

**PROYECTO MISICUNI
ESTUDIOS Y DISEÑOS COMPLEMENTARIOS
INFORMACIÓN DE REFERENCIA
APENDICE B – GEOLOGÍA DEL SITIO DE PRESA Y OBRAS ANEXAS**

TABLA DE CONTENIDO

LISTA	DE
ANEXOS.....	3/4
LISTA	DE
PLANOS.....	4/4
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. INVESTIGACIONES ADELANTADAS EN EL SITIO DE PRESA.....	2
2.1 SÍSMICA DE REFRACCIÓN.....	2
2.2 SONDEOS GEO-ELÉCTRICOS.....	2
2.3 GALERÍAS.....	3
2.4 PERFORACIONES.....	3
2.5 TRINCHERAS DE EXPLORACIÓN.....	4
3. GEOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA.....	6
3.1 ASPECTOS MORFOLÓGICOS.....	6
3.2 HIDROGRAFÍA.....	6
3.3 CLIMA Y VEGETACIÓN.....	6
3.4 GEOLOGÍA GENERAL.....	7
3.4.1 Estratigrafía.....	7
3.4.2 Geología estructural.....	9
4. CONDICIONES GEOLÓGICAS DEL SITIO DE PRESA Y OBRAS ANEXAS.....	11
4.1 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS.....	11
4.2 ESTRATIGRAFÍA.....	11
4.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	12
4.3.1 Pliegues.....	12
4.3.2 Fallas.....	12
4.3.3 Orientación de los estratos.....	12
4.3.4 Sistemas de diaclasamiento.....	13
4.4 ALTERACIÓN Y DESCOMPRESIÓN.....	13
4.5 ZONA INESTABLE.....	13
4.6 PERMEABILIDAD Y ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS.....	13
5. GEOLOGÍA DE LAS EXCAVACIONES.....	14
5.1 FUNDACION DEL PLINTO DE LA PRESA.....	14
5.1.1 Estribo izquierdo.....	14
5.1.2 Lecho del río.....	15
5.1.3 Estribo derecho.....	15
5.2 FUNDACION DE LOS ESPALDONES DE LA PRESA.....	16
5.3 FUNDACION DE LA ATAGUÍA.....	16
5.4 FUNDACION DEL REBOSADERO.....	17
5.4.1 Rebosadero para la presa con cresta en la cota 3749 msnm.....	17
5.4.2 Rebosadero para la presa a la cota 3782 msnm.....	18
5.5 TÚNEL DE DESVIACIÓN.....	18
5.5.1 Portal de entrada.....	19
5.5.2 Portal de salida.....	19
5.6 GALERÍA DE ACCESO.....	20
5.6.1 Portal de entrada.....	20
6. FUENTES DE MATERIALES.....	21
6.1 ÁREA DE CANTERA RÍO NEGRO KHEYMO.....	21
6.2 DEPÓSITOS ALUVIALES DEL RÍO MISICUNI.....	21
ANEXOS	
PLANOS	

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1 Registros de los Sondeos de Refracción Sísmica Ejecutados en Dic-2002.
- ANEXO 2 Trincheras. Perfiles Estratigráficos y Registros Fotográficos

LISTA DE PLANOS

PLANO 1	Localización del Proyecto
PLANO 2	Sitio de Presa y Obras Anexas – Exploraciones Geológicas – Planta
PLANO 3	Presa – Geología - Planta
PLANO 4	Presa - Geología – Perfiles
PLANO 5	Presa - Geología – Perfiles Eje del Plinto y Eje de la Ataguía
PLANO 6	Geología – Rebosadero Perfiles
PLANO 7	Túnel de Desviación y Galería de Acceso – Geología - Perfiles
PLANO 8	Fuentes de Materiales – Depósitos aluviales del Río Misicuni – Instalaciones y servicios - Localización
PLANO 9	Fuentes de Materiales – Cantera Río Negro Kheymo – Planta y Sección

1. INTRODUCCIÓN

En este apéndice se presentan las características geológicas del sitio de presa de Misicuni y sus obras anexas deducidos de los resultados de las investigaciones geofísicas, geotécnicas y geoelectricas realizadas por Electrowatt en una etapa anterior del proyecto y de las inspecciones e investigaciones adicionales efectuadas en el sitio de la presa en la presente etapa de estudios.

El trabajo geológico regional realizado para el Proyecto Múltiple Misicuni tuvo como objetivo principal establecer un conocimiento suficiente de la geología general de la zona y de su área de influencia de tal modo que sirviera de base para el diseño de la presa, el túnel de desviación y los rebosaderos en sus dos etapas de funcionamiento.

La metodología para lograr este objetivo, en etapas anteriores de estudios del proyecto, se basó en la interpretación de fotografías aéreas en la escala aproximada 1:20 000, el mapeo geológico sobre planos topográficos levantados por EWI en escala 1:1000 y el levantamiento en campo de 127 estaciones donde se midieron las discontinuidades de los afloramientos de roca y los correspondientes datos estructurales como relleno, apertura, orientación, espaciamento, rugosidad, presencia de agua y planaridad. Esta información fue revisada y confirmada en la presente etapa de estudios, mediante la ejecución de las siguientes actividades:

- Inspección detallada del sitio, verificando toda la información geológica disponible y confirmando la información de las estaciones de campo en el sitio de la presa con cara de concreto y sus obras anexas.
- Estudio de los registros disponibles de todas las exploraciones ejecutadas.
- Programación y ejecución de exploraciones adicionales necesarias para complementar la información requerida para el diseño en la etapa de licitación de la presa.
- Correlación de todas las exploraciones y elaboración de secciones geológicas, horizontes de velocidad de onda, perfiles de alteración y meteorización de la roca.

El esquema general del proyecto se presenta en el Plano 1.

En este apéndice se describen las características geológicas generales del sector de la cuenca donde quedará emplazado el proyecto y las condiciones geológicas del sector de la presa Misicuni y sus obras anexas.

La información contenida en este apéndice debe utilizarse solamente como referencia. LA EMPRESA no es responsable de las deducciones o conclusiones que el Proponente pueda establecer de la información presentada en este apéndice.

LA EMPRESA no se compromete a suministrar ninguna información adicional a la incluida en este apéndice. En caso que El Contratista desee ejecutar otras investigaciones para ampliar su conocimiento o para tomar sus decisiones, estas serán por su cuenta y riesgo y deberán ser aprobadas por LA EMPRESA.

Es posible que los contactos de las diferentes unidades geológicas y las características respectivas mostradas en los planos incluidos en este apéndice, no coincidan exactamente con los que se encuentren durante la construcción del proyecto, pues estos se han definido con base en la interpretación de datos de superficie y de investigaciones de campo limitadas. Por lo tanto, el proponente puede disentir parcial o totalmente de la interpretación geológica presentada y formarse su propia idea con base en la información suministrada o en cualquier otra que obtenga del área del proyecto.

2. INVESTIGACIONES ADELANTADAS EN EL SITIO DE PRESA

El sitio de presa Misicuni fue estudiado por la firma Electrowatt cuando diseñó una presa de escollera con núcleo impermeable central. Debido a que el eje de dicha presa estaba ubicado a menos de 200 m aguas abajo del eje de la presa actual, las exploraciones ejecutadas para la presa inicial sirven igualmente para el diseño de la presa de cara de concreto, lo mismo que para sus obras anexas. Para estudiar la fundación del plinto, ubicada aguas arriba de un sitio menos explorado, se realizaron las investigaciones complementarias adicionales que se comentan en el presente capítulo. En el Plano 2 se localizan todas las exploraciones ejecutadas en el contorno de la presa y sus obras anexas.

2.1 Sísmica de Refracción

En el sitio de presa actual se ejecutaron en etapas de estudio anteriores 12 líneas de refracción sísmica encaminada a definir los espesores de la cobertura y de la roca descomprimida y a proporcionar una base para estimar las características mecánicas de los distintos materiales. En la presente etapa de estudios se ejecutaron cinco sondeos de 55 m en la zona de fundación del plinto, cuyos resultados confirmaron la interpretación efectuada con base en las líneas sísmicas ejecutadas inicialmente. Los registros obtenidos en estas líneas sísmicas se presentan en el Anexo 1.

De acuerdo con los resultados de la exploración sísmica, el espesor de la capa de roca descomprimida (fracturada y moderadamente meteorizada), aumenta de unos 10 m en el fondo del valle a unos 35 m en las partes altas de la ladera. Igualmente, según los resultados obtenidos se determinaron tres horizontes de velocidad de onda Vp con las siguientes características.

- Primer horizonte, conformado por suelo o roca muy meteorizada localizada hasta 10m de profundidad, con velocidades de onda menores de 1000 m/s.
- Segundo horizonte, conformado por roca fracturada y moderadamente meteorizada, localizada entre 10 m y 45 m de profundidad, con velocidades de onda comprendidas entre 1000 m/s y 2500 m/s.
- Tercer horizonte, conformado por roca poco fracturada, localizada a profundidades superiores a 45 m, con velocidades de onda superiores a 2500 m/s.

En los sondeos realizados en la presente etapa de estudios se investigó el subsuelo hasta una profundidad de 20 m. Los resultados obtenidos confirmaron las características de la roca de los dos primeros horizontes, antes definidos, con los siguientes resultados.

- Primer horizonte, conformado por recubrimiento de ladera, arcilla y roca meteorizada, localizado hasta 8,0 m de profundidad, con velocidades comprendidas entre 423 m/s y 2040 m/s.
- Segundo Horizonte. Conformado por roca diaclasada y poco meteorizada localizada entre 8,0 m y 20 m, con velocidades de onda comprendidas entre 1833 m/s y 3618 m/s.

2.2 Sondeos Geo-Eléctricos

Las conclusiones de estas investigaciones efectuadas en etapas de estudio anteriores indican que las condiciones geológicas aparentemente no favorecen la aplicación de éste método, del cual se realizaron 16 sondeos. En el estribo derecho los sondeos 2, 2' y 6 por su contraste con los sondeos 1 y 4 sirven para delimitar la zona del derrumbe. En el centro del derrumbe se observa la presencia de una capa espesa con resistividad reducida, condición que probablemente significa la existencia de arcilla parcialmente saturada. Los sondeos 1 y 4 sirven para delimitar la zona del derrumbe.

Los sondeos 3, 5, 11, 12, 15 y 16, todos ubicados en el fondo del valle, muestran una capa de resistividad relativamente baja que en la mayoría de los casos empieza en aproximadamente 50 m

de profundidad. No se dispone de una interpretación definitiva del fenómeno. El sondeo 11 detectó una capa probablemente arcillosa en superficie. En los sondeos 3 y 5 la resistividad relativamente baja acusa la presencia probable de suelos finos hasta profundidades de 6,0 m y 14 m respectivamente.

2.3 Galerías

Se excavaron cuatro galerías en el estribo derecho (1, 2, C y G) y tres en el izquierdo (3, E y D). Las galerías 1 y C se excavaron para investigar la zona inestable del estribo derecho y las galerías 2 y G para investigar la roca de fundación del núcleo. Las galerías 3 y E se excavaron para investigar la roca de fundación del núcleo sobre el estribo izquierdo y la galería D para investigar la zona del vertedero.

La galería 1 de 50 m de longitud, excavada en una zona de confluencia de fallas y de inestabilidad superficial, comenzó en material de derrumbe, compuesto por bloques de roca con matriz arcillosa. A partir de los 40 m la estructura indica roca in-situ pero fracturada y fallada. Relacionando este punto con la calicata 5 y con los afloramientos de la vía quedaría definido un plano recto que determina el límite norte del derrumbe.

La galería C, de 10 m de longitud, se ubica en la parte superior de la zona inestable. En esta galería se encontró roca cerca de la superficie, lo cual indicó que en este sector el espesor de la zona inestable es pequeño.

La galería 2, de 30 m de longitud, tuvo el propósito de investigar el cambio en la posición de la estratificación que se observaba aguas arriba del eje inicial de la presa. Hacia el fondo de la galería los estratos se levantan gradualmente pero no adquieren la posición normal. Además se observaron algunas zonas de milonitas que buzaban en favor de la ladera y que pueden haber influido en el cambio de posición de la estratificación.

La galería G, investiga las limonitas en la ladera, las cuales se encontraron masivas y estables. Hay varias diaclasas con zonas de milonitas de hasta 20 cm de espesor (y hasta 5 cm de material plástico). La roca está medianamente descomprimida y hasta el final de la galería se encuentran vetas de lodo a lo largo de las fracturas.

La galería 3, excavada en una longitud de 30 m, se ubica en la ladera izquierda cerca del coronamiento de la presa diseñada por Electrowatt. En el portal la roca está medianamente deteriorada disminuyendo su calidad hasta aproximadamente 25 m del portal (la galería se derrumbó en este lugar). Hacia el fondo la roca mejora un poco pero se sigue encontrando grietas abiertas de 1,0 cm y algunas vetas de arcilla residual. La galería se excavó hasta 25 m de la superficie del terreno.

La galería E, localizada a media altura de la ladera izquierda y con una longitud final de 20 m atravesó roca alterada y similar a la de la galería 3.

La galería D, localizada cerca al pie aguas abajo de la presa con una longitud de 25 m, registró igualmente roca alterada. La galería se derrumbó en el portal.

Ninguna de las galerías presentó nivel freático. Solamente se experimentaron goteos ligeros en algunas fallas y fracturas. Los datos estructurales, medidos en las galerías se utilizaron en la evaluación estadística de la roca.

2.4 Perforaciones

ENDE realizó tres sondeos de 50 m cada uno, perforados en diámetro NQ y corona de diamante. Se hicieron ensayos de permeabilidad, pero no se instalaron piezómetros. Los sondeos se ubicaron sobre el eje de la presa diseñada por Electrowatt y presentan los siguientes resultados resumidos.

Sondeo PS-1:
(85-MIS-S2)

Localizado sobre la vía de la margen derecha. A partir de los 25 m la recuperación del testigo es casi completa. La perforación comienza en material de derrumbe, compuesto de fragmentos de roca con arcilla y milonitas. Aproximadamente en los 21 m entra en roca alterada transicional a la roca in situ. Por debajo de los 32,5 m de

profundidad no se detectan indicios de movimientos significativos. La roca in situ es una limolita masiva, muy poco alterada. La RQD alcanza los 50%.

Sondeo PS-2:
(85-MIS-S1)

Localizado en la orilla derecha del río. Se perforó con una inclinación de 60 grados con la vertical para pasar por debajo del río. A partir de los 25 m se consiguió buena recuperación. Los primeros 3,0 m correspondieron a coluvión. Siguen depósitos fluviales con cantos rodados con intercalaciones de arena limosa, orgánica. La roca se encontró los 8,0 m de profundidad y consiste en arcillolitas y limolitas frescas. Los primeros 15 m de roca se consideraron zona de falla a causa de la presencia de milonitas y otros rasgos de cizalla fuerte. El RQD en este tramo es cero. A partir de los 25 m de profundidad la calidad de roca se mejora notablemente y el RQD se mantiene entre 25% y 50%.

Sondeo PS-3:
(85-MIS-S3)

Localizado en la margen izquierda, 15 m por encima del fondo del río. La recuperación de testigos mejoró a los de 16m de profundidad. En superficie se encontraron 2,0 m de suelo coluvial, debajo del cual se presenta una terraza fluvial con cantos rodados hasta un tamaño de 30 cm. Entre 5,4 m y 9,0 m se recuperó un material triturado que puede ser coluvial o roca muy alterada. Las muestras a partir de los 9,0 m se consideran roca fracturada. La presencia de roca se hace manifiesta en los 13 m de profundidad. Se trata de una siltita un poco cuarcítica, frágil y muy fisurada. El testigo se presenta fracturado en los planos de estratificación con un RQD entre 0% y 25% solamente. Por debajo de los 14 m la roca está fresca.

2.5 Trincheras De Exploración

Adicional a las trincheras y calicatas excavadas en otras etapas del proyecto, en la presente etapa se excavaron cuatro trincheras en la zona adyacente a la fundación del plinto, las cuales confirman que el material de los depósitos de coluvión (Qc) y de recubrimiento de la ladera tiene espesor entre 0,1 m y 1,0 m.

La trinchera NO T-1 se excavó en el sector del estribo izquierdo en los alrededores de la cota 3720 msnm, con una longitud de 27 m en el sentido de la pendiente del terreno. La profundidad máxima excavada fue de 2,0 m, en material de suelo orgánico y suelo areno arcilloso con grava. Este material se encuentra cubriendo roca que no fue posible excavar con pica y pala. Hacia la parte baja de la trinchera se encontró una discontinuidad con relleno arcilloso y grava, con espesor máximo de 2,0 m y con profundidad de 1,5 m por debajo del contacto suelo roca. Se considera que por debajo de esta profundidad la discontinuidad está cerrada.

La trinchera SO T-2 se excavó en el sector del estribo izquierdo en los alrededores de la cota 3690 msnm, con una longitud de 32,40 m en el sentido de la pendiente del terreno. La profundidad máxima excavada fue de 0,5 m en suelo orgánico donde se encuentra la roca que no fue posible excavar con pica y pala. Hacia la parte media de la trinchera se encontró una discontinuidad con relleno areno arcillosa con grava, con espesor máximo de 0,6 m y profundidad de 2,5 m por debajo del contacto suelo roca. Se considera que por debajo de esta profundidad la discontinuidad está cerrada.

La trinchera TR SE-3 se excavó en el estribo derecho en los alrededores de la cota 3730 msnm, con una longitud de 26,7 m, en el sentido de la pendiente del terreno. La profundidad máxima excavada fue de 2,0 m en suelo orgánico y suelo areno arcillosos con grava y areno arcilloso que se encuentra en contacto con roca fracturada que no fue posible excavar con pica y pala. En la parte media de la trinchera se excavó una zona asociada a una zona de fractura, con un espesor máximo de 0,5 m por debajo del contacto suelo roca. Se considera que la fractura por debajo de esta profundidad se encuentra cerrada.

La trinchera TR SE-4 se excavó en el estribo derecho, en los alrededores de la cota 3700 msnm, con una longitud de 20,50 m en el sentido de la pendiente del terreno. La profundidad promedio de la excavación fue de 0,8 m en suelo orgánico y suelo de grava arcillosa con arena, con espesor máximo de 2,2 m y profundidad de 2,5 m por debajo del contacto suelo roca. Se considera que por debajo de esta profundidad la zona de cizalla esta cerrada.

De las trincheras NO T-1 y SO T-2 se concluye que las fallas y zonas de cizalla localizadas en el estribo izquierdo tienen rellenos blandos que no sobrepasan los 2,5 m de profundidad por debajo del contacto suelo roca.

De las trincheras TR SE-4 y SO T-2 se concluye que las fallas y zonas de cizalla localizadas en el estribo derecho tienen rellenos blandos que no sobrepasan los 2,5 m de profundidad por debajo del contacto suelo roca.

Los perfiles estratigráficos y descripciones de estas trincheras, así como sus registros fotográficos se presentan en el Anexo 2.

3. GEOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA

A continuación se presenta un resumen de la geología en la zona el cual ha sido tomado de informes geológicos realizados en otras etapas del proyecto.

3.1 Aspectos Morfológicos.

La zona cubierta con el trabajo geológico corresponde morfológicamente al ámbito de la Cordillera Real. En este sentido orográficamente se observan cordones montañosos que alcanzan alturas de más de 5000 msnm, formando la Cordillera del Tunarí.

Un rasgo distintivo es el control estructural sobre el relieve y la inversión de relieve que se va suavizando hacia el este. Los sinclinales que en la región sub-andina forman las depresiones topográficas, en este caso forman la parte más elevada y coincide con el sinclinal de Aguas Calientes cuyo flanco occidental forma los nevados del Tunarí.

El sinclinal de Uyuni igualmente en esta zona forma un alto perfil montañoso. La litología desempeña un papel importante en el delineamiento morfológico, observándose que las partes altas están constituidas por rocas resistentes como las Formaciones Anzaldo y San Benito mientras que los valles o zonas bajas se encuentran ocupadas por rocas débiles de la Formación Uncia. Este control también se presenta en el tipo de drenaje aunque la topografía de la zona está controlada principalmente por el aspecto tectónico manifestado en fallas y diaclasas.

Localmente se observan en la zona tres niveles topográficos claramente diferenciables que son: de Oeste a Este el sinclinal de Aguas Calientes, conformado por rocas resistentes de la Formación San Benito, que constituyen las partes más elevadas e inaccesibles dentro de los cuales están los escarpes del sector sur; el anticlinal de Misicuni, mas bajo, que tiene un perfil topográfico empinado de difícil acceso y ocupa el 80% de la superficie del proyecto; y finalmente, el sinclinal de Uyuni, que se presenta como una superficie plana con relación a las otras dos zonas morfológicas, con elevaciones suaves y onduladas como consecuencia de las características de los sedimentos que la conforman.

3.2 Hidrografía

La red hidrográfica de la zona pertenece en su totalidad a la cuenca amazónica, donde el principal colector es el río Ayopaya afluente del río Beni.

El drenaje en el área es de tipo rectangular y desarrollado generalmente a lo largo de las fallas y diaclasas, lo cual implicaría un origen tectónico con ríos y quebradas subsecuentes con los tributarios principales transversales a las estructuras. Además de este diseño también la zona participa del tipo dendrítico localizado en áreas restringidas.

La red hidrográfica particular de la región está formada por la cuenca del río Misicuni –Titiri que tiene una dirección de escorrentia de sur a norte y es el principal colector de toda la red formada por los tributarios Jallpa Cueva, Sunkahani, Jatun, Huayco, Monte Laguna, Huara Huara y todas las quebradas que drenan en forma directa y constituyen la cuenca de mayor aporte del proyecto.

3.3 Clima y Vegetación

El clima corresponde al de alta montaña. En invierno el clima es seco y muy frío con temperaturas por debajo de cero grados centígrados, con frecuencia caen nevadas en toda la zona. En verano el clima es algo templado en los valles, con precipitaciones que muchas veces producen desbordamiento de los ríos. La vegetación es muy escasa casi de estepa, con la presencia de paja brava en algunas zonas y el desarrollo de escasa vegetación raquílica en los valles.

Dadas las condiciones climáticas los pobladores en esta zona aprovechan las partes bajas para al cultivo de papas y para la crianza de ovinos.

3.4 Geología General

3.4.1 Estratigrafía

Las rocas que cubren el área de estudio están constituidas íntegramente por una secuencia sedimentaria perteneciente a los sistemas Cuaternario, Silúrico y Ordovícico.

El sistema Cuaternario esta formado por depósitos de morrenas y depósitos fluvio glaciales, correspondientes al Pleistoceno. Los depósitos aluviales recientes forman terrazas en las márgenes de los ríos, lechos aluviales y conos aluviales en las desembocaduras de las quebradas.

El sistema Silúrico está representado por las formaciones Cancañiri y Uncía también de origen marino y glacio – marino.

Las formaciones del sistema Ordovícico por ser las más antiguas forman el basamento de la zona estudiada y están representadas por formaciones cuyas edades van desde el Arenigiano al Caradociano, todas de origen marino.

No se ha constatado la presencia de rocas ígneas, habiéndose observado vetas de cuarzo de origen hidrotermal de unos pocos centímetros de espesor. Tales vetas se encuentran solamente en las lutitas del núcleo del anticlinal de Misicuni y en las pizarras de la Formación Independencia. Generalmente tienen un rumbo paralelo a la estructura principal y buzamientos subverticales.

En el siguiente cuadro se resume la estratigrafía del área del proyecto Misicuni.

EDAD	FORMACIÓN	UNIDAD LITOLÓGICA
Cuaternario	Aluvial Suelo Residual Coluvión Terrazas Fluvio Glacial Morrenas	
Silúrico	Formación Uncía Formación Cancañiri.	Su Scc
Ordovícico	Formación San Benito Formación Anzaldo Formación Capinota Formación Independencia	A B1, B2, B3 C, C1, C2, D1, D2 E

3.4.1.1 Cuaternario

La mayor parte de los depósitos correspondientes al Pleistoceno están representados por morrenas laterales y frontales, producto de la intensa glaciación que sufrió esta parte de la cordillera Andina. Los depósitos recientes están representados por terrazas de materiales, aluviales y coluviales acumulados en los lechos de los ríos.

Depósitos morrénicos

La intensa glaciación de esta parte de la cordillera formó las morrenas que ocupan gran parte del área. Regionalmente se trata principalmente de morrenas laterales que se extienden por kilómetros y presentan alturas de mas de 100 m en algunos casos. Las morrenas frontales y de fondo son las menos frecuentes por la pendiente abrupta que presenta esta zona.

Los sedimentos que la conforman están compuestos por un material polimíctico de fragmentos y bloques de roca, cantos, grava, arena y material arcilloso, que forman verdaderas barreras a lo largo de las pendientes para terminar su recorrido como morrenas frontales o de fondo en los lechos de los ríos, como se observa en la confluencia de los ríos Sunkani y Sivingani con el Titiri.

En, general se observa un paisaje intensamente afectado por una actividad de glaciación. Actualmente la erosión es marcada especialmente en las partes altas de esta cordillera.

Depósitos recientes

Los depósitos recientes están compuestos por depósitos fluvio-glaciales originados por la acción combinada del agua proveniente del deshielo de los glaciales, la cual acarrea material suelto conformado por una mezcla de material mal seleccionado de grava, arena y material arcilloso, que se acumula en las faldas de la serranía y algunas veces llega hasta los ríos.

También se encuentran depósitos fluviales ubicados principalmente en los cauces de los ríos Misicuni, Titiri, Sivingani, Sunkani donde forman terrazas que tienen dos o más niveles producto de las épocas lluviosas

Las terrazas están conformadas por material pobremente seleccionado consistente en cantos, gravas, arenas y limos. Estas acumulaciones de material reciente presentan cierto grado de selección que va de grueso a fino.

Los abanicos aluviales o conos de deyección se ubican en la desembocadura de las quebradas cubriendo superficies reducidas debido al poco desarrollo que estas tienen.

3.4.1.2 Silúrico

Las rocas sedimentarias pertenecientes a este sistema, están representadas por las Formaciones Cancañiri y Uncia los cuales ocupan los flancos y núcleos de los sinclinales de Aguas Calientes y Uyuni.

Regionalmente estos sedimentos acusan una disminución de espesor de oeste a este donde los mayores espesores y buen desarrollo de estas rocas se presentan en el sector occidental de cordillera y el altiplano.

3.4.1.3 Ordovícico

Sedimentos pertenecientes a este sistema están ampliamente representados en todo el área de estudio.

Estas rocas están constituidas por limolitas y siltitas, areniscas, cuarcitas, lutitas y pizarras que totalizan un espesor de más de 5000 m.

Formación Independencia

Las rocas de esta unidad sedimentaria representan la parte más baja del sistema Ordovícico de la Cordillera del Tunari. Sus afloramientos se localizan en el sector occidental del área formando el núcleo del anticlinal de Misicuni.

Formación Capinota

Esta unidad sedimentaria se encuentra bien expuesta a lo largo de todo el flanco oriental del anticlinal de Misicuni, donde denota un control sedimentario respecto a la morfología, es decir, las unidades menos resistentes en partes bajas o valles, y las unidades más resistentes en las partes altas. La alternancia de resistencia de esta unidad permitió realizar un trabajo fotogeológico relativamente sencillo adoptando esta unidad como guía.

Regionalmente la Formación Capinota está formada por un paquete arenoso en la base y otro arcilloso gris oscuro hacia la parte alta, ambos con variaciones de norte a sur.

Formación Anzaldo

Rocas de esta unidad sedimentaria tienen amplia distribución en el sector, conformando el flanco oriental del anticlinal de Misicuni en el área de la presa y obras anexas. Esta unidad es más conocida con el nombre de Cuchupunata en el sector del Tunari, pero por haber utilizado el nombre de Anzaldo, en todos los informes de este proyecto se mantiene este nombre para no crear confusiones.

Esta formación en la base presenta limolitas o siltitas gris verdosas muy micáceas, estratificadas en capas delgadas de 10 cm a 20 cm de espesor, con intercalaciones delgadas de areniscas verdosas de grano fino; en conjunto se presenta como una unidad poco resistente formando pendientes suaves.

Hacia su parte media la estratificación se hace más resistente por la presencia de areniscas duras, estratificadas en capas gruesas, de grano fino a medio, matriz poco arcillosa, formando partes altas que se destacan en la morfología.

Su parte superior está formada por sedimentos semejantes a los que conforman la parte inferior, iniciando con un paquete lutítico de 120 m de espesor, de color gris oscuro y gris verdoso. Siguen limolitas y areniscas suaves de color gris verdoso micáceas, estratificadas en capas de 1m a 2m de espesor, formando paquetes masivos de roca. Por su carácter friable forma un plano inclinado relativamente suave, controlado por el buzamiento y los agentes erosivos.

Los contactos de esta formación con otras formaciones son concordantes, lo cual indica una sedimentación continua sin presencia de discordancias; tan sólo se puede inferir que durante la sedimentación la cuenca ha tenido pequeñas fluctuaciones que han permitido la variación cíclica de la acumulación de sedimentos.

El mayor espesor de esta formación excede 2000 m en el sector de Misicuni.

Formación San Benito

Constituye la formación más joven de la secuencia del Ordovícico. En la zona de Misicuni se encuentra aflorando en los sinclinales de Aguas Calientes y Uyuni y se ubica en el sector occidental y oriental respectivamente, formando una topografía suave y ondulada, como consecuencia de los buzamientos bajos que presenta esta unidad. La característica principal que permite diferenciarla de las formaciones infra y suprayacentes es la presencia de niveles arenosos fuertemente consolidados, que en algunas zonas presentan características de cuarcita, los cuales dan lugar a la formación de altos topográficos y acantilados (sinclinal de Aguas Calientes centro).

3.4.2 Geología estructural

Regionalmente la zona del proyecto Misicuni se encuentra ubicada en la parte media de la unidad morfoestructural conocida con el nombre de cordillera central y oriental. Es precisamente en esta parte media de la cordillera, donde el bloque paleozoico que marca un rumbo general N40°W, cambia a un rumbo norte sur a partir del paralelo 18°.

El cambio de rumbo que sufren las unidades litoestratigráficas permite suponer la presencia de una zona de debilidad afectada por movimientos sísmicos vinculados a la anomalía regional denominada "El Codo de Arica", relacionada con la teoría de placas.

El cuadro estructural incluye la presencia de un anticlinal, dos sinclinales y varias fallas longitudinales inversas y otras secundarias de tipo normal, que tienen rumbos perpendiculares y diagonales a las estructuras principales y localmente plegamientos transversales. Estos rasgos estructurales son producto de los esfuerzos tectónicos Hercínicos que fueron posteriormente modificados por el ciclo Andino, el cual produjo el fallamiento de reajuste representado por fallas normales y lineamientos presentes en la zona del proyecto.

3.4.2.1 Anticlinal de Misicuni

La estructura principal en la zona del proyecto se denomina anticlinal de Misicuni, la cual consiste en una estructura positiva que se extiende en forma longitudinal con rumbo general N35°W. Está conformado por un flanco occidental con un buzamiento del orden de 55° a 60° promedio, y un flanco oriental más suave con ángulos que fluctúan entre 36° y 45° conformando de esta forma un anticlinal asimétrico con su plano axial buzando al oeste.

La unidad que aflora en el núcleo del anticlinal pertenece a la Formación Independencia y corresponde a la unidad rocosa más antigua que aflora en esta parte de proyecto.

3.4.2.2 Sinclinal de Uyuni

El sinclinal de Uyuni, se ubica en el sector oriental de la zona del proyecto conocido también como sinclinal de Sehuenca. Está conformado por rocas de la formación Anzaldo en la base, luego presenta la formación San Benito y finalmente, en la parte superior, la Formación Uncia de edad Silúrica.

3.4.2.3 Plegamientos secundarios

Estos plegamientos corresponden a los pliegues transversales originados como consecuencia de los fallamientos y de los esfuerzos combinados de las fases de plegamiento Hercínico y Andino.

Estas estructuras aunque son menores regularmente, son importantes para el caso del sitio de presa de Misicuni, donde deben definirse las condiciones geotécnicas de calidad y estabilidad de las rocas de fundación de las obras por construir en este sitio.

3.4.2.4 Fallas

En la zona del proyecto se han diferenciado dos sistemas principales de fallamiento: el primero que se desarrolló simultáneamente al plegamiento principal, producto de los esfuerzos de empuje tangenciales (fallas longitudinales) que tienen un carácter inverso, como es el caso de la falla de Misicuni. El otro sistema correspondería a las fracturas y lineamientos cuyas trazas tiene un rumbo perpendicular y diagonal a las estructuras o rumbo de las capas y se traducen en fallas generalmente normales, como las fallas de Sivingani, Sunkhani y otras.

Es importante señalar que el drenaje que presenta la zona del proyecto responde a un control tectónico, controlado también por la competencia o incompetencia de las diferentes unidades formacionales.

3.4.2.5 Fallas longitudinales

En el área de la presa Misicuni el principal accidente tectónico es la Falla de Misicuni, paralela a las estructuras principales regionales, cuyo plano axial buza con alto ángulo hacia el NE.

En la excavación del túnel principal no se encontraron evidencias de esta falla, aunque se esperaba intersectarla.

3.4.2.6 Fracturas regionales

Las fracturas que tienen origen tectónico están íntimamente ligadas a los movimientos orogénicos que afectaron la Cordillera del Tunari y a la composición petrológica de las diferentes unidades litológicas. En el área del sitio de presa de Misicuni se han reconocido más de tres sistemas principales de fracturas regionales, formando sistemas conjugados.

Las diaclasas observadas en el campo se muestran en forma general como fracturas que no han sufrido ningún movimiento, pero en algunos sectores se observan desplazamientos de 6 a 12cm rellenos con milonita. Los rumbos promedios de estas fracturas son E-W, N-S y algunas NE-SW.

Las características generales que presentan este tipo de fracturas en la zona del proyecto son muy variadas, destacándose el hecho que no se encuentran aisladas, sino formando sistemas conjugados. El intervalo entre ellas varía entre pocos centímetros y varios metros, tanto en el sentido de la estratificación como en sentido transversal y diagonal, conformando en conjunto el diseño del drenaje presente en el paisaje de la zona del proyecto.

4. CONDICIONES GEOLÓGICAS DEL SITIO DE PRESA Y OBRAS ANEXAS

En este capítulo se presenta el estudio geológico y mapeo detallado de la zona donde se emplazará la estructura de la presa y obras anexas. El área de mapeo se encuentra comprendida entre la confluencia de los ríos Misicuni y Sivingani y aproximadamente unos 400m aguas abajo, en la confluencia de los ríos Misicuni y Negro Kheymo. En los Planos 3 y 4 se muestra la geología general en planta y perfil del sitio de presa

4.1 Características Geomorfológicas

El paisaje predominante del área es el resultado de la acción tectónica de fallas y deformaciones transversales, entre las que se encuentra y la falla inversa Misicuni, la cual combinada con la acción erosiva del río, cortando en forma subsecuente la estructura geológica, ha formando un valle de paredes rocosas, con pendientes entre 30° y 40° en ambos costados.

En los niveles superiores, de ambos flancos del valle la topografía está determinada por pendientes suaves menores de 30 grados y un conjunto de montículos redondeados, característicos de actividad glacial. En la parte sur del área se observa una acumulación de tipo fluvioglacial, irregularmente clasificada, de pendiente suave y espesores hasta de 30m de material morrénico, caracterizado por la presencia de cantos sub-redondeados o redondeados de 50 y 80cm de diámetro, con gravas y arena bien gradadas. El diseño de drenaje dendrítico predomina ampliamente, aunque en el flanco este se observa cierta tendencia a formar un diseño subparalelo debido al alineamiento de fracturas o diaclasas transversales a la estratificación.

Rocas en estado de fragmentación debido a los procesos de meteorización se encuentran con mayor frecuencia en horizontes cercanos a la superficie, en algunos casos asociados con descargas de aguas subterráneas en forma de vertientes de muy bajo caudal o en forma de zonas de humedad. El fracturamiento debido a tectonismo se muestra con mayor intensidad en los niveles superiores del flanco este y en menor intensidad en el flanco oeste.

4.2 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica en el área está representada por rocas ordovícicas y sedimentos cuaternarios.

Las rocas ordovícicas están constituidas por una secuencia de estratos con espesores variables desde 5,0 cm hasta 150 cm, estando la media comprendida entre 20 cm y 60 cm. Litológicamente la secuencia estratigráfica corresponde a la Formación Anzaldo superior (B-1), que en la zona de estudio puede ser subdividida en tres subniveles según sus características litológicas y estructurales. Estos niveles se han denominado en orden ascendente de la columna litológica B1-a, B1-b, y B1-c.

El nivel B1-a presenta una secuencia homogénea de limolitas gris verdosas, micáceas, finamente estratificadas (60 mm a 200 mm), en partes con apariencia masiva, ligera a moderadamente meteorizada. Ocasionalmente se encuentran intercalaciones de lutita.

El nivel B1-b presenta lutitas y limolitas gris oscuro a gris verdoso, de grano muy fino, finamente laminadas, muy micáceas, bastante friables y fisibles; intensamente meteorizadas especialmente en los niveles de menor competencia o superficiales donde tienden a separarse paralelamente a la estratificación, mostrando así una foliación característica. Se observa una abundante población de fósiles lingulas.

El nivel B1-c presenta una secuencia de capas bien estratificadas de limolitas gris verdosas, muy micáceas, bastante duras, con un alto grado de facturación y diaclasamiento. Se observa en general que la roca está sometida a efectos de descompresión y a una ligera meteorización.

Los depósitos coluviales tienen un espesor variable, relacionado con los cambios de pendiente. El rango de estos espesores varía desde 10 cm en las partes altas del flanco izquierdo, hasta 150 cm en las depresiones y zonas de pendiente suave en el flanco derecho. El espesor medio de la capa

de coluvión varía entre 20 cm y 50 cm, estando constituido éste material por gravas, arenas y arcillas bien gradadas. El contenido de gravas es del 50% con tamaños del orden de 5mm a 20mm, sub-redondeadas o redondeadas el contenido de arenas es del 30% y el de limo y la arcilla 20 %.

Los depósitos aluviales están compuestos en general por 30% de cantos entre 7,62 cm (3,0 pulgadas) y 100 cm (39,37 pulgadas) de diámetro, 20% de gravas bien gradadas con partículas entre 5,0 mm y 25 mm sub-angulares a sub-redondeadas y 50% de arenas bien seleccionadas de partículas entre 0,50 mm a 5,0 mm, sub-redondeadas y redondeadas.

El depósito aluvial – coluvial en forma de abanico, está constituido por materiales arenosos en un 70%, con partículas de arena que van desde 0,075 mm hasta 0,50 mm redondeadas y bien clasificadas, y por arcillas muy finas en un 30%.

El depósito fluvio glacial situado en la intersección de los ríos Sivingani y Misicuni está constituido por material morrénico, compuesto por un 50% de cantos sub-redondeados de tamaños que van desde 7,62 cm (3 pulgadas) hasta 80 cm (31,50 pulgadas) de diámetro, y un 50% de gravas y arena bien gradadas con partículas que van desde las 3 pulgadas (7,62 cm) hasta 1,0 mm, sub-angulares a sub-redondeadas.

4.3 Geología Estructural

4.3.1 Pliegues

El sitio de emplazamiento se encuentra en el flanco oriental del anticlinal de Misicuni, común al flanco occidental del sinclinal de Uyuni cuyo cierre se encuentra situado dentro del área investigada. Localmente puede considerarse como una estructura homoclinal con inclinación hacia el sudeste.

4.3.2 Fallas

La zona del proyecto está caracterizada principalmente por la presencia de la falla inversa Misicuni que se alinea longitudinalmente al río del mismo nombre formando un plano que buza hacia el este. Regionalmente esta falla corta el sinclinal Uyuni en dos bloques. En el área en cuestión el bloque levantado corresponde al flanco este y el bloque inferior corresponde al flanco oeste. El desplazamiento neto y rechazo de esta falla no excede el centenar de metros.

A lo largo de la margen derecha del río Misicuni se observa una falla secundaria subparalela a la falla Misicuni, cuyo rechazo y desplazamiento no son significativos, debido a los espesores de la milonita de esta falla.

Otros movimientos de menor intensidad están representados por fallas normales, identificadas en el plano geológico con letras E, F, G, H, etc. Estas fallas generalmente actúan como delimitantes de bloques o áreas de diferentes características geo-estructurales. El macizo rocoso puede ser dividido, según su comportamiento estructural en dos bloques principales correspondientes a la margen derecha y a la margen izquierda del camino de acceso.

4.3.3 Orientación de los estratos

Los planos de estratificación constituyen las discontinuidades principales que afectan al macizo rocoso; son en general cerradas, continuas, generalmente sin relleno. En las paredes del valle del río Misicuni y en las galerías de investigación, entre planos de estratificación se han observado rellenos hasta de 40 cm de espesor, constituidos por arcilla de plasticidad media y en casos con presencia de brecha, en la zona de roca meteorizada.

En general los planos de estratificación tienen una orientación dominante que fluctúa entre N25°-40°E, con buzamientos de 35° a 50° al sureste. En la parte alta de la ladera derecha en el área de las obras se presenta un cambio en la orientación de la estratificación, siendo esta, N10°-20°E/10°-15°SE y N65°W/10°-20°SW presentándose fuerte replegamiento.

4.3.4 Sistemas de diaclasamiento

El diaclasamiento en general tiene un comportamiento variable en cuanto a su persistencia, continuidad, abertura y frecuencia, dependiendo de su ubicación en las zonas de diferente comportamiento estructural. En el área de las obras se presentan dos sistemas principales orientados así:

Sistema S1 N30° - 60°/45° - 80° NW

Sistema S2 N50° - 90°/75° - 90° NE

4.4 Alteración y Descompresión

El macizo rocoso se encuentra afectado por un proceso de alteración y descompresión. La alteración de la roca está relacionada con el tectonismo de la zona, el cual ha fracturado la roca y desarrollado milonita y brecha entre algunos planos de discontinuidades y planos de estratificación, como se puede apreciar en los registros geológicos de las galerías.

La formación del valle ha causado descompresión y alteración en la roca de los flancos, en un ancho que fluctúa entre 3,0 m, 10 m, 13 m y 14 m medidos en sentido horizontal a lo largo de las galerías G, E, 3 y 2, respectivamente. Estas zonas de debilidad deberán ser removidas y/o tratadas mediante las excavaciones y las medidas previstas para la fundación del plinto de la cara de concreto.

En la margen derecha, sobre la vía regional se observan igualmente zonas de roca descomprimida, con bloques sueltos, en orientación caótica, en condiciones de equilibrio precario.

4.5 Zona Inestable

En la margen derecha del río, sobre la carretera regional y muy cerca de la galería 1, se encuentra una zona inestable, descomprimida, en los alrededores de la falla "D", en donde la estratificación buza paralelamente al terreno. El área de fundación de la presa con cara de concreto quedará por fuera de esta zona inestable y por ello no se prevén obras especiales en ella.

4.6 Permeabilidad y Aspectos Hidrogeológicos

En los tres sondeos ejecutados en el sitio de presa se hicieron ensayos de permeabilidad, inyectando agua por gravedad o bien a presión con obturador. En algunos ensayos se experimentaron problemas con el cierre del obturador neumático razón por la cual algunos de los resultados indican permeabilidades mayores que las reales. Las permeabilidades obtenidas fueron las siguientes:

En el sondeo realizado sobre la orilla derecha del río Misicuni, las permeabilidades varían entre 1E-2 cm/s y 1E-3 cm/s.

En los sondeos realizados sobre los estribos, las permeabilidades varían entre 1E-2 cm/s y 1E-5 cm/s, presentándose valores de 1E-4 cm/s a partir de los 33 m de profundidad en el estribo derecho y a partir de los 23 m de profundidad en el estribo izquierdo.

En las galerías excavadas en los márgenes del Río Misicuni no se presentan filtraciones considerables indicativos de haber atravesado la tabla de agua. Cerca de la superficie se presentaron goteos y humedades de magnitud pequeña, los cuales deben incrementarse en época de lluvia.

Dentro de los trabajos de impermeabilización de la fundación rocosa se tienen previstos huecos de exploración y mediciones de la permeabilidad a diferentes profundidades y en diferentes sectores de acuerdo con las condiciones reales de la roca observadas después de las excavaciones. Estas investigaciones previas a la inyección de lechada, permitirán correlacionar la geología con la absorción de agua a presión, todo lo cual constituirá la base para orientar los trabajos de inyección en su etapa inicial.

5. GEOLOGÍA DE LAS EXCAVACIONES

En los Planos 3 y 5 se presenta la planta geológica del sitio de la presa y el perfil por el eje del plinto, respectivamente.

5.1 Fundacion del Plinto de la Presa

5.1.1 Estribo izquierdo

Entre las cotas de 3780 msnm y 3772 msnm, el estribo está conformado por limolitas gris verdosa, micáceas, finamente estratificadas, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo, cubiertas discordantemente por sedimentos de un depósito de coluvión con espesor hasta de 1,0 m de acuerdo con el registro de la línea de refracción sísmica S-17.

Entre las cotas 3772 msnm y 3670 msnm (lecho del río) el estribo esta conformado por limolitas y areniscas de grano muy fino, gris verdosas, micáceas con apariencia masiva, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo. Parcialmente se encuentran cubiertas por depósitos de coluvión con espesores que varían entre 0,1 m y 1,0 m.

Con base en los registros de las líneas de refracción sísmica se puede establecer que el espesor de los suelos y de la roca muy meteorizada, con velocidad de onda primaria menor de 1000 m/s, se encuentra a profundidades hasta de 10 m. Sin embargo de acuerdo con los registros de las galerías de exploración, galería 3 y galería E, y con los registros de las perforaciones, PS-2 y PS-3 este espesor se encuentra a profundidad hasta de 13 m en la parte alta del estribo y hasta de 6m en la parte baja del estribo. Por debajo de estas profundidades se encuentra roca fracturada a poco fracturada con velocidad de onda primaria variable de 1000 m/s a 2500 m/s. Este tipo de roca se encuentra a profundidad hasta de 45 m en la parte alta del estribo y hasta de 9,0 m en la parte inferior. Por debajo de la roca moderadamente fracturada se encuentra la roca sana con velocidad de onda mayor de 2500 m/s.

El estribo izquierdo se encuentra afectado por tres sistemas principales de discontinuidades, constituidos por la estratificación y dos sistemas de diaclasas, que se describen a continuación:

Estratificación N25°- 40°E/40°- 50°SE.	Continuidad > 10m, poco espaciadas, algunas presentan rellenos de arcilla arenosa con fragmentos de roca, en partes manchas de óxido.
Sistema S1 N45°-60°E/45°- 60°NW.	Presenta dirección de buzamiento contraria a la dirección de la estratificación. Se presenta en partes con continuidad hasta 10m y separación de 0,2 m a 1,5 m. En partes abiertas y con relleno de arena arcillosa. Con la dirección de esta familia de discontinuidades coincide la dirección de la falla H que intersecta la excavación del plinto en el estribo izquierdo, aproximadamente en la cota 3740 msnm. También coincide con una Zona de Cizalla (milonita) que intersecta la excavación del plinto en el estribo izquierdo aproximadamente en la cota 3705 msnm.
Sistema S2 N50°-70°W/75°- 90°NE	Dirección aproximadamente perpendicular a la dirección de la estratificación. Continuidad < 5,0 m, espaciamiento 5,0 cm – 50 cm, ondulada y rugosa, apertura 0,0 mm – 5,0 mm. Manchas de óxido, algunas con relleno orgánico.

No se conocen datos de nivel freático, el cual tampoco se encontró en las excavaciones de las galerías 3 y E.

5.1.2 Lecho del río

El lecho del río esta conformado por sedimentos aluviales poco consolidados con espesor estimado de unos 4,0 m, que cubren, discordantemente limolitas de grano muy fino, gris verdosas, micáceas con apariencia masiva, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo.

Con base en los registros de las líneas de refracción sísmica se puede establecer que el espesor del depósito aluvial y de la roca meteorizada es hasta del orden de 6m.

El macizo rocoso en el lecho del río está afectado por los mismos sistemas de discontinuidades del estribo izquierdo.

Además de estas discontinuidades se encuentra la Falla de Misicuni que se alinea longitudinalmente con el río con buzamiento hacia el este. El desplazamiento neto y rechazo de esta falla parece no exceder el centenar de metros. De acuerdo con la perforación PS-2 la zona de influencia de la falla tiene unos 10m de espesor y está constituida por roca muy fracturada y milonita con RQD 1 igual a 0.

5.1.3 Estribo derecho

En el estribo derecho se pueden diferenciar dos sectores con diferente comportamiento estructural. El primer sector se encuentra por debajo de la cota 3718 msnm y se caracteriza por mantener la posición estructural uniforme con la misma dirección de buzamiento hacia el SE, similar al estribo izquierdo. El segundo sector se encuentra localizado por encima de la cota 3718 msnm y se caracteriza por presentar fuertes variaciones en la dirección de buzamiento.

Entre las cotas 3670 msnm y 3675 msnm, el estribo esta conformado por limolitas de grano muy fino, gris verdosas, micáceas con apariencia masiva, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo. Se encuentran cubiertas por depósitos de coluvión y fluvio-glaciales con espesor hasta de 4,0 m.

Entre las cotas 3675 msnm y 3680 msnm el estribo esta conformado por lutitas y limolitas, gris oscuro a gris verdoso, finamente laminadas, muy micáceas bastante friables y fisibles, pertenecientes al nivel B1-b de la Formación Anzaldo. Se encuentran cubiertas por depósitos de coluvión y fluvio-glaciales con espesor hasta de 6,0 m.

Entre las cotas 3680 msnm y 3780 msnm el estribo esta conformado por limolitas, gris verdoso, bien estratificadas, bastante duras, pertenecientes al nivel B1-c de la Formación Anzaldo. En la parte media se encuentran cubiertas por depósitos de coluvión con espesor hasta de 1,0 m.

Con base en los registros de las líneas de refracción sísmica se puede establecer que el espesor de los suelos y de la roca meteorizada, con velocidad de onda primaria menor de 1000 m/s, se encuentra a profundidades hasta de 6,0 m. Sin embargo de acuerdo con el registro de la galería G de exploración, este espesor se encuentra a profundidad hasta de 10 m en la parte alta del estribo y hasta de 6,0 m en la parte baja del estribo. Por debajo de estas profundidades se encuentra roca fracturada a poco fracturada con velocidad de onda primaria variable de 1000 m/s a 2500 m/s. Este tipo de roca se encuentra a profundidad de hasta 35 m en la parte alta del estribo y hasta de 9,0 m en la parte inferior. Por debajo de la roca moderadamente fracturada se encuentra la roca sana con velocidad de onda mayor de 2500 m/s.

El estribo derecho se encuentra afectado por tres sistemas principales de discontinuidades, constituidos por la estratificación y dos sistemas de diaclasas que se describen a continuación:

Estratificación (bajo la cota 3718 msnm) N25° - 40°E/40° -50°E.	Continuidad >10 m, poco espaciadas, algunas presentan rellenos de arcilla arenosa con fragmentos de roca, en partes manchas de óxido.
Estratificación (sobre la cota 3718 msnm) N10°-20°E/10°-15°E. N65°W/10°-20°W	Continuidad >10 m, poco espaciadas, algunas presentan rellenos de arcilla arenosa con fragmentos de roca, en partes manchas de óxido.
Sistema S1 N45°-60°E/45°- 60°W.	Con características similares a las del estribo izquierdo.
Sistema S2 N50°-70°W/75°-90°NE.	Con características similares a las del estribo izquierdo.

En las cotas 3718 msnm y 3740 msnm se presentan dos Zonas de Cizalla (milonita) paralelos al curso del río y orientadas S-N, con ángulo de buzamiento estimado en 90° y con una zona de influencia hasta de 5,0 m.

5.2 Fundación de los Espaldones de la Presa

Como se muestra en el plano geológico y en los perfiles a lo largo de los ejes de la presa inicial y la presa final las laderas donde se apoyaran los espaldones de la presa están conformadas por limolitas y en partes por lutitas de los niveles B1-a, B1-b y B1-c de la Formación Anzaldo. Parcialmente las rocas se encuentran cubiertas por sedimentos de depósitos de coluvión cuyo espesor no sobrepasa 1,0 m. El espesor de la roca meteorizada es en promedio de unos 13 m en las partes altas de la ladera y de unos 6m en las partes bajas. Se estima que para el apoyo de los espaldones se deberá remover solamente el depósito de coluvión siendo aceptable como fundación la roca alterada superficial.

En el área del espaldón de aguas abajo, en la parte baja del estribo derecho, se encuentra un depósito aluvial-coluvial en abanico (Qaa) con espesor estimado de 6,0 m, el cual deberá ser removido para la fundación del espaldón.

El depósito aluvial-coluvial (Qa) que se encuentre en el lecho del río deberá ser removido parcialmente en la zona adyacente a la cara de concreto bajo el espaldón de aguas arriba, así como el depósito fluvio-glacial (QFg) localizado en la zona aledaña al talón del plinto. Se estima que el espesor del depósito aluvial no sobrepasa los 4,0 m.

5.3 Fundacion de la Ataguía

En el Plano 5 se presenta el perfil geológico por el eje de la ataguía. El estribo izquierdo de la ataguía está conformado por limolitas gris verdoso, micáceas, finamente estratificadas, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo, localmente cubiertas discordantemente por un depósito de coluvión con espesor hasta de 1,0 m.

El lecho del río en el sector de la ataguía esta conformado por sedimentos aluviales poco consolidados con espesor estimado en unos 4,0 m, cubriendo, discordantemente limolitas de grano muy fino, gris verdosas, micáceas con apariencia masiva, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo y afectadas por el alineamiento de la falla Misicuni. Con base en los registros de las líneas de refracción sísmica se puede establecer que el espesor del depósito aluvial y de la roca meteorizada es del orden de 6m.

Entre las cotas 3672 msnm y 3680 msnm el estribo derecho de la ataguía esta conformado por lutitas y limolitas, gris oscuro a gris verdoso, finamente laminadas, muy micáceas bastante friables y fisibles, pertenecientes al nivel B1-b de la Formación Anzaldo, las cuales se encuentran cubiertas por depósitos de coluvión y aluviales con espesor hasta de 4,0 m.

Entre las cotas 3680 msnm y 3686 msnm el estribo derecho de la ataguía esta conformado por limolitas, gris verdoso, bien estratificadas, bastante duras, pertenecientes al nivel B1-c de la Formación Anzaldo, cubiertos discordantemente por depósitos de coluvión con espesor hasta de 1,0 m.

5.4 Fundación del Rebosadero

Las excavaciones e implantación del rebosadero de cada una de las etapas de la presa están ubicadas en la parte alta del estribo izquierdo. Las condiciones geológicas para el rebosadero son las siguientes:

5.4.1 Rebosadero para la presa con cresta en la cota 3749 msnm

El perfil geológico del rebosadero para la presa inicial que aparece en el Plano 6, indica que la zona en que se fundaría el canal de aducción, la estructura de control y de la primera parte del canal esta constituida por limolitas gris verdoso, micáceas, con apariencia masiva, también pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo, parcialmente cubiertas por sedimentos de un depósito de coluvión con espesor hasta de 0,1 m – 1,0 m. De la parte media del canal hacia abajo esta conformado por limolitas, gris verdosas, micáceas, finamente estratificada, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo, parcialmente cubierta por depósitos de coluvión con espesores que varían entre 0,1 m – 1,0 m.

En la zona de fundación del plinto en su cruce con el canal del rebosadero se pudo establecer que los suelos y la roca meteorizada, se encuentran a profundidad hasta de 13 m, este espesor tiende a disminuir hasta 6,0 m cerca del río. Por debajo de estas profundidades se encuentra roca fracturada a poco fracturada a profundidad hasta de 24 m en la parte alta y hasta de 9,0 m en la parte inferior. Por debajo de la roca moderadamente fracturada se encuentra la roca sana con velocidades de onda mayores de 3500 m/s.

Los taludes de la excavación del canal de aducción quedaron conformados en la parte superior en el horizonte de roca meteorizada con velocidad de onda de 770 m/s y en la parte media e inferior en el horizonte de roca fracturada y moderadamente meteorizada con velocidad de onda de 1250 m/s.

La estructura de control quedará fundada en la base del horizonte de roca fracturada y moderadamente meteorizada con velocidad de onda 1250 m/s muy cerca de su cambio a roca más competente.

En este sector la roca se encuentra afectada por tres sistemas principales de discontinuidades constituidos por la estratificación y dos sistemas de diaclasas, orientados así:

Estratificación N34°E/48°SE

Sistema S1 N56°E/56°NW

Sistema S2 N56°W/83°NE

El canal del rebosadero será fundado sobre el horizonte de roca fracturada y moderadamente meteorizada con velocidad de onda de 1040 m/s a 1180 m/s.

Establecido el perfil de la calidad de la roca en función de la velocidad de onda V_p , se encuentra que la estructura de control y el deflector están ubicados muy cerca de una roca poco meteorizada y fracturada muy cercana al refractor mayor de 3000 m/s, pero que la zona media del canal se encontraría en roca más alterada y fracturada de velocidad algo superior a 1000 m/s.

Si bien la roca de fundación mencionada puede ser adecuada para cimentar el canal del rebosadero, los materiales de excavación estarían compuestos por fragmentos de roca meteorizada con rellenos de arcilla en sus fracturas que contaminarían los fragmentos granulares de la presa y darían origen a un contenido de finos significativo. El material resultante, no es muy competente y es de todas formas de calidad inferior a las gravas aluviales, por lo tanto no debe ser utilizado como fuente de material para la presa.

Los principales sistemas de discontinuidades en el sector del rebosadero corresponden a los mismos sistemas presentes en el estribo izquierdo de la presa y tratados en el numeral 6.1.

Se puede prever que los tres sistemas de discontinuidades formen cuñas inestables que puedan deslizarse por el plano de estratificación en el talud izquierdo de la excavación del rebosadero.

5.4.2 Rebosadero para la presa a la cota 3782 msnm

En el Plano 6 el perfil geológico del rebosadero para la presa final indica que la zona del canal de aducción de la estructura de control y de la primera parte del canal, está conformada por limolitas gris verdoso, micáceas, finamente estratificadas, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo, parcialmente cubiertas por sedimentos de depósito de coluvión con espesor hasta de 1,0 m. La parte baja del canal está conformada por limolitas, gris verdosas, micáceas con apariencia masiva, pertenecientes al mismo nivel B1-a de la Formación Anzaldo.

El espesor de los suelos y de la roca meteorizada, también se encuentra a profundidad hasta de 13 m en la parte alta y hasta de 6,0 m en la parte baja del rebosadero. Por debajo de estas profundidades se encuentra roca fracturada a poco fracturada a profundidad hasta de 24 m en la parte alta y hasta de 9,0 m en la parte inferior. Por debajo de la roca moderadamente fracturada se encuentra la roca sana con velocidades de onda mayores de 3500 m/s.

Los taludes de la excavación del canal de aducción quedaran conformados en la parte superior, en el horizonte de roca meteorizada con velocidad de onda de 770 m/s y en la parte media e inferior en el horizonte de roca fracturada y moderadamente meteorizada con velocidad de onda de 1250 m/s.

La estructura de control quedará fundada sobre el horizonte de roca fracturada y moderadamente meteorizada con velocidad de onda 1250 m/s.

El canal del rebosadero será fundado sobre el horizonte de roca fracturada y moderadamente meteorizada con velocidad de onda de 1040 m/s a 1180 m/s.

Los principales sistemas de discontinuidades en el sector del rebosadero corresponden a los mismos sistemas presentes en el estribo izquierdo de la presa y se muestran en el numeral 6.1.

Se puede prever que los tres sistemas de discontinuidades formen cuñas inestables que puedan deslizarse por el plano de estratificación en el talud izquierdo de la excavación del rebosadero.

5.5 Túnel de Desviación

El túnel de desviación del río Misicuni para la construcción de la presa se excavará en su margen izquierda, entre las cotas 3672 msnm y 3667 msnm.

En los Planos 3 y 7 se muestra el alineamiento del túnel en planta y perfil, el cual tiene una longitud de 470 m, un diámetro útil de 4,50 m y una pendiente de 1,02%.

Entre la abscisa K0+000 y la abscisa K0+170 el túnel se excavará en limolitas de grano muy fino, gris verdosas, micáceas con apariencia masiva, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo. Entre las abscisas K0+170 y K0+470 se excavará en el paquete de limolitas, gris verdosas, micáceas finamente estratificadas, que subyace al anterior dentro del mismo nivel B1-a de la Formación Anzaldo.

De la abscisa K0+000 a la abscisa K0+020 aproximadamente, se espera excavar roca moderadamente meteorizada y moderadamente fracturada, con velocidad de onda de 1600 m/s de acuerdo con la línea sísmica S-20 aunque localmente puede presentarse muy fracturada, por efecto de la zona de cizalla que atravesará.

Entre las abscisas K0+020 y K0+170 aproximadamente, se espera excavar roca sana y poco fracturada con velocidad de onda de 4400 m/s y aunque localmente muy fracturada en el sitio de la Falla H.

Entre las abscisas K0+170 y K0+440 aproximadamente, se espera excavar roca sana y poco fracturada pero finamente estratificada con velocidad de onda de 4400 m/s a 4600 m/s, desmejorando las condiciones de excavación y autosoporte con respecto al tramo anterior.

Entre las abscisas K0+440 aproximadamente y K0+470 se espera excavar roca moderadamente meteorizada y moderadamente a muy fracturada con velocidad de onda de 1180 m/s a 1990 m/s. Entre las abscisas K0+470 a K0+500 se espera excavar roca muy meteorizada con velocidades de onda de 625 m/s.

Los sistemas de discontinuidades que forman cuñas potencialmente inestables en el túnel están constituidos por la estratificación y dos sistemas de diaclasas orientados así:

Estratificación N25°-35°E/35°-45°E.

Sistema S1 N30°-40°E/45°-80°W.

Sistema S2 N75°-90°W/75°-80°W y 75°-80°E.

5.5.1 Portal de entrada

El portal de entrada del túnel de desviación está conformado por limolitas, gris verdosas, micáceas, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo. La roca se presenta moderadamente a poco meteorizada, moderadamente fracturada, con velocidad de onda de 1600 m/s. Sobre la cota 3680 msnm el área esta cubierta por un depósito de coluvión con espesor no mayor de 1,0 m.

El sector se encuentra afectado por los tres sistemas de discontinuidades constituidos por la estratificación y dos sistemas de diaclasas que se describen a continuación:

Estratificación	N20°-35°E/38°-50°E	Ondulada, cerrada a poco abierta continua, separada 15 cm – 30 cm.
Sistema S1	N30°-50°E/ 54°-80°W	Ondulada, rugosa, abierta entre 0,5 mm y ocasionalmente 0,5 cm, en partes oxidada, continuidad hasta 10 m, separada entre 10 cm y 50 cm.
Sistema S2	N30°-80°W/55°-78°E	Ondulada, rugosa, abierta entre 0,5 mm y ocasionalmente 0,5 cm, continuidad hasta 5m, separada entre 5,0 cm y 50 cm.

5.5.2 Portal de salida

El portal de salida del túnel de desvío está conformado por limolitas, gris verdoso, micáceo finamente estratificado, perteneciente al nivel B1-a de la Formación Anzaldo. Las rocas meteorizadas y fracturadas registran una velocidad de onda de 625 m/s en ensayos de refracción sísmica. En el sector derecho del portal la roca se encuentra cubierta por un depósito de coluvión de espesor no mayor de 1,0 m. Asimismo, se encuentran afectadas tres sistemas constituidos por la estratificación y dos sistemas de diaclasas que se describen a continuación.

Estratificación	N25°-35°E/35°-45°E	Ondulada, cerrada a poco abierta, continua, separada 15 cm – 30 cm
Sistema S1	N30°-40°E/45°-80°W	Ondulada, rugosa, abierta entre 0,5 cm. En partes oxidada, continuidad hasta de 10 cm separada entre 10 cm y 50 cm.
Sistema S2	N75°-90°W/75°-80°W y 75°-80°E	Ondulada, rugosa, abierta entre 0,5 mm y 0,5 cm. Continuidad hasta de 5,0 m, separada entre 5,0 cm y 50 cm.

5.6 Galería de Acceso

La galería de acceso comunica la cámara de válvulas de la descarga de fondo con la superficie. Se describen a continuación las condiciones geológicas del alineamiento de la galería, cuya localización en planta y perfil se muestran en los Planos 3 y 7, respectivamente.

La galería de acceso se excavará entre las cotas 3680 msnm, en superficie, y 3670 msnm, en el sitio donde intersectará el túnel de desviación. Tendrá una longitud de 230 m aproximadamente.

Entre la abscisa K0+000 y la abscisa K0+230 la galería se excavará limolitas, grises verdosos, micáceos finamente estratificados, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo. En la zona del portal la roca está cubierta con un depósito de coluvión con espesor hasta de 1,0 m de espesor.

Entre las abscisas K0+000 y K0+020, aproximadamente se espera excavar roca moderadamente meteorizada y moderadamente fracturada que registra una velocidad de onda de 1180 m/s. Entre las abscisas K0+020 y K0+230 aproximadamente, se espera excavar roca sana y poco fracturada cuya velocidad de onda es de 4600 m/s, pero finamente estratificada por lo cual podrá presentar condiciones desfavorables de excavación y autosoporte.

Los sistemas de discontinuidades que forman cuñas potencialmente inestables en la galería están constituidos por la estratificación y dos sistemas de diaclasas orientadas así:

Estratificación N25°-35°E/35°-45°E.

Sistema S1 N30°-40°E/45°-80°W.

Sistema S2 N75°-90°E/75°-80°W y 75°-80°E.

5.6.1 Portal de entrada

El portal de entrada de la galería de acceso esta conformado por limolitas, gris verdosas, micáceas finamente estratificadas, pertenecientes al nivel B1-a de la Formación Anzaldo.

Entre la abscisa K0+000 y K0+005 la roca se presenta muy meteorizada y fracturada, que registra una velocidad de onda de 783 m/s. Después de la abscisa K0+005 se estima que la roca se presenta moderadamente meteorizada y moderadamente fracturada, en la cual se registra una velocidad de onda de 1180 m/s.

El sector se encuentra afectado por tres sistemas de discontinuidades constituidos por la estratificación y dos sistemas de diaclasas orientados así:

Estratificación N25°-35°E/35°-45°E.

Sistema S1 N30°-40°E/45°-80°W.

Sistema S2 N75°-90°E/75°-80°W y 75°-80°E.

6. FUENTES DE MATERIALES

El aspecto fundamental en la obtención de materiales para la construcción de la presa y sus obras anexas es la explotación de las terrazas aluviales existentes a lo largo del río Misicuni, aguas arriba del sitio de las obras. Estas playas son de gran extensión, de espesores suficientes para una explotación industrial con volumen de material aprovechable superior al requerido para las obras. Lo anterior no descarta la posibilidad de que existan estratos finos intercalados entre los materiales aprovechables, ni granos y arenas contenidos en una matriz arcillosa no aprovechable, en sitios determinados.

Además de los materiales aluviales, existen depósitos morrénicos originados por flujos glaciales a lo largo de tributarios del río Misicuni. Tal es el caso del depósito morrénico existente inmediatamente aguas arriba de la ataguía, frente a la desembocadura del río Sivingani, que se extiende aguas arriba y a lo largo de dicho río. Estos depósitos también son fuentes potenciales de materiales.

Adicionalmente a las fuentes de materiales anteriores, en el diseño de la presa se ha considerado la posibilidad de explotar material de una masa rocosa de buena calidad, ante la eventualidad de que el Contratista considere conveniente obtenerlos de una cantera cercana. Aunque se presenta en estos documentos, esta fuente puede tener mayor importancia en la construcción de la segunda etapa de la presa, cuando el embalse haya inundado todas las playas aluviales y las morrenas cercanas al mismo. Esta cantera se ubica inmediatamente aguas abajo de la presa en la margen derecha del río negro Kheymo, en su confluencia con el río Misicuni. Está compuesto por limolitas y areniscas de grano fino de muy buena calidad.

Con base en la información preparada por Electrowatt y los reconocimientos y exploraciones de campo realizadas recientemente por EMM, se describen a continuación los sitios para explotación de los materiales necesarios para la construcción de los rellenos de la presa y elaboración de concretos. Estos sitios se muestran en los Planos 8 y 9.

Los límites de las zonas de préstamo mostradas en los planos son solamente ilustrativas y sus límites son aproximados. No se establece ninguna garantía de que en estos lugares exista la cantidad suficiente de material requerido para las obras. El contratista tiene la plena responsabilidad de asegurar la cantidad, calidad y distribución granulométrica de los materiales requeridos para las obras bajo este contrato.

6.1 Área de Cantera río Negro Kheymo

Localizada a unos 300 m aguas abajo del sitio de la presa por la margen derecha del río. Conformada por limolita y arenisca dura, de grano muy fino, en capas de 10 cm a 20 cm. Se presentan algunos niveles delgados de limolita más blanda separando paquetes de roca dura de aproximadamente 5,0 m de espesor. Se estima que en la zona mostrada en el Plano 9 se podrían obtener cerca de 1 000 000 m³ de material para enrocado.

6.2 Depósitos Aluviales del río Misicuni

Están localizados a lo largo del río Misicuni entre unos 100 m y 8,0 km aguas arriba del sitio de presa, según se muestra en el Plano 8 y están constituidos por grava, arena y limo, con un espesor promedio estimado en 5,0 m.

Las propiedades de los materiales aluviales del río Misicuni fueron establecidas mediante las investigaciones realizadas durante el diseño anterior. En general están conformados por gravas duras y limpias, de forma subangular a redondeada. Se estima que un 20% del material excede 24 pulgadas de diámetro (60,96 cm) y un 50% es mayor de 3 pulgadas (7,62 cm); este último presenta un porcentaje de desgaste entre 21% y 29%.

Las investigaciones adelantadas durante el diseño anterior incluyeron la excavación de canaletas, pozos y trincheras, localizadas según se indica en el plano 8, a lo largo del río Misicuni, entre la

desembocadura de los ríos Sivingani y Serkheta, en una extensión de 5km. Estas investigaciones fueron las siguientes:

- Canaletas. De la Z-1 a la Z-9, con profundidades entre 3,80 m y 6,80 m.
- Pozos. Del 7-1 al 7-4 y del 8-1 al 8-4, con profundidades entre 1,0 m y 5,60 m.
- Trincheras. Del HOR-9 al HOR-12, con profundidad del orden de 1,0 m.
- Calicatas. De la C-1 a la C-8, con profundidades entre 2,0 m y 4,0 m. Excavadas en la presente etapa de estudios.

Aguas abajo de la desembocadura del río Serkheta en una extensión de 3,0 km se investigaron los aluviales mediante las trincheras HOR-1 a HOR-9 con profundidades de 1,0 m.

Durante la presente etapa se excavaron ocho calicatas con profundidad de 4,0 m principalmente y 2 0 m ocasionalmente. En general las calicatas muestran un horizonte de suelo orgánico con espesor hasta de 0,5 m, por debajo del suelo orgánico se encuentra un estrato de arcilla con espesor de 0,4 m, el cual cubre material grueso constituido desde una grava bien gradada con limo y arena (GW-GM) hasta arena arcillosa con grava (SC). Este perfil en general es constante excepto en la calicata C-1, sector aguas arriba de la presa, en la que bajo el suelo orgánico solamente se encuentra arcilla (CL). En varios cortes cerca de las calicatas se ha evidenciado que el material grueso se extiende hasta por debajo de 4,0 m. Los resultados de los ensayos de campo y de laboratorio efectuados durante este diseño sobre estos materiales, son similares a los obtenidos en las etapas anteriores de estudios.

En el Plano 8 se han delimitado las áreas de los depósitos aluviales investigados en una extensión aproximada de 7,5 km, obteniéndose una extensión de 114 Ha de explotación potencial. Si consideramos una profundidad promedio de explotación de 4,0 m, obtendríamos del orden de 4,5 millones de m³ de materiales utilizables para la construcción de la presa y obras anexas. El volumen aproximado del material explotable en función de la distancia a la presa sería el siguiente:

DISTANCIA DE LA PRESA (km)	VOLUMEN PARCIAL (m³) x 1000	VOLUMEN ACUMULADO (m³) x 1000
1,0	525	525
2,0	556	1081
3,0	623	1704
4,0	295	1999
5,0	617	2616
6,0	812	3428
7,0	837	4265
7,5	290	4555

De acuerdo con lo anterior, se confirma entonces que la presa puede construirse con los materiales disponibles en las áreas contiguas a ella, los cuales son de excelente calidad pétreo. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que dentro de los depósitos mencionados pueden existir sectores con materiales que no cumplan las especificaciones granulométricas en su estado natural y que deba requerirse de alguna clasificación y/o lavado para lograrlo aparte de tener que desechar algunos materiales.

ANEXO 1

Registros de los sondeos de refracción sísmica ejecutados en diciembre de 2002

ANEXO 2

Trincheras. Perfiles estratigráficos y registros fotográficos

PLANOS
