



**ESTUDIO GEOLOGICO – GEOFISICO DEL PROYECTO  
PUERTA DEL SOL, DEL SISTEMA DE PRESAS DEL RIO SONORA**

**INFORME**

## INDICE

<b>1. INTRODUCCION .....</b>	<b>6</b>
1.1. Antecedentes .....	6
1.2. Objetivos y alcances .....	6
1.3. Localización del proyecto .....	7
1.4. Anteproyecto de la presa .....	8
<b>2. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....</b>	<b>12</b>
2.1. Recopilación y análisis de información .....	12
2.2. Análisis fotogeológico .....	12
2.3. Levantamiento geológico .....	12
2.4. Estudio geofísico .....	13
2.5. Sondeos exploratorios .....	14
· Perforación de sondeos .....	14
· Pruebas de permeabilidad .....	17
2.6. Integración, interpretación, elaboración de planos e informe final .....	17
<b>3. ESTUDIO PREVIO, CONSULTORES EN INGENIERIA S.A., 2006 .....</b>	<b>18</b>
3.1. Información geológica del estudio previo 2006 .....	19
3.2. Procesamiento de la información previa 2006 .....	22
3.3. Conclusiones y recomendaciones del informe previo 2006 .....	22
<b>4. MODELO GEOLÓGICO .....</b>	<b>25</b>
4.1. Marco geológico regional .....	25
4.2. Geología de la boquilla .....	27
· Unidades litológicas .....	27
· Geología estructural de la boquilla .....	31
· Ensayos in situ con martillo de Schmidt .....	36

4.3.     Modelo geológico de la boquilla .....	37
<b>5. MODELO GEOSÍSMICO .....</b>	<b>42</b>
5.1.     Distribución de los Tendidos Sísmicos .....	42
5.2.     Unidades sísmicas .....	46
·     Margen izquierda .....	46
·     Cauce.....	51
·     Margen Derecho .....	54
5.3.     Unidades geosísmicas .....	59
<b>6. MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LA BOQUILLA .....</b>	<b>64</b>
6.1.     Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos .....	64
6.2.     Mecanismos de falla y problemas geotécnicos.....	66
·     Mecanismos de falla Margen Derecho.....	66
·     Mecanismos de falla Margen Izquierdo .....	67
·     Cause del río .....	70
6.3.     Integración y desarrollo del modelo geológico-geotécnico.....	70
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>8. REFERENCIAS.....</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1.1 Localización del sitio de la presa Puerta del Sol .....	8
Figura 1.2 Características de la presa.....	9
Figura 1.3 Planta de la presa y obras auxiliares .....	10
Figura 1.4 Perfil sobre el eje de la cortina .....	11
Figura 1.5 Sección de la cortina vertedora.....	11
Figura 2.1 Localización de sondeos exploratorios .....	15
Figura 2.2 Resultados del sondeo S-3 .....	16
Figura 3.1 Ubicación del eje de la presa en el estudio 2006 y el eje actual ubicado aguas arriba .....	19
Figura 3.2 Localización de exploraciones y geología .....	20
Figura 3.3 Perfiles geológicos de la boquilla y vertedor .....	21
Figura 3.4 Reinterpretación geológica de los sondeos del eje de la boquilla .....	23
Figura 3.5 Reinterpretación geológica de los sondeos del eje del vertedor, a partir del estudio previo .....	24
Figura 4.1 Columna estratigráfica de la zona (SGM,2021).....	26
Figura 4.2 Plano geológico de la zona (SGM, 2021) .....	27
Figura 4.3 Estereograma de las familias de fracturas en la boquilla de la presa.....	31
Figura 4.4 Análisis estadístico de la variación del echado y la dirección del echado en las familias de fractura .....	33
Figura 4.5 Plano geológico de la boquilla y exploración del subsuelo .....	38
Figura 4.6 Sección geológica por el eje de la cortina .....	39
Figura 5.1 Coordenadas y distribución de los Tendidos Sísmicos .....	45
Figura 5.2 Zonificación sísmica del Tendido TRS-1 .....	46
Figura 5.3 Zonificación sísmica del Tendido TRS-05 .....	47
Figura 5.4 Zonificación sísmica del Tendido TRS-08 .....	49
Figura 5.5 Zonificación sísmica del Tendido TRS-09 .....	50
Figura 5.6 Zonificación sísmica del Tendido TRS-02 .....	51
Figura 5.7 Zonificación sísmica del Tendido TRS-03 .....	52
Figura 5.8 Zonificación sísmica del tendido TRS-04.....	53
Figura 5.9 Zonificación sísmica del tendido TRS-06.....	55
Figura 5.10 Zonificación sísmica del Tendido TRS-07 .....	57
Figura 5.11 Perfil sísmico TRS a lo largo del eje de la cortina de la presa .....	60
Figura 6.1 Clasificación GSI modificada, aplicada para las unidades geológico-geotécnicas del corte .....	65
Figura 6.2 Análisis cinemático de estabilidad en margen izquierda .....	67
Figura 6.3 Análisis cinemático de estabilidad en margen derecha. .....	68
Figura 6.4 Perfil longitudinal a lo largo del eje de la presa .....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Variación estadística de datos estructurales .....	34
Tabla 4.2 Resultados de los ensayos efectuados con Martillo Schmidt.....	36
Tabla 4.3 Características de las unidades geológicas de la boquilla .....	40
Tabla 5.1 Coordenadas y distribución de los Tendidos Sísmicos .....	43
Tabla 5.2 Unidades sísmicas TRS-01 .....	47
Tabla 5.3 Unidades Sísmicas TRS-05 .....	48
Tabla 5.4 Unidades sísmicas TRS-08 .....	49
Tabla 5.5 unidades Sísmicas TRS-09 .....	50
Tabla 5.6 Unidades Sísmicas TRS-02 .....	52
Tabla 5.7 Unidades Sísmicas TRS-03 .....	53
Tabla 5.8 Unidades Sísmicas TRS-04 .....	54
Tabla 5.9 Unidades Sísmicas TRS-06 .....	56
Tabla 5.10 Unidades Sísmicas TRS-07 .....	58
Tabla 5.11 Unidades Geosísmicas del Margen Izquierdo .....	61
Tabla 5.12 Unidades Geosísmicas de la zona del Cauce .....	62
Tabla 5.13 Unidades Geosísmicas del Margen derecho .....	63
Tabla 6.1 Clasificaciones geomecánicas de las unidades geológico-geotécnicas definidas .....	66
Tabla 6.2 resumen de las características de cada una de las unidades.....	73

## INDICE DE PLANOS

- Plano 01. Modelo geológico de la boquilla y exploración del subsuelo
- Plano 02. Sección geológica por el eje de la cortina
- Plano 04. Secciones sísmicas y geosísmicas de la margen izquierda
- Plano 05. Secciones sísmicas y geosísmicas del cauce y margen derecha
- Plano 05. Modelo geológico - geotécnico de la boquilla

## INDICE DE ANEXOS

- ANEXO 01. Diseño Cortina CCR
- ANEXO 02. Estudio geológico Consultores en Ingeniería, S.A., 2006
- ANEXO 03. Levantamiento fotográfico con dron
- ANEXO 04. Estudio geosísmico
- ANEXO 05. Sondeos exploratorios y Pruebas de permeabilidad
- ANEXO 06. Topografía
- ANEXO 07. análisis geológico – geotécnico
- ANEXO 08. Análisis estructural

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. Antecedentes

El proyecto de la presa Puerta del Sol tiene como finalidad atender dos necesidades estratégicas para la región: por un lado, operar como un sistema de almacenamiento que permita cubrir los requerimientos de agua potable de la ciudad de Hermosillo, considerando la situación actual de sobreexplotación de fuentes superficiales y subterráneas, así como las expectativas de crecimiento urbano y la intensa actividad agrícola en las planicies de la cuenca baja.

otro lado, funcionar como una estructura de control hidráulico ante avenidas extraordinarias del río Sonora, que en épocas de precipitaciones intensas provocan inundaciones severas desde el poblado de Sinoquipe hasta aguas abajo, afectando a Banámichi, Huepac, San Felipe, Aconchi y Baviácora, así como a los ejidos Puerta del Sol, San Pedro, Ures, Santiago, El Sauz, Guadalupe y San Rafael. En eventos extremos, estas avenidas han ocasionado afectaciones superiores al 70% de la superficie agrícola ubicada en los márgenes del río.

Esta problemática evidencia una demanda creciente de volúmenes de agua que difícilmente puede ser satisfecha con las fuentes actuales del río Sonora, por lo que la Comisión Estatal del Agua (CEA) consideró indispensable realizar un Estudio de Factibilidad para la construcción de una presa reguladora de avenidas en el sitio conocido como Puerta del Sol, localizado dentro del municipio de Ures. Dicho estudio fue realizado en el año 2006 mediante contrato con la empresa Consultores en Ingeniería, S.A., y como resultado se determinó que el sitio de boquilla presentaba condiciones geológicas e hidrológicas favorables para la construcción de una presa de almacenamiento y control.

Se analizaron tres alternativas de cortina: de mampostería, de materiales graduados desplantada sobre roca basal (previa remoción de aluviones), y de materiales graduados desplantada directamente sobre depósitos aluviales, siendo esta última la más viable desde el punto de vista técnico y económico. No obstante, análisis realizados en los años 2024 y 2025 concluyeron que el sitio de boquilla evaluado en 2006 presentaba limitaciones topográficas en la margen derecha, por lo que se recomendó desplazar el eje de la presa 500 metros aguas arriba, donde se identificaron condiciones topográficas más favorables en ambas laderas. En consecuencia, durante el año 2025 la CEA procedió a realizar los estudios topográficos, geológicos, geofísicos y geotécnicos en el nuevo eje seleccionado, con el objetivo de desarrollar el anteproyecto de la presa y sus obras auxiliares.

### 1.2. Objetivos y alcances

El estudio geológico realizado para el proyecto de la presa Puerta del Sol tuvo como objetivo general evaluar las condiciones de calidad del macizo rocoso en el área de emplazamiento, con el fin de determinar su idoneidad para la construcción de la cortina y las obras auxiliares.

Para ello, se llevaron a cabo levantamientos geológicos superficiales, estudios geofísicos mediante el método sísmico de refracción y sondeos directos del subsuelo.

El levantamiento geológico superficial tuvo como propósito caracterizar la distribución, grado de alteración, consistencia y fracturamiento de las unidades litológicas presentes en la zona de la cortina y sus obras complementarias, permitiendo identificar zonas de mayor estabilidad y establecer criterios técnicos para el diseño estructural.

Los estudios geofísicos se realizaron utilizando el método sísmico de refracción, con el objetivo de identificar variaciones en la calidad del macizo rocoso en profundidad, a partir del análisis de las velocidades sísmicas primarias (P) y secundarias (S). Asimismo, se definió la profundidad del contacto entre los depósitos aluviales del río Sonora y la roca basal, información fundamental para el diseño de cimentaciones y obras de control hidráulico.

Por su parte, los sondeos exploratorios permitieron determinar de forma directa las condiciones de alteración, consistencia y fracturamiento del macizo rocoso en las laderas y el cauce del río, así como evaluar el grado de permeabilidad de los materiales mediante pruebas de absorción realizadas en sitio. Estos resultados aportaron parámetros geotécnicos esenciales para el diseño de la cortina, obras de impermeabilización y demás estructuras asociadas al proyecto.

### 1.3. Localización del proyecto

El municipio de Ures está ubicado en el centro del Estado de Sonora, su cabecera es la población de Ures y se localiza en el paralelo 29° 25' 16" de Latitud Norte y a los 110° 23' 37" de Longitud al Oeste del Meridiano de Greenwich, a una altura aproximada a los 432 metros sobre el nivel del mar, colinda al Norte con Aconchi, al Este con Villa Pesquería. Al Sur con Mazatlán, al Oeste con Hermosillo y San Miguel de Horcasitas, al Noroeste con Baviácora y al Noreste con Rayón, posee una superficie de 2,618.56 Kilómetros cuadrados, que representan el 1.41 por ciento del total Estatal y el 0.13 por ciento del Nacional; las localidades más importantes son: Guadalupe de Ures, San Pedro, Pueblo de Álamos, El Sauz.

El área de estudio se localiza en el municipio de Ures en su cercanía al Poblado Puerta del Sol. El sitio de la boquilla está localizado en las siguientes coordenadas: X=573119.8666, Y=3260481.7215. En la Figura 1.1 se muestra la ubicación del sitio de la presa.

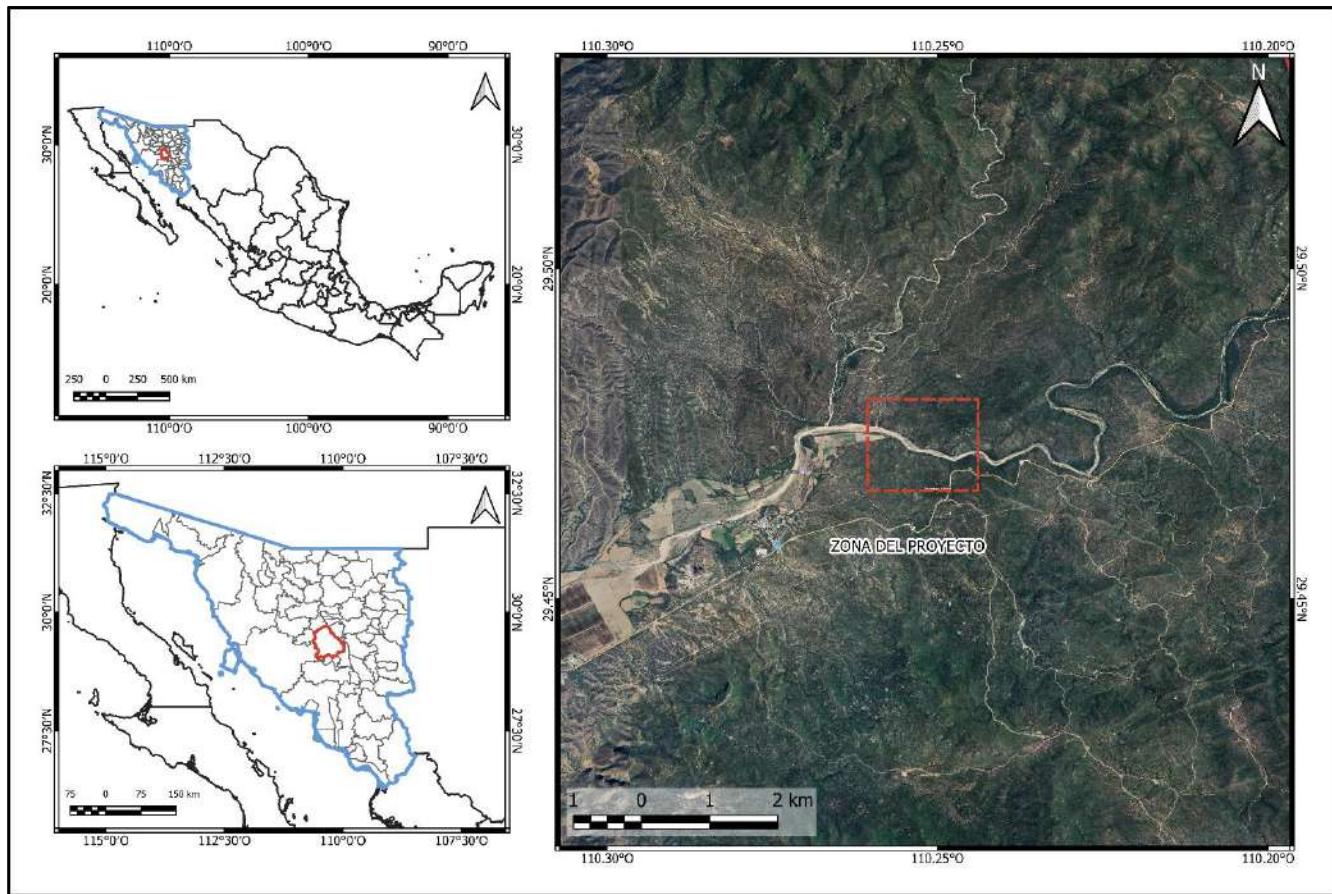


Figura 1.1 Localización del sitio de la presa Puerta del Sol

#### 1.4. Anteproyecto de la presa

El anteproyecto realizado de la presa comprende una cortina de concreto compactado con rodillo (CCR), con una longitud de 280 m, con una altura de 78 m, considerando el desplante después de remover aluvión y roca alterada.

El vertedor se encuentra adosado a la cortina de 70 m de ancho. La obra de desvío se localiza en margen derecha, mediante un canal de 31 m de ancho y 420 m de longitud, ubicado en margen izquierda.

En la figura 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5 se muestran las características de la presa, la planta, perfil por eje de cortina y una sección cortina vertedora.

<b>CAPACIDADES (HM<sup>3</sup>)</b>	
N.A.M.E	173.89 hm <sup>3</sup>
N.A.M.O (CONSERVACIÓN)	127.80 hm <sup>3</sup>
N.A.MIN. (AZOLVE)	20.00 hm <sup>3</sup>
CAPACIDAD UTIL	107.80 hm <sup>3</sup>
<b>ALTURAS (ELEVACIONES EN MSNM)</b>	
CORONA	483.00 msnm
N.A.M.E.	482.00 msnm
N.A.M.O.	476.00 msnm
LONGITUD DE LA CORTINA	281.00 m
ALTURA MÁXIMA DE LA CORTINA (DESPLENTE)	78.00 m
LONGITUD DE CRESTA DEL VERTEDOR	70.00 m
CARGA HIDRAULICA SOBRE EL VERTEDOR	6.00 m
<b>GASTOS (M<sup>3</sup>/S)</b>	
AVENIDA MAXIMA (TR=10,000 AÑOS)	XXXX.X m <sup>3</sup> /s
GASTO DE DESCARGA DEL VERTEDOR	2257.0 m <sup>3</sup> /s
<b>OBRA DE TOMA</b>	
GASTO DE DISEÑO DE LA OBRA DE TOMA	1000 LPS
DIÁMETRO DE LA TUBERÍA	30 " Ø

Figura 1.2 Características de la presa

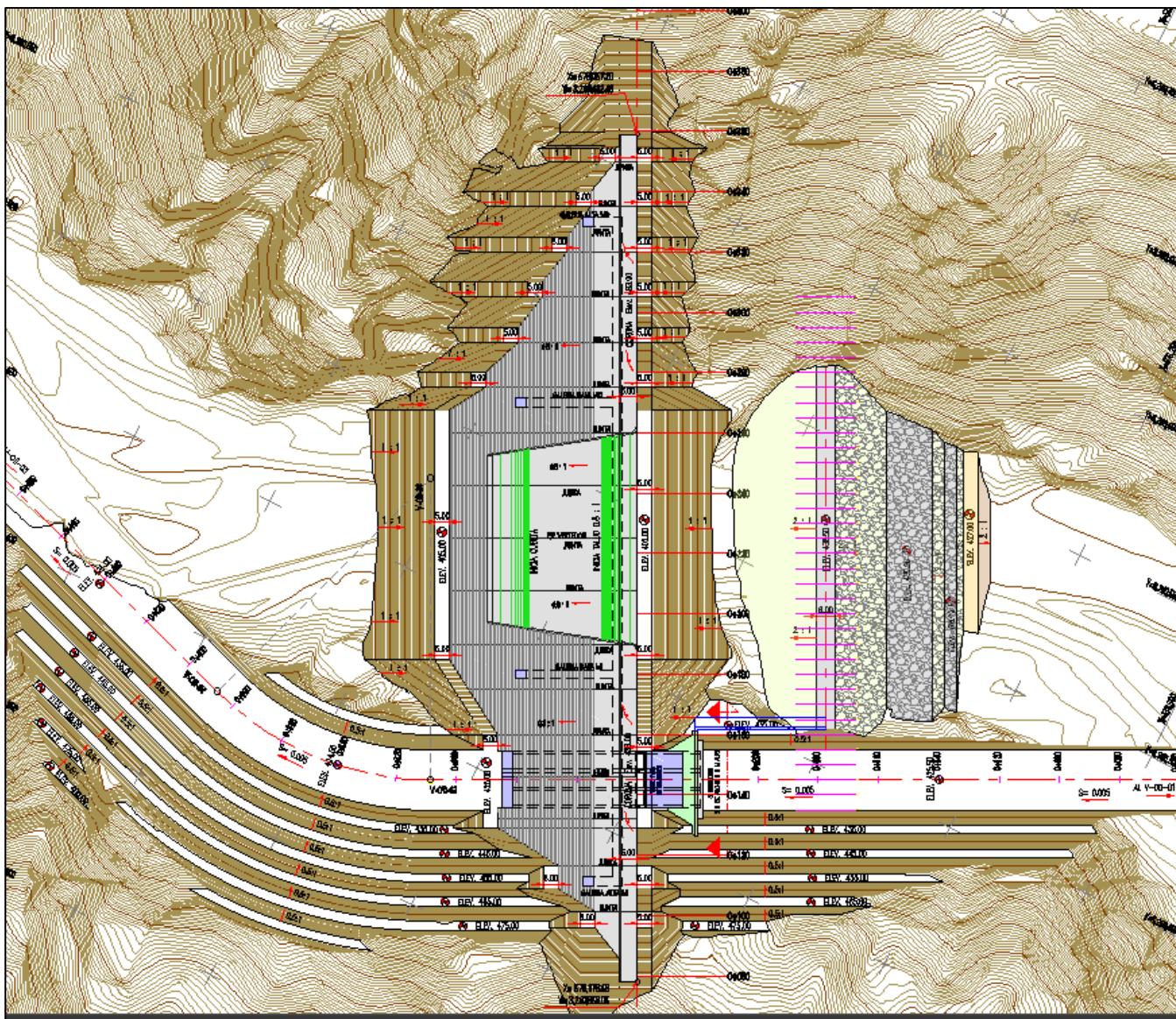


Figura 1.3 Planta de la presa y obras auxiliares

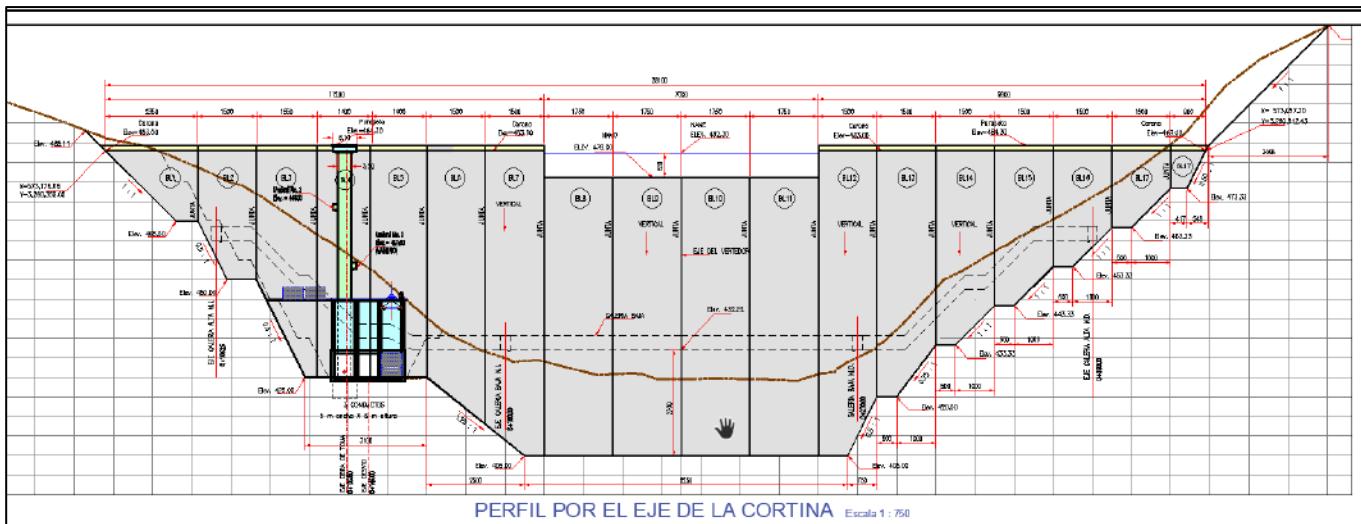


Figura 1.4 Perfil sobre el eje de la cortina

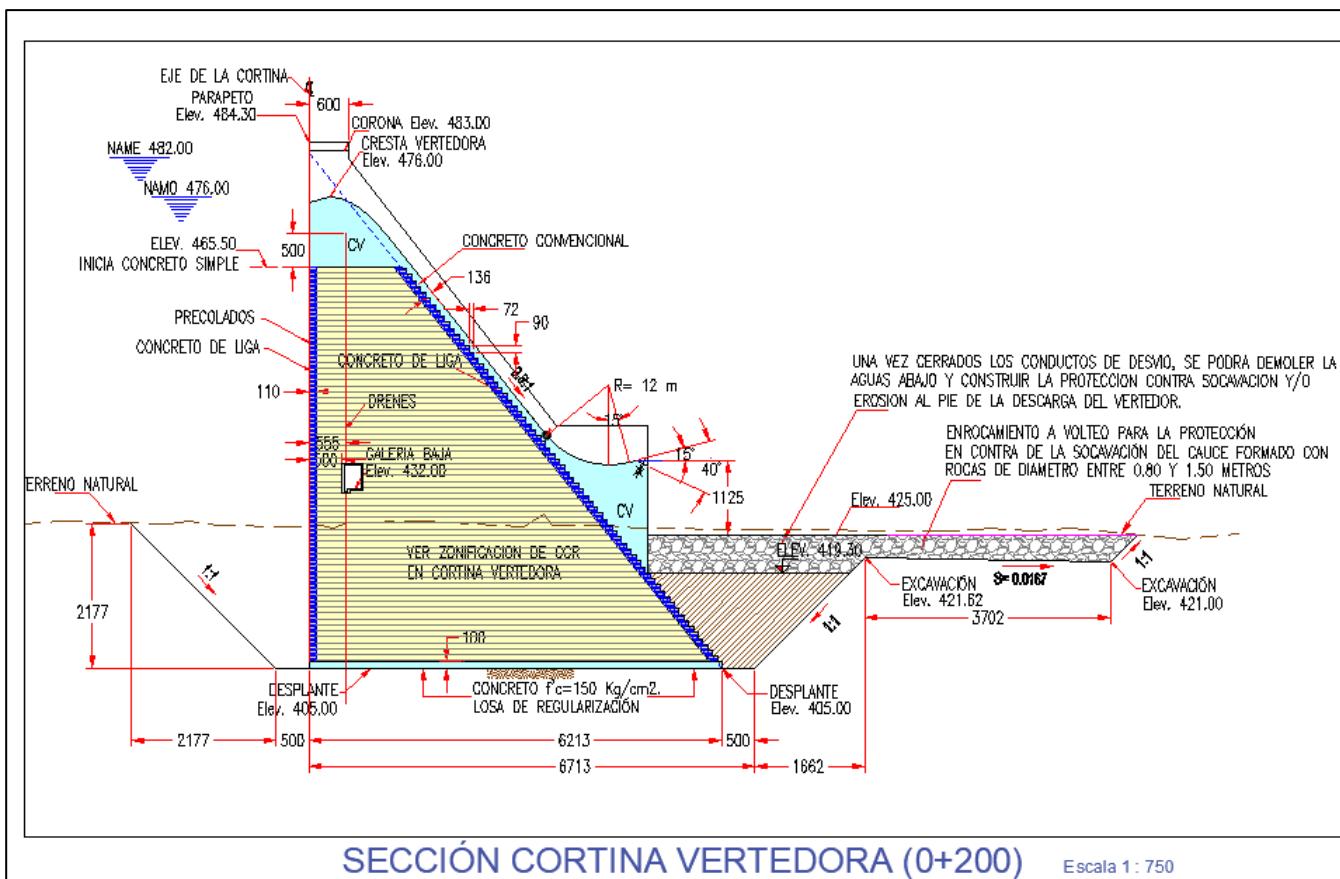


Figura 1.5 Sección de la cortina vertedora

## 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Este capítulo presenta una descripción sintética de la metodología empleada y de las etapas de trabajo desarrolladas para la elaboración del estudio geológico correspondiente al proyecto de la presa “Puerta del Sol”. Se detallan los criterios técnicos que guiaron a la caracterización del sitio, así como las actividades de gabinete, campo y análisis integrados que permitieron establecer las condiciones geológicas relevantes para la obra.

### 2.1. Recopilación y análisis de información

Previo al desarrollo de la campaña de campo, se realizó una revisión sistemática y análisis detallado de la información geológica y topográfica regional disponible para la zona de estudio, con el objetivo de construir un modelo geológico preliminar que orientara las actividades posteriores. La información cartográfica consultada incluyó:

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Carta Geológica H12-8 “Hermosillo”, escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano (SGM): Carta Geológico-Minera H12-D33 “Puerta del Sol”, escala 1:50,000.

Google Earth (2025): Imágenes satelitales recientes correspondientes a la región cercana a la comunidad de Puerta del Sol, Sonora.

Estudio geológico previo realizado en el año 2006 mediante contrato con la empresa Consultores en Ingeniería, S.A.

Información de sondeos perforados a lo largo del eje de la cortina.

### 2.2. Análisis fotogeológico

Como parte de la fase preliminar, se llevó a cabo un análisis fotogeológico de la zona de estudio utilizando imágenes satelitales de alta resolución obtenidas mediante la plataforma Google Earth. Este análisis permitió identificar las condiciones geológico-estructurales del área donde se proyecta la cortina de la presa.

Asimismo, se logró correlacionar y ubicar las principales estructuras previamente mapeadas en las cartas geológicas consultadas durante la etapa de recopilación de información, lo que facilitó la planificación del levantamiento geológico de campo.

### 2.3. Levantamiento geológico

El levantamiento consistió en una primera salida de reconocimiento al área de estudio, con el objetivo de identificar las distintas formaciones geológicas aflorantes, caracterizar detalladamente su litología y documentar las discontinuidades que afectan al macizo rocoso, con especial énfasis en la descripción estructural de estas últimas.

Durante el recorrido se analizaron rasgos geológicos relevantes para el diseño y operación de la presa, tales como evidencias de caída de bloques rocosos que podrían representar un riesgo para la estabilidad de las obras, así como la presencia de depósitos de material granular no consolidado derivado de la meteorización in situ de rocas, los cuales podrían contribuir al proceso de azolvamiento del vaso de la presa debido a su facilidad de transporte y acumulación.

Como parte de las actividades de campo, se realizó el levantamiento geológico estructural, con el fin de caracterizar la orientación, densidad y tipo de fracturamiento presente en el macizo rocoso. Se llevó a cabo la clasificación de las unidades geológicas con enfoque geotécnico, considerando su grado de alteración, consistencia y comportamiento mecánico. Adicionalmente, se aplicaron clasificaciones geomecánicas de campo para evaluar la calidad del macizo, incluyendo parámetros como el RQD, el porcentaje de recuperación y la intensidad de fracturamiento. Para complementar la caracterización de las discontinuidades, se utilizó el martillo Schmidt, herramienta que permitió estimar parámetros de resistencia superficial en zonas representativas del afloramiento rocoso.

#### **2.4. Estudio geofísico**

Se realizó un estudio geofísico utilizando el método sísmico de refracción, mediante el cual se determinaron las velocidades de propagación de ondas sísmicas primarias ( $V_p$ ) y secundarias ( $V_s$ ). A partir de la interpretación de estos datos, fue posible obtener información clave para el diseño y planificación de las obras de la presa, entre la que se destaca lo siguiente:

Definición del espesor y distribución del suelo y de la roca altamente intemperizada que deberá ser removida en la zona de emplazamiento de la cortina.

Identificación de zonas donde el macizo rocoso presenta grados elevados de intemperismo y baja consistencia estructural.

Determinación de la presencia, calidad y profundidad de la roca sana, adecuada para cimentaciones y estructuras de control.

Interpretación de unidades geosísmicas, incluyendo su espesor y distribución en el subsuelo, mediante la elaboración de secciones sísmicas.

Estimación de módulos elástico-dinámicos para evaluar la respuesta del suelo y del macizo rocoso ante esfuerzos y deformaciones.

Evaluación de la excavabilidad y ripabilidad de las distintas unidades geosísmicas, información fundamental para la planificación de actividades constructivas.

El trabajo de campo consistió en la ejecución de nueve Tendidos Sísmicos de Refracción (TSR), con longitudes de 100m, 120 m y 140 m, con un total de 1000 m de tendido y 1020 m de profundidad. Cada tendido se instrumentó con un arreglo lineal de 12 geófonos, espaciados

a intervalos regulares de 10 m, y se realizaron al menos cinco puntos de disparo por línea, distribuidos estratégicamente para garantizar una adecuada cobertura y resolución sísmica.

La fuente sísmica utilizada consistió en impactos controlados con marro sobre una placa metálica, generando impulsos de energía que permitieron registrar las ondas sísmicas en los sensores dispuestos en superficie.

En cada línea de investigación se determinaron las velocidades de propagación de ondas sísmicas primarias ( $V_p$ ) y secundarias ( $V_s$ ), mediante la técnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), aplicada en múltiples puntos de medición a lo largo de los tendidos.

El procesamiento de datos se realizó en gabinete, mediante la lectura precisa de los tiempos de arribo de ondas P y S, utilizando software especializado para la elaboración de gráficas dromocrónicas y perfiles de velocidad que reflejan los cambios en las propiedades dinámicas del subsuelo.

Los resultados de exploración y la ubicación de los tendidos se presentan en el capítulo 5, donde se incluye el modelo geosísmico del sitio. Este modelo comprende:

Un perfil sísmico a lo largo del eje de boquilla.

Secciones sísmicas correspondientes a las distintas obras de la presa.

Los fundamentos teóricos, la descripción del equipo utilizado y las memorias de cálculo correspondientes se detallan en el Anexo 3 Estudio Geosísmico.

## 2.5. Sondeos exploratorios

Con el objetivo de caracterizar directamente el subsuelo en la zona de emplazamiento de la presa, se propone llevar a cabo 5 sondeos exploratorios de 30 m de profundidad de manera que se tenga más información del macizo rocoso en la zona de desplante de la cortina, alcanzando una profundidad acumulada de 150 m

- Perforación de sondeos

Como parte de la campaña de exploración geotécnica para caracterizar el macizo rocoso en la zona de emplazamiento de la cortina, se definió una distribución estratégica de sondeos orientada a obtener información representativa de las condiciones estructurales y litológicas del terreno. La disposición considera tanto el eje del cauce como sus márgenes, con el objetivo de evaluar la continuidad de fracturamientos y la calidad del macizo en profundidad. La distribución de los sondeos se contempla como lo visualizado en la Figura 2.1:

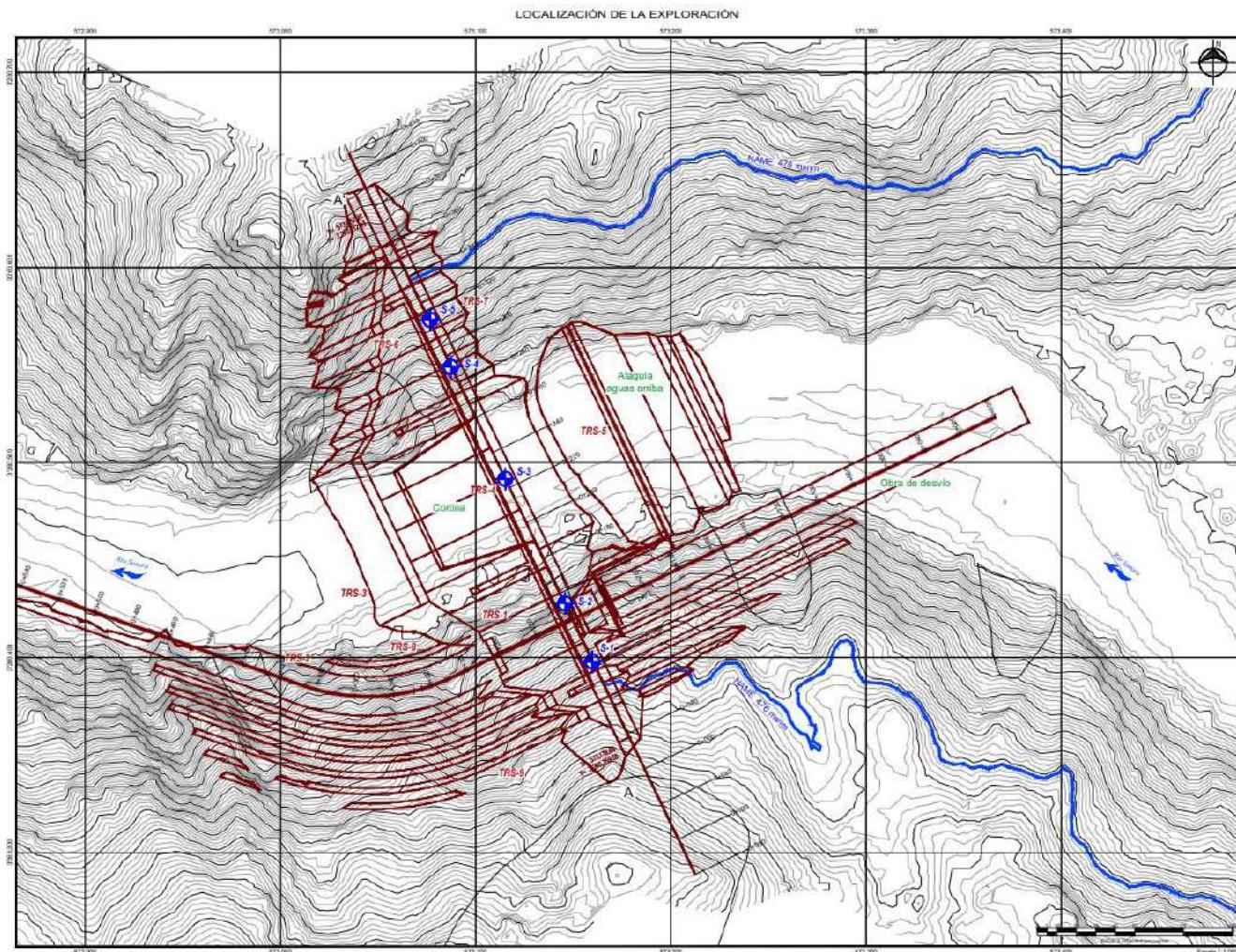


Figura 2.1 Localización de sondeos exploratorios

Un sondeo vertical en el cauce del río, ejecutado con equipo Longyear y recuperación de núcleos en diámetro NQ.

Cuatro sondeos inclinados hacia las laderas, ubicados en los márgenes del cauce, ejecutados con equipo portátil tipo Winkie y recuperación de núcleos en diámetro BQ. Estos se plantean con una inclinación de 60°, con el fin de interceptar el mayor número de fracturas verticales presentes en el macizo rocoso.

La logística y preparación del sitio incluye el traslado, instalación, nivelación y anclaje de la maquinaria de perforación en cada punto de sondeo; movimiento entre sitios de perforación y colocación de ademe metálico recuperable tipo NW en tramos con roca de baja calidad, para estabilizar temporalmente el pozo y evitar obstrucciones por caídos.

La perforación y muestreo empleara la perforación rotaria con recuperación continua de núcleos en diámetro NQ y BQ, utilizando barriles muestreadores adecuados para materiales de alta competencia como granitos; utilizando únicamente agua como fluido de perforación. El sondeo S-3 planteado de manera vertical en el cauce del río ya se ha concluido y sus resultados se presentan en el Anexo 5. Sondeos exploratorios y pruebas de permeabilidad en la Figura 2.2.

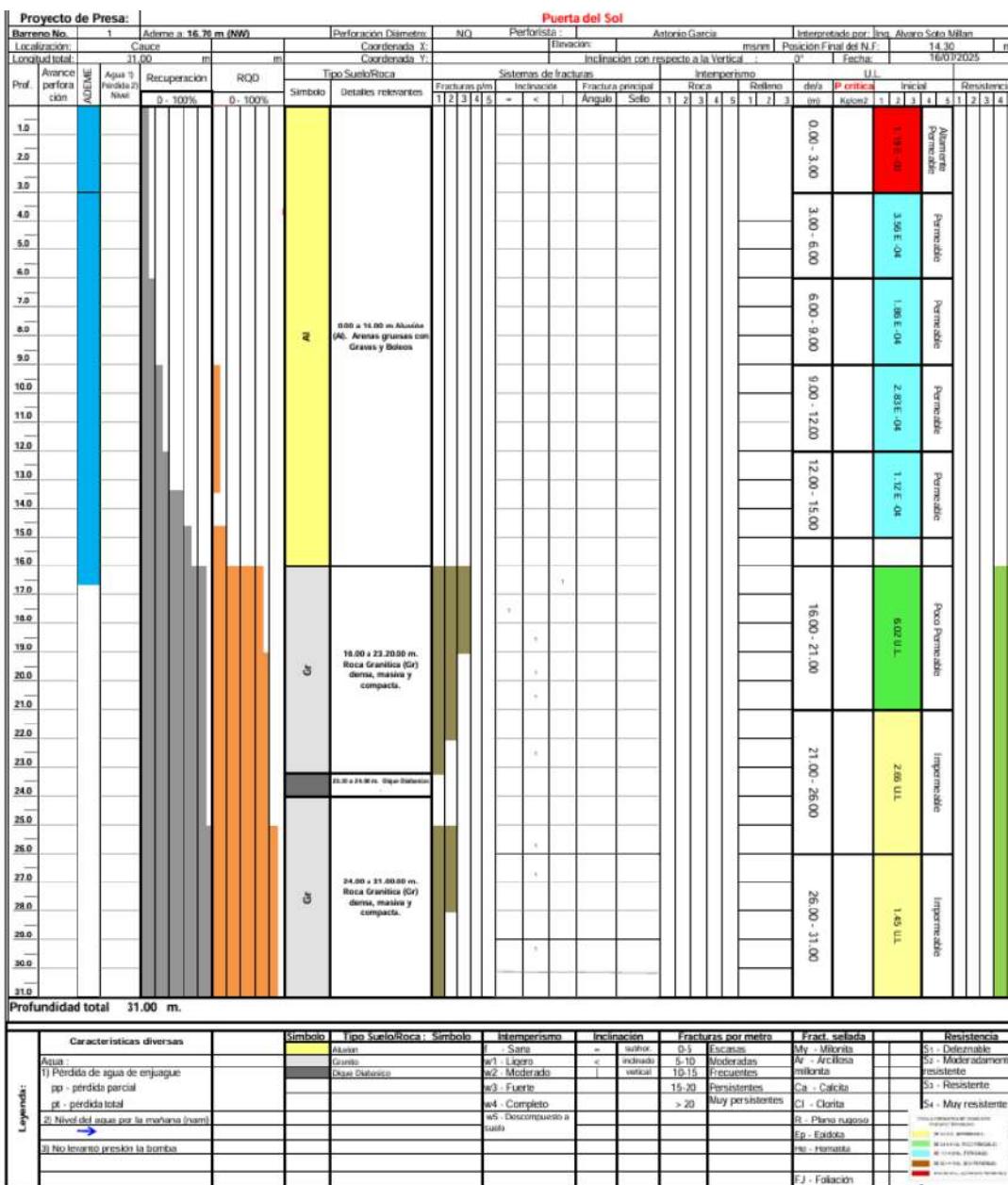


Figura 2.2 Resultados del sondeo S-3

- Pruebas de permeabilidad

Durante los trabajos de perforación se ejecutarán pruebas de permeabilidad in situ en todos los sondeos, utilizando las técnicas Lefranc y Lugeon a intervalos regulares de 5 m, cubriendo la totalidad de la profundidad perforada. Estos ensayos ya fueron realizados en el sondeo 3, y los resultados se encuentran en el Anexo 5. Sondeos exploratorios y pruebas de permeabilidad.

a) Pruebas de permeabilidad tipo Lefranc

Las pruebas Lefranc se aplican en los primeros 5 m a 15 m de profundidad, correspondientes a zonas con depósitos aluviales, suelos residuales y roca altamente alterada o fracturada. Los tramos de ensayo son de 5 m, utilizando el método de inyección con carga variable.

b) Pruebas de permeabilidad tipo Lugeon

Las pruebas Lugeon se aplican en todos los sondeos ubicados sobre el eje de la boquilla, en tramos de 5 m hasta alcanzar la profundidad total de cada perforación. El procedimiento técnico contempla:

- Lavado cuidadoso del tramo a ensayar.
- Colocación de un obturador neumático sencillo en la parte superior del tramo, delimitando el intervalo de prueba entre el obturador y el fondo del pozo.
- Inyección de agua para medición de presiones y consumos, conforme a la metodología establecida.

Se considera una presión crítica de 8 kg/cm<sup>2</sup>, debido a que esta altura representa la altura máxima de la cortina, como límite de referencia, tomando como válidos los valores de absorción inicial si estos son mayores, o los finales si son menores.

## **2.6. Integración, interpretación, elaboración de planos e informe final**

Los datos geológico-geotécnicos obtenidos en el presente estudio se integran con la información geológica generada en etapas previas del proyecto de la presa, permitiendo la interpretación y definición del modelo geológico, geosísmico, hidrogeológico y geotécnico del sitio. Con base en los levantamientos geológicos estructurales y sus respectivos análisis estereográficos, se elaboran planos y secciones de la boquilla, en los que se identifican rasgos morfológicos y estructurales de las unidades litoestratigráficas, familias de fracturas, fallas geológicas y demás evidencias estructurales; los resultados se presentan en el Plano 1 Modelo

geológico de la boquilla y exploración del subsuelo y Plano 2. Sección geológica por el eje de la cortina.

En el Anexo 4. Estudio Geosísmico se integra un perfil sísmico, complementado con los Planos 3 y 4: Sección sísmica y geosísmica de la margen izquierda y Secciones sísmicas y geosísmicas cauce y margen derecha. En estas representaciones se incorpora la información geológica obtenida de los sondeos, junto con los resultados derivados de la propagación de ondas P (método TRS) y ondas S (método MASW), permitiendo una caracterización integrada del subsuelo.

Con los resultados de las pruebas Lefranc y Lugeon se planteará un perfil de permeabilidades que integra los resultados de las presiones efectivas y presiones críticas. Esta información permite realizar una zonificación en unidades hidrogeológicas, indicando además la posición del nivel freático. Los resultados de estos ensayos en el Sondeo 3 se presentan en el Anexo 5. Sondeos exploratorios y pruebas de permeabilidad.

Las secciones geotécnicas se elaboran tomando como base los sondeos exploratorios, integrando de forma gráfica los resultados obtenidos en cada uno de ellos, esta integración permite interpretar las condiciones geotécnicas en las zonas de desplante de las estructuras. Los resultados de estos sondeos se presentan en el Anexo 5 Sondeos exploratorios y pruebas de permeabilidad.

La información geológica y geotécnica se presenta en los Planos anexados, donde se presentan modelos en planta, perfiles longitudinales y secciones transversales, indicando para cada estructura la litología, el sistema de discontinuidades, y las propiedades geotécnicas relevantes (resistencia, deformabilidad y permeabilidad), tanto en el cauce como en las laderas de cimentación, así como en los materiales propuestos para la construcción de la cortina.

El informe final del estudio incluye la totalidad de la información generada, integrando la descripción de actividades realizadas, resultados obtenidos, conclusiones técnicas y recomendaciones derivadas del análisis.

### **3. ESTUDIO PREVIO, CONSULTORES EN INGENIERIA S.A., 2006**

En el año 2006, la Comisión Estatal del Agua de Sonora contrató a la empresa Consultores en Ingeniería, S.A. para llevar a cabo el Estudio de Factibilidad del Proyecto de la Presa de Almacenamiento y Control del Río Sonora en la Puerta del Sol, ubicada en el municipio de Ures, Estado de Sonora.

Como parte de dicho contrato, se desarrollaron estudios socioeconómicos, de tenencia de la tierra, fotogrametría del vaso, estudios geológicos complementarios, análisis de bancos de materiales, evaluación hidrológica y análisis de alternativas de cortina. Asimismo, se elaboró el anteproyecto de la opción seleccionada, incluyendo su evaluación económica y financiera. Los resultados de este estudio se presentan en el Anexo 2. Estudio geológico Consultores en Ingeniería, S.A., 2006.

El estudio geológico complementario se desarrolló básicamente en el sitio de la boquilla que en ese entonces se tenía seleccionada, la cual se ubica a 500 m aguas abajo del eje que actualmente se tiene contemplado para construir la presa, tal como se ilustra en la Figura 3.1.

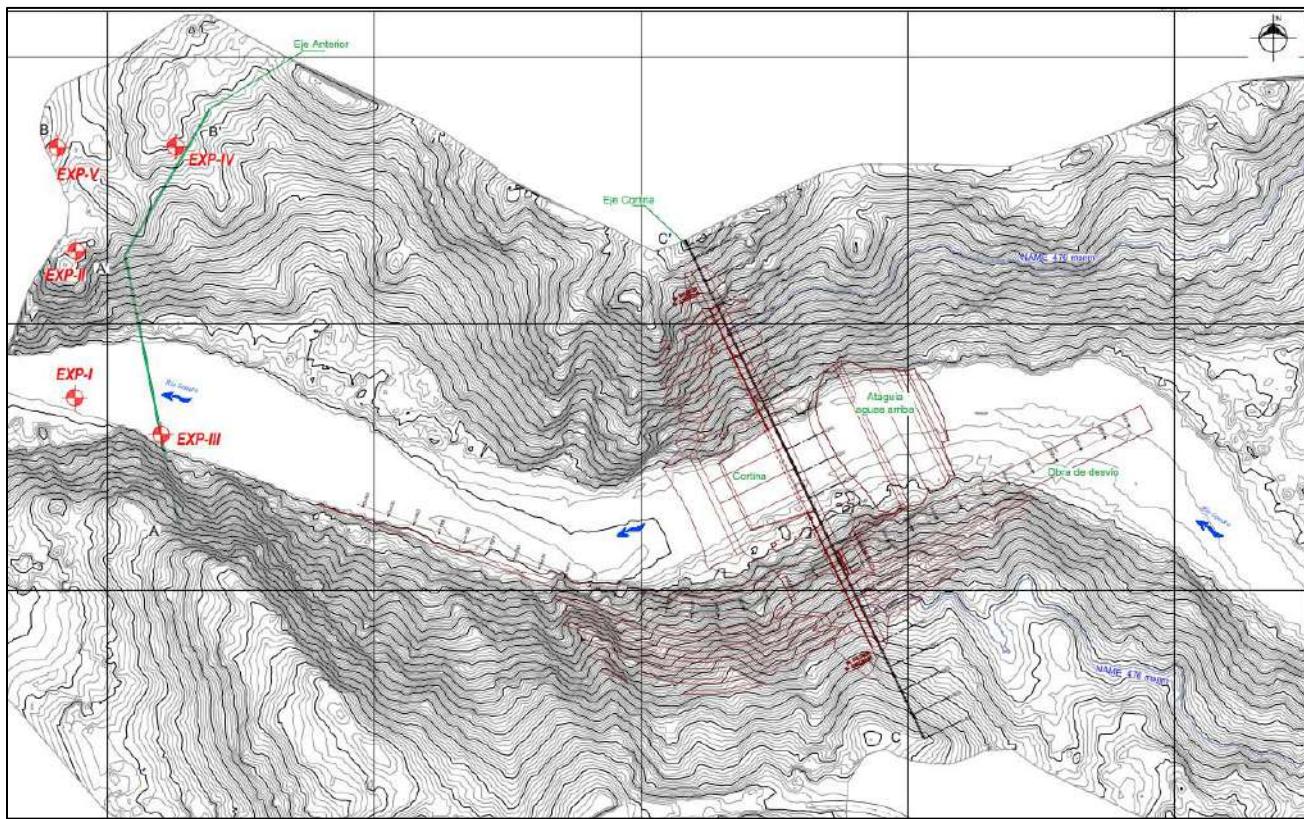


Figura 3.1 Ubicación del eje de la presa en el estudio 2006 y el eje actual ubicado aguas arriba

### 3.1. Información geológica del estudio previo 2006

Se resume la información del Informe Geológico (se incluye en Anexo 2.1 Informe Geológico).

- Informe geológico complementario (Capítulo VI), que contiene:
  - Marco geológico regional

- Geología regional
- Geología de la boquilla
- Exploración geotécnica mediante tres sondeos:
  - EXP III EST. 0 + 070 (Eje Cortina) ELEV. 421.85 PROF. 30.00
  - EXP IV EST. 0 + 030 (Eje Vertedor) ELEV. 483.15 PROF. 25.00
  - EXP V EST. 0 + 120 (Eje Vertedor) ELEV. 463.10 PROF. 25.00
- Resultados de las exploraciones y pruebas de permeabilidad
- Comentarios a la geotecnia realizada
- Conclusiones y recomendaciones

Se incluyen dos planos geológicos:

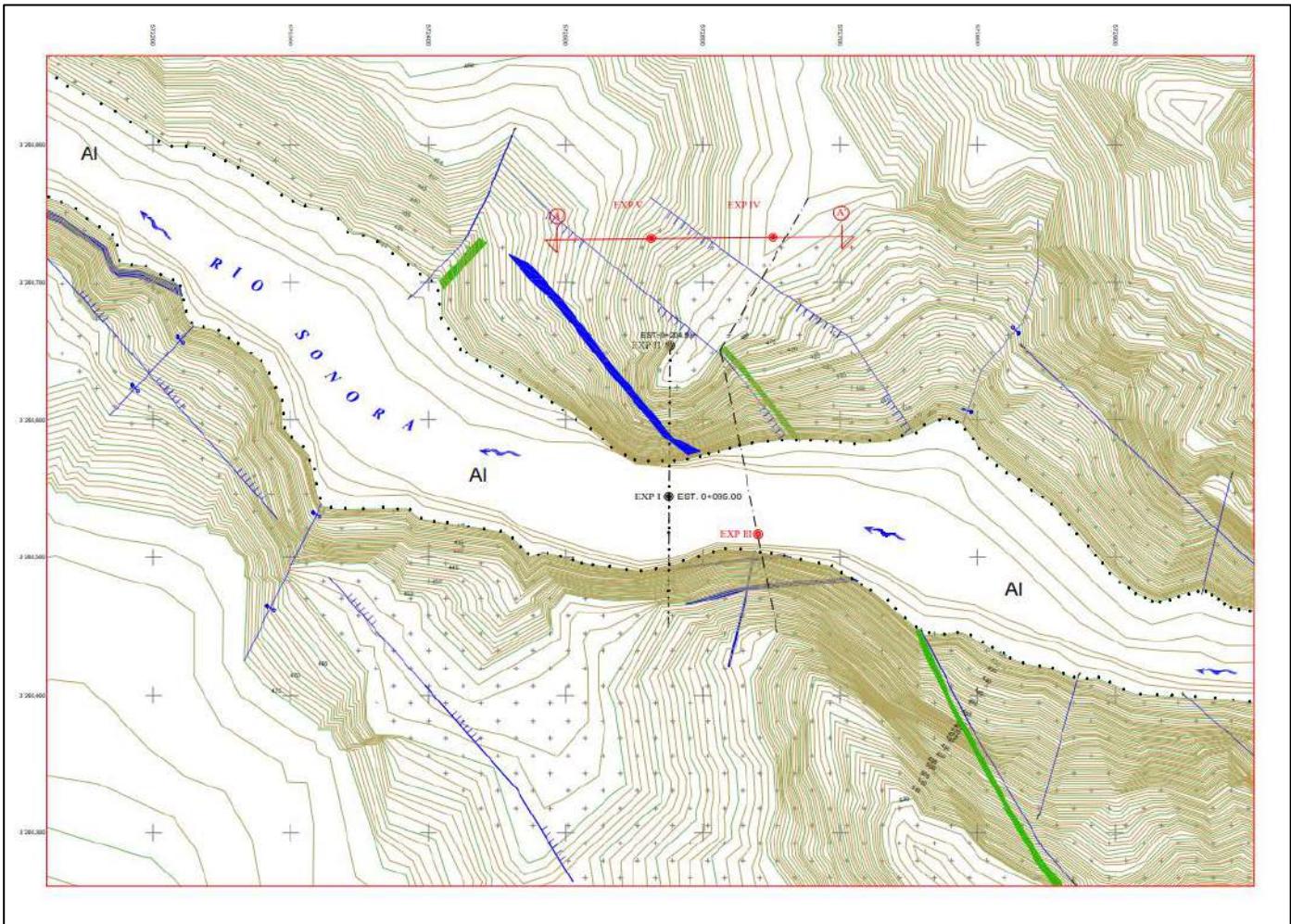


Figura 3.2 Localización de exploraciones y geología

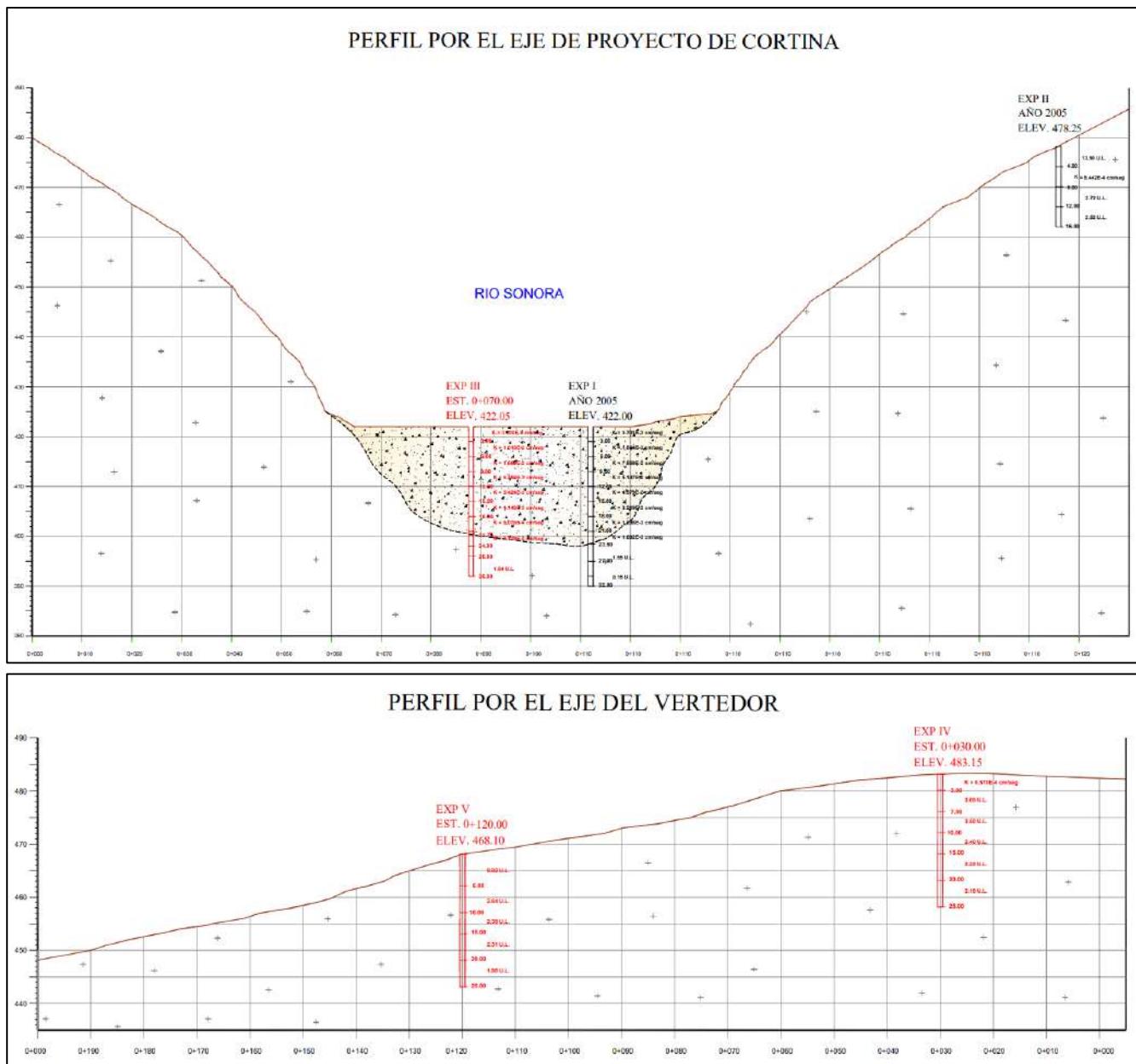


Figura 3.3 Perfiles geológicos de la boquilla y vertedor

- Los soportes de las exploraciones que se presentan son:
  - Registros de interpretación de pruebas de permeabilidad Lugeon y Lefranc en los barrenos I, II, III, IV y V.
  - Los sondeos I y II fueron realizados en una etapa anterior, en el año 2005, pero se incluyeron sus resultados.

- Registros de perforación (Perfiles estratigráficos) de los barrenos I, II, III, IV y V. con datos de litología, valores de permeabilidad, porcentaje de recuperación de núcleos e Índice de Calidad de Roca (RQD).

### 3.2. Procesamiento de la información previa 2006

La información de los sondeos y pruebas de permeabilidad fue procesada para poder comprender mejor los resultados del estudio geológico previo, por lo que se procedió a integrar y grafica en cada sondeo la litología, el % recuperación y el RQD, así como los valores de permeabilidad de cada prueba Lefranc o Lugeon realizada. Los resultados de esta interpretación se muestran en las figuras 3.2 y 3.3.

Como resultado de este análisis se destaca que la roca granítica puede dividirse en tres zonas con un comportamiento geotécnico diferente, con las siguientes características generales:

Tgr1 – Granito muy alterado, poco consistente, muy fracturado y permeable.

Tgr2 – Granito alterado, consistente, fracturado y poco permeable.

Tgr3 – Granito sano, muy consistente, poco fracturado e impermeable.

### 3.3. Conclusiones y recomendaciones del informe previo 2006

El sitio de la boquilla conocido como “Puerta del Sol”, presenta una topografía asimétrica, con pendiente abrupta de su parte media a la base o nivel del cauce, hacia la parte alta es moderada destacando un bajo topográfico en la margen derecha, geológicamente el área donde se proyecta la construcción de una Cortina para control del Río Sonora, está constituido por rocas ígneas, intrusivas, clasificadas como Granitos con zonas transicionales a Granodiorita que se ven cruzadas por Diques Diabásicos y Aplíticos.

En la superficie que ocupa el cauce del Río, se tienen mayormente depósitos de origen fluvial constituidos por arenas gruesas con escasa presencia de gravas, cuyo espesor que detectó la EXP III (v) fue de 25.20 metros en este estrato aluvional.

De manera general se pudo observar que la roca granítica perforada se encuentra en su inicio alterada, poco fracturada y clasificada megascópicamente en los núcleos extraídos en la perforación como un Granito de color gris claro, con textura fanerítica equigranular con apariencia maciza, densa y compacta, considerándole un módulo de resistencia bastante aceptable para recibir obras ingenieriles hidráulicas como la que se tiene proyectada; con respecto a la recuperación de muestras obtenidas el índice de Calidad de Roca o RQD por sus siglas en inglés, se reporta como REGULAR.

Las características físicas de la roca Granítica, presenta propiedades atractivas para continuar con Estudios a Nivel de Proyecto Ejecutivo; ya que, desde el punto de vista geotécnico el sitio de la boquilla se considera como positivo.

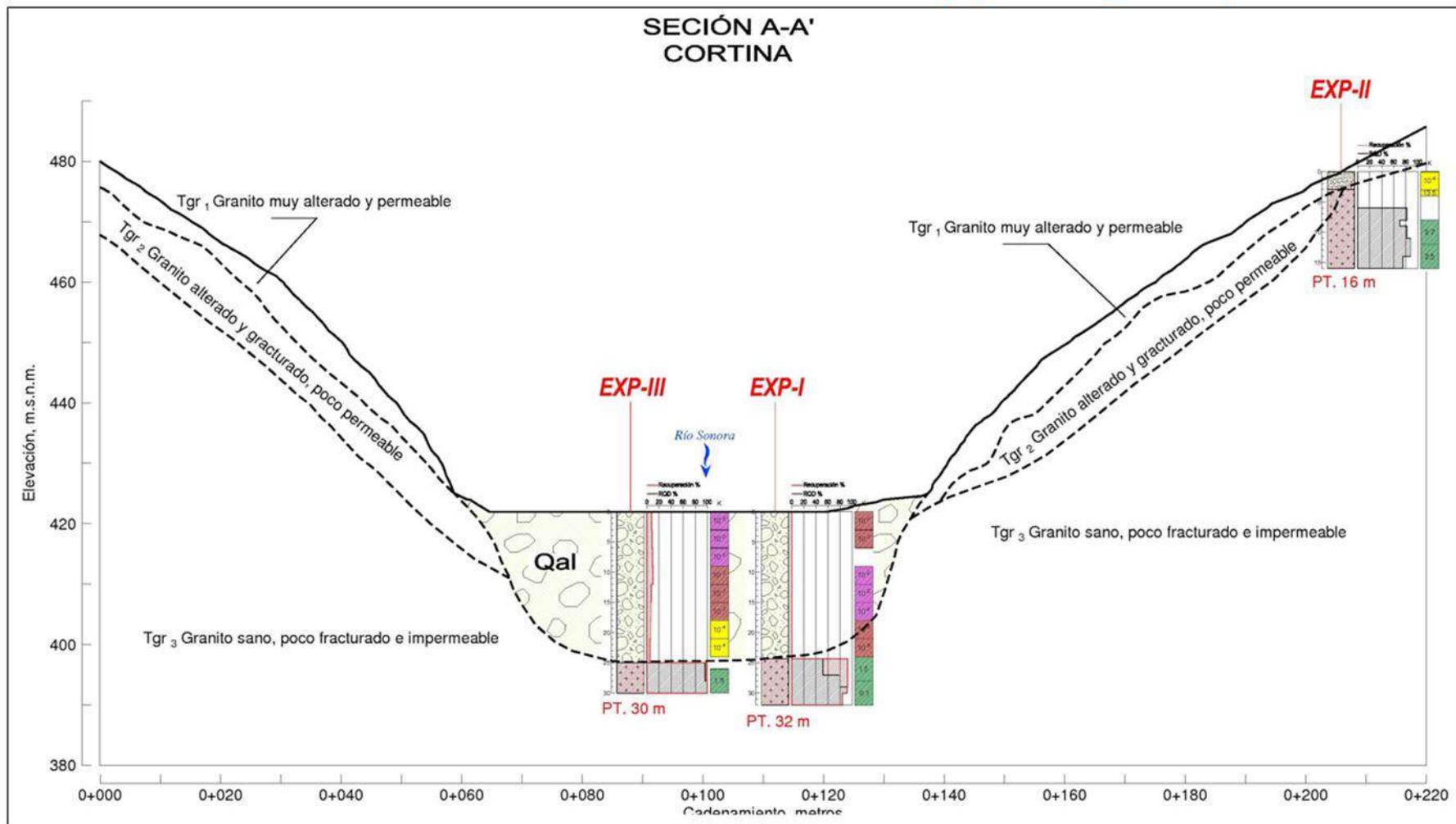


Figura 3.4 Reinterpretación geológica de los sondeos del eje de la boquilla

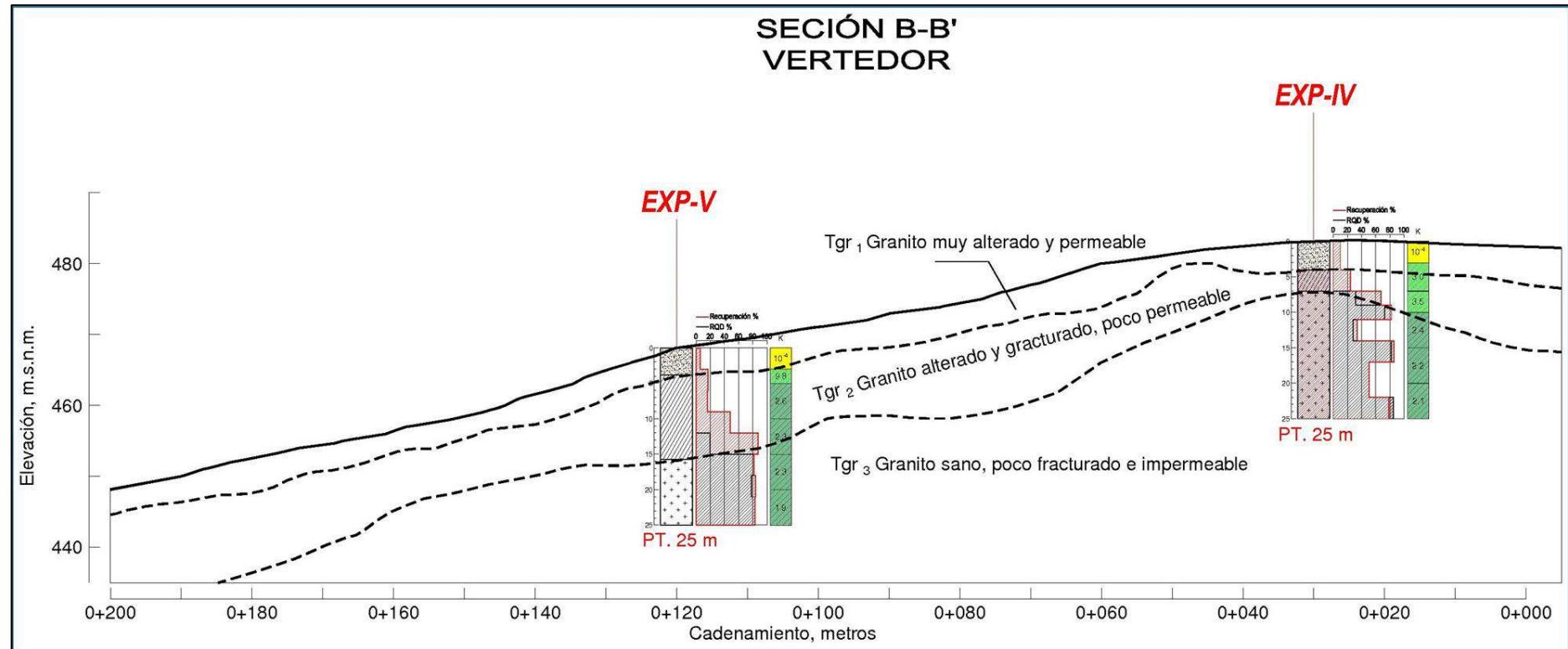


Figura 3.5 Reinterpretación geológica de los sondeos del eje del vertedor, a partir del estudio previo

## 4. MODELO GEOLÓGICO

### 4.1. Marco geológico regional

El presente apartado expone las condiciones geológicas de la zona de estudio, comenzando con las características regionales, para este apartado se tomó en cuenta la información existente de la Carta geológica Puerta del Sol H12-D33 y su Informe Anexo, pertenecientes al Servicio Geológico Mexicano en su edición de 2021.

La región donde se encuentra Puerta del Sol está ubicada dentro de las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental y la Llanura Sonorense, según la clasificación de INEGI (2001). La topografía presenta variaciones de elevación que van desde aproximadamente 387 msnm cerca del río Sonora, hasta cerca de 1,600 msnm en el cerro El Rodadero, localizado en la parte noreste de la zona.

La sección estratigráfica de la región muestra una alta complejidad tanto en edades como en los tipos de rocas. Los principales conjuntos estratigráficos incluyen:

Rocas metamórficas como basamento del Paleoproterozoico; rocas sedimentarias del Paleozoico; rocas volcánicas y vulcano-sedimentarias del Cretácico); e intrusivos magmáticos del Cretácico Superior hasta el Mioceno. Adicional la región sufrió varias fases tectónicas, incluyendo fallas inversas y normales, así como eventos de deformación dúctil y frágil, que modificaron las unidades y propiciaron el desarrollo de estructuras minerales.

En la zona de estudio predomina la unidad TeGd-Gr del Terciario, la cual corresponde a una roca intrusiva compuesta de granito y granodiorita caracterizadas por una textura granular de grano fino a grueso, como se muestra en la imagen 4.1 de la columna estratigráfica de la zona. Esta unidad representa un cuerpo magmático que intruye las unidades sedimentarias y metamórficas del paleozoico, su intrusión se asocia a eventos de enfriamiento profundo y a procesos tectónicos de emplazamiento en el tramo final del ciclo orogénico. La unidad presenta un espesor variable, pero en algunos casos puede alcanzar hasta 20 m en los cuerpos intrusivos. Sin embargo, en general, estos cuerpos presentan una morfología de pendientes suaves y pueden extenderse en áreas de varios cientos de metros a kilómetros como se muestra en la Figura 4.2.

En campo la unidad TeGd-Gr se observa en cuerpos intrusivos de morfología suave, textura fanerítica y morfología homogénea, presentan una mineralogía compuesta de plagioclasa, biotita, clorita y cuarzo, y muestra vetillo de cuarzo entre 0.5 y 1.00 cm de espesor. Estos cuerpos intrusivos pueden aparecer como áreas de rocas de textura homogénea y compacta, a menudo afectados por procesos de silicificación y alteración hidrotermal, que les dan un aspecto más alterado y a veces con presencia de fracturas o vetillas (SGM 2021).

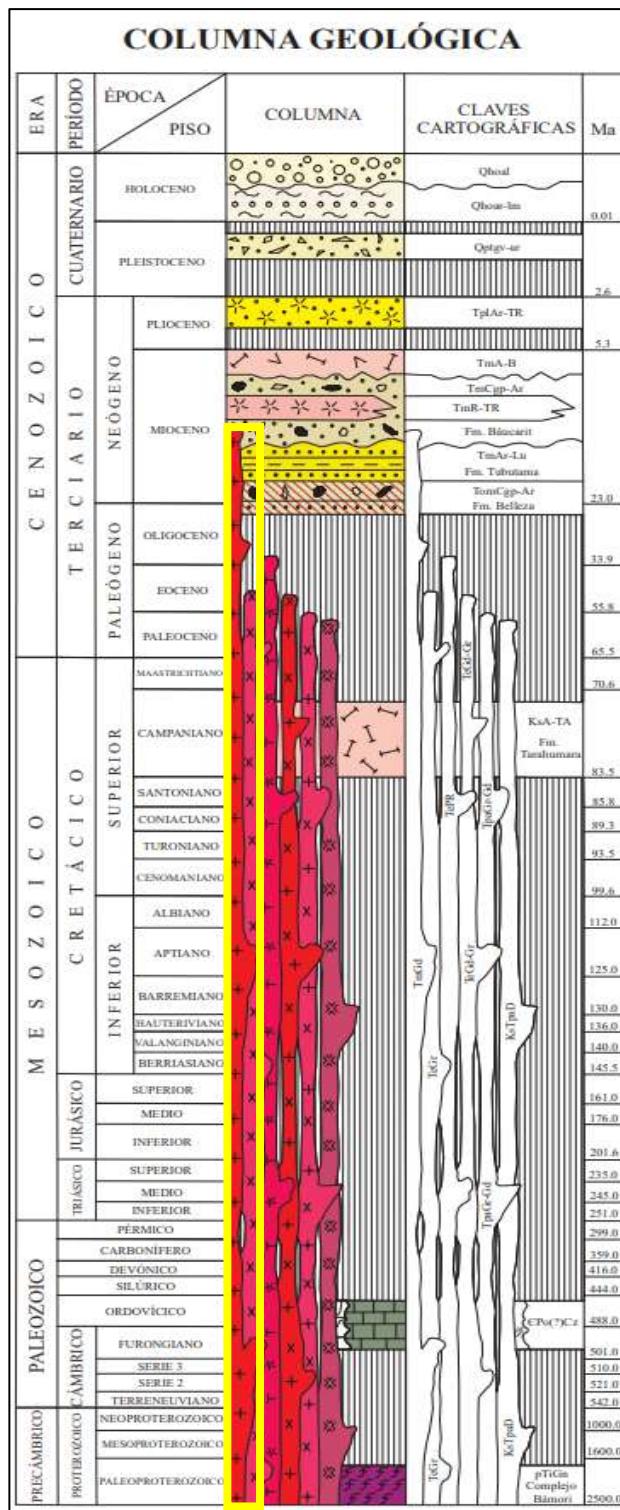


Figura 4.1 Columna estratigráfica de la zona (SGM, 2021)

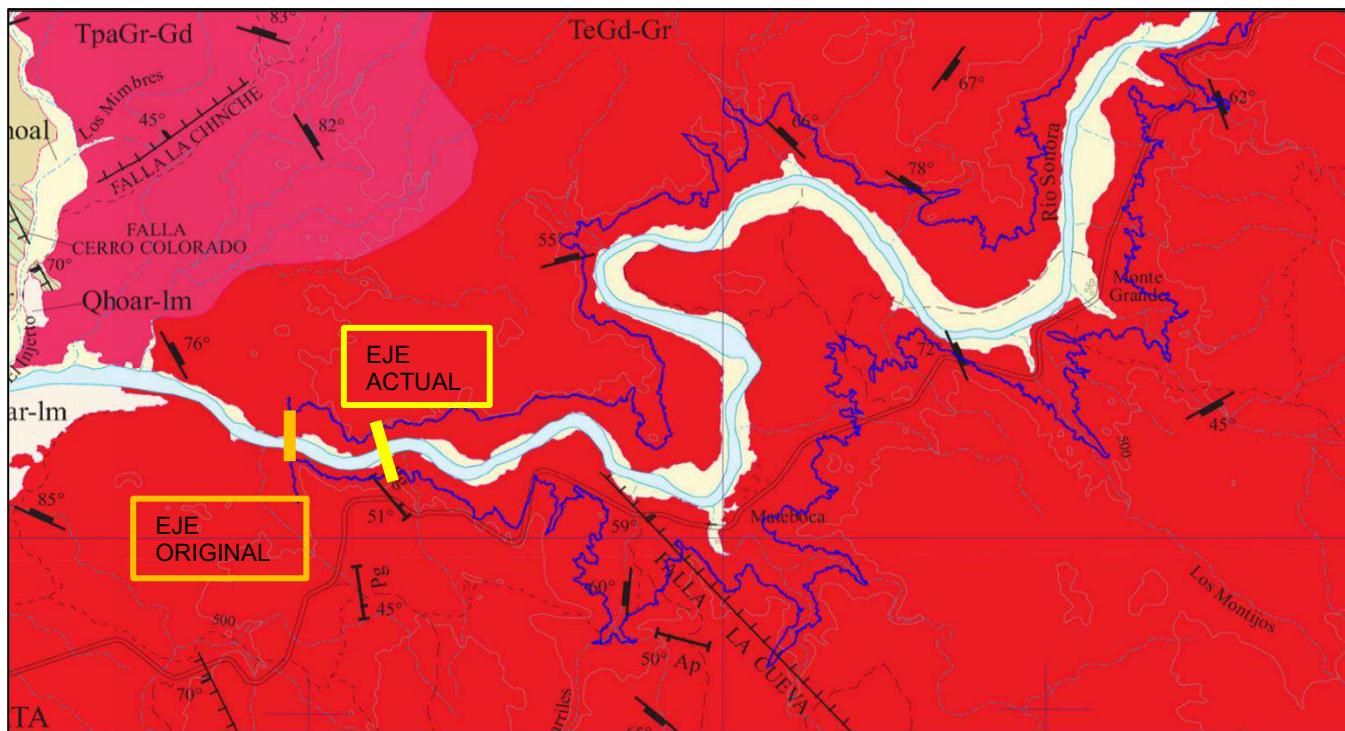


Figura 4.2 Plano geológico de la zona (SGM, 2021)

## 4.2. Geología de la boquilla

En este apartado se presentan el modelo geológico de la boquilla obtenido a partir de los levantamientos geológicos estructurales realizados en la zona de estudio, la descripción aquí presentada esta basada en una descripción litológica de las diferentes formaciones rocosas aflorantes, así como en una caracterización de las discontinuidades desde el punto de vista estructural geomecánica, así como en ensayos in situ mediante Martillo de Schmidt, así como índices geomecánicas de campo y clasificaciones como el RMR y el GSI.

- Unidades litológicas

### Granito (T Gr)

Granito de textura fanerítica y morfología homogénea, presentan una mineralogía compuesta por fenocristales de plagioclasa, con abundante presencia de cuarzo y biotita, y muestra vetilleo de cuarzo entre 0.5 y 1.00 cm de espesor.

En estado fresco, el color de la matriz rocosa es color gris claro, presentando ligera meteorización de los minerales féreos, observándose cambios del color original de la matriz. Se considera una roca dura (50 – 100 MPa) ya que se requiere de más de un golpe con el martillo, para romper una muestra. (Fotografía 4.1)

En estado meteorizado, el color de la matriz es pardo claro, presenta un intemperismo tipo cebolla, en donde se genera una costra superficial de hasta 20 cm de la roca altamente alterada que se disgrega fácilmente con la mano o con un golpe débil con el martillo, se considera una roca muy blanda (1 – 5 MPa), deleznable bajo golpes del martillo (Fotografía 4.2).



*Fotografía 4.1 Granito en estado fresco*



*Fotografía 4.2 Granito moderadamente meteorizado, con intemperismo tipo cebolla*

Dique mafico (T Di):

Intrusionando el granito a través de algunos sistemas de fracturas y fallas, se observaron diques maficos de textura microcristalina, compuesta por anfíboles y piroxenos. La matriz rocosa tiene un color negro en estado fresco, es una roca (50 – 100 MPa), se requiere de más de un golpe para romperla. Esta unidad se detectó rellenando un sistema de fallas geológicas aguas debajo de la cortina (Fotografía 4.3) y en el sondeo SM-3 en el cauce del río entre los 23.4 – 24 m de profundidad.



*Fotografía 4.3 Dique mafico intrusionando falla geológica.*

Depósitos aluviales (Q Dal)

Rellenando las partes topográficas bajas en el cauce del río se han presentado depósitos aluviales, conformado básicamente por arenas gruesas redondeadas de cuarzo, con presencia de lentes y horizontes boleos de composición ígnea, redondeados de hasta 1 m de diámetro. Mediante las exploraciones realizadas se ha detectado que el depósito aluvial tiene un espesor de 16 m. (Fotografía 4.4). Superficialmente el depósito fluvial tiene una composición predominantemente arenosa, sin embargo, a profundidad presenta un mayor número de boleos y cantos rodados en una proporción de 50 - 50%.

Depósitos de talud (Q Dt)

Finalmente, en las laderas de los cerros se han acumulado depósitos de talud conformado por una matriz suelta arenosa tipo tucuruguay, con un 30% de fragmentos rocosos angulosos y sub redondeados de composición granítica. Este material está en estado suelto sin consistencia (Fotografía 4.5).



*Fotografía 4.4 Depósitos aluviales en el cauce del río*



*Fotografía 4.5 Depósitos de talud en las laderas.*

- Geología estructural de la boquilla

El comportamiento geomecánica de los macizos rocosos presentes en el área de estudio estará controlado por las características y propiedades de resistencia de las discontinuidades, por lo cual se realizó un levantamiento y caracterización estructural de los diferentes sistemas de fracturas y fallas observadas.

Se midieron un total de 107 datos estructurales correspondientes a fracturas, la cuales se analizaron estadísticamente mediante el programa Dips, para obtener las familias principales de las fracturas, así como sus variaciones estadísticas de echado y dirección del echado. La base de datos estructurales, y los análisis estadísticos de las fracturas se presentan en el Anexo 8. Análisis estructural.

En la figura 4.3. se presenta el estereograma de fracturas realizado a partir del análisis estructural, en la figura 4.4 y Tabla 4.3. se muestra un análisis estadístico de la variación de los valores de echado y dirección del echado.

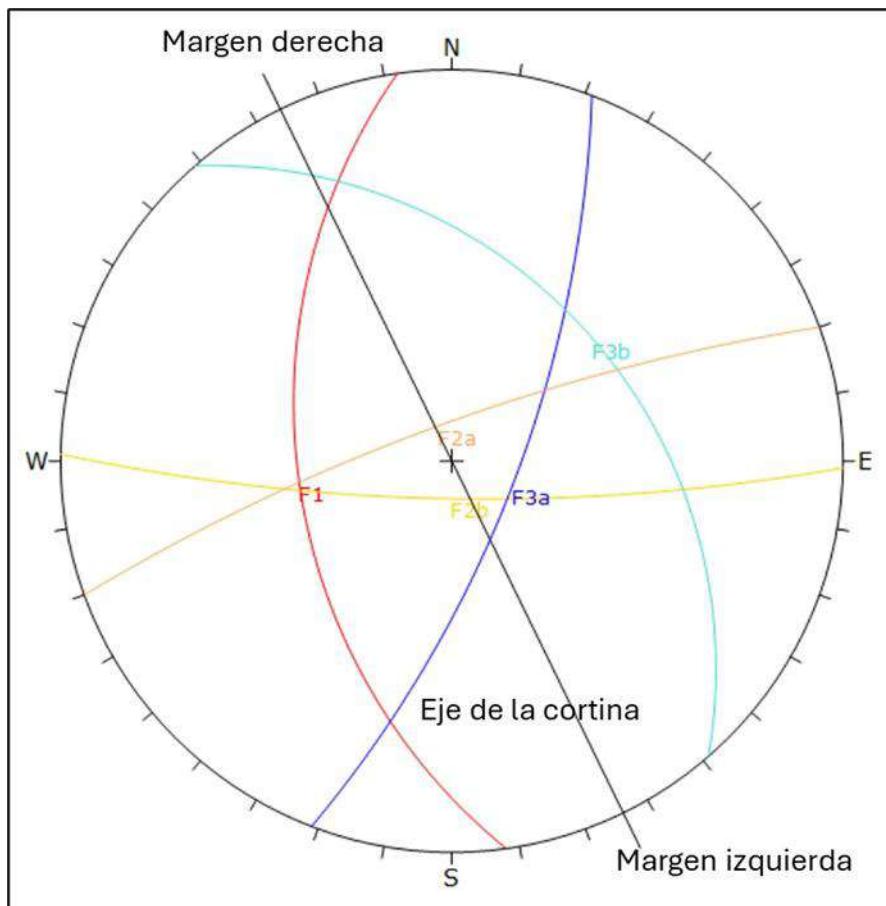


Figura 4.3 Estereograma de las familias de fracturas en la boquilla de la presa.

En el análisis estadístico detallado de las principales familias de fractura identificadas en el macizo rocoso, llevó a la evaluación por medio de histogramas de frecuencia y tablas resumen con los valores mínimos, máximos, medias y desviaciones estándar, lo que permitió caracterizar la dispersión angular y la consistencia estructural de cada sistema de discontinuidades.

En el conjunto general, se observó una media de  $166^{\circ}$  para la dirección del echado y un echado predominante de  $57^{\circ}$ . Por familia, los resultados fueron los siguientes (Figura 4.4 y Tabla 4.1):

- **FAMILIA 1:** Presenta valores de echado que oscilan entre  $24.0^{\circ}$  y  $71.0^{\circ}$ , y una mediana de  $47.7^{\circ}$ , lo que indica una inclinación moderada a alta. La dirección del echado varía entre  $245.0^{\circ}$  y  $279.0^{\circ}$ , con una mediana de  $261.6^{\circ}$ , correspondiente a una orientación predominante hacia el oeste-suroeste. La desviación estándar de  $10.4^{\circ}$  en la dirección del echado sugiere una dispersión moderada. La desviación estándar del echado, de  $12.9^{\circ}$ , indica cierta variabilidad en la inclinación de las discontinuidades.
- **FAMILIA 2a:** Presenta echados elevados, con valores entre  $64.0^{\circ}$  y  $89.0^{\circ}$ , y una mediana de  $79.3^{\circ}$ , lo que indica una inclinación casi vertical. La dirección del echado varía entre  $315.0^{\circ}$  y  $357.0^{\circ}$ , con una mediana de  $339.2^{\circ}$ , correspondiente a una orientación predominante hacia el noroeste. La desviación estándar de  $13.9^{\circ}$  en la dirección del echado revela una dispersión angular más amplia que en otras familias, mientras que la desviación estándar del echado, de  $8.9^{\circ}$ , indica una inclinación relativamente consistente.
- **FAMILIA 2b:** Presenta una geometría de fracturas subverticales, con valores de echado entre  $66.0^{\circ}$  y  $88.0^{\circ}$ , y una mediana de  $78.9^{\circ}$ . La dirección del echado se encuentra entre  $170.0^{\circ}$  y  $195.0^{\circ}$ , con una mediana de  $181.2^{\circ}$ , correspondiente a una orientación predominante hacia el sur, con muy baja dispersión (desviación estándar de  $8.3^{\circ}$ ). La desviación estándar del echado, de  $7.6^{\circ}$ , refuerza la interpretación de una inclinación homogénea.
- **FAMILIA 3:** Presenta fracturas de inclinación alta, con valores de echado entre  $59.0^{\circ}$  y  $84.0^{\circ}$ , y una mediana de  $71.0^{\circ}$ , lo que indica una geometría subvertical. La dirección del echado varía entre  $85.0^{\circ}$  y  $135.0^{\circ}$ , con una mediana de  $111.1^{\circ}$ , correspondiente a una orientación predominante hacia el este-sureste. La desviación estándar de  $13.7^{\circ}$  en la dirección del echado indica una dispersión angular moderada-alta. La desviación estándar del echado, de  $8.0^{\circ}$ , sugiere una inclinación relativamente homogénea.
- **FAMILIA 4:** Presenta la mayor variabilidad geométrica entre las familias analizadas. Los valores de echado oscilan entre  $7.0^{\circ}$  y  $80.0^{\circ}$ , con una mediana de  $40.6^{\circ}$ , lo que indica una mezcla de fracturas de baja a alta inclinación. La desviación estándar de  $21.2^{\circ}$  confirma una dispersión significativa. En cuanto a la dirección del echado, los valores varían entre  $5.0^{\circ}$  y  $110.0^{\circ}$ , con una mediana de  $48.0^{\circ}$ , correspondiente a una orientación general hacia el noreste. Sin embargo, la desviación estándar de  $22.3^{\circ}$  indica una dispersión direccional muy amplia.

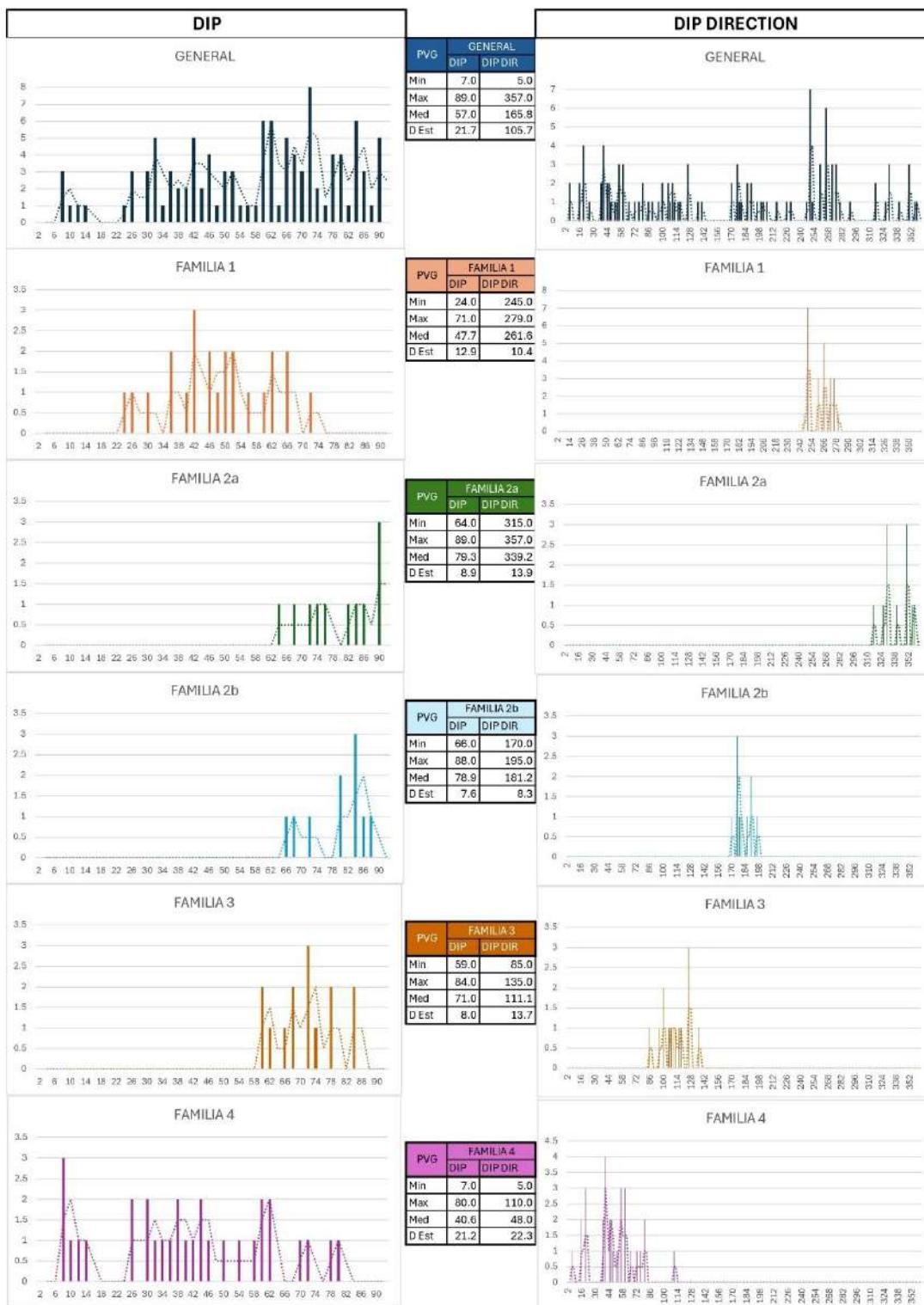


Figura 4.4 Análisis estadístico de la variación del echado y la dirección del echado en las familias de fractura

Tabla 4.1 Variación estadística de datos estructurales

FAMILIA DE FRACTURA	DIP				DIP DIRECCIÓN			
	MEDIA	MAXIMO	MINIMO	DES. ESTAN.	MEDIA	MAXIMO	MINIMO	DES. ESTAN.
F1	47	71	24	13	262	279	245	10.4
F2a	79	89	64	8.9	339	357	315	14
F2b	79	88	66	7.6	181	195	170	8.3
F3	71	84	59	8	111	135	85	13.7
F4	40.6	80	7	21	48	110	5	22

De manera superficial las todas las familias de fracturas se presentan planas a onduladas, muy rugosas, continuas 3- 10 m, abiertas más de 1 cm, llenas de óxidos y arenas gruesas duras. Se observa un fuerte grado de intemperismo de las fracturas, siendo el principal medio por el cual fluye el agua alterando la roca y formando una costra de tuguruguay de hasta 20 cm. Algunas de las fracturas presentan betas de cuarzo.



Fotografía 4.6 Fracturas abiertas y muy intemperizadas formando una franja de alteración



*Fotografía 4.7 fractura muy abierta, erosionada rellena de tucuruguay*



*Fotografía 4.8 Veta de cuarzo rellenando fractura ondulada*

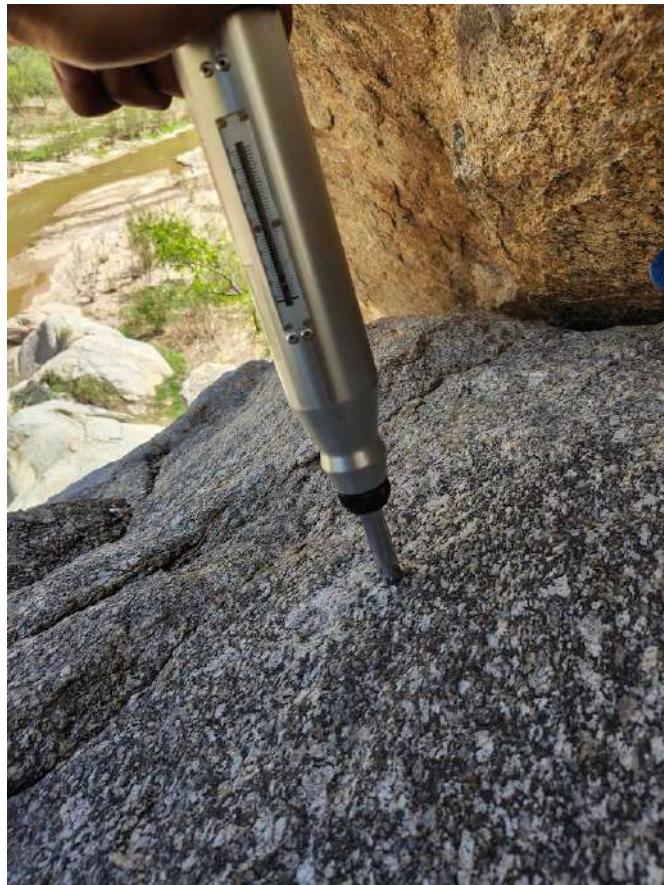
- Ensayos in situ con martillo de Schmidt

Como parte de los trabajos de campo y con la finalidad de determinar los parámetros de resistencia de las rocas y las discontinuidades se realizaron ensayos in situ con el Martillo de Schmidt o esclerómetro, este instrumento permite calcular la resistencia de la compresión simple a través del valor de rebote que otorga el martillo y nomogramas que involucran el peso volumétrico de la roca y la dirección de inclinación en la que se haya realizado el ensayo (González de Vallejo, 2002).

Para evaluar la resistencia de la matriz rocosa de las calizas que conforman el macizo rocoso, se realizaron estaciones geomecánicas donde se ejecutaron mediciones con el Martillo Schmidt. La memoria de cálculo de los datos obtenidos en campo se encuentra en el Anexo 7.2 Memoria de cálculo de martillo de Schmidt, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.2.

*Tabla 4.2 Resultados de los ensayos efectuados con Martillo Schmidt*

UNIDAD LITOLÓGICA	SISTEMA	RCU (MPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
Granito Sano	F2a	140	32.86
Granito Alterado	F2a	80	18.85



*Fotografía 4.9 Ensayo in situ con Martillo de Schmidt*

#### **4.3. Modelo geológico de la boquilla**

A continuación, se presenta el modelo geológico local que integra la distribución, espesores y contactos de las unidades litológicas y discontinuidades de los macizos rocosos. Como ya se mencionó en la zona de estudio se definieron 4 unidades geológicas, un granito terciario (T Gr, Un dique máfico (T Di) y cubriendo discordantemente depósitos de aluviales en el cauce del río (Qal) y Depósitos de talud en las laderas de los cerros (Qre), los cuales se encuentran sueltos y sin consolidación.

En el Plano 1 Plano geológico de la boquilla y exploración del subsuelo se presenta el modelo geológico definido para la zona de estudio. En la Figura 4.5 y 4.6 pueden observar el mapa y una sección geológica a lo largo del eje de la presa y en la tabla 4.3 se puede consultar la planta y características de dicho modelo.

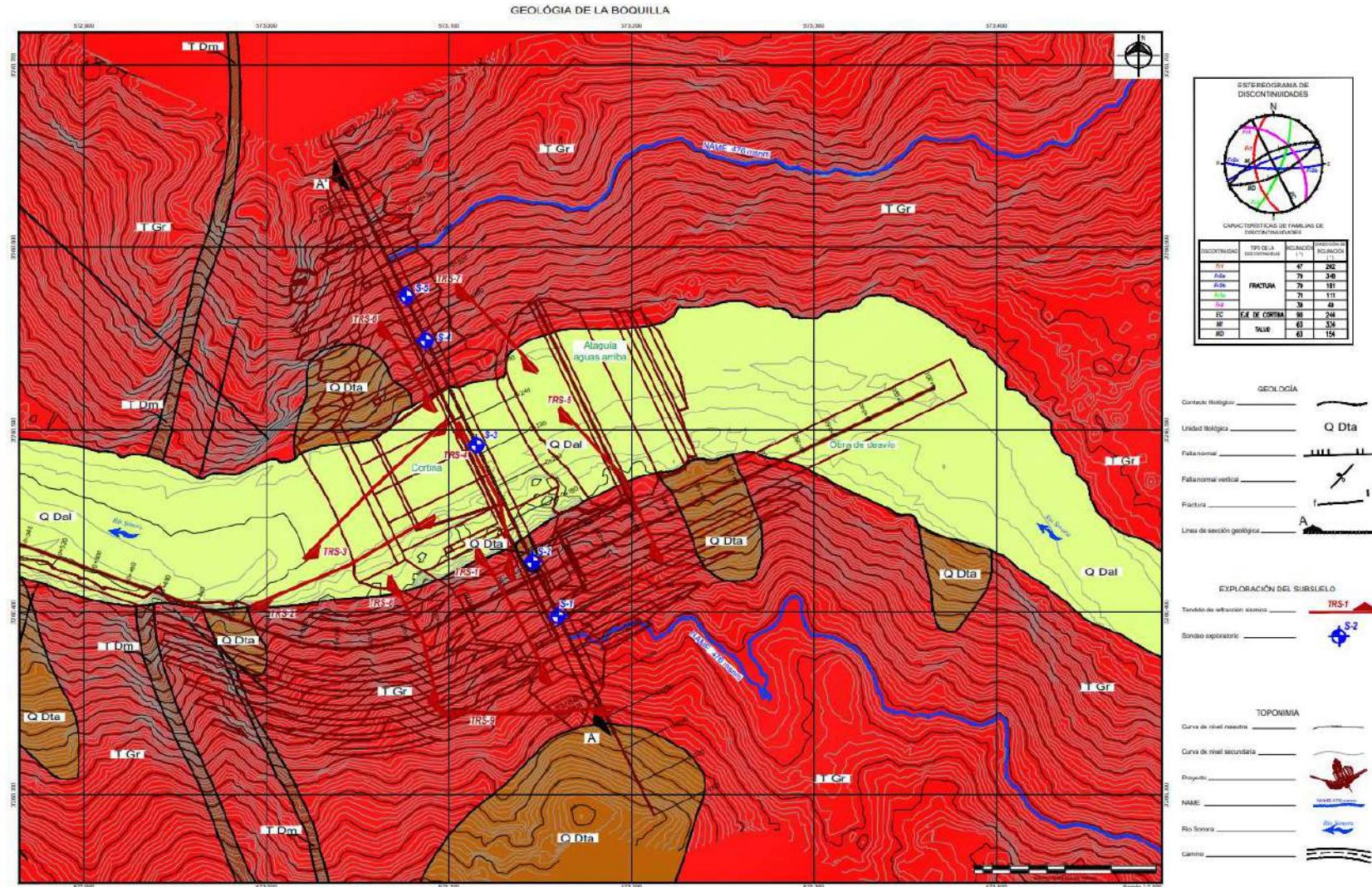


Figura 4.5 Plano geológico de la boquilla y exploración del substituto

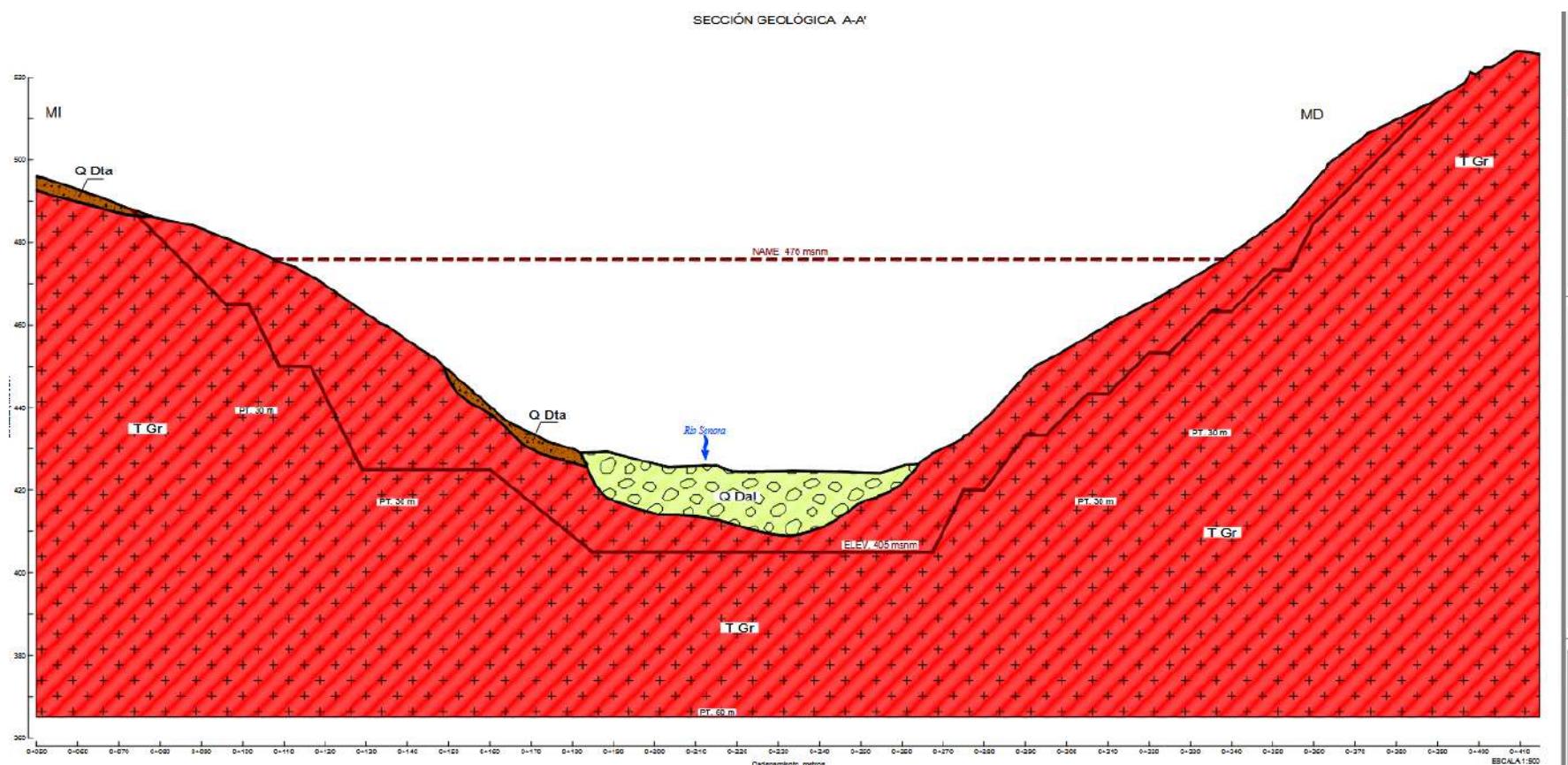


Figura 4.6 Sección geológica por el eje de la cortina

Tabla 4.3 Características de las unidades geológicas de la boquilla

Unidad Geológica	Descripción	Propiedades de la matriz rocosa		
		Peso Vol. Ton/m3	RCS C/Martillo Schmidt	Índice de dureza ISMR (MPa)
Depósito de talud (Q Dta)	Depósitos de talud conformado por una matriz suelta arenosa tipo tucuruguay, con un 30% de fragmentos rocosos angulosos y sub redondeados de composición granítica	2.1	No Aplica	0.25 - 0.5 MPa
Depósito aluvial (Q Dal)	Depósitos aluviales, conformado básicamente por arenas gruesas redondeadas de cuarzo, con presencia de lentes y horizontes boleos de composición ígnea, redondeados de hasta 1 m de diámetro.	2.1	No Aplica	0.25 - 0.5 MPa
Dique máfico (T Dm)	Intrusionando el granito a través de algunos sistemas de fracturas y fallas, se observaron diques máficos de textura microcristalina, compuesta por anfíboles y piroxenos.	2.8	No Aplica	Sano (50 - 100 MPa)

<b>Granito</b> <b>(T Gr)</b>	<p>Granito de textura fanerítica y morfología homogénea, en estado fresco, el color de la matriz rocosa es color gris claro. En estado meteorizado, el color de la matriz es pardo claro, presenta un intemperismo tipo cebolla.</p>	Sano (3.0) / Meteorizado 2.4	Sano (140 MPa) / Meteorizado (80 MPa)	Sano (50 - 100 MPa) / Meteorizado (1 - 5 MPa)
---------------------------------	--	---------------------------------	--	--

## 5. MODELO GEOSÍSMICO

Para la elaboración del modelo geosísmico en el eje de boquilla, se desarrolla un estudio geofísico que contempla la ejecución de líneas sísmicas distribuidas estratégicamente a lo largo de las estructuras principales, considerando la configuración geológica del sitio. El objetivo es caracterizar las condiciones del subsuelo mediante la interpretación de las velocidades de propagación de ondas elásticas, específicamente ondas primarias (P) y secundarias (S).

Con base en los datos obtenidos, se establecen correlaciones entre las velocidades sísmicas y parámetros geotécnicos como el grado de alteración, compacidad, dureza y fracturamiento del macizo rocoso, así como su distribución espacial. Para ello, se emplean dos técnicas complementarias: Tendidos de Refracción Sísmica (TRS) y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).

Como resultado, se interpretan unidades geosísmicas y se definen sus espesores y distribución en el subsuelo mediante secciones sísmicas. Adicionalmente, se generan plantas de isovelocidades de onda P que permiten visualizar la configuración de las unidades geosísmicas a distintas profundidades. Esta información se presenta en el Plano 3 (Secciones sísmicas y geosísmicas de la margen izquierda) y en el Plano 4 (Secciones sísmicas y geosísmicas cause y margen derecha).

Se estiman también los módulos elástico-dinámicos, con el fin de evaluar la respuesta del suelo y del macizo rocoso ante esfuerzos y deformaciones. Asimismo, se realiza una evaluación de la ripabilidad de las unidades geosísmicas, correlacionando las velocidades de onda P mediante el método RIP de Caterpillar.

A continuación, se describe la localización de los tendidos, el procesamiento de datos y los resultados obtenidos. Los fundamentos teóricos, la descripción del equipo utilizado y las evidencias de campo se detallan en el Anexo 4: Estudio Geosísmico.

### 5.1. Distribución de los Tendidos Sísmicos

La finalidad de utilizar tendidos sísmicos es identificar la profundidad, espesor y características estructurales de los distintos estratos que conforman el subsuelo, así como evaluar la compacidad de los materiales. Para definir la distribución de los tendidos sísmicos, se consideran diversos factores técnicos, tales como la ubicación de las obras civiles proyectadas, las condiciones topográficas del terreno y las características geológicas específicas de cada zona a estudiar.

Con la finalidad de cumplir el objetivo del proyecto se realizaron 9 tendidos sísmicos (TRS-MASW) de longitudes variables, divididos principalmente en dos zonas conocidas como: zona de cortina la cual a su vez se subdivide en margen izquierdo, cauce y margen derecho. En la Tabla 5.1 se indican las coordenadas del inicio y final de cada tendido, al igual que su longitud y la zona a la que pertenecen, mientras que la Figura 5.1 muestra la distribución de los 9 tendidos.

Tabla 5.1 Coordenadas y distribución de los Tendidos Sísmicos

Tendido Sísmico	Coordenadas				Longitud [m]	Zona		
	Inicio		Final					
	X	Y	X	Y				
TRS-1	573156.7	3260359.9	573115.6	3260435.6	86.2	MARGEN IZQUIERDA SOBRE EL EJE		
TRS-2	573092.5	3260453.2	572991.9	3260403.6	112.4	CAUSE AGUAS ABAJO		
TRS-3	573098.8	3260505.3	573020.2	3260429.3	109.3	CAUSE AGUAS ABAJO		
TRS-4	573135.8	3260417.7	573105.2	3260504.6	93	CAUSE AGUAS ABAJO		
TRS-5	573217	3260427.6	573160.8	3260512.4	102.8	ATAGUIA AGUAS ARRIBA Y MARGEN IZQUIERDA		
TRS-6	573093.3	3260509.9	573062.4	3260559.5	58.5	MARGEN DERECHA SOBRE EL EJE		
TRS-7	573148.9	3260531.8	573104.4	3260579.9	65.6	MARGEN DERECHA SOBRE EL EJE		
TRS-8	573094.9	3260346.2	573067.9	3260420.2	79.4	MARGEN IZQUIERDA AGUAS ABAJO		
TRS-9	573190.2	3260347.7	573094.8	3260346.1	95.6	MARGEN IZQUIERDA		

La técnica de Refracción Sísmica (TRS) permite determinar la disposición, espesor y velocidades promedio de los estratos del subsuelo, mediante el análisis de las trayectorias de ondas elásticas generadas artificialmente en superficie. Estas ondas, registradas por geófonos alineados, se interpretan con base en los principios de Fermat y Snell, considerando velocidades sísmicas crecientes con la profundidad. El procesamiento se realiza con software especializado (ZondST2D), que permite construir modelos 2D de velocidad y geometría estratigráfica ajustados topográficamente.

Complementariamente, el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) se emplea para estimar las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ), mediante el análisis espectral de dispersión de

ondas Rayleigh. Este método genera modelos 1D de Vs, útiles para caracterizar la rigidez dinámica de los materiales.

Ambas técnicas permiten calcular los módulos elásticos dinámicos (cortante, compresibilidad, Young, Poisson), a partir de las relaciones entre Vp, Vs y la densidad del medio, según la teoría de elasticidad. Estos parámetros son fundamentales para evaluar la respuesta dinámica del terreno y su comportamiento ante esfuerzos inducidos.

La adquisición de datos se realizó con el equipo DAQLink 4, utilizando geófonos verticales de 4.5 Hz y una fuente activa tipo marro. Se aplicaron controles de calidad en campo y gabinete para garantizar la confiabilidad de los tiempos de arriba y minimizar el ruido.

Finalmente, se integraron los resultados con información complementaria de pruebas directas (SPT, CPT, DSPH) y otros métodos geofísicos, fortaleciendo la interpretación geotécnica del sitio.

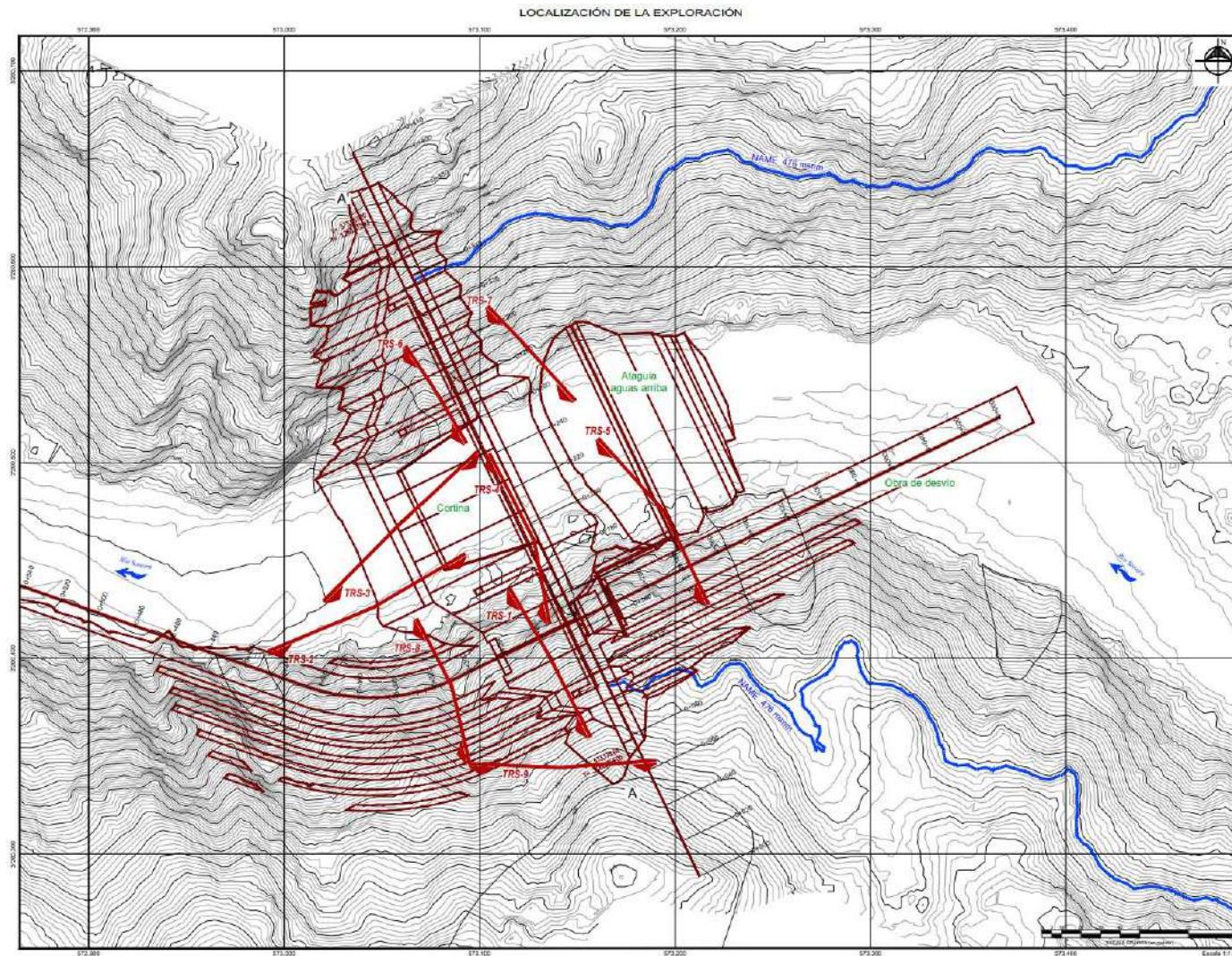


Figura 5.1 Coordenadas y distribución de los Tendidos Sísmicos

## 5.2. Unidades sísmicas

Como resultado de la interpretación de las líneas de exploración geosísmica se presenta el análisis de la información geofísica en cada margen de la cortina y el cauce del río. El análisis de los resultados sugiere que las unidades con mayores velocidades corresponden a materiales más compactos y resistentes, mientras que las de menor velocidad indican suelos más sueltos o con mayor grado de alteración.

- Margen izquierdo

El margen izquierdo está conformado por los tendidos sísmicos TRS-1, TRS-5, TRS-8 y TRS-9 con longitudes que oscilan entre 86 m y 102 m, los resultados se presentan en las Figuras 5.2 a 5.5 y las Tablas 5.2 a 5.5. A continuación, se presentan las características identificadas en dichos perfiles:

Las unidades US-1a a US-1c representan capas superficiales con velocidades bajas, típicas de materiales sueltos o poco consolidados.

Las unidades US-2a a US-2c muestran velocidades crecientes, indicando mayor rigidez y profundidad. Son continuas y dominan la sección sísmica.

Hay una tendencia de espesores mayores hacia el NW en TRS-1 y TRS-8, y hacia el SE en TRS-5.

La unidad US-2c aparece consistentemente como la más profunda y rígida, con velocidades Vs que alcanzan hasta 3800 m/s.

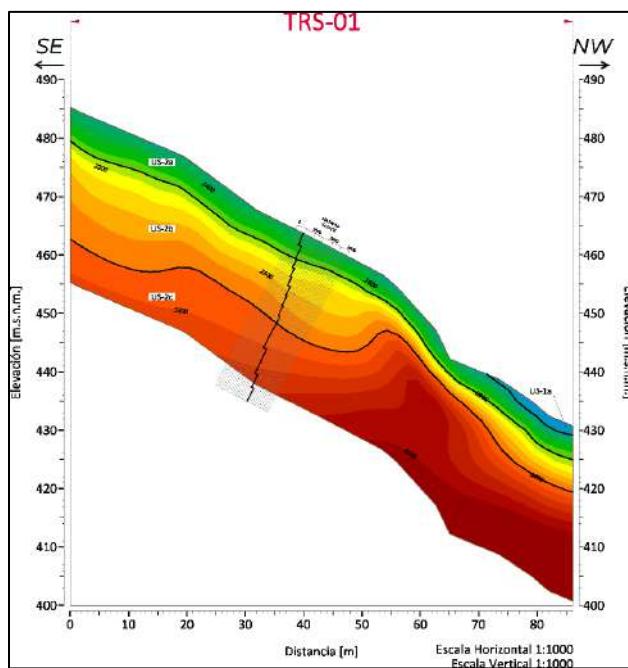


Figura 5.2 Zonificación sísmica del Tendido TRS-1

Tabla 5.2 Unidades sísmicas TRS-01

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Velocidad de onda P	Distribución y espesores
	Vp	Vs		
US-1a	<1000	<400	200 400 600 800	Capa superficial, al cual parece a partir del cadenaamiento 71 m al final del tendido, con un espesor menor a 1.5 m. El espesor aumenta hacia el NW
US-2a	1000 - 2000	400 - 800	1200 1400 1600 1800	Se presenta en toda la sección, con espesores de 1.8 a 5.7 m, su espesor es mayor al SE.
US-2b	2000 - 3000	800 - 1300	2200 2400 2600 2800	Se observa en toda la sección, con espesores de 2 a 16.8 m. Su espesor es mayor al SE (inicio del perfil)
US-2c	3000 - 4200	1300 - 1800	3200 3400 3600 3800 4000	Se manifiesta en toda la sección, esta unidad aparece a una profundidad entre 4.5 y 18.5 metros, la zona más somera se encuentra en el cadenaamiento 56 m

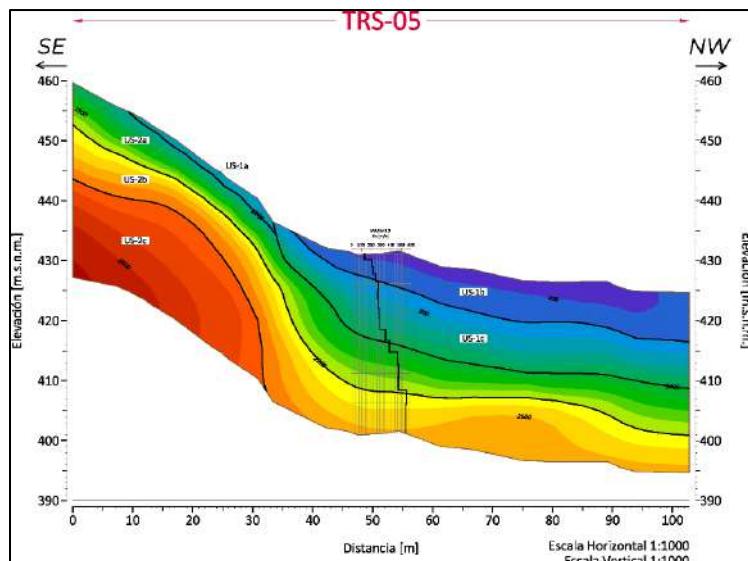


Figura 5.3 Zonificación sísmica del Tendido TRS-05

Tabla 5.3 Unidades Sísmicas TRS-05

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Velocidad de onda P	Distribución y espesores
	Vp	Vs		
US-1a	<1000	<250	200 400 600 800	Capa superficial intermitente, que se manifiesta al inicio de la sección, con espesores menores a 2 m.
US-1b	200 - 600	120 - 250	200 400 600	Capa superficial intermitente, se manifiesta después del cedamiento 31 m, su espesor aumenta hacia el NW (8.2m)
US-1c	600 - 1400	250 - 380	800 1000 1200	Se presenta por debajo de la unidad US-1b, con espesores variables de 6 a 9.7 metros.
US-2a	1400 - 2200	380 - 480	1600 1800 2000	Se manifiesta como una capa continua de espesor variable entre 4 a 8.8 m
US-2b	2200 - 3000	480 - 560	2400 2600 2800	Se manifiesta en toda la sección, por la topografía se encuentra a una profundidad de 5 a casi 24 de longitud.
US-2c	3000 - 3800	>560	3200 3400 3600	Se manifiesta entre los cedamientos 0 a 30 m, a una profundidad de 9 a 16 metros.

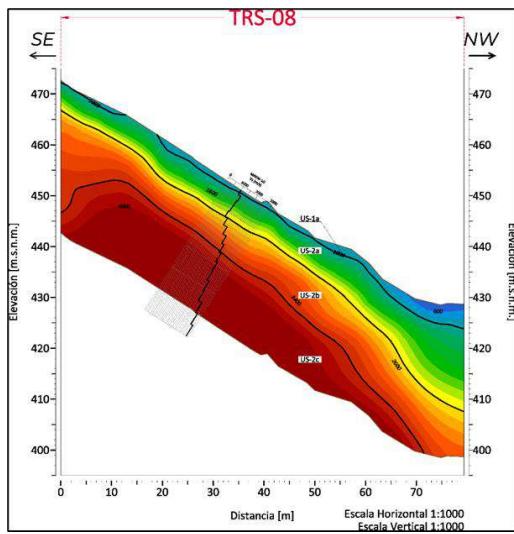


Figura 5.4 Zonificación sísmica del Tendido TRS-08

Tabla 5.4 Unidades sísmicas TRS-08

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Velocidad de onda P	Distribución y espesores
	Vp	Vs		
US-1a	<1000	<1000	200 400 600 800	Capa superficial y discontinua cuyos espesores aumentan hacia el NW, alcanzando los 4.8 m
US-2a	1000 - 2400	1000 - 1200	1200 1400 1600 1800 2000 2200	Manifestándose al largo de toda la sección, su espesor alcanza los 16.3 m hacia el NW (dirección del cauce del río)
US-2b	2400 -3600	1200 - 2000	2600 2800 3000 3200 3400	Se observa en toda la sección, sus espesores aumentan hacia los extremos del perfil, teniendo 20.1 al SE del perfil y como mínimo un grosor de 6.7
US-2c	3600 - 4200	2000 - 3800	3800 4000	Se manifiesta en casi toda la sección, entre los 11.8 y 26 metros de profundidad.

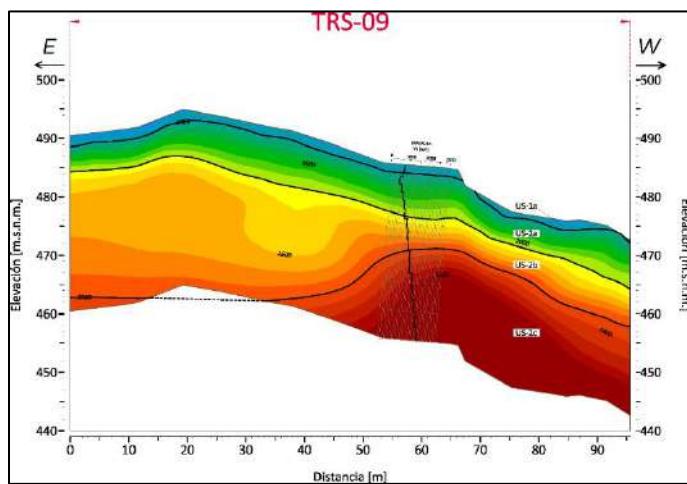


Figura 5.5 Zonificación sísmica del Tendido TRS-09

Tabla 5.5 unidades Sísmicas TRS-09

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Velocidad de onda P	Distribución y espesores
	Vp	Vs		
US-1a	<1000	600 - 800	200 400 600 800	Capa superficial, con espesores menores a 2.1 metro
US-2a	1000 - 2200	800 - 1000	1200 1400 1600 1800 2000	Se presenta en toda la sección, con espesores variables de 4 a 8.4 metros
US-2b	2200 - 3200	1000 - 1400	2400 2600 2800 3000	Se observa en toda la sección, disminuyendo considerablemente su espesor hacia el Oeste, su espesor es indefinido, pero puede ir de 5 a 22 metros.
US-2c	3200 - 4200	1400 - 1700	3400 3600 3800 4000	Se manifiesta principalmente hacia el final del tendido (W), a una profundidad de promedio de 14.5 metros

- Cauce

El cauce está conformado por los tendidos sísmicos TRS-2, TRS-3 y TRS-4 con longitudes de 93 m. Los resultados de cada línea se presentan en las Figuras 5.6 a 5.8 y en las Tablas 5.6 a 5.8.

- Las unidades US-1b y US-1c representan materiales superficiales con baja velocidad, típicos de depósitos poco consolidados. Su espesor varía significativamente según la dirección del perfil.
- Las unidades US-2a y US-2b muestran velocidades intermedias, indicando mayor rigidez. Son continuas y dominan la sección media del perfil.
- La unidad US-2c, presente solo en TRS-4, representa el nivel más profundo y rígido, con velocidades Vs superiores a 420 m/s.

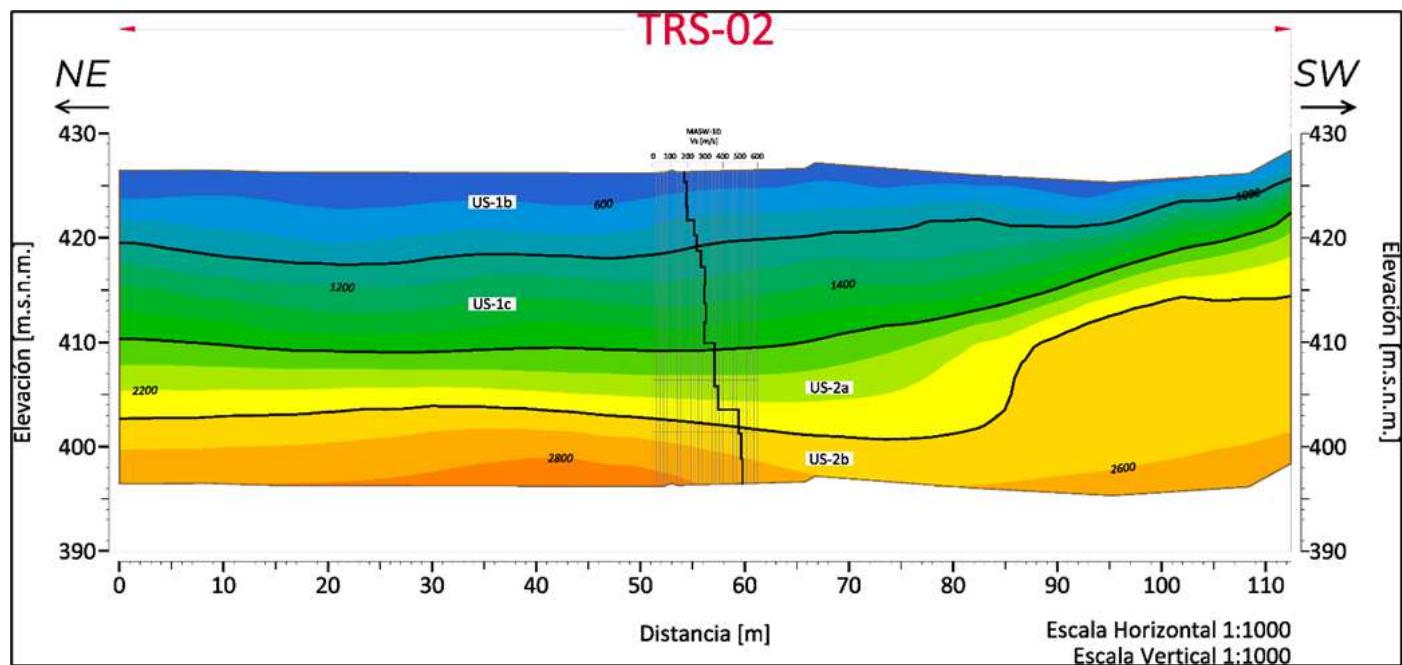


Figura 5.6 Zonificación sísmica del Tendido TRS-02

Tabla 5.6 Unidades Sísmicas TRS-02

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Velocidad de onda P	Distribución y espesores
	Vp	Vs		
US-1b	400 - 1000	180 - 260	600 800	Capa superficial con espesores de 2.2 a 8.8 m; su espesor disminuye hacia el SW.
US-1c	1000 - 1800	260 - 380	1200 1400 1600	Se presenta en toda la sección, con espesores de 3.2 a 9.2 m, su espesor aumenta hacia el NE.
US-2a	1800 - 2400	380 - 500	2000 2200	Se observa en toda la sección, con espesores de 4.6 a 11.1 metros, su espesor relativamente constante cambia después del cedamiento 85 m
US-2b	2400 - 3000	500 - 540	2600 2800	Se encuentra presente a lo largo de todo el perfil a una profundidad promedio de 25 metros hasta el cedamiento 88, ya que después se encuentra entre de los 11.6 y 16.1 m de profundidad

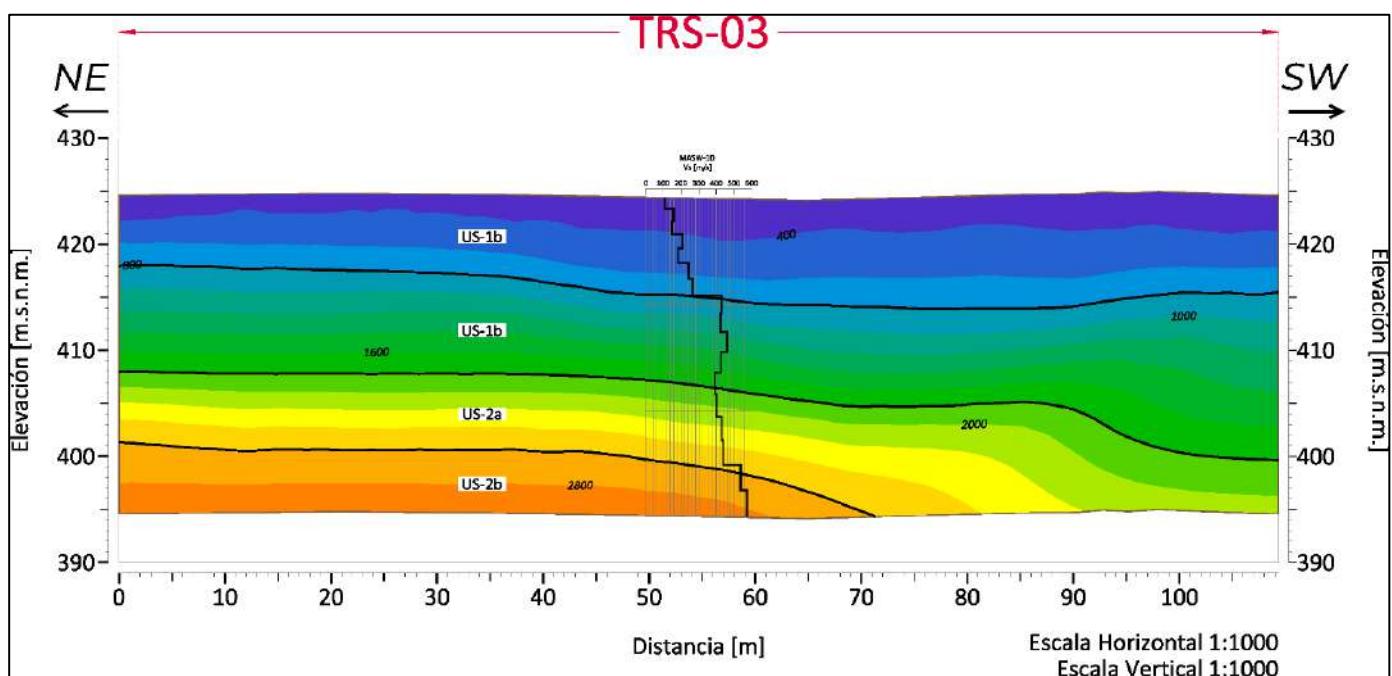


Figura 5.7 Zonificación sísmica del Tendido TRS-03

Tabla 5.7 Unidades Sísmicas TRS-03

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Velocidad de onda P	Distribución y espesores
	Vp	Vs		
US-1b	200 - 800	100 - 280	200 400 600	Capa superficial con espesores de 6.6 a 10.7 metros
US-1c	800 - 1800	280 - 380	1000 1200 1400 1600	Manifestándose a lo largo de toda la sección, tiene un espesor promedio de 9.4 metros, aumentando a 15.8 hacia el SW.
US-2a	1800 - 2600	380 - 460	2000 2200 2400	Se manifiesta en toda la sección, entre 16.6 y 25 metros de profundidad, su espesor es indefinido.
US-2b	2600 - 3000	460 - 580	2800	Se encuentra presente del inicio del perfil, hasta el cedamiento 71 metros a una profundidad de 23.2 a 24 metros.

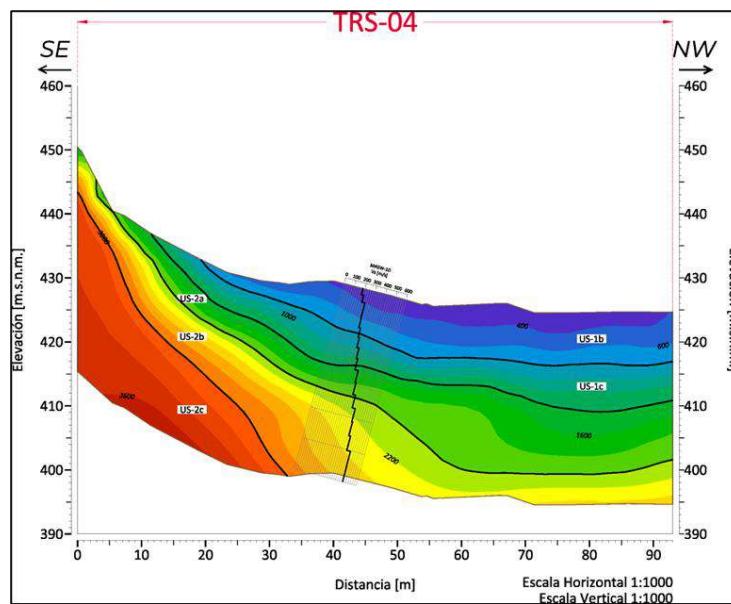


Figura 5.8 Zonificación sísmica del tendido TRS-04

Tabla 5.8 Unidades Sísmicas TRS-04

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Velocidad de onda P	Distribución y espesores
	Vp	Vs		
US-1b	200 - 800	180 - 240	200 400 600	Capa superficial, se hace presente después cadenamiento 19 m de longitud, sus espesores aumentan hacia el NW, hasta alcanzar los 8.8 m
US-1c	800 - 1400	240 - 310	1000 1200	Se presenta en toda la sección, con espesores variables de 4 a 7.3 metros
US-2a	1400 - 2000	310 - 360	1600 1800	Se manifiesta en toda la sección, su espesor es de casi 10 metros en zonas localizadas (cadenamiento 63 m), con un rango de 3.3 a 13.5 metros de espesor.
US-2b	2000 - 3000	360 - 420	2200 2400 2600 2800	Esta unidad aflora en superficie aproximadamente 3 m, mientras que a profundidad se encuentra a 25.6 m. Se presenta en toda la sección.
US-2c	3000 - 3800	>420	3200 3400 3600	Manifestándose los primeros 33 m del perfil, esta unidad se presenta a una profundidad de 7 metros en los primeros metros y a los 30 en el cadenamiento 33 m.

- Margen Derecho

El margen derecho está conformado por los tendidos sísmicos TRS-6 y TRS-7, con longitudes entre 58 m y 65 m y sus resultados se observan en la Figura 5.9 y 5.10 y las Tablas 5.9 y 5.10.

Las características sísmicas observadas muestran las siguientes características:

- Las unidades US-1a y US-1b representan depósitos superficiales con velocidades bajas, típicos de rellenos o suelos poco consolidados. US-1b aparece solo en TRS-7.
- Las unidades US-2a y US-2b muestran velocidades intermedias, indicando mayor rigidez. Son continuas y dominan la sección media del perfil.
- La unidad US-2c representa el nivel más profundo y rígido, con velocidades Vs superiores a 1400 m/s. Su profundidad varía significativamente por efectos topográficos.

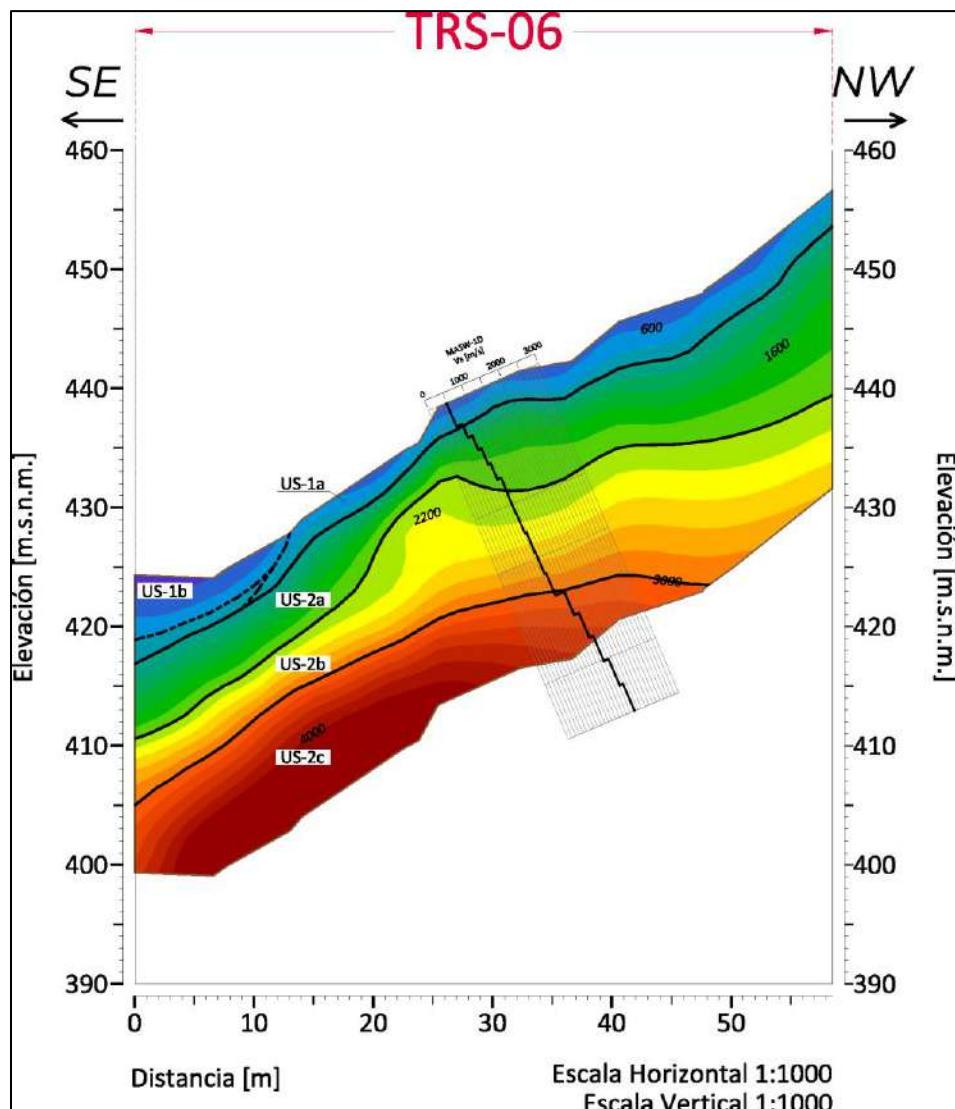


Figura 5.9 Zonificación sísmica del tendido TRS-06

Tabla 5.9 Unidades Sísmicas TRS-06

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Velocidad de onda P	Distribución y espesores
	Vp	Vs		
US-1a	400 - 1000	500 - 700	200 400 600 800	Capa superficial; donde sus espesores van son menores a 5.3 metros
US-2a	1000 - 2000	700 - 1000	1200 1400 1600 1800	Se presenta en toda la sección, aumentando su espesor hacia el NW, donde alcanza los 15 m.
US-2b	2000 - 3000	1000 - 1400	2200 2400 2600 2800	Se manifiesta en toda la sección, con espesores de 5.5 a mayores de 11 m; el espesor aumenta del cadenamiento 18 m hacia el final del tendido,
US-2c	3000 - 4200	1400 - 1800	3200 3400 3600 3800 4000	Se presenta entre las profundidades de 17.8 a 25 metros y del inicio del perfil al cadenamiento 47 m.

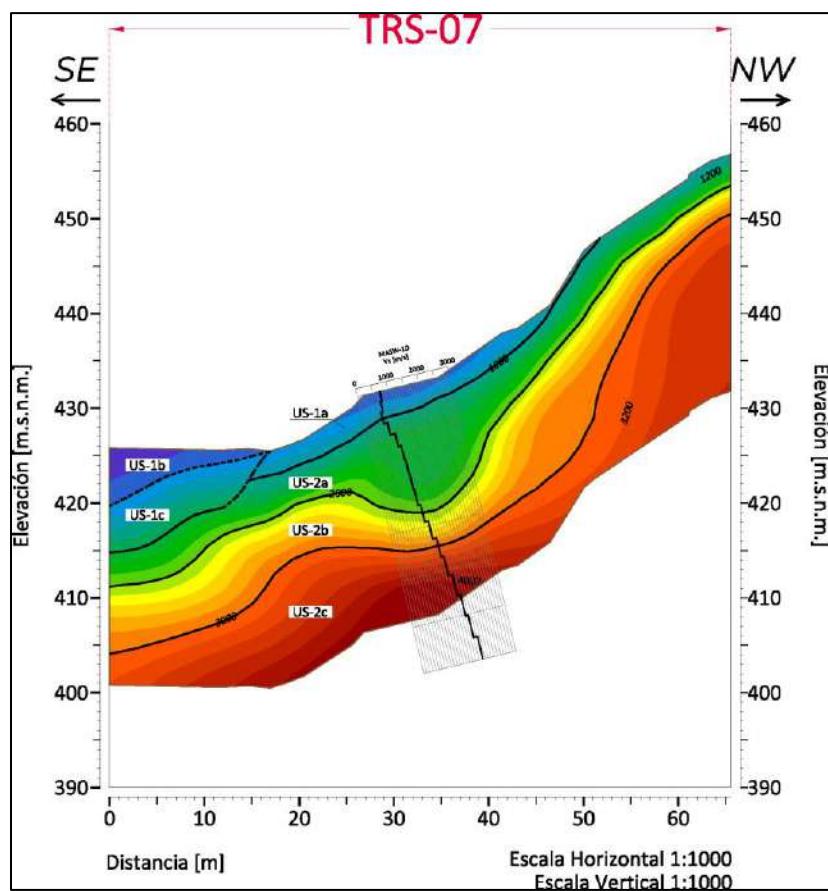


Figura 5.10 Zonificación sísmica del Tendido TRS-07

Tabla 5.10 Unidades Sísmicas TRS-07

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Velocidad de onda P	Distribución y espesores
	Vp	Vs		
US-1a	<1000	<250	200 400 600 800	Capa superficial con espesores menores a 3 metros,
US-1b	200 - 1400	600 - 800	200 400 600 800 1000 1200	Capa superficial que se presenta únicamente en los primeros metros de la sección, su espesor disminuye de 6.1 hacia en cadenamiento 16 m
US-2a	1400 - 2000	800 - 1200	1600 1800	Se manifiesta en toda la sección, donde en los extremos el espesor es en promedio de 3 m, mientras que entre los cadenamientos 25 y 40 aumenta a 11 metros.
US-2b	2000 - 3000	1200 - 1800	2200 2400 2600 2800	Se encuentra presente a lo largo de todo el perfil con espesores variables de 5.8 a 8.7 metros.
US-2c	3000-4200	1800-2000	3200 3400 3600 3800 4000	Debido a la topografía del sitio, esta unidad se encuentra a una profundidad de 21.7 al SE y llega a loa 6.34 metros al NW.

### 5.3. Unidades geosísmicas

A partir de los valores obtenidos de velocidad de onda compresional ( $V_p$ ) y velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), se calcularon los módulos elásticos dinámicos, incluyendo:

Módulo de rigidez (G)

Módulo de elasticidad (E)

Relación de Poisson ( $\nu$ )

Estos parámetros fueron estimados utilizando el peso volumétrico aparente de los materiales, determinado con base en correlaciones litológicas y datos de campo.

En las siguientes Tablas (5.11 a 5.13) se presenta un resumen de las propiedades dinámicas por zona, junto con sus respectivas características litológicas asociadas, lo cual permite establecer una relación entre el comportamiento sísmico y la naturaleza del subsuelo. También se presenta, en la Figura 5.11, el perfil sísmico TRS a lo largo del eje de la cortina.

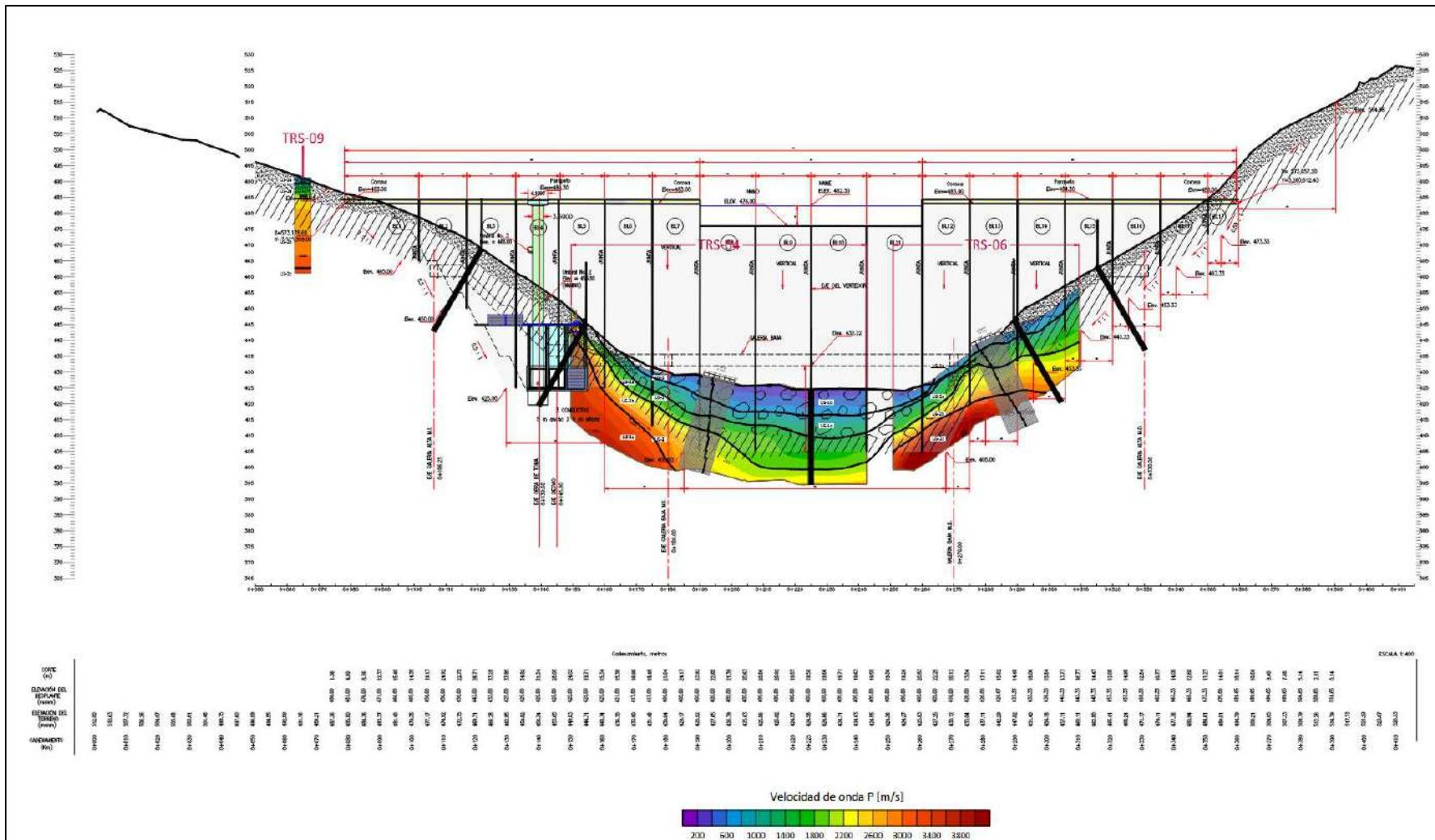


Figura 5.11 Perfil sísmico TRS a lo largo del eje de la cortina de la presa

Tabla 5.11 Unidades Geosísmicas del Margen Izquierdo

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Peso volumétrico (ton/m <sup>3</sup> )	Módulo de rigidez G (ton/cm <sup>2</sup> )	Modulo Elasticidad E (ton/cm <sup>2</sup> )	Relación Poisson v	Ripabilidad	Distribución y espesores
	Vp	Vs						
US -1 a	<1000	600 - 800	2.1	6.35	16.3	0.28		Capa superficial intermitente, con espesores menores a 4.8 metros
US -2a	1000 - 2400	400 - 1200	2.4	3.84-34.56	10.79-92.16	0.4-0.33		Se presenta en toda la sección, con espesores de 1.8 a 16.3 al NW de la TRS 8
US -2b	2000 - 3000	800 - 1400	2.8	17.92-54.88	50.35-149.36	0.4-0.36		Se manifiesta en toda la sección, con espesores de 2 a 16.8, mientras que en las TRS 5 y 9 es indefinido
US -2c	3000 - 4200	1300 - 2000	3	50.7-120	140.38-324.81	0.38-0.35		Unidad intermitente, que debido a la topografía se encuentra entre los 4.5 y 26 metros de profundidad

Tabla 5.12 Unidades Geosísmicas de la zona del Cauce

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Peso volumétrico (ton/m <sup>3</sup> )	Módulo de rigidez G (ton/cm <sup>2</sup> )	Modulo Elasticidad E (ton/cm <sup>2</sup> )	Relación Poisson v	Ripabilidad	Distribución y espesores
	Vp	Vs						
US -1 b	200 - 1000	100 - 280	2.1	0.21-1.65	0.56-4.8	0.33-0.46		Capa superficial con espesores de 2.2 a 10.7 metros
US -1 c	600 - 1800	240 - 380	2.2	1.27-3.18	3.56-9.38	0.4-0.48		Se presenta en toda la sección, con espesores de 3.2 a 15.8 al SW en la TRS 3
US -2a	1400 - 2600	310 - 500	2.4	2.31-6	6.8-17.77	0.47-0.48		Se manifiesta en toda la sección, con espesores de 3.3 a 13.5, mientras que en las TRS 3 es indefinido y se encuentra entre los 16.6 a 25 m de profundidad
US -2b	2200 - 3000	360 - 580	2.8	3.63-9.42	10.79-27.89	0.48-0.49		Debido a la topografía se encuentra entre los 3 y 25 metros de profundidad
US -2c	2400 - 3800	>560	3	9.41	27.68	0.47		Se encuentra únicamente en la TRS 4 y debido a la topografía se encuentra entre los 7 y 29 metro s de profundidad.

Tabla 5.13 Unidades Geosísmicas del Margen derecho

Unidad Sísmica	Velocidades (m/s)		Peso volumétrico (ton/m <sup>3</sup> )	Módulo de rigidez G (ton/cm <sup>2</sup> )	Modulo Elasticidad E (ton/cm <sup>2</sup> )	Relación Poisson v	Ripabilidad	Distribución y espesores
	Vp	Vs						
US -1 a	400 - 1000	250 - 700	2.1	1.31-8.87	3.1-20.13	0.18-0.13		Capa superficial intermitente con espesores menores a 6.1 m
US -2a	1000 - 2000	700 - 1200	2.4	10.14-29.04	23-74.53	0.13-0.28		Se encuentra en todos los perfiles, con espesores de 3 a 15 metros
US -2b	2000 - 3000	1000 - 1800	2.8	28-76.23	74.67-195.63	0.33-0.28		Se manifiesta a lo largo de todas las secciones con espesores de 5.5 a 11 m
US -2c	3000 - 4200	1400 - 2000	3	58.8-120.0	160-324.81	0.36-0.35		Se encuentra a una profundidad de 17.8 a 25 metros.

## 6. MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LA BOQUILLA

En este capítulo se plantea el modelo geológico geotécnico integrado a partir de los resultados de los levantamientos geológicos estructurales de campo, las exploraciones geofísicas realizadas y el sondeo con el que se cuenta hasta el momento. Para mayor a detalle se puede consultar el Plano 5 Modelo geológico-geotécnico de la boquilla.

Como punto de partida para la elaboración del modelo geológico geotécnico de la boquilla, se realizó una zonificación geotécnica agrupando macizos rocosos en unidades geotécnicas con las mismas características de meteorización, grado de fracturamiento, dureza de la matriz, RMR y GSI. En el caso de los depósitos de talud y depósitos aluviales, esos se consideran como suelos sueltos friccionales, los cuales deberán ser removidos durante la excavación del nivel de desplante.

### 6.1. Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos

Se realizó la clasificación geomecánica del macizo rocoso con base en el RMR (Rock Mass Rating) y el Índice geológico de resistencia o GSI (Geological Strength Index). En el Anexo 7.1 Clasificaciones geomecánicas, se pueden consultar las tablas y memorias de cálculo, y la Tabla 6.1 se presentan los resultados obtenidos para las unidades geológicas geotécnicas definidas.

El RMR (Rock Mass Rating), se desarrolló por Bieniawski para evaluar la estabilidad de taludes en función de las características de las discontinuidades y del ajuste de la orientación de las discontinuidades. La evaluación del macizo rocoso mediante este criterio se basa en una puntuación de las siguientes condiciones:

- Resistencia de la roca intacta
- RQD
- Espaciamiento de las discontinuidades
- Estado de las discontinuidades
- Agua en discontinuidades
- Ajuste de orientación de discontinuidades

Por otro lado, el Índice geológico de resistencia (GSI), se obtiene de la observación de las condiciones del macizo rocoso en campo, este índice fue introducido por Hoek en los años 90, cuyo objetivo es la evaluación de la resistencia de los macizos rocosos, respecto de la roca sana, para diferentes condiciones geológicas.

Se define de forma visual en el terreno a través de dos parámetros principales, el grado de fracturamiento y condición de las discontinuidades. Debido a las características geológico-estructurales de los macizos del talud, se aplicó el criterio modificado para macizos rocosos fracturados (Figura 6.1).

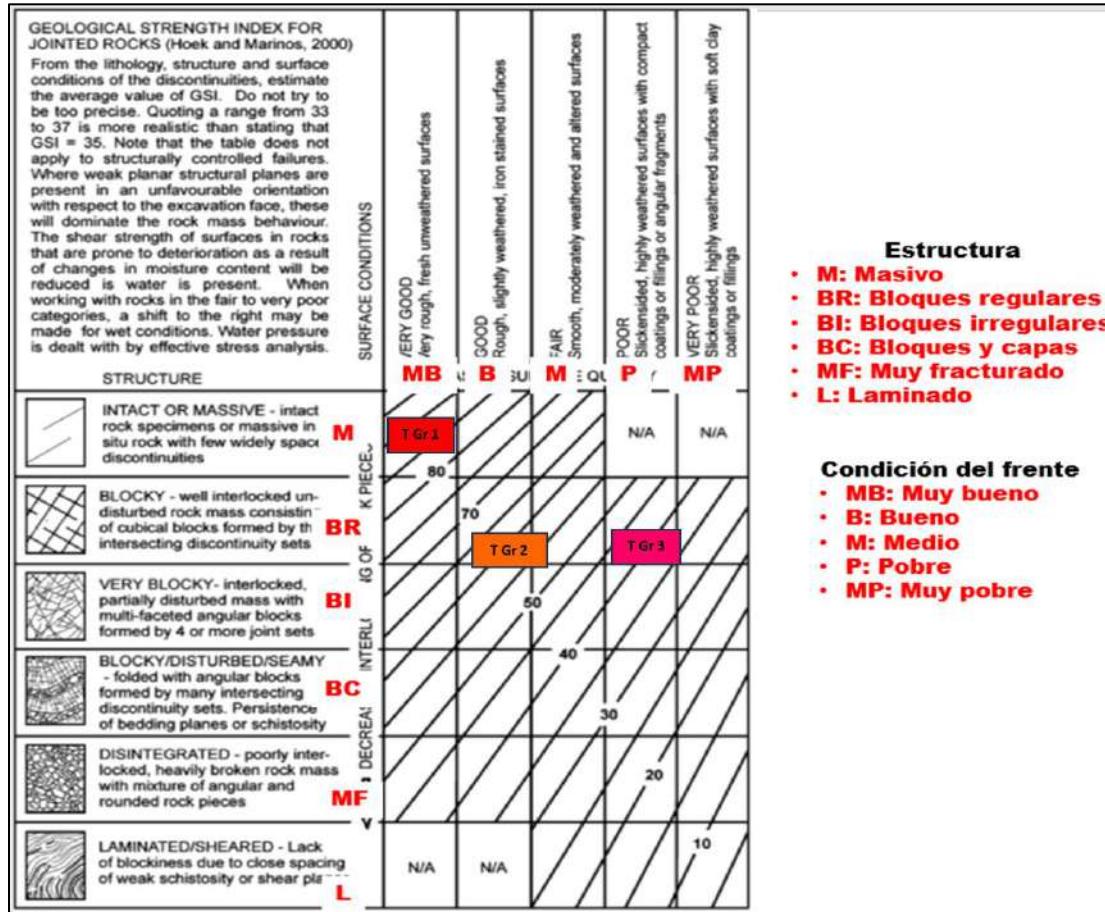


Figura 6.1 Clasificación GSI modificada, aplicada para las unidades geológico-geotécnicas del corte

Tabla 6.1 Clasificaciones geomecánicas de las unidades geológico-geotécnicas definidas

UNIDAD GEOTÉCNICA	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIONES GEOMEÁNCIAS DEL MACIZO ROCOSO	
		RMR (Bieniawski)	GSI (Hoek)
Gr 1	Granito moderadamente meteorizado, fracturado, roca blanda	57 (Roca media)	40
T Gr 2	Granito ligeramente meteorizado, poco fracturado, roca dura	76 (Roca buena)	60
T Gr 3	Granito sano, masivo, roca muy dura	90 (Roca muy buena)	90

## 6.2. Mecanismos de falla y problemas geotécnicos

Estructuralmente las familias de discontinuidades de fracturas tienen mayor repercusión para la estabilidad de la excavación, a continuación, se presentan los análisis cinemáticos y se describen las problemáticas geotécnicas para las diferentes zonas de la presa.

- Mecanismos de falla Margen Derecho

Acorde con el análisis de estabilidad cinemáticos realizados mediante el programa Dips, se determinó que para los taludes excavados en la margen izquierda la principal problemática geotecnica la representan grandes cuñas que podrían deslizar a través de la intersección de las familias de fracturas F2b y F3, que representan los planos más inclinados y frecuentes, esta genera una cuña estructural orientada hacia el noroeste, coincidente con la dirección del talud (334°).

El porcentaje de falla por cuña (12.30%) indica una condición cinemáticamente crítica, especialmente si se confirma la liberación superficial y la continuidad de las fracturas. El ángulo de fricción (26°) sugiere que la resistencia al corte puede ser superada si hay presencia de humedad, relleno o alteración.

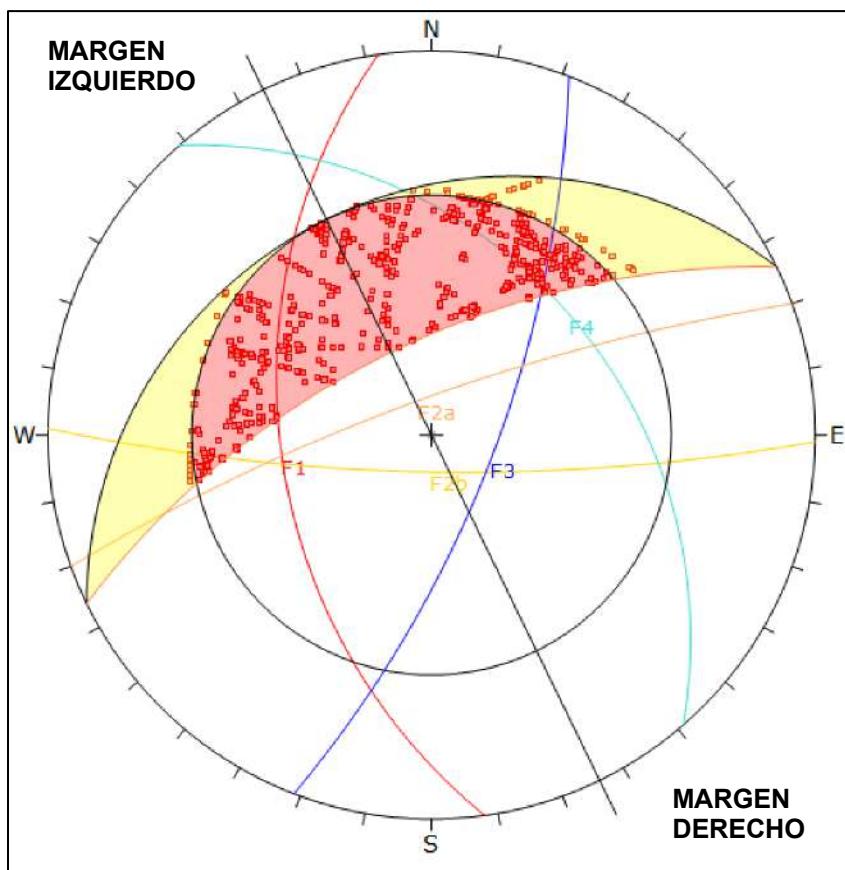


Figura 6.2 Análisis cinemático de estabilidad en margen izquierdo

- Mecanismos de falla Margen Izquierdo

Acorde con el análisis de estabilidad cinemáticos realizados mediante el programa Dips, se determinó que para los taludes excavados en la margen derecha la principal es posible que se generen cuñas que podrían deslizar a través de la intersección entre las familias F2b y F3. Se puede generar una cuña estructural orientada hacia el sureste, coincidente con la dirección del talud proyectado. Esta configuración representa una condición cinemáticamente activa, con un porcentaje de falla significativo (11.47%).

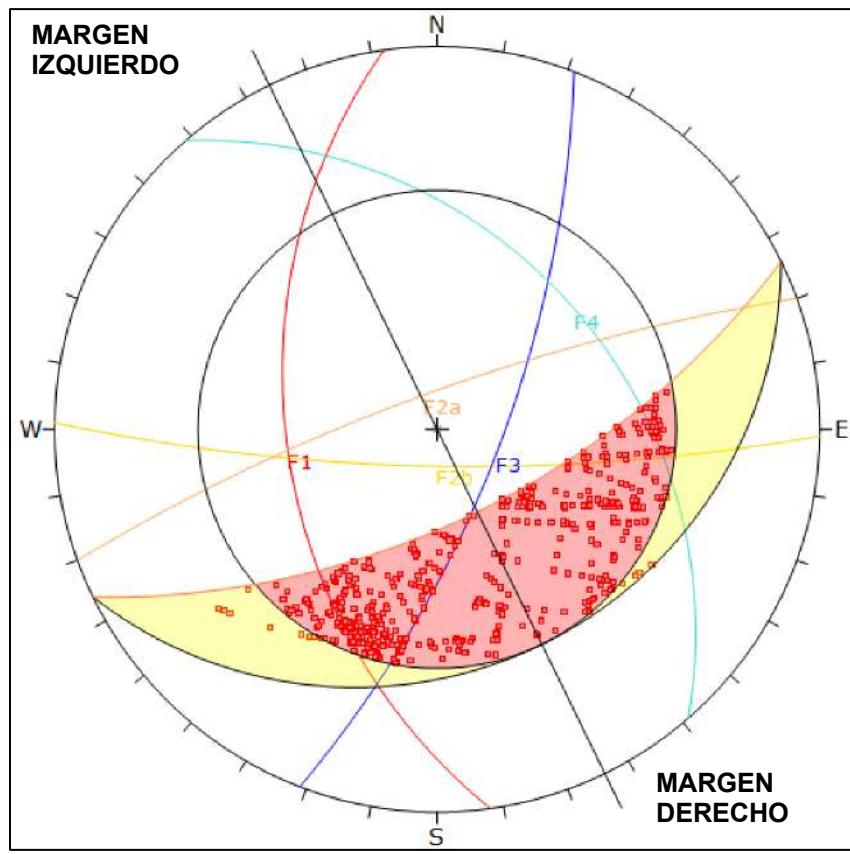
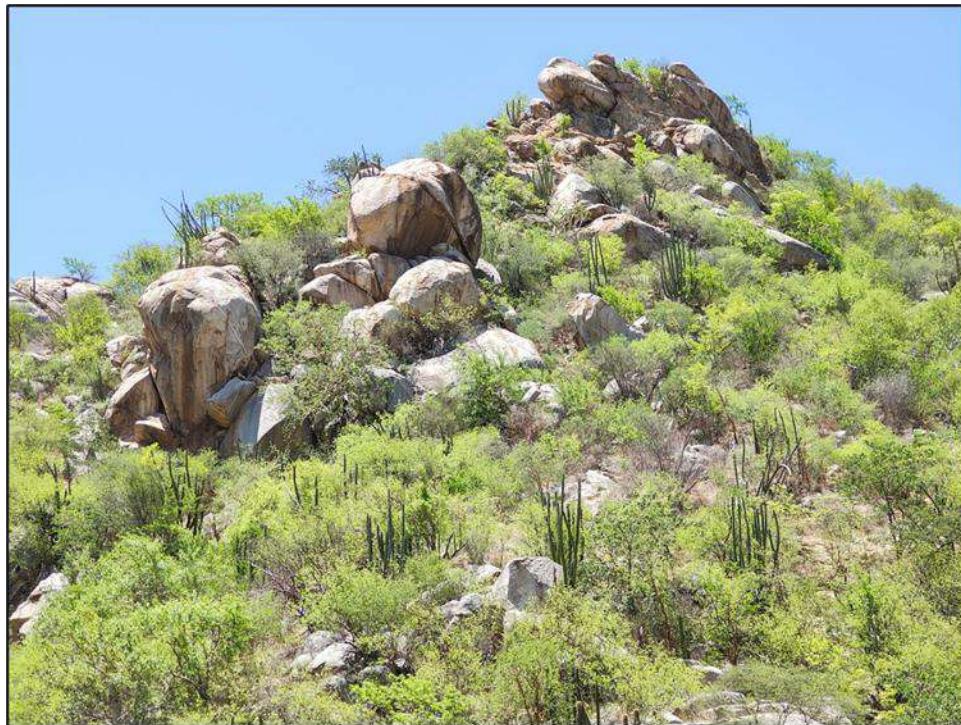


Figura 6.3 Análisis cinemático de estabilidad en margen derecho.

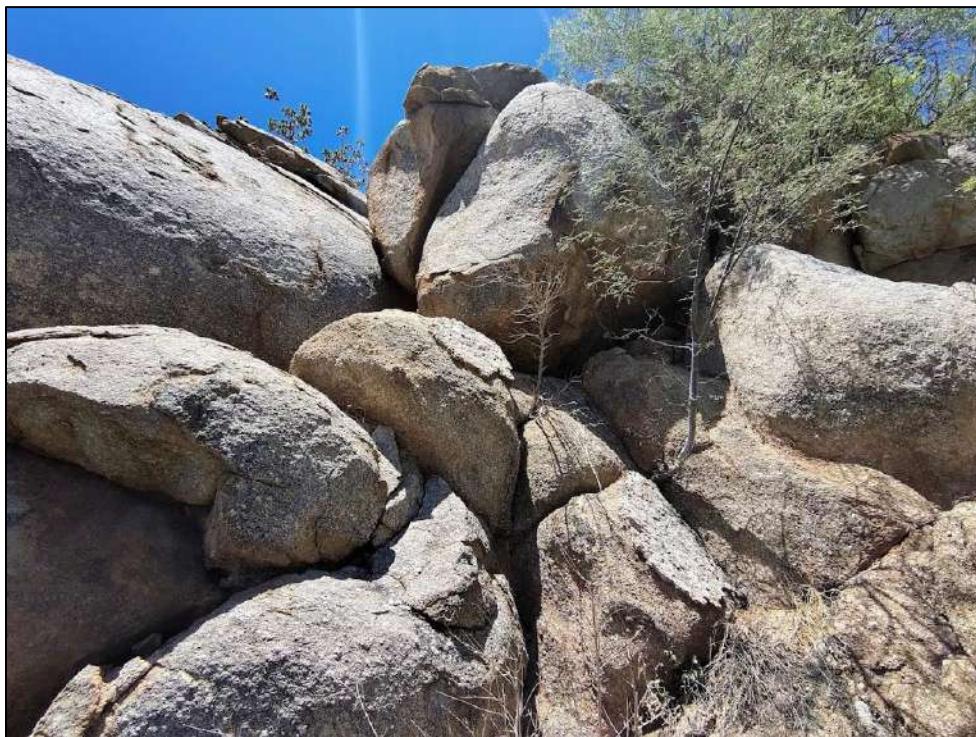
Otro mecanismo de falla a toma en cuanta durante las excavaciones consiste en grandes bloques de roca de más de  $2 \text{ m}^3$ , que se encuentran principalmente en la margen derecha del río, los bloques están muy sueltos, delimitados por sistemas de fracturas que como se mencionó en el apartado de geología estructural están muy alterada y abiertas, llenas de tucuruguay. Estos bloques pueden rodar y representa un riesgo muy importante a tomar en cuanta durante los trabajos de excavación de la presa.



*Fotografía 6.1 Bloques sueltos en la parte alta de la margen derecha*



*Fotografía 6.2. Bloques redondeados sujetos a trabazón.*



*Fotografía 6.3 Discontinuidades del macizo rocoso muy alteradas formando bloques potencialmente inestables.*

- Cause del río

La principal problemática geotecnica en el cauce del río es la altísima permeabilidad de los depósitos aluviales (Q Dal), los cuales llegan a tener espesores que varían de los 16 a los 20 m de profundidad y deberán ser removidos a su totalidad hasta alcanzar la roca sana de buena calidad e impermeable. Es importante considerar que existen lentes y horizontes con una mayor cantidad de boletos de gran tamaño

### 6.3. Integración y desarrollo del modelo geológico-geotécnico

Con la integración de la información obtenida de los levantamientos geológico-estructurales de campo, los ensayos in situ, exploraciones geofísicas, sondeos exploratorios y análisis de laboratorio, se desarrolló un modelo geológico geotécnico, que define la calidad del macizo, así como sus propiedades geomecánicas. A continuación, se hace una descripción detallada de cada una de las unidades geotécnicas definidas, por otro lado, la distribución espacial de las mismas, se presentan en el Plano 5. Modelo geológico-geotécnico de la boquilla.

#### Depósitos de talud (Q Dta):

Depósitos de talud conformado por una matriz suelta arenosa tipo tucuruguay, con un 30% de fragmentos rocosos angulosos y sub redondeados de composición granítica, sin consistencia ni consolidación, el dedo penetra fácilmente varios cm, por lo que se considera un suelo blando,

con una resistencia a la compresión simple estimada de 0.25 a 0.5 MPa, se estima un peso volumétrico de 2.1 Ton/m<sup>3</sup>.

Tiene velocidades de onda  $V_p = 400 - 1000$  m/s y  $V_s = 250 - 700$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 3.1 - 20.13$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $v = 0.18 - 0.13$ , un módulo de rigidez dinámico  $1.31 - 8.87$  Ton/m<sup>2</sup>.

Depósito aluvial arenoso (Q Dal1):

Depósitos aluviales, conformado básicamente por arenas gruesas redondeadas de cuarzo, material suelto, sin consistencia ni consolidación, el dedo penetra fácilmente varios cm, por lo que se considera un suelo blando, con una resistencia a la compresión simple estimada de 0.25 a 0.5 MPa, se estima un peso volumétrico de 2 Ton/m<sup>3</sup>.

Tiene velocidades de onda  $V_p = 200 - 1000$  m/s y  $V_s = 100 - 280$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 0.56 - 4.8$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $v = 0.33 - 0.46$ , un módulo de rigidez dinámico  $0.21 - 1.65$  Ton/m<sup>2</sup>. La recuperación de los sondeos en esta unidad fue de 10% - 20% y se detectó hasta los 9 m de profundidad.

Depósito aluvial arenoso (Q Dal2):

Depósitos aluviales, con boleos y cantos rodados, matriz arenas, suelto. Los boleos son de composición ígnea, redondeados de hasta 1 m de diámetro, sin consistencia ni consolidación, el dedo penetra fácilmente varios cm, por lo que se considera un suelo blando, con una resistencia a la compresión simple estimada de 0.25 a 0.5 MPa, se estima un peso volumétrico de 2.2 Ton/m<sup>3</sup>.

Tiene velocidades de onda  $V_p = 600 - 1800$  m/s y  $V_s = 240 - 380$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 3.56 - 9.38$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $v = 0.4 - 0.48$ , un módulo de rigidez dinámico  $1.27 - 3.18$  Ton/m<sup>2</sup>. La recuperación de los sondeos en esta unidad fue de 30% - 70% y se detectó de los 9 m a los 16 m de profundidad.

Granito moderadamente meteorizado (T Gr1):

Granito de textura fanerítica y morfología homogénea, moderadamente meteorizado, formándose a tucuruguay, fracturado, roca blanda, a matriz rocosa se disgrega o rompe con golpe del martillo para ser fracturada por lo que se considera una resistencia a la compresión simple estimada de 1 a 5 MPa. Se estima un peso volumétrico de 2.4 Ton/m<sup>2</sup>.

Tiene velocidades de onda  $V_p = 1400 - 2600$  m/s y  $V_s = 310 - 500$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 6.8 - 17.77$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $v = 0.47 - 0.48$ , un módulo de rigidez dinámico  $2.31 - 6$  Ton/m<sup>2</sup>.

La recuperación de los sondeos en esta unidad fue de 80% - 90% con un RQD = 60% - 70%. Para el macizo rocoso se determinó un RMR = 57 una roca de media calidad, y un GSI = 40.

Granito ligeramente meteorizado (T Gr2):

Granito de textura fanerítica y morfología homogénea, ligeramente meteorizado, poco fracturado, roca dura, se considera una resistencia a la compresión simple estimada de 50 a 100 MPa. Se estima un peso volumétrico de 2.8 Ton/m<sup>2</sup>.

Tiene velocidades de onda  $V_p = 2200 - 3000$  m/s y  $V_s = 360 - 580$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 10.79 - 27.89$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $\nu = 0.48 - 0.49$ , un módulo de rigidez dinámico  $3.63 - 9.42$  Ton/m<sup>2</sup>.

La recuperación de los sondeos en esta unidad fue 90% - 100% con un RQD = 80% – 90%. Para el macizo rocoso se determinó un RMR = 76 una roca de buena calidad, y un GSI= 60.

Granito ligeramente meteorizado (T Gr3):

Granito de textura fanerítica y morfología homogénea, sano, masivo, roca muy duro, se considera una resistencia a la compresión simple estimada de 100 a 250 MPa. Se estima un peso volumétrico de 3 Ton/m<sup>2</sup>.

Tiene velocidades de onda  $V_p = 2400 - 3800$  m/s y  $V_s = >560$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 27.68$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $\nu = 0.47$ , un módulo de rigidez dinámico  $9.41$  Ton/m<sup>2</sup>.

La recuperación de los sondeos en esta unidad fue 90% - 100% con un RQD = 90% – 100%. Para el macizo rocoso se determinó un RMR = 90 una roca de buena calidad, y un GSI= 90.

En la figura 6.4 se observa el perfil longitudinal a lo largo del eje de la presa, con la distribución de las unidades geológico-geotécnicas descritas, en la Tabla 6.2 se muestra un resumen de las características de cada una de las unidades.

Tabla 6.2 resumen de las características de cada una de las unidades.

Unidad Geológica	Descripción	Propiedades de la matriz rocosa			Propiedades geosísmicas				Clasificaciones geomecánicas				
		Peso Vol. Ton/m3	RCS C/Martillo Schmidt	Índice de dureza ISMR (MPa)	Velocidades sísmicas		Módulo de Rígidez	Módulo de Elasticidad	Relación de Poisson	% Recuperación	% RQD	RMR (Bienia wski)	GSI (Hoek)
					Primaria, VP [m/s]	Secundarias [m/s]							
Depósito de talud (Q Dta)	Depósitos de talud conformado por una matriz suelta arenosa tipo tucuruguay, con un 30% de fragmentos rocosos angulosos y sub redondeados de composición granítica	2.1	No Aplica	Suelo débil 0.25 - 0.5 MPa	400 - 1000	250 - 700	1.31-8.87	3.1-20.13	0.18-0.13	No Aplica	No Aplica	No Aplica	No Aplica
Depósito aluvial arenoso (Q Dal1)	Depósitos aluviales, conformado básicamente por arenas gruesas redondeadas de cuarzo, material suelto.	2	No Aplica	Suelo débil 0.25 - 0.5 MPa	200 - 1000	100 - 280	0.21-1.65	0.56-4.8	0.33-0.46	10. -20	No Aplica	No Aplica	No Aplica
Depósito aluvial con boleos (Q Dal2)	Depósitos aluviales, con boleos y cantos rodados, matriz arenas, suelto. Los boleos son de composición ígnea, redondeados de hasta 1 m de diámetro.	2.2	No Aplica	Suelo débil 0.25 - 0.5 MPa	600 - 1800	240 - 380	1.27-3.18	3.56-9.38	0.4-0.48	30 -70	No Aplica	No Aplica	No Aplica
Granito moderadamente meteorizado (T Gr1)	Granito moderadamente meteorizado, formándose a tucuruguay, fracturado, roca blanda	2.4	No Aplica	Roca muy blanda (1 - 5 MPa)	1400 - 2600	310 - 500	2.31-6	6.8-17.77	0.47-0.48	80 -90	60 -70	57 (Roca media)	40
Granito ligeramente meteorizado (T Gr2)	Granito ligeramente meteorizado, poco fracturado, roca dura	2.8	Meteorizado (80 MPa)	Roca dura (50 - 100 MPa)	2200 - 3000	360 - 580	3.63-9.42	10.79-27.89	0.48-0.49	90 -100	80 -90	76 (Roca buena)	60
Granito sano (T Gr3)	Granito sano, masivo, roca muy dura	3	Sano (140 MPa)	Roca muy dura (100 - 250 MPa)	2400 - 3800	>560	9.41	27.68	0.47	90 -100	90 -100	90 (Roca muy buena)	90

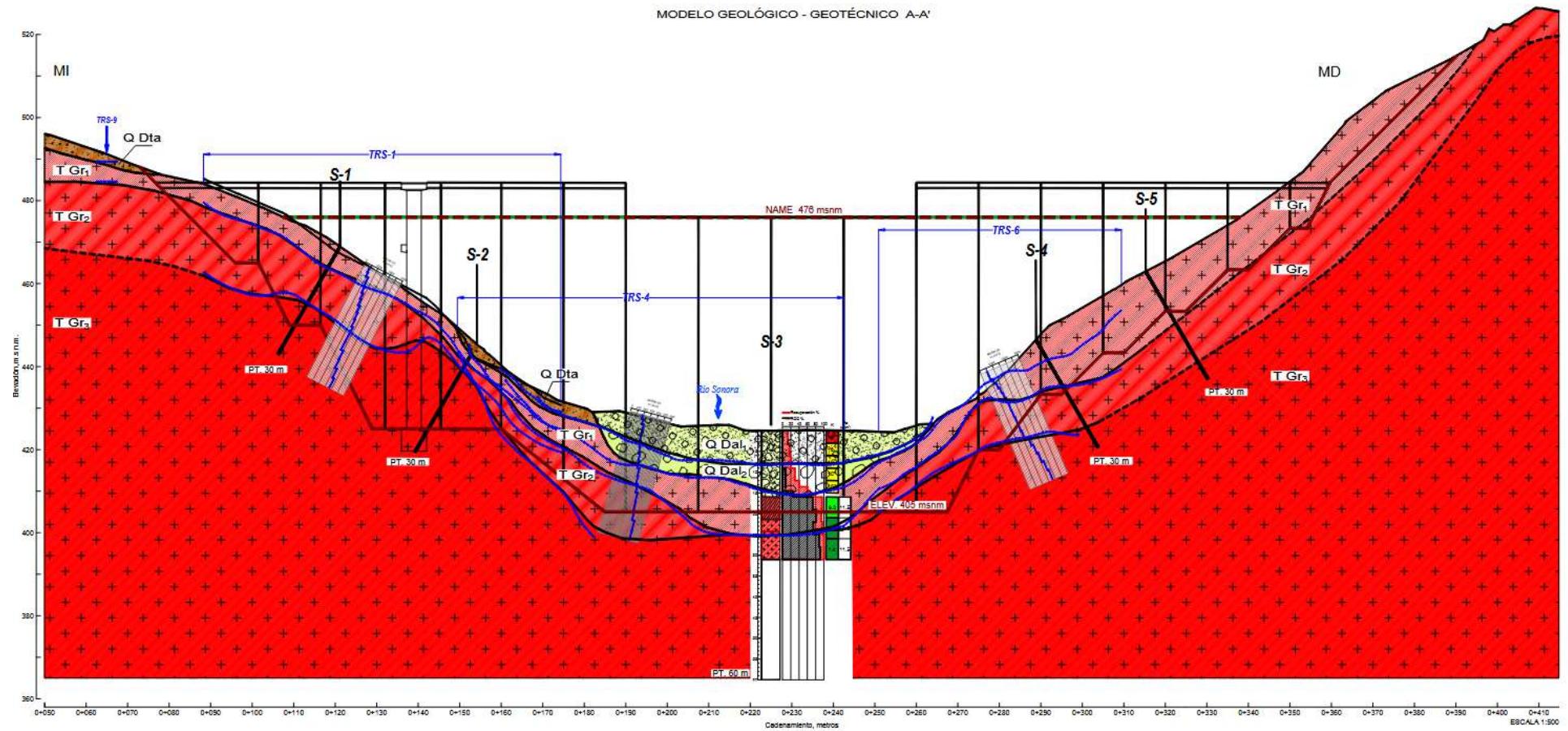


Figura 6.4 Perfil longitudinal a lo largo del eje de la presa

## 7. CONCLUSIONES

1. El proyecto de la Puerta del Sol, se localiza sobre el río Sonora, a considera una cortina 220 m de largo de CCR, con una altura de 79.3 m, a un nivel de desplante de 410 msnm, la corona a una elevación de 484.30 msnm, el NAME a la elevación 470 msnm.
2. En la zona de estudio predomina la unidad TeGd-Gr del Terciario, la cual corresponde a una roca intrusiva compuesta de granito y granodiorita caracterizadas por una textura granular de grano fino a grueso. Esta unidad representa un cuerpo magmático que intruye las unidades sedimentarias y metamórficas del paleozoico, su intrusión se asocia a eventos de enfriamiento profundo y a procesos tectónicos de emplazamiento en el tramo final del ciclo orogénico. En campo la unidad TeGd-Gr se observa en cuerpos intrusivos de morfología suave, textura fanerítica y morfología homogénea, presentan una mineralogía compuesta de plagioclasa, biotita, clorita y cuarzo, y muestra vetillo de cuarzo entre 0.5 y 1.00 cm de espesor. Estos cuerpos intrusivos pueden aparecer como áreas de rocas de textura homogénea y compacta, a menudo afectados por procesos de silicificación y alteración hidrotermal, que les dan un aspecto más alterado y a veces con presencia de fracturas o vetillas.
3. En cuanto a los resultados de los estudios geofísicos. Se realizaron 9 tendidos sísmicos de longitudes variables, divididos principalmente en tres zonas margen izquierdo, cauce y margen derecho, los resultados se presentan a continuación:

**Margen izquierdo:** Queda conformada por los tendidos sísmicos TRS-1, TRS-5, TRS-8 y TRS-9, con longitudes que van de los 86 a 102m, de las cuales a continuación se resumen las características Sísmicas:

Unidad Sísmica US-1a, presenta valores de Vp menores de 1000m/s y Vs entre 600 a 800 m/s, estos materiales se asocian con la presencia de materiales de depósitos recientes con un espesor aproximado de 4.8m.

Unidad Sísmica US-2a, presenta valores de Vp entre 1000 a 2400m/s y Vs entre 400 a 1200m/s, con un espesor entre 1.8 a 16m

Unidad Sísmica US-2b, presenta valores de Vp entre 2000 a 3000m/s y Vs entre 800 a 1400m/s, con un espesor entre 2 a 16.8m

Unidad Sísmica US-2c, presenta valores de Vp entre 3000 a 4200m/s y Vs entre 1300 a 2000m/s, la unidad se presenta por debajo de los 4.5 a 26m de la exploración

**Cauce:** Queda conformada por los tendidos sísmicos TRS-2, TRS-3 y TRS-4, con longitudes que van de los 93 a 93m, de las cuales a continuación se resumen las características Sísmicas:

Unidad Sísmica US-1b, presenta valores de Vp entre 200 a 1000m/s y Vs entre 100 a 280m/s, estos materiales se asocian con la presencia de materiales de depósitos recientes con un espesor entre 2.2 a 10.7.

Unidad Sísmica US-1c, presenta valores de Vp entre 600 a 1800m/s y Vs entre 240 a 380m/s, con un espesor entre 3.2 a 15.8m

Unidad Sísmica US-2a, presenta valores de Vp entre 1400 a 2600m/s y Vs entre 310 a 500m/s, con un espesor entre 3.3 a 16.6m

Unidad Sísmica US-2b, presenta valores de Vp entre 2200 a 3000m/s y Vs entre 360 a 580m/s, la unidad se presenta entre los 3 a 25m de profundidad.

Unidad Sísmica US-2c, presenta valores de Vp entre 2400 a 3800m/s y Vs mayores a 560m/s, la unidad se presenta entre los 4 a 29m de profundidad.

**Margen Derecho:** Queda conformada por los tendidos sísmicos TRS-6 y TRS-7, con longitudes que van de los 58 a 65m, de las cuales a continuación se resumen las características Sísmicas:

Unidad Sísmica US-1a, presenta valores de Vp entre 400 a 1000m/s y Vs entre 250 a 700m/s, estos materiales se asocian con la presencia de materiales de depósitos recientes con un espesor aproximado de 6m.

Unidad Sísmica US-2a, presenta valores de Vp entre 1000 a 2000m/s y Vs entre 700 a 1200m/s, con un espesor entre 3 a 15m

Unidad Sísmica US-2b, presenta valores de Vp entre 2000 a 3000m/s y Vs entre 1000 a 1800m/s, con un espesor entre 5.5 a 11m

Unidad Sísmica US-2c, presenta valores de Vp entre 3000 a 4200m/s y Vs entre 1400 a 2000m/s, la unidad se presenta por debajo de los 17.8 a 25m de la exploración

4. Estructuralmente las familias de discontinuidades de fracturas tienen mayor repercusión para la estabilidad de la excavación, acorde con el análisis de estabilidad cinemáticos realizados mediante el programa Dips, se determinó determinaron 5 sistemas de fracturas de las cuales para los taludes excavados en la margen izquierda la principal problemática geotecnia la representan grandes cuñas que podrían deslizar a través de la intersección de las familias de fracturas F1 y F4

5. Otro mecanismo de falla a toma en cuenta durante las excavaciones consiste en grandes bloques de roca de más de 2 m<sup>3</sup>, que se encuentran principalmente en la margen derecha del río, los bloques están muy sueltos, delimitados por sistemas de fracturas que como se mencionó en el apartado de geología estructural están muy alterada y abiertas, rellenas de tucuruguay.

6. La principal problemática geotecnica en el cauce del río es la altísima permeabilidad de los depósitos aluviales (Q Dal), los cuales llegan a tener espesores que varían de los 16 a los 20 m de profundidad.

7. El modelo geológico geotécnico planteado considera un total de 6 unidades geológico geotecnica cuyas características se describen a continuación.

**Depósitos de talud (Q Dta):** Depósitos de talud conformado por una matriz suelta arenosa tipo tucuruguay, con un 30% de fragmentos rocosos angulosos y sub redondeados de composición granítica, sin consistencia ni consolidación, el dedo penetra fácilmente varios cm, por lo que se considera un suelo blando, con una resistencia a la compresión simple estimada de 0.25 a 0.5 MPa, se estima un peso volumétrico de 2.1 Ton/m<sup>3</sup>. Tiene velocidades de onda  $V_p = 400 - 1000$  m/s y  $V_s = 250 - 700$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E=3.1-20.13$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $\nu=0.18-0.13$ , un módulo de rigidez dinámico 1.31-8.87 Ton/m<sup>2</sup>.

**Depósito aluvial arenoso (Q Dal1):** Depósitos aluviales, conformado básicamente por arenas gruesas redondeadas de cuarzo, material suelto, sin consistencia ni consolidación, el dedo penetra fácilmente varios cm, por lo que se considera un suelo blando, con una resistencia a la compresión simple estimada de 0.25 a 0.5 MPa, se estima un peso volumétrico de 2 Ton/m<sup>3</sup>. Tiene velocidades de onda  $V_p = 200 - 1000$  m/s y  $V_s = 100 - 280$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E=0.56 - 4.8$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $\nu=0.33-0.46$ , un módulo de rigidez dinámico 0.21 – 1.65 Ton/m<sup>2</sup>. La recuperación de los sondeos en esta unidad fue de 10% - 20% y se detectó hasta los 9 m de profundidad.

**Depósito aluvial arenoso (Q Dal2):** Depósitos aluviales, con boleos y cantos rodados, matriz arenas, suelto. Los boleos son de composición ígnea, redondeados de hasta 1 m de diámetro, sin consistencia ni consolidación, el dedo penetra fácilmente varios cm, por lo que se considera un suelo blando, con una resistencia a la compresión simple estimada de 0.25 a 0.5 MPa, se estima un peso volumétrico de 2.2 Ton/m<sup>3</sup>. Tiene velocidades de onda  $V_p = 600 - 1800$  m/s y  $V_s = 240 - 380$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 3.56 - 9.38$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $\nu=0.4-0.48$ , un módulo de rigidez dinámico 1.27 – 3.18 Ton/m<sup>2</sup>. La recuperación de los sondeos en esta unidad fue de 30% - 70% y se detectó de los 9 m a los 16 m de profundidad.

**Granito moderadamente meteorizado (T Gr1):** Granito de textura fanerítica y morfología homogénea, moderadamente meteorizado, formándose a tucuruguay, fracturado, roca blanda, a matriz rocosa se disgrega o rompe con golpe del martillo para ser fracturada por lo que se considera una resistencia a la compresión simple estimada de 1 a 5 MPa. Se estima un peso volumétrico de 2.4 Ton/m<sup>2</sup>. Tiene velocidades de onda  $V_p = 1400 - 2600$  m/s y  $V_s = 310 - 500$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 6.8 - 17-77$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $\nu=0.47 - 0.48$ , un módulo de rigidez dinámico 2.31 – 6 Ton/m<sup>2</sup>. La recuperación de los sondeos en esta unidad fue de 80% - 90% con un RQD = 60% – 70%. Para el macizo rocoso se determinó un RMR = 57 una roca de media calidad, y un GSI= 40.

Granito ligeramente meteorizado (T Gr2): Granito de textura fanerítica y morfología homogénea, ligeramente meteorizado, poco fracturado, roca dura, se considera una resistencia a la compresión simple estimada de 50 a 100 MPa. Se estima un peso volumétrico de 2.8 Ton/m<sup>2</sup>. Tiene velocidades de onda  $V_p = 2200 - 3000$  m/s y  $V_s = 360 - 580$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 10.79 - 27.89$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $\nu = 0.48 - 0.49$ , un módulo de rigidez dinámico  $3.63 - 9.42$  Ton/m<sup>2</sup>. La recuperación de los sondeos en esta unidad fue 90% - 100% con un RQD = 80% - 90%. Para el macizo rocoso se determinó un RMR = 76 una roca de buena calidad, y un GSI= 60.

Granito ligeramente meteorizado (T Gr3): Granito de textura fanerítica y morfología homogénea, sano, masivo, roca muy duro, se considera una resistencia a la compresión simple estimada de 100 a 250 MPa. Se estima un peso volumétrico de 3 Ton/m<sup>2</sup>. Tiene velocidades de onda  $V_p = 2400 - 3800$  m/s y  $V_s = >560$  m/s, se calculó un módulo dinámico de elasticidad  $E = 27.68$  Ton/m<sup>2</sup>, un coeficiente de poisson dinámico de  $\nu = 0.47$ , un módulo de rigidez dinámico  $9.41$  Ton/m<sup>2</sup>. La recuperación de los sondeos en esta unidad fue 90% - 100% con un RQD = 90% - 100%. Para el macizo rocoso se determinó un RMR = 90 una roca de buena calidad, y un GSI= 90.

8. Es necesario continuar con los sondeos exploratorios propuestos, complementándolos con ensayos de permeabilidad, ensayos de laboratorios y nutrir el modelo geológico geotécnico presentado en este informe con los nuevos los resultados obtenidos. Es deseable complementar la exploración geofísica en la margen derecha de la cortina.

## 8. REFERENCIAS

- Comisión Federal de Electricidad. (s.f.). *Norma de referencia CFE-10000-48: Estudio geotécnico para proyectos de obras civiles*. <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/o/10000-48.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano. (s.f.). Carta geológica H12-D33 (GM), escala 1:50,000. [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/360\\_H12-D33\\_GM.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/360_H12-D33_GM.pdf)
- Servicio Geológico Mexicano. (1999). *Carta geológico-minera Hermosillo, H12-8, Sonora, escala 1:250,000* [Mapa]. Consejo de Recursos Minerales. [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/metadatos\\_geol/18\\_GL\\_hermosillo.html](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/metadatos_geol/18_GL_hermosillo.html)
- Servicio Geológico Mexicano. (2021). *Informe técnico T262021RALA0001\_01: Cartografía geológica del área de estudio* [Informe técnico]. [https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T262021RALA0001\\_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T262021RALA0001_01.PDF)
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1994). *The Hoek–Brown failure criterion and GSI – Geological Strength Index*. International Society for Rock Mechanics. Recuperado de <https://1library.co/document/y8xk665q-224501612-el-indice-de-resistencia-geologica-gsi-una-herramienta-de-caracterizacion-para-evaluar-las-propiedades-ingenieriles-de-macizos-rocosos.html>
- Comisión Estatal del Agua de Sonora. (2006). Estudio de factibilidad del proyecto de la presa de almacenamiento y control del Río Sonora en la Puerta del Sol, municipio de Ures, Sonora [Informe técnico, no publicado]. Consultores en Ingeniería, S.A.