado gran importancia como consecuencia de los efectos negativos que en términos sociales, ambientales y económicos representa la inundación, el desplazamiento de comunidades y por sobre todo, la falla o el colapso de este tipo de estructura dentro del área de influencia directa de la zona de inundación, como lo demuestra que hayan sucedido más de 600 fallas registradas por diferentes autores desde 1931 hasta la fecha, asociadas principalmente, a deficiencias de exploración y caracterización geológica, sísmica y morfodinámica (procesos de movimientos en masa), desconocimiento del comportamiento de los materiales bajo condiciones de saturación y aceleraciones pico, sumado a la ausencia de información relacionada con el flujo sub-superficial; lo cual genera deficiencias en los modelos planteados y la falla de las estructuras principales durante su funcionamiento[1].

Dentro de los escenarios más críticos de falla, se estima como el de mayor peligrosidad la falla súbita de la estructura principal de contención, la cual se puede generar como se mencionó anteriormente, por deficiencias en la construcción de la línea base y diseños, o por eventos extremos no esperados, como son lluvias extremas y aceleraciones sísmicas mayores a las de diseño. Este tipo de evento, se caracteriza por poseer tiempos de respuesta muy cortos (menor a 6 horas) por parte de la población localizada aguas abajo de las represas.

Por tal razón, para el diseño, construcción y puesta de funcionamiento de este tipo de proyectos es fundamental la elaboración de una línea base que permitan conocer en el mayor detalle posible, las complejidades del terreno, para garantizar que cada uno de los elementos que componen este tipo de proyecto (presas, diques, túneles y vertederos), respondan adecuadamente las condiciones actuales y futuras a las que se verá enfrentado durante su operación y una vez finalizada su vida útil[2].

Sumado a lo anterior, existen impactos negativos ambientales relacionados con la construcción, operación y abandono de este tipo de proyectos, los cuales deben ser identificados y monitoreados, con el fin de establecer medidas de compensación, mitigación, corrección y prevención de los posibles impactos negativos generados y es la razón por la cual, en Colombia son objeto de licenciamiento ambiental.

[1] Zhang L.M & Jia J.S (2007). Analysis of earth dam failures – A database approach. ISGRS2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk.
[2] Patrick J. Regan, P.E (2009). An examination of dam failures Vs. Age of Dams. . Managing our water retention system. 29th Annual USSD Conference. Nashville, Tennessee, April 20 – 24.

En el caso particular sobre el cual se desarrolla el presente documento corresponde al proyecto hidroeléctrico “El Quimbo”, localizado en el departamento del Huila, entre las cordilleras Central y Oriental de Colombia, a 70 km al sur de la ciudad Neiva y 12 km del embalse de Betania, en el departamento del Huila, el cual consiste en el represamiento de 2.354’000.000 metros cúbicos del Río Magdalena y Suaza, cubriendo 8.250 hectáreas para la generación de 400 MW, a partir de un sistema integrado por una presa en tierra con cara de concreto de 151 metros de altura, un dique auxiliar con núcleo impermeable de 66 metros de altura, localizado al oriente del cuerpo de presa principal, un túnel de condición y descarga, el cual conduce el agua hacia la casa de máquina, una estructura de rebosadero y casa de máquinas; con una vida útil del proyecto de 50 años, de acuerdo a datos reportados por la EMGESA[3].

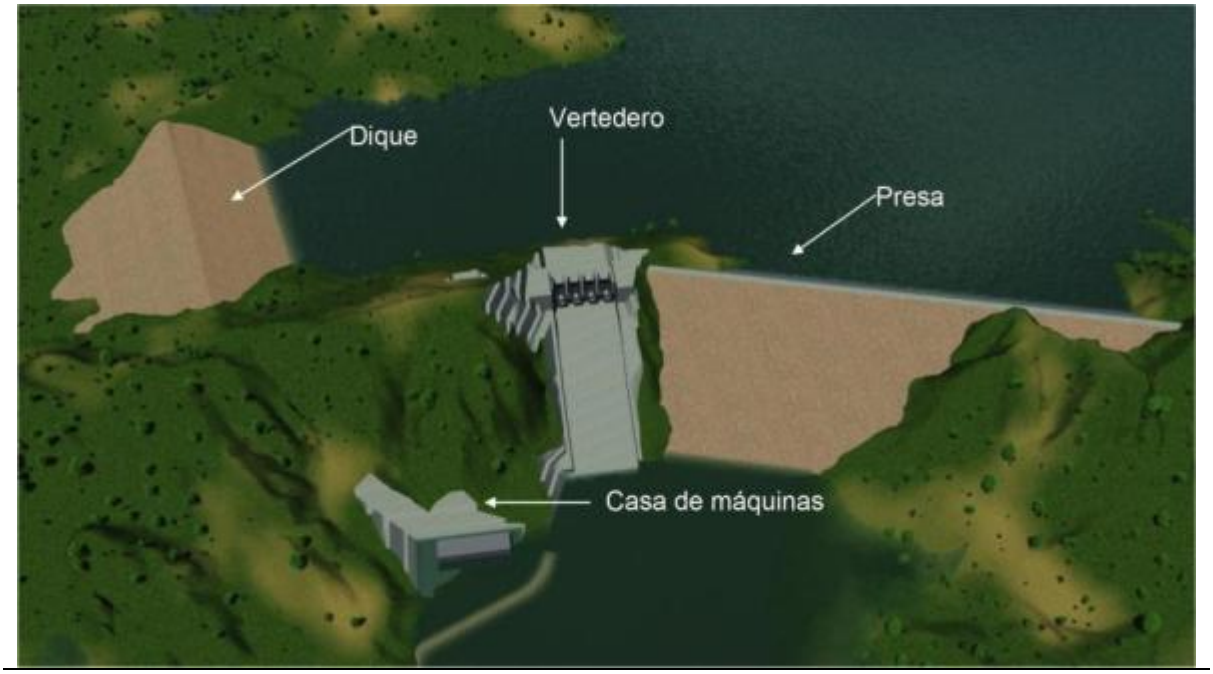


FIGURA 1. ESQUEMA DE LA REPRESA DE EL QUIMBO

Al represar el río Magdalena se formó un embalse que cubre 8586 hectáreas y tiene una altura, en la zona de presa, de 151 metros. Estas condiciones específicas hacen del proyecto hidroeléctrico una obra de gran magnitud (de hecho, el Comité de Grandes Represas, ICold por sus siglas en inglés, establece en alturas mayores de 15 metros un índice para definir grandes represas).

Por otra parte, desde su licenciamiento ambiental, en el año 2008, se han presentado múltiples modificaciones como consecuencia de los numerosos y reiterativos requerimientos que se han realizado desde la sociedad civil y algunas entidades (en particular la Contraloría General), frente a los estudios realizados de impacto ambiental, censo a la población afectada e impactos generados en términos bióticos no valorizados adecuadamente, dentro del proceso de licenciamiento. Sumado a lo anterior, como

[3] http://www.proyectoelquimboemgesa.com.co/site/

consecuencia de hallazgos realizados por parte de entes de control nivel nacional[45], que han llamado la atención, frente aspectos relacionados con las incertidumbres existentes en términos de amenaza sísmica, estabilidad de las obras, caudal ecológico entre otros, lo cual hace de vital importancia para los sectores involucrados tomar acciones prospectivas para prevenir y mitigar las posibles afectaciones a la población. Especialmente, para las autoridades territoriales al ser estas los responsables de la gestión del riesgo en sus territorios, como lo establece la Ley 1523 de 2012.

En concordancia con lo anterior, por solicitud del Gobernador del departamento del Huila, Carlos Julio González Villa, a continuación se presenta un análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de desastres asociado al proyecto hidroeléctrico "El Quimbo", en conjunto con la evaluación de los impactos negativos ambientales actuales y futuros, con el fin identificar las debilidad técnicas del proyecto a partir de la documentación que reposa en el expediente ambiental y establecer acciones prospectivas frente a la gestión del riesgo para garantizar el bienestar de los pobladores del departamento del Huila, dentro del área de influencia del proyecto.

El informe está compuesto por 7 capítulos, los cuales siguen una metodología: análisis y evaluación del Estudio de Impacto Ambiental 2009, por el cual se obtuvo la Licencia Ambiental bajo Resolución 0899 de 15 de mayo de 2009 y sus posteriores modificaciones; verificación del cumplimiento de la norma vigente y análisis de referencia técnica – científica internacional, con el fin de establecer las condiciones de riesgo de desastre que se encuentra expuesta la población localizada aguas abajo del proyecto hidroeléctrico "El Quimbo", así como la identificación de los impactos ambientales generados por el proyecto que deben ser considerados.

Finalmente se realizan las conclusiones y recomendaciones necesarias para asegurar que los riesgos acá contemplados sean evaluados y mitigados a cabalidad por EMGESA.

2 OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Apoyar las evaluaciones de las condiciones de amenaza y riesgo, así como de los eventuales impactos ambientales no considerados alrededor del diseño, construcción y operación de la represa de El Quimbo y sus implicaciones en la planificación territorial de las zonas de influencia directas e indirectas del proyecto.

2.2 ESPECÍFICOS

a. Apoyar las evaluaciones de los componentes geosféricos (geología, geomorfología, geotecnia e hidrogeología), hidrológicos y de riesgos de la información remitida por EMGESA y que sirvió de base para el licenciamiento ambiental del proyecto.

[4] Contraloría General de la República. Actuación especial, ANLA. Seguimiento a denuncias ciudadanas para exigir el cumplimiento de obligaciones ambientales en la actual construcción de hidroeléctricas. Septiembre de 2014.
[5] Contraloría General de la República. Informe de Auditoría, ANLA. Junio 2016.

b. Revisar la información internacional sobre protocolos para estudios de diseño y construcción de represas y contrastar con la información pública referente a la represa del Quimbo.

c. Apoyar los análisis de los instrumentos de ordenamiento territorial y su relación con las amenazas y riesgos inducidos por la construcción y funcionamiento del proyecto hidroeléctrico El Quimbo.

3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El análisis que se realiza a continuación se desarrolló siguiendo la siguiente metodología:

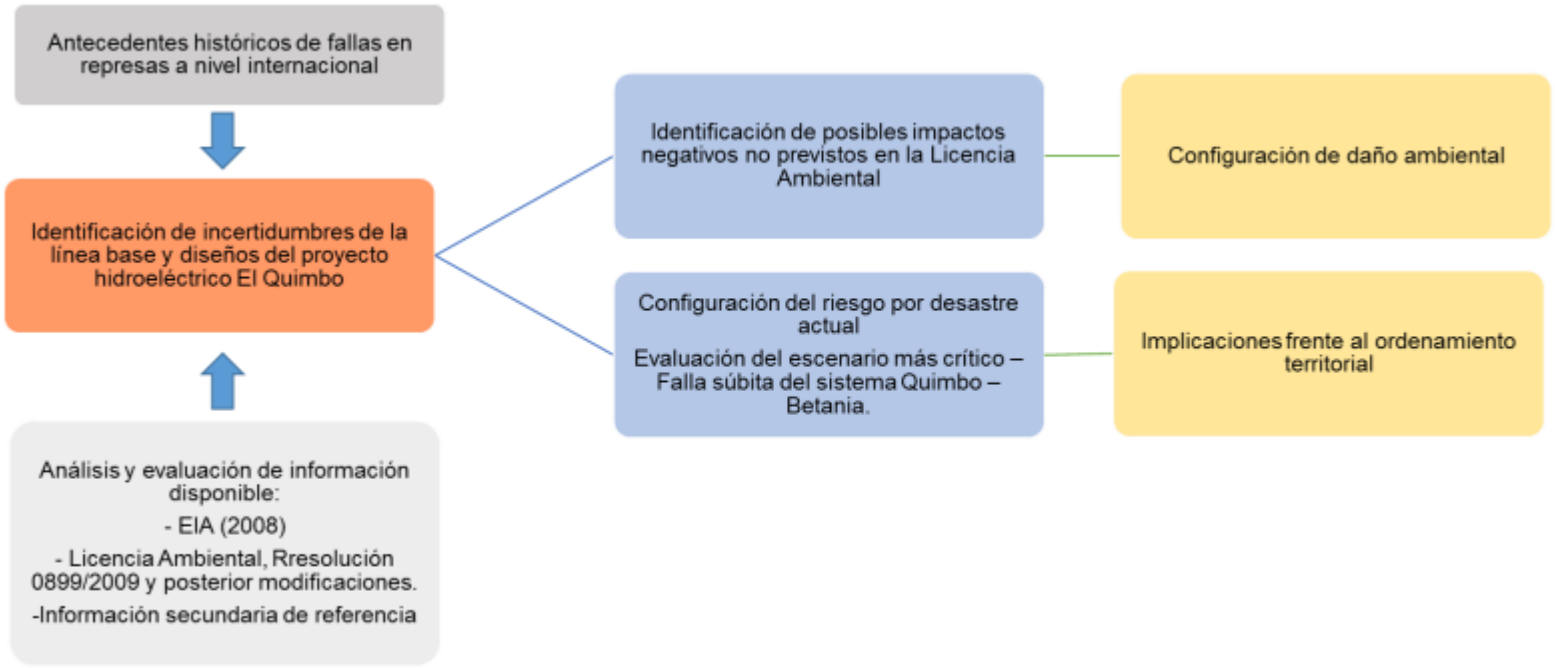


FIGURA 2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

4 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE FALLA DE REPRESAS

A nivel internacional se han realizado extensivos trabajos de investigación, para analizar las causas de los diferentes tipos fallas que se han presentado en las represas, durante su construcción y puesta en funcionamiento. Esto como consecuencia de los grandes desastres generados ante el colapso de este tipo de estructuras, los cuales han comprometido la vida y salud de las personas, así como la estabilidad económica y social de la población en su conjunto. Ejemplo de esto, el Huracán Katrina en agosto de 2005 en Nueva Orleans, el cual causó el colapso de los diques de protección de la ciudad, generó pérdidas tasadas entre 100 y 200 mil millones de dólares y más de 600 muertes[6],.

De acuerdo con Zhang L.M & Jia J.S (2007), las causas más representativas de fallas de represas a nivel mundial son:

TABLA 1. CAUSAS DE LAS FALLAS (MODIFICADO DE MWR, 1993)[7]

No.	Causas
1	Excedencia en altura de la presa
	1) Insuficiente capacidad del vertedero
	2) Excedencia de las lluvias criticas de diseño
2	Problemas de calidad
	1) Tubificación en el cuerpo de la presa
	2) Deslizamiento en el cuerpo de la presa
	3) Tubificación en la fundación
	4) Tubificación alrededor del vertedero
	5) Problemas en la calidad del vertedero
	6) Tubificación en las estructuras auxiliares
	7) Calidad de las estructuras auxiliares
3	Mal manejo
	1) Disminuye la capacidad del reservorio por incremento de arrastre de sedimento en temporada invernal.
	2) Pobre mantenimiento y operación
	3) Problemas en la organización de responsabilidades del manejo y operación del proyecto hidroeléctrico.
4	Desastres
	1) Terremotos
	2) Guerra o ataques terroristas
	3) Ruptura de la presa
5	Otros
	1) Obstrucción del flujo en vertedero por deslizamiento en alguna de sus caras
	2) Falla de la presa como consecuencia de la descarga de la presa
	3) Mal manejo de la planeación del proyecto
6	Desconocidas.

[6] Zhang L.M & Jia J.S (2007) Analysis of earth dam failures – A database approach. ISGRS2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk.

[7] MWR (1993). National inventory of reservoir dam failures. The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (MWR), Beijing (In Chinese)

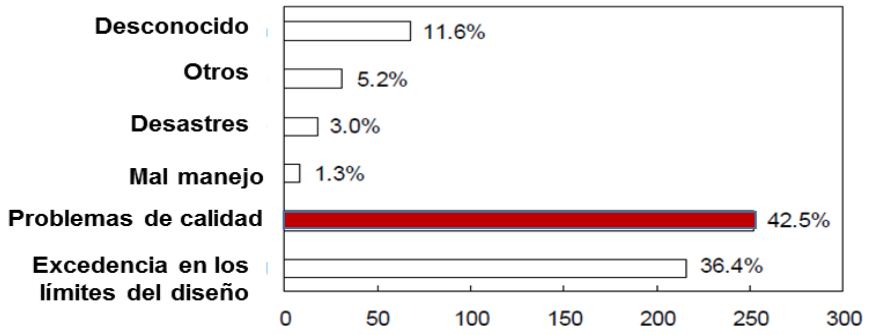


FIGURA 3. PORCENTAJE DE CAUSAS DE FALLAS EN PRESAS EN TIERRA. MODIFICADO DE ZHANG L.M & JIA J.S (2007)

De acuerdo con lo anterior, las principales causas están relacionadas con problemas de calidad en los diseños y durante la construcción de las obras, esto como consecuencia de la caracterización insuficiente de las condiciones geotécnicas, hidrogeológicas, sismológicas y geoquímicas del área de implantación del proyecto y aceleraciones pico no esperadas. Lo cual generó efectos de tubificación en el cuerpo de la represa y en el suelo de fundación, deslizamientos, entre otros[8].

Por otra parte, es importante mencionar que según investigaciones realizadas por Patrick J. Regan, P.E (2009), las fallas en represas pueden generarse en cualquier momento a lo largo de su vida útil e incluso una vez finalizada ésta[9]. Por lo tanto, en el caso del proyecto hidroeléctrico El Quimbo, tanto el dique principal, como la infraestructura auxiliar pueden fallar a lo largo de la vida útil del proyecto de 50 años, o posterior a éste.

Ejemplo de lo anterior, en la tabla siguiente, se puede observar que el mayor porcentaje de fallas registradas se presentan en los primeros 10 años (se resalta, los mayores porcentajes de fallas registradas):

TABLA 2. EDAD DE LAS PRESAS EN TIERRA Y SUS FALLAS. FUENTE: ZHANG L.M & JIA J.S (2007)

Rango de años	Número de casos	Porcentaje (%)
0-1	85	14,3
1-5	96	16,2
5-10	36	6,1
10-20	62	10,5
20-40	58	9,8
40-60	31	5,2
60-80	16	2,7
80-100	7	1,2
100-150	10	1,7
>150	6	1,0

[8] Zhang L.M & Jia J.S. (2007). Analysis of earth dam failures – A database approach. ISGRS2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk.
[9] Patrick J. & Regan, P.E (2009). An examination of dam failures Vs. Age of Dams. Managing our water retention system. 29th Annual USSD Conference. Nashville, Tennessee, April 20 – 24**.**

Rango de años	Número de casos	Porcentaje (%)
Desconocido	186	31,3
Total	593	100,0

En concordancia con lo anterior, al realizar un inventario de fallas en represas con características similares a las presentadas en el proyecto El Quimbo (las cuales se resumen en tabla que se presenta a continuación), fue posible identificar como principales causas: deficiencias en la caracterización de la línea base de área y en el diseño estructural, hidráulico y geotécnico de la presa. Y como consecuencias: personas heridas y fallecidas, daños sobre viviendas, vías y puente, relacionado principalmente a la carencia de sistemas de monitoreo y alertas tempranas, así como un efectivo plan de contingencia.

TABLA 3. INVENTARIO DE FALLAS EN PRESAS[10].

Año	Nombre	Localización	Antecedente de falla	Causas de la falla	Afectaciones
1928	Presa St. Francis	Estados Unidos	*Altura de 200 ft, presa de gravedad - concreto* *"Poco tiempo después de su primer llenado (…) La literatura técnica menciona que el conglomerado rojizo de la fundación fue afectado por la saturación de agua y perdió la resistencia, entre otros motivos".*	*Ausencia de ensayos y análisis geotécnicos en condición natural y saturada la fundación (Roger, 2013)*	*45 millones metros cúbicos de agua, crearon una ola que destruyó la represa y varias localidades. Más de 432 personas perdieron la vida[11].*
1959	Presa Malpasset	Francia	*Estructura en arco con 70 m de altura aproximadamente. Falló después del llenado.* *Deslizamiento de un bloque en la fundación en la margen izquierda causo la falla de la presa.*	Ausencia de investigaciones sobre movimiento entre fracturas y las propiedades de permeabilidad relacionadas con la presión (Mello, 1966)	*400 muertos, sobre el pueblo de Frejus. [12]*
1963	Presa Vajont	Italia	*Estructura tipo bóveda.*	Debilidad en el conocimiento de movimiento entre fracturas o discontinuidades rocosas (López, 2014)	Involucró aprox. 300 mil m3 de material de deslizamiento. La ola sobrepasó la presa. Millares de víctimas.
1975	Presa Henan[13]	Banqiao,China	*Altura de 24,5 m, Presa de gravedad. Capacidad de 492 millones de metros cúbicos.*	Durante su vida útil se planteó la mejora en términos de diseño, aumentando el número de aliviaderos, así como desagüe de fondo, por lo tanto, no se garantizó el caudal ecológico del río Ru. Las lluvias provenientes del Tifón Nina, de agosto de 1975, sobrepasó la capacidad de la presa, generando una ola de 50 kilómetros por hora, un ancho de 10 km y 3,7 metros de altura.	Se estimó que más de 85.000 pérdidas humanas y más de 11 millones de personas resultaron directamente afectadas. La orden de evacuación fue ineficiente por la ausencia de un sistema de alertas tempranas.
1976	Presa Teton	EUA	*Presa en tierra construida sobre fundación de roca riolita muy fracturada y tobas, con grietas anchas*	Tubificación. Existen varias teorías de las posibles fallas entre ellas, fisuramiento del loes del núcleo, asentamientos diferenciales por la forma del valle	*Mil millones de dólares.[14]* *Solo murieron 6 personas, porque se dio una alerta temprana.*

[10] Kanji M (2016). Estabilidad de presas y taludes condicionados a aspectos geológicos y geotécnicos. XV Colombian geotechnical congress & International specialized conference of soft rocks. Cartagena – Colombia, Octubre 5th – 7th

[11] http://damfailures.org/case-study/st-francis-dam-california-1928/

[12] https://www.etcg.upc.edu/asg/mr/descargas/MR2012_Tema1b.pdf

[13] Pisaniello et al. 2015. International small dam safety assurance policy benchmarks to avoid dam failure flood disaster in developing countries. Journal of Hydrology. Volumen 531, Part 3. Pages 1141-1153.

[14] http://web.mst.edu/~rogersda/teton_dam/Retrospective%20on%20Teton%20Dam%20Failure.pdf

Año	Nombre	Localización	Antecedente de falla	Causas de la falla	Afectaciones
			y hasta de 30m de profundidad.	causando hidrofracturamiento y percolación por las grietas en la roca. También se cree que hubo erosión en el llenado generando tubificación entre las fracturas (Water Power, 2002).	
1997	Presa Anita	Montana, EUA	La altura de la represa 36 feet, presa tipo dique, construida con materiales excavados.	Presencia de arcillas dispersivas en el cuerpo de la presa, fracturas hidráulicas, deficiencia en el drenaje de la presa. [15]	*Más de 10.000 dólares. No muertes.*
2004	Presa Camará	Brasil	*Presa en concreto de 55 m de altura, con un vertedero en la parte central.*	Ausencia de caracterización geológica – geotécnica del macizo rocoso, lo cual impidió identificar una capa de 30 cm de material blanco (biotita), con una inclinación desfavorable de 30°, la cual falló, la cuando en el año 2004, la altura de la lámina de agua del embalse superó el 2/3 la altura de la presa, generando el movimiento de una capa de gneis (roca), causando la ruptura de la presa por la galería de drenaje. *Después de la falla se realizó una investigación por parte del Ministerio Público para establecer las causas de la falla, por lo cual se analizó todo el proceso de diseño, construcción y llenado de la presa (Kenji, 2004).* Encontrándose lo siguiente: - *En la etapa de diseño solo se realizaron 3 sondeos rotativos en la zona de la falla. Pero no se encontró ningún perfil geológico – geotécnico.* - *Durante la construcción, a pesar que se encontró la capa débil, se continuó con la construcción de presa, considerando que su extensión era limitada.* - *En la etapa de llenado, en los últimos 3 meses previos a la falla de la prese se observaron diversas anomalías: surgimiento de agua al pie del estribo izquierdo, y transporte de sólidos por los drenes de la galería, lo que conllevó a la*	- *El propietario fue condenado por la justicia por no haber acompañado y monitoreado durante el llenado y por no haber actuado para evitar la ruptura.*

[15] (1) FEMA. (2005). Technical Manual: Conduits through Embankment Dams, Best Practices for Design, Construction, Problem Identification and Evaluation, Inspection, Maintenance, Renovation, and Repair. Federal Emergency Management Agency.

Año	Nombre	Localización	Antecedente de falla	Causas de la falla	Afectaciones
				proyectista a manifestar una alarma sobre la seguridad de la presa, recomendando bajar el nivel del embalse para investigaciones. *En el último mes se incrementaron, así como la continuidad de transporte de sólidos causando taponamiento de la galería (…) el proyectista nuevamente recomendó el abatimiento del nivel agua, sin embargo, sus recomendaciones no se siguieron. Llevando a la falla.*	
2005	Sistema de presas de Nueva Orleans	Nueva Orleans, EU.		El paso del Huracán Katrina, generó la falla del sistema de dique de protección de la ciudad de Nueva Orleans, inundando a aproximadamente el 75% del área metropolitana. Entre las fallas identificadas posterior al desastre, se encuentra: a) incremento de la lámina de agua por encima de la altura de los diques. b) rotura del cuerpo de presa c) perdida de resistencia del suelo de fundación[16].	Más de 1.000 pérdidas humanas y el 80% de la ciudad quedo inundada. 1577 muertos en la ciudad de Luisiana y 238 en Mississipi
2008	Presa Apertadinho	Rodonia, norte de Brasil	Presa en tierra, con una altura máxima de 38 m y extensión de 440 m. El diseño inicial se modificó, se elevó la fundación del vertedero. Su construcción terminó en diciembre de 2007. En el momento del llenado se generó tubificación, causando la ruptura de la presa a principios de 2008, generando el vaciado rápido del embalse, fuerte erosión del valle e inundación de la casa de máquinas.	Resistencia en condiciones de saturación, fundación de arenisca poco cementada y friable. Susceptible a la erosión y formación de tubificación. Ausencia de drenes adecuados.	
2008	Zipingpu	China	Presa en tierra con cara de concreto,	Sismo de 7,8 grados en la escala de Richter debido a *sismicidad inducida*	Agrietamiento de la presa y más de 15.000 pérdidas humanas.

[16] https://soundwaves.usgs.gov/2006/01/

5 IDENTIFICACIÓN DE INCERTIDUMBRES DE LA LÍNEA BASE Y DISEÑOS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO.

5.1 GEOLOGÍA

5.1.1 Análisis de los términos de referencia

Del EIA presentado en octubre de 2008 por EMGESA S.A y realizado por INGETEC S.A se puede establecer que las escalas a las cuales se realizó la cartografía y descripción de las unidades geológicas corresponden a 1:75.000 para la caracterización regional en solo una parte de la zona de influencia indirecta y 1:2.000 para la zona de construcción de las estructuras principales. Sin embargo, la empresa no presenta la cartografía geológica al detalle requerido (1.25.000) para toda el área de influencia directa del proyecto incluyendo el vaso del embalse.

> *"El área de influencia directa comprende el vaso del embalse y las zonas de obras (vías de acceso a los sitios de obras, zonas de vías y obras, áreas de campamentos y talleres, así mismo las zonas de préstamo ubicadas en playas y vegas de los ríos Magdalena y Páez, vías sustitutivas), se incluye dentro del área de influencia directa el río Magdalena aguas abajo del sitio de presa y el embalse de Betania, desde el punto de vista de calidad de aguas, aspecto que es analizado como impacto potencial del proyecto, durante el llenado y operación."*[17]

En cambio, lo que se presenta a lo largo del embalse es una cartografía 1:75.000 con baja densidad de datos estructurales, poniendo como ejemplo los dos (2) datos de estratificación que amarran la sección geológica B-B, la cual atraviesa cinco (5) unidades geológicas que se supone tienen comportamientos diferentes.

En este mapa (1:75.000) la delimitación de unidades contempla un menor detalle en comparación con la de la Plancha geológica a escala 1:100.000 generada por el INGEOMINAS en 1998 (Plancha 366-Garzón), donde el Grupo Gualanday por ejemplo logra ser subdividido en términos litológicos en el Grupo Chicoral, Formación Potrerillo y Formación Doima, a diferencia de lo que ocurre en el mapa regional del EIA donde el paquete completo se cartografió como Grupo Gualanday aun cuando varios de los trabajos geológicos en esta porción del Valle Superior del Magdalena (Subuenca de Neiva) , hacen referencia a las tres unidades antes mencionadas (Velandia *et al.,* 2001[18]; Jiménez, G. ,2008[19]; Rodríguez *et al.,* 1998[20]).

Desde el punto de vista estructural, en el mapa se presenta incertidumbre en algunas fallas en cuento a su buzamiento y tipología, como es el caso de la Falla Rioseco que

[17] EMGESA - INGETEC. 2008. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Resumen ejecutivo, pág. 0-3

[18] Velandia, F., Núnez, A., Marquínez, G. (2001). Mapa geológico del departamento del Huila – Memoria explicativa. INGEOMINAS. Bogotá D.C., 2001.

[19] Jiménez, G. (2008). Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del Valle Superior del Magdalena (Anticlinal de la Hocha). Universidad Nacional de Colombia.

[20] Rodríguez, G., Ferreira, P., Velandia, F., Nuñez, A. (1998). Geología de la Plancha 366 Garzón. INGEOMINAS.

pasa aproximadamente a 1700 m del sitio de presa, además de la ausencia de datos estructurales medidos sobre planos de fractura en el mapa geológico a escala 1:75.000.

Adicionalmente, el documento no contiene la información metodológica que permita definir con que rigor se realizaron los planos geológicos adjuntos p.ej. para el trabajo de campo, no se reporta ni el total ni la ubicación de las estaciones de control, tampoco los parámetros evaluados en cada una de ellas.

Cabe resaltar, que en la información suministrada por la ANLA no se encontraron anexos los cortes geológicos que normalmente acompañan al mapa y permiten entender como es la disposición de las unidades a profundidad, aun cuando en el Plano PL-EIAQ-15 se presenta la ubicación de dos secciones geológicas.

En cuanto a estratigrafía, para el área de influencia indirecta se presenta una descripción generalizada de las unidades y una columna estratigráfica (Figura 4) a escala 1:75.000 de las rocas que afloran en vecindades al proyecto y que en este escrito con base en la información del EIA se resumen como sigue:

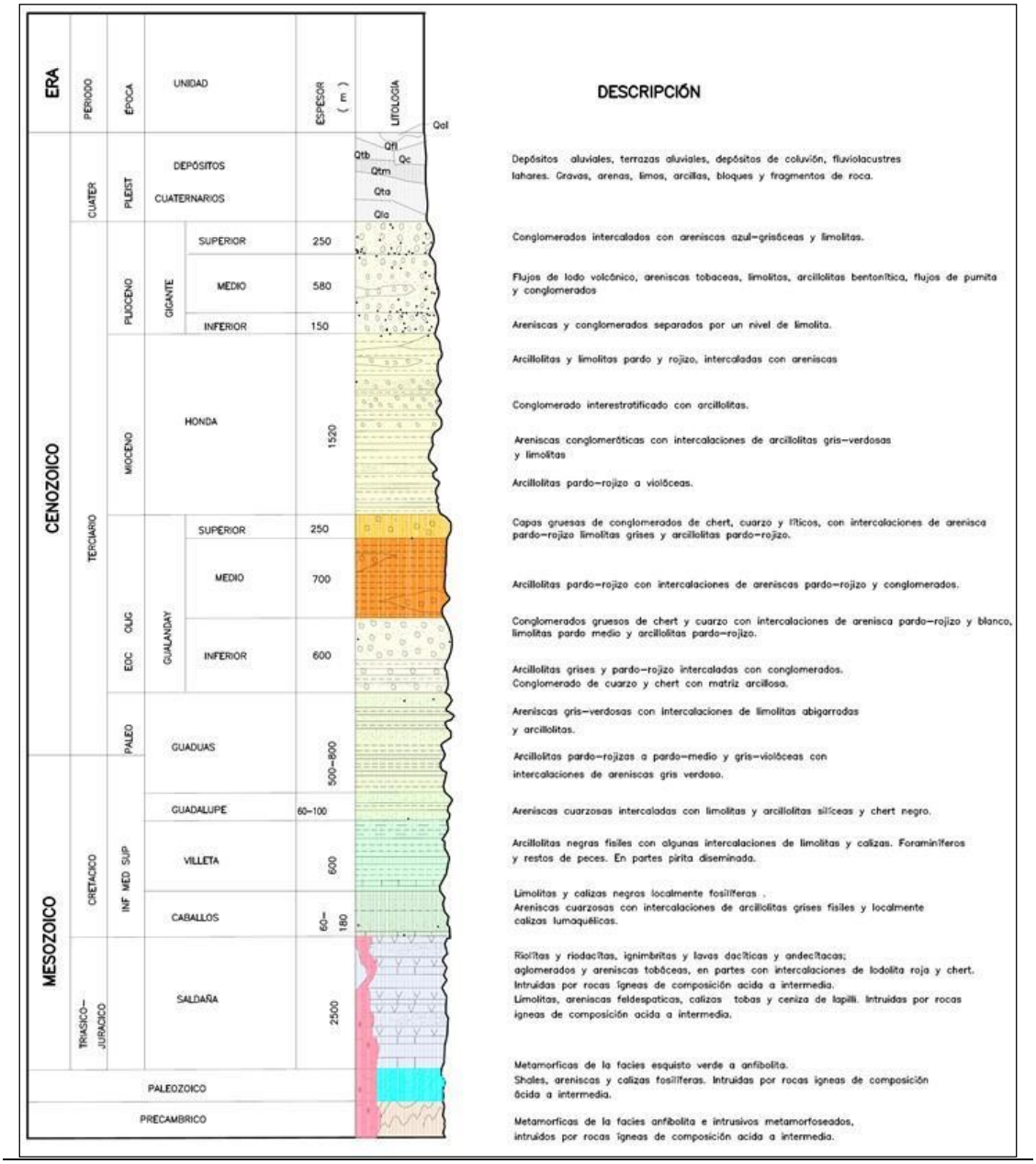


FIGURA 4. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL A ESCALA 1:75.000. FUENTE: EMGESA - INGETEC, (2008).

El área de influencia indirecta está constituida por un basamento Precámbrico de rocas metamórficas de alto grado (migmatitas, neises y granulitas) que afloran en ambos flancos del valle del Magdalena, en algunas zonas recubierto por rocas sedimentarias paleozoicas y en otras cubierto por unidades del Mesozoico representadas por rocas continentales y marinas del Triásico - Jurásico (formaciones Luisa, Payandé y Saldaña) y rocas marinas del Cretácico (formaciones Caballos, Villeta y Guadalupe).

Por su parte, El Cretácico superior y el Terciario alcanzan espesores de hasta varios miles de metros y se componen de rocas sedimentarias continentales de las formaciones Guaduas, Grupo Gualanday y formaciones Honda y Gigante (o Mesa).

Finalmente, los depósitos cuaternarios de terrazas, abanicos aluviales, conos de deyección y lahares recubren parte de la zona y son afectados en parte por movimientos tectónicos recientes.

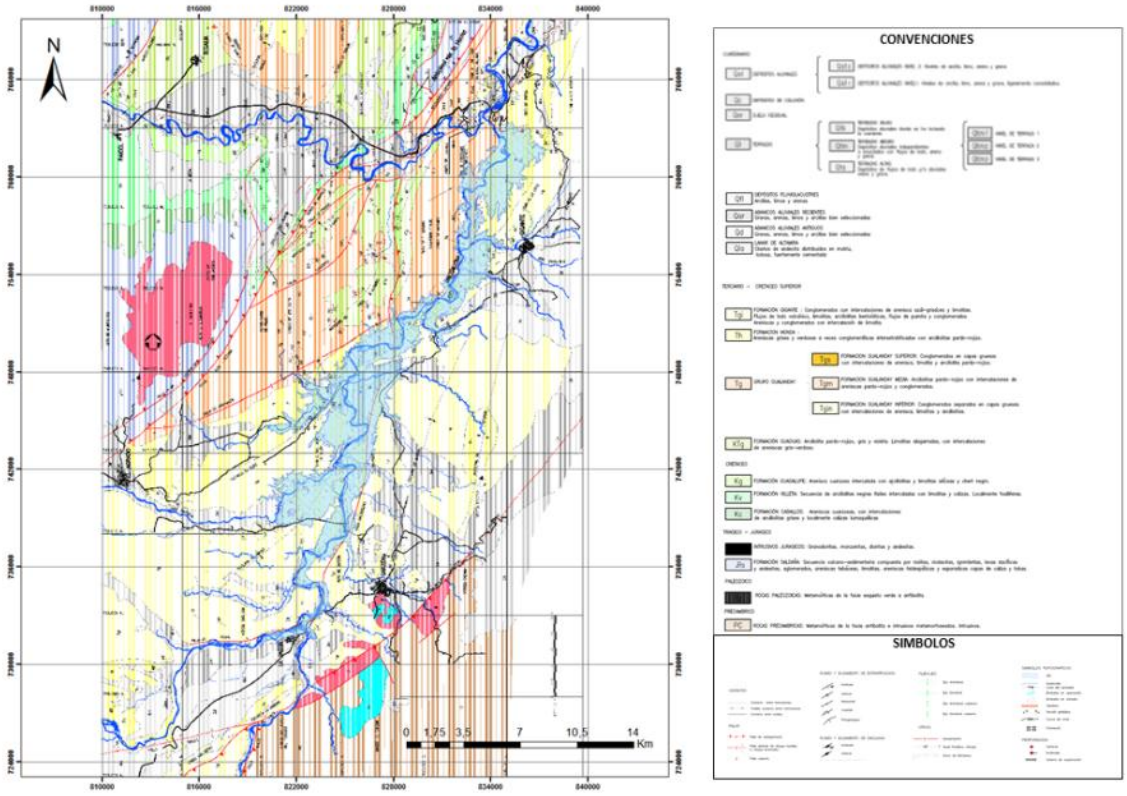


FIGURA 5. MAPA GEOLÓGICO REGIONAL DEL EMBALSE A ESCALA 1:75.000. MODIFICADO DE EMGESA – INGETEC (2008)

Por otra parte, para el área de influencia directa se establece que:

> *"En relación con las unidades estratigráficas, en la zona del embalse afloran rocas sedimentarias de las Formaciones Gualanday Superior, Gualanday Medio, Honda y Gigante, así como depósitos cuaternarios que constituyen aluviones, terrazas bajas y medias, abanicos aluviales recientes y el lahar de Altamira."*

A continuación se presenta una recopilación de la información litológica presentada por unidad geológica a lo largo del EIA (EMGESA – INGETEC, 2008), con ella se pretende establecer qué parámetros fueron analizados por unidad y comparar el detalle de la descripción para cada una de ellas.

- **Cuaternario**

Depósitos aluviales (Qal): Los depósitos aluviales recientes o aluviones están conformados por arcillas, limos, arenas y gravas dispuestas en capas de variado espesor y forma, normalmente lenticular, con clara gradación y selección. Se presentan en los planos de inundación del río Magdalena y muchos de sus afluentes formando playones,

barras de meandros y barras de punta. En el capítulo 4 del EIA se presentan las descripciones de granulometría, estado de oxidación y espesor de aquellos depósitos aprovechados para la extracción de materiales de construcción y en el capítulo 9 la descripción de las perforaciones en términos de granulometría, plasticidad y composición para el sitio de presa y ataguía, casa de máquinas, rebosadero, dique auxiliar y zona de préstamo 13 y 14.

Terrazas (Qt) - Terrazas bajas (Qtb), Terrazas medias (Qtm): Al margen del error de mezclar conceptos geomorfológicos (terrazas) con aspectos geológicos, se distinguen varios niveles de terraza conformadas por depósitos aluviales que en el capítulo 4 se describen como intercalaciones de capas lenticulares de arena arcillosa, arcilla, arcilla limosa, arena y grava, además se presentan datos de espesor, granulometría y composición de gravas y cantos.

Depósitos de ladera o coluvión (Qc): Conformados por bloques y fragmentos de roca angulosos de diferente tamaño y forma, soportados en una matriz arcillosa. En la caracterización geotécnica de la zona del proyecto en el capítulo 9 se presentan detalles de la composición (chert, cuarzo y arenisca) y consistencia de los depósitos del sitio de presa y ataguía, casa de máquinas y rebosadero.

Depósitos fluviolacustres (Qfl): Conformados predominantemente por sedimentos de tamaño arcilla, limos y arenas, transportados por corrientes superficiales que drenan terrenos montañosos susceptibles a la meteorización y depositados en un medio lagunar o de pantano. En el área, estos depósitos se encuentran rellenando cuencas intramontañosas de corta extensión.

Abanicos aluviales recientes (Qar): Compuestos por gravas (cantos rodados, guijarros, guijas y gránulos) arenas, limos y arcillas, estos depósitos *"tienen un gradiente textural vertical y longitudinal del fondo hacia la superficie y del ápice hacia la base del abanico con materiales gruesos, medios y finos respectivamente".*

Estos abanicos se encuentran principalmente sobre la margen derecha del río Magdalena entre las desembocaduras de los ríos Suaza y Loro aproximadamente y aguas abajo de la desembocadura del río Páez.

Lahar de Altamira (Qla): Compuesto por grandes clastos angulares de andesita distribuidos en una matriz lodosa muy cementada. Se localiza entre las localidades de La Jagua y Altamira, sobre las márgenes del río Magdalena.

- **Terciario**

Formación Gigante (Tgi): Se presenta principalmente a la margen oriental del embalse y corresponde a una secuencia sedimentaria que a la base presenta capas gruesas de areniscas y conglomerados de cuarzo y abundantes cantos de rocas volcánicas, separados por un nivel de limolita. A la parte media se presentan flujos de lodo volcánico, areniscas tobáceas, limolitas y arcillolitas bentoníticas, flujos delgados de pumita y en menor cantidad conglomerados, son constantes las concreciones calcáreas en las areniscas y la madera silicificada en las arcillolitas bentónicas. Finalmente en el nivel superior se observan conglomerados de cantos de rocas plutónicas y metamórficas

procedentes del Macizo de Garzón, intercaladas con areniscas azules - grisáceas y limolitas. El espesor de la secuencia es de 1000 m y en el estudio se presenta únicamente una clasificación cualitativa de la permeabilidad:

> *"… con permeabilidades muy bajas, por presentar areniscas y conglomerados masivos texturalmente inmaduros y una importante porción de niveles arcillosos. Localmente por efectos del diaclasamiento, esta unidad puede presentar permeabilidad secundaria. En general, estas unidades se consideran como semipermeables)".*

Como se ve, las consideraciones sobre las características físicas, que luego van a ser la base para la caracterización geomecánica e hidrogeológica son completamente subjetivas, sin ningún análisis de soporte.

Formación Honda (Th): Se presenta en la zona de construcción del dique auxiliar y sobre ambas márgenes del embalse. Corresponde a una secuencia de areniscas grises y verdosas en ocasiones conglomeráticas y conglomerados interestratificados con arcillolitas y rocas vulcano-clásticas de color pardo rojizo, se reportan también niveles de lodolitas rojizas y abigarradas con intercalaciones de areniscas. El espesor reportado es de 1520 m en la quebrada Guandinosa (Van Der Wiel 1991, en EMGESA - INGETEC, 2008) y en el estudio presentan el dato de conductividad hidráulica promedio y RQD, oxidación y compactación de las muestras extraídas en las perforaciones de la zona de dique auxiliar (granulometría: 58% es arenisca y el 42% arcillolita) y zona de préstamo 13 y 14.

Formación Gualanday Superior (Tgs): Aflora en el área de construcción de las estructuras principales y sobre ambas márgenes del embalse, se compone de paquetes o capas muy gruesas de conglomerado masivo, separados por capas de arenisca rojiza y carmelita, limolitas grises y carmelitas y arcillolitas rojizas. En el mapa 1:2000 se logran diferenciar 4 niveles (Figura 5) a lo largo de los 250 m de espesor. En el estudio se presenta un valor de conductividad hidráulica promedio y datos de RQD y litología obtenidos de perforación en el sitio de presa y ataguía a la margen derecha e izquierda del río Magdalena (arenisca 46 % y conglomerado 51 %, con una intercalación de limolita), túnel de desviación (17% es arenisca, 18% limolita y 59% de conglomerado) y rebosadero (el 62% es arenisca, 36% limolita y 2% conglomerado).

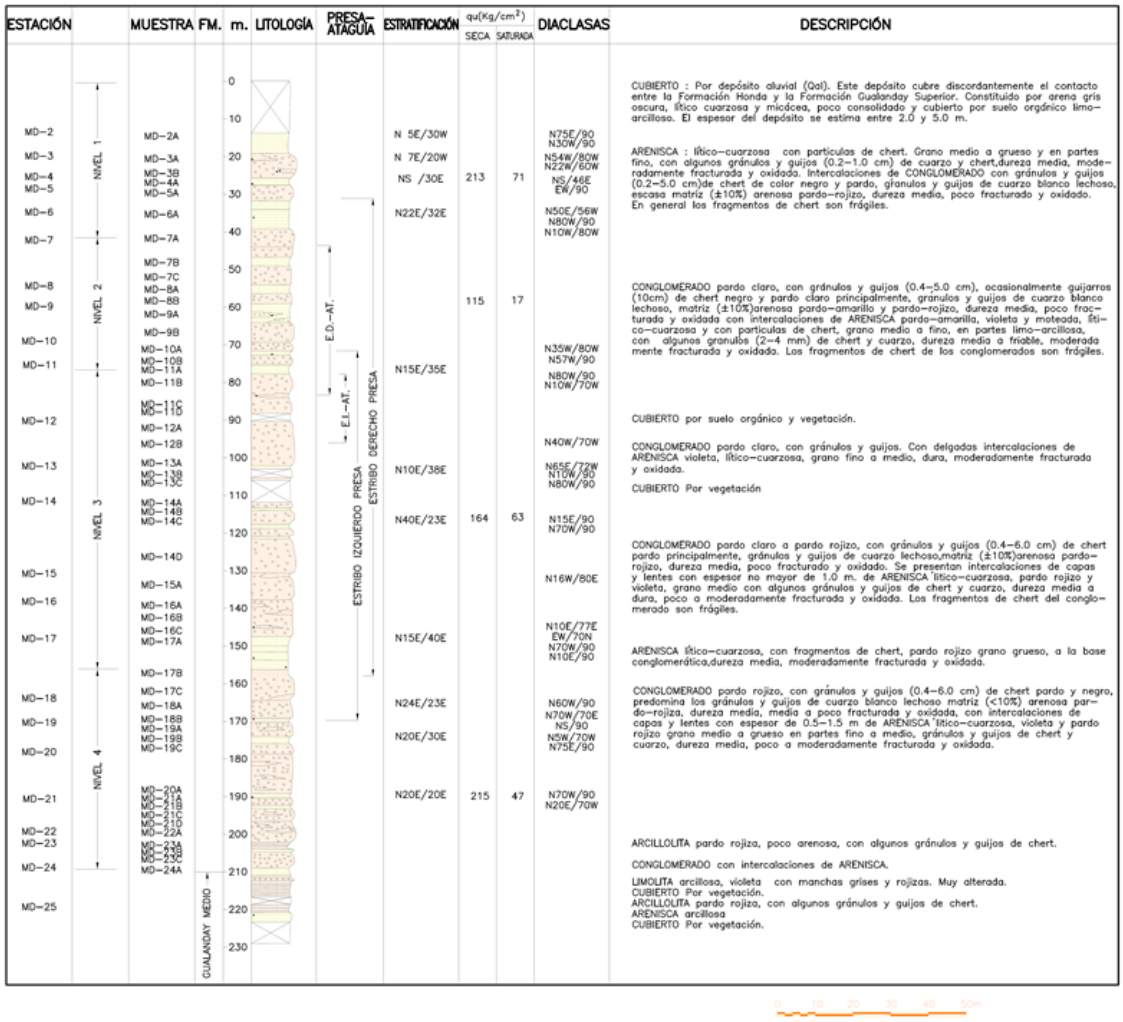


FIGURA 6. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DETALLADA LEVANTADA EN LA ZONA DE CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA A LA MARGEN DERECHA DEL RÍO MAGDALENA. FUENTE: EMGESA – INGETEC, (2008)

Formación Gualanday Medio (Tgm): A la margen derecha del embalse se presenta el Grupo Gualanday indiferenciado en la cartografía 1: 75.000, así como en cercanías a la presa. Esta formación presenta arcillolitas rojizas, areniscas rojizas y carmelitas y capas gruesas de conglomerado masivo en un espesor que se estima puede alcanzar los 700 m. En el estudio se presentan datos de perforación (RQD, granulometría) en la casa de máquinas (49% es arenisca, 23% limolita, 22% conglomerado y 6 % arcillolita) y rebosadero (arenisca 67% y arcillolita 33%).

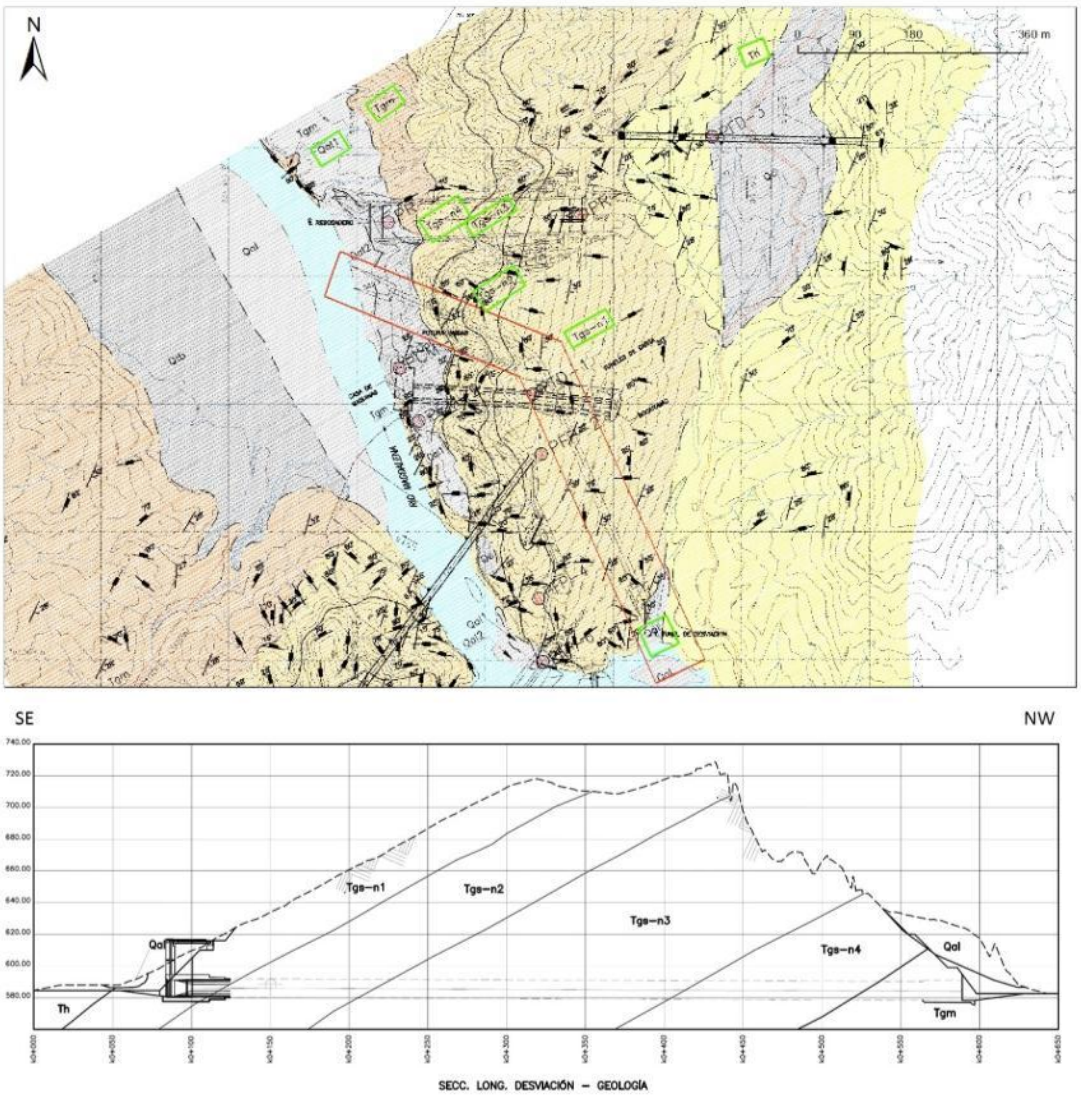


FIGURA 7. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE OBRAS A ESCALA 1:2.000. EN ROJO EL TÚNEL DE DESVIACIÓN Y EN VERDE RESALTADA LA NOMENCLATURA DE UNIDADES GEOLÓGICAS. FUENTE: ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO (OCTUBRE 2008). EL PERFIL SE TOMÓ DEL PLANO ANEXO PL-EIAQ-07. NÓTESE LA PRECARIEDAD DEL PERFIL GEOLÓGICO EN TÉRMINOS DE LA FALTA DE DATOS DE CAMPO EN SUPERFICIE, FRACTURAS O LA INEXISTENCIA DE FALLAS GEOLÓGICAS.

De la revisión anterior se concluye que no se presentan caracterizaciones litológicas del mismo grado de detalle para todas las unidades que afloran a lo largo del embalse. La descripción más completa corresponde a la de la Formación Gualanday superior dado que sobre esta se construyeron las principales estructuras del proyecto, sin embargo para algunas formaciones como Gigante y Gualanday medio, la información suministrada se considera bastante precaria, pues no hay ensayos de campo (martillo Schmidt, penetrómetro de bolsillo, etc.) ni tampoco de laboratorio de ingeniería (compresiones inconfinadas, triaxiales, cortes directos, etc.). Más adelante se abordarán estas deficiencias, junto con la ausencia de petrografía o petrofísica para definir porosidades en las unidades de areniscas o ensayos mineralógicos en arcillas.

Todas estas omisiones en la caracterización de las unidades de roca y depósitos generarán grandes incertidumbres en los componentes geotécnico e hidrogeológico, los cuales a su vez producen deficiencias en el diseño y construcción que pueden llevar incluso a fallas o accidentes en la represa.

5.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Dado que el interés que para la Gobernación del Huila tiene el tema de sismicidad, tanto la natural como la eventualmente inducida por el proyecto, todos los aspectos relacionados con esos ítems se encuentran en el documento denominado Producto Sismicidad natural e inducida. En razón a que la geología estructural y la tectónica son la base para la definición de los aspectos de sismogeneración, este numeral se limita en el presente documento a los aspectos de deformación que se relacionan con geotecnia (estabilidad de taludes y caracterización de macizo rocoso).

Es importante tener en cuenta que el componente estructural, que se refiere a los esfuerzos y deformaciones tectónicas que afectan las rocas, es de vital importancia a la hora de hacer el análisis sobre la hidrogeología, geomorfología y aspectos geotécnicos presentes en la zona de interés, ya que va a dar información relevante con la que se podrá identificar zonas de recarga por fracturamiento, zonas de inestabilidad por la disposición de las diferentes familias de fracturas, conocer la dirección más convenientes a la hora de generar nuevos taludes, entre otros.

5.2.1 Ausencia de características de macizo rocoso

Dentro del EIA se menciona, en repetidas ocasiones, que se hizo el levantamiento de la información de macizo rocoso, como es el caso que se muestra a continuación:

> *"Debido a las características del macizo rocoso del estribo derecho, con sistemas de diaclasas en varias direcciones que impiden la construcción segura del sistema de túneles y cavernas requerido por una cada de máquinas subterránea, se optó por una casa de máquinas superficial, para cuya construcción se emplazaría una contraataguia temporal"*[21]

> *"En el sitio de presa además del levantamiento geológico, se realizaron investigaciones del subsuelo consistentes en perforaciones, excavación de galerías, apiques, trincheras y ensayos de refracción sísmica, las cuales sirvieron de base para caracterizar el macizo rocoso donde se localizaron las obras principales del proyecto, (…)"*[22]

Sin embargo, en dentro del documento no se encuentra cuáles fueron los rasgos tenidos en cuenta para la caracterización de macizo rocoso en la zona de estudio.

Por otro lado, en la descripción de los niveles considerados útiles para la extracción de material para construcción, se hace una clasificación de macizo rocoso para el Cuarto nivel de la Formación Gualanday:

[21] EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 0, pág. 0-2
[22] EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 3.2-1

> *"Los resultados de las investigaciones indican que los afloramientos de la margen derecha del río Magdalena, principalmente constituidos por areniscas y conglomerados, presentan porcentajes de desgaste altos, mayores del 58%, alta absorción (entre 2,9% y 12%) y gravedad específica Bulk baja (entre 2,115 y 2,464); el contenido de finos es, en general, menor del 10%, no plásticos a ligeramente plásticos. Las areniscas presentaron pérdida total (100%) en el ensayo de solidez con sulfato de sodio, mientras que en el conglomerado el porcentaje de pérdida es algo menor, entre 75% y 87%. Los resultados de las muestras tomadas de la galería GLF-2 son similares, pero el contenido de finos es mayor, entre 17% y 18%. Su resistencia a la compresión inconfinada, deducida de los ensayos de carga puntual es, en promedio, del orden de 18 MPa para los materiales secos (en estado natural); el valor del RQD promedio de los sondeos con taladro y de los registros de las galerías, es del orden del 50%. De acuerdo con los datos anteriores, la clasificación del macizo rocoso efectuada según el criterio de Z. Bieniawski, daría un factor RMR del orden de 47, que corresponde a una roca de características regulares."*[23] (Subrayado fuera del texto original)

No obstante, aun cuando se anota por parte de EMGESA – Ingetec (2008) que utilizan la clasificación de Bieniawski, no se mencionan cuáles son las características y el peso dado para las diferentes familias de discontinuidades en este nivel rocoso. Dicho parámetro faltante resulta ser el de mayor peso en esta metodología cuando se evalúan taludes, por lo que se considera que lo consignado en el EIA es incompleto y que la calificación no da ninguna garantía de su veracidad.

La falta de caracterización de macizo rocoso en las unidades y áreas del proyecto y la deficiencia en la información mostrada para los niveles rocosos en los que se pretende explotar material de construcción, llevan a considerar que los cálculos de seguridad que se hayan hecho puedan estar incompletos o tener resultados erróneos, lo cual puede incidir en la estabilidad de cada una de las obras del proyecto, incluida la presa y el dique auxiliar.

5.3 ROCAS Y SEDIMENTOS COMO FUENTES DE MATERIAL PARA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS

Según lo informado por EMGESA – INGETEC en el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo, para la construcción de algunas de las estructuras se utilizaron rocas y depósitos recientes cercanos al área del proyecto:

> *"Los materiales necesarios para la construcción de la presa, dique y para las obras en concreto del proyecto se ha previsto extraerlos de los depósitos aluviales de los ríos Magdalena y Páez, localizados aguas abajo del sitio de presa. Estos depósitos están conformados por arcillas, limos, arenas y gravas dispuestas en capas lenticulares con fragmentos redondeados principalmente de roca intrusiva."*
>
> *(…)*
>
> *"El diseño del dique y de las Zonas 1B y 3B de la presa ha contemplado que para su construcción se utilicen los materiales provenientes de las excavaciones superficiales y subterráneas que se deben ejecutar para la construcción de las*

[23] EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 4, pág. 4-27

obras. Estos materiales corresponden básicamente a una secuencia de conglomerados con intercalaciones de arenisca y en menor proporción de limolitas arcillolitas, pertenecientes a los cuatro niveles de la Formación Gualanday Superior"[24]

Para ello en el EIA (2008) fueron definidas 10 áreas denominadas *fuentes de materiales* de las cuales se esperaba extraer tanto el volumen de material aluvial (9) como el de roca (1) necesario para estas construcciones. Para la descripción de dichas áreas se realizaron una serie de apiques, trincheras, barrenos y perforaciones en varios de los polígonos definidos para materiales aluviales, sin embargo ni en el documento donde se describen ni en los anexos asociados se encuentra el mapa correspondiente, lo cual dificulta la comprensión del impacto ambiental de una actividad minera asociada al proyecto.

En cuanto a la roca, tan solo se hace una descripción de los 4 niveles que conforman la Formación Gualanday Superior a pesar de que en el capítulo 2 mencionan que el núcleo impermeable del dique auxiliar pretende hacerse con suelo residual de la Formación Honda.

Por otro lado, en el EIA se definieron 8 áreas más denominadas *zonas de préstamo/depósito* como posibles fuentes de materiales, de las cuales no se encuentra descripción alguna. No obstante, mediante resolución 899 del 15 de mayo de 2009 (*por la cual se otorga la licencia ambiental para el proyecto hidroeléctrico El Quimbo)* la ANLA negó el permiso de extracción de materiales de arrastre y cantera ya que para la fecha la empresa no contaba con título minero en las áreas solicitadas.

Posteriormente, EMGESA remitió copia de 6 contratos de concesión minera celebrados entre la empresa y el INGEOMINAS el 29 de septiembre de 2009[25]. Mediante Auto 2901 ANLA requiere a EMGESA los levantamientos topográficos, análisis de régimen hidráulico y sedimentológicos, entre otros, de las áreas objeto de extracción en cumplimiento de los términos de referencia *HE-TER-1-01*. En respuesta EMGESA remite al ANLA los estudios mencionados previamente y certificado del registro minero del título KI9-08302X[26] (que recoge los 8 contratos de concesión inscritos por EMGESA en el área) con vigencia de 20 de octubre de 2009 al 19 de octubre de 2019. En consecuencia, mediante resolución 2766 del 30 de diciembre de 2010 ANLA autoriza 7 áreas de extracción de materiales (5, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 15 y 19).

En febrero de 2011 EMGESA presenta estudio para la aprobación de 8 nuevas áreas (7, 8, 13, 14ª, 16, 21, 22 y 23) y la ampliación del área 19[27], sin embargo ANLA mediante resolución 971 del 27 de mayo de 2011 autoriza solamente 6 áreas (7, 8, 14ª, 21 y 23) y la ampliación. Finalmente, mediante resolución 12 del 13 de octubre de 2011 y resolución 181 del 28 de febrero de 2014 se autorizaron las áreas denominadas 22 y El Quimbo (1 y 2)[28]. En conclusión fueron en total 16 áreas autorizadas por ANLA para la extracción de materiales aluviales y de cantera para ser usados en las construcciones del proyecto

[24] EMGESA - INGETEC. 2008. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 2, pág. 2 -32 y 2-33
[25] Radicado ANLA 4120-E1-40218
[26] Radicados 4120-E1-115489 y 4120-E1-169431, respectivamente.
[27] Radicado 4120-E1-14711
[28] No fue posible acceder a la copia de estas resoluciones

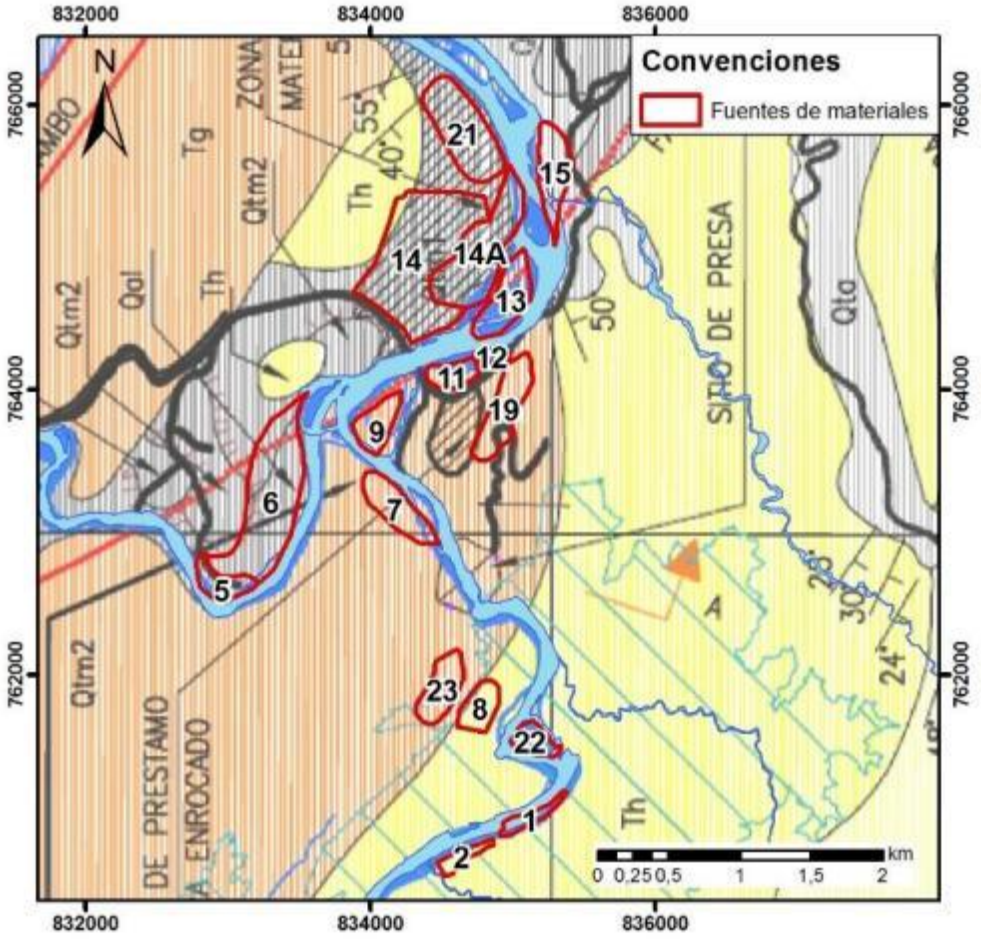


FIGURA 8. ÁREAS DE FUENTES DE MATERIALES UTILIZADOS PARA OBRAS PRINCIPALES DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO (ICA NO. 14, 2016) SOBRE GEOLOGÍA REGIONAL A ESCALA 1:75.000 (EN EL EIA PRESENTADO EN 2008). ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE EMGESA – INGETEC.

5.3.1 Caracterización de los materiales

Las áreas explotadas comprendían principalmente depósitos aluviales de los ríos Magdalena y Páez, a excepción de las áreas denominadas 8, 19 y 23 que se encuentran sobre rocas de las formaciones Gualanday Superior y Honda. A la fecha todas las áreas fuentes de material se encuentran cerradas y algunas en proceso de recuperación o, en el caso de las áreas 1, 2, 8, 22 y 23, inundadas por el embalse.

Dada la caracterización dada por EMGESA – INGETEC tanto de los depósitos aluviales como de las formaciones Gualanday Superior y Honda es necesaria la identificación de los minerales arcillosos presentes. Lo anterior dada la gran influencia de algunos minerales arcillosos con propiedades expansivas en el comportamiento mecánico de las estructuras del proyecto.

Los minerales arcillosos son estructuras en hojas que están conformadas por láminas de silicio (Si^{+4}) y aluminio (Al^{+3}) unidas entre ellas por oxígenos o grupos OH (Gaviria & Sánchez, 2013)[29]. Dichas estructuras pueden ser de tipo 1:1 con una lámina de silicio y una lámina de aluminio, o de tipo 2:1 con dos láminas de silicio encerrando una lámina de aluminio, teniendo cada una un ancho determinado (*d*).

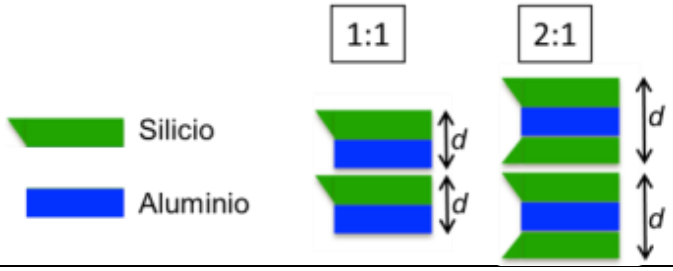


FIGURA 9. ESQUEMAS DE ESTRUCTURAS DE MINERALES ARCILLOSOS TIPO 1:1 Y 2:1. MODIFICADO DE GAVIRIA &SÁNCHEZ, 2013

Las estructuras tipo 2:1, por desequilibrios iónicos, permiten la inclusión de diferentes moléculas entre las láminas lo cual da origen a una amplia gama de minerales arcillosos de este tipo (Gaviria & Sánchez, 2013). Entre estos minerales se encuentran las denominadas arcillas expansivas las cuales pueden acomodar entre sus láminas cationes hidratados (rodeados de moléculas de agua) incrementando así el ancho de sus láminas (*d*) (Mitchell & Soga, 2005[30]). Entre las más importantes se encuentra la familia de las esmectitas las cuales tienen en sus espacios interlaminares cationes hidratados de sodio (Na) o calcio (Ca) (Gaviria & Sánchez, 2013) de las cuales se destaca en [articular la montmorillonita.

Dependiendo la disponibilidad de agua en el suelo o roca que presenten este tipo de arcillas, la hidratación de los cationes interlaminares irá aumentando lo que implicará incluso un incremento del 10% en el diámetro de los cationes, 10% de aumento en el ancho de las láminas (*d*) lo cual estaría relacionado con una significativa expansión de los suelos (Nelson *et al.,* 2015[31]). Precisamente son estos cambios de volumen (aumento por hidratación y disminución por secado) los que pueden generar fallas en las estructuras construidas ya sea por los materiales utilizados o por los materiales sobre los cuales fueron puestas.

[29] Gaviria, S. & Sánchez, M. 2013. La geoquímica y la mineralogía de rocas sedimentarias en cuencas hidrográficas de alta montaña tropical. En Aspectos geoambientales Sistema Chingaza – Informe I. Empresa Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB – e Instituto de Estudios Urbanos – IEU - de la Universidad Nacional de Colombia.
[30] Mitchell, J. & Soga, K. 2005. Fundamentals of soil behavior. Tercera edición. John Wiley & Sons, Inc.
[31] Nelson, J., Chao, K., Overton, D. & Nelson, E. 2015. Foundation engineering for expansive soils. John Wiley & Sons, Inc

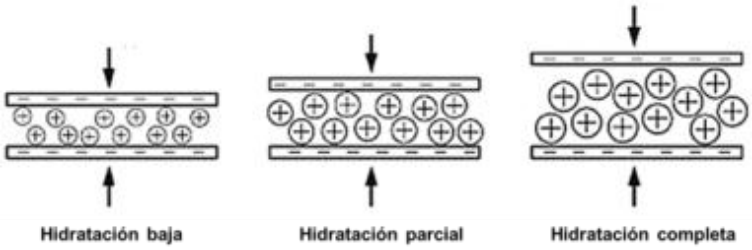


FIGURA 10. AUMENTO DEL ANCHO DE LAS LÁMINAS EN RELACIÓN CON LA MAGNITUD DE HIDRATACIÓN DE LOS CATIONES. FUENTE NELSON, *ET AL.*, 2015.

Dada la importancia de esta información, en el caso del proyecto hidroeléctrico El Quimbo es evidente la ausencia de estudios mineralógicos tanto en el EIA como en los diferentes complementos y estudios técnicos llevados a cabo por EMGESA y que sean de carácter público que permitan la identificación de este tipo de minerales en los materiales que fueron usados para la construcción de la presa, dique auxiliar y demás obras, o sobre los cuales estas mismas estructuras fueron construidas.

Por ejemplo, la zona de *fuentes de materiales* No. 8 se encuentra sobre la Formación Honda y los materiales que de allí se extrajeron fueron usados para la conformación del núcleo impermeable del dique auxiliar, la ataguía, y para el depósito impermeable sobre la cara de concreto[32]. En cuanto a esta formación, Laguna *et al* (2008[33]) caracterizó arcillolitas de la Formación Honda en el Tolima determinando que estas tienen de 24 a 64% de montmorillonita susceptibles a expandirse tanto de origen diagenético (durante la formación de la roca) como por meteorización (transformación de minerales existentes en la roca en montmorillonita). Este último puede implicar que el porcentaje de montmorillonita aumente a medida que se meteoriza la roca.

Por otro lado, las áreas No. 19 y 23 se encuentran sobre la Formación Gualanday Superior y a pesar de que el material extraído de cada una fue utilizado para la construcción del contrafuerte del dique auxiliar[34] y lleno de presa y dique auxiliar, y para la conformación de las zonas 2B, 3B, 3C, 3D y 6 de la presa de cara de concreto y lleno del dique auxiliar[35], respectivamente, tampoco existe caracterización mineralógica de la fracción arcilla de estos materiales. Esto mismo sucede con los depósitos aluviales que también fueron utilizados en cada una de las construcciones relacionadas con el proyecto y que finalmente pueden estar compuestos por sedimentos provenientes de las laderas contiguas (conformadas en parte por Formación Honda), lo cual aumenta aún más la incertidumbre.

Teniendo en cuenta las implicaciones ambientales y sociales que podría tener una falla en la presa, el dique auxiliar o cualquiera de las estructuras principales del proyecto hidroeléctrico El Quimbo, es necesario hacer la caracterización mineralógica detallada de

[32] EMGESA - INGETEC. 2012. Informe de Cumplimiento Ambiental No. 6. Ficha 1ª 7.2.1. Fuentes de materiales en el desarrollo de las actividades del proyecto hidroeléctrico El Quimbo.
[33] Laguna, O., Molina, C., Moreno, S. & Molina, R. 2008. Naturaleza mineralógica de esmectitas (noreste del Tolima). Boletín de Ciencias de La Tierra No. 23. Medellín.
[34] EMGESA - INGETEC. 2016. Informe de Cumplimiento Ambiental No. 13. Ficha 1ª 7.2.1. Fuentes de materiales en el desarrollo de las actividades del proyecto hidroeléctrico El Quimbo
[35] EMGESA - INGETEC. 2015. Informe de Cumplimiento Ambiental No. 11. Ficha 1ª 7.2.1. Fuentes de materiales en el desarrollo de las actividades del proyecto hidroeléctrico El Quimbo

los materiales usados para su construcción y asentamiento (porcentaje de fracción arcilla, identificación de minerales arcillosos, capacidad de intercambio catiónico, microsonda electrónica, barrido electrónico, potencial de expansión y expansión de Lambe).

Adicional a esto, con el fin de identificar arcillas expansivas es necesario hacer pruebas de medidas de propiedades físicas como plasticidad, límites de Atterberg, pozo libre y potencial de cambio de volumen (Nelson *et al.,* 2015).

En cuanto a la Formación Honda, en los anexos del documento entregado para la inclusión de nuevas áreas de extracción en febrero de 2011 se encuentran una serie de análisis físicos hechos a muestras tomadas de apiques dentro del área 8. Entre estos se encuentra el *Límite Líquido* (LL) y *Límite Plástico* (LP) con los cuales es posible sacar el valor de *Índice Plástico* (IP) a partir de la siguiente relación:

$$IP = LL - LP$$

Los valores obtenidos para las muestras de la Formación Honda presentan valores de IP de 13 a 24 los cuales según Patrone y Prefumo (s.f.36) se encuentran dentro de un grado de potencial expansivo medio a alto. Este tipo de ensayos aparentemente no se hicieron en muestras de la Formación Gualanday Superior y depósitos aluviales, de allí la importancia de complementar con información mineralógica ya que en cada una de las unidades utilizadas existe fracción arcilla que puede llegar a tener los componentes previamente descritos.

Hay que destacar se han evidenciado filtraciones en el cuerpo principal de la presa, lo cual quiere decir que dichos materiales están expuestos a flujo de agua en su interior. Adicionalmente el dique auxiliar no tiene un sistema de impermeabilización auxiliar que permita evitar el humedecimiento de las unidades arcillosas.

5.3.2 *Irregularidades en el proceso de aprobación y ejecución de extracción de materiales*

Una de las irregularidades que sale a relucir durante este proceso es la aprobación del área 22 mediante resolución 22 del 13 de octubre de 2011. Ya en la resolución 971 del 27 de mayo de 2011 se había negado el permiso para esta área en particular por la siguiente razón:

"De acuerdo con la información evaluada, se pudo establecer que la zona 22 no es una playa, es una isla localizada dentro del cauce del Río Magdalena[23]. De los análisis de los regímenes hidráulicos se estableció la necesidad de realizar obras de acceso y de protección contra inundaciones por riesgo crecientes súbitas del río Magdalena.

> *Para el caso de la zona 22, se cumple la misma condición de las zonas 13 y 16. Esto es que las tres se encuentran ubicadas dentro del cauce del río Magdalena (ya que corresponden a islotes formados por la acumulación de*

[36] Patrone, J. & Prefumo, J. s.f. La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control. Primeras Jornadas de Ingeniería de cimentaciones. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo.

material aluvial de arrastre) y su explotación implicaría una intervención directa de esta corriente de agua por el acceso directo de maquinaria, volquetas y equipos a estas zonas y/o por el cierre temporal de brazos mediante diques para los accesos. Esta actividad alteraría la morfología del cauce generando riesgos en estos sectores, ante posibles eventos de crecientes durante los aproximadamente 4 años de construcción previstos para la ejecución de la presa y obras anexas.

Por esta razón, se considera que no es viable autorizar la extracción de material de arrastre en la zona 22." (Subrayado fuera del texto)

Tal y como se menciona en la resolución, el área 13 y 16 había sido negado ya en dos ocasiones por las mismas razones. Aun así el área 22 fue aprobada en el 2011, sin embargo no fue posible evaluar dicha resolución ya que no se encontró en el expediente en este momento, razón por la cual se desconoce qué condiciones pudieron haber cambiado para que ANLA cambiara de opinión.

Por otro lado, a pesar de que ANLA aprobó 16 polígonos para la extracción de materiales de arrastre y cantera, al colocarse dichos polígonos sobre el Google Earth® se observa que aunque todos se encuentran dentro del contrato de concesión mencionado previamente, existen áreas aguas abajo de la confluencia del río Páez y Magdalena que aparentemente fue intervenida para extracción de materiales en particular de cantera (roca) dada su localización sobre las laderas y algunas estructuras que se identifican difusamente en la imagen satelital (taludes y bermas). Lo anterior implicaría un incumplimiento por parte de la empresa en relación a los permisos otorgados por ANLA.

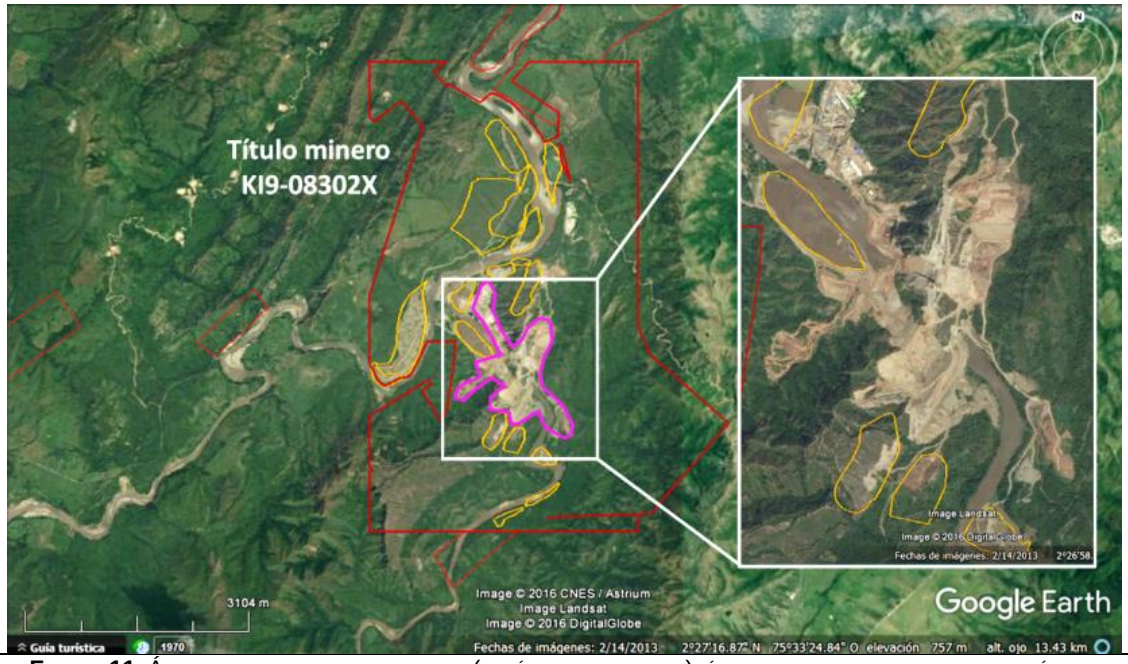


FIGURA 11. ÁREAS DE FUENTES DE MATERIAL (POLÍGONOS NARANJA), ÁREA INTERVENIDA POR FUERA DE ÁREAS AUTORIZADAS (POLÍGONO MORADO) Y TÍTULO MINERO KI0-08302X (POLÍGONO ROJO) SOBRE IMAGEN SATELITAL DE GOOGLE EARTH DE FEBRERO DE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Por último, según la información suministrada en la *Ficha1ª 7.2.1. Fuentes de materiales en el desarrollo de las actividades del proyecto hidroeléctrico El Quimbo* del ICA No. 14, en la zona No. 8 se extrajo más material del autorizado por la autoridad ambiental (2.000 m^3 adicionales).

TABLA 4. VOLUMEN DE MATERIAL EXTRAÍDO DE CADA UNA DE LAS ÁREAS DE FUENTES MATERIALES. FUENTE: ICA NO. 14 DE EMGESA.

Zona	Área (ha)	Cantidad licenciada (m^3)	Cantidad ejecutada a agosto 2016 (m^3)	Observaciones
5	5,15	270.000,00	127.054,00	Actividad de extracción de material en la zona se encuentra culminada. En proceso de recuperación a través de plan de abandono.
6	40,4	1.800.000,00	1.475.158,00	
7	11,64	540.690,00	518.579,00	
8	**7,1**	**156.911,00**	**158.911,00**	**Zona inundada por proceso del lleno de embalse.**
9	8	473.356,00	308.255,00	Actividad de extracción de material en la zona se encuentra culminada. En proceso de recuperación a través de plan de abandono.
11	5,5	220.000,00	173.302	
12	1,8	72.000,00	17.139	
13	12.70	1.184.370	515.111,02	
14	73,28	3.600.000,00	***2.803.349,00***	Actividad de explotación culminada, proceso de adecuación para plan de abandono.
14 A	27,9	1.567.239,00	1.074.030,00	Actividad de extracción de material en la zona se encuentra culminada. En proceso de recuperación a través de plan de abandono.
15	12,36	512.000,00	261.171	
19	14,7	2.000.000,00	1.996.939	Actividad de explotación culminada. En proceso de recuperación a través de plan de abandono.
21	22.84	1.613.987,00	814.421	Actividad de explotación culminada. En proceso de recuperación de área (plan abandono)
22	5,1	318.679,00	317.167	Zona inundada en el proceso de lleno del embalse.
23	9,86	1.963.500,00	1.164.759	
EL QUIMBO (zonas 1 y 2)	6,0	112.391	109.629	

- ***Definición de zonas de depósito (ZODMES)***

Teniendo en cuenta las actividades de extracción tanto en zonas de préstamo como en cantera que se desarrollaron para la construcción del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo, EMGESA – INGETEC (2008) definen en el EIA 4 zonas de disposición de material de excavación (ZODME).

En ese contexto, mediante Resolución No. 899 del 15 de mayo de 2009 la Dirección de Licencias del MAVDT autoriza las 4 zonas de depósitos de materiales (ZODME 3, ZODME 4, ZODME 10 y ZODME 18). Posterior a esto, mediante Resolución No. 971 del

27 de mayo de 2011 se autorizó una nueva área, la ZODME 24, de acuerdo a lo solicitado por EMGESA en el estudio radicado en febrero de 2011[37]. Finalmente, mediante Resolución No. 1142 del 28 de diciembre de 2012 de la ANLA se modificó la ZODME 18 aumentando el volumen de disposición más de 8 veces y se reajustó la geometría de la ZODME 4. Mediante esta misma resolución se autorizó el cambio de zonas de fuentes de materiales a zonas de depósito una vez se haya acabado la etapa de explotación (11, 12, 14, 14A, 15 y 21).

Según el ICA No. 14 con corte a marzo de 2016, se ha dispuesto cerca del 22% del total de material autorizado por ANLA. Para el periodo correspondiente al ICA No. 14, la disposición de material se hizo principalmente en la ZODME 24, la cual tiene un avance de 33,3% y en la ZODME 18, la cual tiene un avance de 17,3%. En cuanto a las demás ZODME, la 3 cuenta con un avance del 99,3%; el material que había sido dispuesto en la ZODME 4 se retiró y utilizó para el relleno de la zona 1A – 1B de la presa aguas arriba – cara de concreto; y la ZODME 10 tiene un avance del 73,3%.

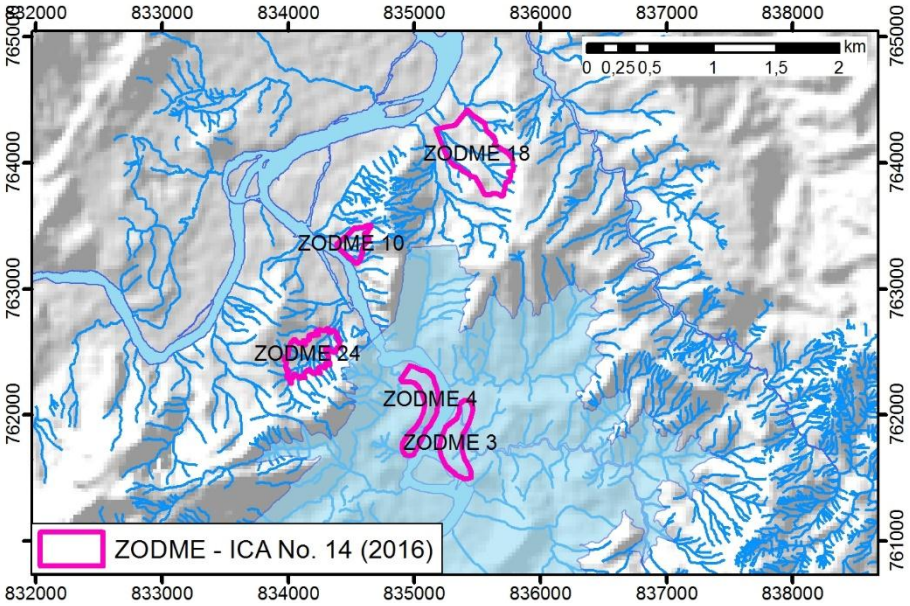


FIGURA 12. ZONAS DE DISPOSICIÓN DE MATERIAL DE EXCAVACIÓN AUTORIZADAS A EMGESA A MARZO DE 2016. ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE EMGESA - INGETEC

En el documento del EIA de 2008 no se encuentra detallado el diseño de construcción de los botaderos iniciales (3, 4, 10 y 18). Tan solo se menciona un anexo con los levantamientos topográficos detallados y georreferenciación de cada uno, sin embargo dicho anexo no se encuentra en la información que reposa en el expediente de ANLA. En el EIA se hace tan sólo una alusión a los factores de seguridad que deberían tener dichos depósitos sin embargo aún sigue siendo incierto los parámetros con los cuales estos fueron diseñados:

[37] Radicado 4120-E1-14711

> *"Considerando las características propias del sitio de proyecto, donde el nivel freático se puede estimar a ¼ de la altura total del talud y de acuerdo a los valores recomendados por Hoek y Bray, se considera que el factor de seguridad requerido se encuentra en un rango entre 1,0 y 1,2."*

En cuanto a la ZODME 24 autorizado en 2011, el documento técnico que fue entregado para su evaluación[38] tampoco tiene información sobre diseño, tan solo en la descripción de la obra se hace alusión sobre el diseño sin que se encuentre un anexo o algún tipo de información relacionada en el expediente:

> *"El diseño del botadero recomienda la conformación de taludes de entre bermas de 10 m de altura con pendiente 2,00H:1V. El ancho de las bermas varía entre 5 m y 20 m."*

Por otro lado, en la modificación realizada en los ZODME 18 y 4, solicitada en mayo de 2012[39], se identifican algunas irregularidades en cuanto a la primera área. En el documento radicado por EMGESA se solicita aumentar el volumen aprobado de 231.000 m^3 a 788.422 m^3, sin embargo la resolución No. 1142 del 28 de diciembre de 2012 se aprueban 1.916.000 m^3. Este último volumen no aparece relacionado en ningún documento entregado previamente por EMGESA que se encuentre en los considerandos de dicha resolución.

Si bien dentro de los planes de manejo de los depósitos 10, 18 y 24 están consideradas obras de manejo de agua superficial (cunetas principalmente) dado que todas se encuentran sobre 3 cursos de agua o más, la ausencia de la información de diseño de cada una en el expediente de ANLA no permite evaluar la estabilidad de dichas estructuras. En cuanto a la ZODME 4, la cual quedó sumergida en el embalse, es necesario considerar que fueron dispuestos más de 100.000 m^3 de materiales de excavación y que los diseños debieron contemplar estas condiciones. Sin embargo, al igual que con las ZODMES anteriores, estos diseños se desconocen también.

En los estudios realizados para la determinación final de la geometría de los botaderos y de su proceso constructivo se debió contemplar lo siguiente:

- El estudio debió realizar exploración del subsuelo para la extracción de muestras y la determinación de características de los materiales encontrados.
- Se debió definir una profundidad de descapote y un análisis preliminar de la capacidad portante del suelo de forma tal que no se generen este tipo de problemas.
- El diseño debió definir las adecuaciones de terreno previo al inicio de llenado de los ZODMES.
- El estudio en cuestión debió contemplar los sistemas hidráulicos más apropiados para el control de agua bajo la estructura. Lo anterior debido a que en su mayoría, las ´pareas aprobadas interceptan quebradas y otros cuerpos de agua o depresiones.

[38] Radicado 4120-E1-14711
[39] Radicado 4120-E1-32735

- Se debió definir la geometría de los taludes, las bermas necesarias y los niveles de compactación que cada capa del acopio debe tener.

- Se debió definir diseñar las estructuras de contención en la parte baja de los rellenos para su confinamiento.

5.4 GEOMORFOLOGÍA

5.4.1 Análisis de los términos de referencia

Los términos de referencia solamente solicitan la caracterización geomorfológica del Área de Influencia Directa que para este caso es el área que se inundará. Esto es un error, pues como se verá a continuación, la caracterización geomorfológica en términos de morfodinámica del área de influencia indirecta es importante para determinar la vida útil del proyecto, pues es el área de influencia indirecta la que genera el aporte de sedimentos que una vez inundado el embalse va a continuar llegando.

De igual manera, mencionan que la caracterización debe ser hecha a partir de fotointerpretación y campo. Esto último está incompleto pues como se verá más adelante, la fotointerpretación debe ser multitemporal con el ánimo de hacer un inventario de proceso lo más completo posible.

No exigen llevar a cabo el monitoreo de los procesos encontrados, por lo que no se tiene clara la velocidad del movimiento.

La escala solicitada no es la adecuada. 1:25.000 quiere decir que en 1cm se representan 250 metros del terreno, en 250 metros se pueden tener muchos deslizamientos 5 de los grandes (de 50 metros de ancho) o 20 de los pequeños (de 10 metros de ancho). No es posible representar 20 deslizamientos en 1 centímetro de papel.

No exigen hacer una caracterización de dinámica fluvial ni morfológica de las cuencas lo cual es importante a la hora de determinar aspectos de torrencialidad como claramente se ha visto que ocurre en varios de los afluentes del río Magdalena en la zona de estudio como lo son el río La Plata y el río Suaza.

En la evaluación de impactos no se contempla el seguimiento a los niveles freáticos aguas arriba del embalse. Esto es importante ya que un aumento del nivel freático, implica un aumento en la presión de poros y por ende una mayor ocurrencia de procesos morfodinámicos que generarían mayor sedimentación y disminuirían la vida útil del proyecto.

5.4.2 Análisis del Estudio de Impacto Ambiental (EIA)

El presente documento comprende el análisis del componente geomorfológico del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. En la elaboración de un estudio de Impacto ambiental se hace una caracterización de la zona (línea base), a partir de la cual se identifican los impactos que la actividad tendría sobre los elementos bióticos y abióticos presentes en la zona y se plantea una línea de acción al respecto.

La geomorfología es insumo para la zonificación geotécnica y para la caracterización y clasificación del paisaje, todos los cuales son a su vez insumo para el diseño del proyecto y la zonificación ambiental, pero al presentar inconsistencias e incertidumbres, cualquier análisis posterior no tendría un sustento técnico confiable, entonces, ¿Cómo asegurar la vida útil del proyecto? ¿Cómo se va a ejercer alguna acción para prevenir, controlar o mitigar los impactos ambientales que la actividad va a generar sobre el territorio, si la identificación de impactos no tiene el sustento adecuado?

Este análisis describe las inconsistencias e incertidumbres encontradas en la caracterización geomorfológica de la zona.

5.4.2.1 Cartografía geomorfológica.

El propósito de la cartografía geomorfológica es proporcionar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno; su origen, los procesos naturales que han ocurrido y los fenómenos naturales activos. En ese sentido los mapas geomorfológicos deben ser herramientas útiles, que permiten evaluar el comportamiento de los terrenos, inventariar los movimientos en masa y sus aplicaciones en la evaluación de amenazas naturales, elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial, considerar el desarrollo de obras de infraestructura, y establecer zonificaciones geomecánicas entre otras.

Estos mapas dan información sobre formas del relieve y procesos con énfasis en la morfogénesis y la morfocronología. Incluyen información geológica (Litológica y estructural). Estos mapas contienen la información en orden jerárquico, iniciando con La Morfogénesis, Morfología, Morfometría y Morfocronología y parcialmente Morfoestructura (litología)[40].

Para la elaboración de un mapa geomorfológico se necesitan al menos la recopilación de información secundaria, mapa geológico, trabajo de campo, análisis de fotografías aéreas o imágenes satelitales, y topografía.

Para la generación del mapa geomorfológico del proyecto hidroeléctrico El Quimbo, se basaron únicamente en "*interpretación de fotografías aéreas y trabajos de reconocimiento y control de campo*"[41]. Luego, al final del documento mencionan la existencia del mapa de pendientes.

Al revisar los mapas presentados, el mapa geomorfológico (anexo PL-EIAQ-19-1) se encuentra en escala 1:75.000 y cubre el área de influencia directa e indirecta, por lo que estaría incumpliendo los términos de referencia que exigen el mapa a una escala de 1:25.000.

Presentan también un mapa de zonas inestables (anexos PL-EIAQ-23-A1 y PL-EIAQ-23-A2), a escala 1:25.000, que cubre solo el área de influencia indirecta y presenta las zonas inestables en conjunto con las unidades geomorfológicas.

[40] Verstappen, H. & Van Zuidam, R. A. (1992). *El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos*. ITC, 10. Villanueva de Huerva.
[41] EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 21-41

Al comparar ambos mapas, en el de detalle se observan exactamente las mismas unidades geomorfológicas, excepto por algunas relacionadas a los depósitos aluviales (terrazas). Lo anterior indica falta de rigor y de trabajo para detallar escalas, pues al aumentar la escala de 1:75.000 a 1:25.000, las unidades previamente definidas pueden ser subdivididas en unidades más pequeñas de acuerdo a características como litología, disposición estructural de los estratos, pendientes y procesos morfodinámicos existentes. Por ejemplo, la unidad Cresta monoclinal puede subdividirse en dos unidades: ladera estructural de cresta monoclinal y ladera de contrapendiente de cresta monoclinal, y dicha subdivisión no se observa en el mapa a escala 1:25.000.

El mapa de pendientes que presentan corresponde únicamente al área de influencia directa, lo cual indica que no fue utilizado para la cartografía de la totalidad del mapa geomorfológico presentado en el anexo PL-EIAQ-19-1.

Finalmente, como se mencionó anteriormente para generar un mapa geomorfológico, se debe usar el mapa de pendientes como insumo. Al comparar el mapa de pendientes con el mapa geomorfológico de los anexos PL-EIAQ-23-A1 y PL-EIAQ-23-A2, se puede ver claramente que los cambios de pendientes, que marcarían límites de unidades no coinciden con los límites trazados en el mapa geomorfológico, lo que indica que metodológicamente el mapa presentado tiene graves errores conceptuales.

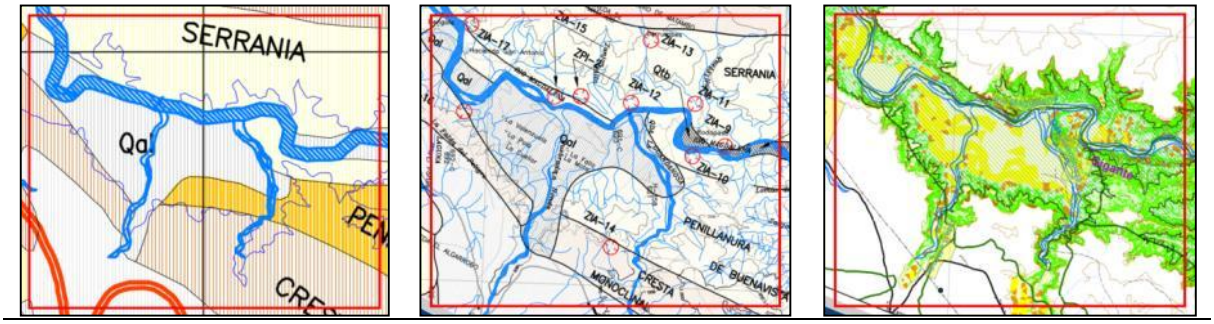


FIGURA 13. DE IZQUIERDA A DERECHA: MAPA GEOMORFOLÓGICO EN ESCALA 1:75.000, MAPA DE ZONAS INESTABLES A ESCALA 1:25.000 Y MAPA DE PENDIENTES. NÓTESE LA CARTOGRAFÍA DE LA UNIDAD "QAL", DEBERÍA SER MÁS DETALLADO SU TRAZO EN EL MAPA DEL MEDIO Y COINCIDIR CON EL ÁREA EN PIXELES AMARILLOS DEL MAPA DE PENDIENTES, PERO NO SE HACE.

No es clara la metodología usada para la generación del mapa de pendientes. En el numeral 3.2.3.2.1. referente a suelos mencionan que "*el mapa de pendientes se hizo utilizando cartografía de escala 1: 10.000, con curvas de nivel cada 10 metros*"[42]. Sin embargo, en el numeral 3.2.10.1.5.1 referente a calidad paisajística mencionan que fue "*calculado a partir del modelo digital de elevaciones*[43]".

5.4.2.2 Morfodinámica

En este aparte deberían describirse los procesos que modifican el relieve y los agentes que inciden en estos cambios, principalmente aquellos que tienen algún grado de

[42] EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 21-41
[43] EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 21-41

importancia para el área de estudio. Los procesos que deben ir en este aparte consisten en procesos de remoción en masa y procesos erosivos.

En el capítulo de morfodinámica del EIA, presentan:

> "*resumen de las características de algunos valles de ríos y quebradas, así como volcanes de la Cordillera Central, que aunque se encuentran por fuera de la zona del proyecto, tienen influencia sobre ella, describiendo algunos fenómenos asociados a ellos….Estas descripciones se refieren a los valles de los ríos Páez y su avalancha de 1994, La Plata, Magdalena, Suaza, Timaná y quebradas La Viciosa y Guandinosa; así como los volcanes Nevado del Huila, Puracé, Pan de Azúcar y Coconucos, que son los que tiene incidencia en la zona*"[44].

Lugo, explica que, para el área del proyecto, se han establecido dos sectores "*con base en las cuencas hidrográficas de los ríos Magdalena, Suaza, Timaná, Páez y La Plata, por hacer parte de los ríos más importantes de la región, y porque asociados a algunos de ellos se han presentado fenómenos de remoción en masa, avalanchas o crecientes*"

A la final el capítulo termina siendo un recuento histórico de desastres naturales que han ocurrido en el área, pero sin llegar a ningún análisis específico de como utilizaron dicha información en el diseño de la presa o en caso de que volvieran a ocurrir cuales serían las consecuencias para el proyecto y los impactos ambientales asociados.

Lo más parecido a lo que debería ser un capítulo de morfodinámica es el capítulo de estabilidad. En este se describe el inventario de zonas inestables realizado en la etapa de factibilidad del proyecto durante los años 1995 y 1996, que consistió de 23 zonas inestables activas (ZIA) y dos zonas potencialmente inestables (ZPI) en el área del embalse, desde el sitio de presa hasta la cola del embalse. Con dicha información concluyen que:

> "*Los fenómenos de remoción en masa serían de poca magnitud por desprendimientos de material y deslizamientos planares (del orden de 600 000 m^3). Estos desprendimientos serían lentos y ocurrirían principalmente bajo el nivel de las aguas normales del embalse, además por su gran extensión, la ocurrencia de olas causadas por deslizamientos no sería significativa en el sitio de presa*".

Al analizar las 25 zonas encontradas fue posible evidenciar que el área reportada como afectada para cada punto correspondía a un solo proceso de remoción en masa, por lo que el inventario es un inventario de procesos, y un inventario incompleto.

Como ejemplo de esto se tiene la zona inestable activa 3 ZIA-3, la cual reporta un área afectada de 3200 m^2 que correspondería al polígono naranja de la imagen de la izquierda en la siguiente figura. Sin embargo, en esa zona hay más de un deslizamiento como se señala en la imagen de la derecha de la siguiente figura en donde cada línea fucsia representa la corona de un proceso (antiguo y reciente) y el área afectada total es cerca a los 85.650 m^2.

[44] EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 21-41

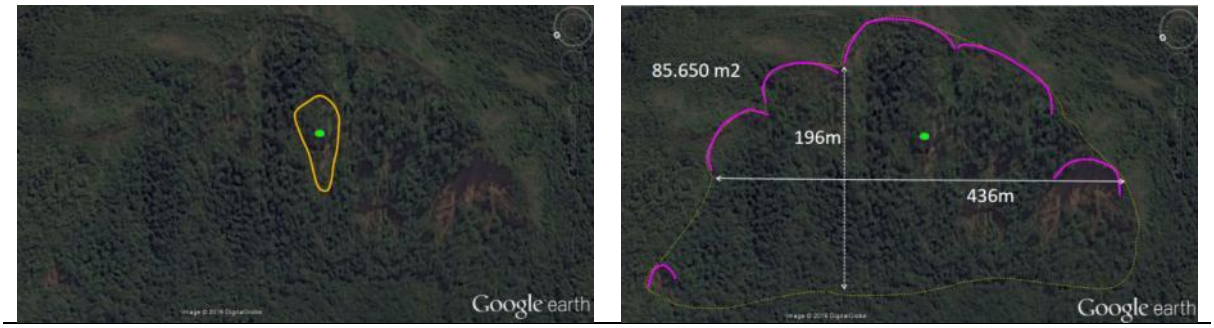


FIGURA 14. ZONA INESTABLE ACTIVA 3 UBICADA EN IMAGEN DE GOOGLE EARTH 2016. A LA IZQUIERDA. ÁREA REPORTADA POR EL EIA, A LA DERECHA ÁREA REAL AFECTADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La mejor metodología para generar un inventario de procesos es por medio de un análisis multitemporal de fotografías aéreas o de imágenes satelitales[45], pues por medio de este se pueden identificar antiguos procesos que actualmente ya están cicatrizados y cubiertos de vegetación.

Lo anterior es de mucha importancia para la zona de estudio, pues estamos en un país tropical en el que la vegetación crece muy rápido y es una zona sísmicamente activa. Y son justamente las lluvias y los sismos los principales detonantes de procesos.

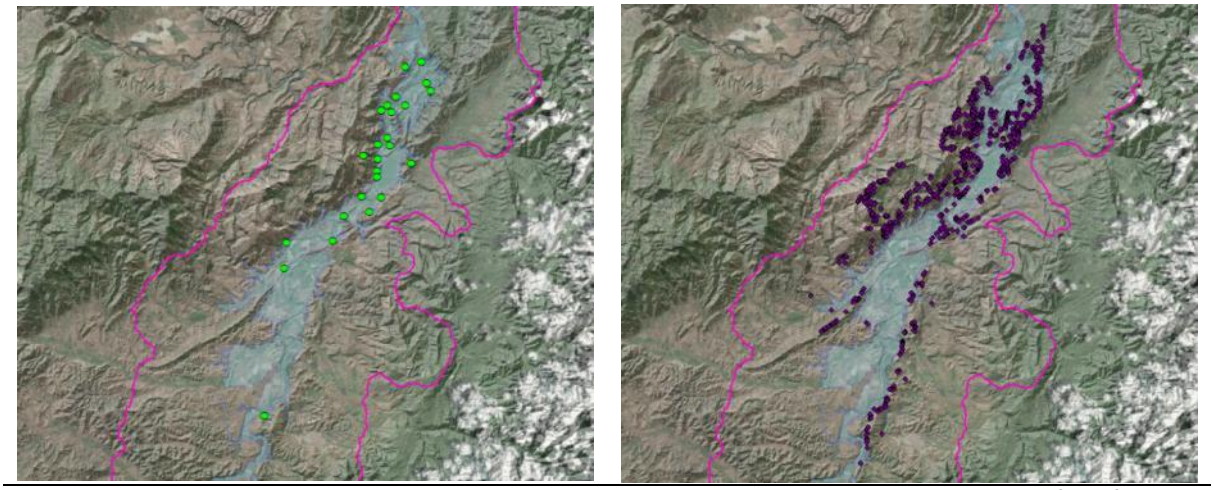


FIGURA 15. A LA IZQUIERDA, INVENTARIO DE ZONAS INESTABLES PRESENTADO POR EMGESA-INGETEC (2008) EN EL EIA. A LA DERECHA EL GENERADO PARA ESTE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Con el ánimo de demostrar el anterior punto, se hizo un inventario de las laderas que dan al embalse por medio de la interpretación de las imágenes satelitales que provee Google Earth que son del año 2014, antes de que la zona fuera embalsada. En este inventario fue posible identificar un total de 893 procesos que incluyen caída de bloques, deslizamientos, flujos de detritos y procesos erosivos como cárcavas en el área de influencia de la zona embalsada, lo cual demuestra otra vez las grandes omisiones e irresponsabilidades de EMGESA en sus estudios ambientales (***Anexo Inventario de procesos de remoción en masa***).

[45] Galli, M. et al. (2008). Comparing landslide inventory maps.

FIGURA 16. INVENTARIO DE PROCESOS HECHO EN GOOGLE EARTH PARA ESTE ESTUDIO. A LA IZQUIERDA PROCESOS RECIENTES. A LA DERECHA PROCESOS ANTIGUOS YA CICATRIZADOS Y CON VEGETACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

De no tener acceso a imágenes satelitales o fotografías aéreas de diferentes años, se puede acudir al Sistema de Información de Movimientos en Masa (Simma), el cual dispone de una base de datos de movimientos en masa ocurridos en el territorio nacional desde 1917 elaborada a partir de información colectada en las entidades locales, regionales o nacionales que registran o atienden las emergencias o realizan visitas técnicas asociadas a la inestabilidad de laderas, como Bomberos, Defensa Civil, Oficina de Gestión del Riesgo del municipio, Oficina de Planeación municipal, corporación autónoma regional, Crepad, gobernación, SINA, SGC-Simma, o a reportes en periódicos, entre otros[46].

¿Por qué es importante tener un inventario de procesos lo más completo posible? A la hora de diseñar el embalse, es importante cuantificar la cantidad de sedimentos que le llega o podría llegar con el fin de estimar la vida útil del proyecto. Actualmente el embalse está diseñado para una vida útil de 50 años a partir de un inventario de tan solo 25 procesos y un volumen de material movido de 600.000 m^3. Dado el inventario que fue posible generar con imágenes de Google Earth es claro que el volumen de material movido está subestimado y por ende es posible que el periodo de vida útil del embalse sea menor debido a procesos de sedimentación.

En las caracterizaciones hechas a los procesos no se indican las posibles causas (sismo o lluvias), así como tampoco se indica el nivel del agua subterránea ni la frecuencia con la que ocurren.

De igual forma al concluir que la mayoría de los 25 procesos quedan debajo del agua luego del llenado del embalse, no plantean ni ejecutan un monitoreo de dichos procesos, que como ya se vio son más de 25 procesos y al no monitorearlos no se sabe los impactos del embalse sobre dichas zonas inestables, como por ejemplo una posible reactivación.

[46] Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2015. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

5.4.2.3 Dinámica fluvial - Torrencialidad

Con el propósito de identificar la torrencialidad de una cuenca es necesario llevar a cabo su caracterización morfológica en términos de área, longitud, perímetro, ancho, coeficiente de Gravelius, longitud de drenaje, densidad de drenaje, pendiente media del cauce, tiempo de concentración y factores de forma de Horton[47].

En ningún lugar del documento se hace dicha caracterización morfométrica de las cuencas y microcuencas, así como tampoco se caracteriza la dinámica de cada cauce en términos de su morfología (sinuosidad), caudal, y carga de sedimentos.

Ambas caracterizaciones son importantes a la hora de definir la vida útil del embalse, pues al igual que el inventario de deslizamientos, ayudan a entender el comportamiento de las cuencas que aportan el agua y los sedimentos al embalse.

Tal y como se dijo anteriormente, en el estudio se hace un recuento histórico de desastres provocados por avenidas torrenciales generadas por los volcanes de la zona, sin embargo no se hace ningún análisis con dicha información.

Esto también fue evidenciado en la actuación especial de la Contraloría del 2014[48] en donde indican que el estudio de impacto ambiental carece de una caracterización de las amenazas naturales bajo modelación estocástica o probabilística por avenidas torrenciales generado por los deshielos del Volcán Nevado del Huila y por la actividad volcánica del Volcán Sotará, de manera tal que incluya:

> "*la morfometría de las cuencas, el tipo de lavas (viscosidad, temperatura, etc.) y procesos de remoción en masa que se puedan generar*".

Lo anterior es importante pues según lo reportado en la actuación especial dela CGR, (2014) en el EIA, (2008) se menciona:

> "*el volcán Nevado del Huila fue identificado como el de mayor amenaza (…) como es el caso del Volcán Nevado del Ruiz, una erupción de este volcán traería consigo la fusión parcial o total de su casquete glaciar, generando avalanchas en el Río Páez y sus afluentes de la cuenca alta, en forma similar a la avalancha del 6 de Junio de 1994. Dicha avalancha descendería por el valle del Río Páez hasta alcanzar el embalse de Betania, sin afectar la casa de máquinas del Proyecto El Quimbo*".
>
> "*En el Volcán Sotará predomina la actividad efusiva sobre la explosiva, de manera tal que el área del proyecto no se vería afectada por emisión de lavas, pues estas avanzarían unos 10Km; caso similar ocurriría por la emisión de piroclastos, que afectaría tan solo un área con radio aproximado de 20Km a partir del volcán. Sin embargo, si la erupción del volcán Sotará diera origen a avalanchas en los*

[47] Sendra, Pablo, 2002. Investigación cuantitativa del transporte de sedimentos no cohesivos en avenidas torrenciales. Aplicación al caso del Arroyo del Partido, Huelva. Universidad politécnica de Madrid Departamento de Ingeniería Forestal Escuela técnica superior de ingenieros de montes.

[48] Contraloría General de la República - CGR, 2014. Actuación especial Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. Seguimiento a denuncias ciudadanas para exigir el cumplimiento de obligaciones ambientales en la actual construcción de hidroeléctricas.

afluentes de la parte alta del Río Magdalena, estas llegarían tan solo hasta la cola del embalse como ocurrió con el lahar de Altamira"

Según lo anterior, la zona del proyecto hidroeléctrico El Quimbo no se vería afectada por avenidas torrenciales ni erupciones volcánicas, sin embargo, como se expresa en el informe de la CGR, (2013),

> *"en visita técnica realizada por personal de la Contraloría General dela República, el día 10 de Junio de 2012, en la zona de influencia del proyecto: casa de máquinas, se identificaron afloramientos de depósitos piroclásticos, los cuales indican la llegada de material volcánico durante eventos anteriores y confirma la posibilidad que los materiales provenientes de actividad volcánica pueden llegar al área del proyecto y afectar la seguridad y funcionamiento del PHQ"*

5.5 HIDROLOGÍA

Con base en lo dispuesto en resolución 0899 de 2008[49] se adoptan los términos de referencia (TDR) para la elaboración del estudio de impacto ambiental (EIA) HE-TER-1-01[50], para el presente análisis se realizará la revisión del EIA presentado por EMGESA – Ingetec (2008) para posteriormente evaluar del cumplimiento de lo estipulado en los TDR. Finalmente se realizaran planteamientos en lo que concierne a los requerimientos mínimos para una caracterización representativa y la evaluación de la pertinencia de los TDR desde el ámbito de la hidrología y el clima.

5.5.1 Análisis y pertinencia de los TDR

5.5.1.1 Caracterización hidrológica del área de influencia indirecta.

En los TDR para la caracterización del área de influencia del proyecto para el componente de hidrología en el AID[51] se señala lo siguiente:

*"**Área de influencia directa***

- *Identificar el tipo y distribución de las redes de drenaje.*
- *Describir y localizar la red hidrográfica e identificar la dinámica fluvial de las fuentes que pueden ser afectadas por el proyecto, así como las posibles alteraciones de su régimen natural (relación temporal y espacial de inundaciones).*
- *Realizar el inventario de las principales fuentes contaminantes, identificando el generador y tipo de vertimiento.*
- *Determinar el régimen hidrológico y los caudales máximos, medios y mínimos mensuales, multianuales de las fuentes a intervenir."*

Se procede a realizar los comentarios y/o observaciones de los ítems que presentan falencias para la caracterización del AID en el EIA presentado por INGETEC:

- ***Identificar el tipo y distribución de las redes de drenaje.***

[49] Por la cual se otorga la licencia ambiental para el proyecto hidroeléctrico El Quimbo
[50] TDR para la elaboración de estudios de impacto ambiental para la construcción y operación de centrales hidroeléctricas generadoras.
[51] MAVDT. (2006). Estudio de impacto ambiental: construcción y operación de centrales hidroeléctricas generadoras HE-TER-1-01. pág 12

EMGESA – INGETEC (2008) señalan:

> "*Según el IDEAM[52], para asegurar una gestión sistémica de manejo de cuencas, se precisa definir tres unidades que orgánicamente conforman el sistema, que son: la región hidrológica, la cuenca propiamente dicha y la microcuenca como unidad mínima básica. Para tal efecto, el IDEAM desarrolló la Codificación de Cuencas para facilitar el ejercicio de ordenación, la sistematización de la información y la concordancia espacial de los modelos hidrológicos que se generen en los ejercicios regionales y locales".*

Este análisis se remite al análisis de orden de las cuencas, subcuencas y microcuencas con base en la zonificación hidrográfica del país definida por el IDEAM.

Sin embargo, en (IDEAM, 2004) en la tabla 4 (alcances técnicos de la caracterización de la cuenca hidrográfica) en lo que corresponde a la sección Hidrografía se enuncia para las parte de actividades: "*caracterización de los sistemas y patrones de drenaje*" con un producto asociado: "caracterización de los patrones de drenaje presentes en la cuenca hidrográfica en ordenación".

La actividad realizada por EMGESA – INGETEC (2008) se podría interpretar como la jerarquización de las cuencas hidrográficas, más sin embargo no se evalúa efectivamente el patrón de drenaje de la corriente (p.ej. dendrítico, rectangular, entre otros) igualmente no se puede apreciar caracterización morfométrica de las cuencas (subcuencas y microcuencas) presentes en el AID.

- ***Describir y localizar la red hidrográfica e identificar la dinámica fluvial de las fuentes que pueden ser afectadas por el proyecto, así como las posibles alteraciones de su régimen natural (relación temporal y espacial de inundaciones).***

No se puede apreciar desarrollo en lo que concierne a describir y a localizar la red hidrográfica de las fuentes que pueden ser afectadas puesto que no se cuenta con caracterización morfométrica de las cuencas, estimación de pendientes medias de los cauce, clasificación de orden de las corrientes (clasificación de Horton y Strahler) y no se tienen análisis de dinámica fluvial.

Adicionalmente no se tienen registros de caudales provenientes de información primaria (aforos líquidos) y/o secundarias (simulaciones hidrológicas) como una lo cual incumple con los TDR.

En lo que concierne a las posibles alteraciones del régimen natural (relación temporal y espacial de inundaciones), EMGESA – INGETEC (2008) consignan:

> *"Inundaciones río Suaza*
>
> *Los fenómenos presentados periódicamente, nos indican que el río Suaza se desborda frecuentemente por la margen derecha. Frente al perímetro urbano de Suaza se presenta la inundación de su margen izquierda, anegando el cauce*

[52] IDEAM. (2004). Guía técnico científica para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia.

natural de la quebrada Satia en una extensión aproximada a los 100 m aguas arriba de su desembocadura. El caudal que causó esta inundación en el año 1 993 fue de 367 m3/s y se supone que sus periodos de retorno son de 7 a 30 años.

Las inundaciones y los desbordamientos periódicos del río Suaza y de las quebradas Satia, Emaya, Mantagua, Jacué, Agua Cabezas y Anayaco, afectan a las personas, viviendas y cultivos existentes en estos sectores. En el perímetro urbano de Suaza, y en sus cercanías la quebrada Satia y el río Suaza inundaban la antigua carretera al Municipio de Acevedo.

- *Inundaciones quebrada Yaguilga*

Se han presentado eventos de inundación en la llanura aluvial de la microcuenca de la Quebrada Yaguilga, desde el puente sobre esta misma quebrada (en la vía que conduce a Santa Rosa) hasta límites con el municipio de El Agrado.

El 21 de marzo de 1 999 se presentó un flujo torrencial en la Quebrada Yaguilga, ocasionado por su represamiento a consecuencia de un derrumbe sobre su cauce, provocando la afectación de aproximadamente el 75% de la llanura aluvial"

Con lo anterior no se puede verificar el análisis de frecuencia y de tiempos de retorno asociados con los caudales de inundación, ni el área de inundación asociada con estos eventos.

- **Determinar el régimen hidrológico y los caudales máximos, medios y mínimos mensuales, multianuales de las fuentes a intervenir.**

Partiendo que en la zona de la represa no se cuenta con estaciones límnímétricas, EMGESA – INGETEC (2008) han definido lo siguiente:

"*Ingetec S.A. realizó en el año 2 006 el estudio de actualización de caudales para el proyecto El Quimbo, para la estimación de los caudales medios, se utilizó la metodología de transposición de registros ya que en el sitio de aprovechamiento no se cuenta con registros históricos de caudales.*

Para el cálculo de caudales medios en el sitio del proyecto se partió de la información de caudales medios naturales disponibles en la Estación Puente Balseadero (río Magdalena), Paicol (río Páez), Puente Garcés (río Suaza), Puente Momíco (río Magdalena) y Puente Santander (río Magdalena), también se tuvo en cuenta la serie de afluencias a Betania…

(…) *El caudal medio multianual estimado para el sitio de presa es de 235,39 m3/s para el período 1972 – 2005.*

El régimen de caudales medios mensuales multianuales, medidos en el sitio de presa, tiene un comportamiento monomodal, como puede observarse en el hidrograma de caudales máximos, medio y mínimos mensuales multianuales, presentado en la figura 3.2.3

Se caracteriza por tener dos periodos de estiaje. El caudal medio máximo tiene un valor de 375,29 m3/s, registrado en el mes de julio, los meses secos comienzan en diciembre y terminan a finales de marzo en el primer periodo, siendo enero el mes más crítico con un valor de caudal medio del orden de 142,57 m3/s. El segundo periodo comienza en septiembre y termina en diciembre.

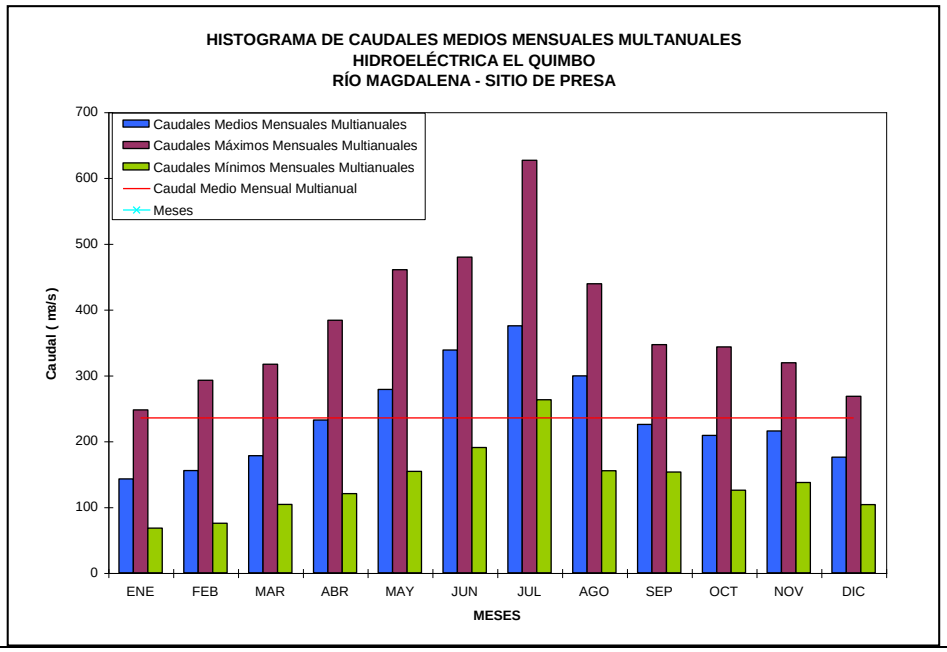


FIGURA 17. CAUDALES MÁXIMOS, MEDIO Y MÍNIMOS MENSUALES MULTIANUALES FUENTE: FIGURA 3.2.3 EMGESA – INGETEC (2008)[53]

A partir de las series de caudales medios disponibles, se construyeron las curvas de duración de caudales medios mensuales disponibles en los sitios de proyecto, las cuales se presentan en la figura 3.2.4"

Respecto a este ítem se tienen las siguientes observaciones:

- Para la estimación de caudales medios, mínimos y máximos en el río Magdalena la altura de la zona de la represa, no se tiene claridad en lo que respecta a los periodos de análisis ni a la resolución temporal (mensual o diaria) de las series de las estaciones Puente Balseadero (río Magdalena), Paicol (río Páez), Puente Garcés (río Suaza), Puente Momico (río Magdalena), Puente Santander (río Magdalena y la serie de afluencias a Betania.

- Para la estimación de caudales medios, mínimos y máximos en el río Magdalena a la altura de la zona de la represa, NO tienen análisis de bondad de las series de caudales de las estaciones en mención

[53] EMGESA – INGETEC (2008). Estudio de impacto ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3.2 pág 93.

- Para la estimación de caudales medios, mínimos y máximos en el río Magdalena a la altura de la zona de la represa, NO se muestra con claridad el procedimiento para la obtención de los caudales medios, mínimos y máximos mensuales

- No se presenta información primaria (aforos líquidos o series de estaciones instaladas) y/o secundaria (simulaciones hidrológica) para el río Magdalena a la altura de la represa, lo cual se considera como algo necesario para estimar con certidumbre los caudales que efectivamente discurren por este punto.

- No se presenta información primaria (aforos líquidos o series de estaciones instaladas) y/o secundaria (simulaciones hidrológica) para el río Suaza, quebrada Patebola, quebrada Los Cocos, quebrada La Colorada, quebrada de Majo, quebrada Las Damas Zanjón de Aguirre y Zanjón de la Sucita lo cual incumple con los TDR.

Se puede concluir que la caracterización hidrológica para el AID presentada por EMGESA-Ingetec (2008) presenta serias falencias puesto que incumple con los requerimientos mínimos exigidos por los Términos de referencia. En lo que concierne a las corrientes y sus cuencas asociadas presentes en el AID no se presentan a caracterizaciones morfométricas e hidráulicas (caudales máximos, medios y mínimos), por lo tanto se tienen grandes incertidumbres relacionadas con la clara identificación verídica de los impacto ambientales y por consiguiente el plan de manejo.

5.5.2 Caracterización hidrológica del área de influencia indirecta.

En los TDR para la caracterización del área de influencia del proyecto para el componente de hidrología en el AID[54] se señala lo siguiente:

Área de influencia indirecta

- *Identificar los sistemas lénticos y lóticos.*
- *Establecer los patrones de drenaje a nivel regional.*
- *Identificar el régimen hidrológico y de caudales característicos de las principales corrientes*."

Se procede a realizar los comentarios y/o observaciones de los ítems que presentan falencias para la caracterización del AII en el EIA presentado por INGETEC:

- ***Identificar los sistemas lénticos y lóticos.***

Para este ítem se identifican los siguientes sistemas lóticos presentes en el AII por EMGESA – Ingetec (2008):

"3.2.4.1.1.1.1 Embalse de Betania

Localización: Embalse artificial, localizado en la zona central del departamento del Huila, en vecindades de los municipios de Yaguará, Hobo y Campoalegre.

[54] MAVDT. (2006). Estudio de impacto ambiental: construcción y operación de centrales hidroeléctricas generadoras HE-TER-1-01. pág 12

Extensión: 7.400 ha, aproximadamente.

Descripción del Sistema: Humedal artificial, construido para la generación de energía "Central Hidroeléctrica de Betania".

Principales afluentes: Ríos Magdalena, Yaguará y Páez.

Usos: Generación de energía eléctrica, acuicultura por instalación de proyectos piscícolas (mojarra roja y negra)

3.2.4.1.1.1.2 Sistemas lénticos por municipios

- *Municipio del Agrado*

Sobre la margen derecha de la quebrada Yaguilga, aproximadamente 3 kilómetros antes de la desembocadura al río Magdalena, existe una laguna estacional de aproximadamente 5 hectáreas. Esta laguna solo tiene espejo de agua en la temporada de aguas altas y se seca en su totalidad durante el verano. No se registran en el municipio otros sistemas lénticos de extensiones similares.

- *Municipio de Gigante*

Por encima de los 2800 – 3310 msnm se encuentra el ecosistema de subpáramo el cual presta invaluables servicios ecológicos, y da origen a tres (3) lagunas donde nacen las fuentes de las quebradas Guandinosa y Rioloro del Municipio de El Gigante y Agua Negra del Municipio de Algeciras. Este ecosistema pertenece al sistema de transición andino-amazónico.

Otros sistemas lénticos presentes en la región, son las lagunas de Miraflores y El Descanso.

- *Municipio de Garzón*

En el municipio de Garzón se identificaron aproximadamente 23 lagunas naturales las cuales en la mayoría están sin protección vegetal. El mayor número de lagunas se encuentra en la vereda Miraflores…

(…)

- *Municipio de Tesalia*

La Laguna de Guillo, está ubicada en la vereda Potrero Grande, en el cerro de su mismo nombre, ocupando un área de influencia directa de aproximadamente 8 ha, un área de espejo de agua de 3 ha, se ubica a los 1300 msnm. Esta laguna es utilizada por aves (patos). Tiene una gran belleza natural y se encuentra anclada sobre un sistema montañoso, siendo la cúspide.

Laguna bonita nacedero de la quebrada El Infierno, surte de agua a la vereda el Dave. Los sitios que tienen un potencial Turístico por su belleza natural en el Municipio de Tesalia, son la laguna de Guillo y en las veredas el Moral y el Dave hay pozos de agua cristalina, piscinas naturales y caídas de más de 100 m.

- *Municipio de Pital*

El municipio del Pital tiene gran parte de su territorio ubicado sobre la Serranía Cuchilla de las Minas, considerado como un ecosistema estratégico regional por ser una estrella fluvial de importancia ecológica y de reserva forestal. En ella, igualmente se encuentra parte del territorio de los municipios de Oporapa, La Argentina, Tarqui, y La Plata. Comparte cuencas hidrográficas con los municipios de Tarqui (Q. Lagunilla), Agrado (Q. La Yaguilga), Paicol (Q. El Oso o Q. La Venta)

En todo el Municipio existen alrededor de 135 estanques, los cuales, individualmente tienen un área muy pequeña, razón por la que no se ubican en un mapa. El área promedio de los lagos oscila entre 50 y 100 m^2, factor que hace que el agua utilizada por ellos sea mínima.

- *Municipio de Altamira*

El sector urbano del Municipio cuenta en su costado Norte con la laguna Natural, que es una atracción turística para quienes visitan el Municipio, hacia el oriente se encuentra la laguna de Chiriaboca, estas dos son las más representativas en la zona."

Para la identificación de los cuerpos lénticos no se puede determinar la escala de trabajo asociada, lo cual genera grandes incertidumbres asociados a los cuerpos que efectivamente se van a impactar con la implementación del proyecto hidroeléctrico.

Para este ítem EMGESA – INGETEC (2008) identifican los siguientes sistemas lénticos y sus subcuencas presentes en el AII, de la siguiente manera:

TABLA 5. SUBCUENCA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO. FUENTE: CUADRO 3.2-9 DE EMGESA – INGETEC (2008)[55]

No.	Subcuenca	Área (km^2)	Longitud Cauce ppal (km)
1	Cuenca alta - Río Magdalena	1633	78
2	Río Guarapas	749	57,2
3	Río Suaza	1561	104
4	Quebrada Negra	163	37
5	Río Bordones	435	58
6	6	132	24
7	Río Timaná	239	29
8	8	191	23
9	9	69	12
10	10	52	8

[55] EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de impacto ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3 pág 3.2-84.

No.	Subcuenca	Área (km^2)	Longitud Cauce ppal (km)
11	Quebrada El Hígado	94	18
12	Quebrada Garañón	20	8
13	Quebrada La Resaca	26	7
14	Quebrada Las Cuchas	18	7
15	Quebrada Lagunillas	116	22
16	Quebrada Seca	33	15
17	Zanjón El Altillo	21	11
18	Quebrada Las Damas	79	22
19	Quebrada de Garzón	125	27
20	Quebrada de Majo	108	28
21	Quebrada de Jagualito	23	12
22	Quebrada La Yaguilga	217	34
23	Quebrada de Buena Vista	90	20
24	Quebrada Qda Voltezuela	42	18
25	Zanjón de La Resaca	183	30
26	Quebrada La Honda	60	22
27	Quebrada Alonso Sánchez	37	12
28	Quebrada El Granadillo	3	5
29	Quebrada La Turbia	38	11
30	Zanjón de La Sucita	3	4
31	Zanjón de La Cascajosa	8	5
32	Zanjón Muchilero	7	5
33	Quebrada El Pedroso	13	6
34	Zanjón Agua Blanca	14	5
35	Quebrada El Hueco	5	5
36	Zanjón de Aguirre	5	3
37	Quebrada Parebola	11	3
38	Quebrada La Guandinosa	143	29
39	Quebrada El Cedro	3	3
40	Quebrada La Colorada	5	3
41	Quebrada Los Cocos	5	3
42	42	17	5
	Total	**6796**	

Análogamente que con los cuerpos lénticos no se puede determinar la escala de trabajo asociada, lo cual genera grandes incertidumbres asociados a los cuerpos que efectivamente se van a impactar con la implementación del proyecto hidroeléctrico.

- ***Establecer los patrones de drenaje a nivel regional.***

La actividad realizada por EMGESA – INGETEC (2008) para este ítem corresponde a la jerarquización de las cuencas hidrográficas, más sin embargo no se evalúa efectivamente el patrón de drenaje de la corriente (p. ej. dendrítico, rectangular, entre otros) igualmente no se puede apreciar caracterización morfométrica de las cuencas (subcuencas y microcuencas) presentes en el AII.

- ***Identificar el régimen hidrológico y de caudales característicos de las principales corrientes.***

En lo que concierne a este ítem EMGESA – INGETEC (2008) plantean:

> *"En el estudio, se realizaron los análisis de precipitación con el fin de determinar tanto la precipitación media necesaria para el cálculo de los caudales medios en los sitios del proyecto como la precipitación máxima asociada a diferentes períodos de retorno, además se determinó la precipitación máxima probable (PMP) para el cálculo de la creciente máxima probable (CMP) en los mismos sitios (mediante modelos lluvia – escorrentía).*
>
> *Para el estudio hidrológico, se contó con 51 estaciones hidrológicas de la cuenca y 23 estaciones fuera de la cuenca.*
>
> *Para el cálculo de la precipitación máxima en cada una de las estaciones, se utilizaron los valores de las lluvias máximas anuales en 24 horas y se ajustaron a la distribución de valores extremos de Gumbel, para el cálculo de los valores de la precipitación máxima probable (PMP) se utilizó el método de Hershfield el cual se explica a continuación.*
>
> *El método estadístico de Hershfield parte de la siguiente relación:*
>
> *PMP = Xn + K.Sn*
>
> *Donde:*
>
> *PMP: Precipitación máxima probable para una duración determinada (aguacero de diseño)*
> *K: Factor de frecuencia*
> *Xn, Sn: Promedio de los valores máximos anuales de precipitación para la duración seleccionada, y desviación estándar de la serie anual.*
>
> *Para el factor de frecuencia K se adopta el mayor valor encontrado en los estudios de Hershfield que es de 15. La media y la desviación estándar se ajustan de acuerdo con las curvas propuestas por Hershfield."*

Respecto a lo anteriormente expuesto se tienen las siguientes observaciones:

- Para la estimación de caudales medios, mínimos y máximos asociados con los cuerpos lóticos presentes en el AII estimados mediante modelos lluvía-escorrentía, no se tiene claridad en lo que respecta a los periodos de análisis ni la resolución temporal (mensual o diaria) de las series de precipitación empleados.

- Para la estimación de caudales medios, mínimos y máximos asociados con los cuerpos lóticos presentes en el AII estimados mediante modelos lluvía-escorrentía, NO tienen análisis de bondad de las series de precipitación.

- No se presentan los análisis para la estimación de los valores promedios máximos anuales de precipitación para la duración seleccionada, y desviación estándar de la serie anual

- No se presenta información primaria (aforos líquidos o series de estaciones instaladas) para los cuerpos lóticos presentes en el AII, lo cual se considera como algo necesario para estimar con certidumbre los caudales que efectivamente discurren por este punto.

Adicionalmente EMGESA – INGETEC (2008) señala lo siguiente en cuanto a la información limnímetrica disponible en AII y la estimación de caudales medios:

> "*Para el cálculo de caudales medios en el sitio del proyecto se partió de la información de caudales medios naturales disponibles en la Estación Puente Balseadero (río Magdalena), Paicol (río Páez), Puente Garcés (río Suaza), Puente Momíco (río Magdalena) y Puente Santander (río Magdalena), también se tuvo en cuenta la serie de afluencias a Betania.*
>
> *A partir de esta serie de caudales medios naturales, se calcularon las series de caudales disponibles en el sitio del proyecto El Quimbo. A continuación se presentan los caudales medios en las estaciones ubicadas sobre las principales corrientes del proyecto (río Magdalena y río Suaza).*"

En conclusión no se puede apreciar la estimación del régimen hidrológico y de caudales característicos de las principales corrientes presentes en el AII. A modo de interpretación INGETEC considera como la única corriente importante el río Magdalena más sin embargo no se realiza un análisis específico de por qué esta corriente es la corriente principal. Adicionalmente no se cuenta con estimación de caudales mínimos, medios y máximos lo cual se considera como una falencia.

La caracterización hidrológica para el AID presentada por EMGESA – INGETEC (2008) cumple con los TDR que se configuran como los requerimientos mínimos para la presentación del EIA.

Se puede concluir la caracterización hidrológica para el AID presentada por EMGESA – INGETEC (2008) presenta serias falencias puesto que incumple con los TDR que se configuran como los requerimientos mínimos para la presentación del EIA. Adicionalmente es pertinente. Más sin embargo es pertinente hacer la aclaración que los TDR para hidrología son bastante precarios puesto que no se especifica los requerimientos mínimos

para caracterizar la zona de estudio de manera representativa e igualmente tampoco se tiene claridad respecto a la escala mínima de trabajo.

5.6 CLIMA

En los TDR para la caracterización del área de influencia del proyecto para el componente de hidrología en el AID[56] se señala lo siguiente:

> *"Identificar, zonificar y describir las condiciones climáticas mensuales multianuales del área, con base en la información de las estaciones meteorológicas existentes en la región. Determinar la necesidad de instalar equipos permanentes para la captura de información meteorológica y si es el caso, recomendar equipos con sus características, así como la localización de los mismos.*
>
> *Los parámetros básicos de análisis serán:*
>
> - *Temperatura.*
> - *Precipitación: media mensual y anual.*
> - *Humedad relativa: media, máximas y mínimas mensuales.*
> - *Viento: dirección y velocidad de los vientos.*
> - *Radiación solar.*
> - *Nubosidad.*
> - *Evaporación."*

EMGESA – INGETEC (2008) señalan lo siguiente en cuanto a las estaciones hidroclimatológicoas seleccionadas y sus registros disponibles para el AII y el AID:

> *"En la hoya hidrográfica del río Magdalena hasta la zona del proyecto hidroeléctrico El Quimbo hay 9 estaciones climatológicas ordinarias, 2 estaciones climatológicas completas, 43 estaciones pluviométricas. 17 estaciones limnigráficas y 6 estaciones limnimétricas.*
>
> *De las 11 estaciones climatológicas ubicadas en la zona que comprende la cuenca del río Magdalena hasta el sitio de presa, están operando en la actualidad solamente 6 estaciones y son las estaciones climatológicas La Betulia en el municipio El Agrado, Zuluaga en el municipio de Garzón, Altamira El Grifo en el municipio de Altamira, Resina en el municipio de Guadalupe, Parque Arqueológico en el municipio de San Agustín y Sevilla en el municipio de Pitalito. De igual forma, las estaciones pluviográficas utilizadas para realizar el mapa de isolíneas de precipitación son El Hatillo, Oporapa, Hornitos, Villa Fátima y Acevedo. En el Plano PL-EIAQ-36*
>
> *Los parámetros utilizados para la caracterización climatológica en el presente estudio son precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación, brillo solar, nubosidad y vientos. En el cuadro3.2-26se presenta un resumen de esta información*

[56] MAVDT. (2006). Estudio de impacto ambiental: construcción y operación de centrales hidroeléctricas generadoras HE-TER-1-01. pág 82-83

Con esta información climatológica, se caracterizó el clima de la región a partir de la metodología propuesta por L. R. Holdridge de zonas de vida. La zonificación climática se presenta en el Plano PL-EIAQ-39.

Los cálculos de los balances hídricos climáticos para las áreas propuestas para reasentamientos se hicieron a aprtir de los parámetros hidrológicos de cada una de las estaciones climatológicas nombradas anteriormente."

Las estaciones seleccionadas y sus registros por EMGESA-INGETEC (2008) NO tienen análisis de bondad de las series de las estaciones en mención.

Los análisis expuestos por EMGESA - INGETEC para la caracterización de temperatura, humedad relativa, viento (dirección y velocidad), y radiación solar se remiten a un análisis de tipo puntual (ubicación de las estaciones climatológicas), lo que se considera como insuficiente. Para este caso es necesaria la espacialización de estas variables para tener una mayor comprensión del funcionamiento del ciclo hidrológico previo a la implementación del proyecto, esto se considera como una falencia puesto que este es un proyecto que tiene como eje articulador el agua y su ciclo.

Para la estimación de la evapotranspiración potencial EMGESA – INGETEC (2008) señalan lo siguiente:

"*Para calcular la evapotranspiración potencial en la zona del proyecto, se utilizaron los parámetros de las estaciones climatológicas La Betulia, Zuluaga, Altamira El Grifo, Sevilla, Parque Arqueológico y Resina que cuentan con registros climatológicos como: precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y evaporación.*

La metodología empleada y explicada a continuación corresponde a la de Thornthwaite, en el 3.2-28, se presenta la formulación de este método."

Según resolución 865 de 2004 de MAVDT adopta la metodología de Turc,Turc modificada u otra metodología (acorde con las condiciones del proyecto) para el EIA se adopta la metodología de Thornthwaite más no se pueden apreciar las consideraciones para la adopción de esta metodología. Análogamente el análisis se remite a un caso puntual lo cual se considera como insuficiente puesto que se tiene incertidumbre en lo que concierne al comportamiento espacial de la evapotranspiración; se recomienda como mínimo la evaluación por 3 metodologías para estimar la evapotranspiración y de esta manera determinar cuál es la más adecuada acorde con los requerimientos del proyecto.

Para la estimación el balance hídrico EMGESA – INGETEC (2008) señala lo siguiente:

"Para el cálculo del balance hídrico, se involucró la precipitación mensual multianual y la temperatura de las estaciones La Betulia, Zuluaga, Altamira El Grifo, Sevilla, Parque Arqueológico y Resina. Con estos parámetros se calculó la evapotranspiración potencial como se presentó en el numeral anterior. Thornthwaite recomienda que cuando no se cuenta con los valores de capacidad de almacenamiento del suelo o capacidad de campo, se puede tomar un valor igual a 100 mm, como valor pivote."

Al igual que en los ítems anteriores el análisis de balance hídrico se remite a un caso puntual lo cual se considera como insuficiente puesto que se tiene incertidumbre en lo que concierne al comportamiento espacial y temporal de la disponibilidad de agua superficial. Es necesario hacer hincapié tener conocimiento a nivel espacial y temporal del funcionamiento del ciclo hidrológico previo a la implementación del proyecto, esto se considera como una falencia grave puesto que este es un proyecto que tiene como eje articulador el agua y su ciclo.

En conclusión para la mayoría de los análisis de variables hidrológicas y climáticas se presentan análisis de tipo puntuales, con lo cual no se puede realizar una caracterización representativa considerando que estas variables son susceptibles a presentar variaciones espacialmente considerables. Para evaluar de manera consistente las variaciones climáticas es necesaria espacializaciones para el AID y el AII.

De igual manera no se realizan análisis de variabilidad climática, cambio climático, modulación climática por fenómenos atmosféricos y/o océano-atmosféricos (p. ej. ENSO, QBO, entre otros) lo cual es fundamental para tener conocimiento en cuanto a la comprensión de la hidrología local y regional.

5.7 HIDROGEOLOGÍA

En esta sección se hace una análisis del modelo hidrogeológico presentado por EMGESA para la solicitud de licencia ambiental expedida mediante resolución 0899 del 15 de mayo del 2009. En una primera sección se analiza los términos de referencia base del estudio, requerimientos mínimos e impactos a identificar, luego se hace un análisis especifico del EIA (EMGESA – INGETEC, 2008) en términos de línea base y capacidad de identificar impactos con el modelo construido. Del análisis se identificó una insuficiencia de información para caracterizar adecuadamente la zona de estudio, con llevando esto a modelo de dudosa calidad y por tanto, muy posible ignorado impactos. Cabe resaltar el intenso fracturamiento evidenciado en la zona de las estructuras que amerita una mejor caracterización en toda la zona en especial en el AII.

5.7.1 Análisis de los términos de referencia

Los requerimientos de información y evaluación de la autoridad ambiental del orden nacional (hasta 2011 la Dirección de Permisos, Licencias y Trámites Ambientales del Minambiente y hoy ANLA) establece condiciones especiales en cuanto a términos de referencia, mencionados en el concepto técnico 277 radicado el 22 de febrero de 2008 y en el auto 515 de igual fecha. En el componente físico no se presentan mayores modificaciones a los términos de referencia HE-TER-1-01. Pero se resalta en el auto 515 las siguientes consideraciones técnicas con respecto al área de influencia y su relación con la central hidroeléctrica de Betania:

> *No se considera que el proyecto requiera presentación de Diagnóstico Ambiental de Alternativas, por lo que se hace necesario, que EMGESA S.A. en la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental justifique la selección de la altura de la presa, con base en información técnica de detalle en procura de la optimización del recuro hídrico, la minimización de los riesgos e impactos ambientales negativos y la maximización de los impactos ambientales positivos considerando el sistema en*

conjunto con la central hidroeléctrica de Betania, tanto a nivel puntual como a nivel regional. (subrayado fuera de texto)

Pese a esto no se encuentra un análisis en conjunto en el aspecto hidrogeológico del efecto asociado de las dos presas más cuando los dos sistemas se encuentran en cercanías de sistemas de fallas (ver análisis densidad de fracturas). La respuesta de EMGESA en el radicado 4120-E1-29923 del expediente de El QUIMBO, hace alusión a la anotación citada así como se especifica que 25 de marzo de 2008:

> *EMGESA, como parte integral del estudio de impacto ambiental ha analizado cuidadosamente los aspectos complementarios requeridos por el Ministerio e incluye en documento anexo a este memorial el análisis y explicación puntual de los mismos*

En este sentido lo consignado en el EIA se ajusta a los requerimientos del MAVDT y especifica en dicha respuesta que el análisis detallado se encuentra en el EIA. En cuanto a especificaciones los siguientes son los requerimientos dados por los términos de referencia:

> *Cuando por las condiciones geológicas del área, se identifiquen unidades hidrogeológicas, presentar la siguiente información:*
>
> - *Identificar el tipo de acuífero.*
> - *Establecer las direcciones de flujo.*
> - *Identificar las zonas de recarga y descarga*
>
> *La información debe ser presentada en planos a escala 1:25.000 o mayor.*
>
> - ***Área de influencia directa***
>
> *Cuando las condiciones geológicas del área de estudio identifiquen un recurso hidrogeológico potencial de importancia, presentar la siguiente información:*
>
> - *Realizar el inventario de puntos de agua que incluyen pozos, aljibes y manantiales, identificando la unidad geológica captada, su caracterización físico-química y los caudales de explotación.*
> - *Establecer las unidades hidrogeológicas que intervendrá el proyecto. Igualmente, se deben identificar aquellas unidades que tengan conexión hidráulica con fuentes de agua superficiales.*
> - *Evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas por las actividades del proyecto (combustibles, materiales residuales, derrames sustancias tóxicas, entre otros).*
>
> *Presentar el mapa hidrogeológico a escala 1:25000 o mayor, localizando puntos de agua, tipo de acuífero, dirección de flujo del agua subterránea y zonas de recarga y descarga.*

La anterior información se deberá presentar siempre y cuando se identifiquen unidades hidrogeológicas en la zona. (Subrayados fuera de texto)

Como es evidente, los términos son de carácter general y por ello están sujetos al criterio del profesional y establecen los mínimos, es decir que en ningún momento se especifica un número mínimo de puntos de muestreo o pruebas de caracterización hidráulica o que en el caso de la escala, no se exige una escala de 1:25.000 sino esta o una más detallada si así lo requiere la claridad o la calidad de los mapas presentados.

En ningún caso los términos de referencia permiten que los modelos hidrogeológicos y las decisiones de diseño y construcción de allí derivadas se tomen basadas en descripciones litológicas genéricas e información de referencias bibliográficas, puesto que ello lleva a establecer todo un marco hidrogeológico considerando únicamente opiniones en cuanto a porosidad y disposición estructural de las rocas sedimentarias, siendo este un análisis subjetivo y muy arriesgado en medios altamente fracturados, el cual sería el caso de la zona de estudio si se revisan documentos geológicos o los mismos datos de RQD consignados en el EIA de EMGESA – INGETEC (2008).

De igual forma, se asume que la empresa interesada en el proyecto tiene un grado de conocimiento adecuado en términos de datos de campo y seguimiento de metodologías en función de las condiciones del área de estudio. En otras palabras, si bien se pide la toma de parámetros físicos los términos de referencia permiten al interesando desarrollar la metodología que considere más pertinente.

5.7.2 Impactos ambientales

Los términos de referencia no permiten definir a cabalidad los impactos generados por una infraestructura como la de una hidroeléctrica, pero allí entra el supuesto conocimiento de una empresa como EMGESA, de la cual hace parte una trasnacional energética como ENEL que debe conocer las implicaciones de un proyecto de este tipo. Además, ya en el territorio colombiano, que presenta una gran complejidad en términos de geología, Hidrosogamoso ha considerado necesario la instrumentación sismológica para el monitoreo de sismicidad inducida.

Los términos de referencia HE-TER-1-01 especifican lo siguiente en términos de impactos asociados al flujo de aguas subterráneas:

- *Se deberá realizar una evaluación hidrogeológica aguas abajo del río objeto de embalsamiento, donde se analizará y concluirá sobre los posibles impactos en los suelos, en el ecosistema y en la productividad del área de influencia por posibles abatimientos del nivel freático, ante la reducción de caudales de la corriente embalsada, como consecuencia de los escenarios propuestos de operación del embalse.*

- *Se deberá realizar un inventario de los cuerpos de agua ubicados sobre el alineamiento de los túneles de conducción y desvío, para los cuales se obtendrán registros de caudales mensuales durante un periodo mínimo de un año, lo cual servirá como referente para la posterior validación de los posibles impactos estimados por desecamiento temporal o permanente de dichos cuerpos de agua por la perforación del túnel; de acuerdo a lo anterior se deberán plantear*

los respectivos planes de manejo y de monitoreo y seguimiento del comportamiento de dichas corrientes para las fases de construcción y operación.

Al igual que la línea base, es obligación del solicitante hacer un control adecuado de todos los posibles riesgos que genere el proyecto, incluso aquellos no registrados en los términos de referencian pero que son de conocimiento de los expertos en las temáticas pertinentes y hacen parte del estado del arte respecto a hidroeléctricas.

5.7.3 Análisis del componente hidrogeológico del EIA del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo

5.7.3.1 Relación con los demás componentes

La primera parte analizada fue la línea base del EIA (EMGESA-INGETEC, 2008) donde en términos hidrogeológicos, la base principal para la construcción del modelo hidrogeológico es la geología y la hidrología de la zona. De las unidades identificadas se debe resaltar que se hace una caracterización en términos de ambiente de formación, edad, granulometría y litificación, sin embargo, no se tiene mención a la porosidad primaria del medio y resulta muy preocupante la inexistencia de un perfil geológico de detalle en la zona del vaso u otra zona diferente al área en donde se ubican las estructuras, más aún cuando en esta zona existe información secundaria de buena calidad en especial la obtenida por Ecopetrol para el estudio de la subcuenca Neiva (secciones sísmicas) y registros de pozo para el sitio, referencias mencionadas en el EIA para la construcción de la base geológica (ver sección 3.1).

En este sentido y en vista de las condiciones hidrológicas de la zona se puede identificar un caudal mínimo de 40 m^3/s medio mensual en la curva de duración de caudales ilustrada en la siguiente figura (para un mayor detalle ver sección 3.4), lo cual indicaría un aporte de aguas subterráneas o flujo base, no obstante, en el EIA (EMGESA-INGETEC, 2008) no se ve una relación entre la hidrología y la hidrogeología que es la entrada del modelo hidrogeológico.

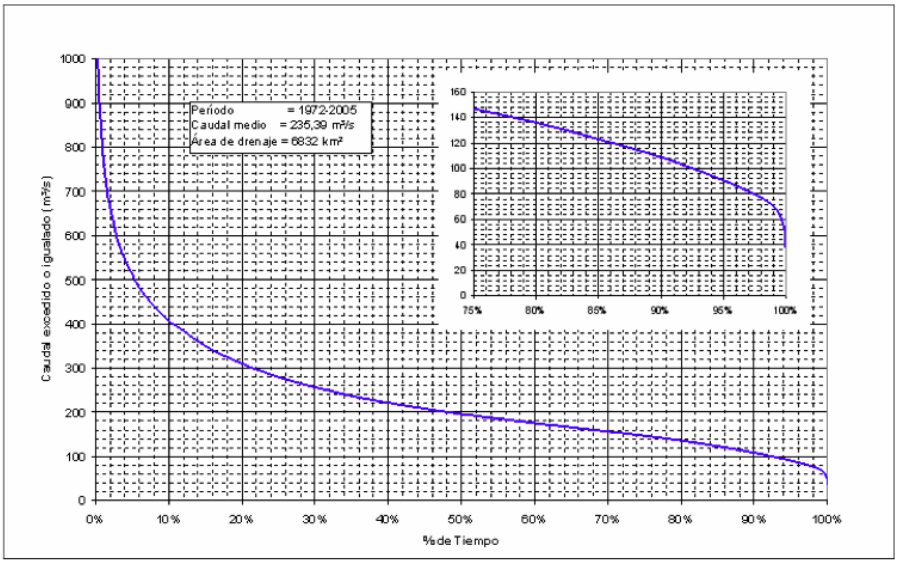


FIGURA 18. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES EN EL SITIO DE LA ZONA DEL PROYECTO TOMADO DEL EIA HECHO POR EMGESA – INGETEC (2008) FIGURA 3.2.4

Por otro lado, se debe resaltar que la información de discontinuidades, macizo rocoso y permeabilidades, obtenidas de la caracterización geotécnica, se centra exclusivamente en la ubicación de la presa (recuadro amarillo siguiente figura) y no hay ninguna mención a mediciones en el vaso, sitio en el cual se tendrá ahora una carga hidráulica de 150 m.

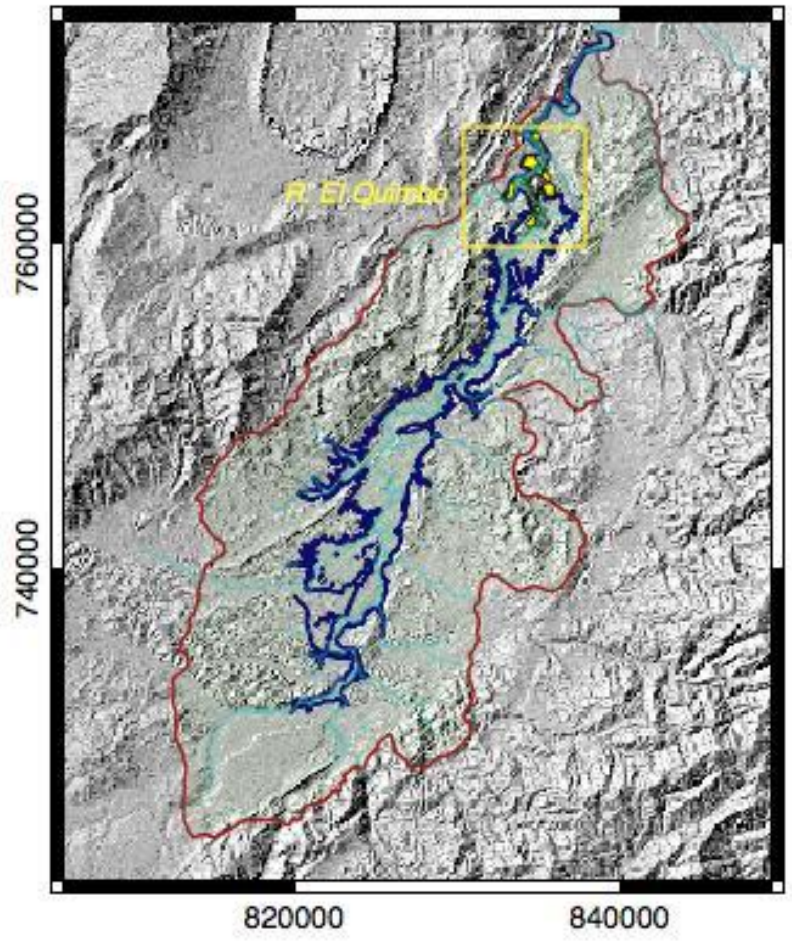


FIGURA 19. UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS, PRESA, DIQUE, ATAGUÍA CON RESPECTO AL AII Y AID. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.7.3.2 Hidrogeología e información hidráulica de base

El EIA (EMGESA-INGETEC, 2008) y otros estudios presentados como EMGESA-INGETEC (2013)[57] señalan lo siguiente en cuanto a la fuente de información con la que se construye el modelo hidrogeológico**:**

> *La caracterización hidrogeológica del área donde se localiza el Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo se establece fundamentalmente con base en información geológica, razón por la cual esta se presenta de forma general, cubriendo lo que se denomina área de influencia indirecta, sin entrar en una caracterización del área de influencia directa, que requiere además de la información geológica detallada,*

[57] EMGESA-INGETEC. (2013). Informe para la sustracción de reserva forestal de la Amazonía-sector Montea Reasentamiento, Volumen 1-1.

> *el conocimiento o determinación de parámetros hidráulicos, que permita clasificar los diferentes niveles litológicos según su aptitud para almacenar y transmitir agua. La información geológica sin embargo, permite inferir de manera conceptual y preliminar, que en la zona no se cuenta con niveles acuíferos que contengan recursos hídricos subterráneos importantes.*

De igual forma en cuanto a permeabilidades se menciona por parte de EMGESA-INGETEC, (2008):

> *Se definen cuatro unidades hidrogeológicas de la zona del proyecto, con base en información geológica y algunos datos de permeabilidad, siguiendo los conceptos y recomendaciones de Lohman S. W. et al (1970). Las unidades hidrogeológicas establecidas, se presentan en el Mapa Hidrogeológico (Plano PL-EIAQ-34.1).*

Posteriormente, en EMGESA-INGETEC (2013)[58] se puede leer:

> *Como no se cuenta con una base de datos de permeabilidades, niveles freáticos, ni piezométricos de la zona, se elabora un mapa hidrogeológico conceptual a partir del estimativo de permeabilidades relativas y por ende del potencial acuífero relativo de las unidades litoestratigráficas diferenciadas en la cartografía geológica plasmada en el mapa geológico general, cuya base corresponde a la plancha geológica 366-Garzón de INGEOMINAS (1998). Además de clasificar las unidades litoestratigráficas con base en su potencial acuífero, se indica para el caso de los acuíferos, su calidad de libre, confinado o semiconfinado, teniendo en cuenta la información geológico-estructural de la zona.* (Subrayado fuera de texto)

De tal forma que la mayoría de las unidades presentes en la zona no cuenta con mediciones de propiedades hidráulicas, sin embargo, se identifican en el EIA (EMGESA-INGETEC, 2008) dos tipos de acuíferos porosos sección (3.2.7.2.1) conformados principalmente por:

> *Acuíferos en depósitos Aluviales (Ap-Qal), Acuíferos en terrazas aluviales (Ap-Qt), Acuíferos en depósitos Fluviolacustres (Ap-Qf) y Acuíferos en abanicos aluviales (Ap-Qa).*

Ninguno de los acuíferos mencionados presenta un dato de capacidad de infiltración o propiedades hidráulicas del medio, siendo este uno de los más afectados, posiblemente relacionados con procesos morfodinámicos. No se han llevado a cabo pruebas hidráulicas o de caracterización hidráulica en los acuíferos. Por otro lado se señala los acuíferos fisurados como el Guadalupe (Af-kg) y el Caballos, pero los únicos datos de caracterización hidráulica corresponden a la formación Guadalupe pero son tomados de referencias ubicadas en la sabana de Bogotá, lo cual no tiene ningún rigor si no se han tomado datos petrográficos, petrofísicos, geofísicos que soporten esas inferencias.

Finalmente, en cuanto a las capas semiconfinadas (Sección 3.2.7.2.3.1. del EIA (EMGESA-INGETEC, 2008) se encuentra las capas semiconfinantes Gigante, Honda y Gualanday. Se realizaron pruebas hidráulicas y caracterización de macizo rocoso en la

[58] EMGESA-INGETEC. (2013). Informe para la sustracción de reserva forestal de la amazonía-sector Montea Reasentamiento, Volumen 1-1.

Formación Gualanday, obteniendo valores de permeabilidad del orden de 10^{-6} m/s, mientras que para el caso de la formación Honda se tienen valores de conductividad hidráulica de 10^{-7} a 10^{-9} m/s. Sin embargo, para el caso de la Formación Gigante, unidad que constituye la mayor proporción del vaso del embalse, no se tiene ningún indicio de las características hidráulicas y resulta alarmante que no se lleven a cabo caracterizaciones de macizo rocoso en el área de influencia indirecta y que la caracterización se base en las opiniones del profesional en hidrogeología que considera que su capacidad de infiltración es baja (sin un solo dato de sustento) y en una descripción geológica precaria, como se detalló en el numeral anterior. .

En el caso de las capas confinantes (Sección 3.2.7.2.4.) entre las que se señalan las unidades Guaduas, Villeta, Saldaña, rocas intrusivas Jurásicas, rocas Paleozoicas y Precámbricas, no se presenta ningún análisis de las características hidráulicas o de porosidad y se omiten o desconocen los estudios del sector petrolero en esta cuenca sedimentaria. En estas capas al igual que las semi-confinantes resultan claves en un estudio detallado de macizo rocoso.

Es de resaltar que el paradigma de las unidades geológicas impermeables ha sido dejado atrás luego del gran avance del conocimiento en los medios fracturados, así como en los modelos de fracturas discretas (DFN) muy diferentes de los modelos continuos típicamente modelados con códigos basados en discretización de un medio continuo (MODFLOW) (Pardo, 2012)[59]. Este es uno de los temas más álgidos especialmente en la evaluación de los impactos ambientales generados por las represas y la modelamiento de estabilidad. Como ilustración, la conductividad hidráulica de una fractura[60] con abertura menor a 0,1mm, o muy cerrada de acuerdo con la caracterización de la ISRM (International Society for Rock Mechanics), puede ser del orden de 10^{-3} m/s y el de un medio continuo con baja a muy baja conductividad del orden de 10^{-7} a 10^{-10} m/s. Esta diferencia, en órdenes de magnitud, es similar a considerar la velocidad de una persona que camina (1m/s) con respecto a la velocidad de la luz ($3x10^{8}$m/s).

Adicionalmente, la caracterización del medio con pruebas Lugeon, resulta en valores muy locales y en vista de la heterogeneidad – anisotropía del medio, asociada a los valores de RQD y orientación de fracturas, es necesario la ejecución de ensayos de mayor duración con seguimiento en pozos de monitoreo, para de esta forma poder estimar todas las propiedades hidráulicas (conductividad y almacenamiento) e interacción entre capas (Singhal & Gupta, 2010)[61].

[59] Pardo (2012), Optimización de un modelo de flujo en un medio fracturado, usando teoría de percolación, Universidad Nacional de Colombia.
[60] Estimación basada en ley cubica o placas paralelas (Singhal & Gupta, 2010)
[61] Singhal , B., & Gupta, R. (2010). Applied hidrogeology of fractured rocks. Springer

5.7.3.3 Zonas de recarga, descarga y direcciones de flujo.

En cuanto a las **zonas de recarga** (sección 3.2.7.3. EIA) (EMGESA – INGETEC, 2008) se tiene lo siguiente:

> *Para la zona de influencia del proyecto en general, se define áreas de recarga para los acuíferos porosos, acuíferos fisurados y capas semiconfinantes. Se diferencia una tercera área donde la recarga es mínima o no se presenta recarga, donde afloran las capas confinantes o impermeables (Ver Mapa PL-EIAQ-34.1).*

La referencia que se cita corresponde al mapa de unidades geológicas y la interpretación de la zonas de recarga es en sí cualitativa a partir de las unidades hidrogeológicas y su ubicación espacial. No hay datos de capacidad de infiltración del subsuelo, tampoco hay validación de zonas de recarga por cruce con otra información como por ejemplo: morfometría, unidades geológicas, deformación tectónica, unidades geomorfológicas, suelos y coberturas vegetales. Este cruce de información temática mediante SIG es apenas una de las primeras aproximaciones, pero en el caso del estudio de EMGESA – INGETEC, 2008, ni siquiera este análisis de susceptibilidad a la recarga es llevado a cabo. En el caso de las ***zonas de descarga*** la información es precaria, no se entiende la relación del inventario de puntos con la estimación de las zonas de descarga, y no se tiene información de hidrogeoquímica e isotopía o cruce con el inventario de puntos para definirlas. Mejores aproximaciones necesitan de monitoreo de isotopos, hidrogeoquímica y pruebas de infiltración, siendo estas últimas de particular interés en los acuíferos porosos (Fetter, 2001)[62].

Finalmente las direcciones de flujo son estimadas de la siguiente forma por EMGESA – INGETEC, 2008:

> *Las direcciones de flujo en los acuíferos de la zona se establecen de manera conceptual, atendiendo fundamentalmente a aspectos estructurales, en especial a la disposición de los flancos de los pliegues anticlinales y sinclinales que afectan la secuencia de rocas sedimentarias donde se encuentran los acuíferos fisurados y las capas semipermeables.*
>
> *En los acuíferos porosos, las direcciones de flujos normalmente son perpendiculares y en dirección hacia las corrientes superficiales de agua adyacentes o que interceptan los depósitos cuaternarios en los cuales se encuentran. En los acuíferos fisurados y en las capas semipermeables, las direcciones de flujos tienden a ser paralelas o coincidentes con las direcciones de buzamiento de las secuencias de estratos en las cuales se encuentran, sin descartar, que también pueden presentar flujo de agua hacia niveles más profundos, siguiendo trayectorias aproximadamente verticales.*

Similar a las zonas de recarga y descarga, al no contar con piezómetros, caracterización hidrogeoquímica e isotopía o un modelo conceptual hidrogeológico primario de buena calidad, no permite estimar las direcciones y energía del sistema. Y En vista de la caracterización dada a las diferentes unidades sería necesario por ejemplo para el caso de las unidades semiconfinadas determinar el coeficiente de goteo de estas unidades y el

[62] Fetter (2001), Applied hydrogeology, Prentice hall.

grado de conexión que existe entre cada una de las unidades del modelo hidrogeológico, lo cual no es estimable solo conociendo la disposición estructural de las capas y muy precario con pruebas tipo Lugeon (restricciones con respecto a dirección). En efecto, la descripción dada es inútil ya que no concluye en algún modelo tangible.

Es de señalar que en las condiciones actuales del conocimiento el estudio de las direcciones de flujo en especial de los flujos a través de fracturas son claves para entender los impactos generados por el llenado de presas, particularmente en la sismicidad inducida o desencadenada, y en el estudio de tubificación de presas.

5.7.3.4 Conclusiones del modelo hidrogeológico EIA (2008)

En el componente hidrogeológico no se presenta ningún modelo del subsuelo o perfil del terreno de escala regional y local que permita pasar de un modelo escrito a un modelo conceptual y eventualmente a un modelo numérico con capacidad de predicción de los abatimientos y las direcciones de flujo. En muchos casos le descripción meramente cualitativa de los fenómenos se ve afectada por la subjetividad del profesional, incrementado la posibilidad de ignorar impactos o subestimarlos por completo. Además, se basa en un componente geológico absolutamente precario en términos de información sobre porosidad o de análisis de fracturamiento (solamente se tienen pocos datos sobre las fracturas en los registros de perforación) o de la comprensión de la deformación tectónica.

No se ve ninguna relación con los demás componentes, es decir, si bien en geotecnia se realizaron numerosas líneas de refracción (con mínima capacidad de detección de variabilidad lateral) y exploración geotécnica (Anexo 3.2.4 del EIA de EMGESA-INGETEC, 2008), esta nunca se tiene en cuenta para el desarrollo y construcción del modelo hidrogeológico, en el mismo sentido la hidrología realiza estimaciones de la infiltración que se da en el AII y AID, pero no se hace mención ni se conocen los detalles de los resultados del modelamiento hidrológico siendo este la entrada de un posible modelo hidrogeológico ya que establece los escenarios de modelación.

Por estas razones, de lo consignado en el Estudio de Impacto Ambiental realizado por EMGESA – INGETEC (2008) se puede concluir que no se tiene ningún conocimiento respecto a los niveles freáticos ni piezométricos, ni a las zonas de recarga y descarga, ni la relación entre las aguas subterráneas y la estabilidad en el sector del vaso, ni los caudales que puedan presentarse en los túneles de desviación ni de descarga. Tampoco se conoce de ningún modelo hidrogeológico ni red de flujo en la zona de presa, lo cual puede repercutir en no considerar aspectos tan importantes en una represa como la eventualidad de grandes deslizamientos gobernados por los cambios en los niveles freáticos en las zonas embalsadas (que a su vez puede producir tsunamis en el vaso) o en la predicción de tubificación dentro del cuerpo de la presa, en la interfaz presa-fundación o en las rocas de la fundación.

5.8 GEOTECNIA

5.8.1 Análisis del Estudio de Impacto Ambiental (EIA)

El Estudio de Impacto Ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo tiene como objetivo general el análisis de los diferentes componentes ambientales y los recursos que

demandará la construcción y operación del proyecto. Todo con el fin de optimizar y racionalizar los usos de los recursos y lograr su viabilidad mediante la obtención de la Licencia Ambiental otorgada por el ministerio de Medio Ambiente.

Bajo este contexto, el presente numeral pretende evaluar cuatro (4) capítulos en particular, ya que tocan los temas relacionados con geotecnia de forma directa o tangencial y que se consideran de vital importancia para asegurar el cumplimiento de los objetivos planteados por EMGESA S.A. en el EIA. Los tres capítulos son los siguientes:

- Capítulo 3: Caracterización del área de influencia del proyecto
- Capítulo 8: Programa de seguimiento y monitoreo
- Capítulo 10: Plan de Abandono y restauración final para las áreas que son intervenidas de manera directa por el proyecto.

5.8.1.1 Análisis de la caracterización del área de influencia del proyecto – EIA Cap. 3

El capítulo 3 del estudio de impacto ambiental, realiza una descripción de las áreas de influencia del proyecto. Específicamente en lo que se refiere al medio ABIÓTICO se tocan los siguientes temas que de forma particular son resorte de los análisis de geotecnia.

En el numeral 3.2.7.8 correspondiente al análisis de la vulnerabilidad de la contaminación de acuíferos hace una descripción muy somera de la influencia de distintos agente frente a los acuíferos. Pero no se tiene modelación alguna, si ningún análisis hidrogeológico que identifique, cuantifique y evalúe la existencia o no de éstos cuerpos de agua subterránea.

Es absolutamente necesario, previo a cualquier evaluación, cuantificar y caracterizar lo que será foco de estudio. Es decir, antes de cualquier análisis hay que tener información de campo y laboratorio respecto a los acuíferos de la zona de estudio.

Ahora bien, solo en función de la naturaleza de los acuíferos antes del llenado del embalse, de su caracterización y demás, es que se puede evaluar la afectación o no de éstos y ya que el estudio no presenta esta información, no puede llegar a las conclusiones a las que llega.

En el numeral 3.2.8 de geotecnia se presentan la cantidad de perforaciones ejecutadas. Se mencionan que para la evaluación de las características del subsuelo de un proyecto que está compuesto por, un cuerpo de presa principal de 150 metros de altura, de un dique auxiliar, de la casa de máquinas, de un túnel de desviación, de un túnel de captación y transporte del agua hacia la casa de máquinas y demás obras complementarias se realizaron 16 perforaciones, 20 líneas de refracción sísmica, tres apique, una trinchera y dos galerías de exploración. El siguiente cuadro referencia la cantidad de exploración del subsuelo realizada.

TABLA 6. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO-DATOS. FUENTE: CAPÍTULO 3.2.8 DEL EIA

Exploración	Número
Sondeos	16
Líneas de Refracción Sísmica	20
Apiques	3
Trinchera	1

Galerías	2

En el numeral 3.2.8.5 del presente documento se describe la zonificación geotécnica encontrada en la zona. La misma describe cuatro sitios de interés o zonas homogéneas.

En todos los casos analizados, se caracterizó el RQD de los sondeos como malo o muy malo. Lo anterior deja ver la necesidad de ensayos de detalle que permitan cuantificar la permeabilidad, no solo como un valor general para toda una formación sino para el caso puntual de las discontinuidades. El valor del RQD que se encontró muestra que la roca se encuentra muy fracturada y que la permeabilidad por discontinuidades podría ser importante su análisis.

5.8.1.2 Análisis de la evaluación ambiental – EIA Cap. 5

En el capítulo 5, donde se enumeran y analizan los diferentes impactos ambientales que se podrían generar y que estarían relacionados de forma directa con la estructura de presa y con las obras asociadas a esta solo enumeran uno, a saber:

Generación de inestabilidad y erosión en el borde del embalse, a este impacto lo califican como muy bajo. En este punto se hace evidente que no se analizaron todos los posibles impactos que se podrían generar, cambio en el régimen de los acuíferos producto de la tabla de agua que de forma artificial se ha dispuesto, procesos de inestabilidad aguas abajo de la presa.

Tampoco se tuvo se evaluó la posibilidad de la falla de la presa, así este análisis tuviera una calificación baja. Es decir que no se han evaluado las afectaciones que este evento podría tener en el entorno.

Ahora bien, respecto al impacto ambiental que se identificó “Generación de inestabilidad y erosión en el borde del embalse” en el Estudio de Impacto Ambiental (EMGESA – INGETEC, 2008) se presenta la siguiente fotografía asociada a la margen izquierda del río Magdalena en la zona de presa. Dicha foto muestra un claro efecto erosivo al tener discontinuidades abiertas, discontinuidades que según se ve en la fotografía presentan aberturas de más de 1,0 metro.

FIGURA 20. EROSIÓN MARGEN IZQUIERDA DE LA ZONA DE PRESA. FUENTE: EIA DE EMGESA-INGETEC, 2008.

Hay que destacar que en la presa de Betania, localizada aguas abajo de la presa de El Quimbo, se han presentados fuertes procesos erosivos en la parte baja del vertedero. Es por tal motivo que se considera que el único impacto ambiental asociado a procesos de estabilidad que podrían afectar a la presa está mal evaluado, no contemplan análisis detallados y solo se limitan a una escueta descripción que adicionalmente está fuera de foco y carece de evidencia tangible que lleven a las conclusiones acá mencionadas.

FIGURA 21. PROCESOS EROSIVOS EN LA PARTE BAJA DEL VERTEDERO EN LA PRESA BETANIA. ADEMÁS DE LOS CAUSADOS POR LA SOCAVACIÓN DEL AGUA QUE CAE POR EL VERTEDERO, TAMBIÉN ES MUY FUERTE LA EROSIÓN INTERNA (TUBIFICACIÓN) DE LAS ROCAS DE LA FORMACIÓN GUALANDAY. FUENTE: NOTAS DE CLASE JULIO FIERRO MORALES – GEOLOGÍA PARA INGENIERÍA.

5.8.1.3 Análisis del Plan de Monitoreo – EIA Cap. 8

En el numeral número ocho, referido al Estudio de Impacto ambiental, se presenta el Plan de seguimiento y monitoreo del proyecto. En este plan de monitoreo se listan los siguientes numerales, los cuales serán foco de estudio y análisis.

- Numeral 8.1.1 Monitoreo de emisiones atmosféricas, calidad del aire y ruido Numeral 8.1.2 Seguimiento y disposición de residuos sólidos domésticos e industriales
- Numeral 8.1.3 Monitoreo y seguimiento a la disposición de excedentes de excavación
- Numeral 8.1.4 Programa de monitoreo del clima en los alrededores del embalse
- Numeral 8.2.1 Programa de monitoreo y seguimiento de cobertura vegetal y hábitat terrestre
- Numeral 8.2.2 Programa de monitoreo de fauna silvestre
- Numeral 8.2.3 Monitoreo del embalse y cursos de agua superficiales durante la construcción, llenado y operación
- Numeral 8.2.3 Programa de monitoreo y seguimiento para el control de micrófitos acuáticos y residuos vegetales flotantes.

Es claro que en los numerales antes listados, el foco de estudio es el medio físico que corresponde al área de influencia del proyecto, no obstante, en éstos no se hace referencia al seguimiento de procesos de inestabilidad en las laderas aledañas al embalse, ni superficiales, ni las que producto del aumento de la tabla de agua quedarán bajo la cota de inundación se puedan generar. Lo anterior es importante para definir la cantidad de sedimentos que podrían llegar al embalse, afectando el volumen total del agua embalsada, la calidad de ésta y en el mismo sentido la durabilidad del funcionamiento de la obra civil.

Al no contemplar el monitoreo sistemático y constante de posibles focos de inestabilidad en las laderas ni de procesos de remoción en masa, se está obviando las afectaciones que éstos podrían tener sobre la infraestructura que da funcionamiento al proyecto hidroeléctrico, adicionalmente, no se están contemplando los impactos ambientales que estos podrían tener, ni los riesgos que acarrean que deslizamientos se presenten sobre el vaso del embalse, que en casos de estudio se han presentado y han generado catástrofes asociadas a descuido en el análisis de dichos procesos.

En el mismo sentido, no se encuentra enumerada la instrumentación que debería disponerse sobre las obras que conforman el embalse, a saber:

- Cuerpo de la presa principal
- Cuerpo del dique auxiliar
- Galerías de captación y descarga de fondo
- Vertedero
- Casa de Máquinas

Esta información debió ser dispuesta de forma explícita en el plan de manejo, pues debido a que las presas son estructuras que deben ser constantemente monitoreadas, ya que sobre ellas recaen aproximaciones considerables, variación de parámetros, condiciones geológicas complejas y demás incertidumbres, que en cuyo caso, la única forma de control es la verificación constante y sistemáticas de las deformaciones, presiones de poros y, en general, del comportamiento de las estructuras proyectadas.

5.8.1.4 Plan de abandono y restauración final – EIA Cap. 10

El proyecto hidroeléctrico está diseñado para una vida útil de 50 años, todo en función de los sedimentos que aporta la cuenta tributaria. Es posible que con obras complementarias se pueda aumentar la vida útil del proyecto, pero todo se ejecutará en función del desarrollo del mismo durante su ejecución.

Debido a esto, tras el cumplimiento de la vida útil, se deberán asegurar las condiciones para que las instalaciones y demás obras no sean un foco de riesgo latente en la zona y que el no seguimiento de éstas durante el tiempo no se convierta en una problemática para la comunidad ni para el entorno.

No obstante lo anterior, el plan que en el capítulo 10 se propone carece de la evaluación detallada de la actividad símica que producto del embalse se generó durante el tiempo de ejecución. No se proyectan estudios de análisis para la evaluación de la degradación de las obras como la presa o el dique auxiliar que debido al paso del tiempo se pudieron ver afectadas y que podrían significar un riesgo latente.

Si tras la operación de la hidroeléctrica, se plantea el descenso de la lámina de agua del embalse, no se evaluaron las afectaciones en las laderas aledañas, procesos erosivos que las podrían afectar, procesos de remoción en masa producto del descenso de la lámina de agua ni demás afectaciones.

Es necesario que estos análisis se incluyan ya que el embalse, de forma clara ha cambiado las condiciones del entorno y estas nuevas variables deberán ser cuantificadas y evaluadas a la luz del riesgo.

5.8.2 Análisis de los informes de diseños para licitación del 2009

Este numeral tiene como objetivo la revisión de la siguiente información y análisis de los siguientes informes:

TABLA 7. INFORMES DE DISEÑOS PARA LICITACIÓN EVALUADOS

Documento	Nombre	Código
1	Memorando de Diseño Presa Cara de Concreto	PHEQ-DEST-DOC-0128
2	Memorando de Diseño Estructural de Túnel de Desviación	PHEQ-DEST-DOC-0054
	Memorando de Diseño Geotécnico de Túnel de Desviación	PHEQ-DGEO-DOC-0034
3	Memorando de Diseño Geotécnico del Dique	PHEQ-DPLA-DOC-0180

El énfasis central de este análisis es la evaluación de la cantidad y calidad de la exploración del subsuelo, de los análisis de las estructuras necesarias para el funcionamiento del Embalse del Quimbo, a saber, presa, dique, casa de máquinas, túneles de desvío, todo enfocado a geotecnia.

5.8.2.1 Documento 1: Memorando de Diseño Presa Cara de Concreto- PHEQ-DEST-DOC-0128

- ***Exploración del Subsuelo***

En el documento no se presentan perforaciones, líneas de refracción sísmica ni otros mecanismos que se consideren pertinentes para la obtención de muestras y parámetros de las unidades de roca y suelo.

- ***Parámetros Geomecánicos***

El documento no presenta soportes de los parámetros geomecánicos que se utilizaron en los análisis presentados. Tampoco menciona el origen de dichos parámetros.

- ***Conclusiones y Recomendaciones***

- No se encuentran los análisis de flujo de agua y presiones sobre la estructura proyectadas.
- No se presentan las presiones que bajo el plinto se podrían presentar, tampoco se presenta la justificación de las barras de anclaje que se proyectan para la unión entre el plinto y la unidad de roca.
- Es claro que tanto el plinto como la cara de la presa deberá ser de concreto, no obstante no se presentan las características mecánicas del material, tampoco se mencionan las condiciones necesarias para la impermeabilización de éstas estructuras.

5.8.2.2 *Documento 2: Memorando de Diseño Estructural de Túnel de Desviación- PHEQ-DEST-DOC-0054 y Memorando de Diseño Geotécnico de Túnel de Desviación- PHEQ-DGEO-DOC-0034*

El túnel tiene una longitud de 488,68 metros, adicionalmente la obra requiere de una ventana de construcción de 51,24 metros. Las dimensiones del túnel corresponden al uso que se le va a dar y está en función de los requerimientos de caudal que se necesitan. Bajo estas condiciones, para el túnel de desviación se fijó un radio de excavación de 6.0 metros de altura con sección en herradura.

Debido a que la obra que se proyecta es de mayor complejidad, es necesario que se cumplan con las condiciones mínimas de estabilidad de las entradas y de la galería proyectada.

El presente capítulo recopila las caracterizas de la estructura a las que llega la consultoría. Dimensiones de las obras, geometrías adoptadas, consideraciones y recomendaciones finales.

- ***Exploración del Subsuelo***

La exploración del subsuelo que se utilizó para la obtención de muestras y de parámetros consintió en un sondeo de 40 metros de profundidad y la realización de cuatro (4) líneas de refracción sísmica. Se considera que esta cantidad de exploración es a todas luces insuficiente, no obstante debido a que la obra ya se ejecutó es necesario que se haya cotejado la información acá suministrada con la realidad.

- ***Ensayos de Laboratorio***

Los ensayos de laboratorio que se presentan en el estudio se enumeran en el siguiente cuadro.

Tabla 8: Relación de ensayos de laboratorio-Túnel de Desviación

Tipo	Cantidad
Límites	4
Granulometría	4
Compresión Inconfinada	7
Carga Puntual	2
Peso Unitario	14

Como es evidente, el informe se realizó sin ensayos de resistencia al corte entre discontinuidades, en un medio a todas luces dominados por las diaclasas y la estratificación. Y los ensayos se centran principalmente en la cuantificación del peso unitario de los materiales. Esta condición va en concordancia con la escasa exploración del subsuelo realizada.

- ***Análisis y Cálculos Realizados***

Hay tres análisis que debieron ser considerados para el dimensionamiento final de las estructuras propuestas. El primero correspondiente al flujo de agua subterránea tras la apertura de la galería y en el mismo sentido, el flujo de agua tras el llenado del embalse. El segundo análisis consistió en la determinación de las posibles fallas que se podrían generar y las deformaciones esperadas tras la construcción de las obras requeridas. El último es relacionado con los portales, estos portales deberán ser protegidos para evitar cualquier proceso de inestabilidad que pueda afectar el túnel.

Respecto al primer análisis requerido, no se presentan comentarios al respecto. De los otros dos si hay información y a continuación se comenta.

- ***Análisis de Estabilidad de la Excavación-Bloque Crítico***

El análisis de estabilidad e la excavación se realizó en función de un análisis de discontinuidades, determinando los bloques que se podrían formar producto de la intersección entre discontinuidades y el alineamiento del túnel. La siguiente tabla resume los bloques definidos como críticos y los factores de seguridad sin obras y con obras.

TABLA 9. BLOQUES CRÍTICOS, DIMENSIONES Y SOPORTES REQUERIDOS

Obra	Bloque	Factor de Seguridad	Presión de Soporte (ton/m2)	Volumen (m3)	Factor de Seguridad Final
Túnel de desviación	0001	0,00	27,0	386,0	1,50
	0111	0,00	1,0	1,7	1,50
	0001	0,17	2,0	7,1	1,29
	0101	0,98	4,0	148,3	0,48
Ventana de Construcción	1001	0,00	1,0	0,6	1,50
	1011	0,00	1,0	1,6	1,50
	1111	0,00	17,0	76,3	1,50
	0011	0,73	1,0	6,9	0,75

Respecto a las deformaciones esperadas, se observa que las mayores se esperan se presentan en el piso del túnel, siendo estas últimas de 100 cm como máximo en las zonas más fracturadas.

TABLA 10. DEFORMACIONES ESPERADAS EN EL TÚNEL

Tipo de Terreno	Tipo de Roca	Deformaciones máximas (cm)		
		Techo	Paredes	Piso
I	Sana	3	2,6	4
II	Poco Fracturada	4,2	4,2	6
IIIA	Fractura	3,9	4,55	15
IIIB	Fractura alterada portales	6	9	28
IIIB	Zonas de esfuerzo	15	15	100

5.8.2.3 Documento 3: Memorando de Diseño Geotécnico del Dique- PHEQ-DPLA-DOC-0180

- ***Exploración del Subsuelo***

La exploración del subsuelo corresponde a cuatro sondeos, uno realizado en la fase previa a dicho informe y tres más realizados durante los procesos de los diseños. Adicional a dichos sondeos se ejecutaron nueve (9) líneas de refracción sísmica[63]. De forma complementaria, y con el objetivo de caracterizas las unidades de roca en función de sus características hidráulicas, se realizaron ensayos de permeabilidad por el método Lugeon; al igual que sucedió con las líneas de refracción sísmica, no se presentan los soportes de la ejecución de dichos ensayos, solo se muestran los resultados obtenidos.

- ***Análisis y Cálculos Realizados***

La estructura foco de estudio correspondió al Dique Auxiliar, que junto con la presa, represan el agua del río Magdalena y forman el embalse. Dicha estructura corresponde principalmente en la disposición de materiales granulares compactados, en el centro de los cuales se encuentra un material cuyas propiedades hidráulicas limitan el flujo de agua a través de ella generando una zona donde el nivel freático generado por la tabla de agua se ver mermado, haciéndolo descender hasta alcanzar los filtros de la parte baja. En función de estas características el estudio debido dar respuesta a las siguientes condiciones:

- Análisis de la capacidad portante del suelo de fundación y cuantificación del factor de seguridad en función de las cargas esperadas tras la disposición de los materiales que conformarán el dique.
- Análisis de las presiones de poros que se generarán producto del flujo de agua a través de la estructura, indicando los límites permisibles y la instrumentación necesaria para la verificación de los mismos.
- Análisis de la estabilidad general del cuerpo del dique. Lo anterior debido a que la estructura estará conformada por materiales antrópico es necesario que se aseguren las propiedades de los materiales y que los mismos se analicen teniendo en cuenta los factores de seguridad mínimos esperados.
- Proponer la instrumentación necesaria para el seguimiento de la estructura propuesta, tipo de instrumentación, localización sugerida, intervalos de medidas, límites permisibles, y señales de alerta.

[63] En los documentos revisados no se encontraron los soportes ni las metodologías para la ejecución de dichos ensayos.

De las anteriores condiciones, el informe correspondiente no presenta análisis de la capacidad portante del subsuelo frente a las cargas esperadas. No presenta los análisis esfuerzo deformación, a saber, análisis de asentamientos inmediatos y debidos a las deformaciones típicas de los rellenos.

Dado que los análisis realizados deben obedecer a la determinación lógica y sistemática de los parámetros geomecánicos que en los modelos se utilizan, el informe adolece de la información necesaria para llegar a las conclusiones finales si a parámetros geomecánicos se refiere, debido a que:

- No se realizan ensayos a muestras inalteradas (ensayos triaxiales)
- No se analiza la resistencia al corte en discontinuidades
- No se realizan ensayos para la determinación de los parámetros de los materiales que conformarán la presa. El estudio en cuestión se fundamenta sobre información secundaria, bibliografía y descarta de tajo la obtención de parámetros reales de los materiales que conformarán el cuerpo del dique.

- ***Análisis de Estabilidad***

De acuerdo con la información disponible en el expediente ambiental, los análisis de estabilidad realizados sobre el cuerpo del dique se utilizan tres materiales, a saber:

TABLA 11. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PRESENTADOS EN EL INFORME PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL CUERPO DEL DIQUE

Material	Y(kN/m3)	C (kPa)	Phi(°)
Espaldones	22	Phi(°) = [30-45[64]]	
Núcleo	20	50	20
Roca	23	90	30

Las propiedades que se presentan en la anterior tabla corresponden a las propiedades de la unidad de roca sobre la cual se cimentará la estructura. Dichos parámetros fueron producto de los ensayos de campo y de laboratorio que sobre dichas muestras se realizaron. No obstante lo anterior, los valores de cohesión y ángulo de fricción para el cuerpo del dique fueron adoptados, es decir, no se realizaron ensayos para validar la información consignada en la bibliografía mencionada en el informe.

En concordancia con lo anterior, usando dichos parámetros se obtuvo el valor del factor de seguridad para tres casos o escenarios. El primero de ellos para la etapa final de construcción, donde no se analiza la influencia del sismo ni del agua sobre la estructura. El segundo caso corresponde al análisis del desembalse rápido. El último caso analizado es bajo la influencia del sismo. Los valores del factor de seguridad obtenidos para el Dique se presentan a continuación.

TABLA 12. FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS PARA LA ESTABILIDAD DEL DIQUE

Caso	Tabla de Agua Arriba	Tabla de Agua Abajo

[64] El informe relaciona estos datos a la tabla 7-6 donde en función de los esfuerzos normales arrojan un valor de ángulo de fricción que varía entre 30 y 45°.

Final de Construcción	1,75	1,93
Desembalse Rápido	1,24	1,51
Con Sismo	1,00	1,01

Ya que en los análisis del factor de seguridad no se presentan las propiedades finales utilizadas en los modelos, se construyó un modelo siguiendo los planos anexos a dicho informe. El modelo usa los mismos parámetros presentados en el informe, pero respecto a las propiedades de los espaldones, se usa 30° como media y se hace variar dicho valor formando una curva que unifica el valor del factor de seguridad. Se analiza el factor de seguridad obtenido teniendo en cuenta lo siguiente:

- Se analizan 50 000 superficies de falla circulares en cuyo caso se selecciona la que menor factor de seguridad arroja.
- Habiendo elegido la superficie de falla crítica se hace variar el valor del ángulo de fricción de los espaldones, partiendo de 30° hasta 45°.
- El análisis se repite para el espaldón aguas arriba y aguas abajo.
- El agua se simula como una lámina de agua estática.
- Se analizan cuatro condiciones o escenarios: Sin Agua y Sin Sismo, Sin Agua y Con Sismo, Con Agua y Con Sismo.

Los valores del factor de seguridad obtenidos se presentan a continuación:

TABLA 13. VALORES DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDOS PARA EL PRESENTE ANÁLISIS[65]

Condición	Aguas Arriba		Aguas Abajo	
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo
Sin Agua-Sin Sismo	1,4	2,4	1,5	2,5
Sin Agua-Con Sismo	0,9	1,6	0,9	1,5
Con Agua-Con Sismo	0,9	1,6	0,7	1,2

De lo anterior se puede observar que es necesario que se analicen las propiedades de los materiales que actualmente conforma el Dique, toda vez que la variación del factor de seguridad es significativa para cada caso propuesto en los diseños.

5.8.3 Análisis de las condiciones actuales de obra y requerimientos mínimos necesarios para el correcto funcionamiento

El proyecto hidroeléctrico El Quimbo corresponde una obra de gran envergadura. Su área de influencia no solo se limita al área correspondiente al embalse, sino también a todas las zonas que podría afectar si no funcionara de forma correcta.

Por lo anterior es que se hace necesario que en cualquier situación previsible el proyecto sea seguro y su estabilidad, en ningún caso, se vea comprometida. Siguiendo estos lineamientos, el proyecto debió cumplir a cabalidad con los requerimientos mínimos que la normativa vigente solicitaba, sin que éstos los limitara para la ejecución de análisis adicionales, si la complejidad y el nivel de importancia del proyecto así lo requerían.

[65] Los valores acá dispuestos son el producto de los análisis realizados por el equipo de trabajo a cargo de la revisión de los estudios. Los soportes se presentan en el anexo correspondiente a la revisión del documento con código **PHEQ-DPLA-DOC-0180**

En términos generales el proyecto está conformado por cinco (5) grandes obras que en su conjunto son la esencia del proyecto hidroeléctrico y que el mal funcionamiento de alguno de estos elementos pondría en grave riesgo el funcionamiento del Quimbo. Las obras se enumeran a continuación:

- Cuerpo de Presa. Presa tierra con núcleo impermeable con cara de concreto
- Dique auxiliar hecho de tierra con núcleo impermeable
- Túneles de Descarga de Fondo y de Captación y direccionamiento hacia la casa de máquinas

5.8.3.1 Cuerpo de presa de tierra y núcleo impermeable

El cuerpo de la presa comprende lo que sería la obra más importante del complejo hidroeléctrico El Quimbo. Es por tal motivo que se tienen que tener en cuenta las siguientes condiciones para que se asegure su estabilidad y correcto funcionamiento.

En los numerales anteriores, más específicamente en el numeral donde fue analizado el capítulo de Geotecnia del EIA se mostró que para toda la obra se realizaron solamente 16 sondeos que permiten inferir una deficiencia en la caracterización de los materiales.

En el numeral de geotecnia no se mencionan ensayos regionales para la caracterización de acuíferos ni modelos detallados de flujo de agua subterránea. Solo se mencionaron ensayos puntuales y sobre ciertas unidades específicas.

Esto deja ver que no se conoce el flujo de agua bajo el cuerpo de presa ni como éste puede afectar la estabilidad de la misma.

La presa como cualquier obra de infraestructura debe cumplir con tres análisis primarios. El primero de ellos correspondiente a la capacidad portante de los materiales de fundación, el segundo corresponde a los análisis de estabilidad que sobre el cuerpo de la presa se deben realizar, se debe asegurar que los factores de seguridad para la presa se ajusten a las condiciones sismotectónicas de la zona. El tercer análisis es el correspondiente a la cuantificación de deformaciones que se deben tolerar debido a las cargas generadas por el embalse y debido a las fuerzas dinámicas que de forma natural se pueden presentar.

Sumado a lo anterior, y siendo que esta condición en particular es la base del estudio de los embalses, se debe evaluar el flujo de agua subterránea bajo el cuerpo del embalse y dentro del cuerpo de presa, ambos factores con el objetivo de descartar procesos como el de tubificación.

En el estudio de impacto ambiental se menciona el estudio detallado de amenaza sísmica que para el proyecto se realizó, en este se define un valor de aceleración Aa que deberá ser adoptado en los diseños y que corresponde al periodo de retorno recomendado para asegurar la estabilidad de la presa.

5.8.3.2 Dique auxiliar de tierra y núcleo impermeable

De forma similar a los comentarios realizados para la estructura de presa, el dique auxiliar debe corresponder a una obra con las más altas especificaciones.

Tomando las descripciones de geometría que en el EIA se encuentran, se realizó una simulación de la estabilidad del cuerpo del dique. El modelo usa los mismos parámetros típicos, ya que en el EIA no se presentan, pero respecto a las propiedades de los espaldones, se usa 30° como media y se hace variar dicho valor formando una curva que unifica el valor del factor de seguridad. Se analiza el factor de seguridad obtenido teniendo en cuenta lo siguiente:

- Se analizan 50 000 superficies de falla circulares en cuyo caso se selecciona la que menor factor de seguridad arroja.
- Habiendo elegido la superficie de falla crítica se hace variar el valor del ángulo de fricción de los espaldones, partiendo de 30° hasta 45°.
- El análisis se repite para el espaldón aguas arriba y aguas abajo.
- El agua se simula como una lámina de agua estática.
- Se analizan cuatro condiciones o escenarios: Sin Agua y Sin Sismo, Sin Agua y Con Sismo, Con Agua y Con Sismo.
- Respecto a la aceleración sísmica se utilizó un Aa de 0.2 g

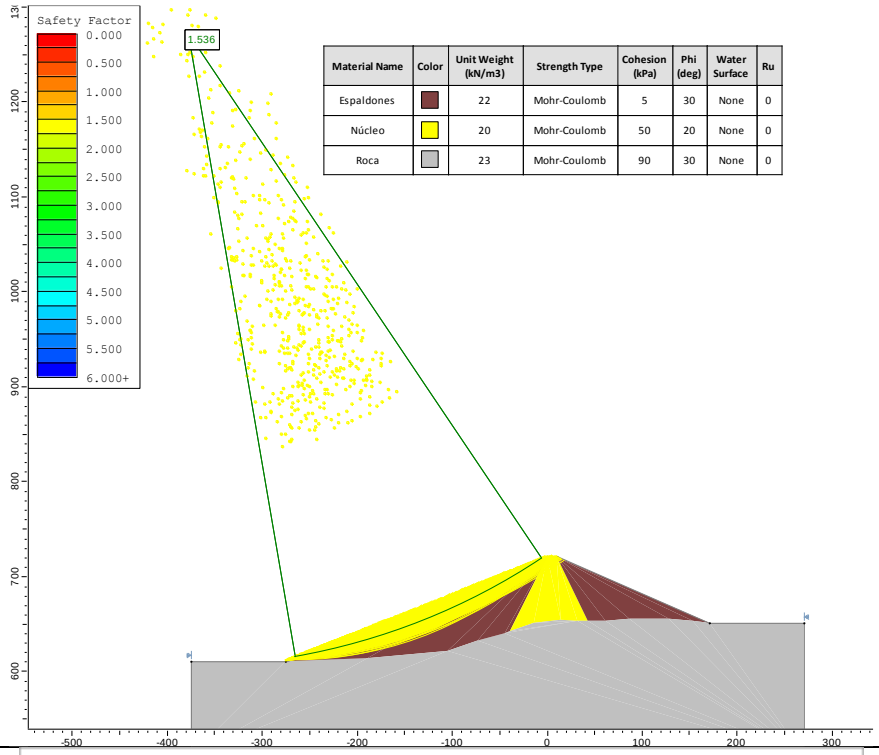
Los valores del factor de seguridad obtenidos se presentan a continuación:

TABLA 14. VALORES DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDOS PARA EL PRESENTE ANÁLISIS (ESTE TRABAJO)

Condición	Aguas Arriba		Aguas Abajo	
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo
Sin Agua-Sin Sismo	1,4	2,4	1,5	2,5
Sin Agua-Con Sismo	0,9	1,6	0,9	1,5
Con Agua-Con Sismo	0,9	1,6	0,7	1,2

De lo anterior se puede observar que es necesario que se analicen las propiedades de los materiales que actualmente conforma el Dique, toda vez que la variación del factor de seguridad es significativa para cada caso propuesto, es de vital importancia que se realicen ensayos de campo para la cuantificación de las propiedades de los materiales y la validación de los modelos de estabilidad.

Los modelos analizados se presentan en las siguientes figuras:



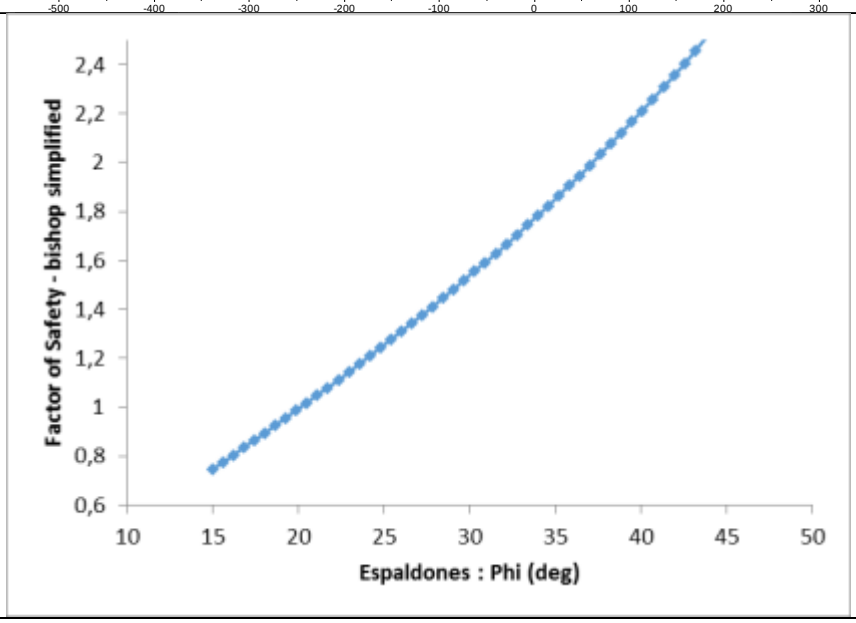
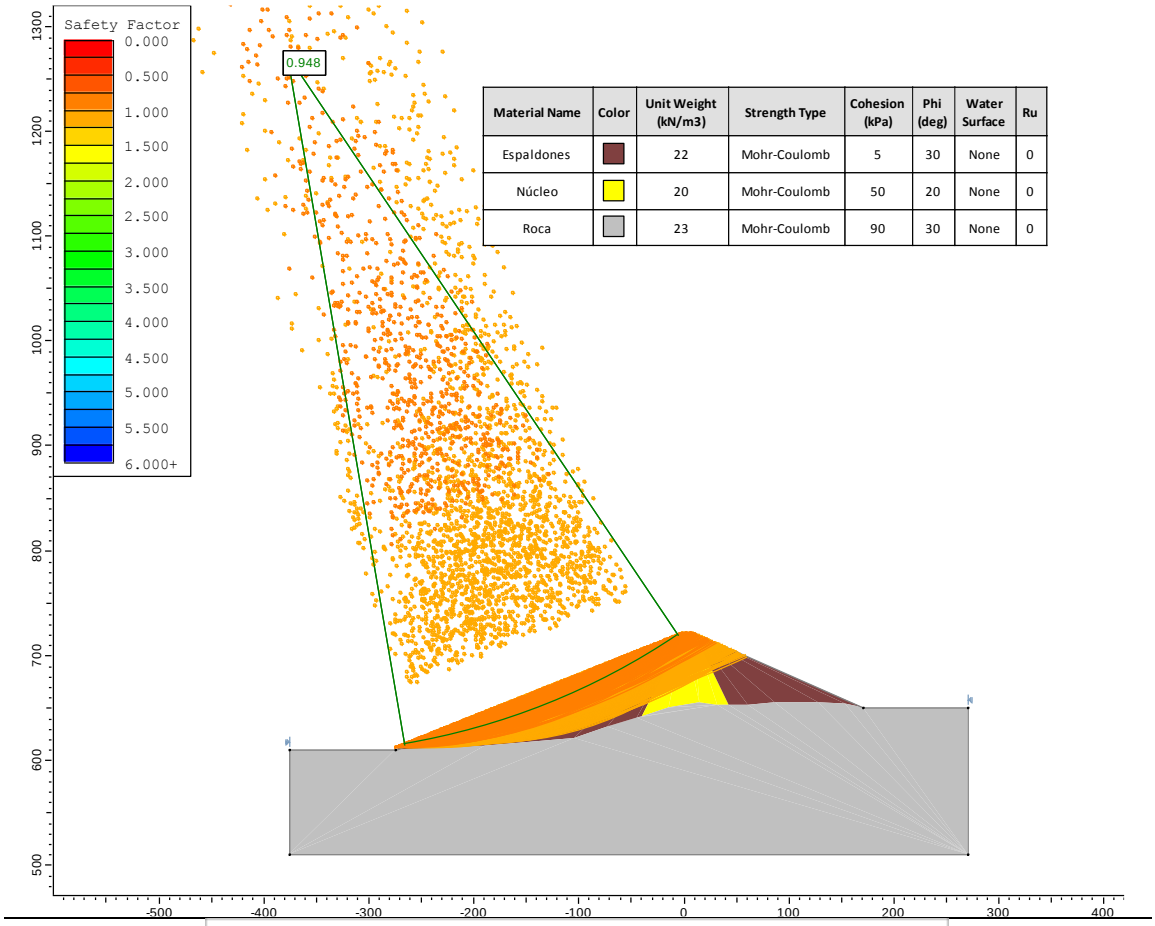


FIGURA 22. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ARRIBA – ANÁLISIS SIN AGUA Y SIN SISMO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



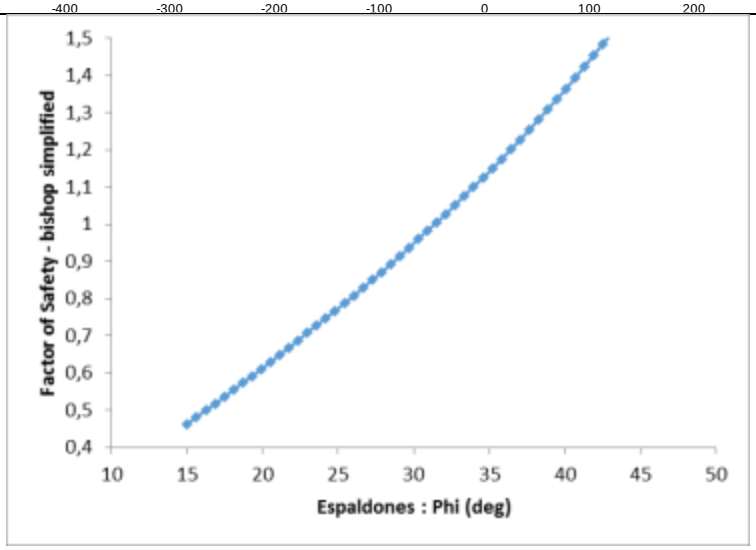
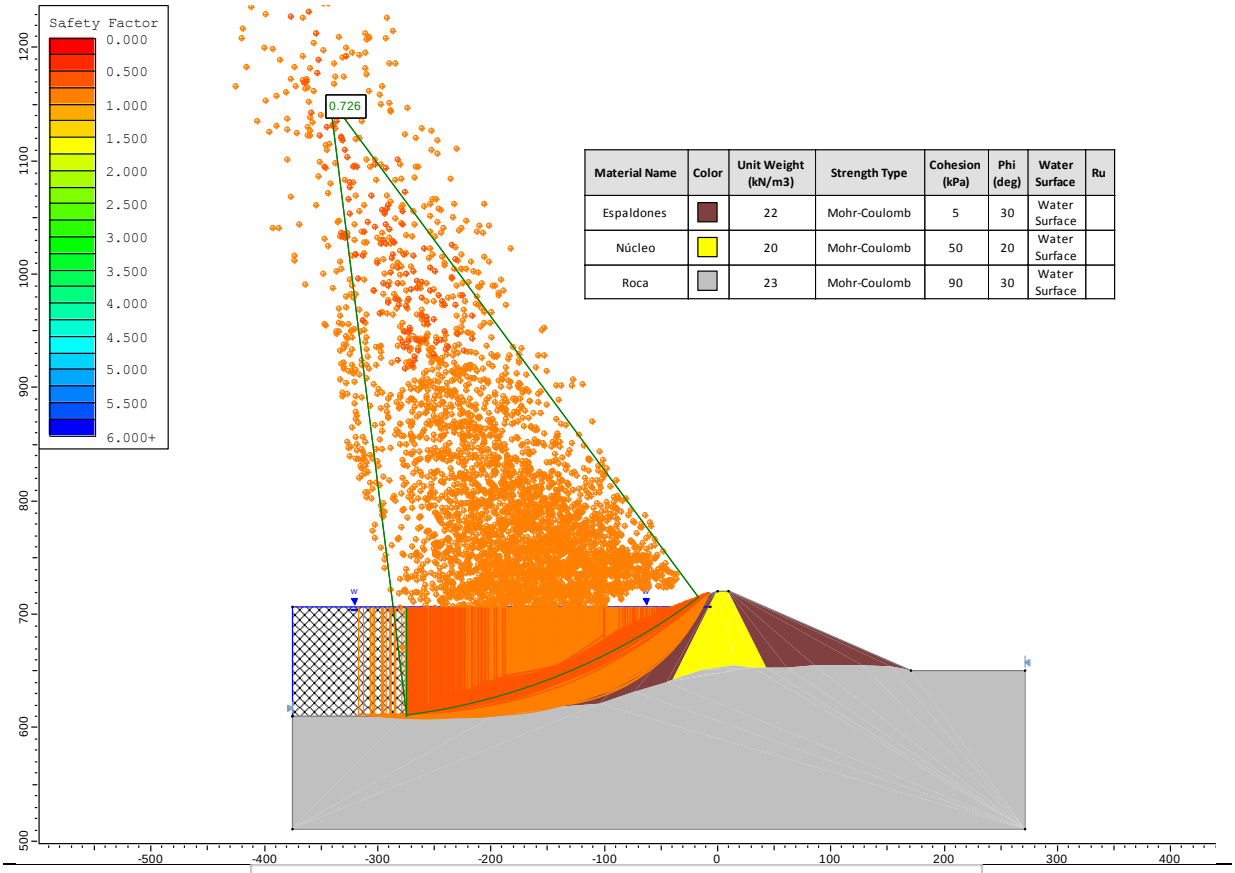


FIGURA 23. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ARRIBA – ANÁLISIS SIN AGUA Y CON SISMO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



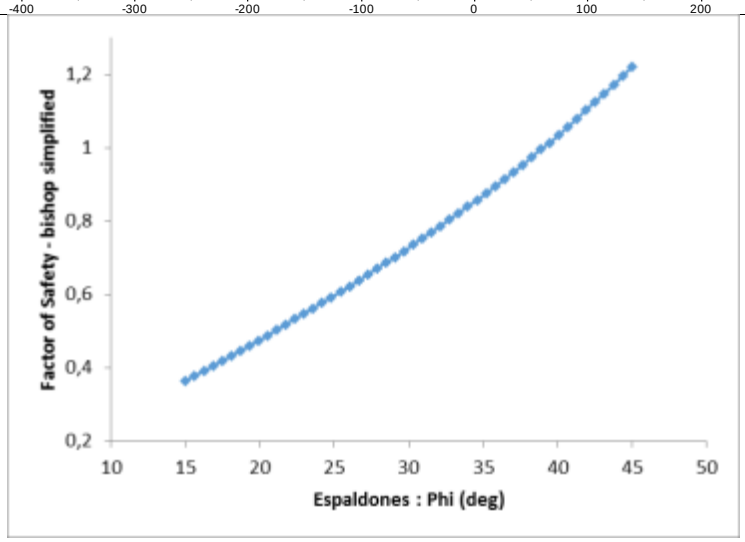


FIGURA 24. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ARRIBA – ANÁLISIS CON AGUA Y SIN SISMO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

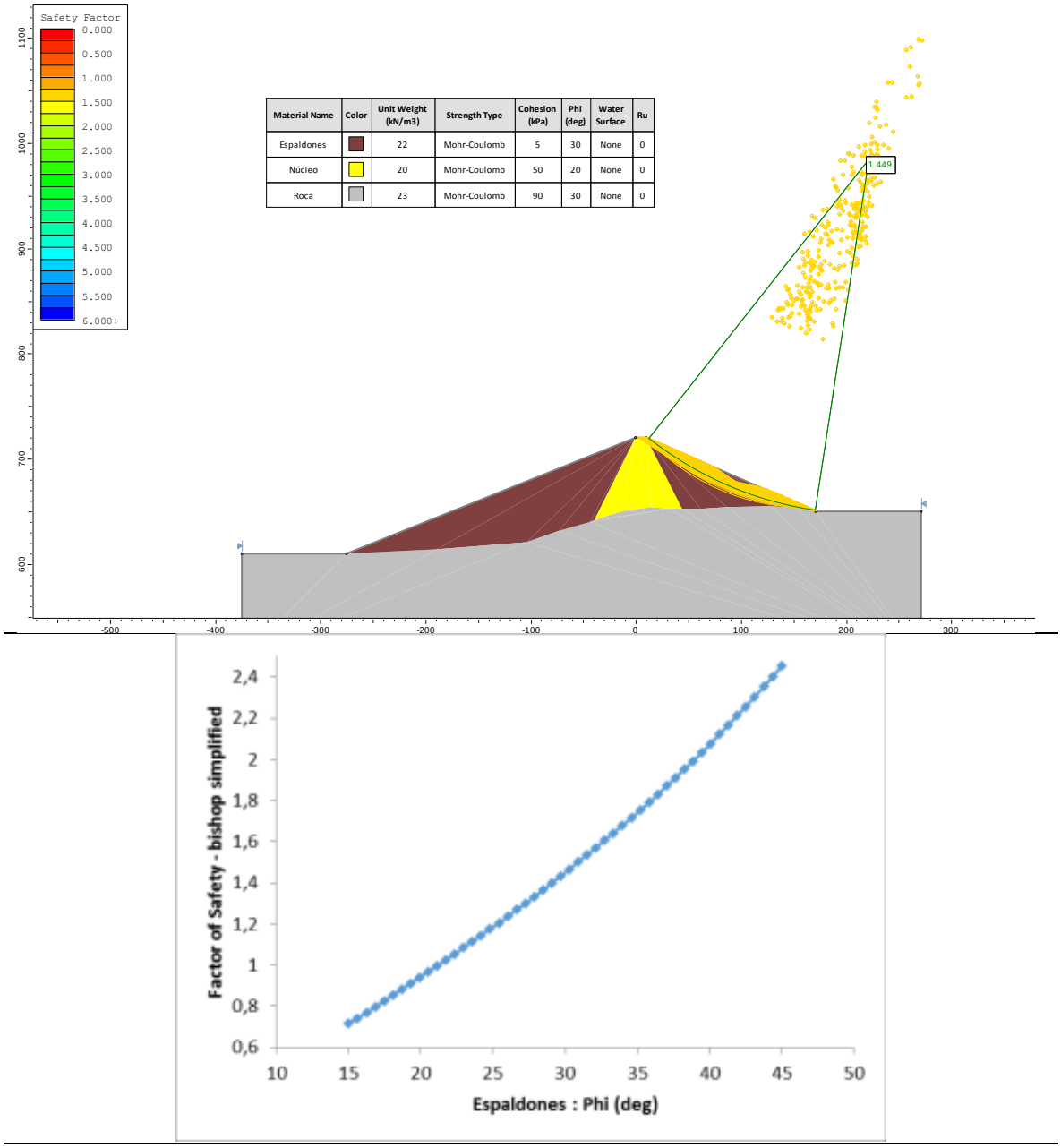
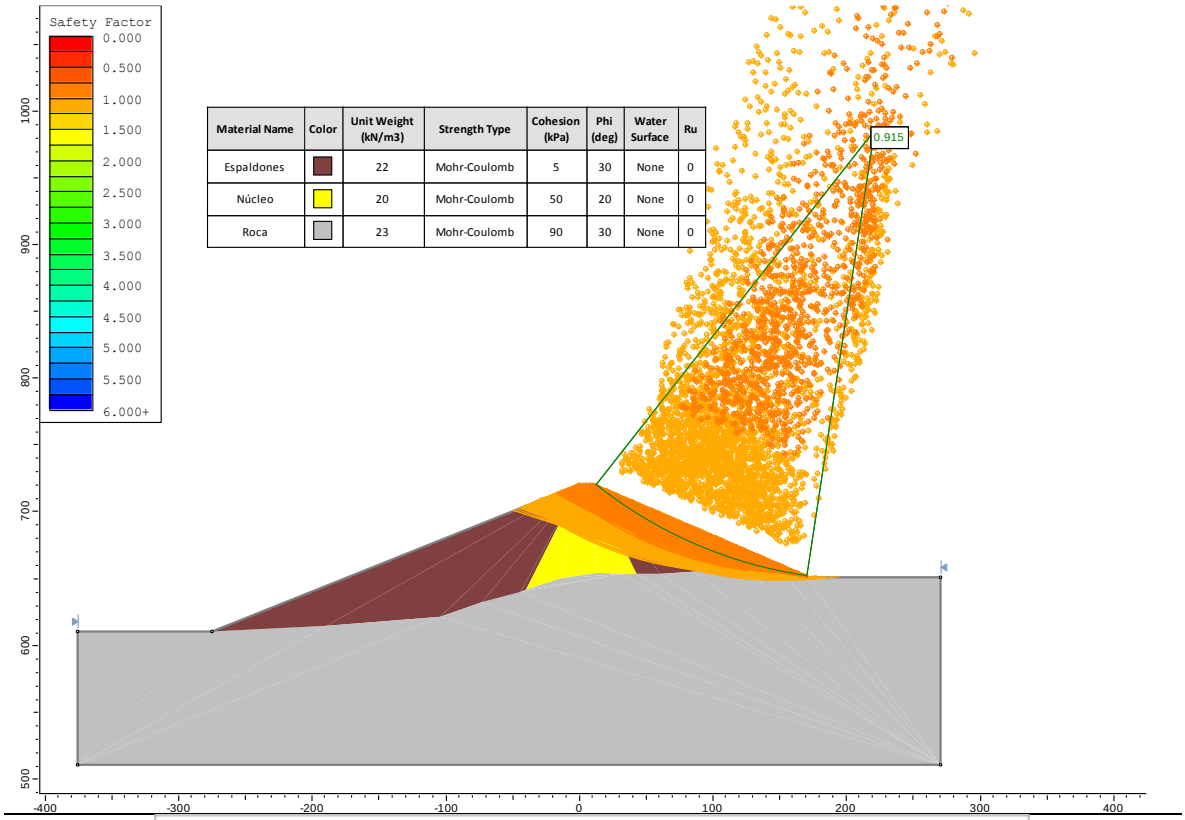


FIGURA 25. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ABAJO – ANÁLISIS SIN AGUA Y SIN SISMO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



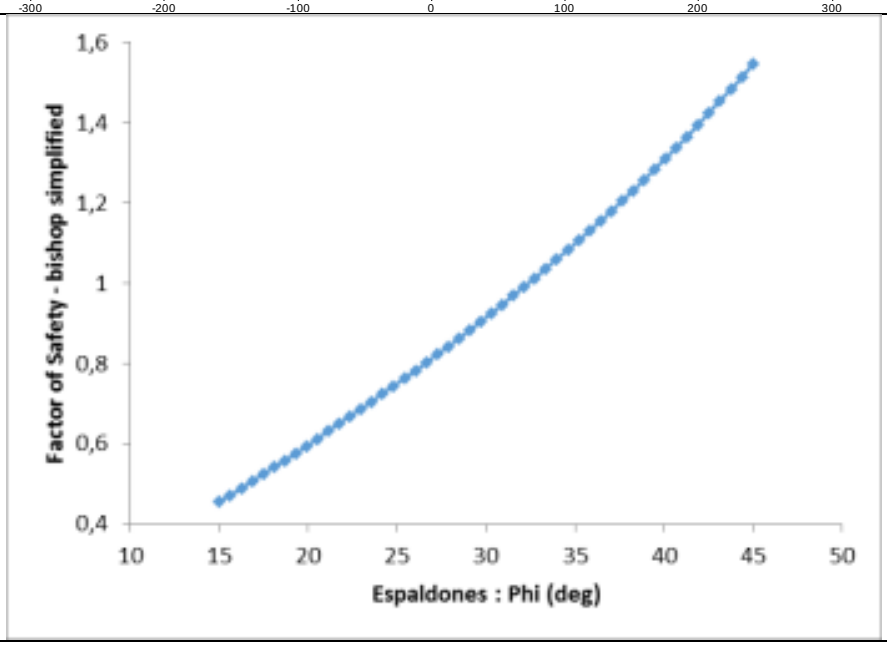


FIGURA 26. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ABAJO – ANÁLISIS SIN AGUA Y CON SISMO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

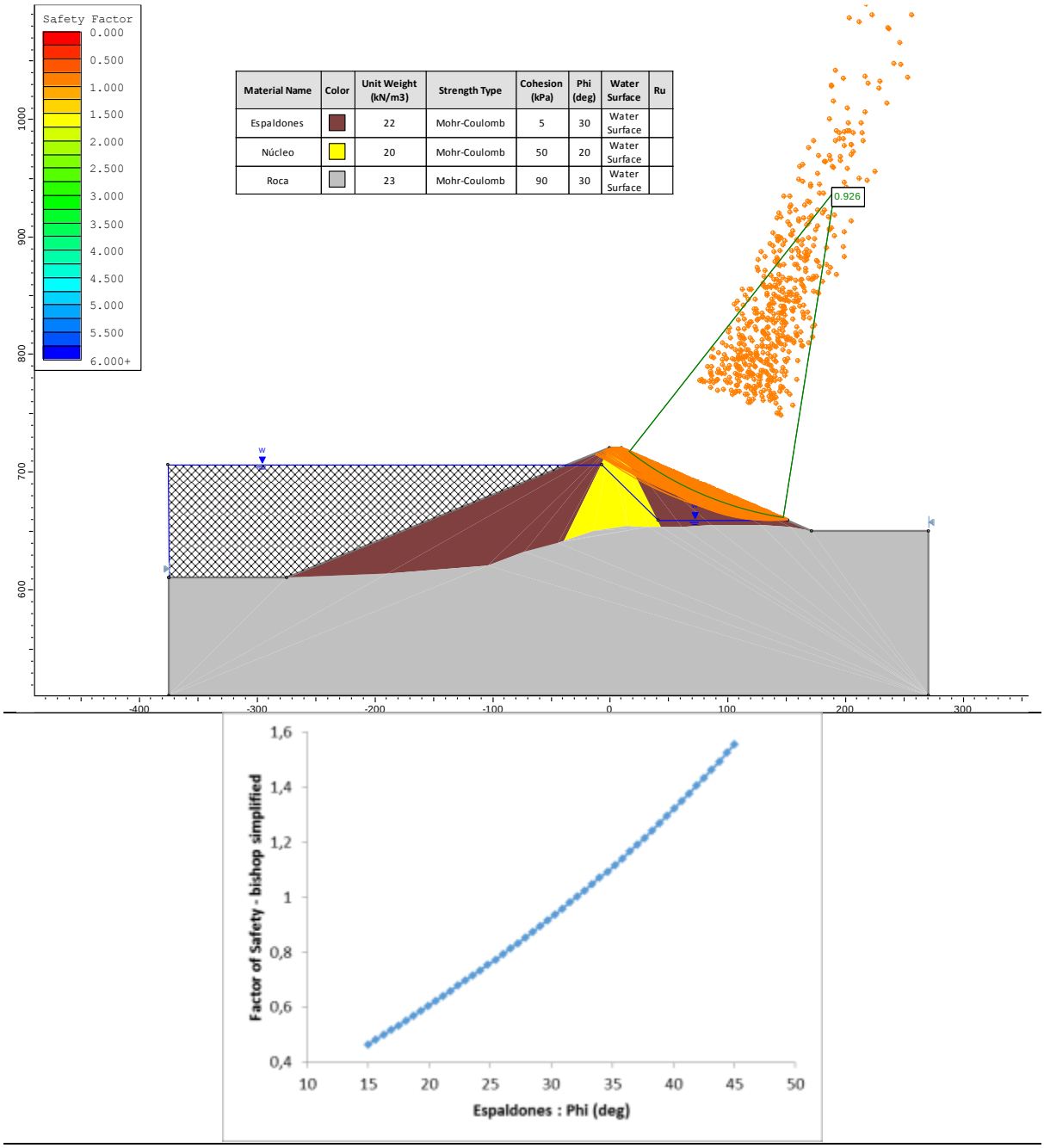


FIGURA 27. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DIQUE AUXILIAR – CARA AGUAS ABAJO – ANÁLISIS CON AGUA Y CON SISMO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Teniendo en cuenta los cálculos realizados, se puede observar que para una aceleración de 0,2 g y con los parámetros promedio mencionados en los informes de diseño que se consultaron, la estructura del dique auxiliar podría verse comprometida en proceso de inestabilidad relacionados con los taludes que conforman la estructura.

En este sentido, a la fecha se han presentado dos eventos que comprometen la estabilidad del dique auxiliar.

El primer evento reportado ocurrió en el 2012. La ANLA se desplazó al sitio con especialistas para el estudio de la problemática. El documento ECO-0179-13 del 14 de marzo de 2013 describe parte de los hallazgos de la visita en cuestión que se realizó el 18 de julio de 2012.

La problemática asociada estaba relacionada con procesos de inestabilidad sobre unos taludes que se generaron y que debían retirarse para dar vía libre a la cimentación de la estructura.

FIGURA 28. PROBLEMAS EN LA CIMENTACIÓN DEL DIQUE AUXILIAR-MASA MOVILIZADA. CIMENTACIÓN DEL DIQUE AUXILIAR, CERCA AL EJE DEL DIQUE

El segundo evento registrado se presentó el 15 de septiembre del 2015 durante el proceso de llenado, el dique auxiliar presentó agrietamientos en las dos caras de la estructura. El documento No. Qd-ITE-16c-009 (Análisis de las fisuras del dique auxiliar), estudia los hallazgos relacionados con dicho evento. En el documento se evidencia que durante el llenado se presentaron fisuras en la cara aguas arriba (cara que da contra el embalse), éstas fisuras se presentaron en la zona media de los taludes. También hubo hallazgos de fisuras en la cara aguas abajo del embalse, una fisura longitudinal se extendió por varios metros en el costado oriental del dique.

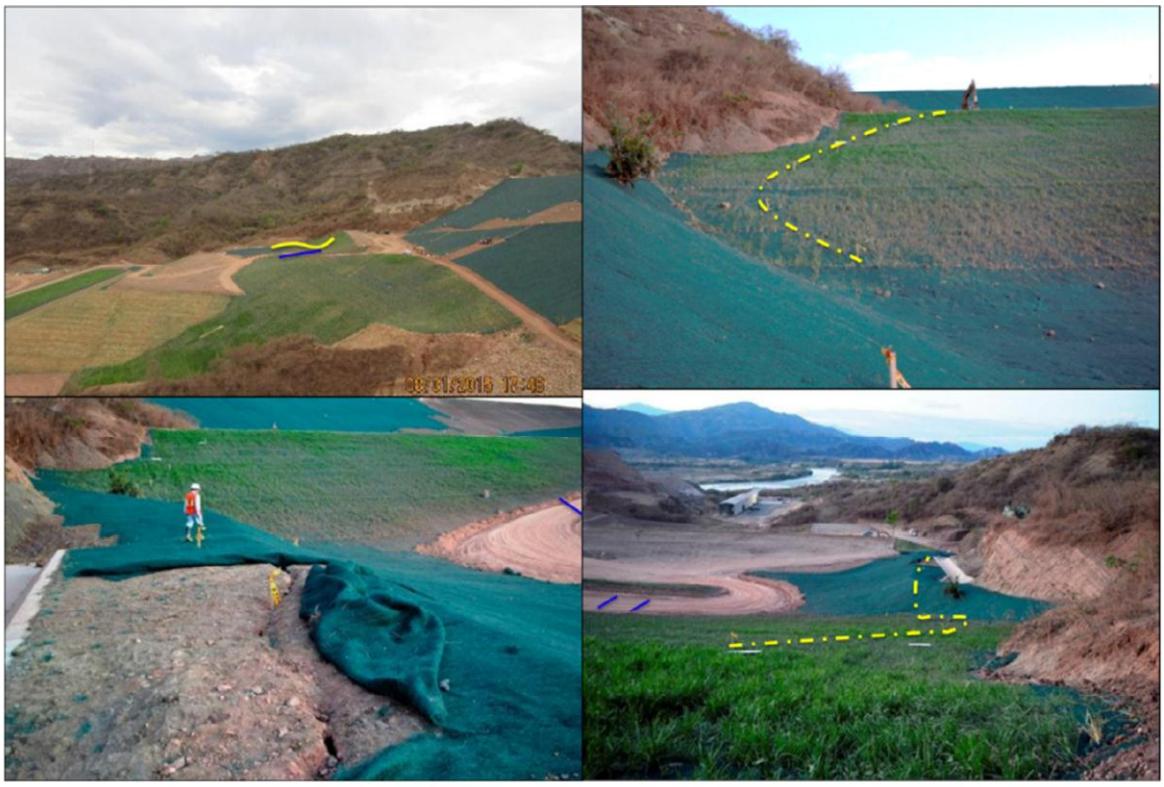


FIGURA 29. FISURAS LONGITUDINALES EN LA CARA AGUAS DEBAJO DEL DIQUE AUXILIAR-TOMADO DEL DOCUMENTO NO. QD-ITE-16C-009 –INGETEC-2015

Debido a que en la estructura se encuentra instrumentación que permite la evaluación de las deformaciones relativas. El estudio en cuestión reporta un asentamiento de la cara aguas abajo y sobre la cota 660 msnm pero no se presenta la información de la instrumentación en las cotas bajo este nivel. Adicional a los asentamientos, se presentaron deformaciones horizontales. Estas deformaciones fueron más evidentes en el espaldón contra el embalse y en el espaldón seco (en la zona donde se generaron las grietas longitudinales.

Lo anterior muestra la necesidad del seguimiento detallado de las deformaciones de la estructura, de los niveles piezométricos, del flujo de agua que se presente dentro de la estructura. Adicionalmente, de los comentarios realizados anteriormente sobre la ausencia de análisis de capacidad de carga en la zona del dique y ciertas salvedades respecto a los diseños presentados, se genera la necesidad de que se realice un estudio de detalle de las condiciones actuales de las estructuras de forma tal que se asegure su correcto funcionamiento.

5.8.4 Túnel de descarga de fondo y túnel de captación y conducción hacia la casa de maquinas

El túnel tiene una longitud de 488,68 metros, adicionalmente la obra requiere de una ventana de construcción de 51,24 metros. Las dimensiones del túnel corresponden al uso que se le va a dar y está en función de los requerimientos de caudal que se necesitan. Bajo estas condiciones, para el túnel de desviación se fijó un radio de excavación de 6,0 metros de altura con sección en herradura.

Debido a que la obra que se proyecta es de mayor complejidad, es necesario que se cumplan con las condiciones mínimas de estabilidad de las entradas y de la galería proyectada.

El presente capítulo recopila las características de la estructura a las que llega la consultoría. Dimensiones de las obras, geometrías adoptadas, consideraciones y recomendaciones finales.

Hay tres análisis que debieron ser considerados para el dimensionamiento final de las estructuras propuestas. El primero correspondiente al flujo de agua subterránea tras la apertura de la galería y en el mismo sentido, el flujo de agua tras el llenado del embalse. El segundo análisis consistió en la determinación de las posibles fallas que se podrían generar y las deformaciones esperadas tras la construcción de las obras requeridas. El último es relacionado con los portales, estos portales deberán ser protegidos para evitar cualquier proceso de inestabilidad que pueda afectar el túnel.

En los documentos correspondientes al estudio de impacto ambiental, no se tocan los temas relacionados con las afectaciones a acuíferos debido a estas excavaciones que se generaron. Estas estructuras deberían asegurar la estanqueidad de las paredes que lo conforman, de forma tal que no se generen flujos preferentes ni hacia adentro de los túneles ni hacia afuera de las obras.

5.8.5 Presa de tierra y enrocado con cara de concreto

En los documentos consultados no se encontraban los diseños geotécnicos del cuerpo principal de la presa. No se encontraron las características de los materiales que deberían disponerse, no se encontraron análisis de flujo interno de agua ni de estabilidad de la estructura. Debido a que no se tuvo acceso a dichos estudios no se pueden realizar aseveraciones al respecto.

No obstante lo anterior, ha habido evidencias que se presentan a continuación se generan ciertas inquietudes que se considera pertinente sean aclaradas.

- Título: Filtraciones Quimbo

Fecha: 7 sep 2015

Enlace: https://www.youtube.com/watch?v=6gWBfebbnEM

Descripción: En el video se realiza un paneo por la cara aguas debajo de la presa en la parte baja. En el minuto 0:31 se muestran filtraciones que presuntamente vienen desde el

cuerpo de la presa. Nuevamente, en el minuto 1:34, y en otro punto de la parte baja de la presa, se muestra una filtración de agua, el caudal que se observa no se puede determinar a simple vista, pero es el que correspondería a una pequeña quebrada.

- Título: Filtraciones en presa son normales durante el proceso de llenado

Fecha: 4 sept 2015

Enlace: https://www.youtube.com/watch?v=_sKtdIvR_ug&t=3s

Descripción: A continuación se presenta la transcripción del video

> *"Soy Luis Bustamante, director técnico del proyecto El Quimbo. Estamos en el sitio de la presa, al frente de la capa de drenaje de filtraciones con que está diseñado este proyecto, el tipo de material con que fue construido es exactamente para que funcione como un filtro y capte toda el agua que puede pasar a través de la capa de concreto o de las demás zonas con que está construida la presa. Esto fue hecho ex profeso así y es parte del diseño para todas las filtraciones que se pueden esperar como en cualquier presa, porque no hay presas que no tengan filtraciones, lo importante aquí es tener las filtraciones dentro de lo que está dentro del proyecto, aquí se construirá un muro en CCR, que a su vez tendrá unos drenajes para captar esta agua y hacerla pasar al río, vamos a tener 35 tubos de 9 pulgadas que conducirán toda el agua que salga a través de la capa filtrante. Hoy día tenemos un volumen, un caudal muy por debajo de lo proyectado, lo cual no representa ningún riesgo y está dentro de lo previsto en esta y cualquier otra presa".*

De lo anterior:

Los caudales observados en el video no pueden ser considerados, bajo ninguna circunstancia, despreciables. Las presas de tierra y enrocado con cara de concreto se proyectan en principio como estructuras con bajos niveles de agua fluyendo en su interior. La cara de concreto, el plinto en su parte baja y el núcleo de arcilla deben asegurar en su conjunto que no se presenten caudales de éstas magnitudes.

Destacando nuevamente que se desconocen las propiedades específicas de los materiales de fundación y los que conforman el cuerpo de la presa. Estas filtraciones pueden tener tres posibles orígenes.

- El primero de ello está relacionado con filtraciones por la cara de concreto de la presa. Observando con la velocidad que sale el agua, esto podría está asociado con problemas en el núcleo impermeable.
- El segundo es relacionado con un mal manejo de la infiltración en la fundación de la estructura. Como se mencionó en los numerales de geología y parte en el de geotecnia, la estratificación e intenso fracturamiento de la roca podría ser un detonante a éstos procesos.
- El tercero es que se haya generado flujo entre la interfaz de la presa y la cimentación.

Cualquiera de las anteriores afirmaciones implica un estudio detallado del problema y una verificación con instrumentación que permita evaluar las implicaciones. Es claro que lo consignado en el video no es suficiente, no se tienen datos de los caudales esperados ni de los reales medidos.

5.9 AMENAZA VOLCÁNICA

Según la información presentada en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), el área del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo (PHEQ) se puede ver afectada por la actividad de cinco volcanes: Cerro Nevado Pan de Azúcar, Coconucos, Puracé, Nevado del Huila y Sotará, a su vez, en el documento se menciona que existen dos volcanes extintos (Cutanga y Chontilal), pero esta característica hace que no sean tenidos en cuenta a la hora de evaluar la amenaza volcánica asociada.

No obstante, de la revisión bibliográfica y siguiendo la descripción de la Memoria explicativa del mapa geológico del departamento del Huila[66], se puede establecer que las zonas de actividad volcánica reciente, ubicadas en cercanías al área del PHEQ además de incluir los ya mencionados Volcán Nevado del Huila y Sotará incluye a los Coconucos como una cadena volcánica que además de comprender los volcanes Pan de Azúcar y Puracé considerados en el EIA, se encuentra constituida por los volcanes Piocollo, Curiquinga, Calambás, Paletará, Quintín, Shaka, Killa, Machángara, Pukará y los conos adventicios Piki y Amancay (Velandia et al., 2001).

Respecto al Volcán Nevado del Huila, se afirma es el volcán que representa la mayor amenaza volcánica para el PHEQ, sin embargo también se menciona que en caso de presentarse una erupción y la posible generación de avalanchas, estas no ocasionarían alguna afectación en el área del proyecto, tal y como se indica a continuación:

> *"Por actividad volcánica la mayor amenaza para el proyecto El Quimbo la ejerce el volcán Nevado del Huila. Como en el caso del volcán Nevado del Ruiz, una erupción de este volcán traería consigo la fusión parcial o total de su casquete glaciar, generando avalanchas en el río Páez y sus afluentes de la cuenca alta, en forma similar a la avalancha del 6 de junio de 1994. Dicha avalancha descendería por el valle del río Páez hasta alcanzar el embalse de Betania, sin afectar como ya se indicó durante o después de su construcción la casa de máquinas del Proyecto El Quimbo."*[67] (Subrayado fuera del texto original).

Lo anterior no tiene coherencia alguna con lo mencionado más adelante en el mismo documento, en donde se afirma que una creciente o avalancha producida en el río Páez afectaría la casa de máquinas del proyecto, debido a la posible ocurrencia de un dique natural en el río Magdalena lo cual conllevaría al aumento del nivel del río aguas arriba. Dicha afirmación se presenta en el ítem de "*Crecientes y avalanchas en el sector de los ríos Páez y la Plata*"[68]*:*

> *"Se debe considerar que debido a una avalancha producida en el río Páez esta puede crecer un dique natural sobre el río Magdalena, produciendo el aumento del*

[66] Velandia, F., Núnez, A., Marquínez, G. (2001). Mapa geológico del departamento del Huila – Memoria explicativa. INGEOMINAS. Bogotá D.C., 2001.
[67] EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 15.
[68] EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 16.

nivel de este río y su consecuente inundación hacia aguas arriba. Esto conlleva a que la zona de la casa de máquinas se vea afectada por esta situación."

Lo anterior, se relaciona con lo reportado por Velandia *et al.,* 2001, en donde se hace mención a los flujos de escombros y lahares que descendieron por los ríos Símbola y Páez hasta alcanzar el río Magdalena. En el mismo documento el autor cita a Pulgarín & Correa (1997) quienes describen un depósito de avalancha de escombros producido por el colapso del edificio volcánico que descendió por el río Páez hasta alcanzar el valle del Magdalena. Estos eventos dan idea del alcance de la actividad volcánica en el valle del río Magdalena, factor que bien podría afectar la presa ubicada 1.300 m aguas arriba de la desembocadura del río Páez como es reportado en el EIA.

En cuanto a la evaluación de la amenaza volcánica asociada al Volcán Nevado del Huila, la primera cartografía fue generada por el INGEOMINAS en 1986 y posteriormente actualizada a su producto vigente en 1996 mejorado en 2007, donde se indica que las áreas expuestas corresponden a aquellas cercanas al edificio volcánico como tal y las zonas próximas al río Páez por donde podrían avanzar flujos de lodo y escombros a causa de la fusión de nieve y hielo como producto de una erupción (Figura 30).

En la imagen, se observa el mapa de amenaza volcánica potencial del Complejo Volcánico Nevado del Huila con y sin el embalse El Quimbo. Del diagrama se puede concluir que aunque el embalse no se superpone con la zona definida como de amenaza alta a lo largo del cauce del río Páez y el Magdalena aguas abajo y aguas arriba de la desembocadura del mismo, la presa se encuentra justo en el límite de amenaza alta en un mapa a escala regional. Por esta razón, la evaluación de la influencia de la actividad volcánica en el valle del Magdalena aguas arriba de la zona de construcción de presa debió y debe ser considerada dado el grado de incertidumbre de la misma y más aún cuando en la descripción de las zonas catalogadas como de alta amenaza, se incluyen los lahares en todas las direcciones de la pendiente.

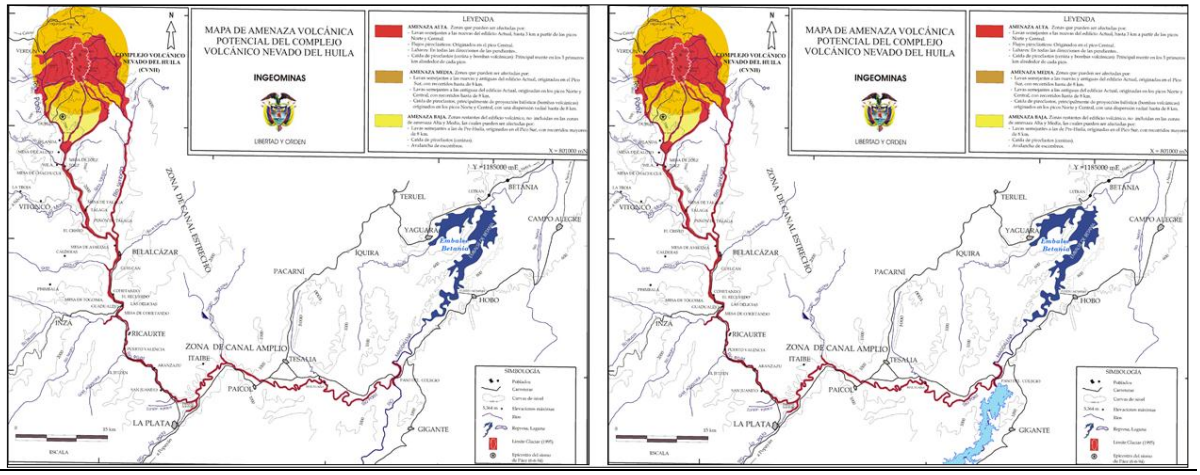


FIGURA 30. MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA POTENCIAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADO DEL HUILA**. EN EL DETALLE SE OBSERVA QUE LA ZONA DE PRESA ESTARÍA EN ZONAS DE AMENAZA ALTA.** FUENTE: WWW.SGC.GOV.CO

En el caso del Volcán Pan de Azúcar, el cual fue agrupado en el ítem de "*Volcanes Puracé, Pan de Azúcar y Coconucos"*, en donde toda lo escrito se centra en el Volcán Puracé, dejando de lado los otros dos, llama la atención la ausencia de la descripción del volcán Pan de Azúcar el cual, más adelante en el mismo ítem, se afirma es uno de los volcanes que tienen influencia directa sobre el río Magdalena:

> *"(…) El volcán Puracé hace parte de la Sierra de los Coconucos junto con los picos Paletará, Pan de Azúcar y Coconucos. (…) En el sector del río Magdalena tiene incidencia directa el volcán Sotará y el Pan de Azúcar constituyente del grupo de los Coconucos, descritos en el numeral anterior."*[69] (Subrayado fuera del texto original)

De esta manera, no se entiende por qué si este es un de los volcanes con mayor incidencia en el río Magdalena, en el documento no se presenta una mayor descripción de las características del mismo y su influencia en la zona del proyecto.

Sobre la cadena volcánica de los Coconucos, Monsalve & Pulgarín, 1999 en Velandia *et al.,* 2001[70], indican que corresponde a una cadena volcánica conformada por varios centros eruptivos la mayoría con actividad post-glaciar. Los volcanes de esta cadena son considerados como activos en estado de reposo, donde los centros de emisión del NW indican actividad de tipo explosivo mientras que en los del SE el predominio es de flujos de lava andesítica.

Respecto a la influencia de esta cadena en cercanías al proyecto hidroeléctrico, a partir de la revisión de unidades litológicas cartografiadas en la plancha geológica a escala 1:100.000 No. 366 - Garzón[71] que cubre la mayor parte de la zona de presa, se identifica al suroccidente y dentro de la zona de influencia indirecta del proyecto, el Lahar de Altamira (Qva) constituido por depósitos vulcano-sedimentarios e intercalaciones de

[69] EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 15.
[70] Velandia, F., Núnez, A., Marquínez, G. (2001). Mapa geológico del departamento del Huila – Memoria explicativa. INGEOMINAS. Bogotá D.C., 2001.
[71] Rodríguez, G., Ferreira, P., Velandia, F., Nuñez, A. (1998). Geología de la Plancha 366 Garzón. INGEOMINAS.

aluviones con un espesor máximo que puede sobrepasar los 100 m. La edad asignada por posición estratigráfica se considera superior a los 2 Ma (Velandia *et al.,* 2001).

En cuanto al origen del depósito, se propone fue generado por la actividad volcánica en la zona de los Coconucos en la parte alta de la Cordillera Central y posteriormente descendió por el ancestral valle del río Magdalena (Velandia *et al.,* 2001), razón por la cual la posible influencia de esta actividad volcánica en la zona de embalse debe y debía ser evaluada.

Respecto al Volcán Sotará, el cual corresponde a un volcán activo que tiene influencia sobre el PHEQ (como se resalta en repetidas ocasiones dentro del EIA), en el estudio se menciona que en caso de hacer erupción, no habría problemas en el proyecto por la emisión de lavas ni de material piroclástico y en el caso de generarse avenidas torrenciales estas llegarían solo hasta la cola del embalse. Sin embargo, por ningún lado se muestra con que fundamento ni basados en que modelamiento se dan estas afirmaciones[72]:

> *"En el volcán Sotará predomina la actividad efusiva sobre la explosiva, de manera tal que el área del proyecto no se vería afectada por emisión de lavas, pues éstas avanzarían unos de 10 km; caso similar ocurriría por la emisión de piroclastos, que afectaría tan sólo un área con radio aproximado de 20 km a partir del volcán. Sin embargo, si la erupción del volcán Sotará diera origen a avalanchas en los afluentes de la parte alta del río Magdalena, éstas llegarían tan sólo hasta la cola del embalse como ocurrió con el lahar de Altamira.*" (Subrayado fuera de texto original).

De la revisión bibliográfica, a este volcán en cuyos alrededores nace el río Majuas, afluente del río Magdalena, se asocian flujos de lavas, flujos piroclásticos, depósitos de caídas y lahares (Velandia *et al.,* 2001) y aun cuando a la fecha no se ha elaborado un mapa de amenaza volcánica, ni se conocen erupciones históricas asociadas a este, en Velandia *et al.,* 2001 se expone:

> "(…) *se piensa que una erupción de este volcán afectaría la cuenca más alta del río Magdalena, con formación de depósitos de piroclastos que pueden ser removilizados para dar origen a flujos de lodo y de escombros. Si esta situación se presenta, las zonas afectadas estarían próximas al río Magdalena. Las terrazas y depósitos pumíticos encontrados en el valle del río mencionado entre Quinchana y Tarqui, probablemente tienen este origen".*

De la revisión anterior, se puede concluir que dadas las contradicciones, ausencias e incoherencias en la información presentada en el EIA, la metodología usada para la evaluación de la amenaza volcánica es cuestionable, pues en ningún aparte del estudio se menciona, detalla ni explica en qué consiste ni cuáles son las variables utilizadas, así como los resultados obtenidos en un modelamiento de amenaza con y sin proyecto. Por otra parte, ante las incertidumbres que genera la información regional de amenaza del volcán del Huila, es necesario que Emgesa evalúe en escala detallada dicha amenaza.

[72] EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 15.

6 IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES IMPACTOS NEGATIVOS NO PREVISTOS EN LA LICENCIA AMBIENTAL

6.1 EVALUACIÓN DE IMPACTOS EN HIDROLOGÍA

6.1.1 Análisis de impacto alteración del clima

En este capítulo se analizara el impacto de alteración del microclima en los alrededores del embalse del Quimbo, aunque según el estudio de impacto ambiental para el Quimbo expresa que no se esperan alteraciones importantes del microclima en el área de influencia del proyecto, existen algunas incertidumbres y por ende inexactitudes en el análisis del impacto.

La jerarquización y cuantificación de impactos ambientales significativos, contempla como impacto ambiental la alteración del microclima en los alrededores del embalse donde se califica el impacto como 0,06 (muy bajo), en conclusión "No se espera que se presenten alteraciones del clima en los alrededores del embalse, con base en la experiencia de Betania*."*

A dicho requerimiento, EMGESA – INGETEC (2008) señalan lo siguiente:

> "*Alteración del microclima en los alrededores del embalse: Con base en el análisis de variables climáticas (temperatura, precipitación y evaporación), realizados en períodos anteriores y posteriores a la operación del embalse Betania en la estación Rosales, localizada a aproximadamente 3 kilómetros del embalse, no se encontraron variaciones en los valores medios mensuales, que permitan afirmar que la presencia de este cuerpo de agua ha modificado estas variables a la distancia en que fueron registradas. Razón que permite decir que el embalse El Quimbo no provocaría alteraciones diferentes a las que ha provocado Betania en las variables climáticas*. Sin embargo *A nivel de microclima en el borde del embalse es posible que se presenten en una franja estrecha incrementos en los valores actuales de evaporación y amortiguación de los valores de temperatura que seguramente no excederán las décimas de grado*"

Para efecto del análisis que se comenta en el párrafo anterior se tuvo en cuenta series históricas desde 1974 hasta 1986 (Antes del proyecto Betania) y series desde 1987 hasta 2006 (Después del proyecto Betania), adicionalmente se evaluaron los mismos factores para la estación Sevilla Cod. 2102502 la cual dista 100km del área de influencia de Betania donde, (EMGESA - INGETEC 2008) concluye que el cambio de dichos factores no es representativo para afirmar que existió alteración en el microclima en los alrededores de Betania.

Sin embargo esta metodología para estimar o predecir un posible cambio micro climático en el Quimbo deja atrás aspectos importantes como la posible generación de Gases Efecto Invernadero GEI los cuales está demostrado tienen una relación directa con el comportamiento de la temperatura y la precipitación. En adición a lo anterior los grandes

reservorios de agua tienen la capacidad de almacenar calor por lo cual los embalses tienen tendencia a generar temperaturas extremas (IJWREM, 2012)[73].

Conjuntamente e introduciéndonos en el contexto del Quimbo estudios recientes muestran que la descomposición anaeróbica de biomasa en un reservorio de agua está directamente ligado a la producción de dióxido de carbono y metano (aclarando que este último es 21 veces más perjudicial para la atmosfera que el dióxido de carbono) donde estos son liberados a la atmosfera cuando el agua es liberada por las turbinas y los vertederos, además se ha descubierto que la producción de GEI es mucho más alta en regiones tropicales que en regiones boreales (IJWREM, 2012)[74]. A manera de ejemplo se citan las emisiones reportadas por embalses en Panamá, Brasil y Guyana Francesa donde se midieron en promedio 3500 mg CO_2 y 300 mg CH_4 m^2/día (Pu Wang, Shikui Dong James P. Lassoie, 2013)[75].

Es importante mencionar que aunque Betania es una aproximación inicial para la evaluación de la alteración del microclima en el Quimbo, esta evaluación deja gran incertidumbre ya que los dos proyectos son escenarios diferentes en lo que a este impacto se refiere.

6.1.2 Plan de manejo del impacto y recomendaciones al PMA

> *"Para el monitoreo de este impacto se plantea la toma de registros y análisis de variabilidad climática que establezcan las condiciones presentes en el área de influencia del embalse antes de la construcción del proyecto, durante la implantación de las obras y en la operación del mismo. Instalación de seis estaciones automáticas de registro de variables climatológicas, que permitan la medición de las siguientes variables: Temperatura, precipitación, humedad relativa, evaporación, dirección y velocidad del viento y brillo solar."*

Considerando lo expuesto anteriormente y el grado de importancia que se evidencia en cuanto a la producción de GEI en los grandes reservorios de agua, es importante monitorear las concentraciones de CO_2 y CH_4 en las inmediaciones del embalse.

Adicionalmente en cuanto a clima se refiere se sugiere considerar los Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100, expuestos por la Tercera Comunicación de Cambio Climático donde se estima el aumento de precipitaciones y temperaturas para la región como se muestra en la (Figura 30). Valores cuya afectación en el ciclo hidrológico son de gran relevancia durante la duración la vida útil del proyecto (2015-2065).

[73] IJWREM, (2012), HYDROLOGICAL IMPACTS OF DAMS, Volume 3, Number 1.
[74] IJWREM, (2012), Hydrological impacts of dams: A review, IJWREM: Volume 3, Number 1.
[75] Pu Wang · Shikui Dong James P. Lassoie, (2013). "The large dam dilemma" An Exploration of the Impacts of Hydro Projects on People and the Environment in China.

Huila	0,8	16,52	1,4	17,74	2,1	17,24
La Guajira	0,9	-14,50	1,6	-16,57	2,3	-20,02
Magdalena	1,0	-18,65	1,7	-20,83	2,4	-23,24
Meta	0,9	-7,46	1,7	-5,68	2,4	-3,89
Nariño	0,7	13,69	1,4	13,42	2,1	12,03
Norte de Santander	0,9	1,00	1,7	0,21	2,6	-0,35
Putumayo	0,8	4,45	1,5	6,73	2,2	6,74
Quindío	0,8	6,34	1,5	12,20	2,3	24,28

FIGURA 31. TABLA DE RESUMEN DE CAMBIO CLIMÁTICO DEPARTAMENTALES 2011-2100. FUENTE: MODIFICADO DE NUEVOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA COLOMBIA 2011-2100, 3RA COMUNICACIÓN NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO

6.2 EVALUACIÓN DE IMPACTOS HIDROGEOLÓGICOS

En este apartado se presenta el análisis y los comentarios del MAVDT con respecto al proyecto el QUIMBO, plasmados en la resolución 0899 del 15 de mayo del 2009, a la luz de los términos de referencia H-TER-01-0, bien cabe resaltar *las consideraciones del Ministerio* (MADVT) especialmente en cuanto al aspecto físico.

> *Se considera adecuada la caracterización del medio físico, donde se cumple con lo exigido en los términos de referencia tanto en temáticas como alcances y metodologías utilizadas, considerándose aspectos como: la geología, hidrogeología.*

Y en el caso de hidrogeología se precisa:

> *Se realizó una caracterización según el grado de permeabilidad de las formaciones y se establecieron las respectivas unidades hidrogeológicas; se identificaron las zonas de recarga y descarga de acuíferos. Se realizó un inventario de aljibes en el área de interés para el proyecto.*

En cuanto a los impactos significativos se indica el ministerio lista los impactos identificados por el proponente:

> *Agradación de las colas del embalse; regulación de caudales durante llenado y operación; alteración de las características de la calidad de agua del río Magdalena en el embalse el Quimbo, aguas abajo del sitio de presa y del embalse Betania; Alteración dela calidad del agua durante construcción; Alteración de la calidad del aire y ruido; generación de inestabilidad y erosión en el borde del embalse; afectación por generación de residuos de excavación; Alteración del microclima en los alrededores del embalse y perdida y alteración de suelos.*

Siendo este el análisis con respecto al EIA por parte del MADVT, el cual resulta muy similar a una comprobación de que en el documento se encuentre los componentes señalados en los términos. Es necesario, por las condiciones del documento, que la ANLA solicite información con respecto a la verificación de impactos así como otros no contenidos en los términos de referencia.

6.2.1 Conclusiones del modelo hidrogeológico presentado por EMGESA – INGETEC (2008)

No es posible evaluar lo impactos mínimos requeridos en los términos de referencia con el

agravante de afectar las condiciones de estabilidad de las laderas del embalse así como la estabilidad de las estructuras (Dique, presa, ataguía, túneles), en las cuales, de acuerdo con la información consignada en los expedientes, no se tuvo en cuenta las variaciones del nivel freático y la dinámica del agua subterránea. Es de recordar que el Dique ya presentó un evento de falla, registrado en el 2012 luego del cual se hicieron los requerimientos de instrumentación más adecuada y caracterización en términos de presión de poros del medio. También se presentaron problemas de estabilidad en la casa de máquinas. Sin embargo la caracterización del medio natural es nula y en este caso la existencia de caminos preferenciales es resaltada en los datos mencionados en el anexo de geotecnia (Sección 3.2.4 EIA en EMGESA – INGETEC, 2008).

6.3 EVALUACIÓN DE IMPACTOS EN CALIDAD DE AGUA

Ver el producto: “CALIDAD DEL AGUA.”

7 CONFIGURACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

7.1 DEFINICIONES

Se toma como referencia, las definiciones dadas por el marco normativo nacional descritas por el artículo 4 de la Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones:

“(…)

3. Amenaza: *Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.*

4. Análisis y evaluación del riesgo: *Implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. Se estima el valor de los daños y las pérdidas potenciales, y se compara con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir tipos de intervención y alcance de la reducción del riesgo y preparación para la respuesta y recuperación.*

8. Desastre: *Es el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige del Estado y del*

sistema nacional ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción.

(…)

10. Exposición (elementos expuestos): *Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza."*

11. Gestión del riesgo: *Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.*

12. Intervención: *Corresponde al tratamiento del riesgo mediante la modificación intencional de las características de un fenómeno con el fin de reducir la amenaza que representa o de modificar las características intrínsecas de un elemento expuesto con el fin de reducir su vulnerabilidad.*

13. Intervención correctiva: *Proceso cuyo objetivo es reducir el nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones de mitigación, en el sentido de disminuir o reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos.*

14. Intervención prospectiva: *Proceso cuyo objetivo es garantizar que no surjan nuevas situaciones de riesgo a través de acciones de prevención, impidiendo que los elementos expuestos sean vulnerables o que lleguen a estar expuestos ante posibles eventos peligrosos. Su objetivo último es evitar nuevo riesgo y la necesidad de intervenciones correctivas en el futuro. La intervención prospectiva se realiza primordialmente a través de la planificación ambiental sostenible, el ordenamiento territorial, la planificación sectorial, la regulación y las especificaciones técnicas, los estudios de prefactibilidad y diseño adecuados, el control y seguimiento y en general todos aquellos mecanismos que contribuyan de manera anticipada a la localización, construcción y funcionamiento seguro de la infraestructura, los bienes y la población.*

15. Manejo de desastres: *Es el proceso de la gestión del riesgo compuesto por la preparación para la respuesta a emergencias, la preparación para la recuperación posdesastre, la ejecución de dicha respuesta y la ejecución de la respectiva recuperación, entiéndase: rehabilitación y recuperación.*

16. Mitigación del riesgo: *Medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente.*

(…)

26. Seguridad territorial: *La seguridad territorial se refiere a la sostenibilidad de las relaciones entre la dinámica de la naturaleza y la dinámica de las comunidades en un territorio en particular. Este concepto incluye las nociones de seguridad alimentaria, seguridad jurídica o institucional, seguridad económica, seguridad ecológica y seguridad social.*

27. Vulnerabilidad: *Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos".*

7.2 CONFIGURACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE POR FALLA DE LA REPRESA

Para fines del presente análisis, se considera la inundación súbita por causa de la falla de la estructura principal del proyecto hidroeléctrico "El Quimbo", al ser este el escenario más crítico, por liberarse en un corto periodo de tiempo (menor a 6 horas) más de 2000 millones de metros cúbicos aguas abajo, del punto de presa, llegando al embalse de Betania y generando posiblemente una falla en cadena de estos dos sistemas de almacenamiento.

Lo anterior, entiendo el riesgo de desastre como la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad, como se ilustra a continuación:

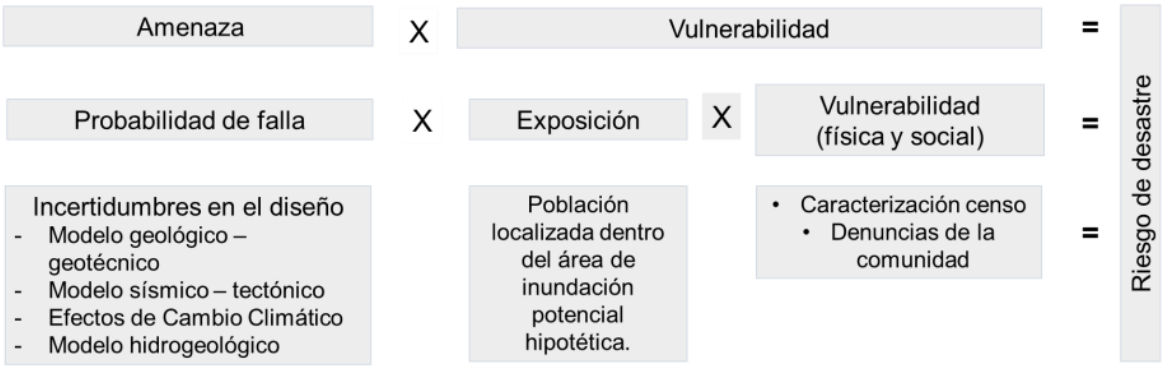


FIGURA 32. ANÁLISIS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DESASTRES. FUENTE: MODIFICADO DE DELTARES, 2016.[76]

Para el presente análisis se realizan las siguientes consideraciones, con el fin de garantizar la coherencia e integridad conceptual y metodológica.

A continuación, se describen cada una de las fases de análisis, anotando que todo lo relacionado con amenaza sísmica se incluye en el documento Producto Amenaza sísmica natural e inducida que hace parte del material generado como apoyo a la Gobernación del Huila:

[76] Deltares, 2016. Curso de alertas tempranas. UNGRD, 2016.

7.2.1 Incertidumbres identificadas en los documentos de soporte presentado por EMGESA en el EIA 2008

Los factores que producen la mayoría de falla de represas a nivel mundial son: sismicidad, crecientes extremas superiores a las de diseño, filtración de agua en los cimientos, inestabilidades geológicas, inestabilidades geotécnicas y finalmente fallas por diseños y/o construcciones deficientes; por tal razón se realizó un análisis integral entre las debilidad e incertidumbres encontradas en cada uno de los componentes de la línea y base y su posible consecuencia en términos de estabilidad y funcionalidad del proyecto hidroeléctrico, dando como resultado que las incertidumbres identificadas en cada uno de los componentes de la línea base, que inciden directamente en la estabilidad y funcionalidad de las obras principales a corto, mediano y largo plazo, así como en la vida útil de ésta, como se describe en la tabla siguiente:

TABLA 15. ANÁLISIS DE DEBILIDAD E INCERTIDUMBRES IDENTIFICADAS Y POSIBLES CONSECUENCIAS EN LA ESTABILIDAD DE LAS OBRAS PRINCIPALES DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO.

Componente	Debilidades	Incertidumbre	Posibles consecuencias
Geología – Litología (materiales)	• Ausencia de la cartografía geológica a detalle (1:25.000) en parte del área de influencia directa incluido el vaso del embalse para el que se presenta solamente un mapa y columna estratigráfica generaliza ambos productos a escala 1:75.000.	• Distribución, espesor y características litológicas y estructurales a detalle de las unidades litológicas presentes.	• Inconsistencia en el modelo geológico planteado para estimar la carga de sedimentos esperado. • Dificultades en términos de estabilidad de las paredes del embalse a raíz de la falta de conocimiento acerca de la litología y comportamiento estructural detallado de los materiales • Ausencia de conocimiento del comportamiento hidrogeológico.
	• Ausencia de caracterización de macizo de rocoso en el área de influencia directa del proyecto, y en la zona de construcción de las obras principales.	• Distribución y espesor de la roca de mala calidad. • Comportamiento geomecánico de las estructurales principales, en zonas donde se localiza la roca de mala calidad. • Comportamiento geomecánico y geoquímico de las unidades arcillosas, frente a procesos de humedecimiento –	• Subestimación de parámetros geo-mecánicos empleados para el diseño de las estructuras principales. Lo cual puede generar posible falla de éstas. • Disminución de la vida útil del proyecto, por excesiva carga de sedimentos. • Posible afectación en términos de estabilidad de las estructuras

Componente	Debilidades	Incertidumbre	Posibles consecuencias
	• Ausencia de caracterización geoquímica de los materiales usados para la construcción de la presa y dique auxiliar.	secado, condiciones de saturación y exposición a la atmósfera. • Comportamiento geomecánico y geoquímico de las unidades arcillosas, frente a procesos de humedecimiento – secado, condiciones de saturación y exposición a la atmosfera. • Comportamiento expansivo de las arcillas.	principales. • Disminución del tiempo de vida útil del proyecto, como consecuencia de la alteración físico-química de los materiales, expuestos a condición de saturación permanente. Lo cual puede generar posible falla de la presa y dique principal.
Geomorfología (forma)	• Deficiencia en la identificación de procesos de movimientos en masa.	• Nivel de amenaza por movimientos en masa que se encuentra expuesta el área de influencia directa.	• Incremento no considerado de la carga de sedimentos en el embalse, reduciendo así, su vida útil.
Geología estructural (fallas geológicas)	• No se reporta ni la espacialidad de las estaciones ni los criterios evaluados en cada una de ellas durante la fase de campo. • Falta de claridad en el comportamiento de algunas de las fallas que se presentan en cercanías al proyecto hidroeléctrico. • Ausencia de caracterización de macizo rocoso.	• Comportamiento cinemático • Probabilidad de falla en macizo de rocoso. • Calidad en términos estructurales del modelo geológico propuesto. • Permeabilidad secundaria, por fracturamiento del macizo rocoso.	• Disminución del tiempo de vida útil del proyecto, como consecuencia de procesos de movimientos en masa activos en área del embalse, por mayor carga de sedimentos. • Presión intersticial excesiva no considerada en las condiciones de diseño de las estructuras principales.
	• Ausencia de caracterización neotectónica del área de influencia directa del proyecto. • Debilidades en análisis de sismicidad histórica.	• Comportamiento dinámico de los materiales, especialmente, los materiales no consolidados como depósitos recientes (cuaternario).	• Disminución del desempeño dinámico de las estructurales principales. • Excedencia de las aceleraciones pico considerada para el diseño de las estructuras

Componente	Debilidades	Incertidumbre	Posibles consecuencias
		• Importancia de las fallas cercanas en el comportamiento sísmico de la zona de influencia directa del estudio.	principales.
Sismología (localización, profundidad magnitud de los sismos)	• Incremento en la sismicidad de Ml < 3, en la zona de la construcción del proyecto hidroeléctrico. • Presencia de sismos con magnitud local mayor a la registrada durante el diseño de las obras del proyecto (EIA 2008)	• Presencia de sismicidad inducida. • Aceleraciones pico esperadas. • Comportamiento dinámico de la pantalla de concreto de la presa, al ser un elemento susceptible a ser afectado de acuerdo a referencias bibliográficas.	• Falla de las estructuras principales por aceleración pico que exceden los valores estimados en los diseños.
Hidrología – Hidráulica	• Ausencia de aforo de caudales sólidos y caudales líquidos para la construcción de la línea base del EIA (2008) y sus posteriores modificaciones. • Se identifica la existencia de un flujo base o caudal mínimo de 40 m^3/s medio mensual en la curva de duración de caudales. Siendo la relación de estos dos componentes inexistentes en especial cuando los escenarios de modelación o entrada del modelo hidrogeológico se obtiene de este componente. • En el plan de contingencia presentado por (EMGESA-INGETEC, 2015)[77] se plantean escenarios de emergencia asociados a la falla de la presa (dique principal), más sin embargo para NO se puede evidenciar el criterio de selección del modelo, variables de entrada, calibración y	• Nivel de la lámina de agua, bajo eventos extremos no considerados dentro de la línea base del proyecto, de acuerdo a la información del EIA (2008) y posteriores modificaciones. • Efecto sobre el microclima del área de influencia directo, lo cual podría generar afectaciones a los ecosistemas y actividades agrícolas – productivas desarrolladas en esta área. • Efecto de las variaciones hidroclimáticas bajo escenario de Cambio Climático.	• Cuantificación en la amenaza asociada a la ruptura de la presa y por ende en los escenarios de emergencia y planes de contingencia para los municipios. • Estimación de crecientes máximas probables (CMP) en escenarios de variabilidad climática y cambio climático.

[77] EMGESA-INGETEC, 2015. Plan de contingencia Quimbo-Betania

Componente	Debilidades	Incertidumbre	Posibles consecuencias
	validación.		
Hidrogeológica	• Ausencia de análisis integral de la influencia hidrogeológica del "El Quimbo" y el embalse de Betania. • Ausencia de valoración de impactos ambientales asociados con el componente hidrogeológico, cambios del nivel freático y interconexión de cuencas. • Ausencia de caracterización hidrogeológica del embalse y estudio de la red de fracturas. • Deficiencias en la construcción del modelo hidrogeológico en el área donde se construye las obras principales. • Desconocimiento del comportamiento de zonas de recarga, descarga y dirección del flujo. • No existe información de conductividad hidráulica o esta se encuentra limitada al área de las estructuras y no se articula el proyecto con el conocimiento proveniente de caracterización de la subcuenca Neiva, notablemente información del sector petrolero. • Hay evidencia de flujo de agua sobre el cuerpo principal de la presa	• Comportamiento hidrogeológico del área de influencia directa, zonas de recarga, descarga y dirección del flujo • Valoración de los impactos ambientales asociados al componente hidrogeológico. • Efecto acumulativo hidrogeológico entre "El Quimbo" y el embalse de Betania sobre el sistema de fallas.	• Presión intersticial excesiva no considera en los diseños de las estructuras principales, lo cual podría generar las fallas de las mismas. • Posible afectación de las estructuras principales por efecto de tubificación. • Activación de procesos morfodinámicos en el área inundada por variaciones del nivel freático. • Interconexión de cuencas. • Sismicidad inducida por flujo preferencial a través de red de fracturas e incremento de presiones. • Las presas con caras de concreto están diseñadas para que la cara genere una zona impermeable que controle el flujo de agua sobre el cuerpo de la presa. El hecho de que este flujo de agua se presente hace a la presa vulnerable a aumento de presión de poros en eventos sísmicos.
Geotecnia	• No se encuentran los análisis de flujo de agua y presiones sobre la estructura proyectadas. • No se presentan las presiones que bajo el plinto se podrían presentar, tampoco se	• Presencia de materiales con características geotécnicas pobres, como material altamente fracturado. • Comportamiento geotécnico del total	• Factores de seguridad sobre-estimados, lo cual generaría una posible falla de las estructuras principales bajo escenarios críticos no considerados (lluvia y aceleraciones pico).

Componente	Debilidades	Incertidumbre	Posibles consecuencias
	presenta la justificación de las barras de anclaje que se proyectan para la unión entre el plinto y la unidad de roca. • No se presentan las características mecánicas del material, tampoco se mencionan las condiciones necesarias para la impermeabilización de éstas estructuras. • Se considera insuficiente la cantidad de exploración del subsuelo realizada, no obstante, ya que la obra ya fue ejecutada es importante verificar si el único sondeo realizado es representativo para toda la zona del túnel. • No se explora y se toman acciones en vista del intenso fracturamiento, anisotropía y heterogeneidad del medio detectada específicamente en el área de las estructuras. • No hay claridad respecto al valor de aceleración sísmica utilizado en los modelos.	de las unidades presentes dentro del área de influencia directa y área donde se construyeron las obras. • Comportamiento de las estructuras en condicione de saturación y aceleraciones pico que exceden los parámetros planteados en la línea base del EIA, 2009, y sus posteriores modificaciones.	• Posible afectación de las estructuras principales por efecto de tubicación. • Deformaciones considerables sobre las presas que podrían generar flujo de agua sobre el cuerpo de la presa • .Si los estudios de amenaza sísmica sugieren valores de aceleración para los diseños mayores a los usados, esto es un riesgo grave frente a la estabilidad de la presa.
Calidad del agua	• No se ha realizado el seguimiento y control de la calidad del agua de forma adecuada que permita determinar los eventuales impactos generados por el llenado del embalse y la posterior descarga. • No existe un monitoreo sistemático que permita analizar los datos en función del tiempo, generando series temporales que permitan analizar la variabilidad espaciotemporal de las concentraciones de parámetros fisicoquímicos importantes como:	• No se tiene conocimiento real del impacto generado durante en llenado del embalse debido a: 1) la ANLA no realizó revisión de los ICA 11, 12, 13 que incluían los análisis de calidad del agua del río Magdalena durante el llenado y operación (hallazgo de la CGR), 2) no se cuenta con un monitoreo sistemático que permita mediante series de tiempo analizar la	• Deterioro de la calidad del agua del río Magdalena y sus principales tributarios, principalmente los que fueron objeto de inundación. Los indicios de contaminación son fundamentalmente por aumento de sólidos aguas arriba del embalse, enriquecimiento de nutrientes y con ello proliferación de algas, aumento de carga orgánica y disminución de oxígeno disuelto. • Riesgo de pérdida de ecosistemas acuáticos por condiciones anóxicas

Componente	Debilidades	Incertidumbre	Posibles consecuencias
	sólidos, contenido de nutrientes, materia orgánica y oxígeno disuelto. • No se presentaron registros de oxígeno disuelto en los monitoreos verticales realizados en el embalse posterior al llenado.	variabilidad en las concentraciones de contaminantes tanto en el río Magdalena como sus principales tributarios, y 3) no se encontraron datos de oxígeno disuelto en los monitoreos verticales realizados en el embalse durante diciembre de 2015 y febrero 2016, por tanto se desconoce el comportamiento del embalse durante ese periodo crucial posterior al llenado.	o de oxígeno disuelto reducido aguas abajo del embalse. • Malos olores y generación de vectores por procesos de descomposición de materia orgánica en zonas donde exista una depositación excesiva de sólidos o material vegetal. • Impacto a la actividad pesquera por presentarse condiciones adversas para la preservación de la vida acuática por altos contenidos de nutrientes y déficit de oxígeno.
Vulcanología	• la metodología usada para la evaluación de la amenaza volcánica es cuestionable, pues en ningún aparte del estudio se menciona, detalla ni explica en que consiste ni cuáles son las variables utilizadas, así como los resultados obtenidos en un modelamiento de amenaza con y sin proyecto	• Nivel de amenaza del complejo vulcanológico sobre el funcionamiento del proyecto hidroeléctrico El Quimbo.	• Aceleraciones pico no esperadas generadas por el complejo vulcanológico, afectando la estabilidad de las obras principales. • Cambios no esperados bajo el evento volcánico del Río Magdalena y sus afluentes.

7.2.2 Amenaza por falla del dique principal (presa) – Inundación súbita

Las inundaciones súbitas (*Flash flood* en idioma inglés) consisten en inundaciones en las cuales aumentan rápidamente el caudal y pueden estar atribuidas a precipitación excesiva o eventos de ruptura de represas. Las inundaciones súbitas generadas por precipitación excesiva se desarrollan en pocas horas (generalmente menores a 6 horas) estas se presentan por lo general en zonas montañosas. Las inundaciones asociadas con ruptura de represas naturales o construidas por el hombre también pueden liberar grandes volúmenes almacenados en un periodo corto de tiempo acarreando consecuencias catastróficas aguas abajo (Organización meteorológica mundial, 2009)

La principal característica es el poco tiempo que requieren para desarrollarse; en este lapso las personas tienen muy poco tiempo para actuar en aras de reducir el daño a inmuebles y reducir el riesgo para las vidas humanas. Usualmente este tipo de inundaciones están relacionadas con grandes volúmenes de precipitación, ruptura de diques, ruptura de presas entre otros. Para la mitigación de estas situaciones desfavorables actualmente a nivel mundial se han implementado múltiples estrategias;

una de las más eficientes consiste en la implementación de sistemas de alerta temprana para inundaciones.

Es importante mencionar que a pesar que la probabilidad de ocurrencia de este tipo de fallas es muy baja, como lo mencionan los análisis realizados en el EIA 2009 del proyecto, ya que los estándares de seguridad de este tipo de obras así lo exigen. Todo tipo de obras de infraestructura posee una probabilidad de falla asociada, que debe ser considerada, con el fin de establecer el plan de contingencias y demás medias a que haya lugar para prevenir futuras afectaciones. En este sentido, la probabilidad de falla u ocurrencia de la misma, depende la calidad de los estudios realizados para la construcción de la línea base, diseños, de las actividades que se realicen durante la operación y condiciones a que se verá enfrentada las obras una vez culmine la vida útil del proyecto.

Por otra parte, a pesar que las represas están diseñadas para su perdurabilidad garantizando que no se presenten fallas estructurales y/o funcionales y para el caso específico del Quimbo, la amenaza de falla de la represa fue definida como improbable [1], la falla de represas es relativamente frecuente en el mundo causando enormes pérdidas humanas, ambientales, sociales y económicas, como se describió anteriormente. Lo cual, sugiere la necesidad de realizar estudios de amenaza en detalle para poder dar alertas tempranas a la población y así evitar la pérdida de vidas humanas y económicas.

7.2.2.1 Definición del área de afectación y tiempo de respuesta por inundación súbita

Una de las principales amenazas que se ha evidenciado respecto al proyecto, es la ruptura de la presa y las inundaciones derivadas de esta. Este es un tema el cual requiere gran interés por parte de las empresas consultoras y constructoras como por las autoridades reguladoras competentes dado que este escenario representa una amenaza para la población no solo en el tramo entre el Quimbo y Betania sino también para la población aguas abajo de la represa de Betania (Neiva).

Como se mencionó en secciones anteriores, en el plan de contingencia[78] presentado por (EMGESA-INGETEC, 2008) NO se evidencia el estudio de amenaza asociado con la eventual ruptura de la represa dado que este evento se considera como improbable[79]. Más sin embargo este estudio de amenaza se considera necesario para que conjuntamente los municipios asentados aguas abajo del proyecto el Quimbo, la represa de Betania, los entes territoriales, entre otros puedan tomar las medidas pertinentes para mitigar los impactos negativos asociados a la ruptura de la represa.

En la hidráulica contemporánea la rama que estudia los flujos asociados a la falla de represas es conocida por sus siglas en inglés como DBF (*Dam Break Flow*), este tema ha cobrado gran interés en la rama de la ingeniera dado que este se configura como una herramienta necesaria para la evaluación y gestión del riesgo puesto que estos eventos generalmente están asociados a consecuencias catastróficas.

[78] EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de impacto ambiental de proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Revisión 01, Capítulo 09.
[79] EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de impacto ambiental de proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Revisión 01, Capítulo 09, pág 57.

La investigación en estos temas tiene un gran trasfondo que se remite a sus inicios en la década de los 70, uno de los referentes en la investigación de este tema es el centro de ingeniería hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del ejercito de los Estados Unidos quienes en 1977 publicaron una metodología para calcular la inundación asociada con la ruptura de presas[80] Adicionalmente en la actualidad existen múltiples investigaciones (Bureau of Reclamation, 1982)[81], (Costa, 1986)[82], (Fread, 1986)[83], (Froehlich, 1995)[84], (Kirkpatrick, 1977)[85], (MacDonald & Langridge-Monopolis, 1984)[86] en las cuales se han realizado múltiples modelaciones numéricas y físicas para determinar las características hidrodinámicas asociadas a este tipo de flujos.

7.2.2.2 Modelo HEC-RAS y sistemas SIG

Para estimar las zonas que eventualmente serían inundadas asociadas a la eventual ruptura de la represa se realizó una modelación unidimensional que utiliza el modelo HEC-RAS para el análisis hidráulico que trabajara de manera acoplada con un sistema de información geográfica (QGIS) para determinar las zonas posiblemente inundadas.

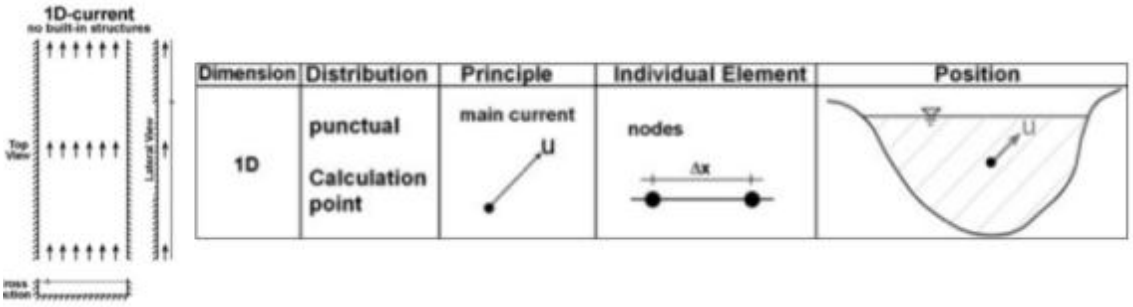


FIGURA 33. ESQUEMA DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL FUENTE: SENE, K. (2013). FLASH FLOODS: FORECASTING AND WARNING. LONDON: SPRINGER.

El programa de análisis hidráulico HEC-RAS fue desarrollado por el US Army Corps of Engineers gracias a la gestión del U.S Federal Goverment para uso libre. Este software ha sido diseñado para integrar diferentes componentes de análisis hidráulico en una interfaz gráfica permitiendo diferentes tipos de simulaciones y un almacenamiento de datos. HEC-RAS contiene cuatro componentes de análisis en una dimensión: análisis de flujo estacionario, análisis de flujo no estacionario, transporte de sedimentos y análisis de calidad de agua.

Para este caso de estudio se utiliza el módulo de análisis de flujo permanente (el caudal no presenta variaciones respecto al tiempo). Este componente del sistema de modelación está destinado para el cálculo de los perfiles de la lámina del agua, este módulo puede simular regímenes de flujo subcrítico, supercrítico y mixto. El método de solución se basa en la solución de la ecuación de conservación de masa y de energía en una dimensión

[80] Hydrologic Engineering Center. (1977). Guidelines for Calculating and routing a dam-break flood.
[81] Bureau of Reclamation. (1982). Guidelines for defining inundated areas downstream from Bureau of reclamation.
[82] Costa, J. E. (1986). Floods form dam failures.
[83] Fread, J. L. (1986). The maximium discharge of outburst floods caudes by the breaching of man-made and natural dams.
[84] Froehlich, D. C. (1995). Peak outflow forme breached enbankment dam.
[85] Kirkpatrick, G. W. (1977). Evaluation guidelines for spillway adequacy.
[86] MacDonald, T. C., & Langridge-Monopolis. (1984). Breacing characteristics of dam failures

donde las pérdidas de energía se evalúan por la ecuación de Manning y la expansión y contracción (efectos de cambios de geometría) se evalúan por medio de un coeficiente. De manera acoplada se utilizó el sistema de información geográfico de carácter gratuito QGIS, para visualizar las secciones transversales y las cotas de inundación que probablemente alcanzaría la inundación generada por la eventual ruptura de la represa.

Variables de entrada

Se describen brevemente las variables de entrada al modelo que corresponden a:

- **Modelo digital de elevación (MDE):** El modelo digital de elevación utilizado para la presente modelación corresponde a la misión ALOS (Advanced land observing satellite por sus siglas en inglés) y proyecto PALSAR (Phased array type L-band synthetic apertura radar por sus siglas en inglés), este trabaja con un sensor utilizando la frecuencia de la banda L, este permite lograr una resolución de 12,5 metros por pixel que equivale a una escala 1:20.000 (Figura 34).

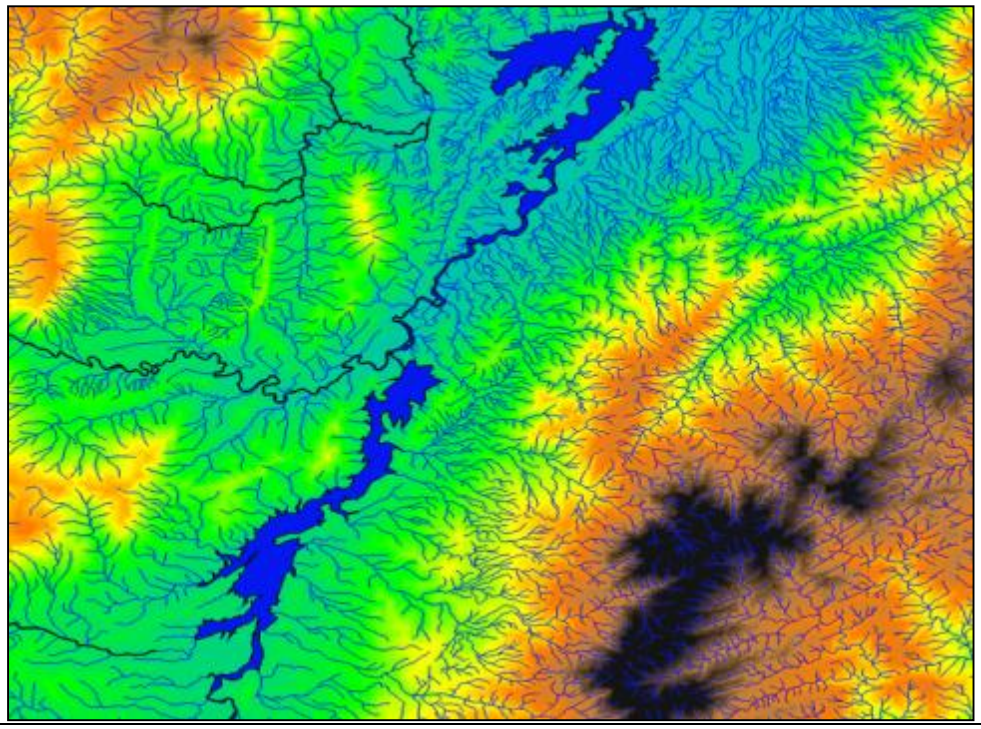


FIGURA 34. ZONA DE LA MODELACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Inicialmente es necesario realizar un llenado de pixeles[87] que no tuvieran datos asociados dado que esto podría generar errores en el cálculo de la superficie de inundación, secciones trasversales y perfil longitudinal de la corriente.

- **Secciones transversales:** Para representar el río Magdalena se realizó un abcisado con 13 secciones transversales cuya longitud oscila en el rango de 1.200 a 3.000 metros (esto en aras de poder solventar la representación del flujo en los meandros)

[87] Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depression in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. Journal of geographical information sciense.

donde la sección 0 corresponde a la entrada a la represa de Betania y el 12 corresponde a la cara de la represa del Quimbo.

FIGURA 35. SECCIONES TRANSVERSALES PROPUESTAS PARA LA MODELACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La altimetría fue extraída del MDE ALOS-PALSAR mediante la herramienta QRAS 88 (Figura 35).

- **Caudales e hidrograma asociado a la ruptura de la represa:**

  Para calcular el hidrograma de entrada se tuvo en cuanta la metodología planteada por (Saberi & Zenz, 2015)[89] con base en investigaciones previas como Singh (1998)[90], Froehlich (1995)[91] entre otros.

  Esta metodología depende de la altura de la represa o la altura de la lámina de agua detrás de la represa (Hw), volumen de almacenamiento (Vw) y el tiempo de falla de la represa (tf). Se encontró también que la relación (Vw/Hw) es una relación

[88] De Rosa, P. L. (2015). Q-RAS:Simple tool for geometry data preparation as QGIS can become an HEC-RAS preprocessor.
[89] Saberi, O., & Zenz, G. (2015). Empirical relationship for calculate outflow hydrograph of enbankment dam failure due overtopping flow. International Journal of hydraulic engineering, 45-53.
[90] Singh, V. P. (1998). Dam breach modeling technology.
[91] Froehlich, D. C. (1995). Peak outflow forme breached enbankment dam.

representativa para el estudio el tiempo de falla de represas donde la unidad de Vw deberá ser en millones de metros cúbicos y la unidad de Hw deberá estar en metros.

Para la evaluación del tiempo de falla (tf) de la represa se realizaron regresiones numéricas obteniendo las siguientes ecuaciones en función de la relación (Vw/Hw), para tf (hr), Vw (m3x106) y Hw (m).

$$V_w/_{H_w} \leq 1.0 \therefore\ t_f = \delta\left[0.1214 \cdot \ln\left(\frac{V_w}{H_w}\right) + 0.79\right] \quad (1)$$

$$V_w/_{H_w} > 1.0 \therefore\ t_f = \delta\left[0.5063 \cdot \ln\left(\frac{V_w}{H_w}\right) + 0.85\right] \quad (2)$$

Adicionalmente acorde con el tipo de represa y con el grado de erosión se plantea un factor de erosión (Tabla 21) para el caso particular de estudio la represa El Quimbo, como primera aproximación se utilizara el menor valor (δ=0,5) ya que se trata de representar una falla súbita de la represa y este es el valor que mejor se aproxima a esta condición

TABLA 16. FACTORES DE EROSIÓN (Δ) FUENTE SABERI, O., & ZENZ, G. (2015). EMPIRICAL RELATIONSHIP FOR CALCULATE OUTFLOW HYDROGRAPH OF ENBANKMENT DAM FAILURE DUE OVERTOPPING FLOW. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, 45-53.

Tipo de represa	Rango de coeficientes	Sugerido
Represa sin núcleo y erosión alta	0,5 - 0,2	1
Represa sin núcleo y erosión baja	2,0 - 3,0	2
Represa con núcleo y erosión baja	2,0 - 3,0	1,5
Represa con núcleo y erosión alta	2,0 - 3,0	3

En lo que respecta al cálculo del caudal pico de descarga propuesto por (Saberi & Zenz, 2015) plantean la construcción de una hidrógrafa simplificada dividiendo este en tres figuras geométricas (Figura 36).

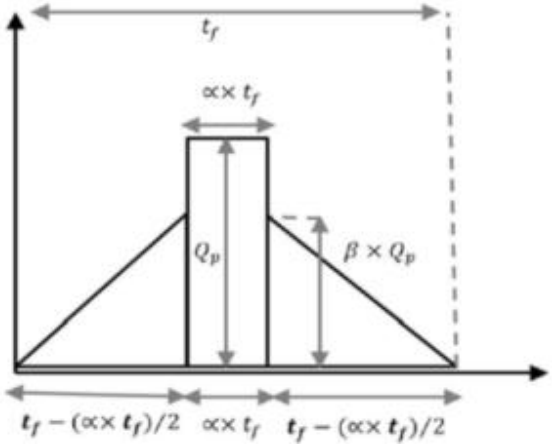


FIGURA 36. HIDROGRAMA SIMPLIFICADO ASOCIADO CON LA RUPTURA DE UNA REPRESA. FUENTE: SABERI, O., & ZENZ, G. (2015). EMPIRICAL RELATIONSHIP FOR CALCULATE OUTFLOW HYDROGRAPH OF ENBANKMENT DAM FAILURE DUE

Teniendo en cuenta que el volumen bajo la hidrógrafa es el volumen de almacenamiento del embalse, se tiene la siguiente ecuación para determinar el caudal pico de descarga donde Q_p (m^3/s), V_w (m^3) y t_f (s) y que Donde los factores α y β han sido calculados usando análisis sensitivo de calibración basado en las ruptura de represas histórica (α=0,1 y β=1,0)

$$Q_p = \frac{2V_w}{t_f(2\,\alpha + \beta - \alpha\,\beta)}$$

Finalmente el caudal pico (Q_p) corresponde a 173401 m^3/s para un tiempo de falla de 5,30 horas, este caudal pico se considera conservativo dado que en la realidad las descargas de estos suelen suceder en tiempos menores a 6 horas (Figura 37).

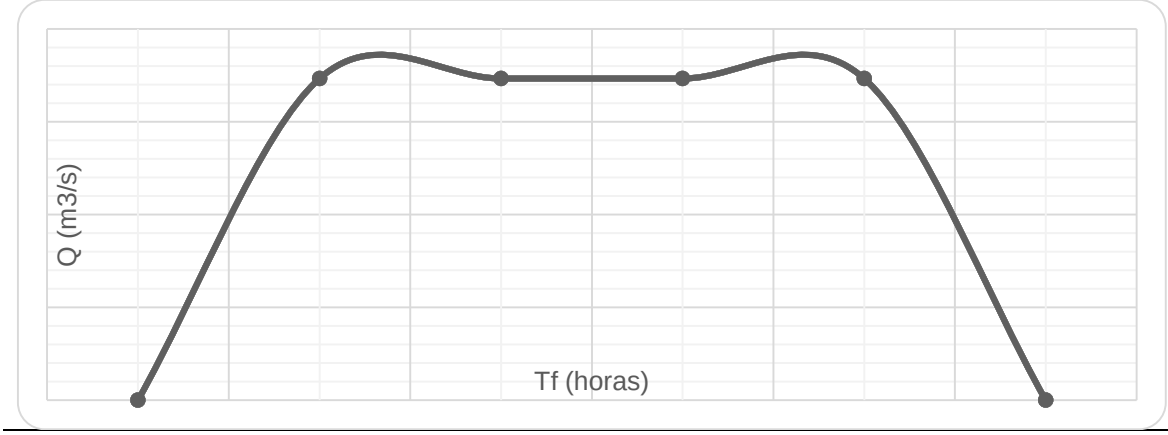


FIGURA 37. HIDROGRAMA ASOCIADO A LA RUPTURA DE LA REPRESA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Limitaciones del modelo

El modelo propuesto está sujeto a incertidumbres que están asociadas a los datos de entrada al modelo, por lo tanto es pertinente realizar las siguientes aclaraciones y/o suposiciones para la modelación:

- La modelación se realizó para el río Magdalena en el tramo comprendido entre la represa del Quimbo y Betania dado que se tiene una condición de contorno asociada con la represa de Betania. Considerando que HEC-RAS podría presentar problemas con la modelación del efecto hidrodinámico que tendría la llegada de este caudal a la represa de Betania, con base en este criterio se decidió realizar la modelación para este tramo.
- No se tiene en cuenta el caudal medio del río Magdalena, únicamente se tiene en cuenta el caudal adicional que estaría asociado a la ruptura de la represa.
- No se tiene el caudal afluente del río Páez al río Magdalena.
- La modelación se realizó para flujo permanente y uniforme
- El MDE ALOS-PALSAR tiene una resolución 1:20.000, para estudios de amenaza se requiere tener un MDE de una mayor resolución.

- Las secciones transversales fueron extraídas del MDE ALOS-PALSAR, más sin embargo se requieren las secciones batimétricas transversales al río Magdalena en aras de disminuir la incertidumbre asociada a los parámetros geométricos del canal.
- Para la estimación del hidrograma y el caudal pico asociado con la eventual ruptura de la represa se empleó la metodología de (Saberi & Zenz, 2015) la cual aplica para represas de tierra, más sin embargo se realizaron los ajustes de similitud para el caso de la represa del Quimbo.

Resultados

Como se mencionó anteriormente la modelación se realizó para flujo permanente y uniforme arrojando los siguientes resultados.

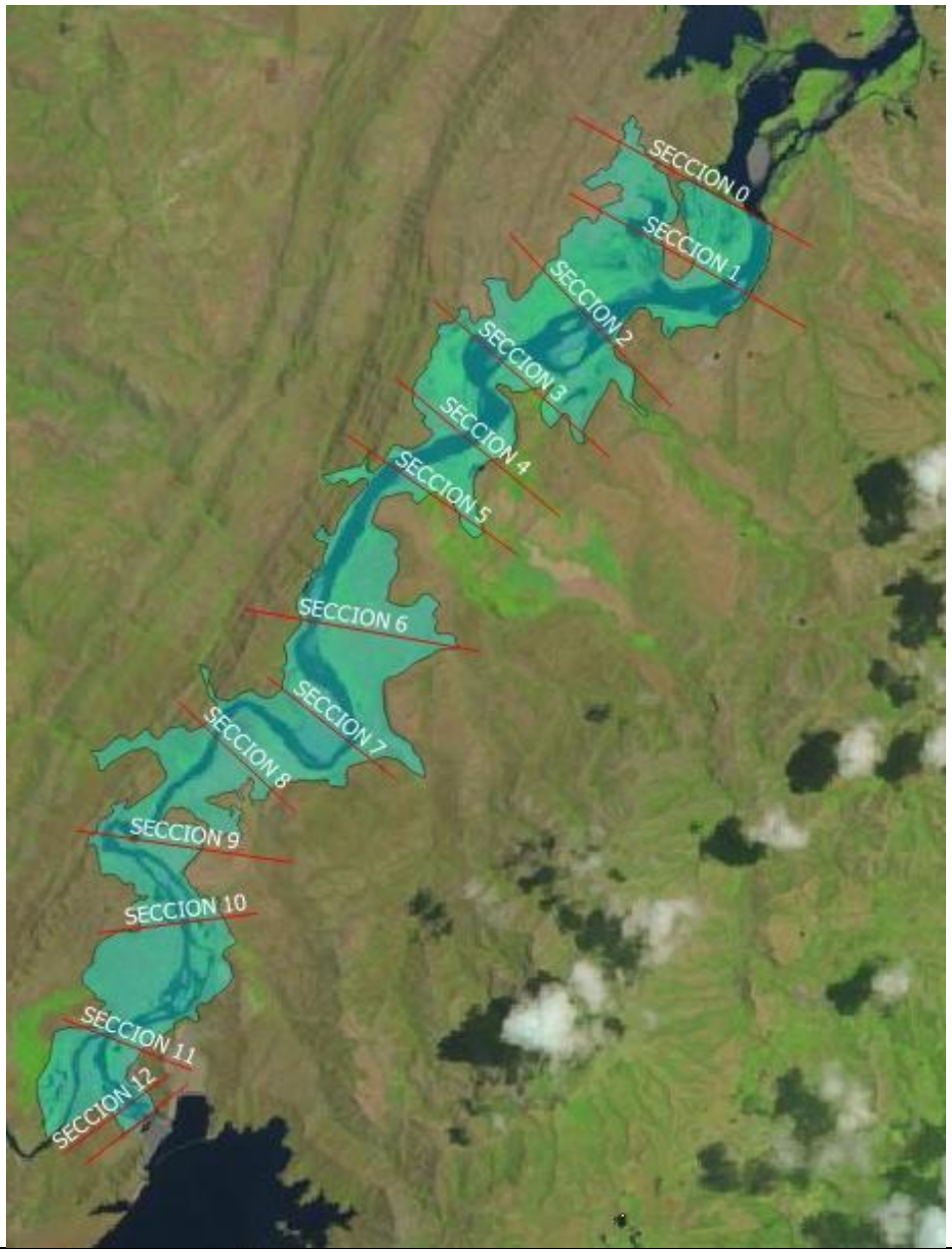
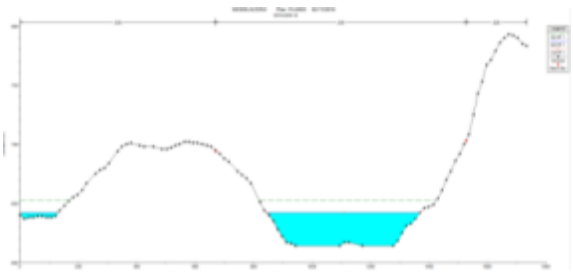
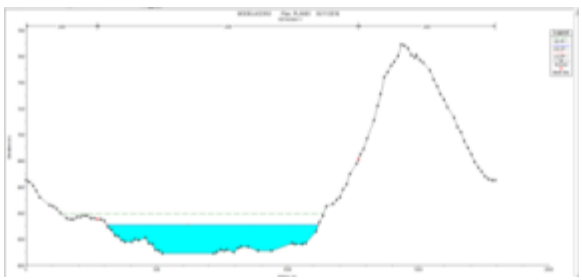
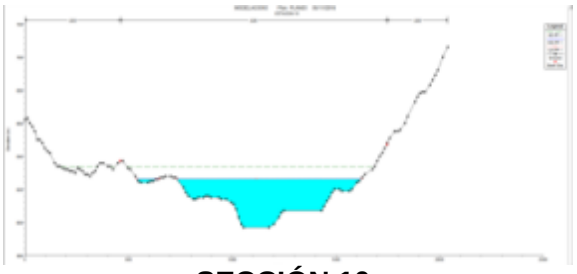


FIGURA 38. ZONAS PROBABLEMENTE INUNDADAS DEBIDO A LA EVENTUAL RUPTURA DE LA REPRESA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

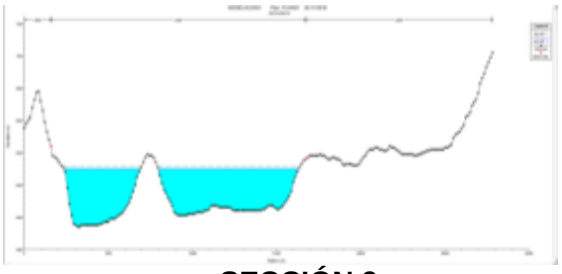




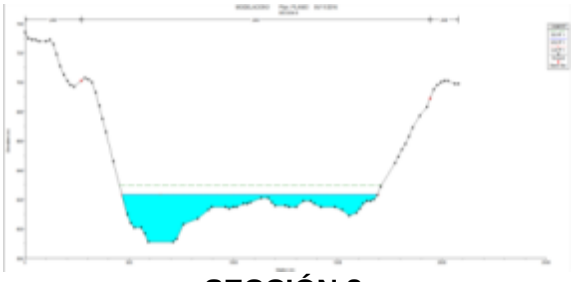
SECCIÓN 12



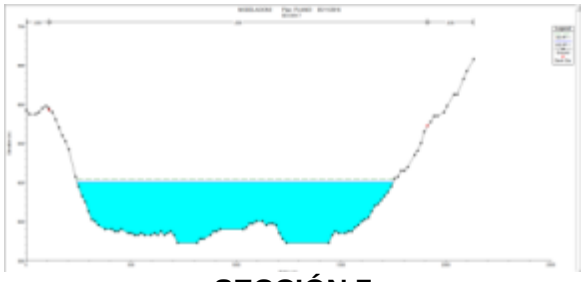
SECCIÓN 11



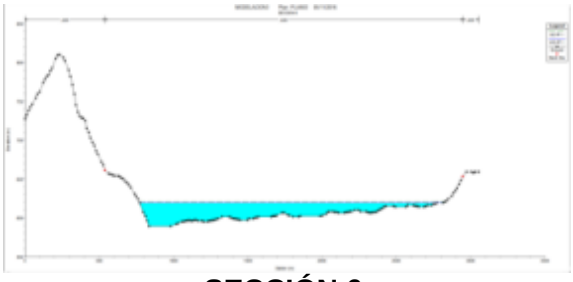
SECCIÓN 10



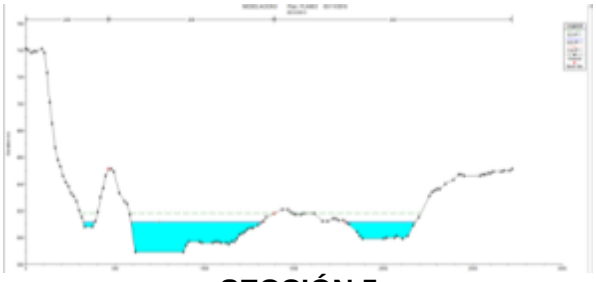
SECCIÓN 9



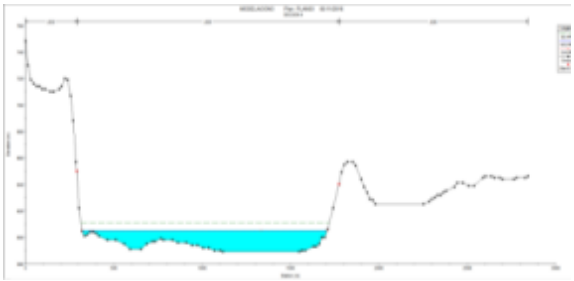
SECCIÓN 8



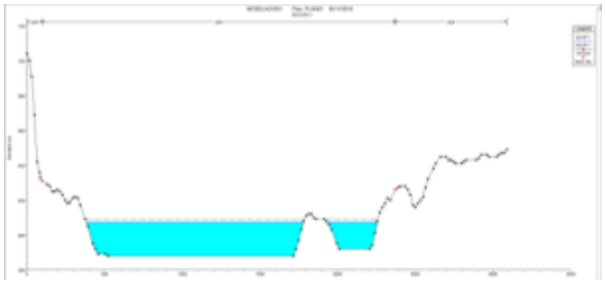
SECCIÓN 7



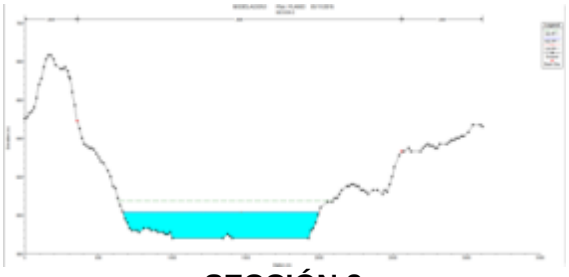
SECCIÓN 6



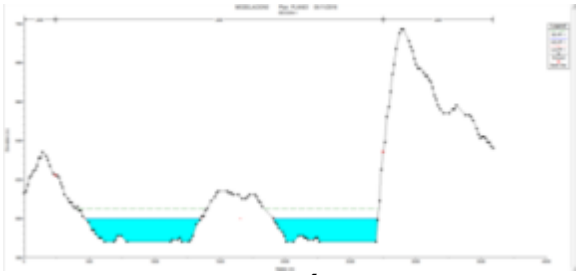
SECCIÓN 5



SECCIÓN 4

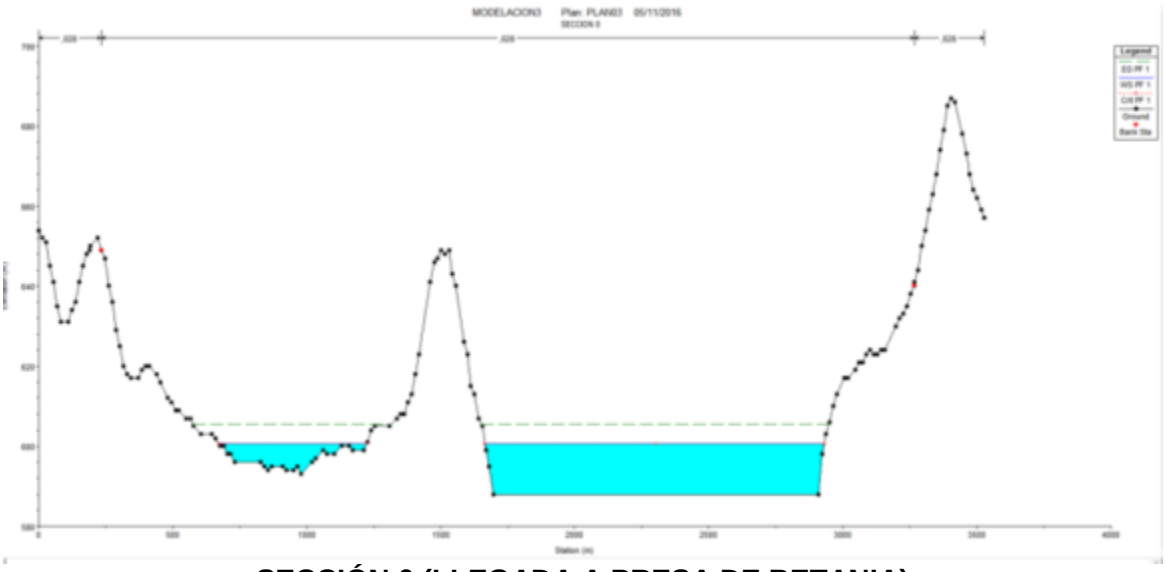


SECCIÓN 3



SECCIÓN 2

SECCIÓN 1



SECCIÓN 0 (LLEGADA A PRESA DE BETANIA)

FIGURA 39. SECCIONES TRANSVERSALES DEFINIDAS PARA LA MODELACIÓN CONDICIONES DE FLUJO PERMANENTE Y UNIFORME ASOCIADA CON LA EVENTUAL RUPTURA DE LA REPRESA EL QUIMBO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

TABLA 17. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN PARA CONDICIONES DE FLUJO PERMANENTE Y UNIFORME ASOCIADA CON LA EVENTUAL RUPTURA DE LA REPRESA EL QUIMBO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tramo	Sección transversal	Q Total (m3/s)	Elevación (m)	Línea energía (m)	Velocidad (m/s)	Area mojada (m2)	Ancho superficial (m)	Número de Froude
Quimbo-Betania	12	173401	642,04	652,16	14,16	12575,53	655,43	0,94
Quimbo-Betania	11	173401	630,91	639,24	12,78	13564,24	810,09	1
Quimbo-Betania	10	173401	626,33	633,6	11,94	14520,7	997,37	1
Quimbo-Betania	9	173401	629,87	631,43	5,52	31403,5	1289,4	0,36
Quimbo-Betania	8	173401	623,43	629,76	11,14	15566,78	1226,59	1
Quimbo-Betania	7	173401	620,26	621,42	4,76	36446,11	1505,85	0,31
Quimbo-Betania	6	173401	619,23	620,72	5,41	32027,56	2041,28	0,44
Quimbo-Betania	5	173401	611,62	618,13	11,88	15791,6	1193,53	0,95
Quimbo-Betania	4	173401	601,83	613,15	14,9	11634,88	1306,07	1,59
Quimbo-Betania	3	173401	607,29	609,04	5,86	29608,33	1716,22	0,45
Quimbo-Betania	2	173401	601,5	607,49	10,83	16004,45	1332	1
Quimbo-Betania	1	173401	599,85	604,96	10,01	17321,81	1687,98	1
Quimbo-Betania	0	173401	600,63	605,5	9,77	17743,32	1818,25	1

Para el caso general se debe que tener en cuenta que la altura de la lámina de agua aumenta en 15 a 30 m del nivel medio del río Magdalena.

Como se puede apreciar para la mayoría de secciones las velocidades están en el rango de 9,5 a 14-16 m/s exceptuando las secciones 9, 7,6 y 3; esto se debe a que el valle de inundación en estas zonas es más amplio por ende la velocidad media de la corriente disminuye. Para tener una mayor comprensión se remite al número de Froude el cual relaciona las fuerzas inerciales y gravitacionales; el número de Froude en la mayoría de casos se encuentra en una zona de flujo cuasi-crítico[92] exceptuando de la sección 4 la cual tiene un número de Froude asociado a 1,59 que se encuentra en un régimen supercrítico.

[92] Se presenta para los casos de 0.7 <Fr <1.2

Se tiene que hacer hincapié en que estas velocidades son muy altas respecto al promedio mensual multianual (las probabilidades para que estas velocidades se alcancen son muy baja); adicionalmente con estas velocidades se tiene que considerar que se aumenta considerablemente la capacidad de transporte del río.

Para la zona de llegada del río Magdalena al embalse de Betania se debe que tener en cuenta que se tiene un régimen crítico con una velocidad asociada de 9,77 m/s, la cual es alta respecto a la velocidad media mensual multianual, por lo tanto es necesario evaluar cuales serían las condiciones hidrodinámicas de la entrada de este caudal a la presa de Betania y sus posibles efectos respecto a la sobrecarga y funcionamiento de la misma.

7.2.3 Condiciones hidrogeológicas de la zona de estudio y consideraciones acerca del estudio del área

Para abordar inicialmente el estudio hidrogeológico es necesario tener una idea de la ubicación regional del sistema, principalmente en la disposición regional de las capas, y en el grado de fracturamiento. Para lo cual el estudio de los lineamientos a escala de fotografías aéreas o DEM permiten identificar zonas de alto fracturamiento, en este sentido en la siguiente grafica se presenta de una parte la interpretación de lineamientos realizada por el geólogo Julio Fierro en el marco del presente trabajo y el mapa de densidad de lineamientos construido a partir de ello. Adicionalmente, se indica la ubicación de dos perfiles de escala regional generados a partir de interpretación de secciones sísmicas por Jiménez et al. (2012)[93].

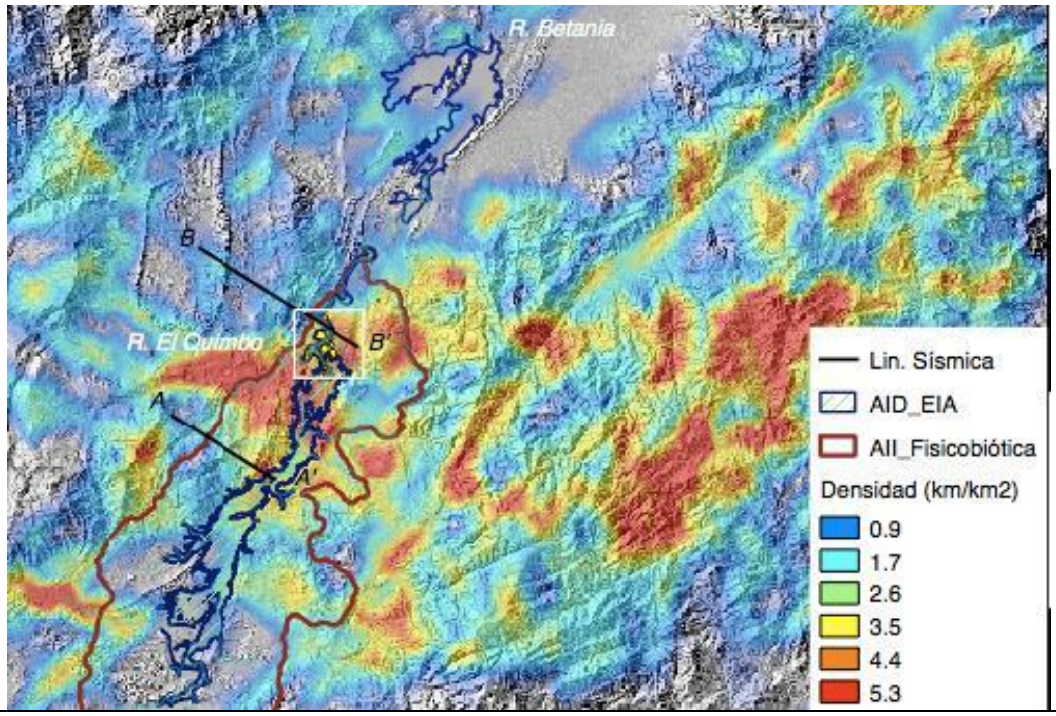


FIGURA 40. INTERPRETACIÓN DE LINEAMIENTOS Y DENSIDAD, EN LA GRÁFICA SE MUESTRA LA UBICACIÓN DE LÍNEAS

[93] Jimenez et al. (2012)[93], Analysis of curved folds and fault/fold terminations in the southern Upper Magdalena Valley of Colombia, journal of South American Earth Sciences 39 (2012) 184-201.

SÍSMICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La densidad de fracturas da un indicio de las condiciones de capacidad de infiltración a nivel superficial y es ideal para el estudio de conectividad de fracturas y la relación con sistemas de fallas (Ver Sección 3.2). Las zonas con alta densidad de fractura presentan una disposición en direcciones preferenciales NW-SE y NE-SW concentradas en la ubicación de las estructuras, se evidencia de igual forma la alta concentración en la cordillera oriental. En este sentido el comportamiento y la caracterización hidráulica puede mostrar un comportamiento diferencial en función del grado de fracturamiento, haciendo que las pruebas realizadas por EMGESA (Aunque solo fueron realizadas en las unidades gualanday y honda) no representativas de las condiciones de la AII.

En este sentido, al analizar los perfiles (en la siguiente figura) se puede ver en la sección BB' que las estructuras coinciden con una zona con alta complejidad estructural. Basándose en la disposición de las fallas y capas en este punto es de resaltar la orientación vertical con respecto a la superficie del terreno. Este comportamiento debe tenerse en cuenta al momento de realizar pruebas hidráulicas puesto que al realizar las perforaciones verticalmente se estaría analizando principalmente el flujo en la dirección de menor permeabilidad de las capas y perpendicularmente al sistema de fracturas, con mayor incertidumbre en pruebas de corta duración.

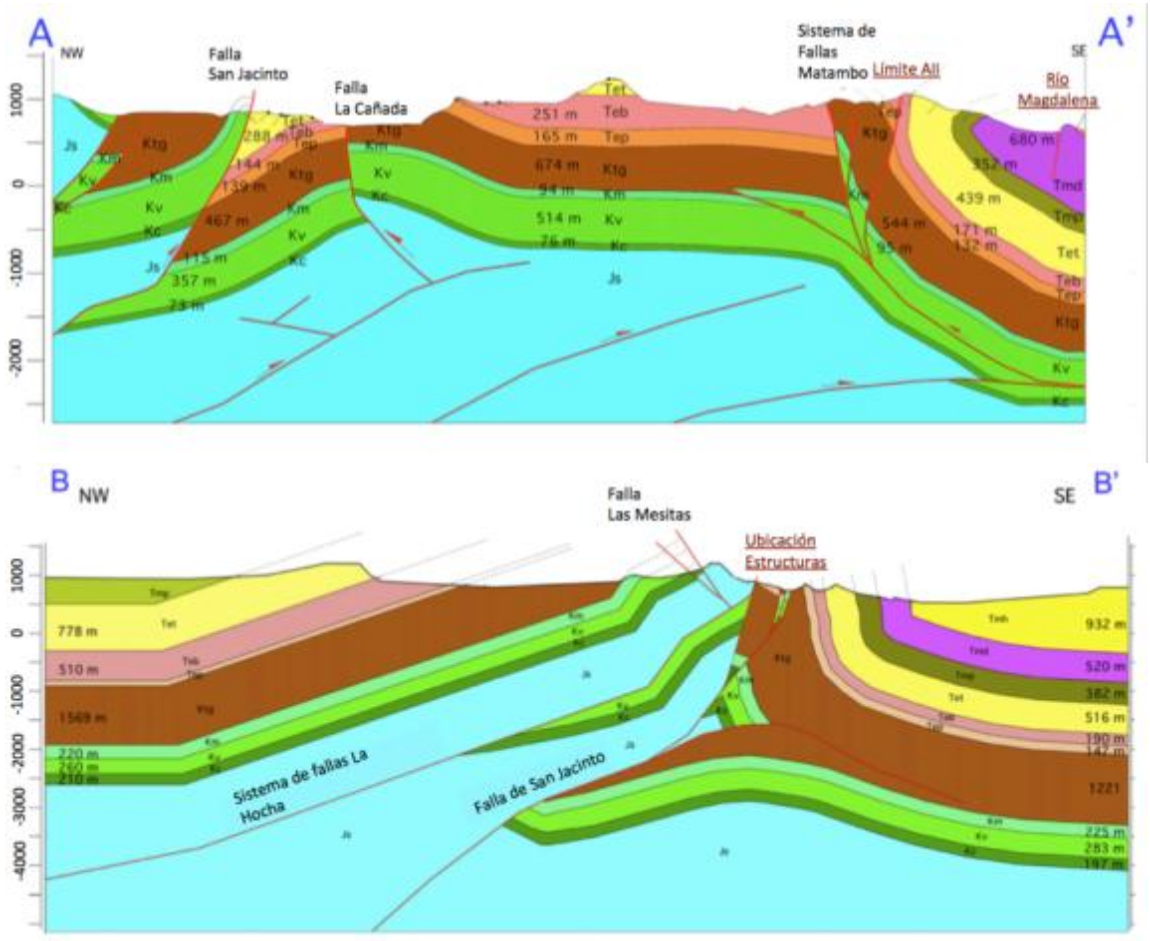


FIGURA 41. INTERPRETACIÓN DE LÍNEAS SÍSMICAS UBICADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: MODIFICADO DE JIMENEZ, *E AL,*.2012

De igual forma se puede ver en AA', observando solo la disposición estructural de las capas, que ellas facilitan el flujo y la recarga en el AII hacia la cordillera oriental. Aunque el sistema de fallas no tiene una gran resolución y detalle en el valle del río si plantea la necesidad de realizar un estudio más detallado de las estructuras en esta zona en vista de la carga hidráulica generada por la presa (150m de columna).

Finalmente, a forma de contraste preliminar con este análisis de carácter regional, en el EIA se presenta el índice RQD, el cual da una idea del grado de fracturamiento, ubicado especialmente en la zona de estudio. En las diferentes zonas de estudio se encontró un medio altamente fracturado, con valores de RQD asociados a zonas muy fracturadas, como lo indica el anexo de investigación geotécnica (Anexo 3.2.4 del EIA (2008)), en donde se señala para las perforaciones realizadas en la zona de presa margen derecha y el sitio de máquinas índices menores al 4% y el 6% para cerca del 85% (90m) y 59% (23), lo que indica un medio muy fracturado. Estos índices como los porcentajes de recobro de las represas coinciden con zonas muy fracturadas relacionadas con la alta densidad de líneas identificadas.

Por otro lado, en escala local la orientación el informe EMGESA (2009)[94] indica para las formaciones Gualanday superior (Tgs), Gualanday medio (Tgm) y Honda (Th), que existe un sistema de cuatro discontinuidades, todo esto identificado principalmente por interpretación superficial y datos de las galerías exploratorias. En general del macizo rocoso se tiene J1 con orientación 10-20/80-90, J2 con orientación 260-280/ 70-80, J3 con orientación 280-300/ 70-80, J4 con orientación 200-210/ 80-90, de las diaclasas se menciona en general que son ligeramente abiertas a abiertas con espaciamiento que oscila entre 0.6 a 1m para J1-J3 y mayores a 1 m para J4. En este aspecto no se tiene certeza sobre el condicionamiento de las fracturas a los estratos (posibilidad de generar un volumen elemental de referencia), pero se indica para el sistema J4 la existencia de señales de oxidación, el cual se puede asociar flujo y precipitación de óxido de hierro. De igual forma en el informe se referencia la existencia de zonas de cizalla con espesores entre 10 -50 y tamaños entre 2 a 70 m, muy superiores a los espesores de capas y facilitando la interconexión del medio.

En términos de propiedades hidráulicas los ensayos realizados en EMGESA (2009) señalan valores de 10^{-3}m/s (perforación PT-PA-2) y 1x10-5 m/s (perforación PT-C-1), medios a altos, contrastados con valores bajos a muy bajos en las demás perforaciones. Adicionalmente, los registros de niveles de agua realizados durante la perforación muestran una alta variabilidad en el nivel entre diferentes periodos y diferentes profundidades (Anexo perforaciones EMGESA (2009)).

Esto sugiere que el grado de heterogeneidad del medio generado especialmente por el fracturamiento es muy relevante, en especial por la aparente conformación de zonas de intensa deformación. En este sentido resulta necesario realizar un estudio hidrogeológico detallado. Se sugiere, entonces, para profundidades menores a los 100m realizar una caracterización geofísica de detalle orientada a hidrogeología (métodos eléctricos y electromagnéticos) complementada con secciones sísmicas idóneas en la zona y

[94] EMGESA (2009). Construcción obras civiles principales información de referencia parte 4: Información de geologia y geotecnia para obras civiles principales. Informe de licitación.

caracterización de macizo rocoso. Luego de conocer mejor la disposición de las estructuras será necesario el desarrollo de pruebas hidráulicas de larga duración con pozos de monitoreo, para de esta forma poder entender la interconexión del sistemas.

7.3 IMPACTOS POR CAMBIOS DE NIVEL FREÁTICO: CASOS DE ESTUDIO

7.3.1 Tubificación

La tubificación se produce cuando el flujo de agua subterránea es tal que se produce un arrastre de material fino del cuerpo de la presa o de la fundación hacia el exterior (estribos, conductos aledaños, etc.). En el caso de que la presa no esté diseñada para ello, el arrastre de finos produce disminución de las resistencia del material lo que conlleva a la falla de la presa, la cual bien puede ser en el cuerpo de la presa o en la fundación (ICOLD, 2013)[95]. La USSD (2009)[96] con una base de datos de fallas de presas (1158 datos tomados principalmente en Estados Unidos) muestra, en conjunto con otros tipos de falla típicas como inestabilidad del talud y desbordamiento, que el 50% de las fallas ocurren luego de pasados 50 años de operación siendo la tubificación una de las principales causas. Además, la mayor proporción de fallas ocurren generalmente en los cinco primeros años.

Es de señalar que estos datos tiene un periodo de análisis que va desde los 1850 hasta 1980 principalmente registrados luego de 1900. En este sentido, Foster (ICold, 2013) para la época 1800-1986 con datos del ICOLD, encuentra que de las fallas registradas el 94% corresponde a fallas por erosión, y en particular la tubificación es aproximadamente el 50% de los eventos de erosión. En este sentido es de señalar que para conductividades del orden de 10^{-7} m/s que son las asociadas a la formación Gualanday en el EIA de EMGESA – Ingetec (2008) indican aproximadamente que una gota de agua puede recorrer 3,15m en aproximadamente 1 año, por lo cual el tener unidades con estas conductividades no es garantía de impermeabilidad si se observan las dimensiones de la base de la presa (500m aproximadamente) y su significado en términos de pasivo ambiental.

La segunda causa de falla en presas de tierra y enrocado en los Estados Unidos es debido al flujo de agua el cuerpo de la presa y a la tubificación[97]. Este fue el caso que se presentó en la presa alta y baja de San Fernando. En dicha presa no fue el flujo de agua que se había presentado en la cara aguas arriba de la presa la que llevó a la falla, tras la ocurrencia de un sismo parte de los materiales que conformaban el cuerpo de la presa perdieron resistencia debido a un aumento en la presión de poros y se generó un colapso de grandes magnitudes.[98]

[95] ICOLD(2013), Internal erosion of existing Dams, Levees and dikes, and their foundation
[96] USSD(2009), U.S. Society of Dams, Managing our wáter retención systems.
[97] US Army Corps of Engineers (2004). General Design and construction considerations for earth and rock-fill dams
[98] Gonzalo Castro et al (1971). Steady-State Strength Analysis of Lower San Fernando Dam Slide.

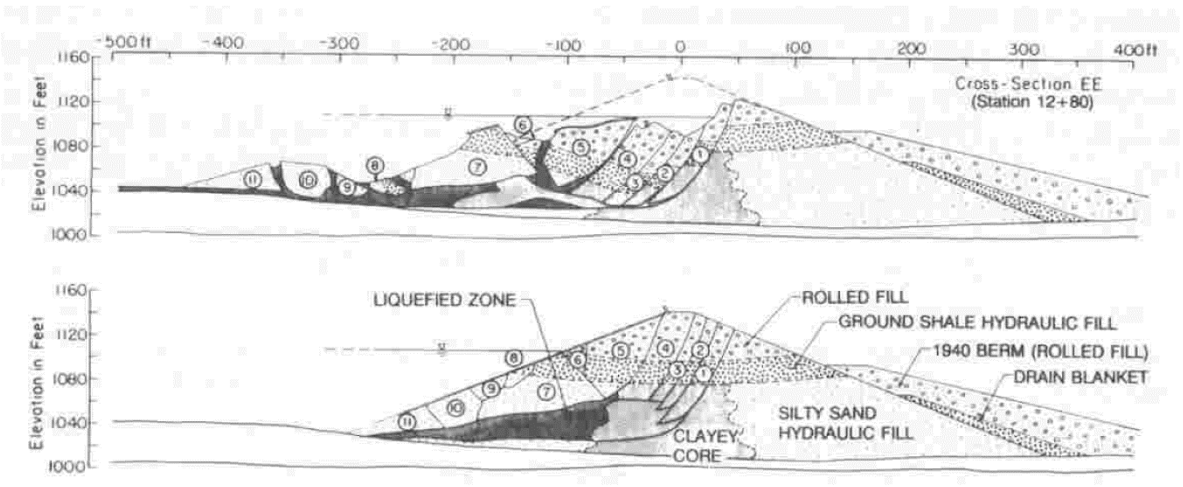


FIGURA 42. ESQUEMA DE LA FALLA DE LA PRESA BAJA DE SAN FERNANDO

En la línea base, en la información referente a geotecnia se hace mención a que no se pudo realizar la revisión de los diseños del cuerpo de presa principal y que por tal motivo no se podía llegar a una conclusión clara respecto a los flujos de agua que se han presentado sobre el cuerpo de la presa. Lo anterior es con el objetivo de llamar la atención en la necesidad de un estudio detallado de lo anteriormente mencionado y que se amplía en la línea base.

7.3.2 Cambios en los niveles freáticos e inestabilidad de taludes

Los cambios en los niveles freáticos generan variaciones en las condiciones de equilibrio del sistema: de una parte se tiene un incremento de las presiones internas por aumento de la columna de agua y por otra cambio en las propiedades mecánicas, generando así disminución del factor de seguridad y por tanto posibilidad de deslizamiento de los taludes o activación de procesos morfodinámicos. En este proceso las propiedades mecánicas del subsuelo, ángulo de fricción interna y cohesión, son modificadas de acuerdo a la humedad del suelo. En la siguiente figura se muestra el comportamiento de estas propiedades en función del contenido de humedad (Zhang et al., 2012)[99] .

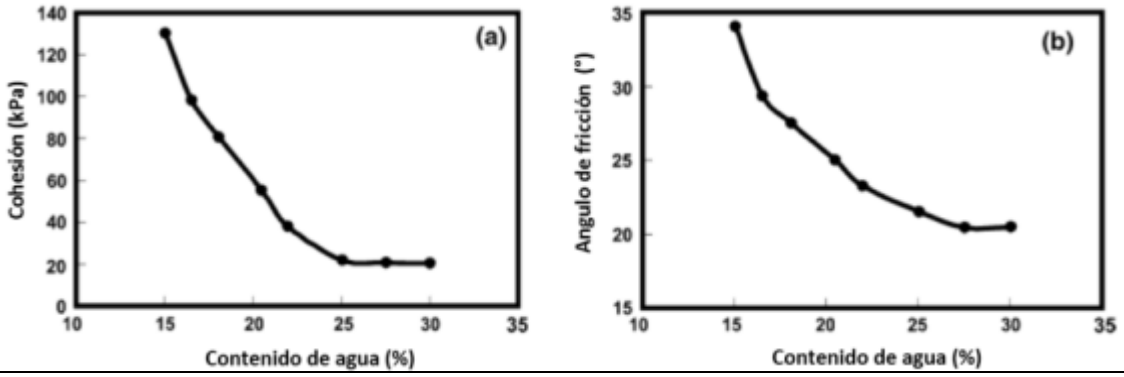


FIGURA 43. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD. FUENTE: MODIFICADO DE ZHANG, *ET AL.*, 2012

[99] Zhang et al.(2012), Impact of reservoir impoundement-caused groundwater level changes on regional slope stability: a case study in the Loess Plateu of wetern China. Environ Earth Sci. 1715-1725.

Entre los casos de estudio más notables se encuentra el del embalse de Vaiont en 1963 en el norte de Italia que generó un efecto en cadena. Inicialmente se desencadenó el deslizamiento, luego la masa deslizada generó un tsunami, y finalmente el tsunami sobrepaso la presa. Afortunadamente esto no causó la falla. El volumen de masa desplazada fue de $2{,}6x10^8$ m^3 y el movimiento tomó 45 segundos entre su inicio hasta que la masa chocó con la cara opuesta del embalse (Ward & Day, 2010)[100]. Un proceso similar o inducido por los cambios del nivel freático fue reportado y analizado por Zhang et al. (2012) en el embalse Hongzhuang (China), donde se dio la reactivación de un proceso ubicado fuera de la cuenca del embalse, sin embargo, la interconexión de cuencas permite el accenso del nivel freático en un deslizamiento inactivo (Zhaojiaan ubicado fuera del embalse) teniendo como resultado la activación del proceso morfodinámico.

Por otro lado, el abatimiento del nivel freático de forma rápida genera un cambio en la presión de poros, esto se ve ligado con dos procesos, de una parte la consolidación del material y el cambio de las condiciones de esfuerzos a condiciones no drenadas, en este caso la resistencia del material disminuye y el cambio en las propiedades depende de la velocidad con que se cambia el nivel del embalse, en donde el proceso es de especial interés en suelos con presencia de material arcilloso (Berilgen, 2006[101]; Badillo y Rodríguez,1997[102]). En general se encuentra reducción del factor de seguridad para taludes en donde, además del cambio en las propiedades mecánicas, se tiene un aporte en la presión por el flujo inducido. De tal forma que además de un análisis cuidadoso en condiciones estáticas es necesario considerar los cambios en las propiedades mecánicas al generarse cambios súbitos en el nivel del embalse. Algunos casos, principalmente registrados en E.E.U.U. por vaciado rápido son la represa de Pilarcitos al sur de San Francisco, Walter Boudin en Alabama (Berilgen, 2006).

7.3.3 Sismicidad inducida por hidroeléctricas, asociado al flujo preferencial en medios fracturados o calcáreos.

Numerosos casos en China y Brasil muestran que la sismicidad inducida por el llenado de embalses está asociada a diferentes causas, entre las principales se encuentran la geología, la hidrogeología y las fallas geológicas presentes en la zona. Algunos ejemplos de sismicidad inducida son en el embalse de Xinfengiiang, Shenwo, Dahua, Shengjiaxia, entre otros en China (Chen & Talwani, 1998), y Tucuruí, Balbina, Miranda, Yaguari, Grande, entre otros en Brasil (Assumpção, et al., 2002). En el caso de China se encuentran rocas calcáreas e ígneas muy fracturadas en la zona de influencia del embalse. Aunque si bien en la zona se tienen varias fallas cercanas, el principal factor detonante es la geología de la zona, más específicamente los flujos de agua preferenciales y el incremento de presión en los ductos generados en los ambientes kársticos y las fallas. Particularmente para el caso de los ambientes kársticos se tiene el agravante de la disolución de las rocas calcáreas generando colapso de las cavernas y ductos. En estos casos el llenado del embalse fue el detonante principal de los sismos, que se ve reflejado en la correlación que hay entre el incremento de la micro-sismicidad somera en cercanías del embalse y el nivel del embalse en el proceso de llenado, en el

[100] Ward & Day (2010), The 1963 landslide and flood at Vaoint reservoir Italy. A tsunami ball simulation. Ital.J.Geosci.vol 130, No. 1.
[101] Berilgen (2006), Investigation of stability of slopes under drawdown conditions, computer and geotechnics, 34, 81-91.
[102] Badillo y Rodríguez (1997), Mecánica de suelos, Tomo 1, fundamentos de mecánica de suelos. Limusa

caso del embalse Xinfengiiang (China) encontrándose como valor pico un sismo de Ms 6,1 somero (Chen & Talwani, 1998).

En este fenómeno se tienen asociados dos mecanismos de generación: el primero es el incremento de presión de poros generados por el llenado del embalse y los flujos preferenciales producto del incremento de presión, y el segundo es la sobre carga por sí sola. De acuerdo con esto para una evaluación adecuada de los mecanismos de generación es necesario tener un entendimiento de la hidrogeología, la geología y la geomecánica de la zona. Con esta información primaria se puede llegar a disminuir la incertidumbre en la generación de sismos por el llenado del embalse y no el monitoreo una vez se comience con el llenado.

Mayor desarrollo de este aspecto ver el producto “SISMICIDAD NATURAL E INDUCIDA”.

7.3.4 CONSIDERACIONES GENERALES RESPECTO DEL DISEÑO DE PRESAS

Las presas de tierra y enrocado con cara de concreto tienen su origen en California en 1850, en una región minera llamada Sierra Nevada. La experiencia hasta 1960 demostraba que este tipo de presas eran seguras y eran una alternativa económica para la época. Anterior a estas fechas las presas solo no recibían una compactación adecuada y la cara de concreto era obviada, por lo cual se generaban problemas de estabilidad debido a los bajos niveles de compactación y a las presiones generadas por el nivel freático.

Lo anterior generó no solo un incremento en el uso del tipo de presa sino que se empezaron a construir presas de mayor tamaño, las mayores, alcanzando hasta 205 metros de altura.

Las presas de tierra y enrocado con cara de concreto debe tener unas características muy específicas para que su funcionamiento sea el adecuado y para que la técnica tenga su mayor potencial. Todo en función de asegurar las mejores características de funcionamiento y el mejor comportamiento frente a eventos extremos.[103]

En este sentido se han generado múltiples recomendaciones, tanto conceptuales de las especificaciones mínimas a tener en cuenta en los análisis y diseños, como en las consideraciones para la determinación de parámetros y cuantificación de los factores detonantes que pueden afectar las estructuras.

En términos generales las presas de este tipo deben tener en cuenta las siguientes consideraciones al momento de realizar los análisis y diseños.[104]

- Toda la zona del enrocado debe estar aguas abajo de la cara que da con la lámina de agua. Es decir, el enrocado no debe encontrarse en contacto directo con la lámina de agua.

[103] ICOLD. 2004. Concrete face rockfill dams concepts for design and construction.
[104] Cooke, J.B et al. “Progress in Rockfill Dams, discussions and Closure.1986 Journal of Geotechnical Engineering

- El factor de seguridad frente al deslizamiento debe exceder el valor de 7. Esto hace referencia al factor de seguridad del cuerpo de la presa a deslizarse sobre la cimentación.
- Un plinto con un apropiado tratamiento debe conectar la cara de concreto con la cimentación de la estructura.
- Un muro de parapeto en la cresta de la estructura debe construirse de forma tal que genere una zona amplia para la construcción y permite una reducción del volumen de rellenos.
- Siempre y cuando el material de enrocado permanezca seco, los sismos no podrán causar presiones de poros internas.
- Las condiciones de alta resistencia al corte, presión de poros baja, bajos asentamientos bajo fuerzas sísmicas, hacen de este tipo de presas una estructura que es resistencia frente a cargas sísmicas.
- Bajo las anteriores condiciones, el único mecanismo posible de falla es la erosión debido al rebosamiento del embalse. Además, procesos de tubificación en la cimentación es potencialmente un mecanismo de falla que debe ser analizado.
- Como cualquier presa, sus desplazamientos deberán ser monitoreados. De igual forma se deberán controlar las posibles infiltraciones de agua dentro del cuerpo de la presa.

La represa que genera el embalse de El Quimbo es una presa de tierra y enrocado con cara de concreto. La misma solo tiene una cara impermeable la cual se extiende desde la parte alta hasta el plinto en la parte baja. Durante la fase de llenado de la presa se encontraron filtraciones atípicas, con caudales que afloraban en la cara en la presa (cara aguas abajo). Los caudales observados son considerablemente grandes ya que lo típico en presas de éste tipo es que solo se presenten caudales por goteo y la velocidad observada en del orden de metros por segundo. Esto es algo que debería ser evaluado con cuidado, pues si se generó tubificación en el cuerpo de la presa, es un indicio de que el núcleo impermeable puede estar severamente dañado y debido a que las premisas de este tipo de presas es la ausencia de presión de poros interna.

En los diseños revisados no se pudieron identificar los valores del factor de seguridad frente a deslizamientos de la base. Tampoco se obtuvo los valores de capacidad portante que la unidad de roca que corresponde a la cimentación. En este sentido, no se logró identificar un modelo hidrogeológico que cuantificara de forma clara los caudales de infiltración, o goteo esperados.

Lo anterior consiste en grandes falencias en el diseño u omisiones al momento de realizar los análisis pues las premisas previas al diseño de estanqueidad sobre la cara de concreto de la presa. Ya que se supone que la cara consiste en un límite impermeable, el agua infiltrada pude ser debido a daños sobre la estructura de concreto, el plinto o infiltración en la cimentación de la estructura, en cualquiera de los casos problemas que deben ser descartados o controlados ya que éstos son las casusas más comunes de falla en este tipo de presas.

Análisis de Estabilidad

Los análisis de estabilidad de la presa comprenden tres frases. La primera correspondiente a la determinación de los parámetros de diseño (propiedades de los materiales, influencia del agua influencia del sismo), la segunda fase corresponde al tipo de análisis más apropiado para definir la geometría de la obra (análisis pseudoestáticos o análisis es esfuerzo deformación) y la tercera fase es correspondiente a fase de construcción y control posterior, en ésta última etapa se deben asegurar que las premisas de diseño se cumplen. En esta última etapa la instrumentación es de vital importancia pues es ésta la que permite conocer la veracidad del diseño y el seguimiento continuo de las condiciones de la presa.

En los siguientes numerales se comentarán las recomendaciones que ICOLD consigna en "Concrete face rockfill dams concepts for design and construction" respecto a los parámetros de resistencia en materiales granules compactados (materiales típicos en este tipo de presas) y a la determinación del sismo de diseño y más específicamente al valor de aceleración que se deben utilizar en los análisis.

Parámetros de resistencia en materiales granulares compactados

En términos generales, una buena gradación en el material que conformará el cuerpo de la presa asegura mayores valores de resistencia y en el mismo sentido si las gravas que conforman el material corresponden a bloques de roca con resistencias altas, el valor de resistencia obtenido se aumenta.

Para valores de esfuerzos normales por debajo de 70 kPa, el ángulo de fricción interna de los materiales es de 45° y puede llegar hasta 60° (éstos últimos para materiales de alta densidad compuestos de partículas fuertes y con mezclas bien gradadas). Además, El valor del ángulo de fricción se reduce del orden de 6° a 7° por cada 10 veces que el esfuerzo normal sobre la superficie de falla se incrementa.

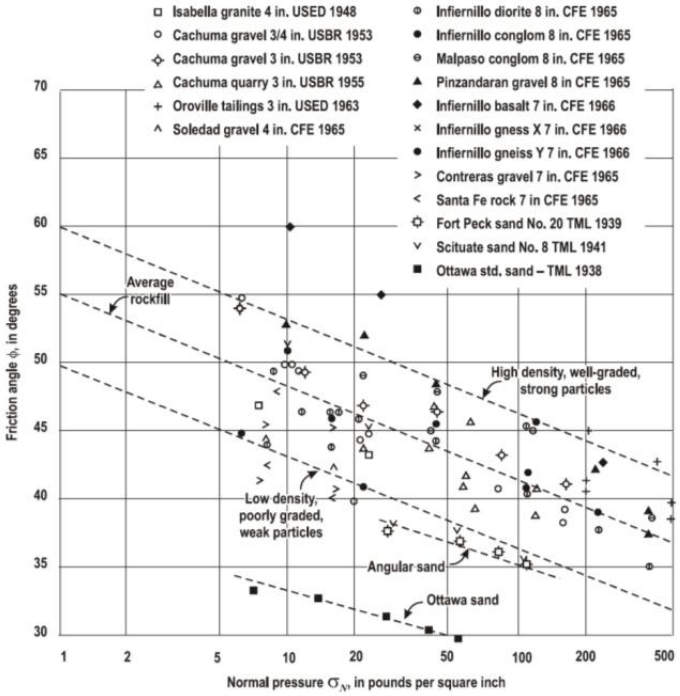


FIGURA 44. RESISTENCIA AL CORTE EN ENROCADOS. DATOS OBTENIDOS DE TRIAXIALES DE GRAN TAMAÑO [105]

Hay que recordar que la presa del Quimbo tiene una altura de 152 metros de altura. Con un peso unitario del suelo promedio de 22 kN/m2 para alturas mayores a 50 metros el valor del esfuerzo normal esperado es superior a 150 PSI. En la anterior figura, en cuyo caso los valores de menor resistencia se encuentran entre 200 y 500 PSI el valor del ángulo de fricción tiene una media que varía entre 40° y 37°. Hay que recordar que en los parámetros de análisis de la presa, en los presentados en los informes se mencionaron valores entre 35° y 45°. Como se observa el límite que la literatura menciona es mucho más reducido y se cree conveniente la ejecución de ensayos para la verificación de estos valores con los que realmente tienen los materiales que conforman el cuerpo de la presa.

Recomendaciones para la determinación de los valores de aceleración sísmica

La presa de Zipingpu se encuentra ubicada en la República Popular de China. Ésta controla el curso del río Min y forma un embalse, que en su altura máxima llega a tener 156 metros. La presa sobre el río Min es una presa de tierra y enrocado con una cara de concreto, su altura total es de 156 metros y tiene una longitud de 663 metros.

En mayo del 2008 se presentó el terremoto de Wenchuan con una magnitud de 8,0. Ésta presa es la primera de su tipo, con alturas sobre los 150 metros, en experimentar un sismo superficial considerablemente fuerte. La máxima aceleración utilizada en los diseños fue de 0,26g. El máximo valor de aceleración registrado en la cresta fue de 2,0g,

[105] Leps T. (1970) Reviw of shering strength of rockfill. Journal of soil mechanics and foundation división, ASCE.

de lo cual se estima que la aceleración en la base de la presa fue alrededor de 0,50g"[106] Los daños en la presa fueron atenuados debido a que la dirección principal de sismo no se presentó en la misma dirección del río.

Este tipo de casos, donde se subestima la intensidad con que se puede presentar un sismo y de qué forma éste afectará la estructura de presa es una práctica común en presas de gran altura. La práctica típica es que se suponga que por la estructura granular de la presa el sismo se disipará y la aceleración que experimentará será menor a la que se usa en los modelos.

En este sentido ICOLD da las siguientes recomendaciones que deberían tomarse en cuenta en cada uno de los casos que se exponen a continuación.

Máximo Sismo Creíble (MCE) Es el sismo de mayor magnitud que de forma razonable se podría presentar en la zona. Hay que tener en cuenta que dicho sismo podría ser producto de posibles fallas que deben ser reconocidas y estudiadas.

Máximo Sismo de Diseño (MDE). Corresponde al máximo nivel de movimiento del suelo para el cual la presa deberá ser analizada. Típicamente, para presas cuya falla represente la posible pérdida de vidas, el sismo de diseño será igual al máximo sismo creíble.

Sismo Básico Operativo (OBE) Represente el nivel de movimiento del terreno en el sitio de presa como resultado, solamente para que se generen daños menores o aceptables. USCOLD define este sismo como el que presenta un 50% de probabilidad de ocurrencia en 100 años.

Cuando se conoce bien la geometría de las fallas y su actividad sísmica asociada, se deberá usar métodos determinísticos para el cálculo del MCE. En sitios donde hay desconocimiento de la actividad sísmica, una probabilidad anual del orden de 1/3000 a 1/10000 recomienda el Comité estadounidense para grandes represas (USCold por sis silgas en inglés) para el cálculo del valor de MCE (USCold, 1999). Para proyectos clasificados como de alto riesgo, un periodo de retorno de 10 000 años se remienda para el diseño, esto corresponde al 1% de probabilidad de excedencia en 100 años.

Como se observa, las recomendaciones van dirigidas al correcto estudio de la sismicidad de la zona de estudio, no solo en campo cercano sino en campo cercano. El correcto estudio de las estructuras de fallas, su actividad sísmica y, muy importante y en todo caso indispensable, el levantamiento en campo de los rasgos estructurales de las fallas identificadas, es indispensable para determinar los valores de MCE, MDE y de OBE.

En suma, la recomendación más importante es que, tras la determinación de los valores antes mencionados, si la falla de la presa podría significar la pérdida de vidas, no se deben tomar reducciones al momento analizar la influencia de la aceleración sísmica en los modelos. Es más, las recomendaciones van mucho más allá, el uso de periodos de retorno de 475 años se cambia por valores del periodo de retorno de 10 000 años (para el caso en que el proyecto se califique como uno de alto riesgo)

[106] Jian-Min et al. (2014). Geotechnical aspects and seismic damage of the 156-m-high Zipingpu concrete-faced rockfill dam following the Ms 8.0 Wenchuan earthquake-

7.4 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

7.4.1 Exposición

De acuerdo con el numeral 10, artículo 3, Ley 1523 de 20129: **"***Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza".*

En este sentido, para establecer la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos, localizados dentro del área de afectación hipotética de inundación, es necesario realizar un inventario y caracterización en campo o contar con información proveniente del expediente ambiental del proyecto.

Como resultado se encontró que los municipios que se verían expuestos a un evento de inundación súbita, considerada la falla en cadena de los embalses del Quimbo y Betania, son Tesalia, Potrerillos, Hobo, Yaguará, Palermo, Rivera y Neiva, los cuales no se encuentran incluidos en su totalidad dentro del área de influencia directa del proyecto, por lo tanto carecen de identificación y caracterización social.

7.4.2 Vulnerabilidad física

De acuerdo al *"Plan de Contingencia Quimbo – Betania Revisión A. Volumen 1 de 1, Documento No. Qi-ITE-02k-001*", de octubre de 2015, la infraestructura expuesta considerada por este estudio, localizada en los municipios Campo Alegre, Palermo, Rivera Neiva, Aipe, Tello y Villavieja son:

- ***Vías e infraestructura***

De vías tipo 1, se cuenta en el contexto local con un total de 24230,1 metros, tipo 4 de 1552,3 m, tipo 5 es de 17270,4 m y tipo 6 de 19122,4 m. La mayor amenaza de afectación de la infraestructura vial se registra en el municipio de Neiva con 23887,3 m, seguido de Palermo con 10787,8 m, Campoalegre 4727,3 m, Rivera 4583,3 m y Villavieja 4582, 6 m.

> *"(…) en Puerto Seco se identifican redes de acueducto y líneas de energía de baja tensión, así como una escuela. También se registran establecimientos comerciales como restaurantes que atienden a los viajeros ocasionales y a los residentes de la zona, sosteniendo la economía local".*
>
> *"A la altura del municipio de Yaguará se localiza un puente y una torre de comunicaciones. De acuerdo con interpretación de fotografías de la zona, se registran 11 torres y aproximadamente 4 líneas de energía".*

- ***Áreas productivas en el área de influencia***

"El área rural total que podría afectarse es de 18019,2 Ha, concentrándose en el municipio de Yaguará el mayor número de hectáreas con 4703,52, seguido de Neiva con 3278,1 Ha, Campoalegre 2493,9 Ha, Villavieja 2336,39 Ha y Palermo 2004,1 Ha".

En este sentido, es importante anotar que el inventario realizado de elementos expuestos fue realizado a partir de información secundaria, de acuerdo a los Planes de Ordenamiento Territorial vigente de los municipios anteriormente mencionados, los cuales fueron realizados en su mayoría entre los años 2000 y 2002, Censo 2005 e información cartográfica vial del IGAC 2015 a escala 1:100.000, por lo tanto no se cuenta con información recopilada en campo, ni con caracterización de los elementos físicos expuestos, como tipo estructural de las edificaciones, clasificación de las edificaciones (vivienda, escuelas, hospitales), inventario de bocatomas o sistema de conducción de agua potable de la población, total de áreas productoras, condiciones de estabilidad y funcionamiento de las vías de acceso y evacuación, entre otros. Estas omisiones en la información generan incertidumbre frente a la cuantificación y cualificación de la infraestructura y en el grado de vulnerabilidad definido por EMGESA en el Plan de Contingencia elaborado en el 2015.

7.4.3 Vulnerabilidad social

El concepto de vulnerabilidad social, permite acercarse a la compresión de los efectos negativos que genera un desastre, no solo en términos de afectaciones sobre la infraestructura localizada dentro del área de influencia del evento o en términos de número heridos, lo cual es el alcance que poseen las metodologías de análisis de riesgo convencionales donde se considera la vulnerabilidad solo en términos físicos (infraestructura), sino que adicionalmente, determina esencialmente los impactos que se generan durante y posterior a la emergencia.

En este sentido, la vulnerabilidad social permite acercarse a la comprensión, la cuantificación o la cualificación de:

a) La influencia parcial de las inequidades sociales,
b) La capacidad de respuesta de la población y las entidades,
c) La vulnerabilidad diferencias entre la población urbana o social,
d) La dependencia del género. Estudios demuestran que las mujeres toman un mayor tiempo en recuperarse frente a un evento de desastre que los hombres, como consecuencia de las oportunidades de empleo que se generan posterior al evento, sumado a la responsabilidad del cuidado y alimentación de los miembros de la familia, que poseen las mujeres tradicionalmente,
e) La dependencia del nivel de ingresos de la población rural, como consecuencia de sus bajos ingresos y de su dependencia a actividades primarias de producción (agricultura). En cambio, altas densidades en área urbanas pueden generar problemas en términos de evacuación y la ausencia de un tejido social,

Por otra parte, los efectos generados por un desastre pueden ser definidos como tangibles o intangibles, como se describe a continuación:

TABLA 18. EFECTO DE DESASTRES NATURALES SOBRE EL BIENESTAR SOCIAL Y ECONÓMICO[107]

Consecuencias	***Medida***	***Pérdidas***	
		Tangibles	***Intangibles***
Muertes	Número de personas	Pérdidas económicas de las	Efecto psicológico y

[107] Ademola A. et al., (2016). Effects of natural disasters on social and economic well-being: A study in Nigeria. International Journal of Disaster Risk Reduction 17 (2016) 1-2.

Consecuencias	Medida	Pérdidas	
		actividades individuales	social en la comunidad
Heridos	Número de heridos de gravedad	Necesidad de tratamientos médicos, pérdida temporal de las actividades económicas individuales.	Pena social y psicológica y reconocimiento.
Daños psicológicos	Inventario de daños a elementos de acuerdo con el nivel de afectación.	Costos de remplazo y reparación.	Perdidas culturales
Operación de emergencia	Volumen de trabajo, días laborales, equipos y recursos	Costos de movilización, inversión en capacidad de preparación.	Estrés y trabajo en exceso relevando a los participantes
Interrupción de la economía	Número de días labores; volumen de pérdidas en la producción	Valor de las pérdidas en la producción	Oportunidades, competitividad y reputación.
Interrupción social	Número de personas desplazadas, personas sin hogar	Albergues temporales, producción económica, moral de la comunidad.	Cohesión, contacto social, bienestar social y psicológico.
Impactos ambientales	Escala y la severidad	Costos de limpieza y restauración.	Generación de posibles desastres y riesgos sobre la salud.

Frente a este tema, el Plan de Contingencia de Emgesa (2015)[108], determina que el número de habitantes localizados en el área de influencia frente a una falla del sistema Quimbo – Betania es de 310.663 habitantes, como se cita a continuación:

> *"5.2.2.2.1 Localización de la población en el área de influencia de las Centrales Quimbo -Betania"*
>
> *"Se estima que en las veredas dónde jurisdiccionalmente se localizan las áreas susceptibles de amenaza por inundación hay una población de 310663 habitantes y que aproximadamente el 19,6% de ésta, es decir, cerca de 60995 personas estarían expuestas a dicha amenaza ante la eventualidad que se presentara la creciente máxima probable del proyecto hidroeléctrico Quimbo, lo que equivale a 15260 familias y el mismo número de viviendas, teniendo en cuenta que la tendencia regional es de una familia por vivienda. En la Tabla 5.16 Se presenta la distribución de la población expuesta a inundación por la CMP". (Página 72)*

De acuerdo con lo anterior, es importante anotar que, dichos datos fueron obtenidos a partir de información secundaria, como lo demuestra la falta de datos relacionados con el censo o caracterización realizada en terreno. Adicionalmente, no se presenta a lo largo del documento caracterización del tejido social, género, edad, condición rural o urbana, las cuales se consideran como características mínimas para el análisis de vulnerabilidad social frente a este tipo de eventos.

[108] Emgesa – Ingetec (2015). Plan de Contingencia Quimbo – Betania Revisión A. Volumen 1 de 1, Documento No. Qi-ITE-02k-001", de octubre de 2015

Finalmente, frente al estado del tejido social, el cual determina la capacidad de respuesta y recuperación de una comunidad durante y después de un desastre, es fundamental llamar la atención frente al fenómeno de desplazamiento y reubicación de familias y comunidades localizadas dentro del área de influencia definida en el EIA presentado por Emgesa - Ingetec (2008) del proyecto, lo cual sugiere la necesidad de la reconstrucción de esta función social, entendiendo principalmente el contexto rural característico de esta zona.

Por lo anterior, se considera que el grado de vulnerabilidad es alto, dado el nivel de incertidumbre que existe frente a su caracterización.

7.5 CONFIGURACIÓN DEL RIESGO

Como resultado de la caracterización de amenaza y vulnerabilidad (física y social) descrita anteriormente, se puede concluir que el nivel de riesgo de desastre por falla súbita de la presa y obras principales a que se ve expuesta la población y ecosistemas aguas abajo del proyecto hidroeléctrico el Quimbo es ALTO.

De acuerdo con el Plan de Contingencia 2015, estos son los escenarios de riesgo planteados por proyecto:

Escenario	**Plan de Contingencia 2015 Numeral 5.3.**
Sísmico	"*Tiene una **muy baja probabilidad** de ocurrirse y caso de presentarse sismos de magnitud inferior al de diseño, no se presentarían emergencias que afecten zonas aguas debajo de las centrales ya que disco riesgo fue mitigado en etapa de diseño en ambos casos."* *"En caso de ocurrirse un sismo de magnitud mayor a la del sismo de diseño no se espera una falla de las presas del sistema, ya que podrían tener fallas, pero no colapsar".*
Disminución en la disponibilidad hídrica	*El embalse de Betania cuenta con volúmenes de espera que reduciría las afectaciones esperadas por crecientes naturales.* Nivel de riesgo 4.
Crecientes con periodo de retorno < 100 años	*Esperarse afectaciones iguales a las que se darían en crecientes naturales incluidas la Creciente Máxima Probable.* Nivel de riesgo 3.
Crecientes con periodo de retorno > 100 años y < a 1000 años	*Las reglas de operación de las compuertas del vertedero permitirán el paso de las crecientes por el embalse y el vertedero sin amplificar los caudales afluentes, por lo que pueden verse afectadas el mismo número de veredas en los municipios localizados entre Quimbo y Betania (13 veredas), pero obviamente a medida que se incrementa el periodo de retorno se incrementan las áreas afectadas.* Nivel de riesgo 4.

Escenario	Plan de Contingencia 2015 Numeral 5.3.
Creciente máxima probable	*En ningún caso el tránsito de crecientes en los embalses de Quimbo y Betania amplificará los caudales afluentes naturales, por lo que no se producirían afectaciones superiores a las que se presentarían sin la presencia de los embalses.* *El vertedero del embalse del Quimbo tiene capacidad para transitar una creciente de 18817 m3/s, mientras que el vertedero del embalse de Betania tiene capacidad para una creciente de25317 m3/s.* *Se esperaría que en caso de ocurrirse puedan afectar un total de 35 veredas de los municipios del Huila localizados aguas bajo del embalse de Quimbo y municipios de otros departamentos localizados más aguas abajo.* *cabe aclarar que la ocurrencia de la CMP o crecientes superiores es bastante improbable, en caso de ocurrirse las afectaciones serían muy altas, lo que se refleja en un nivel de riesgo 5*
Falla o rompimiento de alguna de las presas o diques del sistema Quimbo - Betania	*"Tiene una probabilidad muy baja de ocurrir, es decir, es extremadamente remota debido a que los criterios de diseño y construcción de este tipo de obras hace que no se admitan fallas aunque se superen los parámetros de diseño.*

De acuerdo con lo anterior, es importante mencionar que a pesar que el Plan de Contingencia presentado por Ingetec en el año 2015, presenta mejoras significativas frente a la información presentada en el EIA 2008, por el cual se otorga la licencia ambiental al proyecto hidroeléctrico El Quimbo, aún se presentan las siguientes debilidades:

a. Incluye el análisis realizado en el EIA 2008 de la línea base y diseños, razón por la cual, en el Plan de Contingencia 2015, persisten las incertidumbres identificadas a lo largo del presente documento.

b. Dentro del análisis de población, no se consideraron aspectos necesarios para el análisis de vulnerabilidad social como género, edad, rural o urbano.

c. Aunque plantea niveles de emergencia (verde, amarilla, naranja, roja), no se incluye los tiempos de respuesta y las acciones de evacuación que deben realizarse.

d. No menciona, la localización de albergues temporales o puntos de encuentro.

e. Carga de la mayor responsabilidad a las entidades territoriales para la toma de decisiones y acciones de contingencia bajo un nivel máximo de alerta, sin evaluar la capacidad de las entidades de asumir dicha responsabilidad.

Por tal razón, es necesario recordar que todo proyecto de infraestructura de este tipo posee un riesgo inherente, el cual es necesario gestionar y manejar con los diferentes actores, con el fin de prevenir y preparar a la población y entes territoriales frente un potencial desastre, como lo indica el ciclo de la gestión de riesgo de desastre.

En este sentido, de acuerdo con el Artículo 42 de la Ley 1523 de 2012, los responsables de realizar los Análisis específicos de riesgo y planes de contingencia, son entidades públicas o privadas encargadas de la prestación de servicios públicos, como se describe a continuación:

> *"Artículo 42. Análisis específicos de riesgo y planes de contingencia. Todas las entidades públicas o privadas encargadas de la prestación de servicios públicos, que ejecuten obras civiles mayores o que desarrollen actividades industriales o de otro tipo que puedan significar riesgo de desastre para la sociedad, así como las que específicamente determine la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, deberán realizar un análisis específico de riesgo que considere los posibles efectos de eventos naturales sobre la infraestructura expuesta y aquellos que se deriven de los daños de la misma en su área de influencia, así como los que se deriven de su operación. Con base en este análisis diseñará e implementarán las medidas de reducción del riesgo y planes de emergencia y contingencia que serán de su obligatorio cumplimiento".*

f. No incluye las acciones necesarias a ser realizadas por las entidades competentes después de la vida útil del proyecto.

g. No estipula compensaciones de tipo económico, social y ambiental que debería realizar EMGESA frente a una posible falla del sistema en cualquiera de los niveles establecidos en el Plan de Contingencia. Lo cual es vita, considerando que entre las estrategias que plantea el Plan de Contingencia 2015, es abrir compuertas frete a una creciente que supere la capacidad del embalse ya sea en Quimbo o Betania, lo cual, aunque es una práctica común en este tipo de proyecto, lo es igualmente establecer las medidas de compensación frente a los daños generados por la inundación por ejemplo de tierras productivas aguas debajo de estos sistemas.

h. A lo largo de los documentos evaluados no se realiza una cuantificación de los daños generados en los diferentes niveles de alerta para los municipios, aspecto fundamental para la toma de decisiones.

7.6 IMPLICACIONES EN LA GESTIÓN DEL RIESGO EN EL TERRITORIO

Ver el producto "REVISIÓN PLANES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LOS MUNICIPIOS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL QUIMBO"

8 CONCLUSIONES

Los casos de la falla de presas de tierra no son de carácter excepcional cuando se revisa la documentación técnico-científica internacional. Para 2007 se habían registrado cerca de 400 casos, con un porcentaje de problemas cercano al 30% en los primeros 5 años.

Los proyectos hidroeléctricos y más específicamente, los proyectos del Quimbo se enmarcan dentro de la normativa vigente que rige a todas las obras de infraestructura que se lleven a cabo en el país. Por tal motivo, si bien la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales emite un decreto donde enumera unos mínimos a cumplir, éstos por si solos no se consideran suficientes para el cumplimiento de la normativa colombiana.

En Colombia se carece de una norma técnica específica que reglamente los mínimos necesarios para garantizar la estabilidad y funcionalidad de las grandes represas así como una Autoridad a nivel nacional que posea el conocimiento técnico para la evaluación de la misma.

Los estudios geológicos son precarios en términos de las escalas de trabajo usadas y de la densidad de información recopilada. No cumplen con las exigencias de los términos de referencia expedidos por la autoridad ambiental. La delimitación de unidades geológicas y de columna estratigráfica es de menor detalle que los estudios regionales publicados por la autoridad geológica.

En el componente geológico no se adjunta la información metodológica que permita definir con que rigor se realizaron los planos geológicos adjuntos p.ej. para el trabajo de campo, no se reporta ni el total ni la ubicación de las estaciones de control, tampoco los parámetros evaluados en cada una de ellas ni perfiles geológicos que son usuales en cualquier estudio.

No se presentan caracterizaciones litológicas del mismo grado de detalle para todas las unidades que afloran a lo largo del embalse. La descripción más completa corresponde a la de la Formación Gualanday superior dado que sobre esta se construyeron las principales estructuras del proyecto, sin embargo para algunas formaciones como Gigante y Gualanday medio, la información suministrada se considera bastante precaria, pues no hay ensayos de campo (martillo Schmidt, penetrómetro de bolsillo, etc.) ni tampoco de laboratorio de ingeniería (compresiones inconfinadas, triaxiales, cortes directos, etc.).

Todas estas omisiones en la caracterización de las unidades de roca y depósitos generarán grandes incertidumbres en los componentes geotécnico e hidrogeológico, los cuales a su vez producen deficiencias en el diseño y construcción que pueden llevar incluso a fallas o accidentes en la represa.

La caracterización de macizo rocoso es muy precaria, aun cuando se anota por parte de EMGESA – Ingetec (2008) que utilizan la clasificación de Bieniawski, no se mencionan cuáles son las características y el peso dado para las diferentes familias de discontinuidades en este nivel rocoso. Dicho parámetro faltante resulta ser el de mayor peso en esta metodología cuando se evalúan taludes, por lo que se considera que lo consignado en el EIA es incompleto y que la calificación no da ninguna garantía de su veracidad.

La falta de caracterización de macizo rocoso en las unidades y áreas del proyecto y la deficiencia en la información mostrada para los niveles rocosos en los que se pretende explotar material de construcción, llevan a considerar que los cálculos de seguridad que se hayan hecho puedan estar incompletos o tener resultados erróneos, lo cual puede incidir en la estabilidad de cada una de las obras del proyecto, incluida la presa y el dique auxiliar.

Es evidente la ausencia de estudios mineralógicos de arcillas en la zona del proyecto, tanto en el EIA como en los diferentes complementos y estudios técnicos llevados a cabo por EMGESA y que sean de carácter público, por lo cual no es posible la identificación de este tipo de minerales en los materiales que fueron usados para la construcción de la presa, dique auxiliar y demás obras, o sobre los cuales estas mismas estructuras fueron construidas.

En términos generales la exploración del subsuelo para el diseño y construcción de las estructuras del proyecto se considera suficiente, no obstante es necesario que se adjunten los soportes de los ensayos realizados en campo: Líneas de fracción sísmica y ensayos de permeabilidad

No se presenta un análisis geotécnico suficiente de capacidad portante, no se presentan los factores de seguridad correspondientes ni los análisis de deformaciones esperados en ninguna de las estructuras del proyecto.

El proyecto hidroeléctrico está constituido por cinco estructuras que se consideran neurálgicas para el funcionamiento del mismo. Estas obras deberán cumplir a cabalidad con la normativa respecto de la exploración del subsuelo, ensayos de laboratorio realizados para la caracterización de los materiales y análisis mínimos requeridos. En los numerales donde se evalúa la complejidad de cada una de las estructuras se generaron unas cuantías mínimas, que al compararlos con las que se encuentran en los documentos entregados a la Agencia Nacional de Infraestructura, no cumplen con los mínimos requeridos para este tipo de obras.

Existieron irregularidades en el proceso de aprobación y ejecución de la extracción de materiales de construcción, en particular por su ubicación dentro del cauce del río Magdalena. No obstante lo anterior, la ANLA aprobó la explotación del área 22. Por otro lado, a pesar de que ANLA aprobó 16 polígonos para la extracción de materiales de arrastre y cantera, al colocarse dichos polígonos sobre el Google Earth® se observa que aunque todos se encuentran dentro del contrato de concesión mencionado previamente, existen áreas aguas abajo de la confluencia del río Páez y Magdalena que aparentemente fue intervenida para extracción de materiales en particular de cantera (roca) dada su localización sobre las laderas y algunas estructuras que se identifican difusamente en la imagen satelital (taludes y bermas). Lo anterior implicaría un incumplimiento por parte de la empresa en relación a los permisos otorgados por ANLA.

En lo referente a los ZODME, Si bien dentro de los planes de manejo de los depósitos 10, 18 y 24 están consideradas obras de manejo de agua superficial (cunetas principalmente) dado que todas se encuentran sobre 3 cursos de agua o más, la ausencia de la información de diseño de cada una en el expediente de ANLA no permite evaluar la estabilidad de dichas estructuras. En cuanto a la ZODME 4, la cual quedó sumergida en el

embalse, es necesario considerar que fueron dispuestos más de 100.000 m^3 de materiales de excavación y que los diseños debieron contemplar estas condiciones. Sin embargo, al igual que con las ZODMES anteriores, estos diseños se desconocen.

Al revisar el mapa geomorfológico (anexo PL-EIAQ-19-1) este se encuentra en escala 1:75.000 y cubre el área de influencia directa e indirecta, por lo que estaría incumpliendo los términos de referencia que exigen el mapa a una escala de 1:25.000. Presentan también un mapa de zonas inestables (anexos PL-EIAQ-23-A1 y PL-EIAQ-23-A2), a escala 1:25.000, que cubre solo el área de influencia indirecta y presenta las zonas inestables en conjunto con las unidades geomorfológicas. El inventario de las zonas inestables debería incluir el área de influencia indirecta y deberían hacer parte de un mapa de susceptibilidad a remoción en masa.

El inventario morfodinámico hecho es insuficiente, presentan un total de 25 zonas inestables. Según el inventario hecho en google earth, en la zona hay al menos 893 zonas inestables.

En ningún lugar del documento se hace la caracterización morfométrica de las cuencas y microcuencas para evaluar la torrencialidad, así como tampoco se caracteriza la dinámica de cada cauce en términos de su morfología (sinuosidad), caudal, y carga de sedimentos. Esto también fue evidenciado en la actuación especial de la Contraloría del 2014 en donde indican que el estudio de impacto ambiental carece de una caracterización de las amenazas naturales bajo modelación estocástica o probabilística por avenidas torrenciales generado por los deshielos del Volcán Nevado del Huila y por la actividad volcánica del Volcán Sotará, de manera tal que incluya: "*la morfometría de las cuencas, el tipo de lavas (viscosidad, temperatura, etc.) y procesos de remoción en masa que se puedan genera".*

La caracterización hidrológica para el AID presentada por EMGESA presenta serias falencias puesto que incumple con los requerimientos mínimos exigidos por los Términos de referencia. En lo que concierne a las corrientes y sus cuencas asociadas presentes en el AID no se presentan a caracterizaciones morfométricas e hidráulicas (caudales máximos, medios y mínimos), por lo tanto se tienen grandes incertidumbres relacionadas con la clara identificación verídica de los impacto ambientales y por consiguiente el plan de manejo.

En cuerpos de agua lóticos y lénticos no se puede determinar la escala de trabajo asociada, lo cual genera grandes incertidumbres asociados a los cuerpos que efectivamente se van a impactar con la implementación del proyecto hidroeléctrico.

Para la mayoría de los análisis de variables hidrológicas y climáticas se presentan análisis de tipo puntuales, con lo cual no se puede realizar una caracterización representativa considerando que estas variables son susceptibles a presentar variaciones espacialmente considerables. Para evaluar de manera consistente las variaciones climáticas es necesaria espacializaciones para el AID y el AII.

No se realizan análisis de variabilidad climática, cambio climático, modulación climática por fenómenos atmosféricos y/o océano-atmosféricos (p. ej. ENSO, QBO, entre otros) lo

cual es fundamental para tener conocimiento en cuanto a la comprensión de la hidrología local y regional.

En el componente hidrogeológico no se presenta ningún modelo del subsuelo o perfil del terreno de escala regional y local que permita pasar de un modelo escrito a un modelo conceptual y eventualmente a un modelo numérico con capacidad de predicción de los abatimientos y las direcciones de flujo. En muchos casos le descripción meramente cualitativa de los fenómenos se ve afectada por la subjetividad del profesional, incrementado la posibilidad de ignorar impactos o subestimarlos por completo. Además, se basa en un componente geológico absolutamente precario en términos de información sobre porosidad o de análisis de fracturamiento (solamente se tienen pocos datos sobre las fracturas en los registros de perforación) o de la comprensión de la deformación tectónica.

No se encuentra un análisis en conjunto en el aspecto hidrogeológico del efecto asociado de las dos presas más cuando los dos sistemas se encuentran en cercanías de sistemas de fallas (ver análisis densidad de fracturas).

La información de discontinuidades, macizo rocoso y permeabilidades, obtenidas de la caracterización geotécnica y que son fundamentales para el entendimiento de la hidrogeología en medios fracturados, se centra exclusivamente en la ubicación de la presa y no hay ninguna mención a mediciones en el vaso, sitio en el cual se tendrá ahora una carga hidráulica de 150 m.

No se han llevado a cabo pruebas hidráulicas o de caracterización hidráulica en los acuíferos. Por otro lado se señala los acuíferos fisurados como el Guadalupe (Af-kg) y el Caballos, pero los únicos datos de caracterización hidráulica corresponden a la formación Guadalupe pero son tomados de referencias ubicadas en la sabana de Bogotá, lo cual no tiene ningún rigor si no se han tomado datos petrográficos, petrofísicos, geofísicos que soporten esas inferencias.

Para el caso de la Formación Gigante, unidad que constituye la mayor proporción del vaso del embalse, no se tiene ningún indicio de las características hidráulicas y resulta alarmante que no se lleven a cabo caracterizaciones de macizo rocoso en el área de influencia indirecta y que la caracterización se base en las opiniones del profesional en hidrogeología que considera que su capacidad de infiltración es baja (sin un solo dato de sustento) y en una descripción geológica precaria.

No hay datos de capacidad de infiltración del subsuelo, ni validación de zonas de recarga por cruce con información diferente a las litologías como por ejemplo: morfometría, unidades geológicas, deformación tectónica, unidades geomorfológicas, suelos y coberturas vegetales. Con ello se podría estar incumpliendo con el artículo 1° de la Ley 99 de 1993.

No se tiene ningún conocimiento respecto a los niveles freáticos ni piezométricos, ni a las zonas de recarga y descarga, ni la relación entre las aguas subterráneas y la estabilidad en el sector del vaso, ni los caudales que puedan presentarse en los túneles de desviación ni de descarga. Tampoco se conoce de ningún modelo hidrogeológico ni red de flujo en la zona de presa, lo cual puede repercutir en no considerar aspectos tan

importantes en una represa como la eventualidad de grandes deslizamientos gobernados por los cambios en los niveles freáticos en las zonas embalsadas (que a su vez puede producir tsunamis en el vaso) o en la predicción de tubificación dentro del cuerpo de la presa, en la interfaz presa-fundación o en las rocas de la fundación.

De los escenarios de riesgo más críticos se consideró en este documento, la falla súbita de las estructuras de contención principal del proyecto hidroeléctrico del Quimbo, el cual a pesar que posee una probabilidad muy baja de ocurrencia de acuerdo a los resultados arrojados por el Plan de Contingencia elaborado por INGETEC- EMGESA 2016, esta probabilidad debe ser reevaluada a la luz de las múltiples incertidumbres identificadas en el este estudio, entendiendo que estas depende la confiabilidad y probabilidad de la falla del proyecto hidroeléctrico el Quimbo.

De acuerdo con la modelación (unidimensional) hidrodinámica del flujo asociado a la eventual ruptura de la represa, realizado de forma aproximada y preliminar a lo largo de este documento, da como resultado un incremento de la lámina de agua entre 15 y 30 m en el cauce del río Magdalena109 con velocidades que oscilan en el rango de 5,86 a 14,16 m/s los cuales son velocidades muy altas en comparación con el promedio mensual multianual que se registra en este tramo del río Magdalena de 1.5-2.5 m/s., adicionalmente se tiene que tener en cuenta el transporte de sedimentos asociado a estas altas velocidades y que consecuencias tendría sobre la represa de Betania.

Los resultados de la simulación para la sección 0 que corresponde a la entrada de la represa de Betania se evidencia que llega en una condición de flujo crítico (Fr=1,0) con una lámina de agua 20 metros aproximadamente por encima del lecho y una velocidad de 9,77 m/s, esto tiene serias implicaciones sobre la represa de Betania y en consecuencia se debe evaluar el comportamiento hidrodinámico de la represa de Betania y su estabilidad. Sumado a ello evaluando la conservación de masa, la represa de Betania no tendría la capacidad para evacuar el caudal asociado a la eventual ruptura de la represa del Quimbo, lo cual tendría una falla de tipo funcional y podría ocasionar inundaciones aguas abajo de la represa de Betania.

Durante el licenciamiento ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo, se carecía de información técnica suficiente en lo que respecta a los diseños (geotecnia) del proyecto hidroeléctrico El Quimbo, que permitiera garantizar la estabilidad y funcionalidad de las obras de acuerdo a lineamientos internacionales, ya que no se presentan los análisis de capacidad portante del dique auxiliar ni de los materiales de fundación en la zona de presa.

Para la construcción del proyecto hubo omisión en la presentación de los modelos de flujo de agua subterránea en medios fracturados, toda vez que es evidente que la permeabilidad secundaria domina el flujo en este tipo de medios fracturados. No se presentan los análisis de flujo de agua subterránea para los túneles que se requieren. No se presentan los modelos de pérdidas de agua por infiltración ni tampoco de aporte a acuíferos. No se presentan los análisis de flujo dentro el cuerpo de la presa ni de cómo éstos serán controlados, ni se presentan los caudales esperados debido al flujo de agua

[109] Relación entre profunidad ancho y altura de lámina es mayor en una proporción mayor a 7.

interno y si éstos podrían generar procesos como Tubificación. No se presentan las protecciones en el Plinto contra el flujo de agua subterránea, características de intrusiones de concreto o de una pantalla impermeable para impedir el flujo.

Los principales efectos que podrían generar un escenario de falla del proyecto hidroeléctrico son: Crecientes extremas superiores a las de diseño, filtración de agua en los cimientos – tubificación, inestabilidades geotécnicas dentro del área de influencia del proyecto y fallas por diseños y/o construcciones deficientes.

9 RECOMENDACIONES

De acuerdo con la incertidumbres identificas en los componentes geoambientales (geología, geomorfología, hidrología, clima, hidrogeología) es necesario reevaluar por parte de EMGESA – INGETEC, las condiciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo que se encuentra la población e infraestructura localizada aguas abajo del proyecto, ya que las incertidumbres identificadas son similares a las presentadas en represas que ya han fallado a nivel internacional, de acuerdo con el inventario de colapso de represas realizado en el presente documento.

Es necesario un levantamiento geológico que cumpla con los requerimientos de escala y de calidad (densidad de controles de campo, levantamiento de columnas estratigráficas, recolección de muestras de roca, etc.) que se constituya en una base seria para revaluar los aspectos geotécnicos, hidrogeológicos y de sismogeneración.

Es necesaria la caracterización detallada del macizo rocoso en las unidades del proyecto, lo cual puede llevar a revaluaciones en las obras de infraestructura y en el funcionamiento del propio proyecto.

Teniendo en cuenta las implicaciones ambientales y sociales que podría tener una falla en la presa, el dique auxiliar o cualquiera de las estructuras principales del proyecto hidroeléctrico El Quimbo, es necesario hacer la caracterización mineralógica detallada de los materiales usados para su construcción y asentamiento (porcentaje de fracción arcilla, identificación de minerales arcillosos, capacidad de intercambio catiónico, microsonda electrónica, barrido electrónico, potencial de expansión y expansión de Lambe).

Adicional a esto, con el fin de identificar arcillas expansivas es necesario hacer pruebas de medidas de propiedades físicas como plasticidad, límites de Atterberg, pozo libre y potencial de cambio de volumen (Nelson *et al.,* 2015).

Es necesario un levantamiento geomorfológico serio para evaluar de manera adecuada la amenaza por remoción en masa enfocada tanto a la eventual generación de tsunamis en la zona embalsada como por la generación de sedimentos y su relación con la vida útil del proyecto. De igual manera, es necesario este insumo para evaluar el encadenamiento de procesos relacionados con inducción de deslizamientos y flujos por sismo y la susceptibilidad a procesos de transportes de escombros de alta energía y peligrosidad, de lo cual ya se tienen antecedentes con los sismos de 1827, 1834 y 1994.

Es necesario que se evalúe la amenaza volcánica en relación con la sedimentación en el área embalsada y las eventuales amenazas de flujos de escombros de alta energía sobre los elementos de infraestructura del proyecto.

A la hora de diseñar el embalse, es importante cuantificar la cantidad de sedimentos que le llega o podría llegar con el fin de estimar la vida útil del proyecto. Actualmente el embalse está diseñado para una vida útil de 50 años a partir de un inventario de tan solo 25 procesos y un volumen de material movido de 600.000 m^3. Dado el inventario que fue posible generar con imágenes de Google Earth es claro que el volumen de material movido está subestimado y por ende es posible que el periodo de vida útil del embalse sea menor debido a procesos de sedimentación.

Se considera insuficiente la cantidad de exploración del subsuelo realizada, no obstante, ya que la obra ya fue ejecutada es importante verificar si el único sondeo realizado es representativo para toda la zona del túnel.

La cantidad de exploración de ensayos de laboratorio se considera insuficientes y es importante que se haya realizado la verificación de los parámetros geomecánicos acá adoptados.

Debido a que se plantearon obras de control y límites en las deformaciones que se esperan en las estructuras proyectadas se solicita la verificación de lo siguiente:

- Que el espaciamiento de pernos y sus longitudes de los mismos cumplan con lo presentado en el informe en cuestión.

- Que el revestimiento tenga los espesores mínimos requeridos en el presente informe.

- Que se presenten los datos del seguimiento de los límites en las deformaciones acá presentados, toda vez que éstas son un indicador del buen funcionamiento de la obra.

- Que los taludes de las entradas tengan las características de inclinación acá previstas y que los materiales que afloren correspondan con los que en el informe se presentan.

Es necesaria la conformación de una Interventoría independiente y autónoma que realice la revisión detallada del proyecto hidroeléctrico El Quimbo, con el fin que esta realice el seguimiento de las actividades realizadas en la actualidad en términos de puesta en funcionamiento del sistema hidroeléctrico, y revise las condiciones de seguridad, estabilidad y funcionalidad a la luz de las observaciones e incertidumbres identificadas a lo largo de este documento, dentro de las cuales se deberá tener mayor énfasis en:

- Los análisis de estabilidad del cuerpo de presa y del dique. En estos análisis deberá mostrarse de forma explícita la geometría de las estructuras, parámetros de diseño, aceleración sísmica utilizada para los análisis. También debe ser explícito en el modelo la forma como se simuló el flujo de agua subterránea dentro del cuerpo de presa y bajo éste.

- Los análisis de capacidad portante y deformaciones asociadas a las cargas generadas de la estructura de presa y del dique auxiliar

- Análisis de estabilidad de los taludes adyacentes a la casa de máquinas y las obras de mitigación que el diseñador propuso, así como la condición actual de dichas obras. Espaciamiento, longitud de pernos, inclinación y distribución.

En aras de la elaboración de un plan de contingencia en caso de falla de la represa se sugiere que se desarrolle un estudio de detalle para cuantificar la amenaza asociada a la eventual ruptura de la represa del Quimbo para el río Magdalena en el tramo Quimbo-Betania, el efecto de la llegada de este caudal a la represa de Betania considerando que podría generar fallas de tipo estructural (ruptura de la represa) y/o funcional (rebose de la represa) y finalmente cuantificar la amenaza asociada para el río Magdalena y afluentes aguas abajo de la represa de Betania.

Se considera de vital importancia evaluar y definir un tiempo de respuesta y alertas tempranas para la población aguas debajo de las dos presas en aras de reducir al máximo la pérdida de vidas humanas. Una vez se subsanen las incertidumbres identificadas en este documento.

Solicitar Los análisis de estabilidad del cuerpo de presa y del dique. En estos análisis deberá mostrarse de forma explícita la geometría de las estructuras, parámetros de diseño, aceleración sísmica utilizada para los análisis. También debe ser explícito en el modelo la forma como se simuló el flujo de agua subterránea dentro del cuerpo de presa y bajo éste.

Los análisis de estabilidad de la obra deberán ser revisados, toda vez que tras un análisis preliminar, los factores de seguridad acá obtenidos no corresponden a los mínimos esperados.

Es necesario la determinación de los parámetros reales de los materiales que se encuentran en obra y el cálculo de la estabilidad de la obra en función de éstos.

En el estudio se mencionó la existencia de la siguiente instrumentación sobre la obra en cuestión, a saber:

- PHEQ-PDA-GEOSUP-PL041
- Celdas de carga para el análisis de asentamientos: 17 celdas en total.
- Inclinómetros: 3 inclinómetros en total.
- PHEQ-PDA-GEOSUP-PL042
- Mojones para mediciones topográficas: 19 aguas arriba, 20 en la cresta y 21 en el espaldón aguas abajo.
- Mojones topográficos en los estribos: 10 distribuidos de forma homogénea.

Es necesario que se evalúe la información proveniente de dicha instrumentación, toda vez que se tienen incertidumbres de fondo respecto de la estabilidad de la estructura bajo los eventos límites analizados.

REFERENCIAS CITADAS

- Ademola A. et al., (2016). Effects of natural disasters on social and economic well-being: A study in Nigeria. International Journal of Disaster Risk Reduction 17 (2016) 1-2.Berilgen (2006), Investigation of stability of slopes under drawdown conditions, computer and geotechnics, 34, 81-91.
- Badillo y Rodríguez (1997), Mecánica de suelos, Tomo 1, fundamentos de mecánica de suelos. Limusa
- Bureau of Reclamation. (1982). Guidelines for defining inundated areas downstream from Bureau of reclamation.
- Castro, G., Seed, R., Keller, T. (1993). Steady-State Strength Analysis of Lower San Fernando Dam Slide.
- Contraloría General de la República. Actuación especial, ANLA. Seguimiento a denuncias ciudadanas para exigir el cumplimiento de obligaciones ambientales en la actual construcción de hidroeléctricas. Septiembre de 2014.
- Contraloría General de la República. Informe de Auditoría, ANLA. Junio 2016.
- Cooke, J.B et al. “Progress in Rockfill Dams, discussions and Closure.1986 Journal of Geotechnical Engineering
- Costa, J. E. (1986). Floods form dam failures.
- De Rosa, P. L. (2015). Q-RAS:Simple tool for geometry data preparation as QGIS can become an HEC-RAS preprocessor.
- EMGESA - INGETEC. 2008. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo.
- EMGESA - INGETEC. 2012. Informe de Cumplimiento Ambiental No. 6. Ficha 1ª 7.2.1. Fuentes de materiales en el desarrollo de las actividades del proyecto hidroeléctrico El Quimbo.
- EMGESA-INGETEC. (2013). Informe para la sustracción de reserva forestal de la Amazonía-sector Montea Reasentamiento, Volumen 1-1.
- EMGESA - INGETEC. 2016. Informe de Cumplimiento Ambiental No. 13. Ficha 1ª 7.2.1. Fuentes de materiales en el desarrollo de las actividades del proyecto hidroeléctrico El Quimbo
- EMGESA - INGETEC. 2015. Informe de Cumplimiento Ambiental No. 11. Ficha 1ª 7.2.1. Fuentes de materiales en el desarrollo de las actividades del proyecto hidroeléctrico El Quimbo
- EMGESA-INGETEC, 2015. Plan de contingencia Quimbo-Betania
- EMGESA (2009). Construcción obras civiles principales información de referencia parte 4: Información de geologia y geotecnia para obras civiles principales. Informe de licitación.
- FEMA. (2005). Technical Manual: Conduits through Embankment Dams, Best Practices for Design, Construction, Problem Identification and Evaluation, Inspection, Maintenance, Renovation, and Repair. Federal Emergency Management Agency.
- Fetter (2001), Applied hydrogeology, Prentice Hall.
- Fread, J. L. (1986). The maximium discharge of outburst floods caudes by the breaching of man-made and natural dams.

- Froehlich, D. C. (1995). Peak outflow forme breached enbankment dam.
- Galli, M. et al. (2008). Comparing landslide inventory maps.
- Gaviria, S. & Sánchez, M. 2013. La geoquímica y la mineralogía de rocas sedimentarias en cuencas hidrográficas de alta montaña tropical. En Aspectos geoambientales Sistema Chingaza – Informe I. Empresa Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB – e Instituto de Estudios Urbanos – IEU - de la Universidad Nacional de Colombia.
- Hydrologic Engineering Center. (1977). Guidelines for Calculating and routing a dam-break flood.
- ICOLD. 2004. Concrete face rockfill dams concepts for design and construction.
- ICOLD (2013), Internal erosion of existing Dams, Levees and dikes, and their foundation
- IDEAM. (2004). Guía técnico científica para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia.
- IJWREM, (2012), HYDROLOGICAL IMPACTS OF DAMS, Volume 3, Number 1.
- IJWREM, (2012). Hydrological impacts of dams: A review, IJWREM: Volume 3, Number 1.
- Jian-Min et al. (2014). Geotechnical aspects and seismic damage of the 156-m-high Zipingpu concrete-faced rockfill dam following the Ms 8.0 Wenchuan earthquake-
- Jiménez, G. (2008). Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del Valle Superior del Magdalena (Anticlinal de la Hocha). Trabajo de grado para optar al título de Magister en Geología. Universidad Nacional de Colombia.
- Jimenez G., Bayona G., Montes C., Rosero A. y Sierra, D. (2012) , Analysis of curved folds and fault/fold terminations in the southern Upper Magdalena Valley of Colombia, journal of South American Earth Sciences 39 (2012) 184-201.
- Kanji M (2016). Estabilidad de presas y taludes condicionados a aspectos geológicos y geotécnicos. XV Colombian geotechnical congress & International specialized conference of soft rocks. Cartagena – Colombia, Octubre 5th – 7th
- Kirkpatrick, G. W. (1977). Evaluation guidelines for spillway adequacy.
- Laguna, O., Molina, C., Moreno, S. & Molina, R. 2008. Naturaleza mineralógica de esmectitas (noreste del Tolima). Boletín de Ciencias de La Tierra No. 23. Medellín.
- MacDonald, T. C., & Langridge-Monopolis. (1984). Breacing characteristics of dam failures
- Marquínez, G., Morales, C., Nuñez, A. (2006). Geología de la Plancha 344 Tesalia. INGEOMINAS.
- MAVDT. (2006). Estudio de impacto ambiental: construcción y operación de centrales hidroeléctricas generadoras HE-TER-1-01.
- Mitchell, J. & Soga, K. 2005. Fundamentals of soil behavior. Tercera edición. John Wiley & Sons, Inc.
- MWR (1993). National inventory of reservoir dam failures. The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (MWR), Beijing (In Chinese)

- Nelson, J., Chao, K., Overton, D. & Nelson, E. 2015. Foundation engineering for expansive soils. John Wiley & Sons, Inc
- Pardo (2012), Optimización de un modelo de flujo en un medio fracturado, usando teoría de percolación, Universidad Nacional de Colombia.
- Patrone, J. & Prefumo, J. s.f. La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control. Primeras Jornadas de Ingeniería de cimentaciones. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo.
- Pisaniello et al. 2015. International small dam safety assurance policy benchmarks to avoid dam failure flood disaster in developing countries. Journal of Hydrology. Volumen 531, Part 3. Pages 1141-1153.
- Regan, P.E (2009). An examination of dam failures Vs. Age of Dams. . Managing our water retention system. 29th Annual USSD Conference. Nashville, Tennessee, April 20 – 24.
- Rodríguez, G., Ferreira, P., Velandia, F., Nuñez, A. (1998). Geología de la Plancha 366 Garzón. INGEOMINAS.
- Saberi, O., & Zenz, G. (2015). Empirical relationship for calculate outflow hydrograph of enbankment dam failure due overtopping flow. International Journal of hydraulic engineering, 45-53.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2015. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.
- Sendra, Pablo, 2002. Investigación cuantitativa del transporte de sedimentos no cohesivos en avenidas torrenciales. Aplicación al caso del Arroyo del Partido, Huelva. Universidad politécnica de Madrid Departamento de Ingeniería Forestal Escuela técnica superior de ingenieros de montes.
- Shikui Dong James P. Lassoie, (2013). “The large dam dilemma” An Exploration of the Impacts of Hydro Projects on People and the Environment in China.
- Singh, V. P. (1998). Dam breach modeling technology.
- Singhal , B., & Gupta, R. (2010). Applied hidrogeology of fractured rocks. Springer
- USSD (2009), U.S. Society of Dams, Managing our wáter retención systems.
- US Army Corps of Engineers (2004). General Design and construction considerations for earth and rock-fill dams
- Velandia, F., Núnez, A., Marquínez, G. (2001). Mapa geológico del departamento del Huila – Memoria explicativa. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear INGEOMINAS. Bogotá D.C., 2001.
- Verstappen, H. & Van Zuidam, R. A. (1992). El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos. ITC, 10. Villanueva de Huerva.
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depression in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. Journal of geographical information science.
- W ard & Day (2010), The 1963 landslide and flood at Vaoint reservoir Italy. A tsunami ball simulation. Ital.J.Geosci.vol 130, No. 1.
- Zhang L.M & Jia J.S (2007). Analysis of earth dam failures – A database approach. ISGRS2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk.

- Zhang, M., Dong, Y., Sun, P. (2012), Impact of reservoir impoundement-caused groundwater level changes on regional slope stability: a case study in the Loess Plateu of wetern China. Environ Earth Sci. 1715-1725.