



Facultad de Ingeniería
Departamento de Geología y Petróleo
Licenciatura en Ciencias Geológicas

Trabajo Final de Licenciatura

**Problemas geológicos y geotécnicos sobre el cierre de la
presa multipropósito La Invernada, Chos Malal Provincia
del Neuquén.**

Alumno: Tomás Alejandro Pedone

Leg: ING 5215

DNI: 40443932

Director: José Ricardo Gatica

Neuquén, 2023

RESUMEN

Además de la generación de energía hidroeléctrica, el almacenamiento de agua y múltiples beneficios asociados, la construcción de aprovechamientos hidroeléctricos trae aparejada una serie de riesgos que derivan del mal funcionamiento de las presas. Con el fin de asentar las bases para futuros estudios y etapas del proyecto, se realizó un análisis para identificar los problemas geológicos y geotécnicos en el área de estudio del proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada. A fin de cumplir con los objetivos establecidos se propuso una metodología para la identificación y evaluación de los problemas geológicos y geotécnicos, basados en cinco aspectos fundamentales: geología regional, estabilidad de taludes rocosos, análisis de sondeos, análisis de perfiles sísmicos y análisis geomorfológico.

A partir de los resultados obtenidos se concluyó que a pesar de que la zona de estudio se encuentra en una zona caracterizada por una intensa deformación, no se identificaron sectores o estructuras que impliquen un riesgo en términos geológicos, geotécnicos o geomorfológicos para la futura realización del proyecto. Por otra parte las rocas que conforman el sitio de emplazamiento de la presa, no presentan características desfavorables para el futuro desarrollo de obras, sin embargo, los depósitos sedimentarios que caracterizan la parte superficial de ambos macizos, posiblemente asociados a un antiguo cauce del río, los cuales fueron identificados a través de sondeos, estudios geofísicos y relevamientos de campo, deberán ser tenidos en cuenta para las futuras etapas del proyecto. En base a las conclusiones obtenidas es posible afirmar que el área de estudio presenta condiciones favorables para la futura realización de estudios y obras.

Palabras clave: Problemas geológicos y geotécnicos, análisis geomorfológico, estabilidad de taludes, depositos sedimentarios, paleocauce, Aprovechamiento Multipropósito La Invernada.

ABSTRACT

Besides to hydroelectric power generation, water storage and multiple associated benefits, the construction of multipurpose hydroelectrics involves risks that come from the malfunctioning of dams. In order to establish the bases for future studies and stages of the project, an analysis was carried out in order to identify geological and geotechnical problems in the study area of the La Invernada Multipurpose Hydroelectric. In order to achieve the established objectives a methodology for the evaluation and identification of geological and geotechnical problems was proposed, this methodology is based in five fundamental aspects: regional geology, rock slope stability, geological surveys analysis, seismic profiles analysis and regional geomorphological analysis.

From the results obtained, it was concluded that even though the study area is located in an area characterized by intense deformation, no sectors or structures were identified that imply a risk for the realization of the project. On the other hand, the rocks that make up to the emplacement site of the dam do not present unfavorable characteristics for the future development of works, however, the sedimentary deposits thar characterize the superficial part of both massifs, possibly associated with an old paleochannel, which were identified through surveys, geophysical studies, and field studies, should be considered for future stages on the project. Based on the conclusions obtained, it is possible to affirm that the study area presents favorable conditions for the future realization of studies and works.

Key words: Geological and geotechnical problems, geomorphological analysis, rock slope stability, sedimentary deposits, paleochannel, La Invernada Multipurpose Hydroelectric.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Esta tesis está dedicada:

En primer lugar a mi mamá, mi gran mentora quien nunca permitió que baje los brazos, siempre creyó en mí y estuvo a mi lado acompañándome y aconsejándome en cada momento durante mi vida y años de estudio. Siempre te recuerdo con amor y con esa sonrisa tan alegre que te caracterizaba, te extraño mucho.

A mi papa, por siempre dar todo por mí y nunca dejar que nada me falte para poder estudiar, por su apoyo incondicional, compañía y consejos durante tantos años.

A mi abuela Nelly, por esos valores y principios que siempre me inculcaste desde chico, por haberme esperado cada día con las comidas más ricas y por todos esos mates y charlas compartidos mientras estudiaba.

A mi hermano Feli, por siempre estar presente en cada momento y por ser un gran ejemplo de esfuerzo y perseverancia.

A mica, mi compañera de vida y futura colega. Gracias por tu compañía, por esas charlas y momentos de estudio y sobre todo por cada consejo y palabras de aliento en cada momento que lo necesite.

Agradecimientos:

A mi director de tesis, José, por su paciencia, predisposición, por el tiempo y conocimientos brindados, y además, por ser un excelente profesor y profesional.

A Juan Catinari, Alberto Garrido y Roberto Flores, por ser parte de la revisión y jurado del presente trabajo final.

A la Universidad Nacional del Comahue por ser la institución en la cual pude formarme y a todos los excelentes profesores que tuve a lo largo de mis años de estudio.

A mis compañeros y amigos que me dio esta hermosa carrera, con los que pude compartir aula y viajes de campo. Me llevo hermosos momentos compartidos con cada uno de ustedes.

A la empresa EMHIDRO S.E.P y al grupo consultor conformado por Intertechne Consultans S.A, H.I.S.S.A Hidronor Ingeniería y Servicios S.A, Consultoría Oscar G. Grimaux y Asociados S.A.T y HCA Consultora S.R.L por los datos brindados para la realización del presente trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS.....	iii
ÍNDICE.....	iv
INDICE DE FIGURAS	v
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos.....	2
2. ÁREA DE ESTUDIO	2
2.1 Geología.....	3
3. ANTECEDENTES.....	5
4. MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO	6
4.1 Trabajo de gabinete previo a los trabajos de campo	6
4.1.1 Geología regional	7
4.1.2 Estabilidad de taludes en macizos rocosos	7
4.1.3 Análisis de perfiles sísmicos	11
4.1.4 Análisis geomorfológico regional. Clasificaciones.....	12
4.2 Trabajo de campo.....	13
5. RESULTADOS.....	15
5.1 Geología regional.....	15
5.2 Estabilidad de taludes en macizos rocosos.....	26
5.3 Análisis de sondeos.....	34
5.4 Análisis de perfiles sísmicos	41
5.5 Análisis geomorfológico regional.....	51
5.5.1 Geoformas clásticas:.....	51
5.5.2 Geoformas fluviales:	51
5.5.3 Geoformas volcánicas.	51
5.6 Determinación de problemas geológicos- geotécnicos	52
6. CONCLUSIONES	57
7. BIBLIOGRAFÍA.....	59

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Área de estudio y localización del sitio de interés que se encuentra asociado a posibles problemas geológicos y geotécnicos.</i>	2
<i>Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y límite entre las fajas corridas y plegadas de Chos Malal y Agrio. (Modificado de Lebinson 2019).</i>	3
<i>Figura 3. Cuadro estratigráfico de las unidades aflorantes y los principales eventos tectónicos que afectaron la región (Sánchez et al, 2014).</i>	5
<i>Figura 4. Factores influyentes en el comportamiento de laderas. (González de Vallejos, 2005).</i>	8
<i>Figura 5. Tipos de movimientos de ladera (González de Vallejo et al., 2005).</i>	9
<i>Figura 6. Mecanismos de rotura (Ramírez Oyanguren et al., 2004).</i>	10
<i>Figura 7. Ubicación de sondeos brindados por el grupo consultor.</i>	10
<i>Tabla 1. Tipos de roca o suelo en base a valores de la onda de compresión sísmica Vp.</i>	11
<i>Tabla 2. Principales dominios morfoestructurales (Elaboración propia).</i>	12
<i>Tabla 3. Procesos geomorfológicos (Elaboración propia).</i>	12
<i>Tabla 4. Símbolos y colores para cada clase de pendiente. (Fernández et al. 2021).</i>	13
<i>Tabla 5. Clases de pendientes (Fernández et al. 2021).</i>	13
<i>Figura 8. Puntos GPS de los sitios de interés analizados durante los trabajos de campo.</i>	14
<i>Figura 9. Formaciones geológicas aflorantes en el área de estudio.</i>	16
<i>Figura 10. Mapa extraído y modificado de Garrido et al (2014).</i>	16
<i>Figura 11. Mapa geológico correspondiente al sitio de emplazamiento de la presa.</i>	18
<i>Figura 12. A) Brecha sedimentaria compuesta por clastos angulosos a subangulosos cementados con relleno carbonático. B) Venillas subverticales en niveles de brecha.</i>	19
<i>Figura 13. A) Nivel de brechas inferior con presencia de clastos de menor tamaño. B) Depósitos aluviales con matriz compuesta de cemento carbonático.</i>	20
<i>Figura 14. A y B Contacto erosivo entre conglomerados y arenas gruesas con laminación paralela.</i>	20
<i>Figura 15. A) Diaclasas rellenas con carbonato de calcio B) Niveles alterados y fracturados con abundantes diaclasas verticales cerradas.</i>	21
<i>Figura 16. Afloramientos situados al oeste del macizo de la margen derecha del río Neuquén.</i>	21
<i>Figura 17. Afloramientos del macizo del margen izquierdo del río Neuquén.</i>	22
<i>Figura 18. Afloramientos del macizo izquierdo del río Neuquén.</i>	22
<i>Tabla 6. Coordenadas de sitios de interés estudiados.</i>	23
<i>Figura 19. Puntos GPS sitios de interés.</i>	23
<i>Figura 20. A) Afloramientos de la Formación Tordillo. B) Falla normal observada.</i>	24
<i>Figura 21. A) estratos con buzamiento de alto ángulo. B) estratos plegados.</i>	25
<i>Figura 22. A) estratos de la formación tordillo con buzamientos de bajo ángulo. B) Contacto erosivo entre depósitos aluviales y niveles pelíticos de la Formación Tordillo.</i>	25
<i>Tabla 7. Parámetros de los taludes rocos estudiados.</i>	26
<i>Figura 23. Taludes analizados.</i>	26
<i>Figura 24. Diagrama de rotura planar del talud 1.</i>	27
<i>Figura 25. Diagrama de rotura en cuña del talud 1.</i>	28
<i>Figura 26. Diagrama de rotura por vuelco del talud 1.</i>	28
<i>Figura 27. Diagrama de rotura planar del talud 2.</i>	29
<i>Figura 28. Diagrama de rotura en cuña del talud 2.</i>	29
<i>Figura 29. Diagrama de rotura por vuelco para el talud 2.</i>	30
<i>Figura 30. Diagrama de rotura planar para el talud 3.</i>	31
<i>Figura 31. Diagrama de rotura en cuña para el talud 3.</i>	31
<i>Figura 32. Diagrama de rotura por vuelco del talud 3.</i>	32
<i>Figura 33. Diagrama de rotura planar para el talud 4.</i>	32
<i>Figura 34. Diagrama de rotura por cuña para el talud 4.</i>	33

Figura 35. Diagrama de rotura por vuelco del talud 4.	33
Figura 36. Ubicación de los sondeos realizados por el grupo consultor.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 37. Perfil litológico del Sondeo SD-01.	34
Figura 38. Perfil litológico del Sondeo SD-02.	35
Figura 39. Perfil litológico del Sondeo SD-03.	36
Figura 40. Perfil litológico del Sondeo SD-04.	37
Figura 41. Perfil litológico del sondeo SD-05.	38
Figura 42. Perfil esquemático del sondeo SD-06.	39
Figura 43. Perfil esquemático del sondeo SD-07.	40
Figura 44. Ubicación de los perfiles sísmicos y ensayos MASW.	41
Figura 45. Línea Sísmica 1.	42
Figura 46. Línea sísmica 2.	42
Figura 47. Línea sísmica 3.	43
Figura 48. Perfil sísmico 4.	43
Figura 49. Perfil sísmico 5.	44
Figura 50. Perfil sísmico 6.	44
Figura 51. Ensayo y resultados M1.	45
Figura 52. Ensayos y resultados M2.	45
Figura 53. Ensayos y resultados M3.	46
Figura 54. Líneas sísmica 1A.	47
Figura 55. Línea sísmica 2A.	47
Figura 56. Línea Sísmica 3A.	48
Figura 57. Empalme entre los perfiles sísmicos 4A y 5A.	48
Figura 58. Ensayo y resultados M1-A.	49
Figura 59. Ensayo y resultados M2-A.	50
Figura 60. Ensayo y resultados M3-A.	50
Figura 61. Ensayos y resultados M4-A.	50
Figura 62. Mapa geomorfológico del área de estudio.	52
Figura 63. Mapa geotécnico de problemas geológicos y geotécnicos a nivel regional.	53
Figura 64. Unidades geotécnicas y pendientes correspondientes al sitio de emplazamiento de la presa.	56

INTRODUCCIÓN

El Aprovechamiento Multipropósito La Invernada es un proyecto de gran envergadura que tiene como principal objetivo el almacenamiento y abastecimiento de agua así como la generación de energía eléctrica y gestión de caudales. Dicho proyecto tendrá múltiples beneficios asociados, entre ellos, el desarrollo de nuevas zonas turísticas asociadas a la creación del embalse, permitiendo fomentar el perfil turístico del norte neuquino. Por otra parte, la mano de obra utilizada para la ejecución de la presa y la mayor afluencia de turistas una vez culminado el proyecto, permitirá el desarrollo de nuevos canales comerciales para los habitantes de las zonas aledañas. Dicho proyecto generará un incremento de las superficies productivas agrarias y nuevas alternativas de producción aguas abajo asociadas a nuevas áreas potenciales de riego que abarcan 720 hectáreas, las cuales fueron determinadas mediante estudios ambientales. Por último, a través del coronamiento de la presa se podrá generar una vinculación de red vial entre la Ruta Provincial N°6 y la Ruta Nacional N°43.

Como fue mencionado anteriormente, la construcción de una presa está asociada a diversos beneficios, sin embargo, el fallamiento de las mismas trae aparejado una gran variedad de riesgos de diversa magnitud y escala. El concepto de “falla” hace alusión a un movimiento, fractura o mal funcionamiento de alguna parte de la presa, de manera que ésta ya no cumple con su objetivo principal de diseño, la retención del embalse (Hernández., *et al.* 2009).

Diversos autores, entre ellos Armas (2002) y Murillo (2012), han establecido el orden de ocurrencia de los distintos tipos de fallas en presas de tierra. En primer lugar se encuentra el rebase de la cortina o desbordamiento, el mismo se produce cuando el nivel del agua del embalse supera el nivel de corona del terraplén, provocando un inmediato fallo de la estructura. Existen diversos motivos por los cuales se puede producir este fenómeno tales como una mala estimación de la avenida de diseño máxima o un excesivo asentamiento del cimiento y el terraplén. Siguiendo el orden de ocurrencia, el sifonamiento o tubificación es el segundo tipo de falla más producido. Este proceso se origina por la filtración de agua que ejerce una fuerza de arrastre sobre las partículas y tiene como resultado la generación de huecos tubulares y cavernas que pueden conducir a la ruptura de la obra. Existen diversas medidas que permiten evitar este fenómeno, en primer lugar, disminuir el gradiente hidráulico especialmente a la salida de la presa, otra de ellas es la utilización de suelos plásticos aguas arriba para concentrar los gradientes en dicho sector. Las fallas por agrietamiento son el tercer tipo de falla más producido en este tipo de presas, las mismas se originan cuando la deformación de la cortina produce zonas de tracción, cuyo origen es atribuido al asentamiento diferencial del suelo ya sea por deformación del propio cuerpo del terraplén o del terreno de cimentación. Este fenómeno produce sistemas de agrietamiento paralelos o transversales al eje de la cortina siendo estos últimos los más peligrosos ya que estos crean grandes zonas de concentración de flujo. Otro tipo de fallamiento es aquel producido por el deslizamiento en la presa o en los taludes del embalse pudiendo, ante una rotura súbita, producir olas que sobrepasen el coronamiento pudiendo generar erosión y rotura de la misma. De acuerdo con el orden de ocurrencia, tiene lugar el fallamiento asociado a sismos. Para ello, las presas son verificadas bajo dos escenarios, el sismo de operación normal, donde se espera que la presa sea capaz de resistir la acción sísmica con daños menores sin interrumpir su funcionamiento y el sismo de seguridad, que tiene como objetivo principal que la estructura no colapse ni se produzca una fuga de agua incontrolada, pero si admite que se produzcan daños de gran envergadura hasta incluso que la presa quede fuera de servicio. Por último el fallamiento por licuación y por filtraciones son los fenómenos que ocurren con menor frecuencia dentro de las fallas producidas en presas de materiales sueltos. El primero de ellos se produce durante la ocurrencia de un sismo en suelos licuables tales como arenas no consolidadas, saturadas. Por otra parte, las filtraciones pueden producirse a través de la cimentación o la cortina, y las mismas pueden estar asociadas a

ineficientes estudios geológicos del vaso o presencia de zonas de alta permeabilidad tales como niveles kársticos o presencia de cavernas.

En base a los principales riesgos asociados a este tipo de presas y partir de un análisis geológico, geomorfológico y geotécnico, el presente Trabajo Final de Licenciatura contribuirá a la identificación de los problemas geológicos y geotécnicos del sitio de emplazamiento de la presa que puedan inducir al fallamiento de la misma. La identificación de los mismos servirá de base para la realización de futuras obras y estudios en las diversas etapas del proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

- Identificar problemas geológicos y geotécnicos del proyecto de Aprovechamiento Multipropósito La Invernada, Chos Malal, Provincia de Neuquén.

1.2 Objetivos Específicos

- Confeccionar una base de datos mediante la correlación de información de base en subsuelo con el relevamiento en afloramiento.
- Confeccionar mapas sobre unidades geológicas aflorantes en la zona (1:8000 y 1:20000).
- Confeccionar un mapa geomorfológico que contenga los principales elementos geomórficos del área (1:90.000).
- Confeccionar un mapa geotécnico (1:9.500) que permita clasificar los problemas geotécnicos en el área de estudio.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio donde se planea construir el Aprovechamiento Multipropósito La Invernada se localiza en la Provincia del Neuquén, República Argentina a 36 km de la ciudad de Chos Malal sobre el Río Neuquén, en cercanías a la Ruta Provincial N°6 en las coordenadas (S 37°21'44,71"; O 70°28'9,06") (Figura 1).

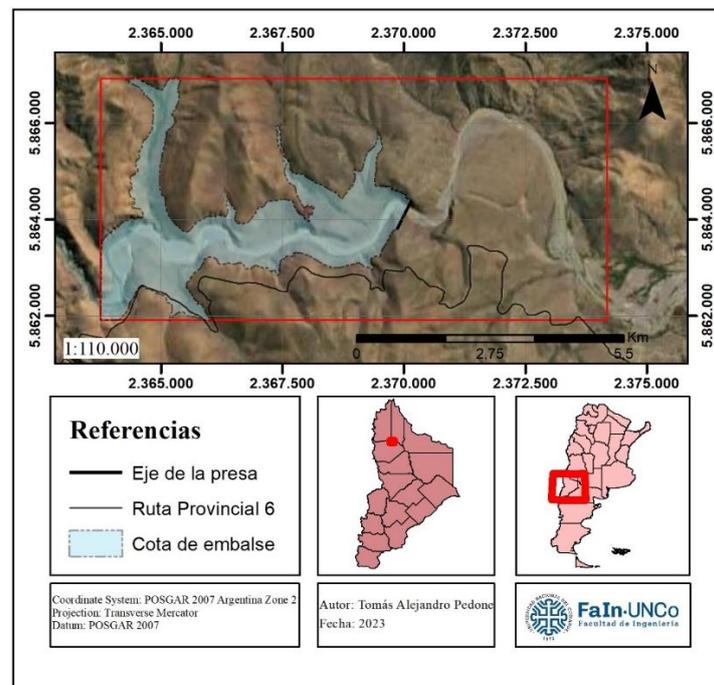


Figura 1. Área de estudio y localización del sitio de interés que se encuentra asociado a posibles problemas geológicos y geotécnicos.

2.1 Geología

La zona de estudio se localiza en la zona interna de la faja corrida y plegada de Chos Malal, un cinturón de deformación de piel gruesa, desarrollado al noroeste de la Provincia del Neuquén por acción de la orogenia Andina, siendo parte de la Cordillera Principal (Sánchez *et al.*, 2014). La región se caracteriza por presentar una gran complejidad estructural debido a diversos eventos de deformación asociados a la presencia de abundantes corrimientos, retrocorrimientos, pliegues de diversa magnitud y fallas. Es debido a esta gran complejidad estructural, que existen discrepancias en cuanto a la región morfoestructural a la cual corresponde el área bajo estudio; ya que si bien forma parte de la faja andina de la Provincia del Neuquén, la misma se encuentra en el límite entre dos regiones morfoestructurales de gran envergadura (Figura 2). Por lo cual, algunos autores tales como Llambias y Aragón (2011), Garrido *et al* (2014), Lebinson *et al* (2017), Lebinson (2019) ubican a la región como parte de la faja corrida y plegada del Agrio.

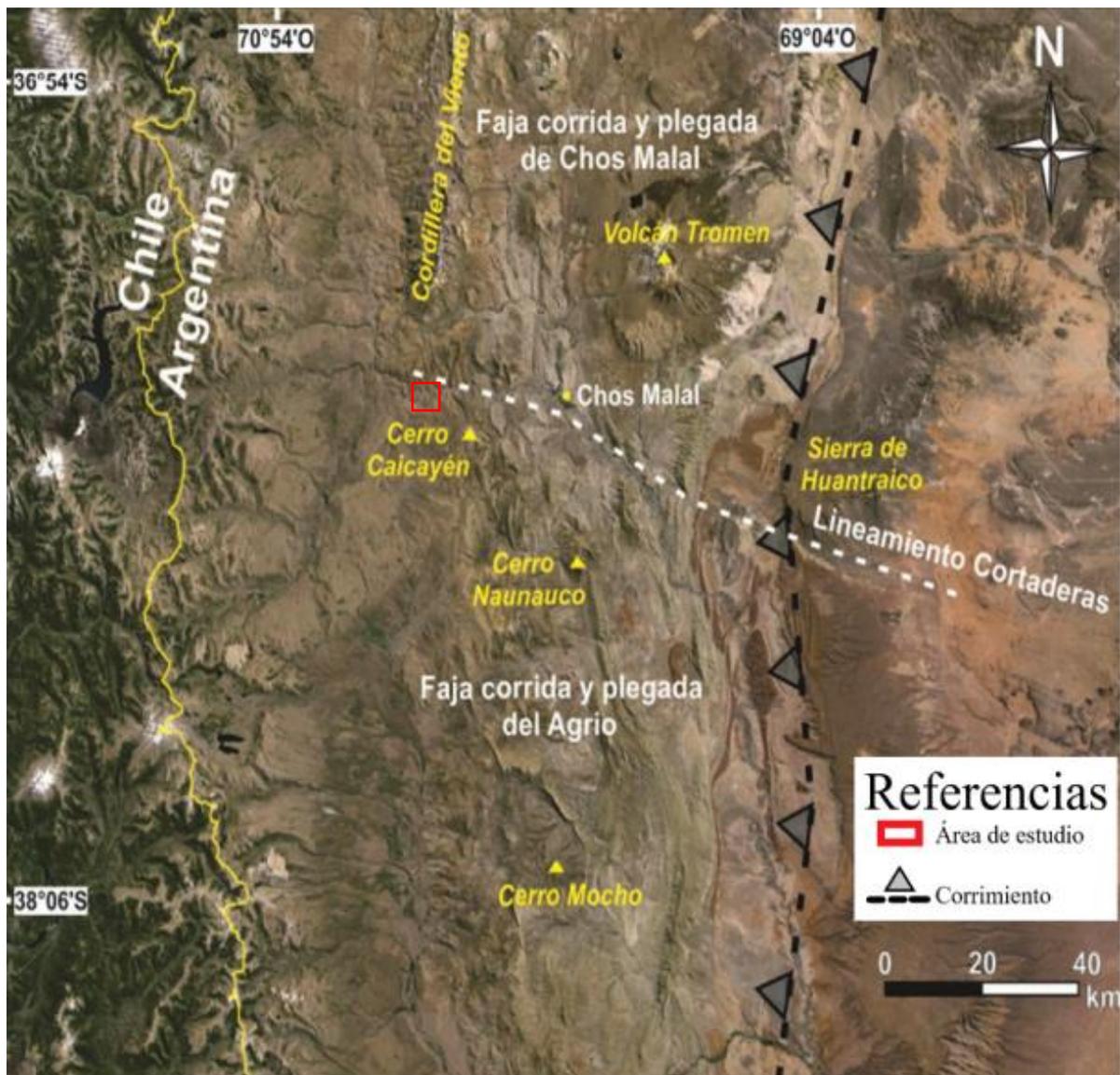


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y límite entre las fajas corridas y plegadas de Chos Malal y Agrio. (Modificado de Lebinson 2019).

En términos regionales las unidades más antiguas que afloran en la región constituyen el Ciclo Precuyano, las mismas corresponden a grandes depocentros asociados a un ambiente de *rift*, vinculados con la fragmentación de Gondwana durante el Triásico Tardío y el Jurásico

Temprano (Sánchez *et al.*, 2014). Estos depocentros se encuentran rellenos por acumulaciones de sedimentitas continentales y marinas, asociadas con materiales volcánicos y volcanoclásticos de composición inicialmente mesosilícica y ácida, a las que se asociaron posteriormente eyectos básicos (Leanza *et al.*, 2005). Desde el inicio del Jurásico al Cretácico Inferior, asociado a un régimen de subducción en el margen occidental de la placa sudamericana, se produjo la subsidencia térmica regional y la región evolucionó a una cuenca de retroarco, donde se depositaron los grupos Cuyo, Lotena, Mendoza y Rayoso, que dieron lugar a una secuencia sedimentaria de más de 4500 metros de sedimentos marinos y continentales, los cuales estuvieron asociados a diversos periodos de conexión y desconexión con el Océano Pacífico. Durante el Cretácico Superior, vinculado al inicio de la fase de antepaís originada por una tectónica compresional sobre el margen andino (Garrido, 2011), se depositó el Grupo Neuquén, una sucesión de depósitos continentales compuestos por areniscas, conglomerados y fangolitas. En la región, a fines del Cretácico Superior y comienzos del Cenozoico, se depositaron los sedimentos marinos del Grupo Malargüe asociados a una transgresión marina proveniente del océano Atlántico, y cuerpos intrusivos eocenos, además de un importante volcanismo basáltico Plio-cuaternario asociado a las extrusiones del volcán Tromen (Sánchez *et al.* 2014) (Figura 3).

El área de estudio se caracteriza por la presencia de afloramientos jurásicos y cretácicos de las formaciones Tordillo, Vaca Muerta, Mulichinco y Agrio pertenecientes al Grupo Mendoza, y cuerpos volcánicos y subvolcánicos de la Formación Colipilli pertenecientes al Grupo Nanauco desarrollados durante el Cretácico Tardío-Paleógeno. La Formación Tordillo de edad kimmeridgiana se depositó durante un periodo extensional y corresponde a un episodio de continentalización de la cuenca, la misma consiste principalmente en depósitos fluviales, eólicos y de *playa-lake* (Mescua *et al.* 2008). Dicha unidad está compuesta por areniscas rojizas medianas a gruesas con estructuras entrecruzadas, conglomerados con clastos de rocas volcánicas y arcilitas rojizas de origen continental (Spalletti *et al.* 2011). En concordancia se encuentra depositada la Formación Vaca Muerta cuya sedimentación se inició durante el Tithoniano inferior, la misma corresponde a facies de talud asociadas a un sistema carbonático (Kietzmann y Vennari., 2013). Dicha unidad está compuesta por pelitas negras intercaladas con niveles de calizas con abundante materia orgánica. Transicionalmente se encuentra la Formación Mulichinco de edad valanginiana compuesta por depósitos silicoclásticos de origen deltaico y areniscas, fangolitas y calizas de ambiente marino somero. (Schwarz *et al.* 2011). La Formación Agrio se encuentra representada por afloramientos pertenecientes al Miembro Pilmatué que abarca el lapso Valanginiano tardío a Hauteriviano Tardío, los mismos están asociados a depositos marinos de plataforma compuestos por lutitas, fangolitas con finas intercalaciones de calizas con abundante contenido de fósiles marinos entre ellos bivalvos y cefalópodos (Spalletti *et al.* 2011). Las facies intrusivas de la Formación Colipilli compuestas por *sills* y lacolitos fueron emplazadas en las sedimentitas de la Cuenca Neuquina (Llambias y Aragón 2011). En las sedimentitas del Jurásico-Cretácico de la cuenca, en particular aquellas con alguna relación con las secuencias carbonático-evaporíticas, se han reconocido numerosas mineralizaciones en forma de vetas o brechas hidráulicas originadas por fluidos hidrotermales asociados a cuerpos subvolcánicos, que conforman el cinturón andesítico Nanauco aflorantes en la faja corrida y plegada del agrio. Gran parte de las mineralizaciones se encuentran situadas en las areniscas correspondientes a la Formación Tordillo, una unidad hidráulicamente permeable confinada en su parte superior e inferior por litologías hidráulicamente impermeables correspondientes a las formaciones Auquilco y Vaca Muerta. (Giacosa, 2020).

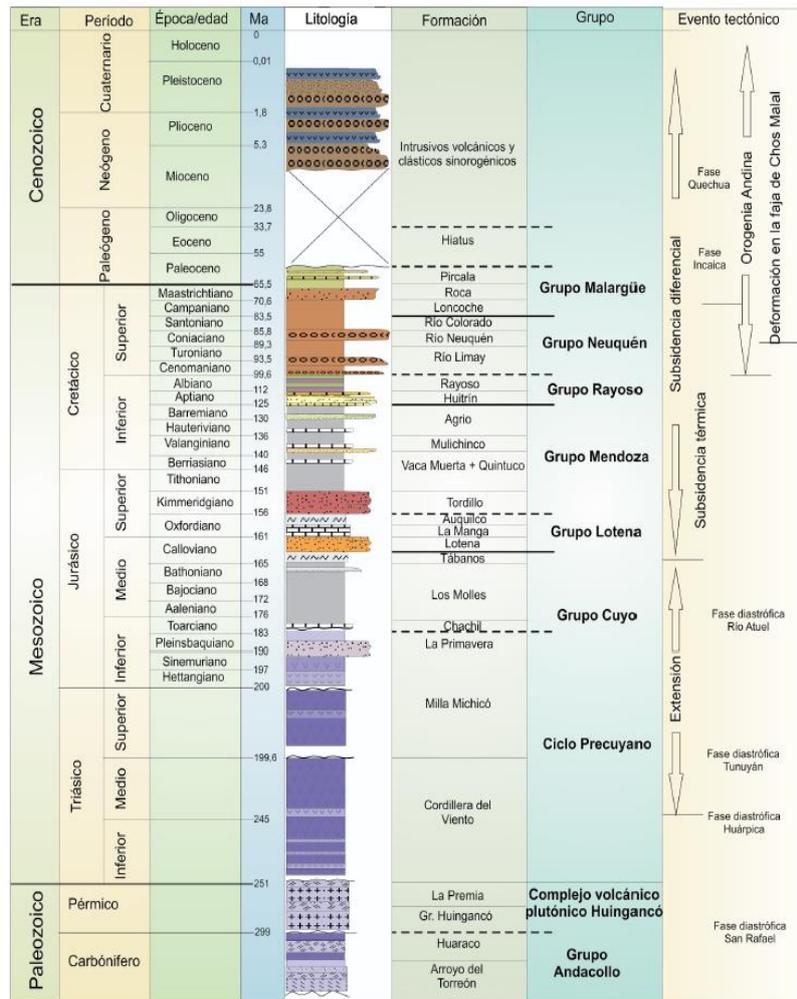


Figura 3. Cuadro estratigráfico de las unidades aflorantes y los principales eventos tectónicos que afectaron la región (Sánchez *et al.*, 2014).

3. ANTECEDENTES

A pesar de que la seguridad de las presas es muy alta, la misma es un factor muy importante y frecuentemente debatido. Sin embargo, la mayoría de los fallos han tenido su causa en problemas geológicos del terreno y en la estructura de las presas (González de Vallejo *et al.*, 2005). A nivel internacional los mayores accidentes han sido producto del fallo de las cimentaciones. En la presa Malpasset (Francia) en 1959, una vez que se realizó el llenado del embalse se produjo la rotura de un gran bloque cuyo origen fue atribuido a la presencia de una falla transversal que no fue identificada debido a la escasez de estudios geológicos, lo cual resultó en el vaciado inmediato del embalse. En la presa de Vajont (Italia) 1963, se produjo un deslizamiento de unos 300 millones de metros cúbicos en la ladera izquierda del embalse, lo cual generó una gran ola que sobrepasó el coronamiento de la presa sin destruirla y provocó una gran inundación en el valle del Río Piave, en dicha ladera los estudios de estabilidad realizados no previeron la magnitud de los posibles deslizamientos. En la presa Teton (Estados Unidos) 1975 se produjo el colapso de la estructura debido a la erosión interna producida por un flujo de agua que percoló a través de la cimentación.

Dentro de la Provincia del Neuquén se han identificado diversos problemas geológicos-geotécnicos en los sitios de emplazamiento de algunas presas. Durante la construcción del Embalse Alicura (1982) se identificó un rasgo geológico desfavorable, es decir la presencia de una gran falla subvertical situada sobre la margen izquierda. Lo cual tuvo como resultado el

rediseño de la obra. En la represa El Chocón (1983) diez años después del llenado de la misma se identificó un incremento en los niveles piezométricos aguas abajo, debido a la presencia de filtraciones producidas a través de discontinuidades horizontales y subverticales rellenas con sulfato de calcio que se solubilizaron debido a la alta capacidad de disolución de las aguas del Río Limay. En los estudios preliminares del Aprovechamiento Hidroeléctrico Piedra del Águila (1993) se identificó en una de las márgenes la presencia de un antiguo cauce del Río Limay compuesto por materiales aluvionales cubierto por una colada de basaltos.

La zona de estudio, cuenta con diversos trabajos realizados por la empresa Consulval S.R.L la cual realizó cuatro calicatas con el objetivo de realizar una evaluación geológica de los materiales sedimentarios. Por otra parte el grupo consultor conformado por Intertechne Consultans S.A, H.I.S.S.A Hidronor Ingeniería y Servicios S.A, Consultoría Oscar G. Grimaux y Asociados S.A.T y HCA Consultora S.R.L, realizó siete sondeos, once líneas sísmicas y cuatro ensayos MASW a través de los cuales determinaron propiedades geotécnicas y características del suelo y rocas.

4. MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO

Según González de Vallejo *et al.* (2005), los suelos tienen su origen en los macizos rocosos, los cuales son sometidos a la acción ambiental disgregadora de la erosión. En términos de ingeniería geotécnica el suelo es un agregado de minerales unidos por fuerzas débiles de contacto, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua.

A diferencia de los suelos, las rocas son agregados naturales duros y compactos de partículas minerales, que presentan fuertes uniones cohesivas permanentes. Los diversos procesos geológicos y ambientales dan lugar al fracturamiento, alteración y meteorización de las rocas. Las masas rocosas generalmente presentan una serie de planos de discontinuidad o debilidad que separan en bloques de matriz rocosa, dando lugar a los macizos rocosos. La estructura en bloques y la presencia de discontinuidades o las superficies de estratificación confieren una naturaleza discontinua y un comportamiento anisótropo para los macizos. Otra propiedad características de los macizos es la heterogeneidad, es decir, la variabilidad de propiedades tanto físicas como mecánicas en distintas zonas del macizo. El tipo de roca y su grado de alteración determinan las propiedades resistentes de la matriz rocosa, mientras que la estructura geológica del macizo define las zonas y planos de debilidad susceptibles a la meteorización y al flujos de agua. Debido a que la resistencia a la tracción de los planos discontinuidad es muy baja, su comportamiento mecánico dependerá de su resistencia al corte o por el material de relleno presente. Además, de las propiedades intrínsecas de los macizos rocosos, determinadas por su matriz y discontinuidades, existen diversos factores que influyen en el comportamiento mecánico de los macizos tales como; estructuras tectónicas y sedimentarias, tensiones naturales y condiciones hidrogeológicas.

De acuerdo a las propiedades de los suelos y las rocas, los mismos presentan distintos problemas geológicos y geotécnicos al emplazarse obras de ingeniería sobre los mismos, por lo que se procedió a aplicar la metodología expuesta en este apartado para la identificación y análisis de dichos problemas.

4.1 Trabajo de gabinete previo a los trabajos de campo

Esta primera etapa consistió en la recopilación, revisión e investigación bibliográfica de los antecedentes del área de estudio y en sectores aledaños, además de trabajos que involucren problemas geológicos-geotécnicos en aprovechamientos y presas de la Provincia del Neuquén. Durante esta primera instancia se utilizó la información correspondiente a siete sondeos, once líneas sísmicas realizadas en la zona de estudio, con el fin analizar e interpretar los aspectos geológicos, geotécnicos y geofísicos del sitio de estudio. Dicha información fue brindada por

la empresa Consulval SRL y el Grupo Consultor conformado por Intertechne Consultans S.A, H.I.S.S.A Hidronor Ingeniería y Servicios S.A, Consultoría Oscar G. Grimaux y Asociados.

Para poder cumplir con los objetivos establecidos, se propuso la siguiente metodología basada en 5 aspectos fundamentales para la identificación de los problemas geológicos y geotécnicos del área de estudio.

- Geología regional.
- Estabilidad de taludes en macizos rocosos.
- Análisis de sondeos.
- Análisis de perfiles sísmicos.
- Análisis geomorfológico regional.
- Determinación de problemas geológicos- geotécnicos.

4.1.1 Geología regional

Con el fin de realizar un análisis geológico regional del área de estudio, se utilizó la Hoja Geológica 32b Chos Malal elaborada por Zollner y Armos (1973), un informe de avance elaborado por Garrido *et al* (2014) y la herramientas Google Earth Pro (2022) y SAS.Planet (2022), mediante las cuales se pudieron identificar las principales unidades aflorantes, sus contactos, diversos rasgos estructurales y sitios de interés, a partir de los cuales se elaboró un mapa geológico de base mediante el uso del software ArcGis.

4.1.2 Estabilidad de taludes en macizos rocosos

Para la margen derecha del río Neuquén se realizó la investigación de estabilidad de taludes rocosos naturales mediante el uso de la herramienta Google Earth Pro (2022) y la Hoja Geológica 32b Chos Malal elaborada por Zollner & Armos (1973). Dicha investigación se basó en la identificación y evaluación de diversos aspectos tales como:

- Relieve y pendientes.
- Litología, tipo y alteración.
- Estructuras, discontinuidades y planos de debilidad.
- Suelos, tipo y espesor.
- Tipos y características de la vegetación.
- Procesos actuantes (erosivos, sísmicos, tectónicos, etc.)
- Reconocimiento de movimientos de ladera.

La morfología de las laderas es definida por procesos geológicos y climáticos que afectan la superficie terrestre. Las laderas adoptan pendientes naturales cercanas al equilibrio, ante un cambio de las condiciones su morfología se modifica buscando de nuevo el equilibrio.

Los deslizamientos en laderas naturales se originan debido al desequilibrio entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, de tal forma que las fuerzas desestabilizadoras superan a las fuerzas estabilizadoras o resistentes (González de Vallejo *et al.*, 2005). En base a la incidencia en el comportamiento geomecánico tanto de los suelos y rocas, los factores que producen movimientos de laderas pueden ser agrupados en aquellos que reducen la resistencia al corte y aquellos que producen un incremento en los esfuerzos de corte (Figura 4). Según González de Vallejo *et al.* (2005), los factores que controlan los movimientos de laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, y los mismos se clasifican en factores condicionantes y desencadenantes.

Los factores condicionantes o pasivos son aquellos que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno. Dentro de los mismos es posible destacar al relieve ya que es necesario un

cierto grado de pendiente para que se puedan producir movimientos. En segundo lugar, la estructura geológica, estratigrafía y litología determinan la potencialidad de los movimientos, y por otra parte, diversos aspectos tales como la composición, resistencia, deformabilidad, alteración y fracturación, determinan la posibilidad del terreno a sufrir roturas y deslizamientos. La presencia de agua juega un papel fundamental en la resistencia de los materiales ya que reduce la resistencia al corte debido a la generación de presiones intersticiales y a la reducción de parámetros resistentes. A su vez el agua aumenta los esfuerzos de corte debido al incremento de peso en el terreno y por la generación de fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades. Por último, las propiedades resistentes y geomecánicas controlan la resistencia al corte de los materiales y su rotura.

Por otro lado, factores desencadenantes o activos son aquellos que provocan inestabilidades y por lo general son los responsables de la magnitud y velocidad de los movimientos. Dentro de los más importantes se destacan las precipitaciones, los cambios en las condiciones hidrogeológicas, la modificación de la geometría, la erosión y los terremotos.

Reducción de la resistencia al corte	Aumento de los esfuerzos de corte
<p>Condiciones iniciales:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Composición, textura y estructura. — Fracturas y fallas. — Planos de estratificación y de foliación. — Zonas de brechas. — Rocas masivas sobre materiales plásticos. — Alternancia de materiales con diferente permeabilidad. <p>Cambios en los materiales por meteorización y reacciones físico-químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Desintegración física de rocas. — Hidratación de minerales arcillosos. — Deseccación de arcillas y de rocas arcillosas. — Disolución y lavado de materiales. — Plastificación de arcillas. <p>Cambios en las fuerzas intergranulares debidas al agua y presiones de agua en poros y fracturas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Precipitaciones. — Deshielo. — Lagos y embalses. — Riego. — Deforestación. <p>Cambios en la estructura:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Por fisuración en pizarras y arcillas sobreconsolidadas. — Por relajación de tensiones en laderas rocosas en valles o excavaciones. — Por remodelo de suelos finos (arenas, loess) y arcillas sensitivas. <p>Debilitamiento de la resistencia debida a procesos de <i>creep</i></p> <p>Acción de las raíces de los árboles y arbustos.</p> <p>Excavación de madrigueras de animales.</p>	<p>Actuación de esfuerzos transitorios:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Movimientos sísmicos. — Vibraciones por voladuras, maquinaria y tráfico. — Deslizamientos cercanos. <p>Pérdida de confinamiento lateral y en la base de las laderas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Erosión del pie de las laderas por ríos, arroyos, olas, mareas, etc. — Lluvias. — Erosión interna o subterránea. — Disolución y lavado del material. — Labores mineras. — Presencia de materiales plásticos infrayacentes. <p>Cambios en la morfología:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Deslizamientos. — Grandes fallas. <p>Sobrecargas naturales:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Peso de la lluvia, nieve y agua de acuíferos. — Acumulación de derrubios, coluviones o masas deslizadas. — Vegetación. <p>Sobrecargas antrópicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Rellenos, escombreras y acopio de materiales. — Edificios y otras estructuras. — Cultivos y riego de laderas. <p>Otras acciones antrópicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Excavaciones. — Retirada de elementos de contención. — Construcción de embases y lagos. <p>Presión lateral:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Agua en grietas y cavidades. — Hielo en grietas. — Presencia de materiales expansivos. — Movilización de esfuerzos residuales. <p>Procesos volcánicos.</p>

Figura 4. Factores influyentes en el comportamiento de laderas. (González de Vallejo *et al.*, 2005).

Los tipos de movimientos de ladera (Figura 5) suelen referirse al material involucrado, al mecanismo y tipo de rotura producido, además, considera otros aspectos fundamentales como la presencia de agua y la velocidad y magnitud del movimiento. Es por ello que el reconocimiento de estos movimientos en campo, permite reconocer aquellas zonas inestables donde deberán identificarse y evaluarse los aspectos mencionados con anterioridad para llevar a cabo la investigación.

Mediante el uso de sistemas de representación estereográfica y la herramienta Dips 5.0, se evaluó la condición de estabilidad y los posibles mecanismos de rotura de diversos taludes rocosos naturales. Los mecanismos de rotura son condicionados por el grado de fracturación y por la orientación y distribución de las discontinuidades. Según Ramírez Oyanguren *et al.*

(2004), los tipos de rotura más frecuentes en macizos rocosos son tres: rotura planar, rotura en cuña y rotura por vuelco (Figura 6).

La rotura plana es producida a través de discontinuidades buzantes a favor del talud y para que se produzca se deben cumplir tres condiciones fundamentales. La primera condición es que el buzamiento del plano del talud sea mayor que el buzamiento de la discontinuidad. En segundo lugar, el rumbo del plano de discontinuidad debe ser paralelo o casi paralelo al rumbo del plano del talud, con una desviación máxima de 20°. Por último, el buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que el ángulo de rozamiento interno. La rotura en cuña es un tipo de deslizamiento traslacional controlado por dos o más discontinuidades que forman un bloque en forma de cuña. Para que se produzca este mecanismo de rotura, es necesario que la línea de intersección de dos planos de discontinuidad aflore en la superficie del talud, por lo que su rumbo deberá ser similar a la dirección de buzamiento del talud. Además, el buzamiento de la línea de intersección deberá ser menor que el ángulo de inclinación del talud. Por último el buzamiento de la línea de intersección deberá ser mayor que el ángulo de rozamiento interno. La rotura por vuelco es un mecanismo producido a través de discontinuidades que presentan buzamientos contrarios a la inclinación del talud e implica un movimiento de rotación de los bloques hacia el exterior del talud. Para que se produzca este mecanismo, es necesario que la dirección de buzamiento de los planos de discontinuidad sea ortogonal a la dirección de buzamiento del talud y que la inmersión del polo de las discontinuidades sea menor que el resultado de restar el buzamiento del talud y el ángulo de rozamiento.

Los valores del ángulo de fricción interna de las rocas fueron obtenidos a partir de bibliografía debido a que no se contaba con información de laboratorio. Según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Casagrande 1948) las areniscas presentan coeficiente de fricción de 30°

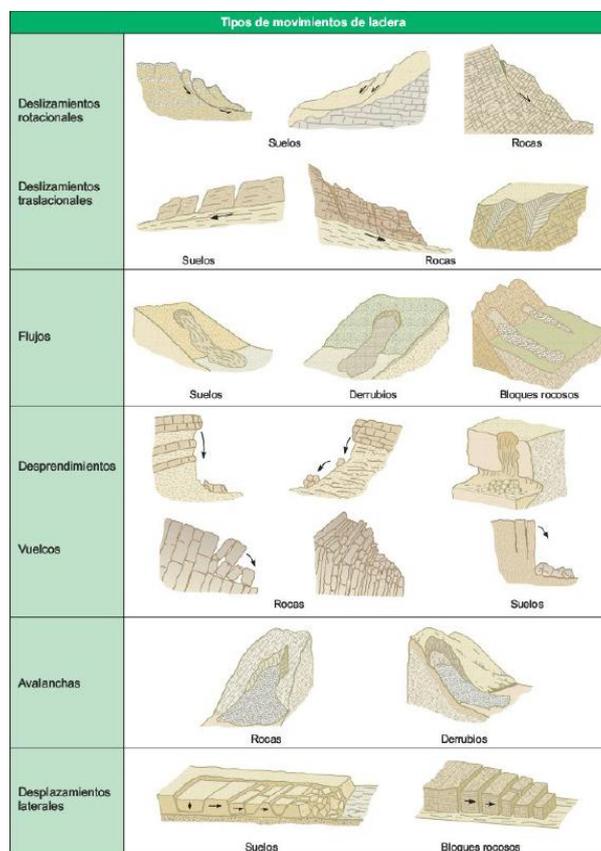


Figura 5. Tipos de movimientos de ladera (González de Vallejo *et al.*, 2005).

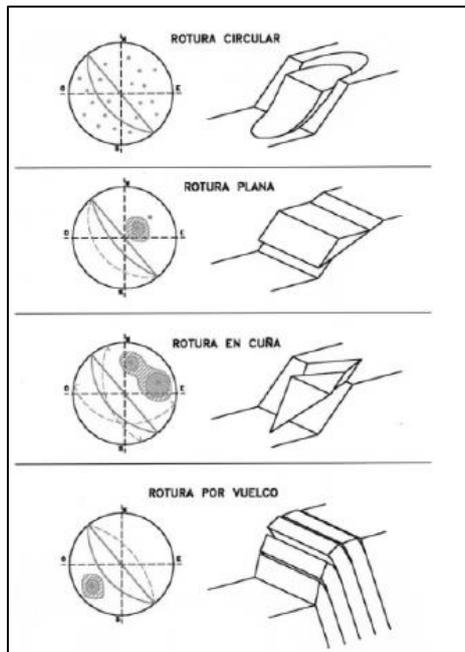


Figura 6. Mecanismos de rotura (Ramírez Oyanguren *et al.*, 2004).

4.1.3 Análisis de sondeos

Con el objetivo de identificar posibles problemas geológicos y geotécnicos se procedió a la interpretación y análisis de sondeos. Para este trabajo se contó con un total de siete sondeos realizados en el año 2017 por el grupo consultor (Figura 7), cada uno de ellos fue interpretado con el fin de determinar cuál o cuáles de ellos contaba con información relevante al estudio.

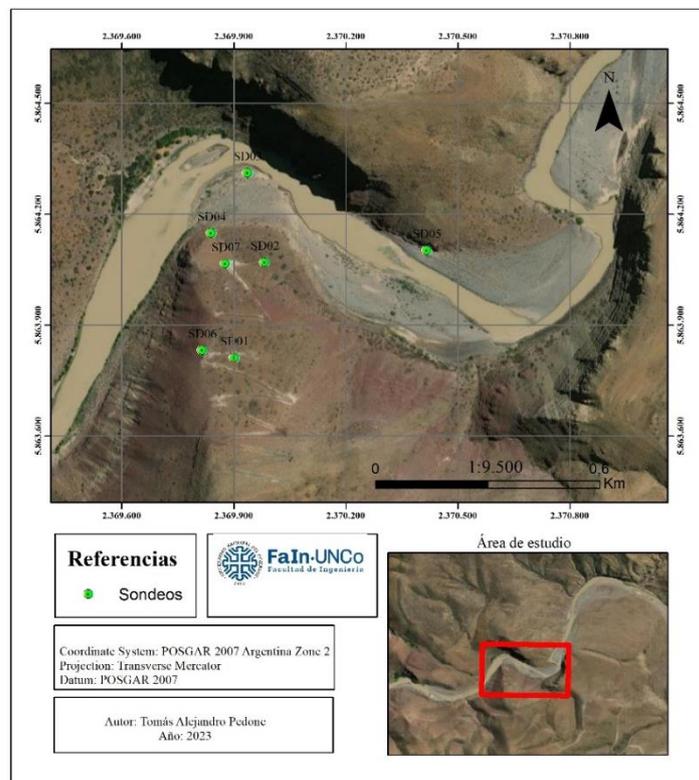


Figura 7. Ubicación de sondeos brindados por el grupo consultor.

4.1.4 Análisis de perfiles sísmicos

Continuando con la metodología propuesta, se procedió al análisis de líneas de refracción sísmica (Método de refracción sísmica) y ensayos de medición de la velocidad sísmica de la onda de corte (MASW) realizados en el año 2017 por el grupo consultor conformado por Intertechne Consultans S.A, H.I.S.S.A Hidronor Ingeniería y Servicios S.A, Consultoría Oscar G. Grimaux y Asociados, para así obtener las características del subsuelo y roca en diferentes zonas del proyecto.

Para el presente trabajo se contó con un total de once perfiles sísmicos realizados durante dos etapas, se procedió al análisis e interpretación de cada uno de ellos. Por otra parte se realizó el análisis de ocho ensayos M.A.S.W con el fin de determinar el potencial de licuefacción de los materiales que componen el área bajo estudio. Mediante los valores de la onda de compresión sísmica V_p es posible discretizar entre suelo o roca. Aquellos estratos formados por suelo, derrubios, depósitos aluviales- coluviales, roca descomprimida y muy alterada presentan velocidades bajas que oscilan entre 300 y 1200 m/s. Por otra parte las rocas en estado aceptable presentan velocidades superiores a 2000 m/s, mientras que aquellas rocas cuyos valores son superiores a 2500 m/s son consideradas de buen y muy buen estado. Cabe destacar que aquellos perfiles realizados en proximidades al río Neuquén, es decir zonas saturadas o con elevados porcentajes de humedad, se produce un aumento de la velocidad sísmica.

Método convencional de Refracción Sísmica

Este método geofísico consiste en medir los tiempos de propagación de una perturbación sísmica, desde el punto de generación hasta los sensores o geófonos dispuestos sobre el terreno. Mediante este método es posible obtener información tanto en profundidad como lateralmente. A partir de los registros se obtiene un perfil continuo de espesores, características y geometría de las distintas formaciones presentes. Además, es posible determinar características del terreno tales como el grado de compacidad y el grado de alteración; e individualizar entre suelo superficial, material aluvial, coluvial o roca en base a los valores de la onda sísmica de compresión V_p (Tabla 1).

Intervalo aproximado de la velocidad de la Onda Sísmica de compresión V_p	
Tipo de suelo o roca	Velocidad (m/seg)
Suelo	170-500
Arcilla	1000-2800
Arcilla arenosa	980-1100
Arcilla arenosa cementada	1160-1280
Limo	760
Arena seca	300
Arena húmeda	600-1280
Aluvión	550-2360
Arenisca	2400-3900
Caliza	3000-5700
Granito	4000-5600

Tabla 1. Tipos de roca o suelo en base a valores de la onda de compresión sísmica V_p .

Método Multi-Canal de Ondas Superficiales (MASW)

Es un método que consiste en aplicar una técnica similar a la utilizada en el método de refracción sísmica y mediante un *software* específico realizar el análisis espectral de ondas superficiales, para poder determinar la rigidez del subsuelo mediante la determinación de la velocidad de la onda de corte (V_s) con la profundidad. Este es un método que se basa en la estrecha relación que existe entre la velocidad de la onda de corte (V_s) y el riesgo de colapso por licuefacción. Para valores de ($V_s < 200$) está comprobado estadísticamente que se produce el fenómeno de licuefacción.

4.1.5 Análisis geomorfológico regional. Clasificaciones.

A partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), la herramienta Google Earth Pro (2022), el *software* ArcGis y mapas e informes brindados por el grupo consultor conformado por Intertechne Consultans S.A, H.I.S.S.A Hidronor Ingeniería y Servicios S.A, Consultoría Oscar G. Grimaux y Asociados, se realizó un análisis geomorfológico en el área de estudio a partir del cual se elaboró un mapa geomorfológico regional.

Clasificaciones

Conjuntos o dominios morfoestructurales: Es la forma y disposición que adopta el relieve. Son el resultado de los movimientos tectónicos del interior de la tierra y la acción posterior de la erosión y sedimentación. Según Pereyra *et al.* (2020) los dominios morfoestructurales son aquellos representados en la Tabla 2.

Llanuras	Piedemontes
Montañas y serranías	Áreas cratónicas
Costas	Planicies y mesetas

Tabla 2. Principales dominios morfoestructurales (Elaboración propia).

Según Pereyra *et al.* (2020) las unidades y geoformas identificadas serán clasificadas en base a los procesos a través de los cuales fueron generadas (Tabla 3).

Antrópico	Eólico
Estructural – Litológico	Fluvial
Glaciario	Glacifluvial
Kárstico	Lacustre
Litoral Marino – Mixto	Movimientos en masa
Poligénico	Volcánico

Tabla 3. Procesos geomorfológicos (Elaboración propia).

Pendiente media de la cuenca

Es un índice que representa un valor medio de las pendientes que conforman las distintas zonas topográficas de la cuenca (Tabla 5), a partir de este valor es posible dividir el área de estudio en zonas que reflejen las pendientes medias o predominantes y a las diferentes categorías de relieve.

Las clases de pendientes serán representadas por polígonos cuyos colores y símbolos se encuentran en la Tabla 4.

Símbolo	Clase	Color	R	G	B
MB	Muy baja		0	153	51
B	Baja		153	204	51
LS	Ligeramente suave		153	204	153
SM	Suave a Moderada		255	255	153
M	Moderada		255	204	0
MF	Moderadamente fuerte		255	153	51
F	Fuerte		255	0	0
MFu	Muy Fuerte		204	51	0

Tabla 4. Símbolos y colores para cada clase de pendiente. (Fernández et al. 2021).

Rango de Inclinación	Clase	Categoría	Condiciones Naturales para el desarrollo de Procesos
0 – 0,5°	Muy baja	Relieve plano-cóncavo	Anegamamiento e inundaciones.
>0,5° - 2°	Baja	Relieve plano	Terrenos afectados por inundaciones. Sin procesos erosivos importantes.
>2° - 4°	Ligeramente suave	Relieve ligeramente inclinado	Posible presencia de erosión de suelos (laminar y en surcos).
>4° - 8°	Suave a Moderada	Relieve inclinado	Procesos erosivos de mayor magnitud que la clase anterior.
>8° - 15°	Moderada	Relieve ligeramente empinado	Procesos erosivos y movimientos de ladera menores.
>15° - 30°	Moderadamente fuerte	Relieve empinado	Procesos de denudación y movimientos de ladera.
>30° - 55°	Fuerte	Relieve muy empinado	Procesos de denudación muy intensos.
>55°	Muy Fuerte	Relieve extremadamente empinado	Escarpes rocosos. Alta probabilidad de caída de rocas.

Tabla 5. Clases de pendientes (Fernández *et al.* 2021).

4.2 Trabajo de campo

Durante los días 24 y 25 de abril del 2023 se realizaron salidas de campo al área de estudio, durante las mismas se efectuó un relevamiento geológico, geomorfológico y geotécnico en sitios de interés definidos durante los trabajos de gabinete mediante la observación e interpretación de imágenes satelitales, hojas geológicas y modelos digitales de elevación (Figura 1) Mediante el uso de la brújula geológica Brunton se midió la actitud de las discontinuidades. El GPS fue utilizado para realizar ubicaciones espaciales, ambas herramientas fueron brindadas por la Comisión de Seguimiento Curricular de la Licenciatura en Ciencias Geológicas de la Universidad Nacional del Comahue. Por otra parte se realizó el registro fotográfico de diversos sitios de interés.

El 24 de abril se realizó un relevamiento geológico y geotécnico de los afloramientos correspondientes al macizo situado en el margen derecho del río Neuquén, sitio correspondiente emplazamiento del eje de la presa. El 25 de abril se recorrieron 9 km a través de la ruta Provincial 6, a través de la margen derecha del vaso de la presa. En ambos días, se efectuó la observación y medición de diversos parámetros, tales como rumbo, buzamiento y tipo de roca así como también el reconocimiento y registro fotográfico de diversos sitios de interés geológico-geotécnico que no se encontraban cartografiados o estudiados.

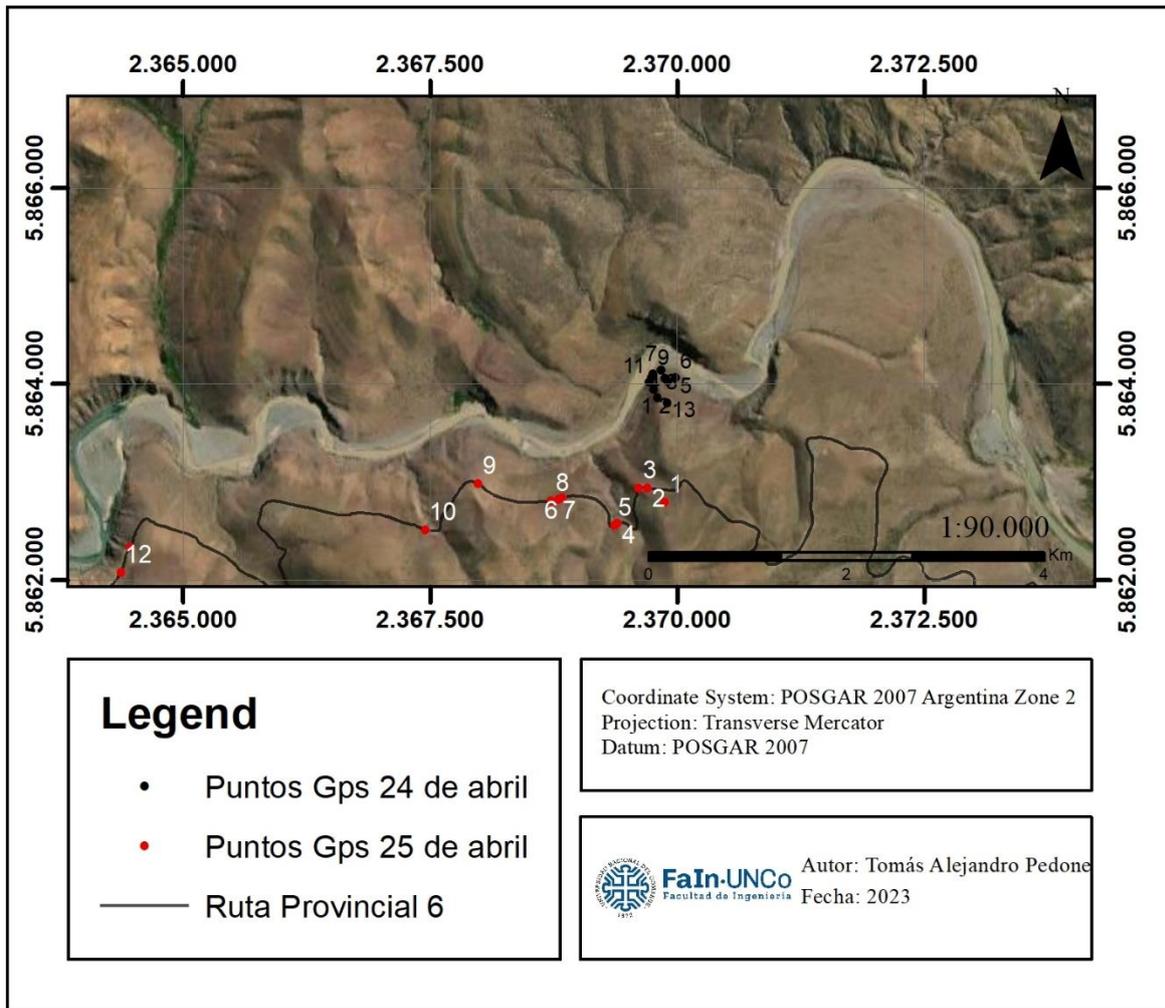


Figura 8. Puntos GPS de los sitios de interés analizados durante los trabajos de campo.

4.3 Trabajo de gabinete posterior a los trabajos de campo

En una primera instancia se realizó el análisis e interpretación de la información recopilada durante las salidas de campo, a partir de la misma, se generó una base de datos (Tabla X y X) y además se pudo realizar la corrección y el control de los mapas geológicos y geomorfológicos de base realizados durante los trabajos de gabinete.

A través de la información obtenida durante el relevamiento de campo y aquella información analizada e interpretada a partir de sondeos, perfiles sísmicos y los mapas geológicos y geomorfológicos realizados, se procedió a la determinación de los problemas geológicos y geotécnicos del área de estudio, además, se realizaron dos mapas geotécnicos a través del Software ArcGis, con el objetivo de representar cartográficamente dichos problemas que caracterizan el área de estudio a nivel regional y local. Para la realización de dichos mapas se caracterizó a los diversos afloramientos, agrupándolos según sus características litológicas o según la susceptibilidad frente a los procesos de inestabilidad asociados a las propiedades intrínsecas del terreno, teniendo en cuenta el efecto del agua, la cual además de producir cambios en el relieve y movimientos de terreno, genera cambios en las propiedades mecánicas de los materiales.

Finalmente se analizaron los resultados obtenidos y se procedió a la redacción del Trabajo Final de Licenciatura.

5. RESULTADOS

En la Tablas X y X se encuentran representados los diversos parámetros y características medidas y observada en cada uno de los puntos GPS realizados durante las salidas de campo.

Puntos Gps 24 de abril					
Punto	Coordenadas		Rumbo	Buzamiento	Tipo de roca y descripción
1	S 37° 21' 58,2"	O 70° 28' 07 "	-	-	Brecha sedimentaria con clastos angulosos (15m) con presencia de cemento carbonático y venillas subverticales
2	S 37° 21' 57,8"	O 70° 28' 09,7 "	-	-	Nivel de brecha con clastos de areniscas y canto rodado
3	S 37° 21' 56,3"	O 70° 28' 10,9"	N 15°	20°E	Fm Tordillo areniscas rojizas, con presencia de diaclasas rellenas de cabonato de calcio
4	S 37° 21' 56,8"	O 70° 28' 11 "	N 20°	20°E	Fm Tordillo areniscas rojizas. Este punto corresponde a la ladera 1 analizada
5	S 37° 21' 57,3"	O 70° 28' 12,4 "	N 20°	20°E	Fm Tordillo intercalaciones de areniscas y fangolitas
6	S 37° 21' 53,5"	O 70° 28' 04,4 "	-	-	Nivel de brecha con cemento carbonático y clastos de areniscas < 5cm
7	S 37° 21' 50,4"	O 70° 28' 07,4 "	-	-	Contacto erosivo entre nivel conglomerádico con cemento carbonático y arenas guresas con laminación paralela
8	S 37° 21' 47,9"	O 70° 28' 13,2 "	N 20°	20°E	Fm Tordillo areniscas amarillentas con niveles fangolíticos intercalados. Este punto corresponde a la ladera 2 analizada
9	S 37° 21' 51,1"	O 70° 28' 14,4 "	-	-	Se obsevó la presencia de caída de pequeños bloques

Tabla X Coordenadas y parámetros puntos GPS 24 de abril.

Puntos Gps 25 de abril					
Punto	Coordenadas		Rumbo	Buzamiento	Tipo de roca y descripción
1	S 37° 22' 30,9"	O 70° 28' 08,7 "	N 15°	7°E	Intercalación de pelitas y bancos arenosos (se observó un predominio pelítico)
2	S 37° 22' 26,7"	O 70° 28' 15,6 "	N 190°	7°E	Misma litología que el punto 1 con presencia de diaclasas y niveles fangolíticos intensamente fracturados
3	S 37° 22' 26,32"	O 70° 28' 19,32 "	-	-	Misma composición litológica que el punto 1 y 2. En este sector se identificó una falla del tipo normal.
4	S 37° 22' 37,8"	O 70° 28' 28,16"	N 140°	10°E	Dominio de pelitas y areniscas intercaladas en la base y dominio arenoso en la parte superior del afloramiento. Se observó una sucesión de estratos plegados que forman una pliegue del tipo sinclinal
5	S 37° 22' 38,44"	O 70° 28' 29,60"	N 65°	8°E	
6	S 37° 22' 29,06"	O 70° 28' 50,79 "	N 330°	55°E	
7	S 37° 21' 50,4"	O 70° 28' 07,4 "	-	-	Dominio fangolítico algo fracturado con presencia de pequeñas intercalaciones de niveles arenosos. A lo largo de los 3 puntos se observó que los estratos aflorantes conforman una estructura del tipo anticlinal
8	S 37° 21' 47,9"	O 70° 28' 13,2 "	N 320°	15°E	
9	S 37° 22' 24,23"	O 70° 29' 24,9 "	N 315°	7°E	Dicho punto corresponde a la ladera 3 analizada.
10	S 37° 22' 39,03"	O 70° 29' 47,35 "	N 315°	8°E	Dicho punto corresponde a la ladera 4 analizada.
11	S 37° 22' 51,41"	O 70° 31' 52,75 "	N 330°	10°E	Intercalación de niveles pelíticos en contacto erosivo con depósitos aluviales con clastos de hasta 160 (cm)

Tabla X Coordenadas y parámetros puntos GPS 25 de abril.

5.1 Geología regional

Como se observa en las figuras Figura 9 y Figura 10, aguas abajo del eje de la presa, los afloramientos están conformados por andesitas de la Formación Colipilli, sucesiones pelíticas y arenoso-calcáreas de la Formación Agrio, rocas clásticas conformadas por conglomerados, areniscas y pelitas correspondientes a la Formación Mulichinco y por margas y lutitas pertenecientes a la Formación Vaca Muerta.



Figura 9. Formaciones geológicas aflorantes en el área de estudio.

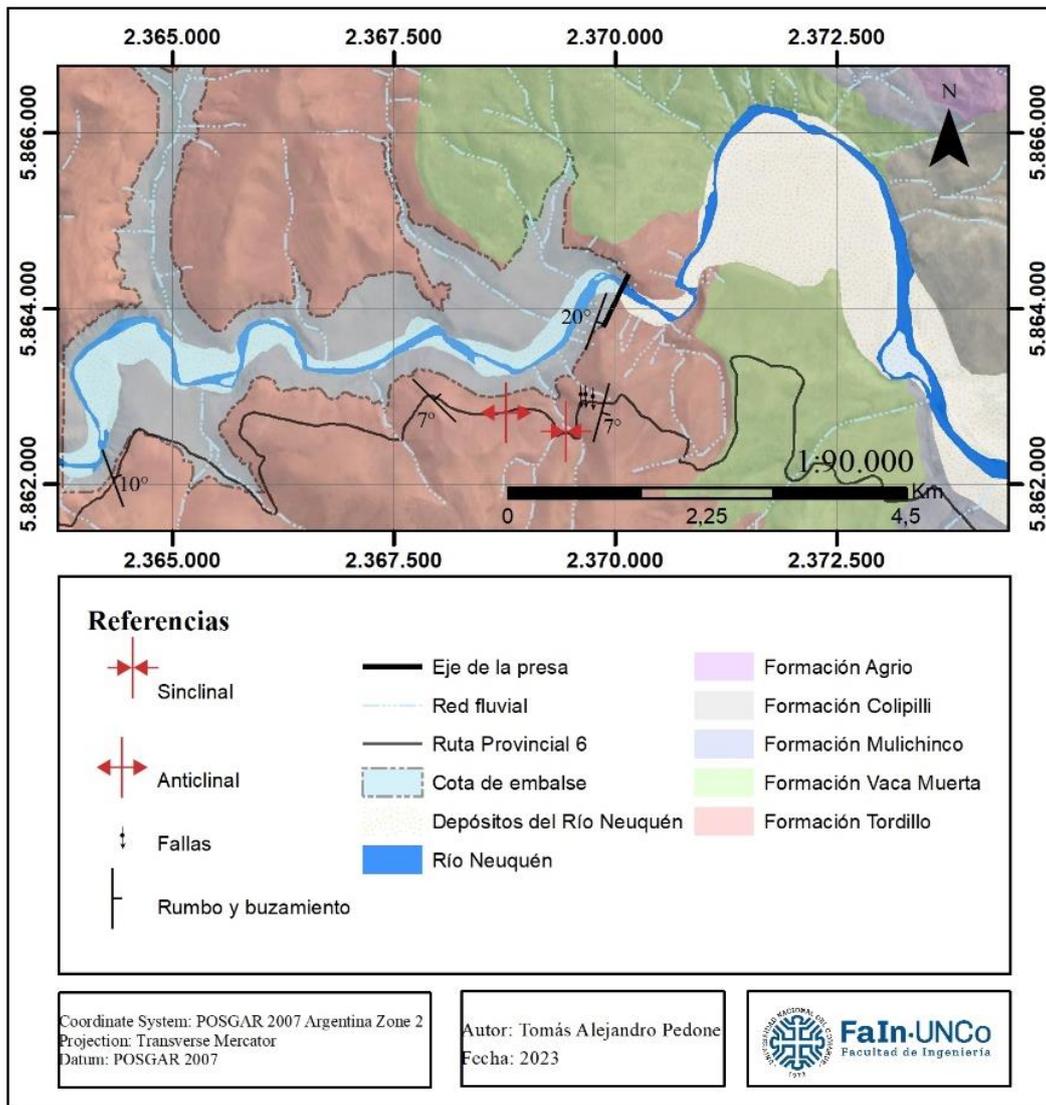


Figura 10. Mapa extraído y modificado de Garrido *et al* (2014).

La geología que caracteriza al macizo situado en el margen derecho del río Neuquén, sitio correspondiente al eje de la presa (Figura 11 y X), está conformada por diversos afloramientos que correspondientes a la Formación Tordillo, dichos afloramientos se caracterizan por presentar un rumbo general N/NE con buzamientos que oscilan entre los 15° y 20° hacia al este. Conforme se fue realizando un relevamiento desde la parte más alta del macizo hasta alcanzar los depósitos aluviales actuales del río Neuquén, se observó inicialmente una sucesión de estratos compuesta por pelitas de color verde, que transicionalmente gradaban hacia un nivel inferior de aproximadamente 30 metros conformado por bancos tabulares de gran continuidad lateral compuestos por arenisca finas de color rojizo con pequeños niveles fangolíticos intercalados. Por debajo de este nivel se observó a lo largo de 25 metros, un dominio fino conformado por intercalaciones de areniscas finas rojizas y niveles fangolíticos de color rojizo. En niveles correspondientes a estas intercalaciones se hallaron por debajo de material suelto compuesto por arenas gruesas, es decir suelo, diversos afloramientos conformados por brechas cuyo origen posiblemente sea sedimentario ya que los clastos evidencian poco transporte, es decir, clastos angulosos y subangulosos de hasta 15 centímetros. Dichas brechas se encontraban cementadas por CaCO₃ y, además, estaban caracterizadas por presentar venillas de alto ángulo rellenas de cuarzo (Figura 12 A y B). Algunos metros más abajo, se identificaron nuevamente niveles brechados, caracterizados por clastos angulosos a subangulosos de arenisca que a diferencia de los observados con anterioridad no presentaban venillas rellenas de carbonato o cuarzo, y además, presentaban un rasgo llamativo, es decir la presencia clastos de canto rodado de hasta 10 centímetros. Luego se identificó un nivel conformado por brechas rellenas de cemento carbonático con clastos de areniscas cuyo tamaño no excedían los 7 centímetros y ausencia de venillas (Figura 13A). Metros más abajo se halló un nivel de conglomerados polimícticos rellenos con cemento carbonático (Figura 13B), compuesto por clastos con tamaños de hasta 50 centímetros bien redondeados, imbricados en contacto erosivo con un lente arenoso con presencia de laminación paralela que no excedía el metro de espesor (Figura 14A y B.). Hacia el oeste, aguas arriba de la presa se pudo identificar diversos afloramientos correspondientes a los niveles conformados por areniscas finas rojizas intercaladas con niveles fangolíticos, en dichos afloramientos se pudo observar niveles intensamente alterados y fracturados, además, de la presencia de abundantes diaclasas verticales a subverticales cerradas y rellenas con CaCO₃ (Figura 15A y B). Por debajo de las intercalaciones se identificó un nivel de gran continuidad lateral con una altura de 20 metros compuesto por bancos tabulares de areniscas medianas a finas de color amarillo intercaladas con niveles de pelitas grises, dicho afloramiento estaba caracterizado por abundantes sistemas de discontinuidades entre ellas diaclasas verticales a subverticales y planos de estratificación. Finalmente por debajo se identificó a través de un contacto neto un nivel de pelitas rojizas laminadas, cubiertas por niveles de caída compuestos por depósitos coluviales. (Figura 16).

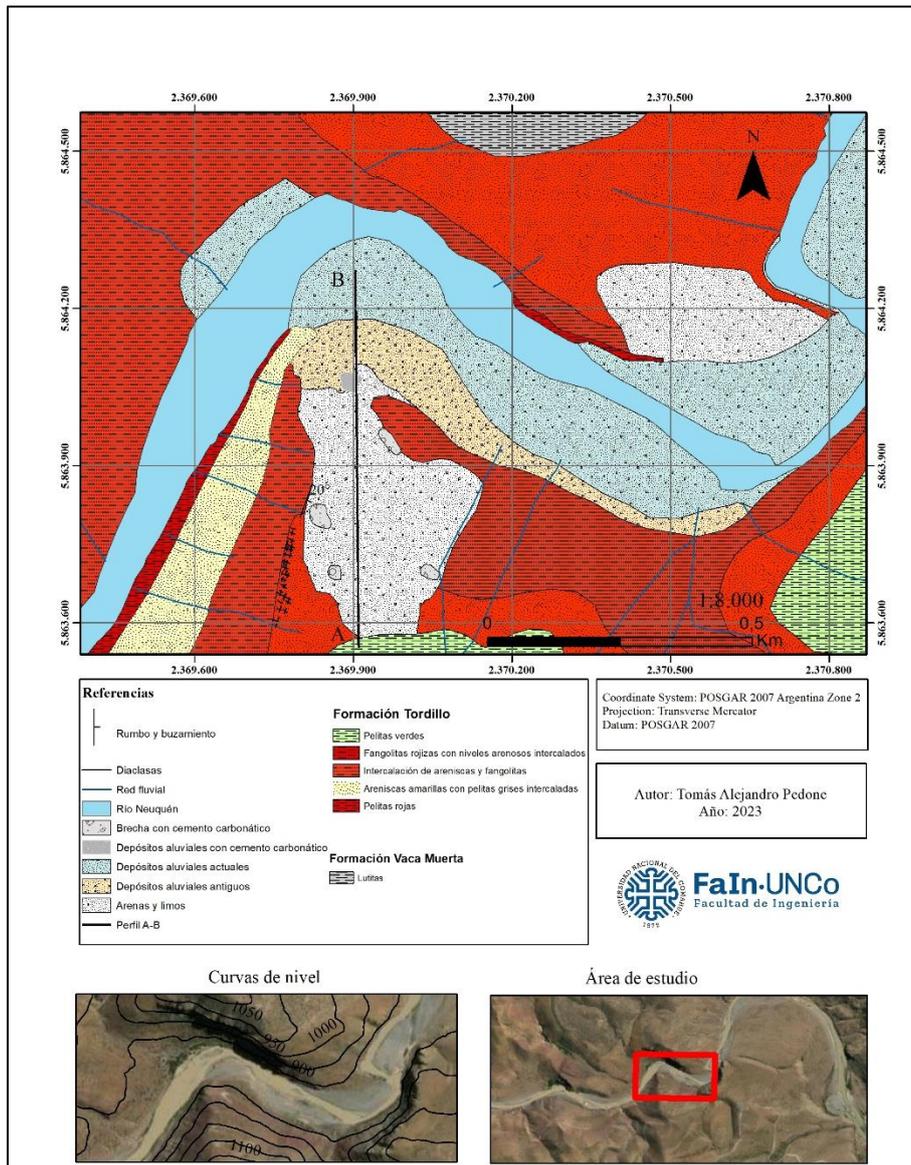


Figura 11. Mapa geológico correspondiente al sitio de emplazamiento de la presa.

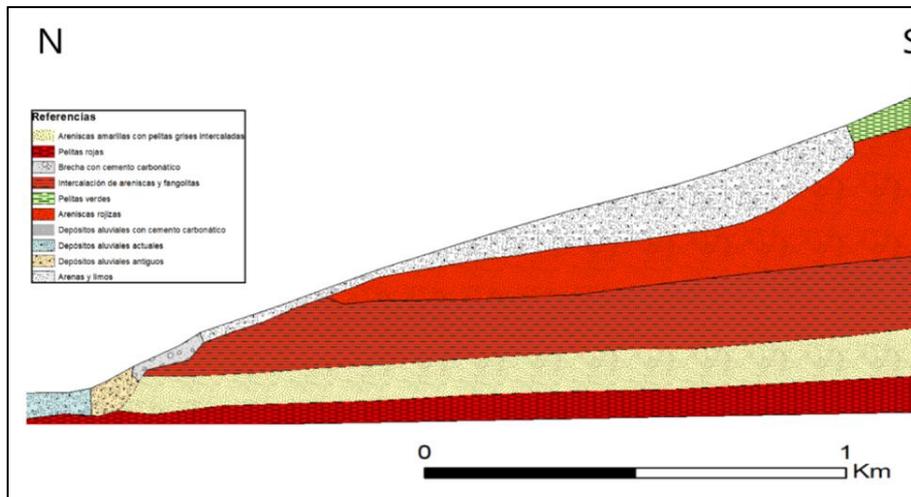


Figura X. Perfil A-B de los afloramientos del sitio de emplazamiento de la presa.

El macizo izquierdo del río Neuquén (Figura 17 y Figura 18), se caracteriza por presentar en su parte más alta afloramientos compuestos por lutitas correspondientes a la Formación Vaca Muerta, por debajo de las mismas y a través de un contacto neto se observó un talud de aproximadamente 60 metros, caracterizado por una elevada pendiente, conformado por cuerpos tabulares de gran continuidad lateral, compuestos por areniscas rojizas en la parte superior e intercalaciones de fangolitas grisáceas y areniscas rojizas hacia la base. Hacia el este, la continuidad de los estratos se ve interrumpida por un sector compuesto por material suelto conformado por arenas gruesas en contacto hacia la parte inferior con depósitos pelíticos color rojizo y depósitos actuales del río Neuquén.



Figura 12. A) Nivel de brechas inferior con presencia de clastos de menor tamaño. B) Depósitos aluviales con matriz compuesta de cemento carbonático.

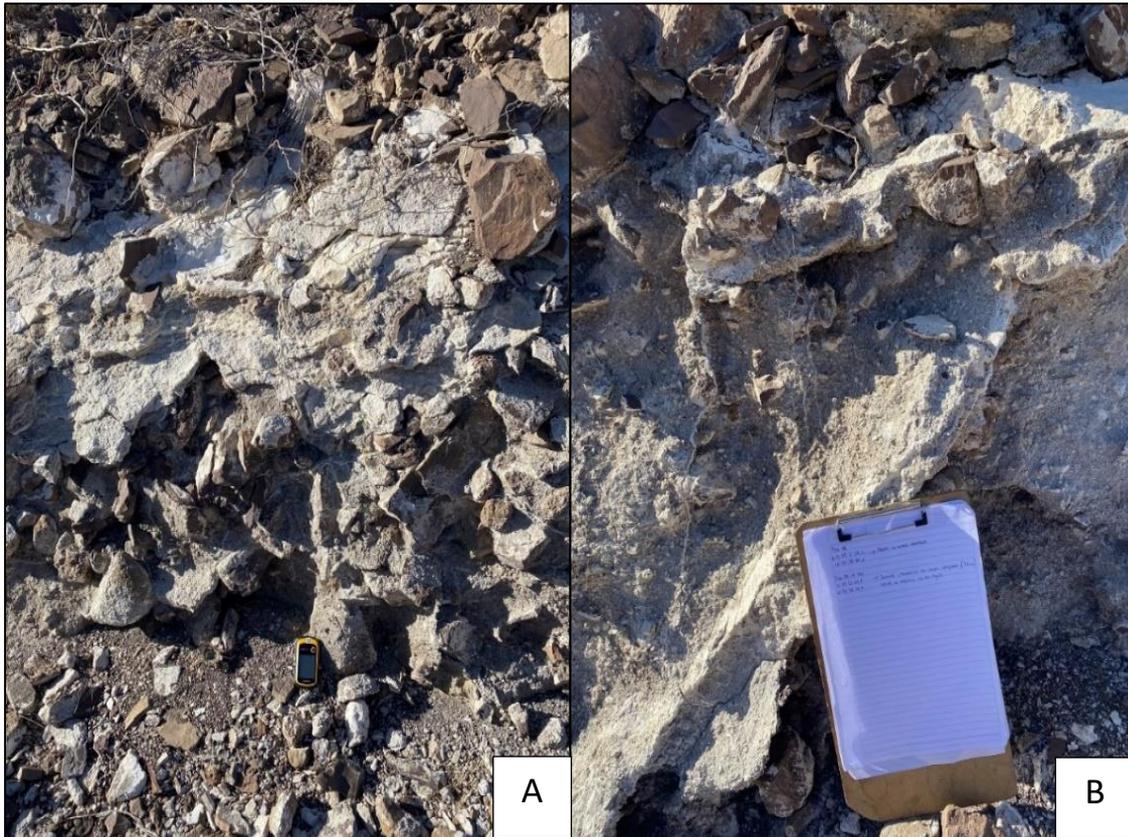


Figura 13. A) Brecha sedimentaria compuesta por clastos angulosos a subangulosos cementados con relleno carbonático. B) Venillas subverticales en niveles de brecha.



Figura 14. A y B. Contacto erosivo entre conglomerados con cemento carbonático y arenas gruesas con laminación paralela correspondientes a depositos aluviales antiguos.

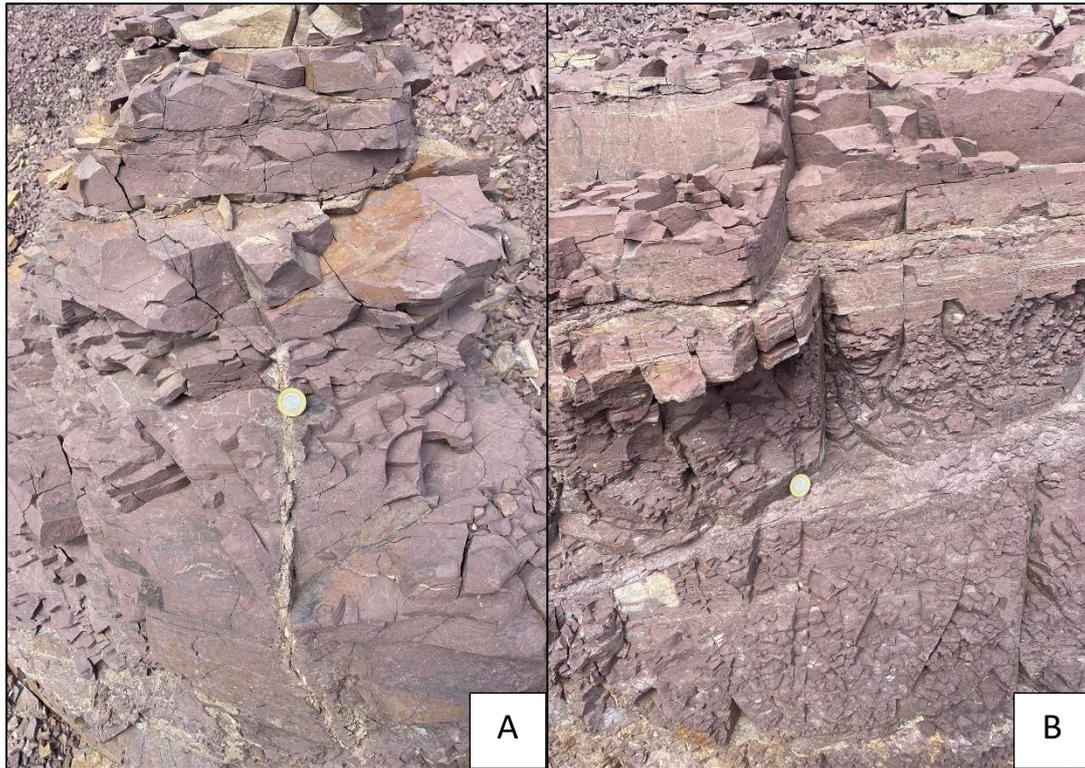


Figura 15. Areniscas rojizas correspondientes a la Formación Tordillo A) Diaclasas rellenas con carbonato de calcio B) Niveles alterados y fracturados con abundantes diaclasas verticales cerradas.



Figura 16. Afloramientos situados al oeste del macizo de la margen sur del río Neuquén.

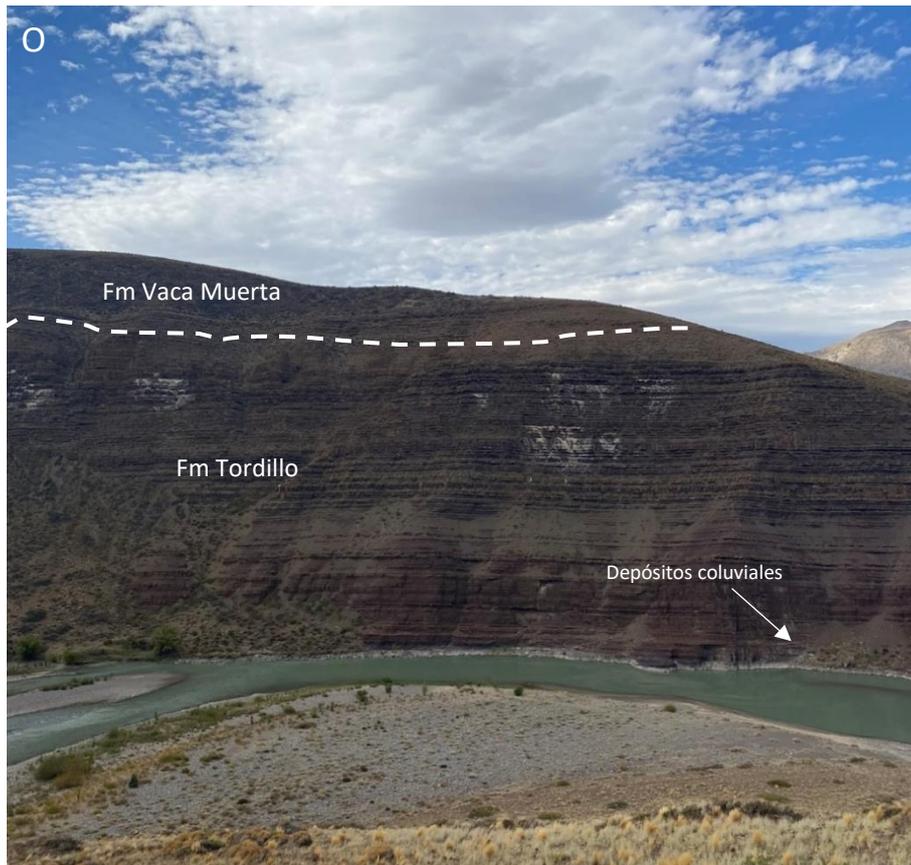


Figura 17. Vista hacia el norte. Afloramientos del macizo del margen izquierdo del río Neuquén.



Figura 18. Afloramientos del macizo izquierdo del río Neuquén.

La geología que caracteriza al margen derecho del vaso de la presa (Figura 10) está conformada en su totalidad por afloramientos de la Formación Tordillo, en dichos afloramientos es posible observar diversas intercalaciones compuestas por bancos arenosos y fangolíticos de variada continuidad lateral cuyo espesor es variable según la posición (Figura 20 A). El rumbo, buzamiento y estructuras presentes en los distintos sitios de interés analizados (Figura 19 y Tabla 6) serán descriptos a continuación.

Punto	Coordenadas		Rumbo	Buzamiento
1	S 37° 22' 26,9"	O 70° 28' 10,40"	N 15°	7°E
2	S 37° 22' 29,68"	O 70° 28' 13,64"	N190°	7°E
3	S 37° 22' 29,43"	O 70° 28' 16,40"	-	-
4	S 37° 22' 40,82"	O 70° 28' 27,03"	N140°	10°O
5	S 37° 22' 38,39"	O 70° 28' 29,03"	N65°	8°E
6	S 37° 22' 29,4"	O 70° 28' 50,67"	N 330°	55°E
7	S 37° 22' 30,59 "	O 70° 28' 55,18"	N 320°	15° E
8	S 37° 22' 44,96"	O 70° 31' 46,01"	N 150°	10°O

Tabla 6. Coordenadas de sitios de interés estudiados.

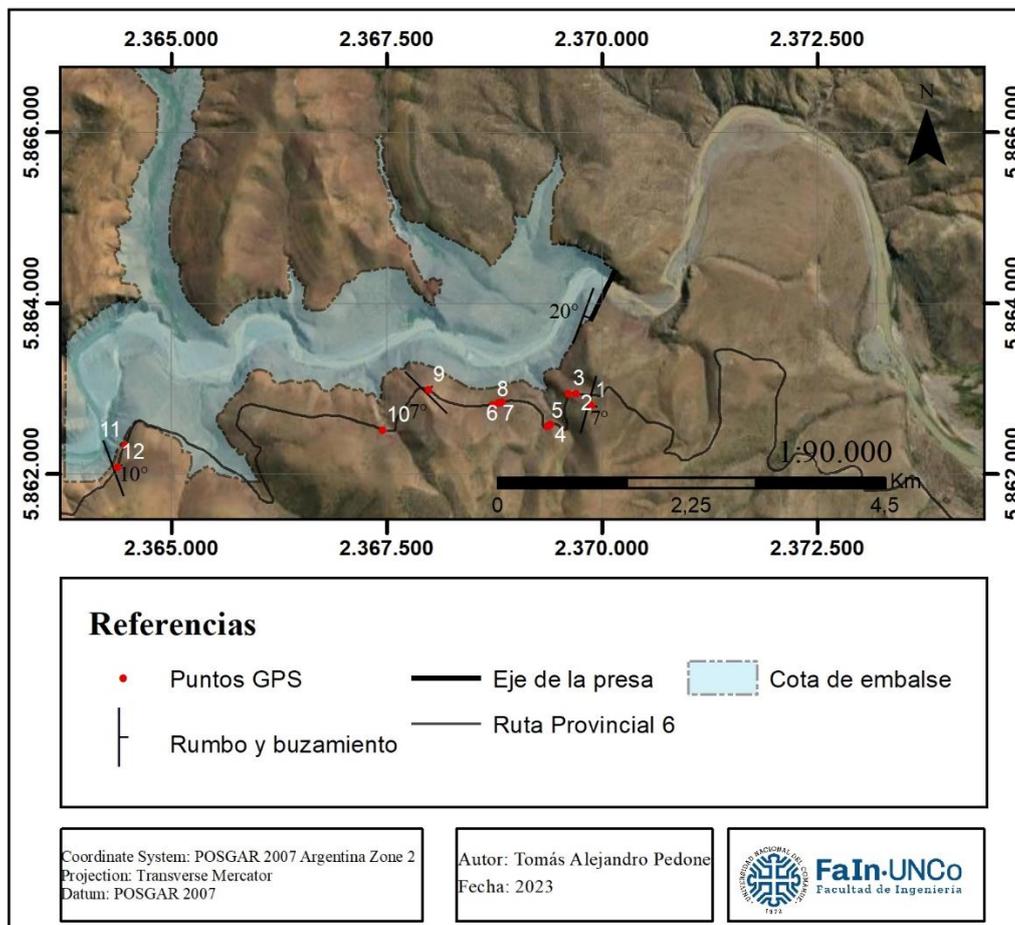


Figura 19. Puntos GPS sitios de interés.

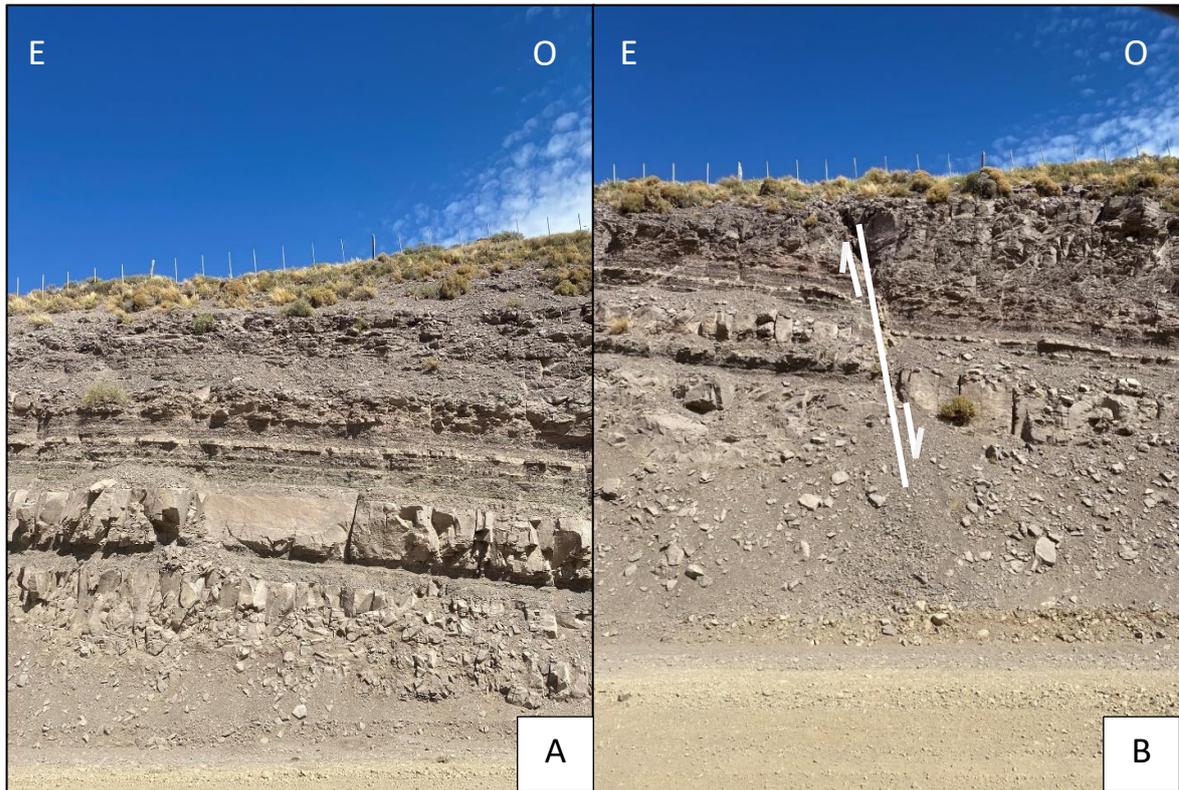


Figura 20. A) Afloramientos de la Formación Tordillo. B) Falla normal observada.

El afloramiento que corresponde a los puntos 1 y 2, está conformado por bancos arenosos de gran continuidad lateral de 50 centímetros de espesor con presencia de diaclasas, intercalados con niveles fangolíticos intensamente fracturados cuyo espesor no excede los 15 centímetros, dicho afloramiento se caracteriza por presentar una deformación, donde se identificaron horizontes plegados que conforman una pequeña estructura anticlinal. Algunos metros hacia el oeste en el punto 3 se observaron estructuras correspondientes a una fallas del tipo normal. (Figura 20 B).

Continuando en dirección oeste sobre la ruta Provincial 6 se analizó un nuevo afloramiento correspondiente a los puntos 4 y 5, el mismo estaba conformado por una sección basal compuesta por una alternancia de niveles fangolíticos y arenosos de poco espesor y una sección superior compuesta por niveles arenosos de mayor espesor, con abundante presencia de diaclasas. El plegamiento observado en los estratos correspondientes a dicho conforman una estructura del tipo sinclinal.

El afloramiento correspondiente a los puntos 6 y 7 está compuesto por un domino fangolítico algo fracturado con intercalaciones de niveles arenosos que escasamente superan el metro de espesor. En dicho afloramiento fue posible observar una estructura anticlinal debido a un intenso plegamiento que caracteriza los estratos. En sectores próximos al punto 6 (Figura 21A) se observó estratos que presentaban buzamientos de alto ángulo y a medida que se caminó en dirección oeste, se pudo observar cómo los mismos se plegaban y disminuían su ángulo hasta alcanzar posiciones horizontales, luego en el sitio correspondiente al punto 7 (Figura 21B) se observó como los estratos presentaban nuevamente buzamientos en dirección este pero con menor ángulo que los observados metros atrás (Figura 22A).

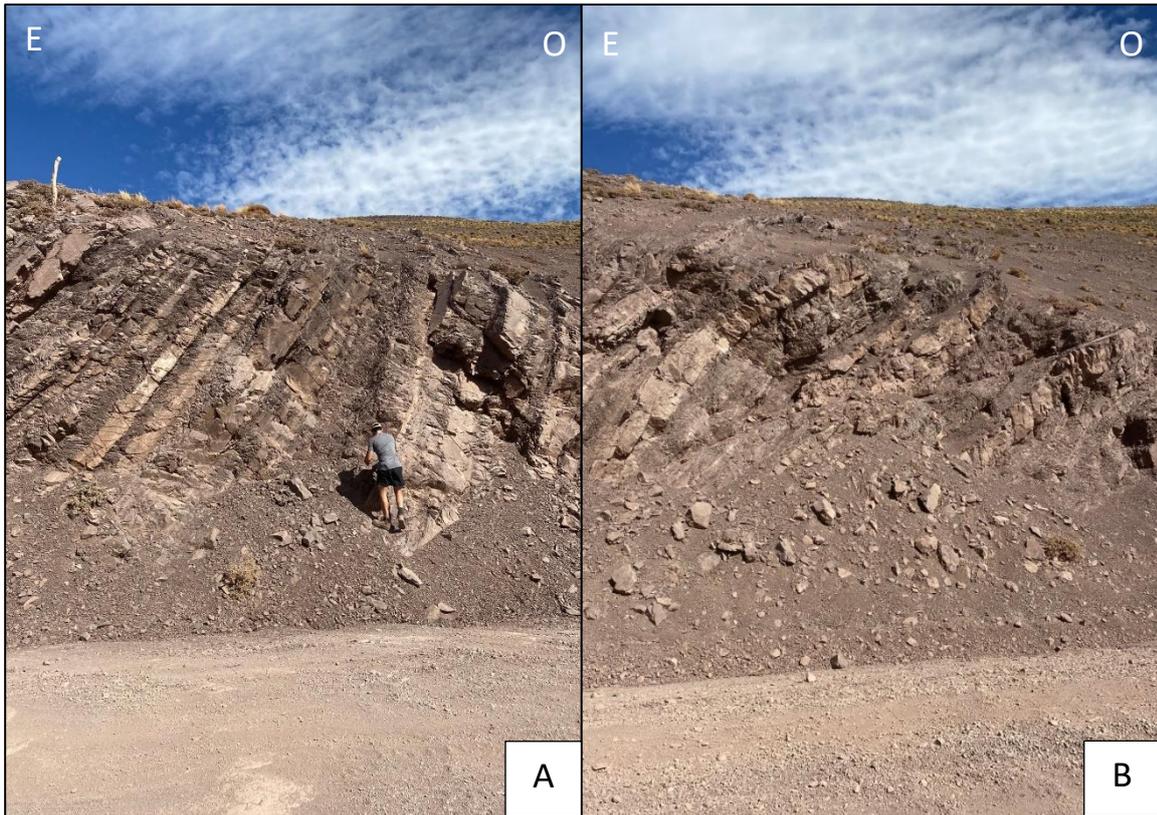


Figura 21. A) estratos con buzamiento de alto ángulo. B) estratos plegados.

En el afloramiento correspondiente al punto 8 se pudo observar una intercalación de pelitas en contacto erosivo con depósitos aluviales caracterizados por clastos ángulos y subangulosos de areniscas y canto rodado de hasta 160 centímetros inmersos en una matriz arenosa (Figura 22 B).

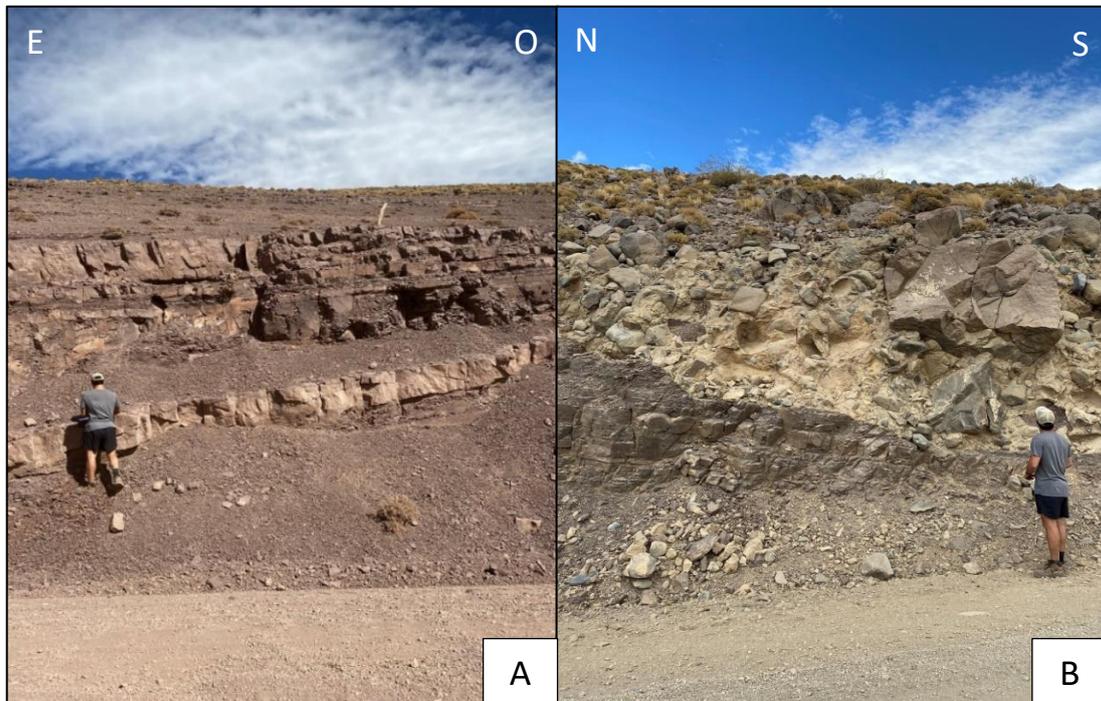


Figura 22. A) estratos de la formación tordillo con buzamientos de bajo ángulo. B) Contacto erosivo entre depósitos aluviales y niveles pelíticos de la Formación Tordillo.

5.2 Estabilidad de taludes en macizos rocosos

Se realizó el análisis de estabilidad para un total de cuatro laderas (Tabla 7) situados sobre la margen derecha del río Neuquén, dos de ellos corresponden al área de emplazamiento de la presa, mientras que los dos restantes se sitúan en el área correspondiente al vaso (Figura 23). Cabe destacar que en las cuatro laderas analizadas se identificó abundante caída de bloques que cubrían parcialmente las laderas de los taludes. Debido a la falta de datos de laboratorio los análisis de estabilidad fueron realizados únicamente en base a consideraciones geométricas.

Taludes	Coordenadas		Talud			Discontinuidades		
	S	O	Azimut	Altura	Inclinación	Familia	Azimut	inclinación
1	37° 21' 56,8"	70° 28' 11"	110°	8	45	D1	205	75
						D2	290	80
2	37° 21' 47,9"	70° 28' 13,22"	100°	25	40	D1	290	90
						D2	220	85
3	37° 22' 24,23"	70° 29' 24,99"	315°	55	70	D1	80	90
						D2	310	85
4	37° 22' 38,73"	70° 29' 47,59"	310°	80	75	D1	60	70
						D2	375	90

Tabla 7. Parámetros de los taludes rocos estudiados.

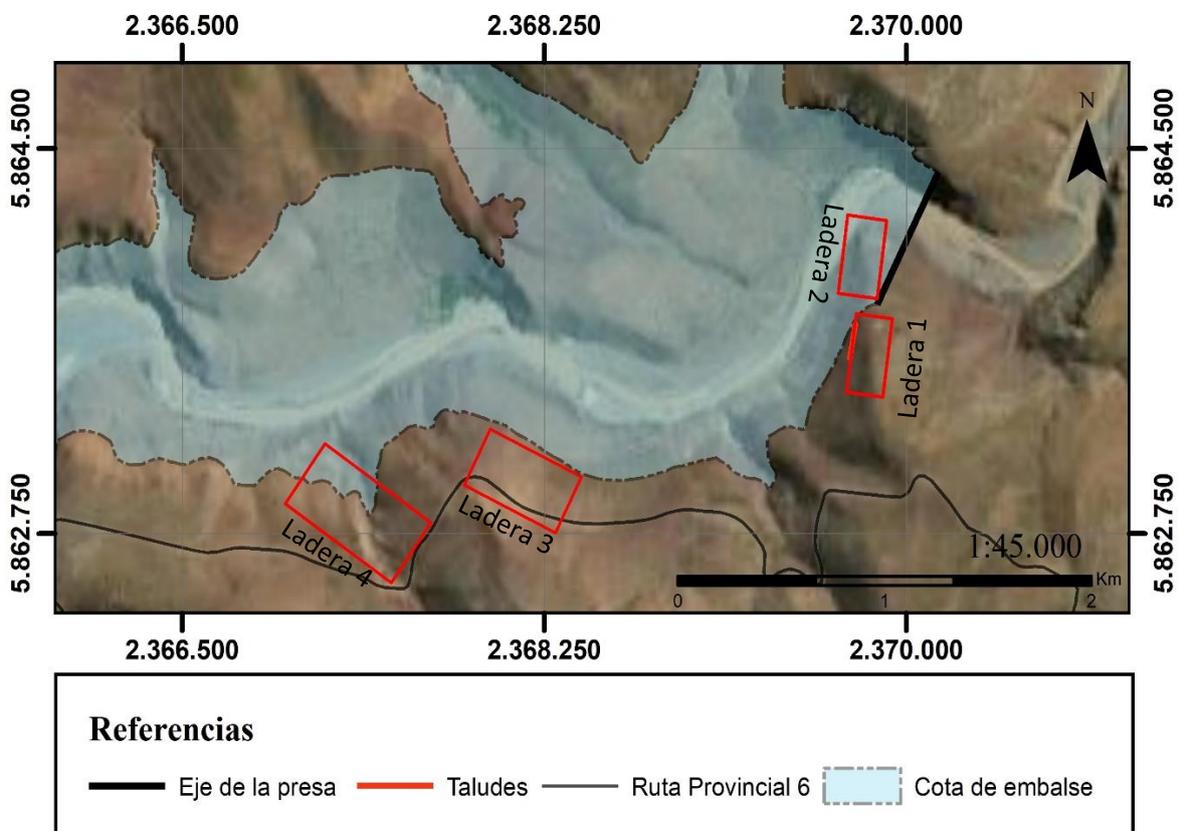


Figura 23. Laderas analizadas .

Ladera 1

La ladera localizada en las coordenadas S 37° 21' 56,8"; O 70° 28' 11" está constituido por diversos bancos tabulares arenosos de 30 centímetros de espesor intercalados con niveles fangolíticos de poco espesor intensamente fracturados. La continuidad lateral es difícil de observar, debido a que los estratos se encuentran totalmente solapados por fragmentos de roca de niveles superiores y por material suelto, es decir, suelo. La ladera se caracteriza por una altura de 8 metros y una inclinación de 45°, en la misma se pudieron identificar dos sistemas diaclasas verticales a subverticales con ausencia de relleno. Este afloramiento no se encuentra cubierto por vegetación.

- Rotura planar: Los sistemas de diaclasas presentes en la ladera no presentan riesgo de inestabilidad asociado al fenómeno de falla planar (Figura 24).

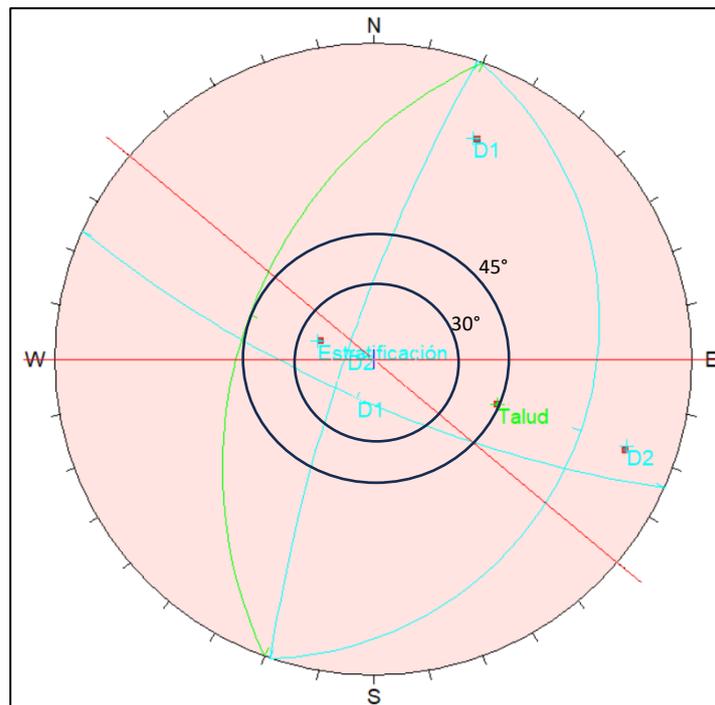


Figura 24. Diagrama de rotura planar de la ladera 1.

Rotura en cuña

No se presentaron situaciones críticas asociadas a rotura en cuña dentro de familias de diaclasas identificadas en los afloramientos (Figura 25).

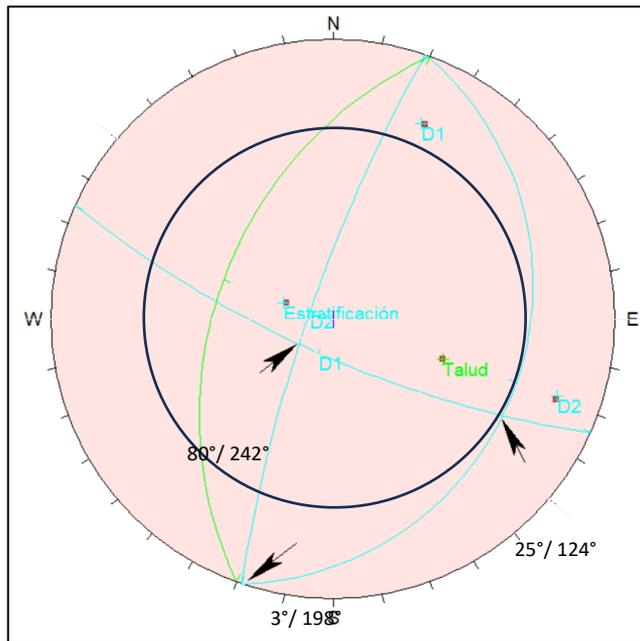


Figura 25. Diagrama de rotura en cuña de la ladera 1.

Rotura por vuelco

No se presentaron situaciones críticas asociadas al fenómeno de rotura por vuelco en las familias de diaclasas pertenecientes a la ladera 1 (Figura 26).

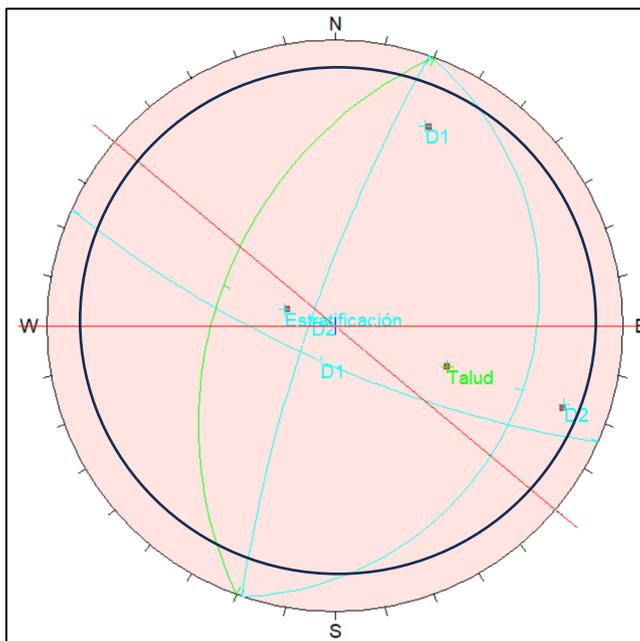


Figura 26. Diagrama de rotura por vuelco de la ladera 1.

Ladera 2

La ladera localizada en las coordenadas S 37° 21' 47,9"; O 70° 28' 13,22", se encuentra limitada en su parte superior por depósitos aluviales antiguos del río Neuquén y suelo, la misma está conformada por una sucesión de gran continuidad lateral compuesta por bancos arenosos de color amarillo tabulares de gran espesor, intercalados con niveles fangolíticos que no exceden

los 20 centímetros. La ladera presenta una altura aproximada de 25 metros y está caracterizada por una inclinación de 40° , en diversos sectores la ladera se encuentra cubierto por depósitos coluviales y de caída. En los afloramientos fue posible distinguir dos familias de diaclasas verticales. En este afloramiento se pudo observar escasa vegetación.

Rotura planar

De acuerdo con el análisis realizado no se presentan situaciones críticas para el tipo de rotura planar en los sistemas de diaclasas estudiados (Figura 27).

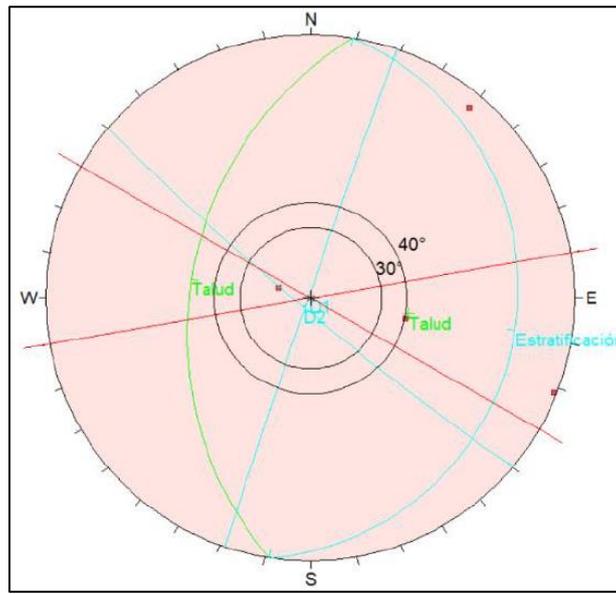


Figura 27. Diagrama de rotura planar de la ladera 2.

Rotura en cuña

No se identificaron situaciones críticas para las familias de discontinuidades presentes en la ladera 2 (Figura 28).

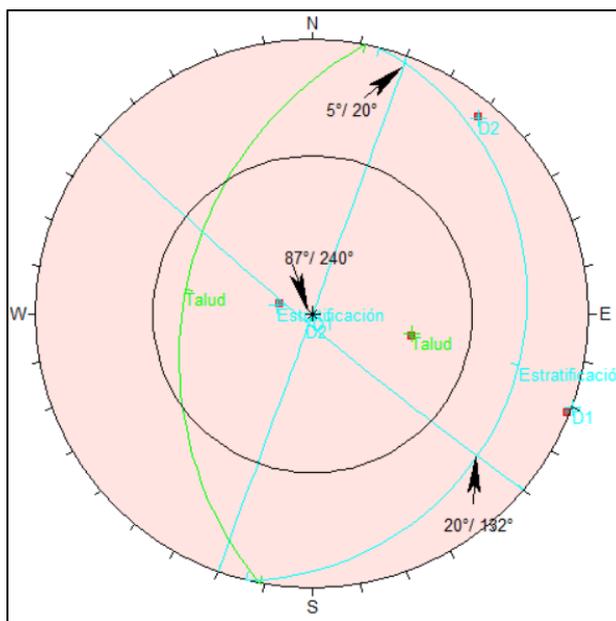


Figura 28. Diagrama de rotura en cuña de la ladera 2.

Rotura por vuelco

No se identificaron situaciones críticas que produzcan inestabilidad asociada al el fenómeno de rotura por vuelco en las discontinuidades identificadas en la ladera 2 (Figura 29).

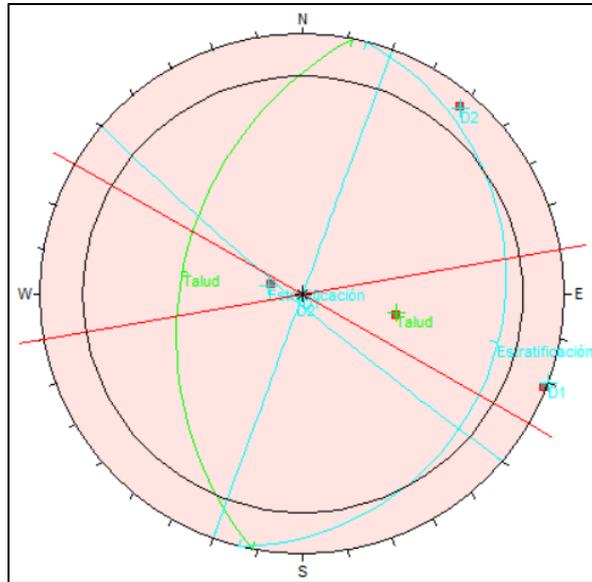


Figura 29. Diagrama de rotura por vuelco para la ladera 2.

Ladera 3

La ladera situada en las coordenadas S 37° 22' 24,23"; O 70° 29' 24,99°, tiene una altura de 55 metros, la misma está conformada por una sucesión bancos tabulares arenosos de gran continuidad cuyo espesor no excede los 30 centímetros intercalados con niveles de fangolitas cuyo espesor no supera los 20 centímetros. Debido a que las condiciones naturales del terreno presentaban dificultades de acceso para la medición de parámetros, se procedió a extrapolar los parámetros obtenidos hacia niveles situados metros más abajo para así poder realizar el análisis de estabilidad. En los afloramientos de los niveles superiores se distinguieron 2 familias de discontinuidades verticales a subverticales.

Rotura planar

No se identificaron situaciones críticas para las familias de discontinuidades presentes en la ladera 3 (Figura 30).

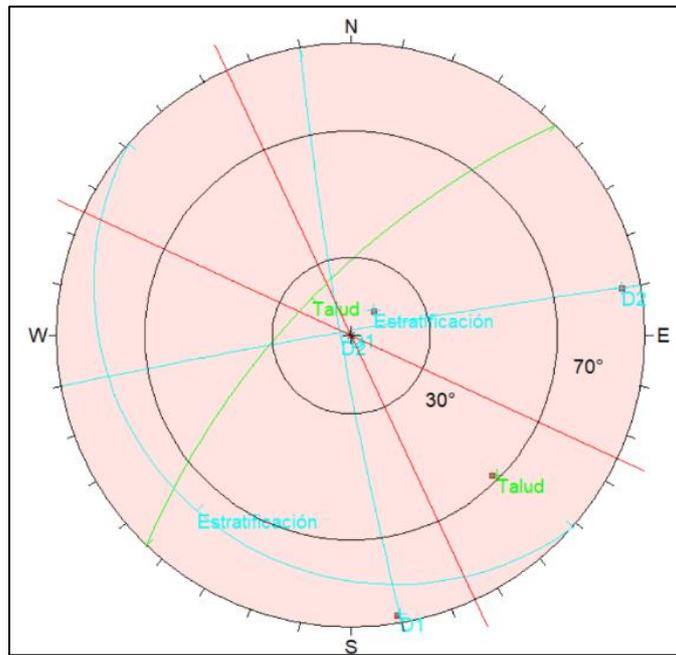


Figura 30. Diagrama de rotura planar para la ladera 3.

Rotura en cuña

No se identificaron situaciones críticas para el fenómeno de rotura por cuña para las familias de discontinuidades de la ladera 3 (Figura 31).

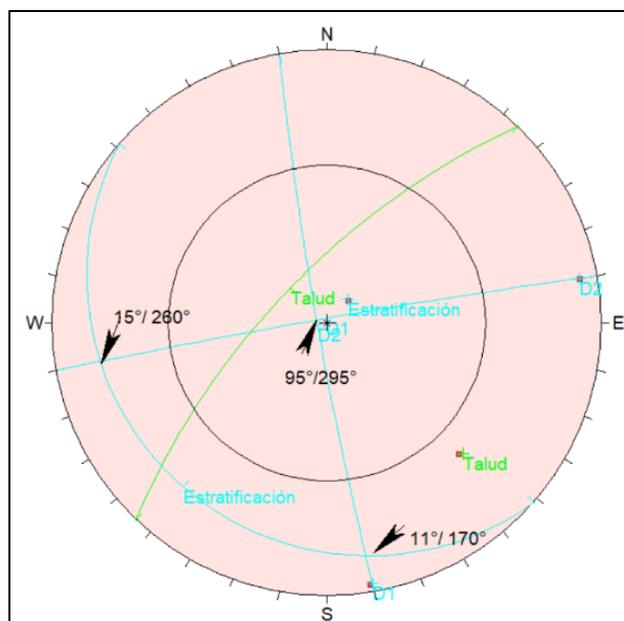


Figura 31. Diagrama de rotura en cuña para la ladera 3.

Rotura por vuelco

En base al análisis realizado no es posible la falla por vuelco para las familias de discontinuidades de la ladera 3 (Figura 32).

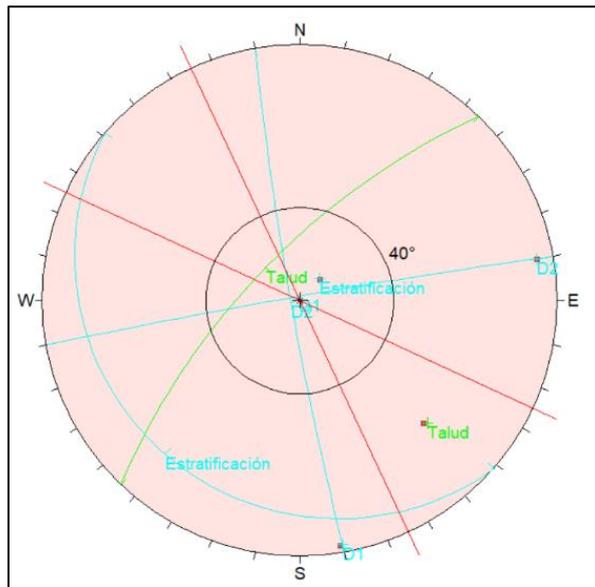


Figura 32. Diagrama de rotura por vuelco de la ladera 3.

Ladera 4

La ladera en las coordenadas S $37^{\circ} 22' 38,73''$; O $70^{\circ} 29' 47,59''$, presenta una altura que supera los 80 metros y está conformada por cuerpos tabulares de gran continuidad lateral arenosos de más de 1 metro de espesor intercalados con pequeños niveles fangolíticos de hasta 20 centímetros. Al igual que la ladera 3, debido a las dificultades de acceso condicionadas por las elevadas pendientes de las laderas, se procedió nuevamente a transpoler los parámetros hacia niveles inferiores. En la ladera estudiada fue posible distinguir 2 familias de diaclasas de elevado ángulo de inclinación.

Rotura planar

No se identificaron situaciones críticas de rotura planar para los sistemas de discontinuidades de la ladera 4 (Figura 33).

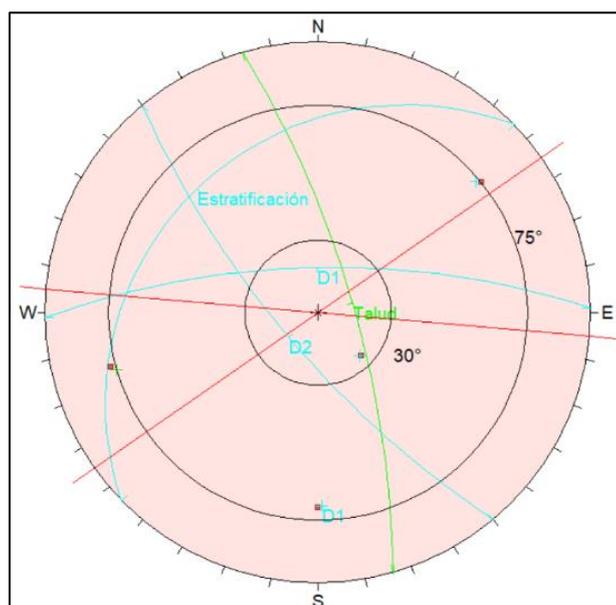


Figura 33. Diagrama de rotura planar para la ladera 4.

Rotura por cuña

No se identificaron situaciones críticas para el fenómeno de rotura por cuña en las familias de discontinuidades identificadas en los afloramientos (Figura 34).

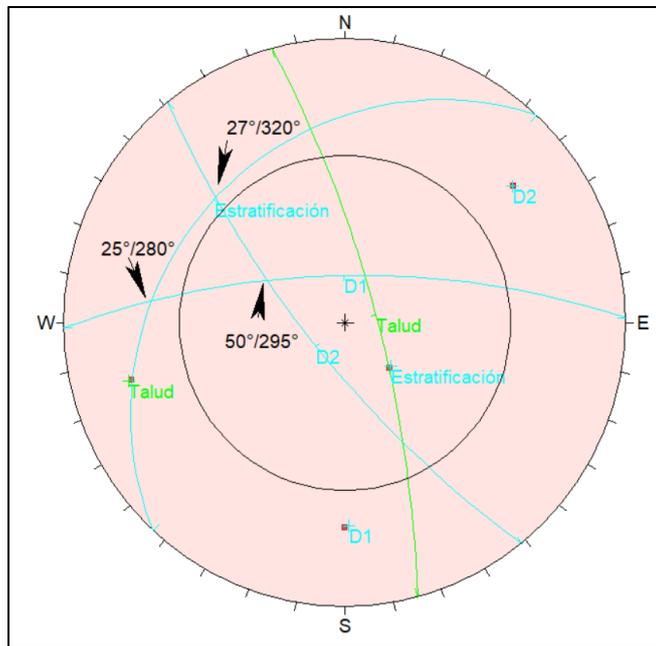


Figura 34. Diagrama de rotura por cuña para la ladera 4.

Rotura por vuelco

No se identificaron situaciones de inestabilidad asociadas al fenómeno de rotura por vuelco para las familias de discontinuidades de la ladera 4 (Figura 35).

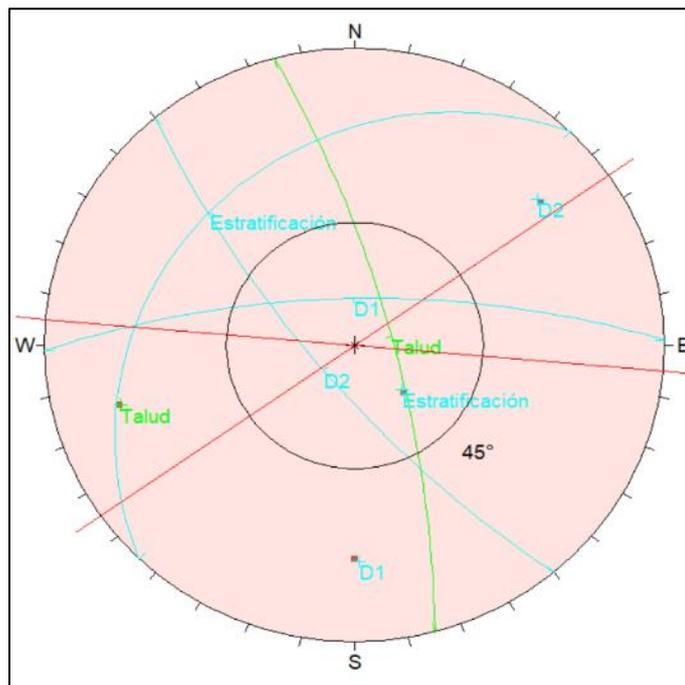


Figura 35. Diagrama de rotura por vuelco de la ladera 4.

5.3 Análisis de sondeos.

El sondeo SD-01 (Figura 36) se localiza en la zona correspondiente a los túneles de desvío. Los primeros 33 metros del mismo, corresponden material suelto, es decir, suelo conformado inicialmente por 16 metros de arenas grisáceas con aporte de ceniza volcánica seguido por 9 metros de gravas y arenas gruesas. Hasta el contacto con el techo rocoso situado a los 33 metros se observó un nivel de 8 metros compuesto por conglomerados polimícticos y bloques de areniscas. A partir de los 33 metros, se observó una intercalación compuesta por niveles de areniscas rojizas y niveles fangolíticos con valores bajos de RQD en los cuales se pudo observar un elevado grado de alteración, abundantes diaclasas con presencia de óxidos y la presencia de venillas de cuarzo y brechas rellenas de CaCO_3 . A partir de los 48 metros se observa un pasaje transicional hacia fangolitas con laminación paralela con mayores valores de RQD.

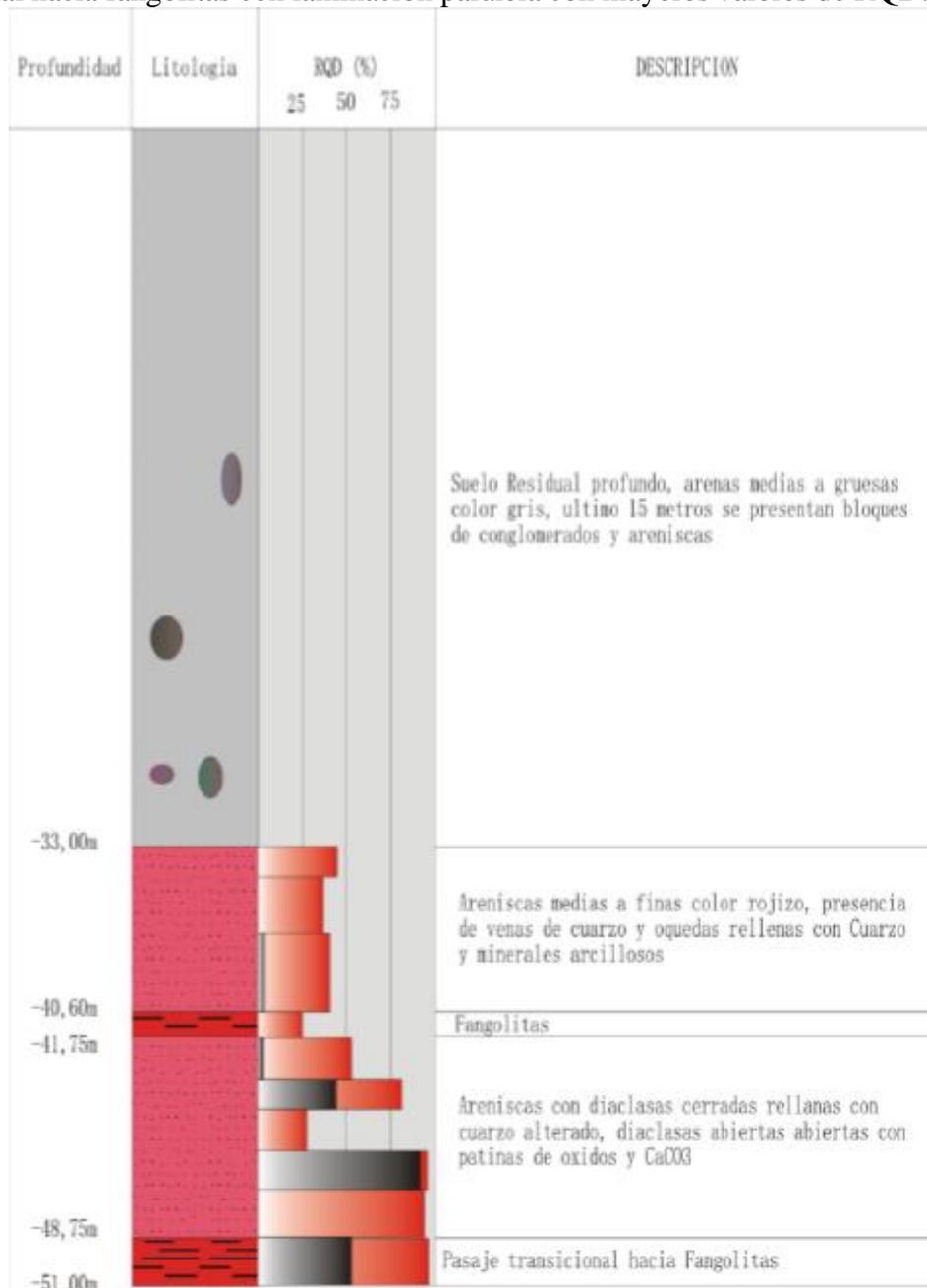


Figura 36. Perfil litológico del Sondeo SD-01 (brindado por el grupo consultor).

El sondeo SD-02 (Figura 37) se localiza en la zona correspondiente al terraplén de la presa. El mismo presenta un tramo inicial de materiales sueltos, conformado por 10 metros iniciales de arenas gruesas color gris con aporte de ceniza, por debajo se observan 5 metros de conglomerados polimícticos cuyos tamaños no exceden los 20 centímetros, hasta el contacto con el techo rocoso localizado a los 22 metros, se observa que el tamaño de los conglomerados aumenta, superando en algunos casos los 50 centímetros. A partir del contacto con el techo rocoso hasta los 40 metros se observa una intercalación con bajos valores de RQD compuesta por areniscas amarillentas y niveles pelíticos grisáceos con laminación paralela. Dichas areniscas se caracterizan por estar intensamente fracturadas y silicificadas, es decir, muy alteradas con presencia minerales secundarios tales como de micas y óxidos. Finalmente los últimos 40 metros del sondeo se caracterizan por la presencia de areniscas finas rojizas con intercalaciones de pelitas grises. En diversos niveles es posible observar que dichas areniscas se caracterizan por presentar diaclasas verticales, con un elevado grado de alteración y diaclasas rellenas de cuarzo, yeso alterado y CaCO₃. También es posible observar a partir de los 60 metros una arenisca gruesa muy alterada, fracturada con presencia de venillas de cuarzo y yeso. Es importante mencionar que se denota un aumento en los valores de RQD hacia los niveles más profundos del sondeo.

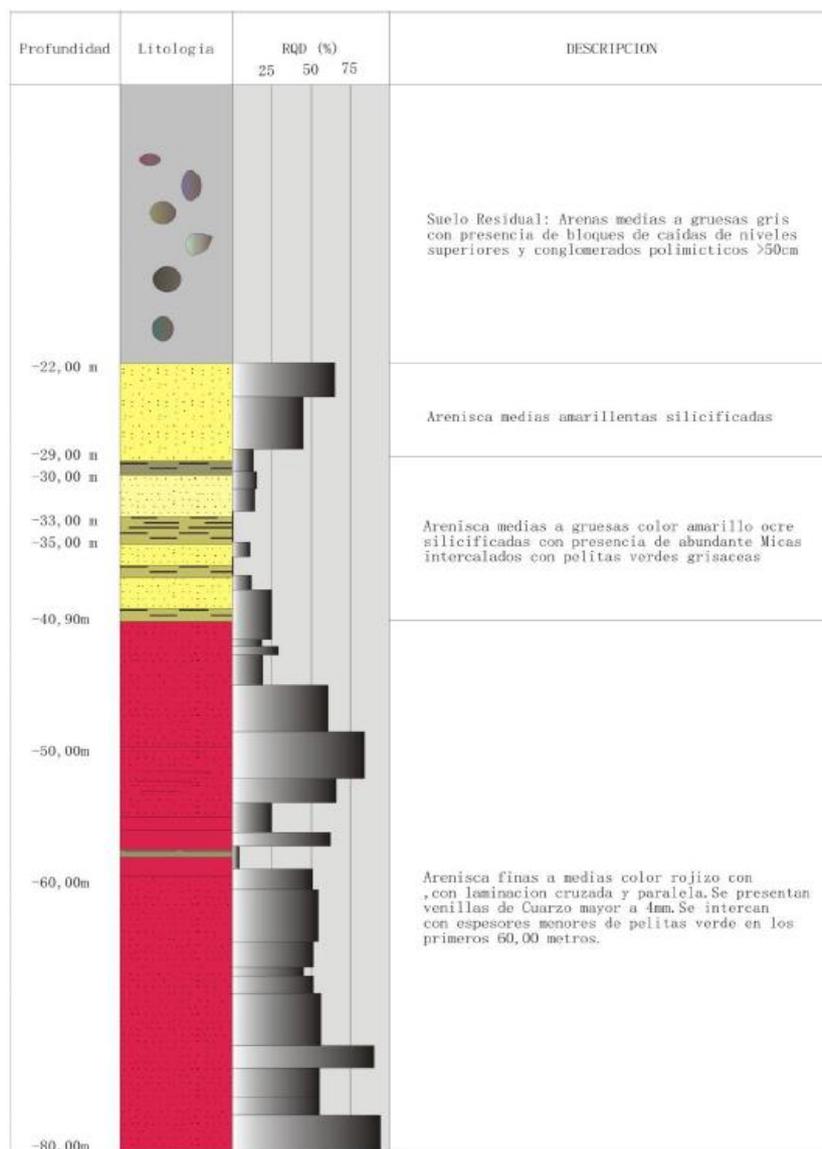


Figura 37. Perfil litológico del Sondeo SD-02 (brindado por el grupo consultor).

El sondeo SD-03 (Figura 38) fue realizado sobre los depósitos actuales del río Neuquén en el sitio correspondiente al eje de la presa, en el mismo es posible observar que el nivel freático fue alcanzado a los 1,5 metros. El primer tramo del sondeo, corresponde a 11 metros de depósitos aluviales compuestos por conglomerados polimícticos inmersos en una matriz arenosa con pequeñas cantidades de limos seguido por 2 metros de arenas medianas. A partir los 14 metros se puede observar un nivel conformado por 6 metros de areniscas finas rojizas con laminación paralela, poco consolidadas en las que se distinguen diaclasas subverticales abiertas con patinas de óxidos y arcillas en las paredes. Hasta los 23 metros se distingue un nivel compuesto por pelitas rojizas laminadas, poco consolidadas con presencia de diaclasas subverticales con presencia de óxidos en las paredes. Desde los 23 a los 31 metros, se destaca un nivel de pelitas grisáceas con laminación paralela con elevado contenido de pirita y presencia de diaclasas abiertas. Finalmente hasta los 40 metros, el sondeo se encuentra compuesto por areniscas silicificadas con presencia de filosilicatos y cristales de pirita, donde se observan diaclasas subhorizontales.

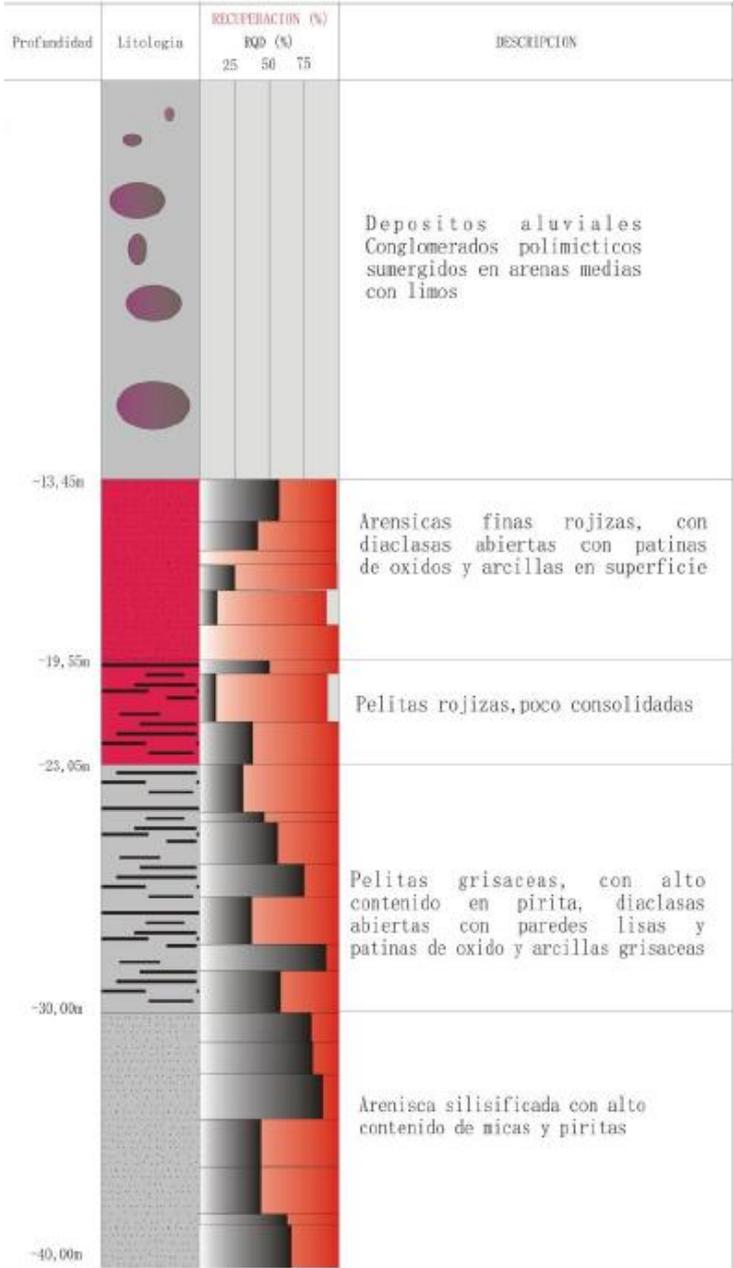


Figura 38. Perfil litológico del Sondeo SD-03 (brindado por el grupo consultor).

El sondeo de perforación SD-04 (Figura 39) fue realizado en el sitio correspondiente a la cara de hormigón aguas arriba de la presa. El tramo inicial está compuesto por 2,90 metros arenas gruesas grisáceas con aporte de cenizas volcánicas y conglomerados polimícticos cuyo tamaño no supera los 10 centímetros. Luego hasta los 22 metros se observa una intercalación con bajos valores de RQD compuesta por niveles de areniscas medias amarillentas y pelitas grisáceas con laminación paralela muy fracturadas y con abundantes diaclasas, por su parte las areniscas se caracterizan por un elevado grado de silicificación, abundantes fracturas y diaclasas con presencia de óxidos en las paredes, además entre los 15 y 16 metros se observa la presencia de brechas carbonáticas en los niveles de areniscas. A partir de los 22 metros es posible observar un aumento de los valores de RQD de las rocas respecto a los niveles superiores, dicha porción del sondeo está conformada por una intercalación de niveles de areniscas rojizas finas intercaladas con niveles pelíticos de color gris, la calidad de las rocas en cuanto al grado de fracturamiento y alteración es mejor que lo observado en los tramos superiores, aunque es posible observar la presencia de diaclasas verticales y subverticales. El nivel freático fue alcanzado a los 15,20 metros.

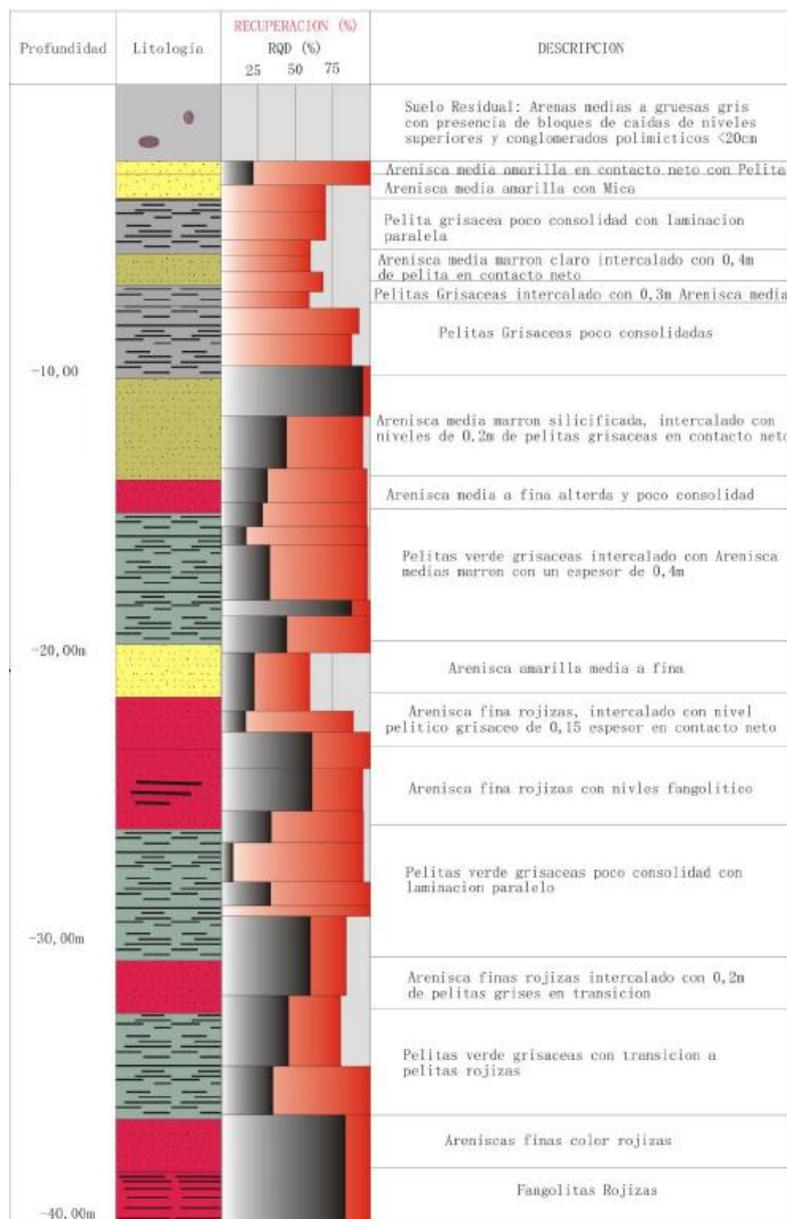


Figura 39. Perfil litológico del Sondeo SD-04 (brindado por el grupo consultor).

El sondeo SD-05 (Figura 40) se localiza en la parte baja del margen izquierdo del río Neuquén. Los primeros 40 metros del sondeo están caracterizados por pelitas rojizas con laminación paralela y cruzada, con presencia de diaclasas verticales a subverticales con presencia de óxido, es posible distinguir en ciertos niveles la presencia de pequeñas venillas de CaCO₃. Finalmente hasta el final de sondeo, es decir, 45 metros de profundidad, se encuentra un nivel compuesto por pelitas verdes caracterizadas por presentar diaclasas subverticales abiertas con presencia de óxidos y arcillas en sus paredes, el grado de consolidación es bajo respecto a los tramos superiores. Para este ensayo de perforación fue posible alcanzar el nivel freático a los 10 metros.

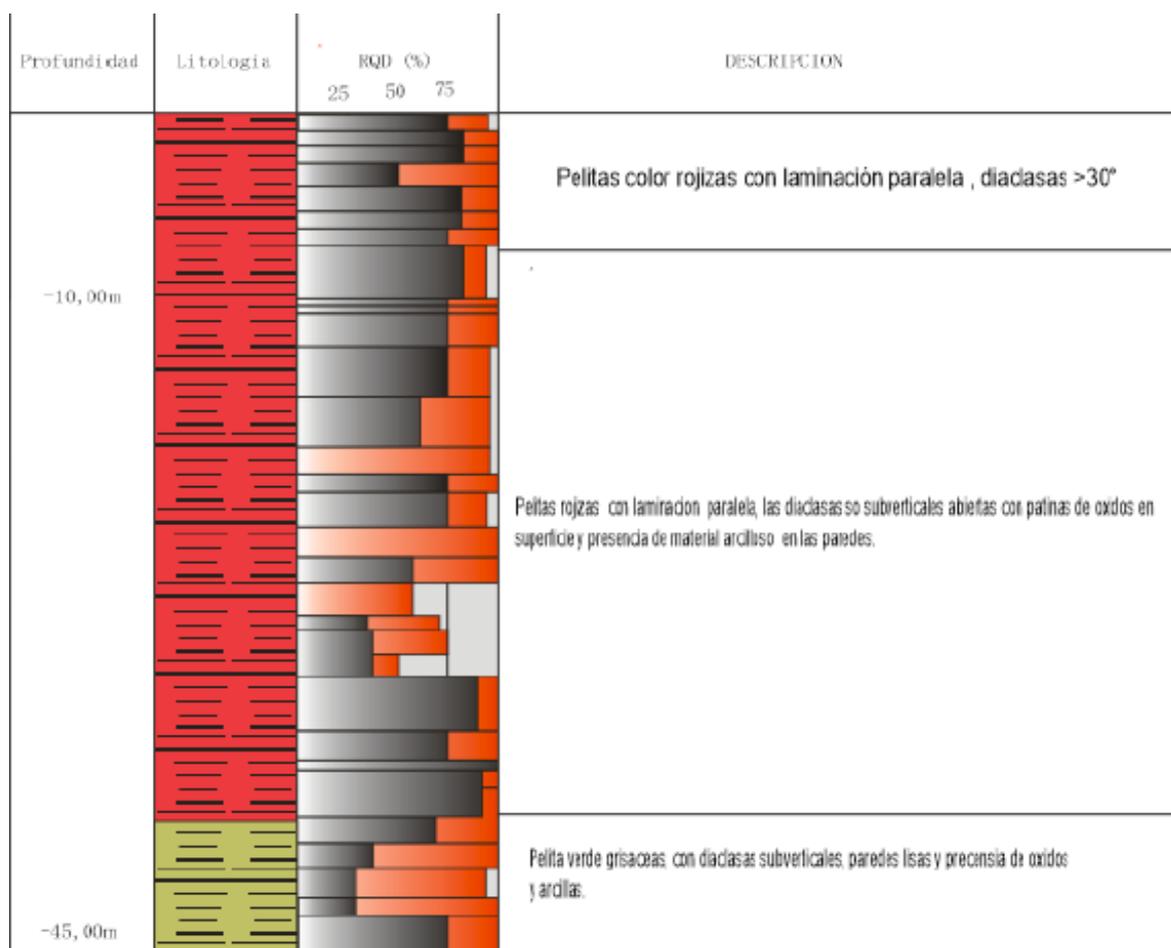


Figura 40. Perfil litológico del sondeo SD-05 (brindado por el grupo consultor).

El sondeo SD-06 (Figura 41) se localiza en el sitio que corresponde a los canales de desvío de la presa. Inicialmente el sondeo está conformado por aproximadamente 8 metros de roca altamente alterada y meteorizada en contacto con 33 metros de areniscas finas rojizas muy fracturadas, caracterizadas por la presencia de diaclasas subverticales cerradas rellenas de CaCO₃ y diaclasas abiertas con presencia de óxidos y arcillas en las paredes, estos niveles se caracterizan por presentar bajos valores de RQD. De los 40 a los 60 metros, además de observar valores de RQD mayores a los niveles anteriores, el sondeo se caracteriza por estar conformado por areniscas finas intercaladas con niveles de fangolitas color rojizo. En dicho tramo es posible observar la presencia de diaclasas verticales a subverticales cerradas con presencia de CaCO₃ y diaclasas abiertas con patinas de óxidos. El último tramo del ensayo de perforación que culmina a los 95 metros, está conformado por una sucesión areniscas amarillentas con presencia

de diaclasas subverticales intercaladas con niveles de pelitas grisáceas con laminación paralela y presencia de diaclasas subhorizontales. A lo largo de este tramo es posible observar la presencia de óxidos en las paredes de las diaclasas y, además, la presencia de CaCO₃ relleno de las mismas.

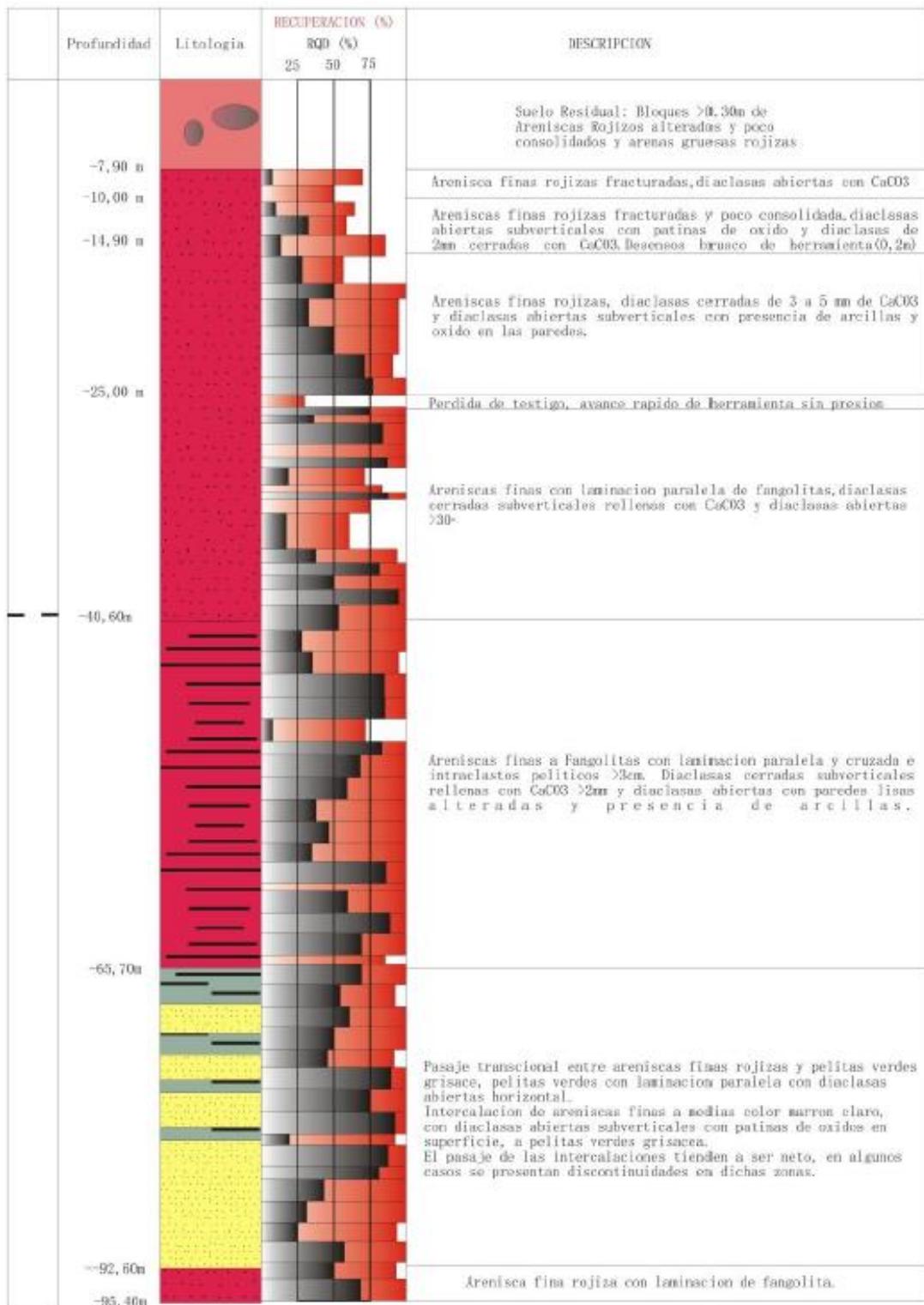


Figura 41. Perfil esquemático del sondeo SD-06 . (brindado por el grupo consultor)

El sondeo SD-07 (Figura 42) fue realizado en el sitio correspondiente a la cara de hormigón aguas arriba del proyecto. Inicialmente el sondeo está compuesto por 7 metros de conglomerados polimícticos que corresponden a depósitos aluviales antiguos del río Neuquén, cuyo tamaños de clastos varían entre 10 y 40 centímetros, los mismos se encuentran fuertemente cementados con carbonato. Por debajo se encuentra un nivel de 10 metros compuesto por areniscas finas rojizas poco consolidadas, caracterizadas por valores bajos de RQD, presencia de diaclasas abiertas rellenas de CaCO_3 con óxidos y arcillas en las paredes de las mismas. El tramo que comprende los 17-20 metros está conformado por pelitas rojizas con laminación paralela, caracterizadas por abundantes diaclasas subhorizontales rellenas de CaCO_3 . A partir de los 25 metros hasta el final del sondeo, se observa inicialmente un nivel de 1,5 metros compuesto por pelitas grisáceas con laminación caracterizadas por la presencia de diaclasas con arcillas en las paredes, seguido por 24 metros de areniscas finas amarillentas con presencia de filosilicatos, elevado contenido de piritita y diaclasas subhorizontales con óxidos y micas en las paredes. Cabe destacar el notorio aumento de los valores de RQD a desde los 17 metros de profundidad hasta el final del sondeo.

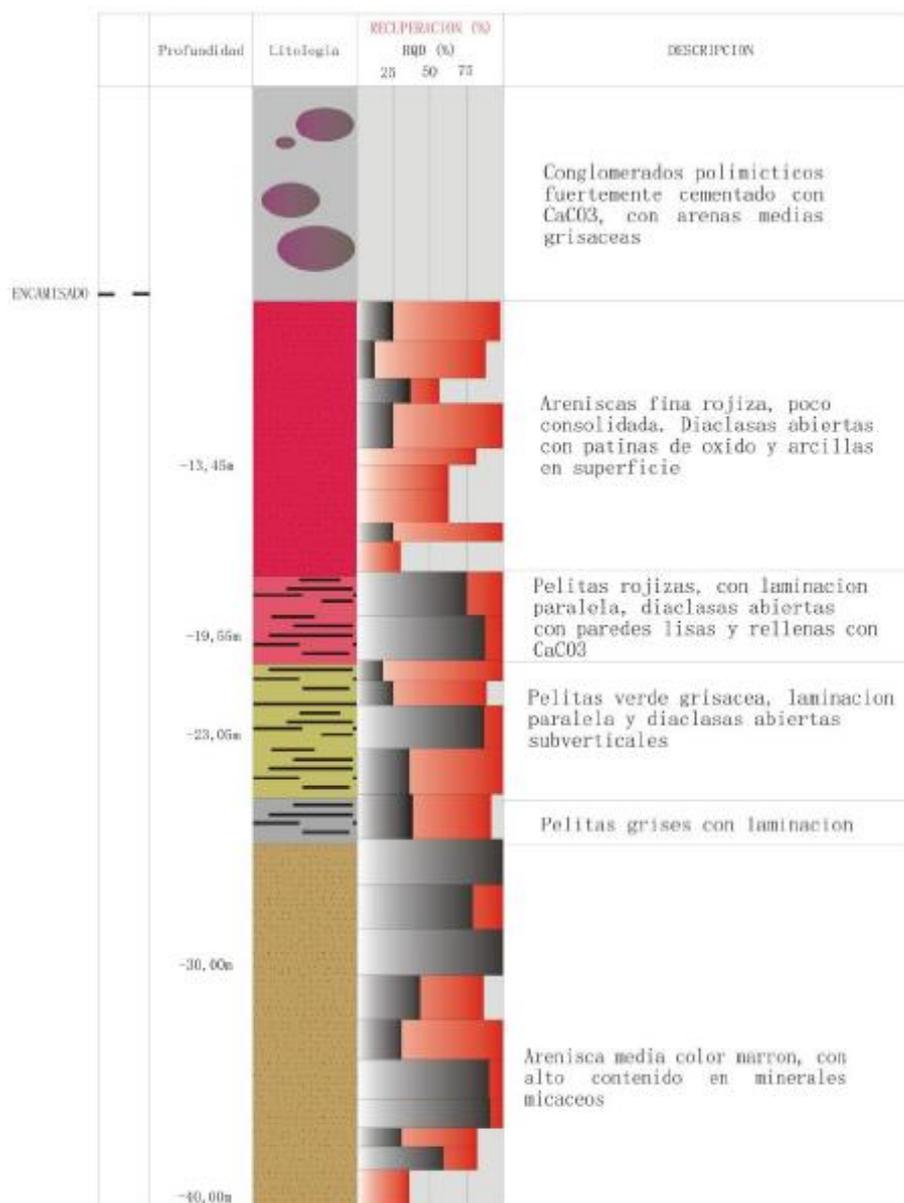


Figura 42. Perfil esquemático del sondeo SD-07 (brindado por el grupo consultor).

5.4 Análisis de perfiles sísmicos

En la siguiente figura 44 se observa la ubicación de los perfiles sísmicos y ensayos M.A.S.W realizados por el grupo consultor.

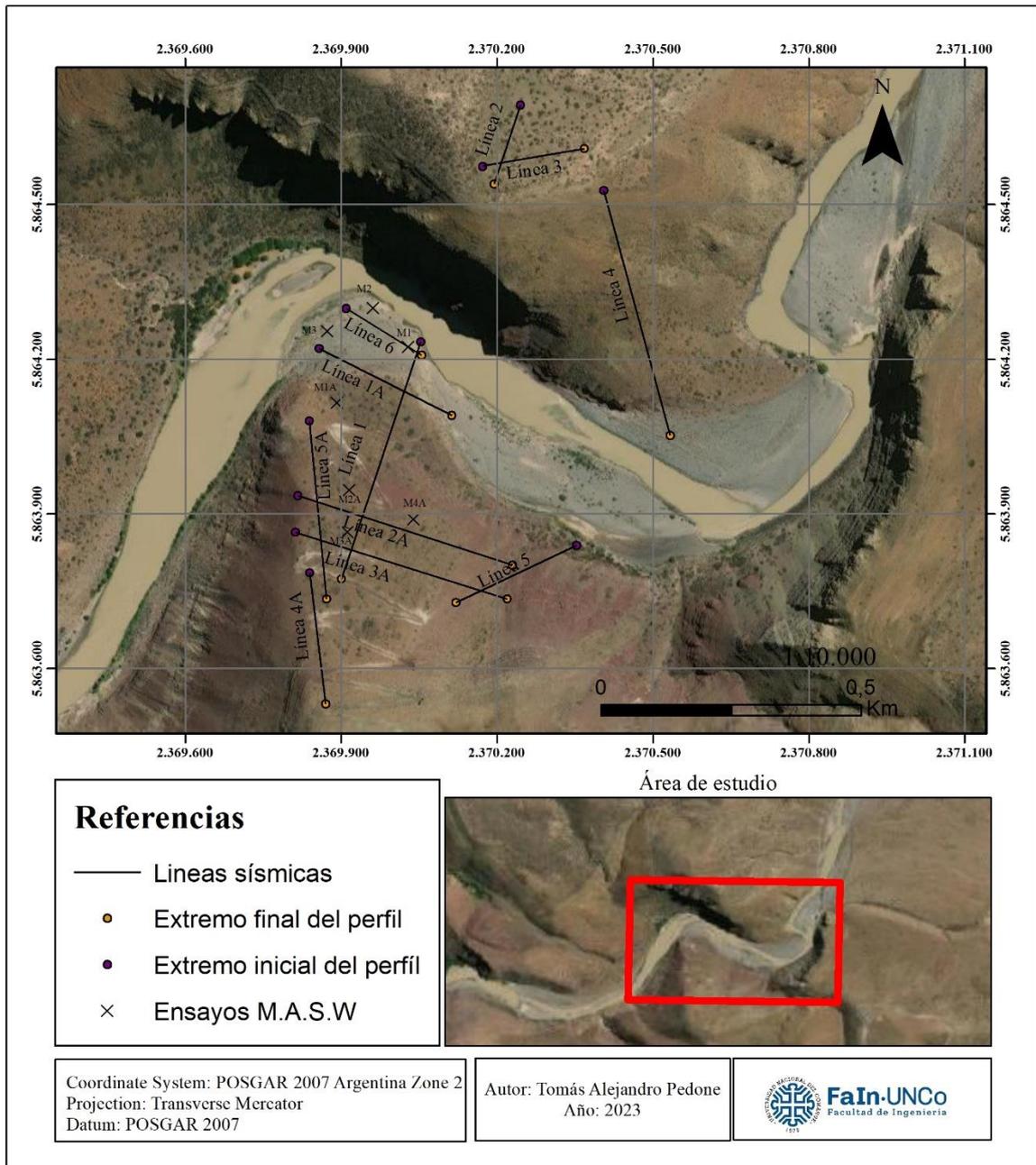


Figura 43. Ubicación de los perfiles sísmicos y ensayos MASW.

Primer etapa:

El perfil sísmico 1 (Figura 44) fue realizado en dirección NO-SE, en la misma dirección que el eje de la presa. Debido a la cercanía del perfil sísmico con los perfiles SD-01 y SD-02 se pudo realizar una correlación entre dicho perfil y los sondeos. A lo largo del perfil se puede observar una capa superficial de baja velocidad que corresponde a material suelto tipo suelo compuesto por arenas gruesas, gravas y conglomerados. Por debajo se observa un nivel cuya velocidad promedia los 1500 m/s, a partir de la información de sondeos es posible afirmar que dicho nivel está conformado por rocas que presentan valores bajos de RQD y además, se encuentran intensamente fracturadas y alteradas. Como puede ser observado a lo largo del perfil, las capas inferiores culminan con estratos cuyas velocidades superan los 2500 m/s, valores que se correlacionan con rocas de muy buena calidad. Cabe destacar que en el sector derecho del perfil los valores de velocidad son mayores debido a la cercanía con el río Neuquén, ya que la humedad produce un aumento de la velocidad sísmica V_p . Otro rasgo llamativo que puede ser observado en este perfil, es la forma acanalada que presentan los estratos en la parte superior del macizo.

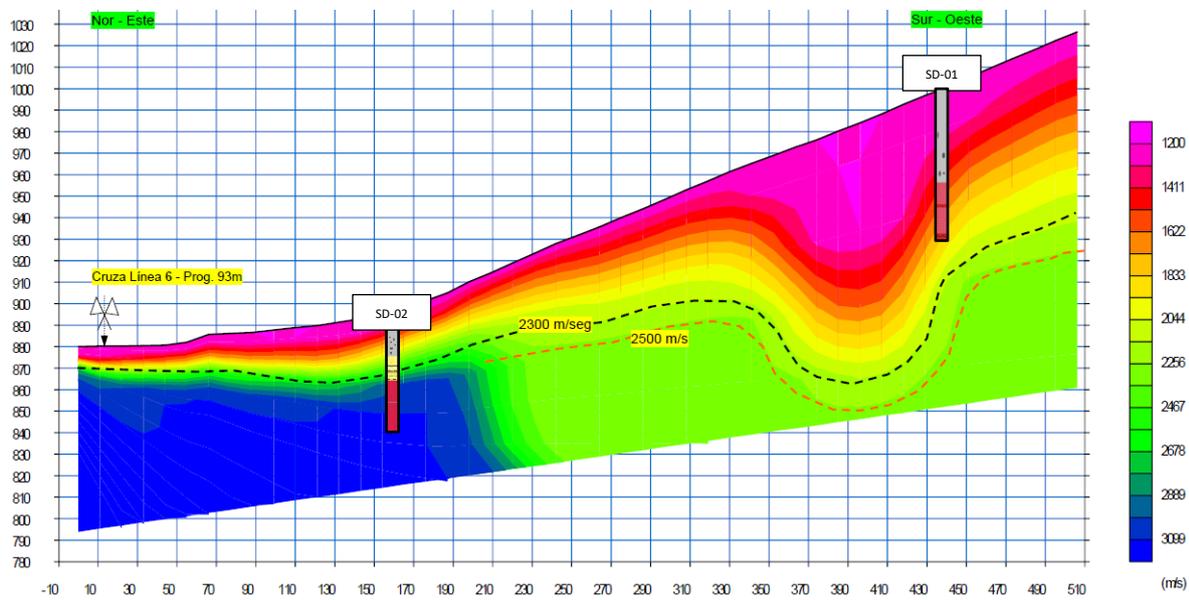


Figura 44. Línea Sísmica 1 (brindado por el grupo consultor).

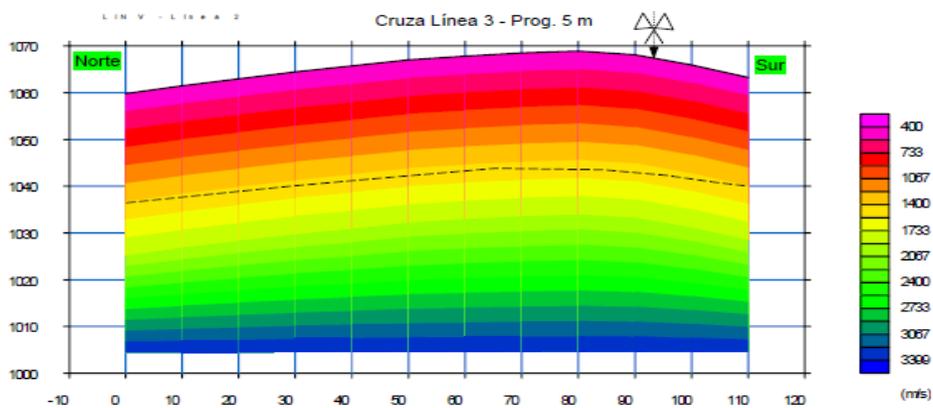


Figura 45. Línea sísmica 2 (brindado por el grupo consultor).

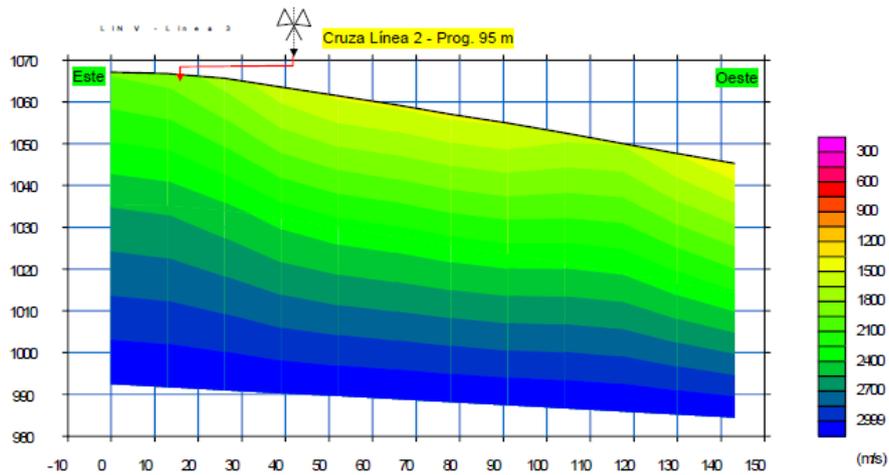


Figura 46. Línea sísmica 3 (brindado por el grupo consultor).

Los perfiles sísmicos 2 y 3 (Figura 45 y Figura 46) se localizan en la parte superior del macizo izquierdo del río Neuquén. En ambos perfiles es posible observar un nivel superficial con velocidades que se encuentran entre los 400 y 700 m/s, valores de velocidad atribuidos a suelo suelto. Por debajo se encuentra un nivel cuya velocidad es de 1700 m/s, valores posiblemente asociados a rocas muy alteradas o con elevado grado de fracturamiento. Finalmente ambos perfiles culminan con niveles cuyas velocidades superan los 2500 m/s, es decir, rocas en buen estado

El perfil sísmico 4 (Figura 47) fue realizado en el macizo izquierdo del río Neuquén en dirección NO-SE en cercanía al sondeo SD-05 por lo que se pudo realizar una correlación entre ambos. Los niveles superficiales presentan velocidades sísmicas bajas (400 a 1000 m/s) que corresponde a suelo suelto. Por debajo se destaca un nivel cuya velocidad promedio los 1500 m/s, dicho nivel posiblemente este conformado por rocas intensamente fracturadas y alteradas. Finalmente el perfil culmina con una capa que supera los 2100 m/s, es decir, rocas en buen estado, lo que se correlaciona con los elevados valores de RQD de las rocas en el sondeo SD-05.

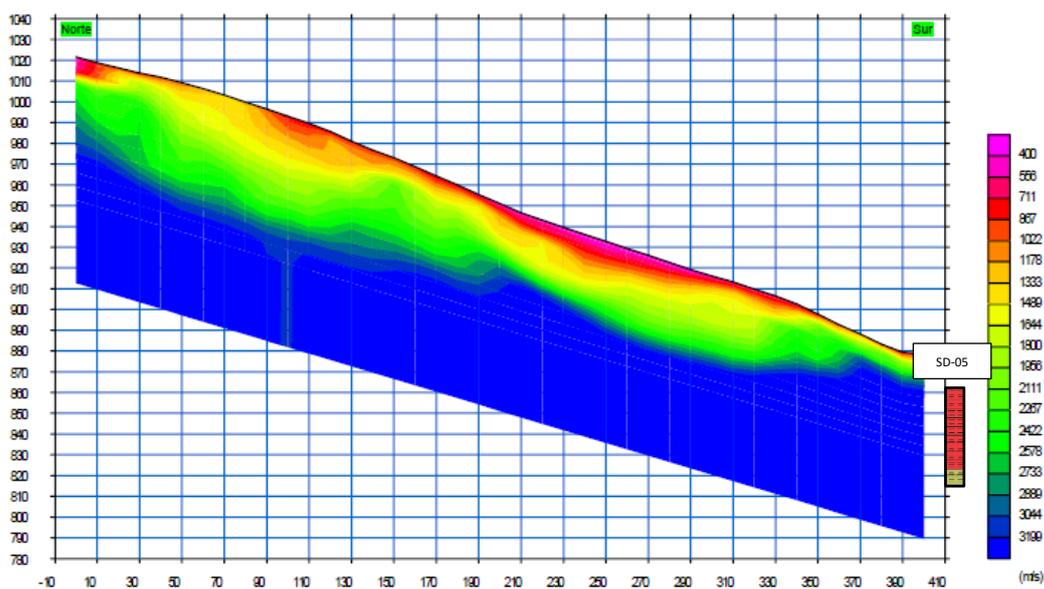


Figura 47. Perfil sísmico 4 (brindado por el grupo consultor).

En el perfil sísmico 5 (Figura 48) realizado sobre el macizo izquierdo del río Neuquén en dirección NE-SO, se observa una sucesión de capas con distintas velocidad de gran continuidad lateral. En la parte superficial, es decir, los materiales que componen la superficie del terreno presentan bajas velocidades, posiblemente asociados a suelos, pero a diferencia de los anteriores perfiles, dichos niveles no presentan grandes espesores. Inmediatamente por debajo se observa una capa de gran espesor que presenta una velocidad de 2000 m/s, que posiblemente corresponda a rocas de buena. Al igual que los demás perfiles, por debajo se destaca un nivel compuesto por rocas de muy buen estado cuyas velocidades superan los 3000 m/s

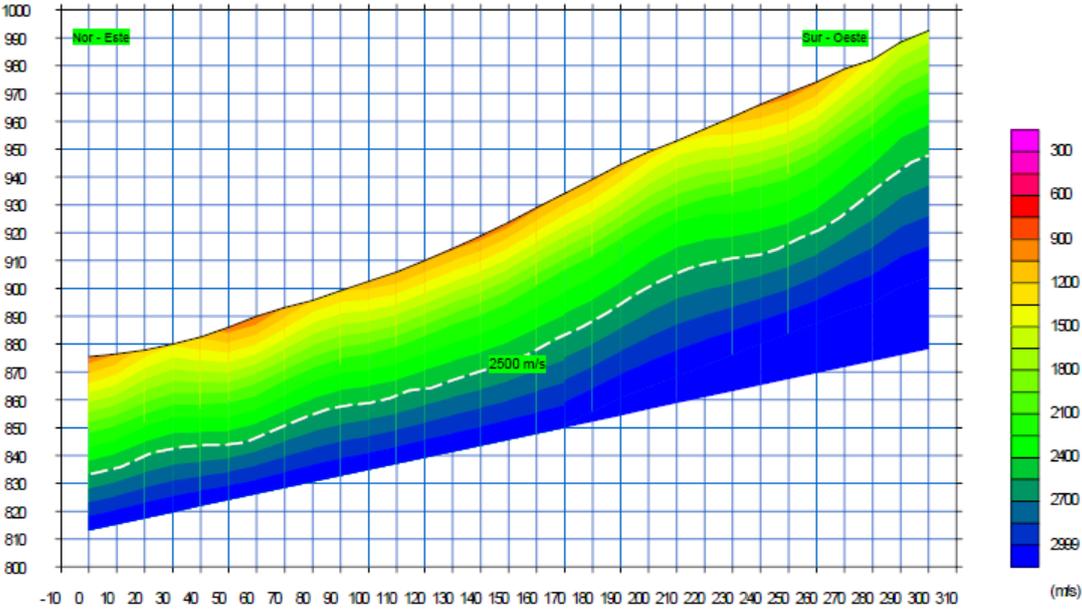


Figura 48. Perfil sísmico 5 (brindado por el grupo consultor).

El perfil sísmico 6 (Figura 49) realizado en cercanías al río Neuquén en dirección O-E. Presenta una capa superficial con una velocidad de 450 m/s que corresponde a materiales aluviales sueltos del río. Por debajo se encuentra una capa de 1200 m/s que corresponde a materiales aluviales saturados y finalmente el perfil culmina con una capa de 3000 m/s que corresponde a una roca de muy buen estado.

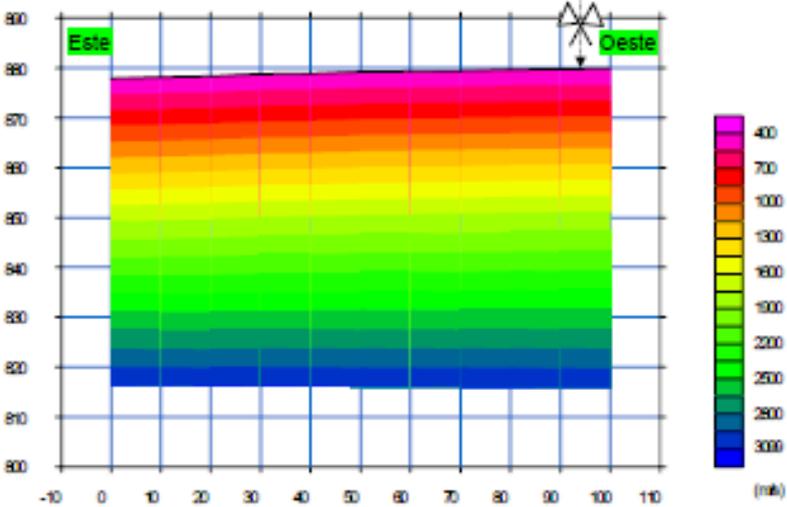
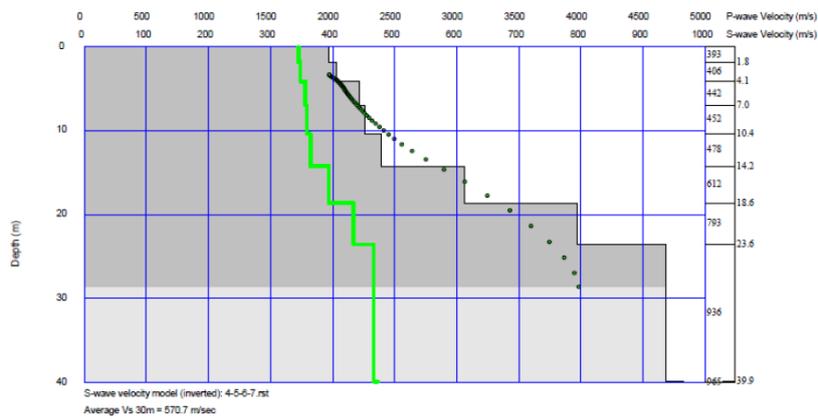


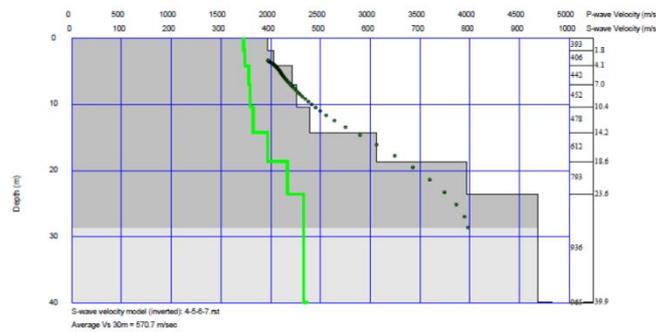
Figura 49. Perfil sísmico 6 (brindado por el grupo consultor).



Prof. (m)	Vs (m/seg)	Vp* (m/seg)	NsPT	Vp/Vs	Poisson v
1,8	393	1.750	51	4,45	0,47
4,1	406	1.780	55	4,38	0,47
7,0	442	1.800	64	4,07	0,47
10,4	452	1.830	67	4,05	0,47
14,2	478	1.870	75	3,91	0,47
18,6	612	1.900	121	3,10	0,44
23,6	793,00	1.950	200	2,46	0,40
39,9	936,00	2.300	276	2,46	0,40

Vp* estos valores se han obtenido de gráfico masw

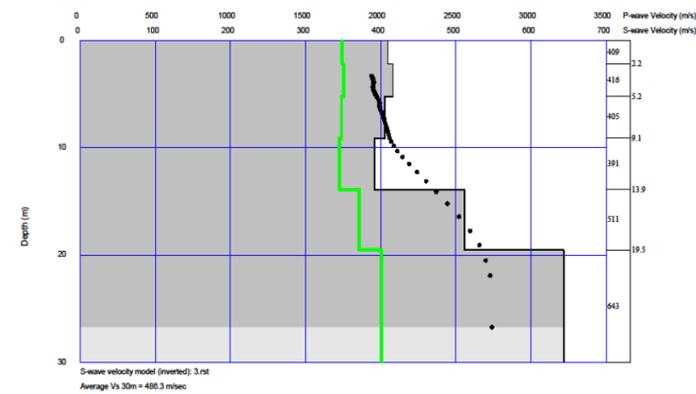
Figura 50. Ensayo y resultados M1 (brindado por el grupo consultor).



Prof. (m)	Vs (m/seg)	Vp* (m/seg)	NsPT	Vp/Vs	Poisson v
1,6	329	1.700	36	5,17	0,48
3,6	296	1.680	30	5,68	0,48
6,0	305	1.680	31	5,51	0,48
8,9	475	1.800	74	3,79	0,46
12,1	606	1.980	119	3,27	0,45
15,7	640	2.000	132	3,13	0,44
19,7	688,00	2.050	152	2,98	0,44
24,2	828,00	2.250	218	2,72	0,42
38,7	1030,00	2.450	332	2,38	0,39

Vp* estos valores se han obtenido de gráfico masw

Figura 51. Ensayos y resultados M2 (brindado por el grupo consultor).



Prof. (m)	Vs (m/seg)	Vp* (m/seg)	N _{SPT}	Vp/Vs	Poisson v
2,2	409	1.750	55	4,28	0,47
5,2	416	1.760	57	4,23	0,47
9,1	405	1.750	54	4,32	0,47
13,9	391	1.740	51	4,45	0,47
19,5	511	1.800	85	3,52	0,46
30,0	643	2.000	133	3,11	0,44

Vp* estos valores se han obtenido de gráfico masw

Figura 52. Ensayos y resultados M3 (brindado por el grupo consultor).

De los 3 ensayos M.A.S.W (Figuras Figura 50, Figura 51 y Figura 52) realizados en la primera etapa, no fueron identificados niveles con valores de onda sísmica Vs que presenten riesgo asociado al fenómeno de licuefacción.

Segunda etapa

El perfil sísmico 1A fue realizado en dirección NO-SE en cercanías del río Neuquén (Figura 53). Debido a la influencia de la humedad presente en el terreno las velocidades observadas en este perfil son elevadas. Fue posible establecer una correlación entre dicho perfil y los sondeos SD-04 y SD-02 debido a la proximidad de los mismos respecto a la línea sísmica. La línea sísmica 1A se caracteriza por presentar una serie estratos horizontales de diverso espesor, divididos según la velocidad sísmica. Tal y como se evidencia en los sondeos, la porción superior de la línea está conformada por una capa superficial de 600 m/s y 1000 m/s conformada por arenas sueltas y depósitos aluviales compuestos por conglomerados polimícticos. Cabe destacar que la capa asociada a las arenas y depósitos aluviales presenta un mayor espesor hacia el centro tal y como se observa en los espesores del sondeo SD-02. Como se observa en ambos sondeos, por debajo de los depósitos aluviales y arenas, es posible observar una capa de 1500 a 2000 ms/s asociada a rocas de mala calidad, posiblemente caracterizadas por una intensa alteración y fracturamiento. Finalmente y en concordancia con los valores de RQD de ambos sondeos, se destacan dos niveles cuyas velocidades corresponden a rocas de muy buena calidad, dichos valores son de 2500-4000m/s.

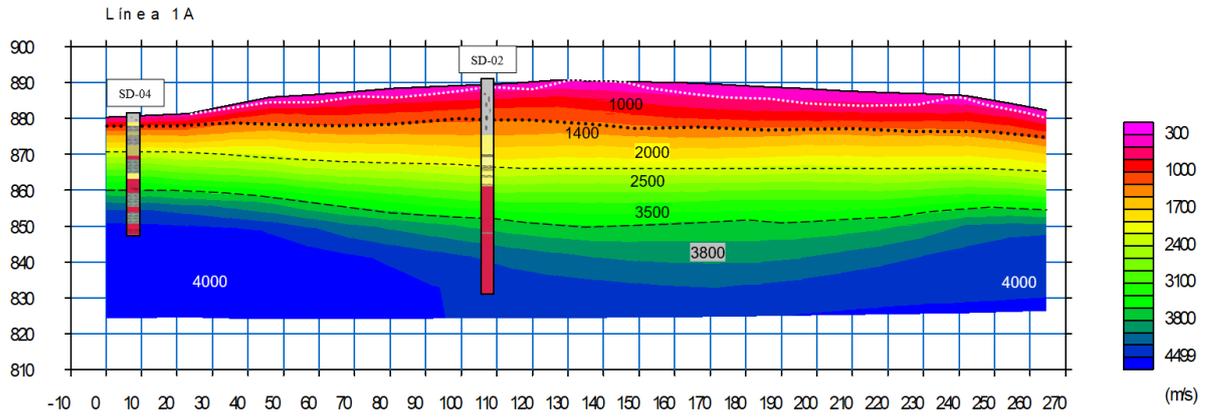


Figura 53. Líneas sísmica 1A (brindado por el grupo consultor).

Los perfiles sísmicos 2A (Figura 54) y 3A (Figura 55) se localizan en la parte alta del macizo (Figura 43) por lo que no hay presencia de saturación de agua en el terreno. Ambos perfiles están caracterizados por presentar una capa superficial con valores de velocidad de la onda sísmica V_p inferiores a 1200 m/s, debido a la cercanía del perfil 3A con el sondeo SD-01 es posible afirmar que dicha capa superficial está conformada por arenas sueltas y conglomerados polimícticos, dichos materiales superficiales se correlacionan con la capa superficial observada en el perfil 1A. Por debajo del nivel conformado por material suelto y conglomerados, es posible distinguir una capa con una velocidad promedio de 1500 m/s. Debido a la información obtenida a partir de los sondeos SD-01 y SD-06 localizados en proximidades al perfil 3A, es posible afirmar que dicho nivel está conformado por areniscas rojizas medianas con un elevado grado de alteración e intenso fracturamiento con abundantes diaclasas. Ambos perfiles sísmicos culminan con capas cuyos valores de velocidad sísmica V_p se encuentra entre los 2000-3000 m/s, valores asociados a rocas de muy buena calidad, tal y como es evidenciado en el aumento de los valores de RQD en los sondeos situados en cercanía a la línea sísmica, además, es posible afirmar que dichos niveles corresponden a intercalaciones de areniscas con niveles fangolíticos.

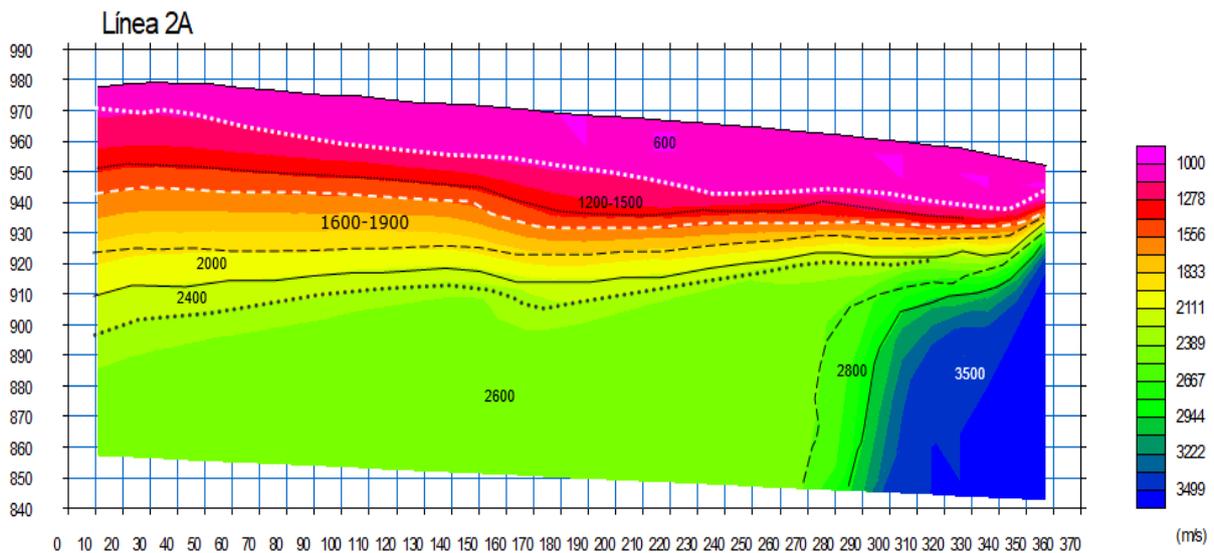


Figura 54. Línea sísmica 2A (brindado por el grupo consultor).

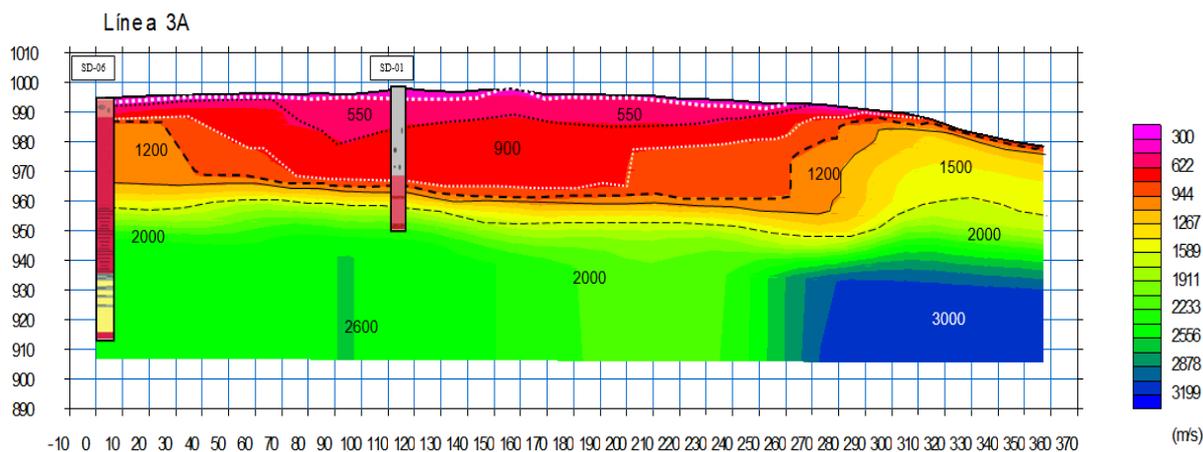


Figura 55. Línea Sísmica 3A (brindado por el grupo consultor).

Los perfiles sísmicos 4A y 5A (Figura 56) presentan una dirección norte-sur, es decir que fueron realizados dirección perpendicular a los perfiles 1A, 2A y 3A. Debido a que ambos perfiles fueron realizados en la misma dirección, el grupo consultor realizó un empalme de los mismos y de esta manera se pudo observar la continuidad de los distintos niveles que componen el macizo. A través de la interpretación de ambos perfiles, se pudo identificar en la parte superficial de ambos, el mismo nivel identificado en los perfiles realizados en la parte alta del macizo, dicho nivel se caracteriza por presentar una velocidad entre 500 y 800 m/s, valores correspondientes a arenas gruesas, gravas y conglomerados. Por debajo, se pudo observar la gran continuidad lateral que presenta el nivel de bajo RQD, intensamente alterado y fracturado identificado en los perfiles 2A y 3A cuya velocidad se promedia en 1500 m/s. Finalmente ambos perfiles culminan con estratos cuyos velocidades son de 3000 m/s, es decir, rocas de muy buena calidad compuestas por intercalaciones de areniscas medianas y niveles fangolíticos con valores de RQD altos.

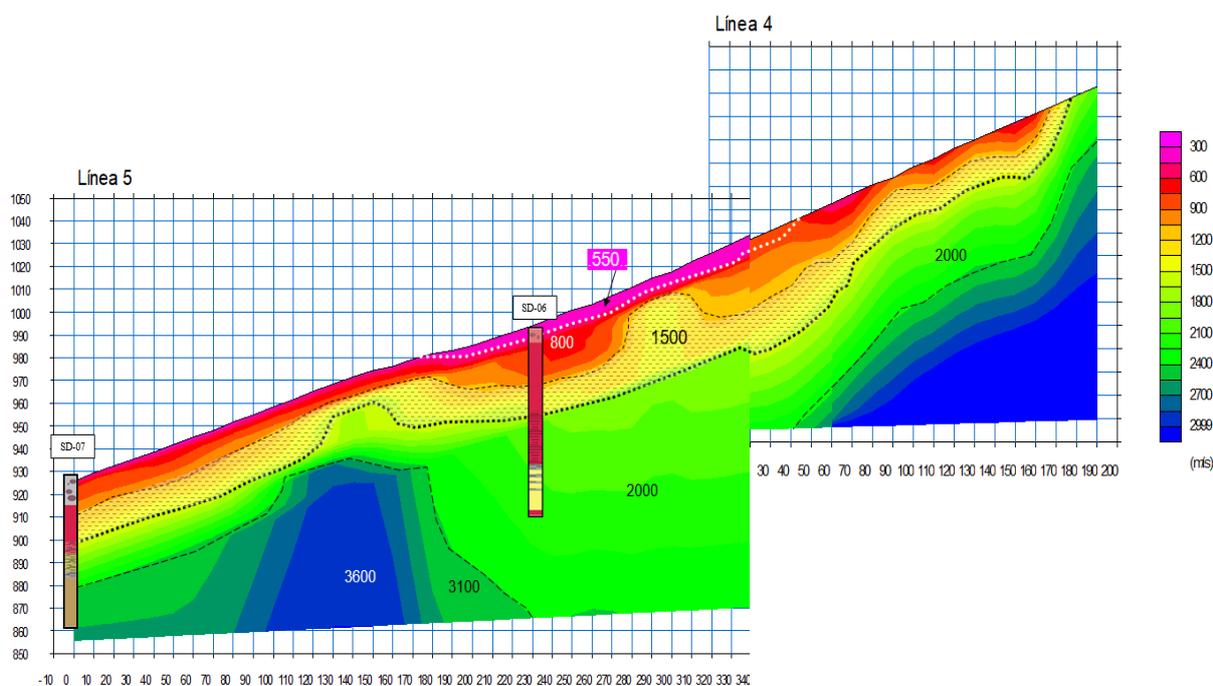


Figura 56. Empalme entre los perfiles sísmicos 4A y 5A (brindado por el grupo consultor).

A partir del análisis e interpretación los cuatro ensayos M.A.S.W (Figuras Figura 57, Figura 58, Figura 59 y Figura 60) realizados en la segunda etapa, no se identificaron valores de velocidad de la onda sísmica V_s que puedan ser afectados por el fenómeno de licuefacción frente a la ocurrencia de un sismo, sin embargo cabe destacar un nivel de 2,6 metros correspondientes al ensayo M1-A caracterizado por presentar una velocidad de 210 m/s, es decir, un nivel con valores de velocidad que presentan posible riesgo de licuefacción.

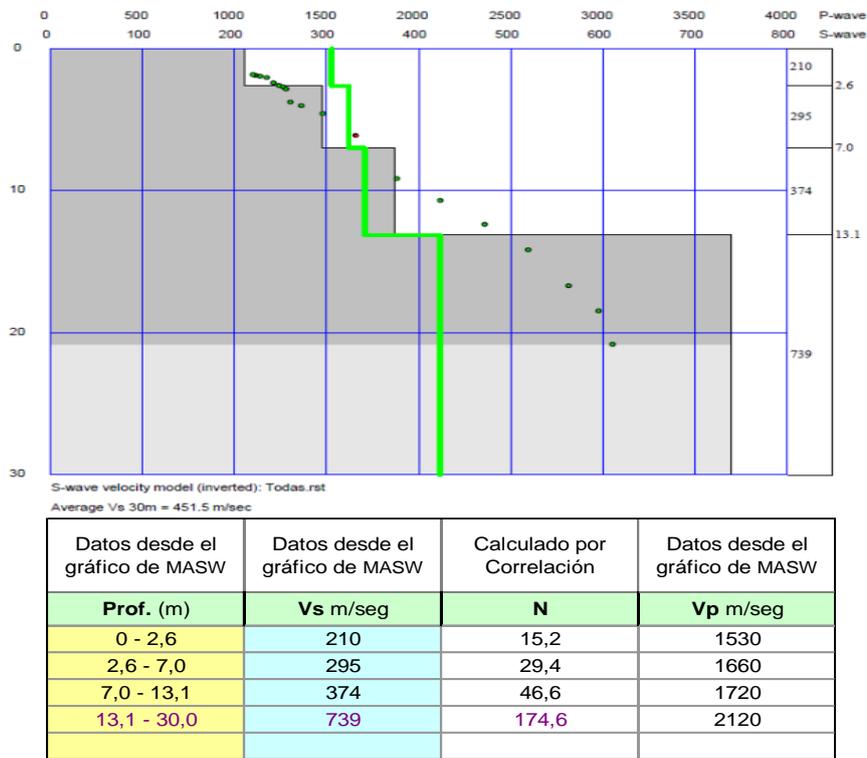


Figura 57. Ensayo y resultados M1-A (brindado por el grupo consultor).

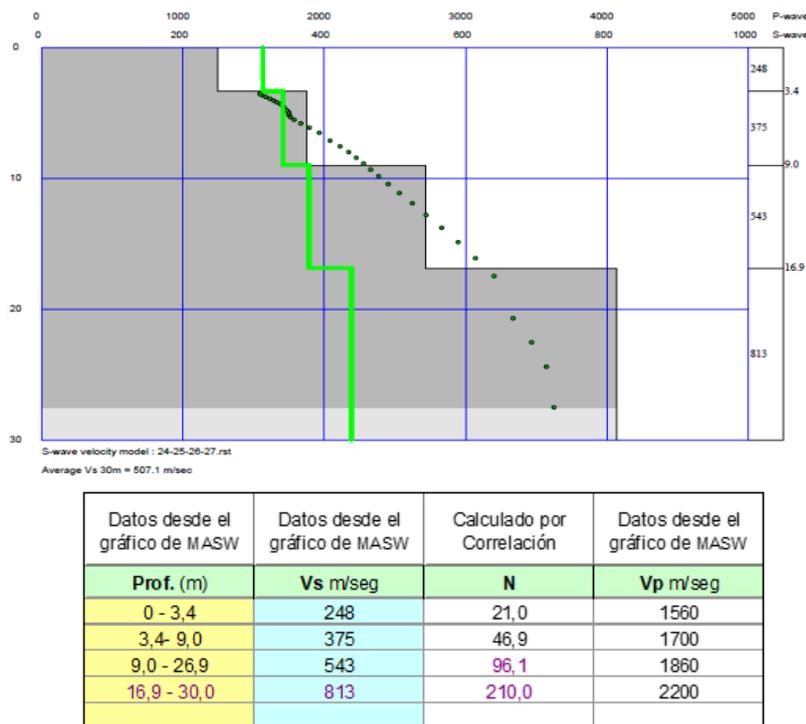
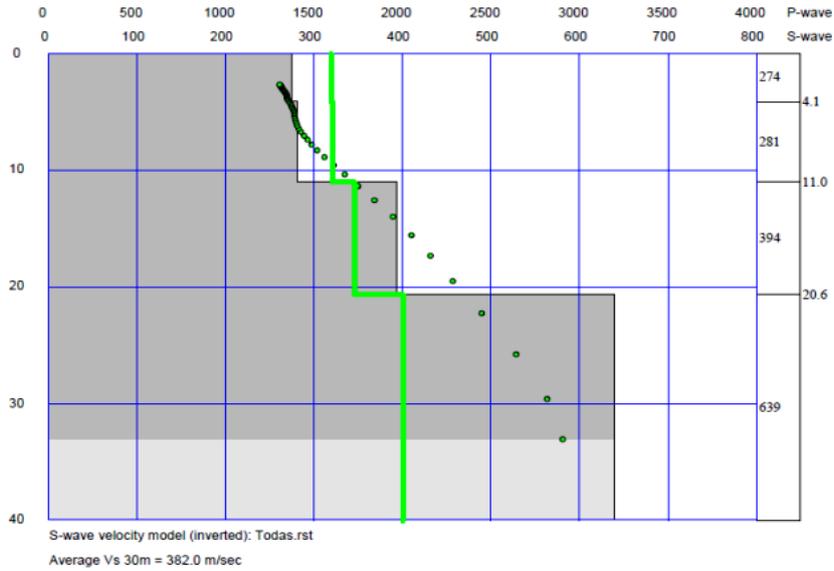
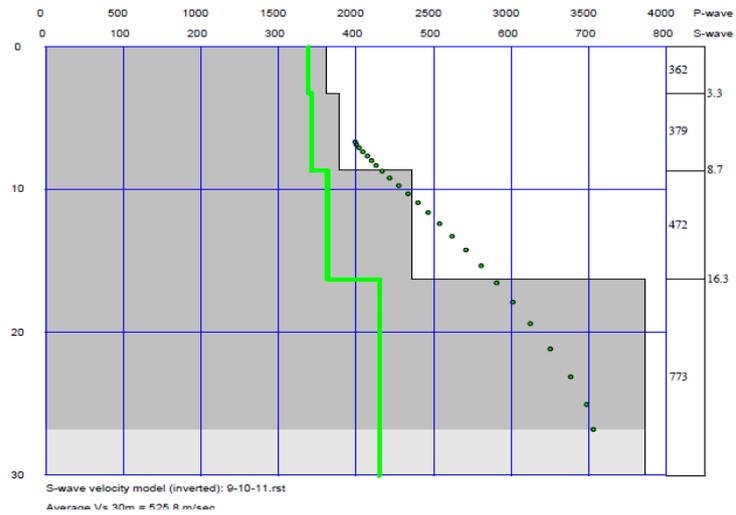


Figura 58. Ensayo y resultados M2-A (brindado por el grupo consultor).



Datos desde el gráfico de MASW	Datos desde el gráfico de MASW	Calculado por Correlación	Datos desde el gráfico de MASW
Prof. (m)	Vs m/seg	N	Vp m/seg
0 - 4,1	274	25,5	1600
4,1- 11,0	281	26,8	1615
11,0 - 20,6	394	51,6	1720
20,6 - 30,0	639	131,7	2000

Figura 59. Ensayo y resultados M3-A (brindado por el grupo consultor).



Datos desde el gráfico de MASW	Datos desde el gráfico de MASW	Calculado por Correlación	Datos desde el gráfico de MASW
Prof. (m)	Vs m/seg	N	Vp m/seg
0 - 3,3	362	43,8	1700
3,3 - 8,7	379	47,9	1780
8,7 - 16,3	472	73,2	1810
16,3 30,0	773	190,5	2180

Figura 60. Ensayos y resultados M4-A (brindado por el grupo consultor).

5.5 Análisis geomorfológico regional

El dominio morfoestructural del área de estudio corresponde a montañas y serranías, dentro del mismo fue posible identificar 3 tipos de geoformas en rocas sedimentarias y volcánicas las cuales fueron clasificadas en base al proceso geomorfológico a partir del cual fueron originadas, además se las clasificó en función del grado de inclinación del terreno, es decir la pendiente media. (Figura 61).

5.5.1 Geoformas clásticas:

En base a la clasificación utilizada en el área de estudio fueron identificadas diversas geoformas de origen clástico.

- **Relieve ligeramente empinado:** esta categoría se caracteriza por presentar un rango de inclinación entre 8° - 15° y corresponde a la clase moderada.
- **Relieve empinado:** está categoría corresponde a valores de pendiente que se encuentran entre los 15° y 30° , y pertenece a la clase moderadamente fuerte. Dentro de esta categoría es posible la generación de erosión hídrica moderada a fuerte y, además, se observan procesos de remoción en masa puntuales, tales como deslizamientos.
- **Relieve muy empinado:** esta categoría corresponde a la clase fuerte cuyos valores de pendiente superan los 30° , dentro de la misma se observan procesos de remoción en masa en forma de caída de bloques e intensa erosión hídrica.

5.5.2 Geoformas fluviales:

Fueron 3 las principales geoformas de origen fluvial identificadas en el área de estudio, todas ellas con rangos de inclinación entre 0° - 2° es decir, geoformas con relieves plano o cóncavo. En primer lugar se encuentran los depósitos actuales del Río Neuquén, formas compuestas por bloques, gravas y arenas, que se encuentran en ambas márgenes del río. En segundo lugar se identificó un nivel de depósitos aluvionales correspondiente a antiguas terrazas del Río Neuquén en la margen derecho del río. Por último aguas abajo se identificó un extenso nivel de terrazas de edad pleistocena, conformado por depósitos aluvionales.

5.5.3 Geoformas volcánicas.

Las formas de origen volcánico presentes en el área de estudio corresponden a andesitas de la Formación Colipilli. Los rangos de pendiente de dichas formas, se encuentran entre los valores de 15° - 55° , dichos valores corresponden a las categorías de relieve empinado y muy empinado. En dichas geoformas fue posible observar diversos procesos dinámicos tales como, procesos de remoción en masa en forma de caída de bloques y erosión hídrica moderada a fuerte.

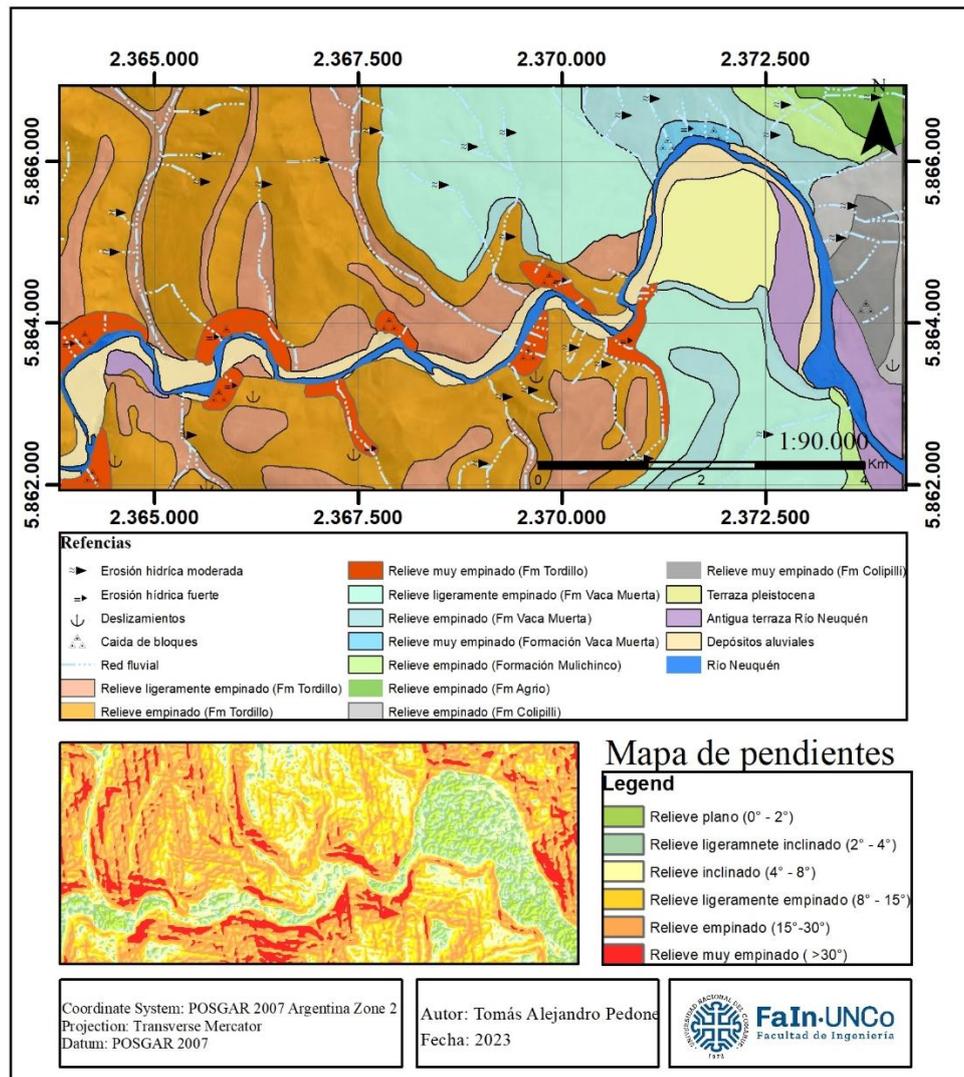


Figura 61. Mapa geomorfológico del área de estudio.

5.6 Determinación de problemas geológicos- geotécnicos

Dentro del área de estudio las sucesiones aflorantes del margen sur del rio Neuquén que conforman el sitio correspondiente al vaso de la presa, se caracterizan por presentar una deformación conformada por una serie de plegamientos de gran magnitud, a los cuales se encuentran asociadas estructuras menores tales como pliegues y fallas. Sin embargo, la presencia de estas estructuras de deformación no constituye un problema de carácter geológico-geotécnico para el futuro desarrollo de obras o llenado del embalse en las laderas estudiadas en el presente trabajo.

En base a los análisis de estabilidad para las laderas rocosas se pudo determinar que tanto para los sistemas de discontinuidades verticales y subverticales como para los de carácter horizontal presentes en cada una de ellas, no fueron identificadas amenazas o posibles riesgos de generación de mecanismos de rotura, que impliquen un problema geotécnico para el desarrollo del proyecto o roturas de futuras obras. Sin embargo cabe destacar que en cada uno de ellos se identificó la presencia de caída de bloques de pequeño tamaño.

Como se puede observar en la (Figura 62), los diversos afloramientos de la zona de estudio fueron agrupados teniendo en cuenta la susceptibilidad a la generación de procesos erosivos e inestabilidad en función de la pendiente del terreno. Aquellos sectores de color rojo, corresponden a sitios con alta susceptibilidad, los mismos se encuentran asociados a la generación de grandes movimientos de ladera y caída de bloques. Los afloramientos de color anaranjado son aquellos sitios con moderada susceptibilidad y se caracterizan por ser propensos a la generación de procesos de denudación y pequeños movimientos de ladera. Por otra parte, los sectores de color amarillo, son afloramientos que debido a su baja pendiente presentan baja susceptibilidad a la generación de procesos erosivos y de inestabilidad. Dichos sitios están vinculados a la generación de procesos erosivos de baja magnitud. Por último se encuentran los afloramientos de color verde, sitios de muy baja susceptibilidad a la generación de procesos erosivos.

En la (Figura 62) se puede observar la cota que alcanzaría el agua una vez llenado el embalse, por lo tanto, todos aquellos sitios que se encuentran en contacto con dicho nivel se verán afectados, ya sea por el incremento en el grado de susceptibilidad frente los procesos erosivos y de inestabilidad o por una reducción de la resistencia al corte de las rocas y suelos.

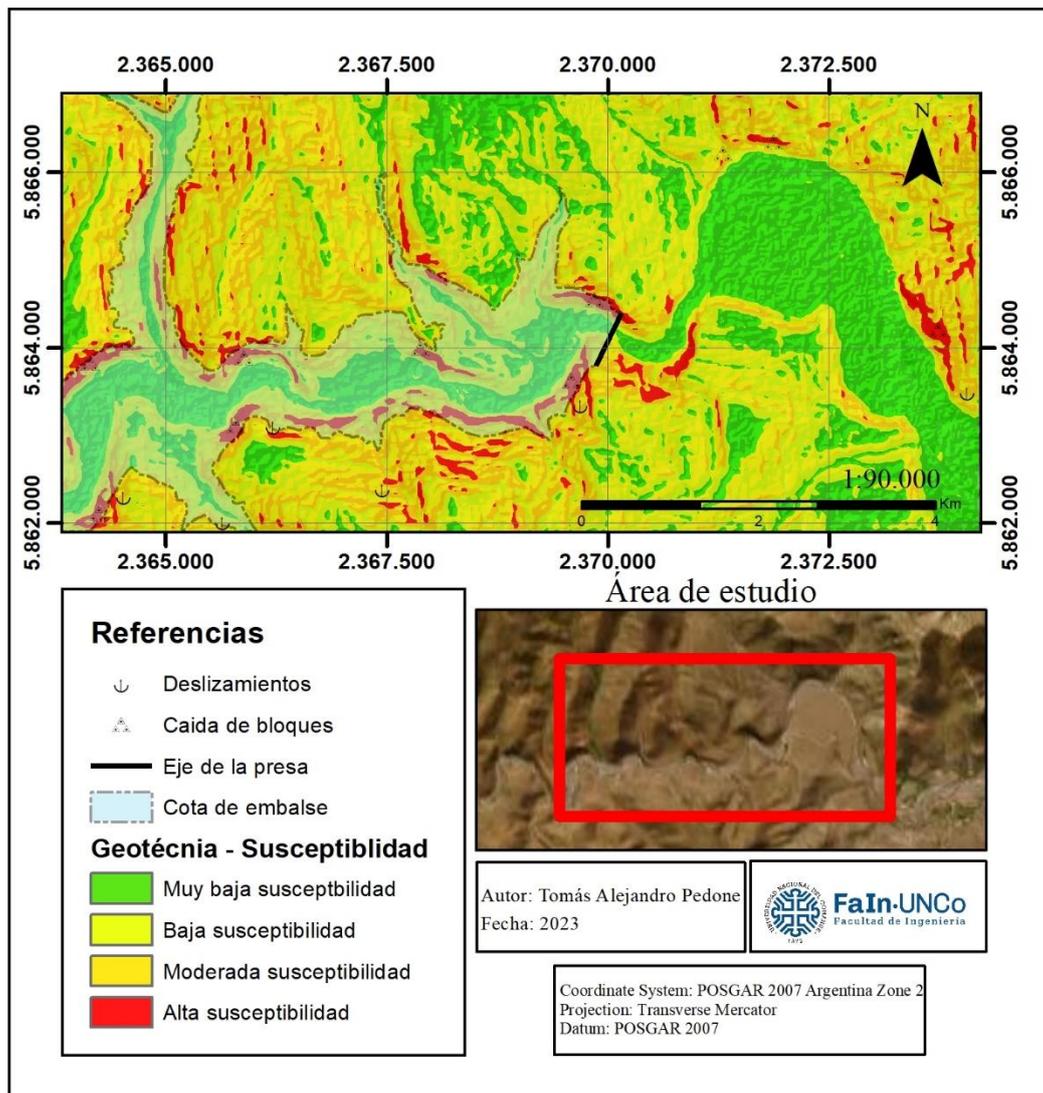


Figura 62. Mapa de susceptibilidad a la remoción en masa en función de la pendiente.

En base a las mediciones, observaciones y registros realizados durante los relevamientos de campo, la información obtenida a partir de sondeos y perfiles sísmicos, el macizo de la margen sur del río Neuquén presenta diversos signos de alteración, fracturamiento y presencia de minerales secundarios posiblemente originados a partir de un evento volcánico, lo cual constituye un problema de carácter geológico-geotécnico en la zona de emplazamiento de la presa. A su vez los depósitos conglomerádicos, gravas y la cubierta sedimentaria constituida por materiales sueltos que se encuentra por encima de los niveles superficiales del macizo en ambas márgenes, cuyo origen posiblemente sea atribuido a la migración de un antiguo cauce, resulta un problema de carácter geológico geotécnico para la ejecución de obras, sin embargo, mediante los ensayos M.A.S.W se pudo determinar que dichos niveles superficiales no presentan riesgos de producir fenómenos de licuefacción ante la ocurrencia de un sismo.

Como puede ser observado en la (Figura 63) los afloramientos correspondientes al sitio de emplazamiento de la presa, fueron clasificados en 4 unidades teniendo en cuenta la pendiente natural del terreno. A diferencia del mapa geotécnico regional, para esta clasificación también se tuvo en cuenta la composición litológica de los afloramientos ya que en este sector se fundarán las futuras obras del proyecto.

La unidad 1 de color verde, cuya pendiente no supera los 4°, está conformada por lutitas de la Formación Vaca Muerta y depósitos aluviales del río Neuquén. En términos geológicos-geotécnicos esta unidad presenta muy baja susceptibilidad frente a la generación de procesos erosivos y de inestabilidad. Por lo tanto dicha unidad no presenta un problema para la futura proyección de obras.

La unidad 2 de color naranja, superficialmente se encuentra conformada por materiales sueltos, es decir suelo compuesto por arenas gruesas con aportes de cenizas volcánicas. A través de sondeos, estudios geofísicos y observaciones realizadas durante las salidas de campo se pudo determinar que debajo de la cubierta sedimentaria, se encuentran depósitos conglomerádicos, gravas y brechas. A pesar de que la pendiente que caracteriza esta unidad presenta baja susceptibilidad frente a la generación de procesos erosivos e inestabilidad, la misma presenta un problema de carácter geológico-geotécnico en termino de los materiales que la componen. Los problemas asociados a la presencia de suelos son, en primer lugar, que los terrenos no tienen la capacidad de resistir incremento o disminuciones de tensiones, generando un sobrepaso en sus límites de seguridad. Otro de los problemas asociados a los suelos es la deformabilidad, un fenómeno que se produce cuando acciones externas o cargas inducidas producen grandes deformaciones del terreno. Por último el sifonamiento es un proceso de inestabilidad del suelo producido por un flujo de agua que anula las presiones efectivas de los suelos, generando una pérdida de la resistencia al corte de los mismos.

Los depositos que conforman la unidad 2 posiblemente fueron originados a partir de un gran evento deformacional desarrollado durante el Cretácico Tardío. Dicho evento produjo un gran cambio estructural en la región, a través del mismo, las sedimentitas jurásicas y cretácicas de la región comenzaron a bascularse, lo cual generó un reordenamiento de la configuración de la red de drenaje, provocando una migración de los canales fluviales generando un posible antiguo paleocauce (Figura 63). A medida que los estratos siguieron basculando, los antiguos rellenos de canal y planicies de inundación se vieron solapados por fragmentos de roca angulosos proveniente de las márgenes, es decir, depósitos típicos de abanicos coluviales. Finalmente asociado al vulcanismo que caracterizó a la región durante el paleógeno, se produjo a través de

fluidos de origen volcánico el aporte de carbonato a través de zonas permeables y diversos procesos de alteración junto con la depositación de minerales secundarios, tales como feldespatos, micas y óxidos.

La unidad 3 de color violeta corresponde afloramientos de la Formación Tordillo, la misma se caracteriza por presentar pendientes que presentan moderada susceptibilidad a la generación de procesos erosivos y de inestabilidad, entre ellos, procesos de denudación y pequeños movimientos de ladera. Debido a la información obtenida a través de perfiles sísmicos y sondeos, es posible afirmar que las rocas que componen esta unidad son de buena calidad en términos geotécnicos ya que presentan un bajo grado de fracturamiento y un elevado RQD, es decir, no se han encontrado evidencias que indiquen un problema de carácter geológico-geotécnico en dicha unidad.

La unidad 4 de color rosado, presenta una elevada susceptibilidad a la generación de procesos erosivos y de inestabilidad teniendo en cuenta las pendientes naturales del terreno que la caracterizan, por lo que dicha unidad presenta una elevada probabilidad de desarrollo de escarpes rocosos con caídas de bloques e intensos procesos de denudación. A pesar de las elevadas pendientes que caracterizan dicha unidad, es posible afirmar en base a las observaciones de campo e información obtenida a través de perfiles sísmicos y sondeos, que en las rocas correspondientes al macizo izquierdo del río Neuquén no se observaron rasgos que indiquen problemas geológicos-geotécnicos. Por otra parte, cabe destacar que además de la elevada pendiente que presentan las rocas que componen esta unidad, las rocas situadas en el macizo derecho del río Neuquén, están caracterizadas por un intenso fracturamiento, un elevado grado de alteración, y valores bajos de RQD. Por lo que dicha unidad resulta un problema de carácter geológico-geotécnico a tener en cuenta en sitios donde se proyecta desarrollar futuras obras.

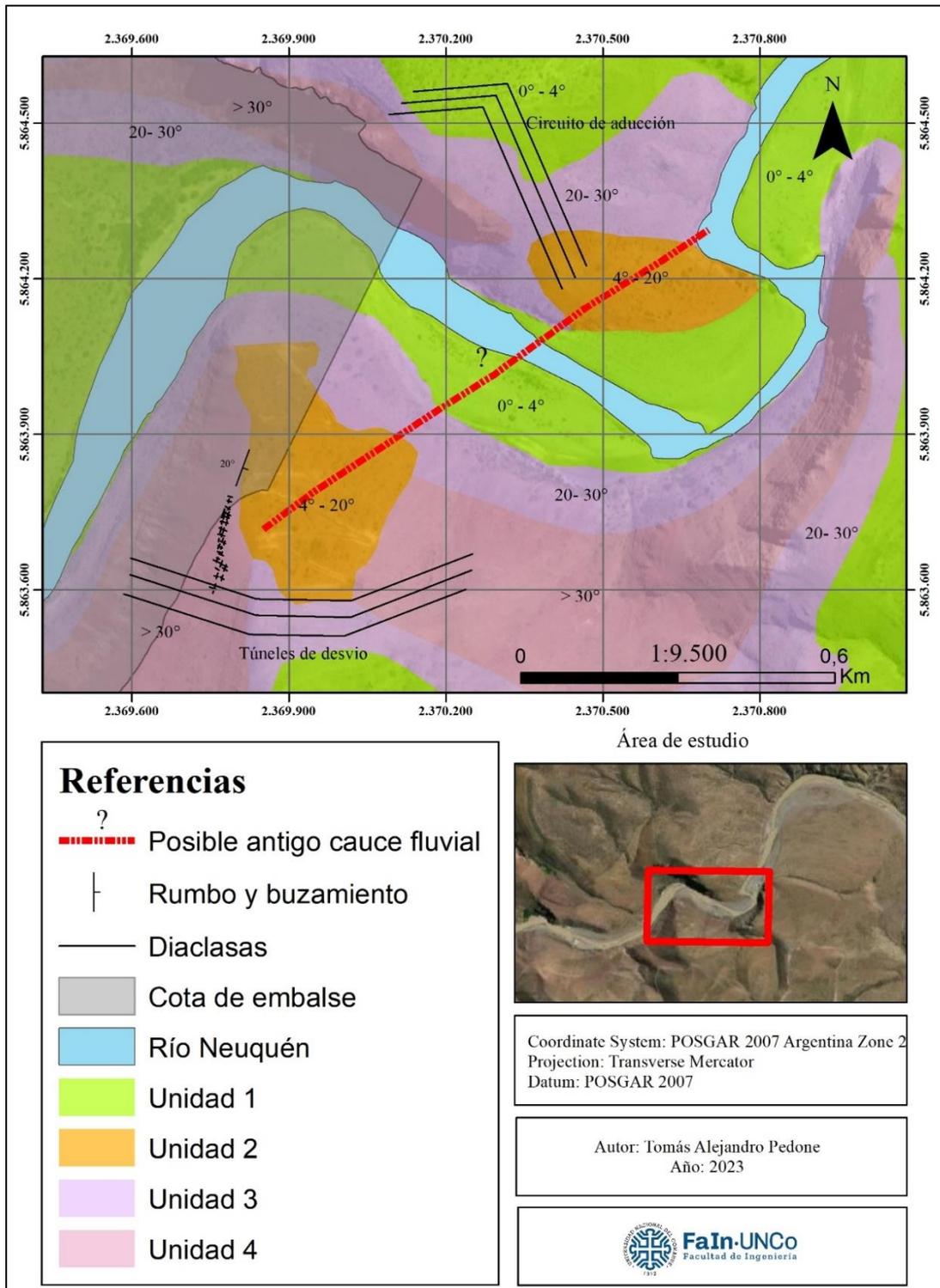


Figura 63. Unidades geotécnicas y pendientes correspondientes al sitio de emplazamiento de la presa.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo final de licenciatura establece los aportes para la etapa de anteproyecto del Aprovechamiento Multipropósito La Invernada. Los resultados obtenidos a partir del trabajo realizado son de gran importancia para la realización de estudios correspondientes a etapas más avanzadas del proyecto y la realización de futuras obras. Cabe destacar la importancia del correcto análisis e interpretación de las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas a fines de establecer los posibles problemas presentes en el área de estudio.

A continuación, se mencionan las conclusiones obtenidas a partir del estudio realizado.

- A pesar de que la zona de estudio se localiza en una región caracterizada por una intensa deformación, no fueron identificadas estructuras que resulten en riesgos significativos para la realización del proyecto.
- Además de los depósitos aluviales del río Neuquén y depósitos coluviales actuales, la geología que caracteriza el sitio de emplazamiento de la presa, está conformada por diversos afloramientos de la Formación Tordillo, los mismos se caracterizan por presentar diversos grados de fracturamiento, presencia de diaclasas y alteración. También se destaca la presencia de diversos afloramientos conformados por niveles conglomerádicos, brechas y desarrollo de suelo.
- Los diversos signos de alteración observados en algunos afloramientos y sondeos, es decir, la silicificación, presencia de cemento carbonático en brechas, depósitos aluviales y venillas observados en diversos afloramientos del macizo derecho del río Neuquén, así como la presencia de minerales secundarios y diaclasas rellenas de cuarzo o yeso, posiblemente fueron originados a partir de un fluido hidrotermal vinculado a cuerpos subvolcánicos asociados a la intensa actividad volcánica que caracterizó a esta región durante Cretácico Tardío-Paleógeno. Resulta importante destacar la baja solubilidad que presentan los carbonatos con el agua, lo cual no produciría un inconveniente una vez que se realice el llenado del embalse. Por otra parte se recomienda realizar excavaciones y estudios de detalle en aquellos sitios caracterizados por la presencia diaclasas rellenas de yeso
- Las laderas analizadas, se caracterizan por presentar elevadas pendientes, presencia de diaclasas y en cada uno de ellos se pudo observar la caída de pequeños bloques, sin embargo queda demostrado a partir del análisis de estabilidad de laderas, que las discontinuidades presentes en los taludes, no presentan riesgo alguno de ocasionar un fenómeno de rotura que ocasione un movimiento de masa rocosa hacia el embalse. Debido a las dificultades de acceso condicionadas por la naturaleza del terreno, se considera necesario realizar para futuras etapas del proyecto, el estudio de estabilidad de laderas para aquellos sectores situados en ambos márgenes del río, que posiblemente estén sujetos a algún fenómeno de inestabilidad, condicionado por las elevadas pendientes, abundantes sistemas de diaclasas o el intenso fracturamiento.
- Además de la determinación de la profundidad y/o presencia del suelo y depósitos aluviales en diversos sectores del macizo. A través de información obtenida a partir de sondeos, se pudo analizar las características litológicas que presentan las rocas del subsuelo en la zona de emplazamiento. Entre ellas, la composición litológica, la presencia de diaclasas, el grado de fracturamiento y la calidad de las rocas, cuyos valores aumentan con la profundidad.
- A pesar de que no fueron identificados niveles con posibles riesgos de licuefacción ante la ocurrencia de un terremoto en los ensayos MASW, los valores observados son bajos por lo que se recomienda tener en cuenta aquellas partes conformadas por suelos para el desarrollo de futuras obras. Además, se considera necesario la realización de ensayos de refracción sísmica en aquellos sectores del macizo izquierdo del río conformado por materiales sueltos, es decir, suelos.

- Los diversos tipos de relieve que caracterizan a la zona de estudio, se encuentran sujeto al posible desarrollo de diversos procesos erosivos o de remoción en masa. Aquellos sectores con relieves empinados, se encuentran sujetos a la posible generación de procesos erosivos y movimientos de ladera de pequeña magnitud. Para aquellos sectores caracterizados por un relieve empinado a muy empinado, es posible la generación de grandes movimientos de ladera y diversos procesos de denudación, es decir el desgaste de las superficie a través de agentes erosivos. Finalmente los sectores cuyo relieve es extremadamente empinado, es posible el desarrollo de escarpes rocosos con elevada probabilidad de caída y desprendimiento de bloques.
- Cada tipo de relieve que caracteriza la zona de estudio, se encuentra sujeto al posible desarrollo de diversos procesos erosivos o de inestabilidad. Resulta de suma importancia tener en cuenta para futuros estudios aquellos sectores cuyas pendientes exceden los 30°, ya que se pudo observar durante las visitas al campo que los mismos están sujetos al desarrollo de movimientos de ladera y escarpes rocosos con alta probabilidad de caída de bloques. En particular, aquellos sitios que se encuentren en contacto con el agua una vez llenado el embalse.
- En base a la geometría observada a través de estudios geofísicos y los depósitos sedimentarios que caracterizan la parte superficial de ambos macizos situados en el sitio de emplazamiento de la presa. Es posible afirmar que dichos depositos corresponden a un antiguo cauce fluvial abandonado. A su vez, los niveles de brechas observados en afloramientos y sondeos, los cuales se caracterizan por estar compuestos por fragmentos de roca angulosos, posiblemente fueron originados a través de abanicos coluviales.
- Se considera necesario remover los depósitos sedimentarios que caracterizan la parte superficial de ambos macizos y, además, remover el nivel de roca identificado inmediatamente por debajo de la cobertura sedimentaria, caracterizado por una intensa alteración y fracturamiento, debido a que las propiedades geotécnicas de estos materiales, son desfavorables para la realización de obras.
- No han sido identificados problemas de carácter geológico, geotécnico o geomorfológico de gran magnitud en el área de estudio, que deban ser tenidos en cuenta en futuros estudios. Sin embargo se recomienda la realización de nuevas perforaciones en ambos macizos para poder obtener más información del subsuelo así como la realización de nuevos estudios geofísicos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Armas Novoa, R., 2003. Criterios para diseñar presas de tierra. Prioridad y secuencia. Ingeniería Hidráulica y Ambiental.
- Casagrande, A. (1948). Classification and Identification of Soils. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113, 901-930.
- Delgado Hernández, D.J., Pérez Pliego, B., Morales Nápoles, O., de León Escobedo, D., Rivero Santana, J.E. y Pérez Flores, D.C., 2009. Falla de presas de tierra por deslizamiento de taludes y formación de brechas originadas por sismo: Un caso en el estado de México . En sn (Ed.), Actas del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica (pp. 1-15).
- Fernández, D.S., Coppololecchia, M., Balbi, A.B., Barber, E.L.G., Bermar, J.M., Boujon, P.S., Cabrera, N.R., Chávez, R.A., Elissondo, M., Jones, M.E., Kaufman, J.F., Pereyra, F.J., Rosas, M.A., Róvere, E.I., Tello, N.E., Tobío, M.I., Villegas, D.C., 2021. Normativa para la cartografía de peligrosidad geológica de la República Argentina – Escala 1:250.000. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. 47p.
- Garrido, A. C., 2011. El Grupo Neuquén (Cretácico tardío) en la Cuenca Neuquina. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, p. 231-244.
- Garrido, A.C., Lucesoli, H. y Pascua, D., 2014. Relevamiento geológico en la alta cuenca del Río Neuquén. Sitio de interés para aprovechamiento hidroeléctrico: Áreas Pini Mahuida, La Invernada, Huitrín y Cerro Rayoso. Informe de avance. Dirección Provincial de Minería del Neuquén (inédita), 33p.
- Giacosa, R. E., 2020. Geología Estructural y Tectónica de los Depósitos de Baritina de Mallín Quemado. Cuenca Neuquina Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas Recursos Minerales N°43, 42 pp. Buenos Aires
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C., 2002. Ingeniería Geológica. Madrid, España. Primera edición. Pearson Educación.
- Kietzmann, D.A. y Vennari, V., 2013. Sedimentología y estratigrafía de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano-Berriasiano) en el área del cerro Domuyo, norte de Neuquén, Argentina. *Journal of Andean Geology*, 40 (1), 41-65.
- Leanza, H.A., Llambías, E.J y Carbone, O., 2005. Unidades estratigráficas limitadas por discordancias en los depocentros de la Cordillera del Viento y la Sierra de Chacaico durante los inicios de la Cuenca Neuquina. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, 1-13. Mar del Plata.
- Lebinson, F.O., Turienzo, M., Frisicale, C., Sánchez, N., Araujo, V. y Dimieri, L., 2017. Caracterización petrológica, geoquímica y estructural de diques subvolcánicos y sus

relaciones con la deformación de la faja corrida y plegada del Agrio, provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74 (2): 239-253.

- Lebinson, F.O. 2019. Evolución tectónica de las estructuras andinas al sur del Río Neuquén (37° 35' L.S), extremo septentrional de la faja corrida y plegada del Agrio, Provincia del Neuquén. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Sur]. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4551/LebinsonTesis2019.pdf;jsessionid=A16752A7D9AD5655D4506B5E635173C5?sequence=1>.
- Llambías, E.J. y Aragón, E. 2011. Volcanismo Paleógeno. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C., Vallés, J.M. (Eds.), *Relatorio Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*, pp. 265-274. Buenos Aires.
- Mescua, J.F., Giambiagi, L.B. y Bechis, F., 2008. Evidencias de tectónica extensional en el Jurásico Tardío (Kimeridgiano) del suroeste de la provincia de Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63 (4), 512-519.
- Murillo, R., 2012. Presas de tierra y sus fallas. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 1-7. México.
- Pereyra, F., Coppololecchia, M., Rosa, M., Fernández, D., Folguera, A., Rodríguez, K., Jones, M., Martínez, H., Rovere, E., Wilson, C., Chávez, R., Barber, L., Dal Molín, C., Ecosteguy, L., Tejedo, A., 2020. Normativa para las cartas geomorfológicas de la República Argentina – Escala 1:250.000/100.000. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. 37.p
- Ramírez Oyanguren, P. y Alejandro Monge, L.R., 2004. *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España.
- Sánchez, N.P., Turienzo, M., Dimieri, L., Araujo, V. y Lebinson, F., 2014. Evolución de las estructuras andinas en la FPC de Chos Malal: Interacción entre el basamento y la cubierta sedimentaria de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (2): 233-246.
- Spalletti, L.A., Arregui, C. y Veiga, G.D., 2011a. La Formación Tordillo y equivalentes (Jurásico Tardío) en la Cuenca Neuquina. En: H.A. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, O. J.C. Danieli y J.M. Vallés, (Eds.). *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. XVIII Congreso Geológico Argentino, 99-111. Buenos Aires.
- Spalletti, L.A., Veiga, G.D., y Schwarz E. 2011. La Formación Agrio (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, p. 145.160.
- Schwarz, E., Spalletti, L.A., y Veiga, G.D., 2011. La Formación Mulichinco (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, p. 131-144.
- Zollner, W. y Amos, A.J., 1973. Hoja Geológica 32 b, Chos Malal, Provincia del Neuquén, Argentina, 1:200.000. Servicio Geológico Nacional. Boletín 143: 97pp.