

## INFORME DE ASISTENCIA TÉCNICA AL PARQUE NACIONAL IGUAZÚ



\*Eduardo GARCIA ARAOZ

\*\*Alejandro CELLI

\*Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)

\*\*Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP)

Buenos Aires, 2021

---

## **AUTORIDADES**

**SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO**

Presidente: Dr. Eduardo O. Zappettini

Secretaria Ejecutiva: Lic. Silvia B. Chávez

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES**

Director: Dr. Martín R. Gozalvez

**DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y APLICADA**

Director: Lic. Alejandra Tejedo

## 1. Contenido

1.	Contenido .....	2
2.	Introducción .....	3
3.	Objetivos .....	3
4.	Metodología.....	3
5.	Ubicación del área de estudio .....	4
6.	Antecedentes.....	5
7.	Marco geológico regional.....	5
8.	Circuitos del Parque Nacional Iguazú.....	6
9.	Relevamientos de Campo .....	7
8.1.	Observaciones geológicas generales.....	8
8.1.1	Litología .....	8
8.1.2	Estratigrafía .....	8
8.1.3	Discontinuidades .....	9
8.2.	Procesos de Remoción en Masa.....	10
8.2.1	Reptación.....	11
8.2.2	Deslizamientos .....	12
8.2.3	Caída de rocas .....	14
8.2.4	Vuelcos o desplomes.....	14
8.3.	Inspección visual de las bases de fundación .....	15
8.4.	Evaluación de peligrosidad geológica .....	16
10.	Conclusiones .....	17
11.	Recomendaciones .....	19
12.	Alcance del estudio.....	21
13.	Trabajos citados en el texto .....	21
ANEXO I –ANÁLISIS DE ESTABILIDAD .....		23
1.	Estación N°1 (Sector del salto Bossetti).....	23
	Matriz rocosa.....	24
	Discontinuidades .....	24
	Clasificación geomecánica del macizo rocoso.....	25
	Estabilidad de taludes .....	27
2.	Estación N°2 (Sector del Salto Bossetti) .....	28
	Análisis de estabilidad .....	30
3.	Estación N°3 .....	31
4.	Estación N°4 (Progresiva 500).....	33
5.	Estación N°5 (Sector del salto Alvar Núñez) .....	35
	Matriz rocosa.....	35
	Discontinuidades .....	35
	Clasificación geomecánica del macizo rocoso.....	37
	Estabilidad de taludes .....	39
	Sector inferior .....	39
6.	Estación N°6 .....	40
ANEXO II - CLASIFICACIONES GEOMECAÑICAS .....		43
1.	Introducción:.....	43
2.	Clasificación RMR.....	44
3.	Clasificación SMR.....	45
4.	Clasificación GSI .....	46

## 2. Introducción

El presente informe responde a la solicitud de asistencia técnica efectuada por la Administración de Parques Nacionales (APN) al Servicio Geológico y Minero Argentino (SEGEMAR), considerando el Convenio de Asistencia Técnica existente entre ambas instituciones.

Surge la preocupación por parte de las autoridades del Parque Nacional Iguazú (PNI), la ocurrencia de posibles eventos de remoción en masa que pudieran afectar el recorrido del circuito turístico denominado Circuito Inferior (CI).

Cabe destacar que dicho circuito se encuentra actualmente cerrado al público (de manera provisoria y preventiva), debido al registro de una serie de acontecimientos de caída de bloques que han impactado sobre la pasarela en los últimos años.

A raíz de esta solicitud, se designó un equipo de trabajo interinstitucional, integrado por los geólogos Eduardo García Aráoz, de SEGEMAR, y Alejandro Celli, de ORSEP (Organismo Regulador de Seguridad de Presas), quienes llevaron a cabo entre los días 14 y 20 de diciembre de 2020, un relevamiento geológico-geotécnico con el fin de analizar los peligros asociados con los procesos de ladera.

Los resultados de los análisis efectuados, permiten en este informe, elaborar una zonificación del terreno en función del peligro de materialización de diferentes procesos de remoción en masa, y recomendar distintas alternativas de estabilización tendientes a disminuir dichos peligros y a concretar la pronta reapertura de este circuito tan importante para el turismo.

## 3. Objetivos

De acuerdo con la solicitud de la APN el objetivo del trabajo se centra en determinar el grado de peligrosidad geológica, relacionado a posibles eventos de remoción en masa, en los sectores de ladera que incluye el recorrido del CI.

Asimismo, se pretende mejorar el conocimiento del medio físico, para definir y zonificar las potenciales amenazas, que será de utilidad para:

- La identificación de zonas prioritarias para estudios más detallados;
- Establecer pautas de control y monitoreo de los sectores críticos;
- Conocer el diagnóstico de la situación actual del CI;
- Proponer medidas de estabilización.

## 4. Metodología

La metodología de trabajo incluye tareas de campo y de gabinete.

Se realizó una campaña entre los días 14 y 20 de diciembre del 2020, que implicó cuatro días de relevamiento de campo, un día de recopilación de información y otro de reunión con las autoridades del PNI y grupos de trabajo.

Durante la campaña se realizó la observación y análisis de la zona involucrada, evaluando las condiciones geológicas (litología, geomorfología, estructuras, etc.) y geotécnicas de la misma, con énfasis en la detección de signos de inestabilidad del área y los procesos actuantes.

Para la determinación de la peligrosidad asociada a los posibles eventos de remoción en masa, y particularmente al impacto de bloques sobre las pasarelas, el relevamiento geotécnico consistió en:

- La identificación de zonas y bloques potencialmente inestables.

- La caracterización de los procesos actuantes.
- La evaluación de la resistencia de la matriz de roca y de las paredes de las diaclasas, mediante esclerómetro y piqueta geológica.
- La estimación del ángulo de fricción interna de diaclasas mediante ensayos de tilt-test.
- La clasificación geomecánica del macizo rocoso involucrado.
- El análisis cinemático y de estabilidad.

Las mediciones geométricas y morfológicas de los taludes y afloramientos se realizaron con cinta métrica.

Los datos de rumbo y buzamiento (Rb/Bz) de las discontinuidades se tomaron con brújula geológica y los puntos fueron posicionados con un GPS Garmin E-Trex10.

Las medidas de resistencia del macizo rocoso (matriz y discontinuidades) fueron tomadas mediante martillo de Schmidt de la marca PROCEQ computando, en cada medida, la media estadística de 20 mediciones aleatorias sobre el sustrato de interés, según normas de la ISRM (Aydin, 2009).

La caracterización y clasificación del macizo rocoso se realizó en base a los índices: Geological Strength Index (GSI) definido por Marinos y Hoek (2000); Rock Quality Designation (RQD) en la versión de Palmström (2005); Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989); Slope Mass Rock (SMR) de Romana Ruíz (1985a,b); y Rock Mass Index (RMI) de Palmström (1995 y 1996).

El análisis de estabilidad se llevó a cabo mediante el método probabilístico de equilibrio límite con las versiones de prueba del paquete de software de RocScience (Swedge 7 y RocPlane).

En base a toda la información recabada se analizaron diferentes acciones para establecer eventualmente medios de control y monitoreo.

## 5. Ubicación del área de estudio

El Parque Nacional Iguazú está ubicado 14km al Sureste de la localidad de Puerto Iguazú, en el límite entre la provincia de Misiones y el estado brasileño de Paraná. El camino de acceso al PNI empalma con la ruta nacional 101 que hacia el este conecta con la ruta nacional 12 y lleva a la localidad de Puerto Iguazú (Fig. 1).

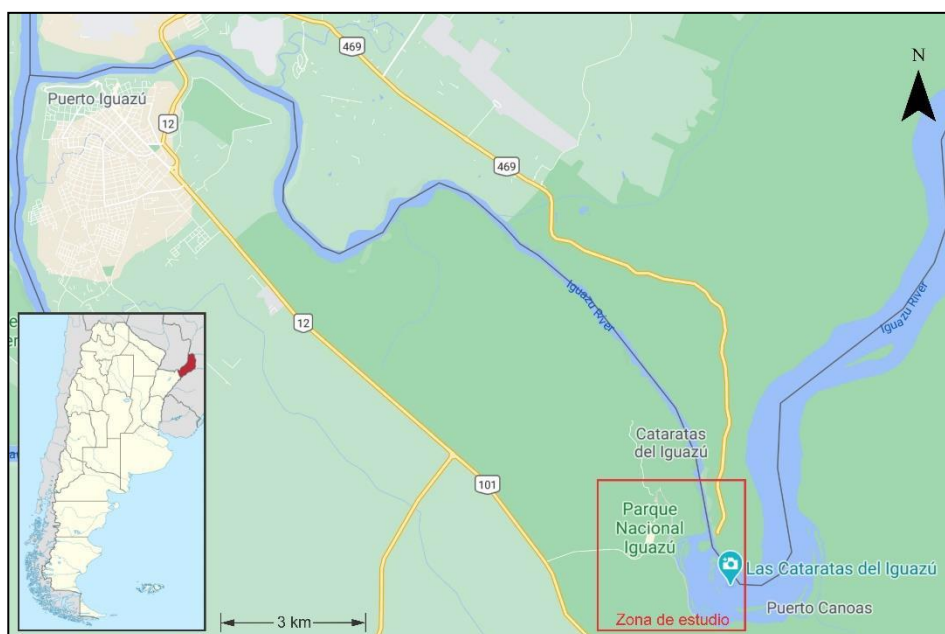


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio y rutas de acceso.

## 6. Antecedentes

Se realizó una compilación y análisis crítico de los antecedentes geológicos disponibles para la zona de trabajo, incluyendo informes inéditos puestos a disposición por las autoridades del PNI.

Para el análisis cartográfico se utilizó la base topográfica del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en combinación con el Modelo de Elevación Alos Palsar de 12m de resolución y las imágenes satelitales pancromáticas de Google Earth, Yandex e Imagery.

### Antecedentes geológicos regionales

- Ardolino A. y Miranda F., 2008. Las Cataratas del Iguazú: El agua grande.
- Barranquero H., 1995. Parque Nacional Iguazú, relevamiento geológico.
- Ciccio S., 2020. La geología de Misiones según el informe inédito de CARTA.
- Ramos V. A., 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. Capítulo 3.
- Schiaffino et al. 2002. El Parque Nacional Iguazu, Argentina.

### Estudios geológicos de detalle en el área del PNI:

- Enriquez C. et al., 2000. Informe técnico. Remodelación Area Cataratas del Parque Nacional Iguazú. Evaluación del estado de la roca en algunos puntos de la obra.
- INTI, 2014. Relevamiento geológico expeditivo en la zona denominada Punta Peligro en el Área Cataratas del Parque Nacional Iguazú, pcia. de Misiones.
- INTI, 2016. Informe de asistencia técnica.
- SRK Consuting, 2016a. Informe de visita y evaluación preliminar.
- SRK Consuting, 2016b. Recomendaciones preliminares de cimentación.
- SRK Consuting, 2018a. Informe de relevamiento geotécnico.
- SRK Consuting, 2018b. Análisis de riesgo de caída de rocas.
- SRK Consuting, 2018c. Análisis de medidas de mitigación.

## 7. Marco geológico regional

Las cataratas del Iguazú están ubicadas en el extremo septentrional de la Meseta Misionera. Topográficamente la región corresponde a una meseta, alta y plana, constituida por un apilamiento de mantos o coladas de rocas volcánicas basálticas, y cuya superficie, está profusamente erodada o disectada por los ríos, conformándose un paisaje con apariencia de sierras y cerros aislados conocidos como las Sierras Misioneras (Ardolino y Miranda 2008).

Estas coladas volcánicas son agrupadas bajo el nombre de Fm. Curuzú-Cuatiá y se describen como un extenso y potente manto efusivo con una superficie de más de 1.000.000 km<sup>2</sup> cuadrados, constituyéndose así en el mayor campo de lava del mundo (Ramos 1999). Han sido datadas entre 125 y 115 millones de años (Cretácico Inferior). Localmente, su espesor es estimado en 200m con una leve pendiente regional al Sudoeste.

En el área del PNI se distinguen 3 coladas basálticas principales, con espesores variables entre 30 y 40m (SRK Consulting 2016a). En cada una es posible diferenciar una zonificación horizontal definida por una alternancia de texturas, a saber:

- basaltos vesiculares y /o amigdaloides: se presentan en el techo, en la base y en los límites laterales de la colada; el techo de la colada se identifica por la presencia de brechas y/o areniscas, unidos a una marcada fracturación horizontal (4 a 8 diaclasas por metro); en la mayoría de los casos las diaclasas son cerradas, agrupadas en fajas horizontales estrechas de entre 5 y 30 cm, rellenas con sílice y calcita.
- basalto masivo: constituye el sector central; presenta diaclasas verticales, en la mayoría de los

casos cerradas y/o rellenas con material silíceo.

En general, el techo de las coladas basálticas acompaña a las curvas de nivel topográfico, aunque con desviaciones puntuales debidas a los procesos de meteorización (SRK Consulting 2016a). Las curvas de nivel topográfico entre 145 y 150 m corresponden al techo de la primera colada (inferior), mientras que la curva de nivel 175 m corresponde actualmente al techo de la segunda colada (intermedia). Al sur del camino que vincula con Puerto Canoas (ver Fig. 1), el relieve asciende en cortas distancias hasta alcanzar la cota de 225 m posiblemente en correspondencia con el frente de una tercera colada (superior). De esta manera, se pueden definir aproximadamente los límites superiores para cada colada mediante las curvas de nivel de 145, 175 y 225.

El clima es subtropical húmedo con una temperatura media anual de 20-21 °C, con máximas en la estación estival que superan los 40 °C y con mínimas en inviernos que alcanzan los -3 °C a -4 °C por lo que se registran heladas invernales en las zonas con escasa o sin cobertura arbórea. Una excepción es el área próxima a las cataratas donde no se producen heladas (Schaffino et al. 2002). Las precipitaciones se distribuyen uniformemente a lo largo del año, y alcanzan los 2000 mm anuales. No hay una estación seca y el aporte de humedad proviene de la incursión de los vientos húmedos provenientes del anticiclón del Atlántico (Schaffino et al. 2002). Durante la época estival son comunes las tormentas eléctricas de carácter torrencial con fuertes vientos que destruyen la vegetación.

## 8. Circuitos del Parque Nacional Iguazú

En la figura 2 se presentan los circuitos que se han construido en el PNI.

En la actualidad, solo tres de estos circuitos se encuentran habilitados para conocer las cataratas: el Circuito Inferior (CI) (en evaluación y preventivamente clausurado), el Circuito Superior (CS) y el Circuito Garganta del Diablo (CGD).



Figura 2. Circuitos turísticos habilitados por el PNI.

El Circuito de la Isla San Martín (CISM), al igual que un antiguo tramo del CI que incluía la bajada al embarcadero (desde el Salto Bossetti) y la zona de Punta Peligro (no demarcados en la figura 2), han sido clausurados definitivamente debido al peligro por eventos de caídas de bloques en el sector (INTI 2016).

Los circuitos CS y CGD permiten acceder a la zona superior de los saltos y transcurren sobre el techo de la colada basáltica intermedia.

El CI, en cambio, se emplaza sobre el techo de la colada inferior permitiendo llegar hasta la base de los saltos que se producen en la colada suprayacente.

El Sendero Verde (SV) y el Sendero Macuco (SM) tienen su recorrido a través de la selva Misionera, mayormente alejados de la zona de cataratas.

## 9. Relevamientos de Campo

Las observaciones geológicas se realizaron a lo largo del CI, iniciando en el salto Dos Hermanas y hasta completar el recorrido turístico. Además, se recorrió el sector clausurado al público que comprende la bajada hacia el antiguo embarcadero, la zona de Punta Peligro (no demarcados en la fig. 2) y el circuito de la Isla San Martín.

A lo largo del recorrido turístico se definieron sitios puntuales de observación, identificando los principales procesos geológicos activos y realizando el levantamiento de los datos necesarios para su adecuada caracterización.

En el ANEXO I se presentan los resultados particulares de este análisis y en la figura 3 se resumen las observaciones realizadas.

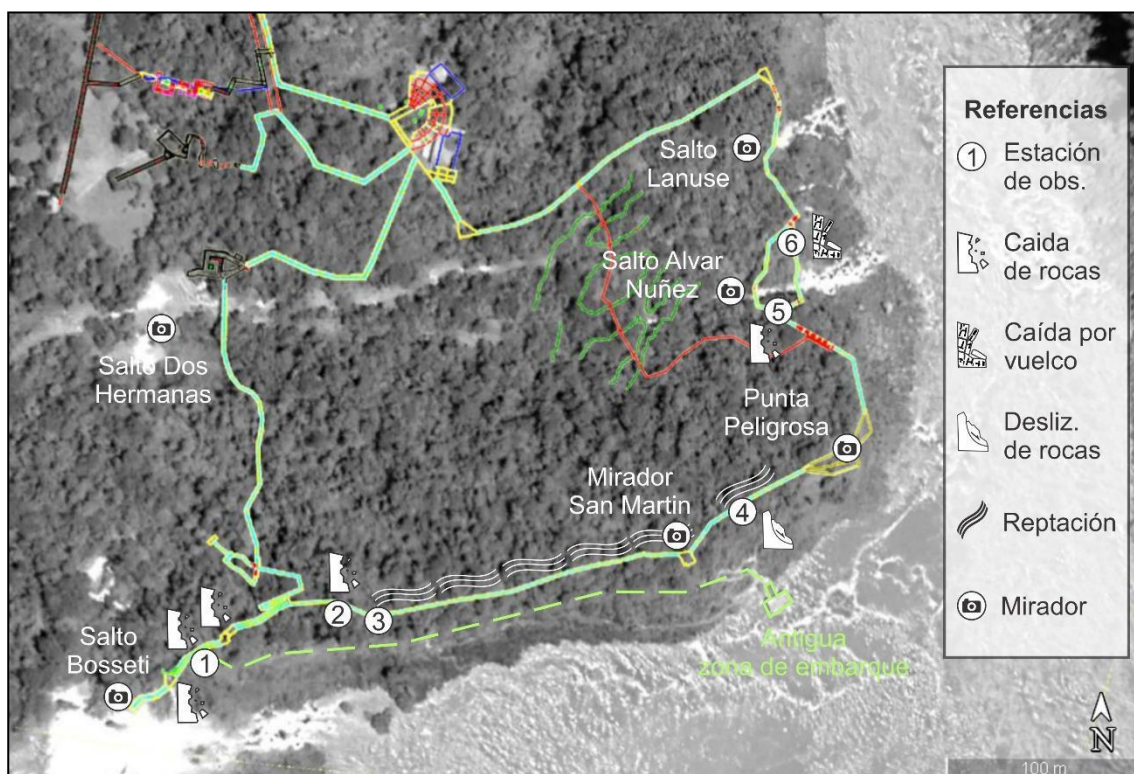


Figura 3. Sitio de estudio. En línea continua de color verde se marca el recorrido turístico del CI. En línea punteada de color verde, el sector clausurado que comprende la bajada al antiguo embarcadero.



## 8.1. Observaciones geológicas generales

En términos generales, todo el circuito relevado se halla emplazado en el techo o parte superior de la colada basáltica inferior, a excepción de la bajada y recorrido hacia el embarcadero que han sido construidos en los depósitos de talud, formados por bloques desprendidos del techo y del sector central de la colada.

### 8.1.1 Litología

En muestra de mano (Fig.4), la roca fresca presenta un color gris oscuro con tonalidades castañas, compuesta principalmente por minerales máficos de color negro y plagioclasas de color blanco e incoloro. Posee textura fanerítica de grano muy fino con cristales entre 0,2 y 0,5 mm de tamaño promedio. La estructura puede ser masiva o vesicular. Son comunes las pátinas de color ocre en forma de parche producto de la oxidación del Fe; con menor frecuencia se observan pátinas de color verde producto de la alteración del Cu.



Figura 4. Detalle de la roca en muestra de mano.

De acuerdo a los estudios petrográficos realizados por el INTI (2016), en base a la composición mineralógica y a los porcentajes totales recalculados según el diagrama QAPF, la roca corresponde a un basalto del campo 10 de la clasificación de la IUGS (International Union of Geological Science).

### 8.1.2 Estratigrafía

Además de las texturas comunes a las coladas principales, descritas en el apartado de marco geológico regional (con basaltos vesiculares en las zonas externas y basaltos masivos en las internas), en el CI es posible observar derrames secundarios, representados por una alternancia de bancos masivos y bancos vesiculares. Esto se da, particularmente, en las zonas de Punta Peligro y del mirador del Salto Alvar Nuñez, donde los bancos masivos son, por lo general, más potentes (entre 50 y 150 cm) y los bancos vesiculares presentan espesores menores (entre 3 a 30 cm). Estas estructuras pueden ejercer un fuerte control en el avance de la meteorización química, siendo las rocas vesiculares las más afectadas.

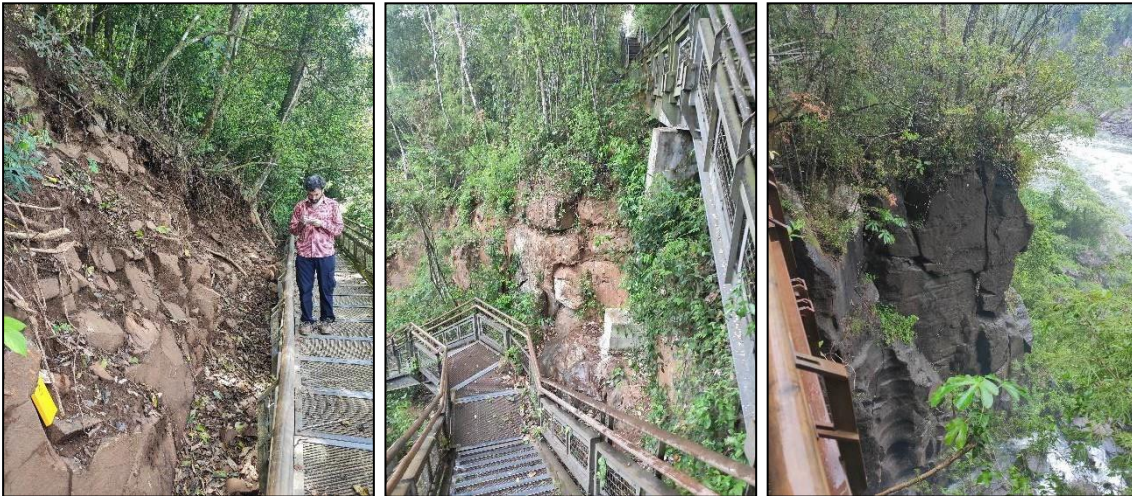
Los procesos de meteorización (tanto físicos como químicos), si bien se observan afectando a toda la secuencia litológica, se intensifican hacia la parte superior del perfil dando lugar al desarrollo de suelos residuales *in situ*.

El perfil generalizado del sector puede ser representado de techo a base por:

- Un manto de suelo orgánico de color marrón oscuro y de poco espesor (del orden de 50cm), que en profundidad puede dar lugar a suelos residuales rojizos característicos de una mayor lixiviación y concentración de óxidos de Fe.
- Una zona de transición de espesor variable entre 1 y 5m, que puede estar ausente, y que se caracteriza por presentar un alto grado de fracturación del macizo producido principalmente

por la meteorización física que ocasionan las raíces de los árboles (bioclastía) y las variaciones diarias de temperatura (termoclastía). En esta zona, y dependiendo del grado de alteración química existente (que varía entre moderado a intenso), se pueden presentar niveles saprolíticos o arcillosos compuestos por basalto alterado de color verde oscuro (clorita?) o anaranjado (óxidos de Fe), de baja consistencia (excavables por métodos manuales o mecánicos).

- Una secuencia de basaltos moderadamente alterados y de baja fracturación de aproximadamente 15-25 m de espesor, donde se distinguen bancos vesiculares y masivos.



*Figura 5. Perfil estratigráfico general. A) Vista del manto de suelo orgánico y transición a la zona de alta fracturación en la progresiva xxxx. B) Vista de la zona de alta fracturación y transición a los basaltos moderadamente alterados y menos fracturados en el sector del Salto Alvar Nuñez. C) Vista general de los basaltos inferiores en el sector del Salto Alvar Nuñez, nótese la usencia de la zona de transición entre el manto de suelo y la roca masiva.*

### 8.1.3 Discontinuidades

Desde el punto de vista estructural, se reconocen 5 juegos de diaclasas (superficies de fracturación sin desplazamiento): uno sub-horizontal y los cuatro restantes verticales a sub-verticales (Fig. 6), asociadas al enfriamiento de las lavas y a la estructura regional respectivamente.

Las diaclasas sub-horizontales se producen siguiendo la estratificación interna de las coladas, en algunos sectores pueden tener un buzamiento en torno a los 15° con dirección hacia el NE y SO. En la mayoría de los casos, permanecen cerradas, agrupadas en fajas estrechas de entre 5 y 30 cm, rellenas con sílice y calcita.

Las diaclasas verticales a sub-verticales pueden presentarse cerradas o abiertas según el grado de confinamiento. Por lo general, estas diaclasas no presentan relleno. En orden de importancia las orientaciones (medias) de estas familias de diaclasas son (Fig. 6): N240°/90° (naranja), N340°/60° (roja), N120°/90° (azul) y N20°/60° (celeste), esta última mayormente acotada a la zona del Salto Bossetti.

Estos planos de discontinuidad, junto con los procesos de erosión y empuje del suelo, favorecen el desplome de bloques en las coladas aflorantes.

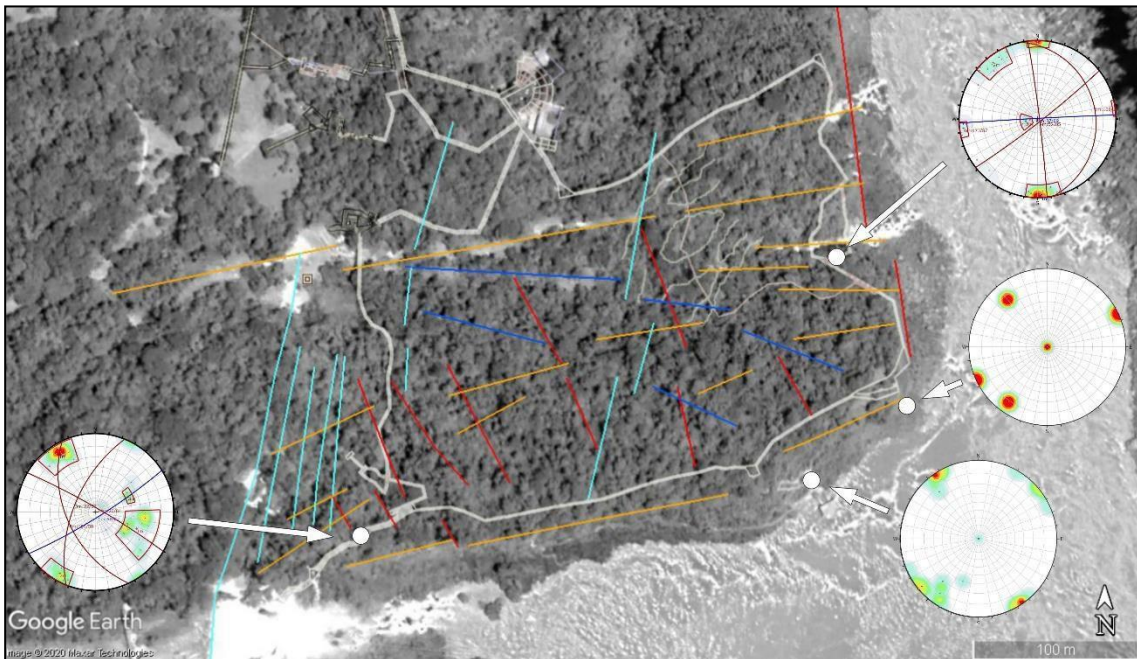


Figura 6. Estructuras presentes en el sitio de estudio. Los datos estructurales de la zona del antiguo embarcadero y Punta Peligro fueron tomados de SRK Consulting (2016a).

## 8.2. Procesos de Remoción en Masa

En este estudio se utilizan los términos “procesos de remoción en masa”, “movimientos de laderas” ó “movimientos en masa”, como sinónimos, para referirse a cualquier tipo de movimiento de suelo o roca que ocurra ladera abajo en los cuales la gravedad sea la principal fuerza involucrada (Cardozo 2013).

Los factores que controlan los movimientos de ladera en general son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno y pueden agruparse en factores pasivos (condicionantes) o activos (desencadenantes) (Seisdedos Santos, 2009). *Los factores pasivos o condicionantes*, son aquellos que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno, tales como: las condiciones topográficas, litológicas, hidrogeológicas, los estados tenso-deformacionales, el grado de alteración o meteorización de los materiales y la cobertura vegetal; mientras que los *factores activos o desencadenantes*, son considerados acciones externas, que provocan inestabilidad y desencadenan movimientos en masa al modificar las condiciones preexistentes. Estos son: precipitaciones, sismicidad, terremotos, vibraciones, erosión, agrietamiento por sequedad del suelo y factores antrópicos (Seisdedos Santos, 2009; Herrera *et al.*, 2011).

Existen diferentes tipos de procesos de remoción. La clasificación más aceptada y aplicada a nivel internacional se basa en el mecanismo de movimiento, reconociéndose los siguientes tipos: caídas o desprendimientos; vuelcos o desplomes; deslizamientos; expansiones laterales; flujos; y deformaciones (ver cuadro 1, Hungr *et al.* 2014).

Cabe destacar que los procesos de remoción en masa son sistemas físicos que se desarrollan en el tiempo a través de varias etapas (Hungr *et al.* 2014): las deformaciones anteriores al fallo, el fallo propiamente dicho y los desplazamientos posteriores al fallo.

Muchos movimientos en masa exhiben una serie de episodios cinemáticos, separados por períodos (largos o cortos) de relativa quietud. El fallo es el episodio más significativo en la historia del proceso de remoción en masa, que normalmente implica la primera formación de una superficie de ruptura completamente desarrollada (discreta o distribuida en una zona de espesor finito).

Es común que durante la etapa de fallo exista un cambio en el mecanismo cinemático del movimiento

en masa, generalmente pasando de un deslizamiento a un flujo o a caída, lo que también es relevante para el comportamiento post-fallo y la destructividad del evento o proceso.

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Caída	Caída de roca/hielo*	Caída de boulder/detrito/limo*
Vuelco	Vuelco de bloque rocoso* Vuelco por flexura de roca	Vuelco de gravas/arena/limo*
Deslizamiento	Deslizamiento de roca rotacional Deslizamiento de roca planar* Deslizamiento de roca en cuña* Deslizamiento de roca compuesto Deslizamiento de roca irregular*	Deslizamiento rotacional de arcilla/limo Deslizamiento planar de arcilla/limo Deslizamiento de grava/arena/detrito* Deslizamiento compuesto de arcilla/limo
Expansión	Expansión de ladera rocosa	Licuefacción de arena/limo* Expansión de arcilla*
Flujo	Avalancha de roca/hielo*	Flujo seco de arena/limo/detrito Flujo de arena/limo/detrito* Avalancha de detritos* Flujo de detritos/barro* Flujo de turba/tierra
Deformación de pendiente	Deformación de ladera montañosa Deformación de pendiente rocosa	Deformación de pendiente de suelo Reptación de suelo Soliflucción

Cuadro 1. Clasificación de los procesos de remoción en masa propuestos por Hungr et al. (2014). \*Tipos de movimientos que usualmente alcanzan velocidades extremadamente rápidas según las definiciones de Cruden y Varnes (1996).

A continuación, se describen los principales procesos reconocidos en la inspección técnica del CI. Una descripción más detallada de estos y otros procesos de remoción en masa se puede encontrar en el trabajo de Hungr et al. (2014).

### 8.2.1 Reptación

La reptación es un proceso de movimiento extremadamente lento de las capas superficiales del suelo (normalmente de menos de 1 m de profundidad) sobre una pendiente, como resultado de los cambios cíclicos de volumen impulsados por el clima (humedecimiento y secado, congelación y el deshielo) y la actividad de plantas y animales (Hungr et al. 2014).

La expansión volumétrica actúa de manera normal en la superficie inclinada del suelo mientras que, durante la contracción, el material se mueve verticalmente hacia abajo por efecto de la gravedad. El resultado es un movimiento neto de bajada, en el sentido de la pendiente (González de Vallejo et al., 2002).

Las tasas de movimiento son extremadamente lentas (0,5 a 10 mm/año según la recopilación de Saunders y Young 1983), pero, durante largos períodos de tiempo, la mayoría de las laderas empinadas quedan cubiertas por capas de coluvios sueltos, desplazados y mezclados, que a menudo son la fuente principal de los deslizamientos de tierra poco profundos y de las avalanchas de escombros.

En el CI, este proceso de reptación de suelo, se observa a lo largo de toda la ladera comprendida en el trayecto que une el mirador del Salto Bossetti con el Mirador de El Peñón. Se evidencia a partir de pequeños quiebres en la pendiente general, que se desarrollan en coincidencia con las raíces de los árboles (Fig. 7).

El grado de avance del proceso ha sido empeorado por las tareas de mantenimiento que se realizan en el perímetro de la pasarela; donde la sobre-excavación de la base del talud, ha quitado el confinamiento y el sostenimiento natural que proporciona el sistema radicular de la vegetación, desencadenando deslizamientos poco profundos (en torno al metro) de coluvios y rocas, como los descritos en las Estaciones N°3 y N°4 (ver apartados 3 y 4 del ANEXO I).

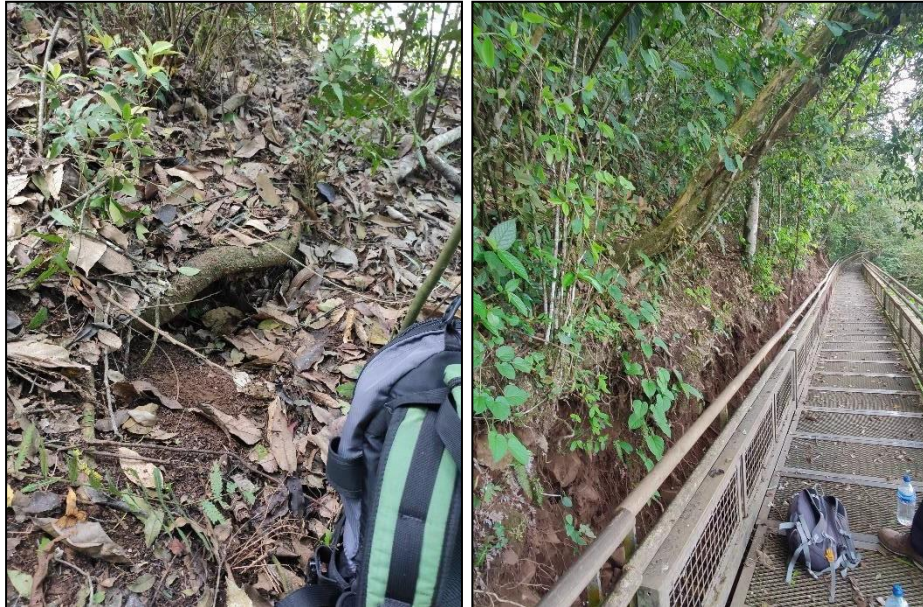


Figura 7. Izquierda: proceso de reptación del suelo. Derecha: Tareas de mantenimiento socavando las bases del talud a lo largo de la pasarela.

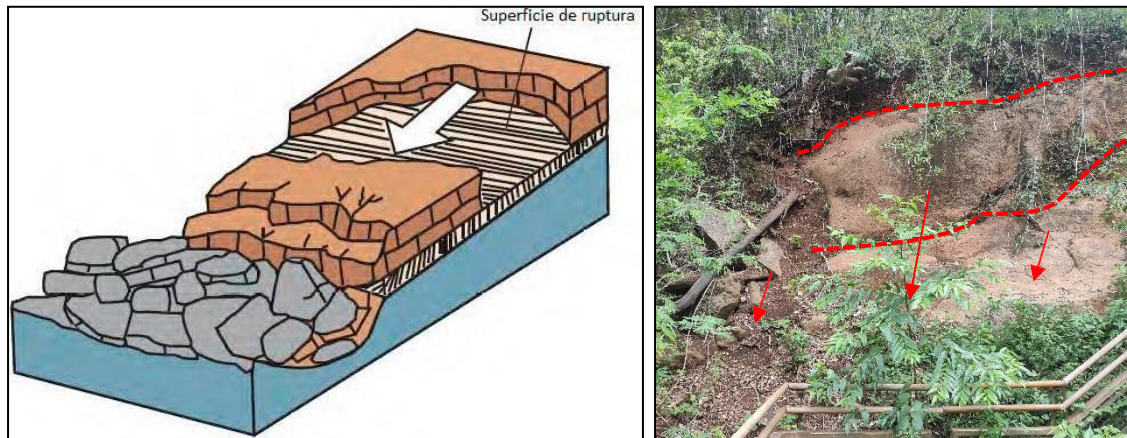
### 8.2.2 Deslizamientos

Los deslizamientos (Fig. 8), son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie de ruptura reconocible.

La superficie de rotura define el tipo de deslizamiento (Hungry et al. 2014), por lo que las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales; las superficies planas o semiplanas (onduladas), a los deslizamientos planos; las superficies formadas por dos planos con una intersección orientada en favor de la pendiente, a los deslizamientos en cuña; las superficies que constan de varios planos, o de una curvatura desigual, acompañada de una distorsión interna significativa de la masa en movimiento, a deslizamientos compuestos; y las superficies irregulares que consisten en una serie de discontinuidades orientadas al azar (no sistemáticas), separadas por segmentos de roca intacta ("puentes de roca"), a deslizamientos irregulares o colapsos de rocas.

En el CI se reconocen eventos de deslizamientos planos, en cuña e irregulares:

Mecánicamente los deslizamientos planos y en cuña son análogos. Comprenden deslizamientos traslacionales que no presentan deformación interna (o presentan muy poca), no se auto estabilizan y tienden a ser extremadamente rápidos (excepto en el caso de fallas según planos de discontinuidad de muy baja inclinación). Se producen en una amplia gama de escalas, aunque los deslizamientos en cuña tienden a ser más pequeños que los planos. En el circuito turístico, los deslizamientos planares y en cuña, a menudo, suelen dar lugar a procesos de caída de bloques o vuelcos. Un claro ejemplo de caída de bloque generada por deslizamiento sobre una superficie plana se reconoce en el sector del Salto Alvar Núñez (Apartado 5 del ANEXO I), donde se ha registrado (hace un par de años) el impacto sobre la pasarela de un bloque de aprox.  $1\text{m}^3$ , provocando daños en la infraestructura.



*Figura 8. Izquierda: Representación esquemática de un deslizamiento planar. Derecha: Deslizamiento planar en el sector del Salto Alvar Núñez (ver apartado 5 del ANEXO I), las líneas punteadas indican los planos de ruptura y las flechas la dirección del movimiento.*

En los deslizamientos irregulares (o por colapso de rocas, Hungr et al. 2014) el mecanismo de falla es complejo y a menudo difícil de describir. Puede incluir elementos de derrumbe, por lo general muy repentino y extremadamente rápido. Se originan en rocas resistentes con pendientes pronunciadas y estructura no sistemática. La forma general de la superficie de ruptura es irregular y cinemáticamente compleja en grado variable, resultando difícil realizar un análisis significativo de la estabilidad del talud (Hungr et al. 2014). Los deslizamientos por colapso de rocas se han detectado en algunos sitios puntuales del CI asociados al proceso generalizado de reptación de ladera y a las labores de mantenimiento realizadas en los límites de la pasarela. El ejemplo más reciente se produce en la Estación N°3, donde aún es posible observar la superficie de rotura fresca (Fig. 9), desprovista de vegetación (ver apartado 3 del ANEXO I). En las Estaciones N°2 y N°4, el mismo proceso ha tenido lugar hace algunos años, y actualmente los planos de rotura se encuentran en proceso natural de ser vegetados (ver apartados 2 y 4 del ANEXO I).



*Figura 9. Deslizamientos irregulares de rocas en la Estación N°3. Nótese el plano de ruptura irregular. Las flechas rojas indican la dirección del movimiento.*

### 8.2.3 Caída de rocas

Los desprendimientos o caídas de rocas (Fig. 7), son los movimientos en caída libre de fragmentos de roca sobre una superficie fuertemente inclinada. La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida. Pueden ocurrir individualmente o en grupos, sin embargo, la distinción más importante de una caída de roca es que hay poca interacción dinámica entre los fragmentos individuales en movimiento, los cuales se mueven como cuerpos rígidos independientes interactuando con el sustrato mediante impactos episódicos (Hungre et al. 2014). La deformación de los fragmentos no es importante, aunque estos pueden romperse durante los impactos.

Este tipo de proceso ha sido reconocido en: el sector cercano al salto Bossetti (ver apartados 1 y 2 del ANEXO I), el sector del Salto Alvar Núñez (ver apartado 5 del ANEXO I) y a lo largo de la bajada y recorrido que lleva a la antigua zona de embarque y Punta Peligro (línea punteada de color verde en la figura 5). Este último sector ha sido estudiado en detalle en los trabajos precedentes desarrollados por el INTI y SRK consulting.

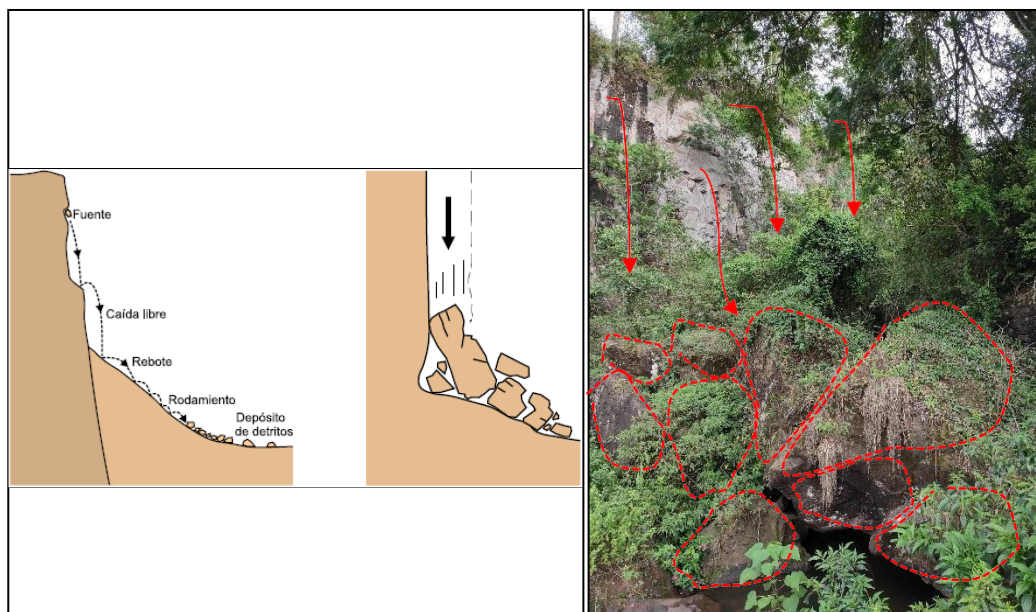


Figura 10. Representación esquemática de caída de bloques. Derecha: Caída de bloques observada en el sector del Salto Bossetti, las flechas rojas indican la trayectoria de los bloques (marcados en líneas punteadas).

### 8.2.4 Vuelcos o desplomes

Un vuelco o desplome (Fig. 11), consiste en la rotación de una masa de roca (generalmente en forma de columna o de placa) en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad. La roca es relativamente masiva y la rotación se produce en discontinuidades basales bien definidas. El movimiento es hacia fuera (hacia la parte externa) y puede comenzar lentamente, pero la última etapa de la falla puede ser extremadamente rápida (Hungre et al. 2014).

La rotación de los bloques se puede iniciar por la presión del agua en las grietas de tensión, por el colapso de una base menos resistente, o por la vibración de un sismo o un episodio de crecida.

Si bien en la inspección del circuito turístico no se han detectado bloques en situación de desarrollar caída por vuelco que puedan impactar directamente sobre la pasarela, este proceso es conspicuo en las paredes verticales que conforman la barranca; donde la socavación de la base, el desconfinamiento y los procesos erosivos actúan en conjunto produciendo el retroceso de las laderas. Esta situación, puede

hacer que se vean afectadas (en sitios puntuales) las fundaciones sobre las que se apoyan las pasarelas del CI.

Los procesos de remoción en masa por vuelco y caída de bloques, han sido estudiados en detalle por el INTI (2016) y SRK Consulting (2016a,b y 2018a,b,c) a lo largo del recorrido que lleva a la antigua zona de embarque y Punta Peligro (parte inferior clausurada del CI, demarcada en línea punteada de color verde en la figura 5). Los resultados de dichos estudios, demuestran que existe un gran peligro geológico asociado a estos eventos y, por lo tanto, los autores han recomendado que se restrinja la circulación por ese sector hasta no adoptar las medidas de contención y estabilización correspondientes. En la actualidad, el sector permanece cerrado.



Figura 11. Representación esquemática del proceso de vuelco de bloques. Derecha: Bloque con potencial de desarrollar caída por vuelco en el sector del Salto Alvar Núñez.

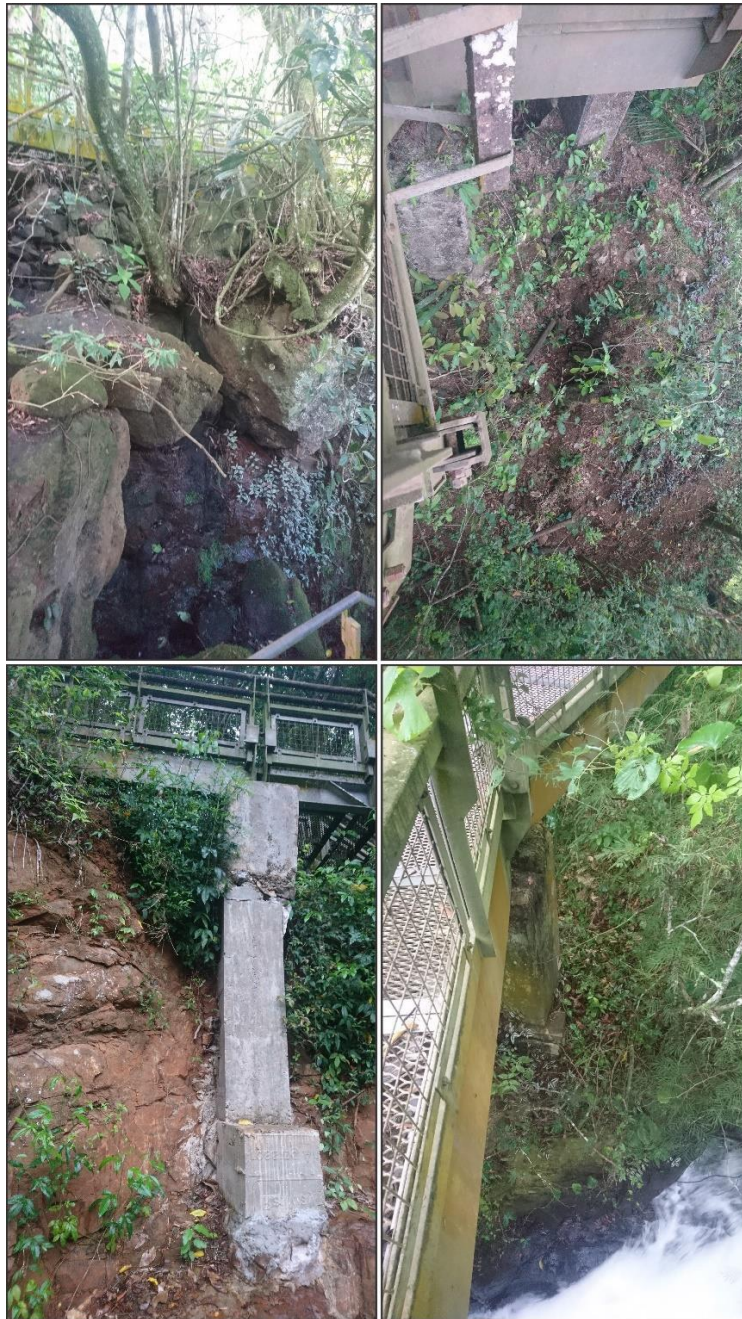
### 8.3. Inspección visual de las bases de fundación

A lo largo del recorrido se ha realizado una inspección visual de las fundaciones de la pasarela, detectándose algunas situaciones potencialmente peligrosas que requieren un análisis más detallado (Fig. 12), excediendo el alcance del presente informe, a saber:

- el puente ubicado en el ingreso al Mirador del Salto Bossetti se encuentra fundado sobre una serie de bloques cuya estabilidad puede ser potencialmente peligrosa.
- en el Mirador San Martín se observan signos moderados de erosión en una de sus bases, que con el tiempo pueden derivar en problemas de socavación, comprometiendo su estabilidad.
- en el sector del Salto Alvar Núñez, donde se produce la bifurcación del circuito en un tramo superior y uno inferior, se observa que una de las bases de fundación ha sido reparada debido al colapso del bloque sobre el cual estaba apoyada. La base en cuestión muestra cierta excentricidad, apoyando de manera inclinada sobre el plano de deslizamiento y en la misma dirección que la pendiente, esto puede provocar una componente de esfuerzo que tiende hacia la inestabilidad.
- en el puente inferior del Salto Alvar Núñez y en el puente del Salto Lanusse, las bases de fundación se encuentran muy próximas al límite de la barranca, observándose una leve socavación en una de sus bases.

Para determinar la estabilidad de estas situaciones puntuales se requiere conocer el diseño constructivo de las fundaciones y sus parámetros de cálculo estructural. Se recomienda realizar un relevamiento detallado de esos sectores para establecer el estado de situación actual de las fundaciones involucradas.





*Figura 12. Inspección visual de las fundaciones de la pasarela. De izquierda a derecha: a) Puente que lleva al Mirador del Salto Bossetti. b) Signos de erosión en el Mirador San Martin. c) Fundación reparada en el sector del Salto Alvar Núñez. d) Fundación próxima al límite de la pared en el Salto Lanusse.*

#### 8.4. Evaluación de peligrosidad geológica

En la figura que se presenta a continuación se muestra un mapa de zonificación de peligrosidad geológica de acuerdo con los procesos detectados. En base al análisis de estabilidad (ANEXO I), se establece una escala cromática según:

- verde (sin peligro): no se detecta peligro por procesos remoción en masa. El análisis de estabilidad sugiere que existe un factor de seguridad mayor a 3.
- amarillo (peligro leve): se detectan procesos de remoción en masa activos o pasados. El análisis de

- estabilidad indica que el factor de seguridad se encuentra entre 2 y 3.
- naranja (peligro moderado): se detectan procesos de remoción en masa activos o pasados. El análisis de estabilidad indica que el factor de seguridad se encuentra entre 1,3 y 2.
  - rojo (peligro alto): se detectan procesos de remoción en masa activos o pasados. El análisis de estabilidad indica que el factor de seguridad es menor a 1,3.

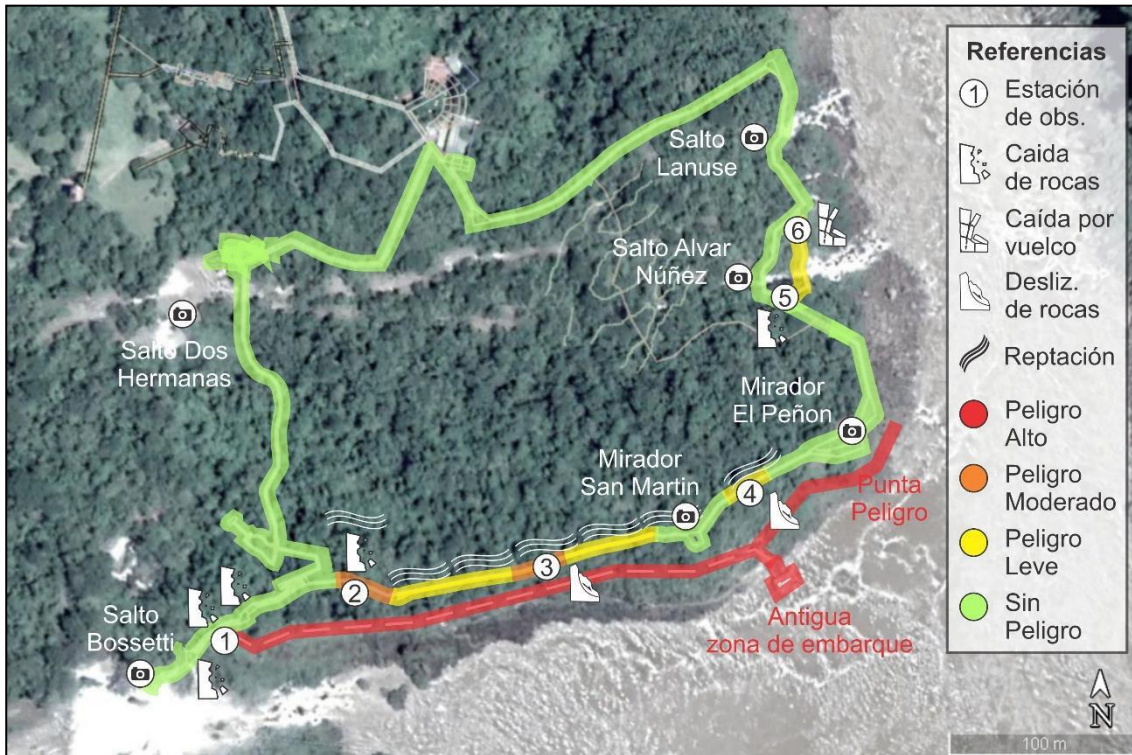


Figura 13. Circuito Inferior. Evaluación del peligro asociado a los procesos de remoción en masa.

## 10. Conclusiones

Se realizó el relevamiento geotécnico del sector que comprende el paseo del Circuito Inferior (CI con el fin de determinar el grado de peligrosidad geológica, relacionado a posibles eventos de remoción en masa. Para ello, se definieron sitios puntuales de observación (Estaciones), identificando los principales procesos geológicos activos y realizando el levantamiento y análisis de los datos necesarios para su adecuada caracterización (ANEXO I).

Los principales resultados del relevamiento geológico se resumen a continuación:

- En términos generales, todo el CI se halla emplazado en el techo o parte superior de la colada basáltica inferior, a excepción de la bajada y recorrido hacia el embarcadero que han sido construidos en los depósitos de talud, formados por bloques desprendidos del techo y del sector central de la colada.
- El perfil generalizado del sitio de estudio queda representado de techo a base por: Un manto de suelo orgánico del orden de 50 cm de espesor, que en profundidad puede dar lugar a suelos rojizos lixiviados; Una zona de transición con alto grado de fracturación del macizo y presencia de raíces, de entre 1 m y 5 m de espesor (que puede estar ausente), donde son comunes los niveles saprolíticos; Una secuencia de basaltos moderadamente alterados y de baja fracturación de aproximadamente 15-25 m de espesor, donde se distinguen bancos vesiculares y masivos.
- Desde el punto de vista estructural, se reconocen cinco familias de diaclasas (subverticales y subhorizontales), con persistencias  $p > 10\text{m}$  y mínima rugosidad; sus orientaciones son:  $-/00^\circ$

(sub-horizontal), N240°/90°, N340°/60°, N120°/90° y N20°/60°, esta última mayormente acotada a la zona del Salto Bossetti.

- La matriz de roca presenta medidas indirectas de resistencia a la compresión, mayores a 70 MPa; las paredes de las diaclasas tienen alteración moderada con una resistencia media estimada de 55 MPa; en general, el ángulo de fricción interna  $\phi_b$  entre bloques de basalto puede estimarse en 32°;

Los diferentes tipos de procesos de remoción en masa identificados son:

- **Reptación:** se observa a lo largo de toda la ladera comprendida en el trayecto que une el mirador del Salto Bossetti con el Mirador de El Peñón (Punta Peligro), evidenciado por pequeños quiebres en la pendiente general, que se desarrollan en coincidencia con las raíces de los árboles, las cuales actúan como sustento y anclaje de la zona superior. El proceso ha sido agravado por las tareas de mantenimiento en el perímetro de la pasarela, donde se ha excavado la base del talud, quitando el confinamiento y el sustento natural que proporcionan las raíces. Como consecuencia de dichas tareas, en aquellos sectores de geometría desfavorable (con taludes mayores a 35° y alturas que superan los 1,5m), se han desencadenado deslizamientos de rocas poco profundos y eventos de caída de árboles, como los analizados en las Estaciones N°3 y N°4. El peligro asociado a reptación es leve a moderado siendo el mayor problema la caída de árboles y la posibilidad de generar deslizamientos por colapsos de rocas en sitios puntuales.
- **Deslizamientos:** se reconocen deslizamientos traslacionales por fallas planas y en cuña, y deslizamientos irregulares de rocas.

Los deslizamientos por fallas planas y en cuña son comunes en las barrancas de paredes verticales y suelen dar lugar a procesos de caída de bloques o vuelcos, como se puede observar en el sector del Salto Alvar Núñez (Estación N°5), donde se ha registrado (hace un par de años) el impacto de un bloque (de aprox. 1m<sup>3</sup>) sobre la pasarela provocando daños en la infraestructura. El peligro en este sector se considera leve a moderado, asociado a la posibilidad de caída de bloques de 0,5m a 1,5m de diámetro.

Los deslizamientos irregulares de rocas se han detectado en algunos sitios puntuales del CI asociados al proceso generalizado de reptación de ladera y a las labores de mantenimiento realizadas. El ejemplo más reciente, se produce en la Estación N°3, donde aún es posible observar la superficie de rotura fresca y desprovista de vegetación. En las Estaciones N°2 y N°4, el mismo proceso ha tenido lugar hace algunos años, y actualmente los planos de rotura se encuentran en proceso natural de ser vegetados. El peligro asociado a estos sectores se considera moderado, representado por la posibilidad de caída de bloques entre 0,1m y 0,5m de diámetro.

- **Caída de rocas y vuelcos:** los procesos de caída de bloques y vuelcos son generalizados a lo largo del tramo clausurado que lleva, desde el Salto Bossetti, a la antigua zona de embarque y Punta Peligro (línea punteada de color verde en la figura 5), identificándose en toda la escarpa de pared vertical que conforma la barranca. Ese sector ha sido estudiado en detalle en los trabajos precedentes desarrollados por el INTI y SRK consulting, proponiendo las soluciones pertinentes. En el recorrido turístico del CI, se reconocen casos puntuales de caída de roca en la zona próxima al Salto Bossetti (Estación 1 y 2) y en el sector del Salto Alvar Núñez (Estación 5). En este último sector la caída de bloques se asocia con procesos de deslizamiento por falla plana que conllevan un peligro leve a moderado. El análisis de estabilidad (ANEXO I) realizado en la Estación 1 indica que no hay peligro de impacto sobre la pasarela. En la Estación 2, se observa un bloque cuyas dimensiones no han sido posibles de determinar, razón por la cual se tiene un alto grado de incertidumbre que lleva a considerar la zona como una situación de peligro. El análisis de estabilidad indica que el bloque se mantiene estable en condiciones secas, pero puede volverse inestable (con un 48% de probabilidad de falla) ante episodios de fuertes lluvias (en condiciones de saturación del suelo).

---

## 11. Recomendaciones

Como medidas generales de control y mitigación de los procesos de reptación y deslizamientos por colapsos de rocas se propone:

- Suspender las tareas de mantenimiento que socavan las bases del talud en los márgenes de la pasarela. De ser necesario, por cuestiones de seguridad de los visitantes, retirar la vegetación que invade la pasarela se deberá ejecutar una tala controlada evitando dañar el sistema radicular de los árboles y quitando sólo las ramas que representen algún peligro. Las tareas de mantenimiento deberán ser supervisadas por personal calificado para así evitar generar situaciones desfavorables en las condiciones de estabilidad.
- Realizar una inspección y valoración en terreno de los árboles que han sido afectados por las tareas ya ejecutadas, con el fin de evaluar su aptitud para la supervivencia y el peligro ante una eventual caída. Esta tarea deberá ser llevada a cabo por personal idóneo. En caso de detectarse una situación peligrosa se recomienda talar el árbol tomando los recaudos necesarios para evitar accidentes, controlando la excavación de las zonas afectadas por sus raíces y retirando los bloques que hayan quedado sueltos como consecuencia de las maniobras.

En las zonas donde se han registrado deslizamientos irregulares de suelo y rocas (Estaciones 2, 3 y 4) se proponen las siguientes alternativas generales de estabilización, ordenadas según su grado de intervención en el medio natural. Cabe destacar que estas medidas no son mutuamente excluyentes y, por lo tanto, si el medio físico lo requiere pueden ser adoptadas en conjunto:

- Estabilización de la ladera mediante la implantación de vegetación autóctona: como se describe en el ANEXO I, el efecto neto de la vegetación puede representarse como un aumento de la cohesión aparente del suelo. Sin embargo, la complejidad de las variables involucradas, hace que la selección de una adecuada combinación de plantas y árboles (que garantice los mejores efectos en la estabilidad del sector), requiera de estudios detallados y específicos sobre la manera en que la morfología, diversidad y edad de la vegetación influyen la estabilidad. Hasta contar con estudios más precisos y como medida inicial, se propone restituir la vegetación con las especies nativas típicas de cada sector, priorizando por aquellas de crecimiento más rápido, mayor consumo de agua y cuyo sistema radicular presente un mayor arraigue y penetre más profundo en el interior del macizo.
- Ejecución de un muro de contención rígido o gavión entre la pasarela y el talud: esta medida puede ser adoptada en los sitios puntuales donde se han detectado los problemas de remoción en masa (Estaciones 2,3,4), o a lo largo de todo el sector de ladera afectado por procesos de reptación (trayecto que une el sector del Salto Bossetti con el Mirador El Peñón). El diseño de los mismos deberá tener en cuenta aspectos estructurales, de drenaje y geológicos-geotécnicos.
- Cambio de traza de la pasarela: la reubicación de la traza de la pasarela puede ser una alternativa a todos los problemas de remoción en masa detectados. Para iniciar el proyecto de una traza alternativa, se deberá contar con un estudio topográfico de detalle. Teniendo en cuenta las necesidades del proyecto y la inspección visual del sector, una alternativa a evaluar puede ser el traslado de la traza (en forma paralela a la actual) unos 10-20m más al norte, desde la bifurcación de la pasarela que conduce al Mirador del Salto Bossetti y hasta el Mirador San Martín. De esta manera se evitan los peligros asociados con las Estaciones 2, 3 y 4, sin demasiado perjuicio en el atractivo turístico del circuito puesto que en ese trayecto no se incluye ningún mirador o salto. El proyecto debe las necesidades estructurales de la pasarela y las condiciones geológicas-geotécnicas del lugar.

Respecto de las medidas de control para los procesos de caídas de rocas y vuelco se recomienda:

- En la Estación 1 (próxima al Salto Bossetti), dado el bajo peligro asociado, implementar un sistema

de monitoreo, en base a observaciones periódicas y regulares del sector con el fin de detectar cambios que pudieran producirse respecto de la situación actual. Por el momento no es necesaria la intervención con medidas de estabilización adicionales.

- En la Estación 2 (próxima al Salto Bossetti), se detecta un bloque potencialmente inestable, cuya geometría no ha sido posible de terminar debido a la cobertura edáfica. Esta situación genera un alto grado de incertidumbre en el análisis de su estabilidad. Es por ello que se recomienda, como primera medida, profundizar en el estudio del sector, para delimitar la geometría exacta del bloque y su relación con el sustrato. Asumiendo que el bloque posea una geometría aproximadamente cúbica, los modelos de estabilidad indican que el bloque se mantiene estable en condiciones secas, pero puede volverse inestable (con un 48% de probabilidad de falla) bajo condiciones de saturación del suelo. Teniendo esto en cuenta se recomienda evitar la circulación en días de lluvias prolongadas e intensas, y mientras se observen signos de saturación del suelo en el sector (escorrentía superficial, encharcamientos, formación de barro, etc.).
- En la Estación 5, el tramo de pasarela superior no presenta peligro por deslizamientos o caída de bloques. Sin embargo, el tramo de pasarela inferior presenta un peligro leve a moderado. Se recomienda realizar un saneamiento de los taludes del sector, evitando arrancar la cobertura edáfica y el manto vegetal, pero extrayendo los árboles que han quedado sin sustento (en la base) luego de los eventos de remoción en masa. Las zonas afectas deben estabilizarse mediante la reposición de vegetación autóctona. Como disposición adicional, se recomienda el monitoreo periódico y regular del sector con el fin de detectar cualquier cambio que pudiera producirse respecto de la situación actual.

Como medida general de estabilización para bloques puntuales o zonas de escarpas, se propone seguir las recomendaciones efectuadas por SRK Consulting (2018 a,b,c), a saber:

- Previo a la instalación del sostenimiento, remover la vegetación en los sectores donde ésta represente un peligro en sí misma por estar pobremente enraizada en el macizo rocoso;
- Colocación de malla de protección y pernos de anclaje en la escarpa mediante revestimiento SteelGrid® MO 200 de Maccaferri o similar y pernos de anclaje Jennmar Saferock® G (40) A440-280 Ø16 o fabricados con barras de acero Acindar AD N-420, de Ø20, de 3.5 m de longitud y dispuestos a tresbolillo cada 2 m en dirección vertical y horizontal;

Con el fin de fortalecer y optimizar las acciones destinadas al manejo del peligro desde todas sus dimensiones (análisis, prevención, preparación y respuesta) se recomienda:

- Realizar estudios técnicos para determinar los peligros asociados a procesos de remoción en masa en los otros circuitos del PNI.
- Establecer un programa de asistencia técnica que consista en monitoreos y controles periódicos para validar y actualizar la información generada. Se propone una visita de asistencia técnica cada dos años, o cuando un evento lo amerite.
- Confeccionar una base de datos de los eventos detectados históricamente. Dónde se incluya información básica de localización, fecha, descripción, tipo, magnitud, etc.
- Generar de un Sistema de Información Geográfico (SIG) que permita vincular toda la información disponible del PNI.

Además, a lo largo del recorrido se ha realizado una inspección visual de las fundaciones de la pasarela, detectándose algunas situaciones potencialmente peligrosas que requieren un análisis más detallado, excediendo el alcance del presente informe. Se recomienda realizar un relevamiento de los siguientes sectores para determinar el estado de situación actual de las fundaciones involucradas:

- Puente ubicado en el sector del Salto Bossetti.
- Mirador San Martín.

- Tramo inferior del Salto Alvar Núñez.
- Puente del Salto Lanusse.

## 12. Alcance del estudio

Las recomendaciones que se incluyen en el presente informe han sido realizadas a partir de la información obtenida en la visita a terreno entre los días 14 y 20 de diciembre de 2020.

Es necesario remarcar que las observaciones y mediciones llevadas a cabo para identificar y caracterizar los diferentes procesos de remoción en masa, estuvieron considerablemente limitadas por las condiciones de accesibilidad y de vegetación. En muchos casos el acceso a los afloramientos resulta restringido o sumamente dificultoso y la visibilidad del macizo (en varios sectores) está ocluida por la vegetación, por lo que no se descarta que existan situaciones de peligro no detectadas en otros sectores del circuito. Por este motivo, se enfatiza en que las recomendaciones aquí presentadas deben interpretarse como mínimas, pero no taxativas.

Para minimizar la incertidumbre generada por estas situaciones de escasa accesibilidad y visibilidad, la información generada en este estudio puede ser complementada mediante un análisis topográfico de detalle, permitiendo realizar una mejor delimitación de las zonas potencialmente inestables (que presenten taludes y laderas de geometrías desfavorables). Esto ayudaría a la detección temprana de posibles eventos de remoción en masa.

Para asegurar que el peligro esté acotado, se recomienda que la implementación de las medidas de mitigación se lleve a cabo bajo la supervisión de un ingeniero geotécnico.

## 13. Trabajos citados en el texto

- Anbalagan R, Sharma S, Raghuvanshi TK. (1992) Rock mass stability evaluation using modified SMR approach. In: Proceedings of 6th nat symp rock mech, Bangalore, India, p. 258–68.
- Ardolino A. y Miranda F., 2008. Las Cataratas del Iguazú: El agua grande. <https://repositorio.segemar.gob.ar/handle/308849217/1340>
- Aydin, A., 2009. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46: 627-634.
- Barranquero H., 1995. Parque Nacional Iguazú, relevamiento geológico. Inédito.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Cardozo, C. P. (2013). Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina). Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba.
- Ciccioli S., 2020. La geología de Misiones según el informe inédito de CARTA.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslides: investigation and mitigation*. Chapter 3- Landslide types and processes. Transportation research board special report, (247).
- Enriquez C. et al., 2000. Informe técnico. Remodelación Área Cataratas del Parque Nacional Iguazú. Evaluación del estado de la roca en algunos puntos de la obra. Inédito.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. A. R. L. O. S. (2002). *Ingeniería geológica*.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- INTI, 2014. Relevamiento geológico expeditivo en la zona denominada Punta Peligro en el Área Cataratas

---

del Parque Nacional Iguazú, pcia. de Misiones. Inédito.

INTI, 2016. Informe de asistencia técnica. Inédito.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Commission on standardization of laboratory and field tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts Vol. 15: 319-368. Inglaterra

Marinos, P. y Hoek, E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In ISRM international symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Palmström, A., 1995. RMI – a rock mass characterization for rock engineering purposes. Tesis Doctoral de la Universidad de Oslo, Noruega, 400 pp.

Palmström, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362-377.

Ramos, V. A. (1999). Las provincias geológicas del territorio argentino. *Geología Argentina*, 29(3), 41-96.

Romana M. (1985a). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Proc. Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics: 49-53.

Romana M. (1995b). The geomechanical classification SMR for slope correction. Proc. Int. Congress on Rock Mechanics 3: 1085-1092.

Romana M. (1997). El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. In: del IV Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables, vol. 3:955–1011.

Saunders I, Young A (1983) Rates of surface processes on slopes, slope retreat and denudation. *Earth Surface Processes and Landforms* 8:473-501.

Schiaffino K., Almirón, M., Chediak S. (2002). El Parque Nacional Iguazu, Argentina. En: Taller regional sobre desarrollo de capacidades para el manejo de áreas protegidas, Parque Nacional Huascarán, Perú.

Seisedos Santos, J. 2009. Los grandes paleo-desplazamientos de Güimar y la Oratava (Tenerife): análisis geológico, mecanismos de inestabilidad y modelización geomecánica. Tesis de Doctorado. Facultad De Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 202 pp.

Herrera, L.; M. Yirley y R. Martínez. 2011. Aplicación de métodos indirectos para el análisis de susceptibilidad de deslizamiento en la subcuenca del río Gatuncillo, Panamá. *Rev. Mapping* (1):15-23.

SRK Consuting, 2016a. Informe de visita y evaluación preliminar. Inédito.

SRK Consuting, 2016b. Recomendaciones preliminares de cimentación. Inédito. SRK Consuting, 2018a. Informe de relevamiento geotécnico. Inédito.

SRK Consuting, 2018b. Análisis de peligro de caída de rocas. Inédito.

SRK Consuting, 2018c. Análisis de medidas de mitigación. Inédito.

## ANEXO I – ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

### 1. Estación N°1 (Sector del salto Bossetti)

En el sector comprendido entre el mirador del Salto Bossetti y la escalera por la cual se accede al mismo, se estableció un primer punto de relevamiento geomecánico del macizo rocoso, denominado Estación N°1. Tras un análisis geológico y morfológico preliminar, fueron seleccionados dos sectores del macizo rocoso, con presencia de taludes verticales a subverticales, con alturas de entre 8 y 12 metros (Fig. A1.1).

En función de las características del macizo rocoso y el patrón de discontinuidades, presente en cada uno de los sectores analizados, se evaluó la estabilidad de las laderas antes el deslizamiento planar, en cuña y el vuelco.



Figura A1.1. Arriba: Vista generales de los afloramientos. Abajo: Detalle del macizo rocoso.



## Matriz rocosa

La matriz rocosa, en los dos sectores relevados, está compuesta por basaltos de estructura masiva y leve a moderado grado de degradación (decolorada a descompuesta), en función de la clasificación de la ISRM (1978).

Se estimó una resistencia a la compresión uniaxial (**UCS**), a partir de una serie de mediciones estadísticas, siguiendo las metodologías de campo propuestas por ISRM 1978. De esta manera, por medio de mediciones con piqueta geológica, se estimó una **resistencia de entre 50 y 100 MPa (R4)**. Por su parte, estos valores fueron cotejados con mediciones ejecutadas mediante un esclerómetro de Schmidt marca Proceq, modelo RockSchmidt, tipo L, siguiendo la metodología sugerida por ISRM (Aydin 2009). Los resultados obtenidos por este método arrojaron unos **70 MPa**, con valores estadísticos de **R (rebote) de  $\mu$ : 33,1 y s: 9**.

## Discontinuidades

Se reconocieron tres familias de discontinuidades, correspondientes a diaclasas, las cuales se encuentran interconectadas, formando un patrón mayormente en zig-zag, debido a su escasa persistencia. La **resistencia de las paredes (JCS)**, estimada mediante esclerómetro de Schmidt, presenta valores medios de unos **55 MPa**, con un **r medio de 29,5 y una desviación estándar de 11**.

Se llevó a cabo un ensayo de campo tipo tilt test, a fin de estimar un ángulo de fricción básico general para las discontinuidades, inclinando dos bloques basálticos prismáticos, lo que arrojó un valor de  **$\phi_b = 32^\circ$** .

Las fracturas relevadas presentan las siguientes características:

FAMILIA	1	2	3
Rumbo	340°± 10°	140°± 10°	050°± 10°
Inclinación (derecha)	60°± 10°	30° ± 15°	90°± 10°
Espaciamiento	0,7 m	0,4 m	1,0 m
Persistencia	1 a 8 m	1 a 3 m	8 a 10 m
Abertura	> 10 mm	> 10 mm	> 10 mm
Relleno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Rugosidad	JRC 8-10	JRC 8-10	JRC 8-10
Alteración	Moderada	Moderada	Moderada
Humedad natural	Seca	Seca	Seca

*Cuadro A1.1: Caracterización geomecánica de las principales familias de discontinuidades.*

Los dos sectores del macizo rocoso analizado en la Estación 1, presentan, respectivamente, taludes con las siguientes actitudes, medidas siguiendo la regla de la mano derecha:

Talud 1:	Talud 2:
Rumbo: 050°± 10°	Rumbo: 220°± 10°
Inclinación: 90°± 10°	Inclinación: 70°± 10°
Dirección de Inclinación: 140°± 10°	Dirección de Inclinación: 310°± 10°
Altura: 8 m	Altura: 12 m

En la Figura A1.2 se expone un diagrama estereográfico, indicando la orientación de las tres familias de discontinuidades y de los dos taludes relevados.

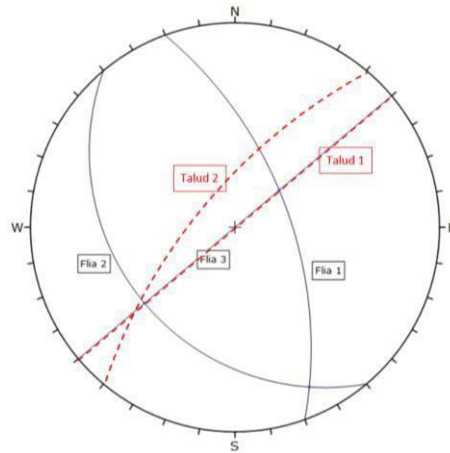


Figura A1.2. diagrama estereográfico, indicando la orientación de las tres familias de discontinuidades y de los dos taludes relevados

### Clasificación geomecánica del macizo rocoso

El macizo rocoso fue clasificado a partir de diversas metodologías (ANEXO II), que comprenden el Geological Strength Index (GSI), definido por Marinos y Hoek (2000); el Rock Quality Designation (RQD) en la versión de Palmström (2005); el Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989); el Slope Mass Rock (SMR) de Romana Ruíz (1985a,b); y el Rock Mass Index (RMi) de Palmström (1995).

#### **GSI**

El macizo rocoso presenta una estructura en bloques, con discontinuidades rugosas, moderadamente meteorizadas. Se asigna un valor medio de **GSI = 60**.

#### **RQD volumétrico**

A partir de mediciones en superficie, se estimó el RQD volumétrico, siguiendo las recomendaciones de Palmström (2005), quien correlaciona este índice con el “recuento volumétrico de discontinuidades”, o volumetric joint count (Jv), calculado como la sumatoria de las frecuencias de cada familia de discontinuidades, o su inversa, los espaciamientos.

De esta manera, el Jv puede calcularse como  $e_1^{-1} + e_2^{-1} + e_3^{-1}$ . Por lo que  $Jv = 0,7^{-1} + 0,4^{-1} + 1^{-1}$ , obteniéndose un valor de **Jv = 4,9**.

A partir de este parámetro, se puede estimar el RQD volumétrico mediante la expresión  $RQD = 110 - 2,5 Jv$ , lo que arroja un valor de **RQD = 98**.

#### **RMR**

A partir de las mediciones efectuadas, se calcularon dos índices: un valor de RMR básico (RMR<sub>B</sub>), es decir, sin la corrección por orientación de discontinuidades; y un valor de RMR corregido (RMR<sub>C</sub>) en función de un análisis cinemático de posibles inestabilidades. En ambos casos, se consideraron los parámetros de las discontinuidades más desfavorables, cuyas puntuaciones (ver ANEXO II) se exponen a continuación:

- Resistencia: 7 puntos (70 MPa)
- RQD: 20 puntos (98 MPa)
- Espaciamiento: 10 puntos (0,4 m)
- Persistencia: 2 puntos (8 a 10 m)
- Abertura: 0 puntos (>10 mm)
- Relleno: 6 puntos (ninguno)
- Rugosidad: 3 puntos (ligera – JRC 9)
- Alteración: 3 puntos (moderada)
- Humedad: 15 puntos (seco)

$$RMR_B = 66$$

Corrección por orientación de discontinuidades:

En función del análisis cinemático presentado en la Figura A1.2, surge en forma preliminar que en el talud 1 existe la posibilidad de generarse una cuña inestable, formada por la intersección de las familias de discontinuidades 1 y 2, si bien la resistencia al corte del macizo rocoso debería ser baja para que este proceso pudiese materializarse. Por su parte, en ambos taludes podría desarrollarse en forma marginal el vuelco de bloques formados por la familia 3, si se dieran las condiciones necesarias en cuanto a la geometría de los bloques.

A partir de esta elaboración se asigna un valor de corrección para taludes de -25 puntos, por lo que:

$$RMR_C = 41.$$

### SMR

El índice SMR es una adaptación del RMR de Bieniawski (1989) desarrollada por Romana Ruíz (1985) para caracterizar taludes excavados en roca.

El cálculo consiste en un ajuste del índice RMR por la orientación de la discontinuidad, a través de cuatro parámetros cuantitativos, tres dependientes de las relaciones geométricas entre la discontinuidad y el talud y un cuarto que depende del método de excavación empleado (ver ANEXO II).

El SMR se calculó a través de la aplicación de código abierto SMRTool para MATLAB™.

planes	dip dir	dip	RMRb	A	B	C	failure	F_1	F_2	F_3	F_4	SMR	Class	Description	Stability	Failures	Support
J_1	70	60	66	80	60	-30	Planar	15	1	-60	15	72	II	good	stable	some blocks	occasional
J_2	50	30	66	80	30	120	Toppling	15	1	-25	15	77	II	good	stable	some blocks	occasional
J_3	140	90	66	10	90	0	Planar	7	1	-25	15	63	II	good	stable	some blocks	occasional

Cuadro A1.1: Cálculo del índice SMR.

### RMI

Este índice fue elaborado con el objeto de representar la influencia del denominado Efecto Escala en la resistencia de un macizo rocoso. Por este motivo, está formado por dos parámetros: la resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa (UCS) y un factor de reducción (JP), comprendido entre 0 (para macizos completamente desintegrados) y 1 (para macizos completamente masivos), de forma que

$$RMI = UCS \cdot JP$$

Este último parámetro se calcula, a partir de una serie de características geológicas, geomecánicas y geométricas del macizo rocoso, medidas en el sitio, mediante la expresión

$$JP = 0,2 \cdot jC^{1/2} \cdot Vb^D$$

El factor  $jC$ , puede calcularse a su vez, mediante la expresión  $jC = (jL \cdot jR/jA)$ . De acuerdo con Palmström (1995), existen diferentes métodos para estimar estos tres parámetros. En el presente trabajo, se estima  $jL$  a partir de los valores de persistencia de las discontinuidades, mientras que el cociente  $jR/jA$  se calcula como  $jR/jA \approx \arctg(\phi) = \arctg(\phi_b + i) = \arctg[\phi_b + JRC \cdot \log(JCS/UCS)]$ , siendo JCS la resistencia a la compresión uniaxial de las paredes de las discontinuidades.

Por su parte, el parámetro  $Vb = \beta \cdot Jv^{-3}$ , siendo  $\beta \approx 20 - 7 e_{max}/e_{min}$ , donde  $e$  es el espaciamiento.

Finalmente, puede hallar que  $D = 0,37 jC^{-0,2}$ .

A partir de los relevamientos geomecánicos efectuados en el sitio, se estimaron los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} UCS &= 70 \text{ MPa} \\ jL &= 1 \\ \phi_b &= 32^\circ \\ JRC &= 9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JCS &= 55 \text{ MPa} \\
 e_{\max} &= 1,0\text{m} \\
 e_{\min} &= 0,4\text{m} \\
 Jv &= 4,9 \\
 jC &= jL \arctg [\phi b + JRC \log (JCS/UCS)] = 1 \arctg [32 + 9 \log (55/70) = \arctg (31) = 1,54 \\
 Vb &= (20 - 7 e_{\max}/e_{\min}) \cdot Jv^{-3} = (20 - 7 \cdot 1/4) \cdot 4,9^{-3} = 18,25 \cdot 0,0085 = 0,16 \\
 D &= 0,37 jC^{-0,2} = 0,37 \cdot 1,54^{-0,2} = 0,34 \\
 JP &= 0,2 \cdot jC^{1/2} \cdot Vb^D = 0,2 \cdot (1,54)^{1/2} \cdot 0,16^{0,34} = 0,2 \cdot 1,24 \cdot 0,54 = 0,134 \\
 RMi &= USC \cdot JP = 70 \text{ MPa} \cdot 0,134
 \end{aligned}$$

Lo que implica que la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso corresponde a un 13% de la de la matriz rocosa, siendo

$$RMi = 9,4 \text{ MPa}$$

### Estabilidad de taludes

A partir del análisis cinemático y geomecánico desarrollado, se elaboró un modelo probabilístico de equilibrio límite, a fin de determinar la probabilidad de una falla en cuña definida por la intersección de las familias de discontinuidades 1 y 2, en el talud 1.

Para ello, se utilizó el software Swedge 7 de la empresa RocScience.

El criterio de rotura seleccionado es el de Barton y Bandis, definido como:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} [\phi_r + JRC \log (JCS/UCS)]$$

donde:

JRC: Coeficiente de rugosidad conjunta

$\sigma_n$ : Tensión normal actuando en la superficie de la unión de rocas

JCS: Resistencia a la compresión conjunta

$\phi_r$ : Ángulo básico de fricción interna de una superficie de deslizamiento

Siendo  $\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 (r/R)$ . Donde r y R son, respectivamente, JCS y UCS definidas en función del índice de rebote obtenido del esclerómetro de Schmidt, y  $\phi_b$  el ángulo de fricción interna definido mediante el ensayo de inclinación (*tilt test*). Se tiene:

$$\phi_r = (32^\circ - 20^\circ) + 20 (29,5/33,1) = 30^\circ$$

Entonces,

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} [30^\circ + 9 \log (55/70)]$$

$$\tau = 0,56 \sigma_n$$

Para el modelo, se consideraron las discontinuidades saturadas, simulando un evento de fuertes precipitaciones.

Por su parte, teniendo en cuenta los comentarios del personal de Parques Nacionales y de ambas empresas concesionarias, respecto a cómo vibraban los vidrios de las ventanas durante la última gran crecida del 2014, se le aplicó al macizo una elevada carga dinámica, equivalente a un coeficiente sísmico de 0,4, superando el máximo establecido para el país por el INPRES (zona 4), correspondiente a la región de cuyo.

Aplicando estos parámetros por demás conservadores, se obtuvo una probabilidad de falla por deslizamiento en cuña del 0,08%, con un factor de seguridad de 2,35 (Fig. A1.3).

Por lo tanto, se descarta la posibilidad de que pudiesen manifestarse eventos de remoción en masa de relevancia en el sector analizado.

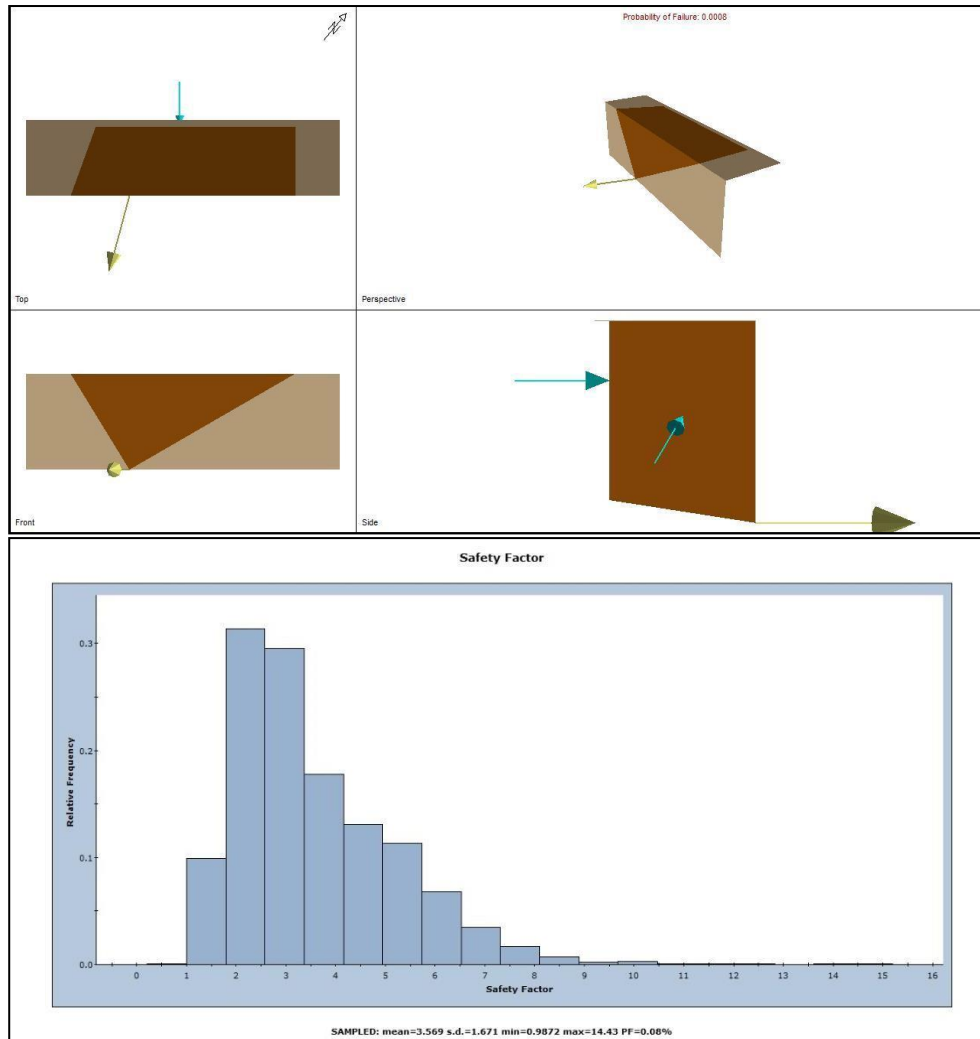


Figura A1.3. Análisis probabilístico de estabilidad por rotura en cuña, mediante el método de equilibrio límite.

## 2. Estación N°2 (Sector del Salto Bossetti)

La Estación N°2 comprende un sector de pasarela ubicado próximo a la bifurcación que conduce al mirador del Salto Bossetti.

De acuerdo con los comentarios transmitidos por el personal del PNI, en este sector se registran antecedentes de desprendimientos de bloques que han impactado sobre la pasarela, ocurriendo el último evento hace aproximadamente unos 5 años.

A raíz de esta situación el personal de la concesionaria del circuito colocó una malla metálica sobre la cicatriz de deslizamiento con el fin de contener los bloques menores. Además, se implementó un sistema de monitoreo colocando guías de cemento en la base de un bloque adyacente considerado potencialmente peligroso por su gran tamaño y proximidad a la pasarela.



*Figura A1.4: Arriba vista general del afloramiento, donde se distingue la situación del bloque inestable en relación con la pasarela y el mallado metálico colocado por la Concesionaria del Circuito. Abajo: Vista en detalle del bloque inestable (izquierda) y de la malla metálica (derecha).*

Al momento de la visita las guías de monitoreo no mostraban signos de movimiento aparente, sin embargo, en base a la inspección visual del sector se recomendó restringir la circulación de manera provisoria y preventiva.

El perfil esquemático que se presenta en la figura A1.5 ilustra la situación del bloque. Como puede observarse, el mismo se encuentra parcialmente enterrado no pudiendo definirse su continuidad en profundidad. Las dimensiones de la parte aflorante son de 2m de alto y 2m de ancho, con geometría irregular a subredondeada.

En la parte superior del bloque se observan procesos de reptación del suelo que demuestran la inestabilidad de la ladera con un movimiento lento pero continuo en el sentido de la pendiente.

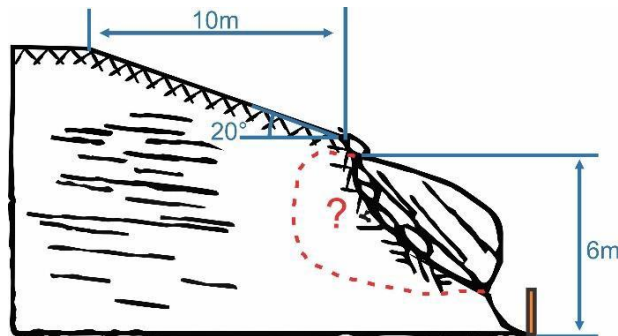


Figura A1.5: Perfil esquemático que ilustra la situación del bloque.

### Análisis de estabilidad

El bloque presenta una geometría incierta, debido a que se desconoce su dimensión en profundidad, por hallarse enterrado en el suelo residual que compone la ladera.

Se ha elaborado un modelo probabilístico de equilibrio límite, variando algunos de los parámetros de ingreso, a fin de establecer un análisis de sensibilidad que permita estimar su estabilidad ante diversos escenarios, hasta tanto pueda ser medida con mayor exactitud su geometría, así como las características del área de apoyo en el terreno.

En función de este análisis se estimó factor de seguridad de 1,63, con una probabilidad de falla del 0,05%, para condiciones secas (Fig. A1.6).

Por su parte, para condiciones de saturación total, asociadas a eventos de precipitaciones intensas y prolongadas, el factor de seguridad se estimó en 1,01, con una probabilidad de falla del 48% (Fig. A1.7).

Los resultados preliminares arrojados en la modelación, sugieren que el bloque es estable en condiciones normales, volviéndose inestable bajo la influencia de una carga hidráulica provocada, por ejemplo, por fuertes precipitaciones.

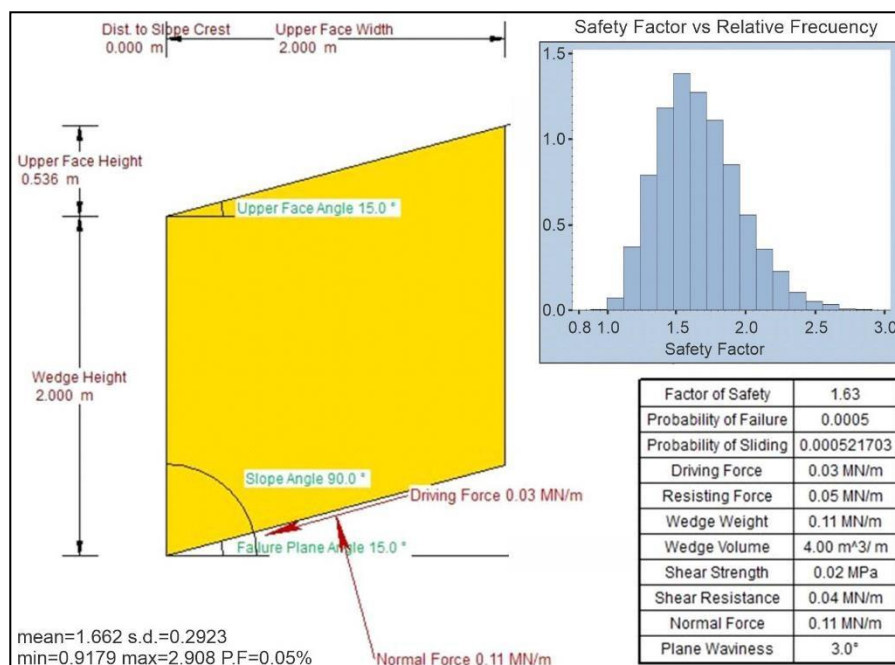


Figura A1.6. Modelo probabilístico de equilibrio límite para análisis por falla plana en condición seca. Se asume que el bloque presenta una geometría cúbica delimitada por una grieta de tracción ubicada a 2m del frente del afloramiento.

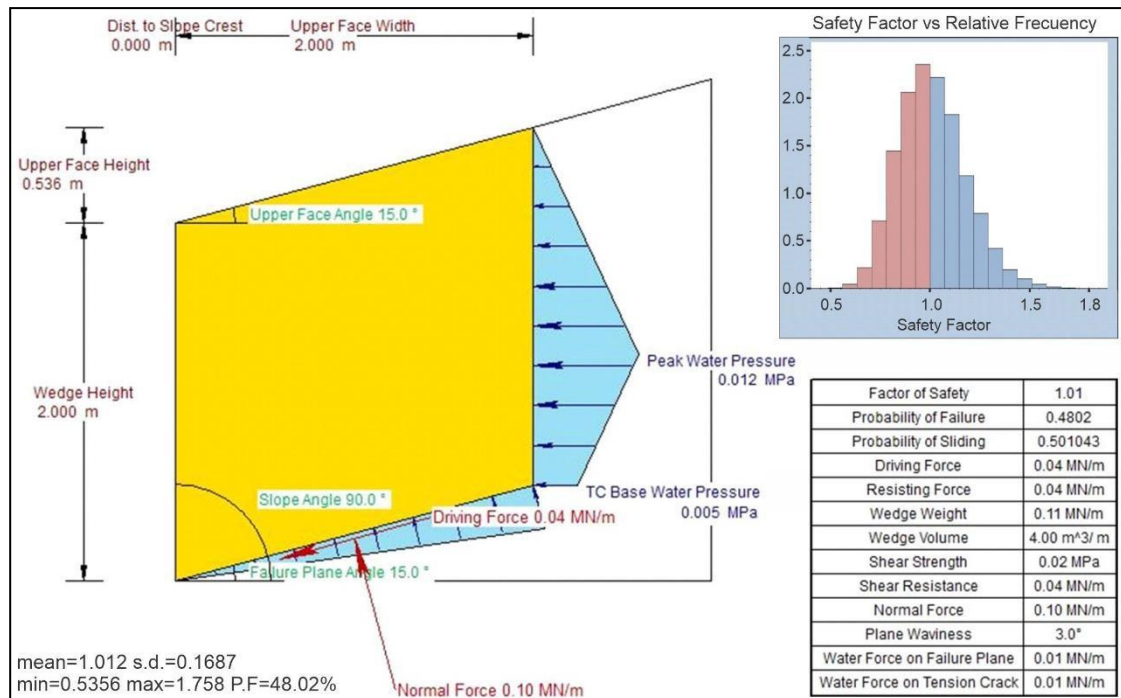


Figura A1.7. Modelo probabilístico de equilibrio límite para análisis por falla plana en condición saturada. Se asume que el bloque presenta una geometría cúbica delimitada por una grieta de tracción ubicada a 2m del frente del afloramiento.

### 3. Estación N°3

La Estación N°3 se ubica aproximadamente a medio camino del trayecto que une el Mirador San Martín y la bifurcación que conduce al Mirador del Salto Bossetti.

En este sector se observa el evento más reciente de remoción en masa (Fig. A1.8). Se trata de un deslizamiento de suelo y roca de aproximadamente 6m de largo, 2m de alto y 1m de profundidad máxima, estimándose un volumen de material desprendido cercano a los 8m<sup>3</sup>.

La superficie de rotura es irregular, conformada por múltiples planos de discontinuidades, producidas principalmente por el avance de la meteorización física que ocasionan las raíces de los árboles. Es posible observar que el deslizamiento ha tenido lugar en las zonas de mayor fracturación, quedando al descubierto los puentes de roca más intactos.

El análisis cinemático es complejo, pero resulta evidente que las tareas de mantenimiento (que socavaron la base del talud) han sido claves en la gestación del movimiento, produciendo dos efectos adversos: el cambio desfavorable en la geometría de la ladera (aumentando la inclinación y altura en la base) y la deforestación.

La geometría del talud es un elemento clave en la estabilidad de la ladera. Por lo general, las laderas adoptan pendientes naturales (en función de los procesos geológicos, biológicos y climáticos) cercanas al equilibrio; ante el cambio de condiciones, su morfología se modifica buscando contrarrestar el desequilibrio producido. En este contexto, el movimiento en masa puede entenderse como el reajuste del terreno para conseguir el equilibrio ante el cambio de condiciones (González de Vallejo et al. 2002).

De esta manera, la socavación de la base del talud produjo una modificación en el estado tensional del sustrato, disminuyendo los esfuerzos normales que tienden a la estabilidad y aumentando los tangenciales que tienden a la inestabilidad, de tal forma que las fuerzas desestabilizadoras superaron a las fuerzas estabilizadoras y se produjo el fallo. Como regla general, cuanto mayor sea el ángulo del talud y mayor su



altura, mayor será el desequilibrio producido en la ladera.

Además de modificar la geometría de la ladera, el otro efecto (y quizás el más importante) que han tenido las labores de mantenimiento ha sido la deforestación y eliminación de la cubierta vegetal.

La presencia de la vegetación en las laderas incide de diferentes formas y mediante diversos mecanismos en la estabilidad del terreno. Estos mecanismos pueden constituir tanto efectos adversos como beneficiosos y se relacionan principalmente con: la infiltración del agua de lluvia en el suelo (interceptación de la lluvia, evaporación, transpiración, aumento de la rugosidad del terreno y generación de grietas de desecación); con el refuerzo mecánico aportado por las raíces de los árboles; con la transferencia de esfuerzos y vibraciones producidas por el viento; y con la masa de la vegetación.

A pesar de que, la complejidad de las variables asociadas y la variabilidad en las situaciones en las que se encuentra cada ladera, hacen que las condiciones de estabilidad varíen para cada caso particular de estudio, numerosas investigaciones demuestran que, en términos generales, los efectos netos de la presencia vegetal (principalmente de los árboles) en las laderas tienden a ser favorables (Fig. A1.9) y contribuyen a la estabilidad del sustrato (Marín Sánchez y Osorio-Salas 2017 y citas allí contenidas).

En la práctica ingenieril es ampliamente aceptado que las raíces aumentan la resistencia al corte de los suelos, y su influencia suele ser expresada como una cohesión “aparente” adicional en términos del criterio de falla de Coulomb (O’Loughlin y Ziemer, 1999; Schmidt et al., 2001; Bransby et al., 2006).



*Figura A1.8. Izquierda: vista general del deslizamiento. Derecha: Vista en detalle del plano de rotura en relación con la pasarela y las labores de mantenimiento. Nótese la superficie de rotura irregular.*



*Figura A1.9. Ejemplo, dentro del propio Circuito Inferior, de la capacidad de retención y estabilización del terreno que poseen algunas especies arbóreas, a través de sus raíces.*

#### 4. Estación N°4 (Progresiva 500)

La estación N°4 se encuentra ubicada a la altura de la progresiva 500, entre el Mirador San Martín y el Mirador de El Peñon (Punta Peligro).

Al igual que en la estación anterior, se observa un deslizamiento por colapso de suelo y roca de aproximadamente 4m de largo, 3m de alto y 1m de profundidad máxima, pero esta vez ubicado hacia el borde externo de la pasarela y por debajo de la misma.



*Figura A1.10. Izquierda: vista general de la zona de deslizamiento. Derecha: Vista en detalle del proceso de socavación de la base de la fundación y de la malla metálica utilizada para mitigarlo.*

La superficie de rotura del deslizamiento es irregular, conformada por múltiples planos de discontinuidades y puentes de roca.

El análisis cinemático resulta complejo, dada la dificultad de acceso al sector (solo se puede observar desde

arriba), pero se interpreta que al igual que en el caso anterior, la ausencia de vegetación, en coincidencia con una geometría de ladera desfavorable podrían haber sido los principales desencadenantes del movimiento en masa. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de descalce debido al desprendimiento (por retroceso de ladera) de uno o más bloques ubicados por debajo (en la barranca) y que actuaban como sustento de la parte superior del perfil. Este último escenario no pudo ser verificado por cuestiones de acceso y visibilidad, sin embargo, se tiene conocimiento que este tipo de eventos es generalizado en todo el frente del escarpe, razón por la cual debe ser considerado como una alternativa válida.

Si bien no existe peligro de impacto de rocas en la pasarela, el proceso de remoción se encuentra socavando una de sus bases. Ante esta situación, la Concesionaria del Circuito, ha implementado como medida precautoria, eliminar el apoyo y anclaje de la pasarela sobre la base afectada reemplazando el tramo correspondiente por otro de mayor longitud y resistencia, que descansa sobre las bases contiguas a modo de puente.

Además, se han implementado como medidas de mitigación del proceso:

- la colocación de una malla de sostenimiento, construida mediante tejido de alambre romboidal de 3" (tejido olímpico) calibre 14 (2mm) anclado con estacas de hierro de 8mm a 0,5m de profundidad (Fig. A1.11);
- la derivación del agua del sector a partir de una zanja de intercepción de 30cm de ancho y 20cm de profundidad excavada en el talud del lado interior de la pasarela.

En base a las características geotécnicas del macizo, estas medidas se consideran insuficientes a los efectos de controlar el proceso de remoción en masa por colapso o caída de bloques.

La colocación de la malla debería ser ejecutada de acuerdo con las especificaciones provistas por SRK Consulting (2016c): mediante revestimiento SteelGrid® MO 200 de Maccaferri y pernos de anclaje Jenmar Saferock® G (40) A440-280 Ø16 de 3.5 m de longitud y dispuestos a tresbolillo cada 2 m en dirección vertical y horizontal.

Respecto de la zanja se debe realizar el seguimiento del sitio de descarga para prevenir problemas de concentración de erosión. Si bien se ha observado que el sector donde se ha construido la zanja no presenta una gran superficie de aporte, dadas las importantes precipitaciones se sugiere su periódico control.



*Figura A1.11: Izquierda: Malla metálica colocada por la Concesionaria del Circuito para mitigar el proceso de deslizamiento por colapso de rocas y caída de bloques. Derecha: Anclaje para el sostenimiento de la malla.*

## 5. Estación N°5 (Sector del salto Alvar Núñez)

La estación de observación N°5 se encuentra ubicada en el sector correspondiente al salto Alvar Núñez donde la pasarela presenta una bifurcación que permite observar el salto en diferentes alturas.

El tramo superior de la pasarela se ubica hacia el interior de la colada, y no registra condiciones de peligro para el tránsito de personas. Sin embargo, sobre el tramo de pasarela inferior se han registrado eventos de caída de bloques asociados a deslizamientos traslacionales por fallas planas.

El último episodio registrado fue el impacto de un bloque de aprox. 1m<sup>3</sup> que provocó daños en la infraestructura de la pasarela. El evento fue parte de un deslizamiento sobre una superficie de rotura plana (ondulada) que provocó, además, la caída de árboles, suelo y bloques menores.

En ese sector también se observa el arreglo de una de las bases de fundación de la pasarela. Aparentemente, y de acuerdo con los comentarios del personal del PNI, la fundación en cuestión apoyaba sobre un bloque de pequeño tamaño que deslizó comprometiendo el apoyo de la base. A raíz de esta situación se decidió proyectar la fundación hacia un bloque estable ubicado más abajo. Se nota que la base proyectada tiene cierta excentricidad, y no empalma bien con la base anterior, por lo que se recomienda su inspección y relevamiento estructural.

En función de las características geomecánicas relevadas en el macizo rocoso, se analizó el grado de estabilidad del terreno en este sector.





*Figura A1.12. Arriba: Vista general del afloramiento en relación con la pasarela. Centro: Detalle del macizo rocoso. En el recuadro rojo se observa el arreglo de una de las bases de fundación que fue descalzada tras el desprendimiento del bloque sobre el cual apoyaba. Se puede notar que la misma presenta cierta excentricidad. Abajo: Vista en detalle de la zona afectada por el último evento de deslizamiento. Las líneas punteadas indican los planos de ruptura y las flechas la dirección del movimiento.*

### Matriz rocosa

La matriz rocosa, está compuesta por basaltos de estructura masiva y leve a moderado grado de degradación (decolorada a descompuesta), en función de la clasificación de la ISRM (1978).

Se estimó una resistencia a la compresión uniaxial (**UCS**), a partir de una serie de mediciones estadísticas, siguiendo las metodologías de campo propuestas por ISRM 1978. De esta manera, por medio de mediciones con piqueta geológica, se estimó una **resistencia de entre 100 y 250 MPa (R5)**. Por su parte, estos valores fueron cotejados con mediciones ejecutadas mediante un esclerómetro de Schmidt marca Proceq, modelo RockSchmidt, tipo L, siguiendo la metodología sugerida por ISRM (Aydin 2009). Los resultados obtenidos por este método arrojaron unos **160 MPa**, con valores estadísticos de **R (rebote) de  $\mu$ : 50,0 y s: 7,6**.

### Discontinuidades

Se reconocieron tres familias de discontinuidades. Dos de ellas se corresponden con diaclasas, mientras que la tercera (familia 3), presenta evidencias de cizallamiento. Estas estructuras se encuentran interconectadas, formando bloques de geometría prismática a cúbica. La **resistencia de las paredes (JCS)**, estimada mediante piqueta geológica, presenta valores en el entorno de los 100 MPa (R4-R5), para las familias 1 y 2, mientras que la tercera familia presenta resistencias dentro del rango de los **25 a 50 MPa (R3)**. A partir de ensayos ejecutados con esclerómetro de Schmidt, sobre las paredes de esta última familia, se obtuvieron valores medios de unos **40 MPa**, con un **r medio de 26,5 y una desviación estándar de 13,2**.



Figura A1.13. Medidas de resistencia mediante esclerómetro de Schmidt marca Proceq, modelo RockSchmidt tipo L.

Se llevó a cabo un ensayo de campo tipo tilt test, a fin de estimar un ángulo de fricción básico general para las discontinuidades, variando la inclinación de dos bloques basálticos prismáticos, uno sobre otro, lo que arrojó un valor de  $\phi_b = 32^\circ$ .

Las fracturas relevadas presentan las siguientes características:

FAMILIA	1	2	3
Rumbo	$250^\circ \pm 10^\circ$	$330^\circ \pm 10^\circ$	$000^\circ \pm 10^\circ$
Inclinación (derecha)	$90^\circ \pm 5^\circ$	$80^\circ \pm 5^\circ$	$15^\circ \pm 5^\circ$
Espaciamiento	0,8 m	0,5 m	0,4 m
Persistencia	8 a 12 m	1 a 3 m	10 a 15 m
Abertura	< 1 mm	< 1 mm	> 10 mm
Relleno	Ninguno	Ninguno	Cizallado
Rugosidad	JRC 4	JRC 4	JRC 9
Alteración	Ligera a moderada	Ligera a moderada	Moderada
Humedad natural	Seca	Seca	Seca

El talud expuesto presenta un rumbo de  $270^\circ \pm 10^\circ$ , y una inclinación derecha de  $90^\circ \pm 5^\circ$ , con una altura de entre 3 y 4 metros, en el sector estudiado.

En la Figura A1.14 se expone un diagrama estereográfico, indicando la orientación de las tres familias de discontinuidades y de los dos taludes relevados.

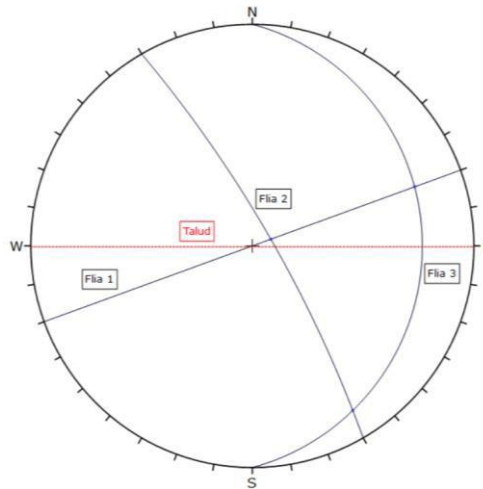


Figura A1.14.

### Clasificación geomecánica del macizo rocoso

El macizo rocoso fue clasificado a partir de diversas metodologías (ANEXO II), que comprenden el Geological Strength Index (GSI), definido por Marinos y Hoek (2000); el Rock Quality Designation (RQD) en la versión de Palmström (2005); el Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989); el Slope Mass Rock (SMR) de Romana Ruíz (1985a,b); y el Rock Mass Index (RMI) de Palmström (1995).

#### **GSI**

El macizo rocoso presenta una estructura en bloques, con discontinuidades moderadamente meteorizadas, en partes con rellenos angulosos. Se asigna un valor medio de **GSI = 45**.

#### **RQD volumétrico**

A partir de mediciones en superficie, se estimó el RQD volumétrico, siguiendo las recomendaciones de Palmström (2005), quien correlaciona este índice con el “recuento volumétrico de discontinuidades”, o volumetric joint count (Jv), calculado como la sumatoria de las frecuencias de cada familia de discontinuidades, o su inversa, los espaciamientos.

De esta manera, el Jv puede calcularse como  $e^{-1}_1 + e^{-1}_2 + e^{-1}_3$ . Por lo que  $Jv = 0,8^{-1} + 0,5^{-1} + 0,4^{-1}$ , obteniéndose un valor de **Jv = 5,8**.

A partir de este parámetro, se puede estimar el RQD volumétrico mediante la expresión  $RQD = 110 - 2,5 Jv$ , lo que arroja un valor de **RQD = 96**.

#### **RMR**

A partir de las mediciones efectuadas, se calcularon dos índices: un valor de RMR básico ( $RMR_B$ ), es decir, sin la corrección por orientación de discontinuidades; y un valor de RMR corregido ( $RMR_C$ ) en función de un análisis cinemático de posibles inestabilidades. En ambos casos, se consideraron los parámetros de las discontinuidades más desfavorables, cuyas puntuaciones se exponen a continuación:

- Resistencia: 12 puntos (160 MPa)
- RQD: 20 puntos (96 %)
- Espaciamiento: 10 puntos (0,4 m)
- Persistencia: 1 punto (10 a 15 m)
- Abertura: 0 puntos (>10 mm)
- Relleno: 2 puntos (duro > 5mm)
- Rugosidad: 1 punto (ondulada – JRC 4)
- Alteración: 3 puntos (moderada)

Humedad: 15 puntos (seco)

**RMR<sub>b</sub> = 65**

Corrección por orientación de discontinuidades:

A partir del análisis cinemático presentado en la Figura A1.14, surge en forma preliminar una configuración de discontinuidades que posibilitaría la generación de una cuña inestable, formada por la intersección de las familias de discontinuidades 1 y 2.

A partir de esta elaboración se asigna un valor de corrección para taludes de -25 puntos, por lo que **RMR<sub>c</sub> = 35**.

### **SMR**

El índice SMR es una adaptación del RMR de Bieniawski (1989) desarrollada por Romana Ruíz (1985) para caracterizar taludes excavados en roca.

El cálculo consiste en un ajuste del índice RMR por la orientación de la discontinuidad, a través de cuatro parámetros cuantitativos, tres dependientes de las relaciones geométricas entre la discontinuidad y el talud y un cuarto que depende del método de excavación empleado (ver ANEXO II).

El SMR se calculó a través de la aplicación de código abierto SMRTool para MATLAB™.

planes	dip dir	dip	RMRb	A	B	C	failure	F_1	F_2	F_3	F_4	SMR	Class	Description	Stability	Failures	Support
J_1	160	60	65	20	90	0	Wedge/Planar	0.40	1	-25	15	70	II	good	stable	some blocks	occasional
J_2	30	80	65	30	80	170	Toppling	0.15	1	-25	15	76	II	good	stable	some blocks	occasional
J_3	90	15	65	90	15	105	Toppling	0.15	1	0	15	80	II	good	stable	some blocks	occasional

*Cuadro A1.2: Cálculo del índice SMR.*

### **RMI**

Este índice fue elaborado con el objeto de representar la influencia del denominado Efecto Escala en la resistencia de un macizo rocoso. Por este motivo, está formado por dos parámetros: la resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa (UCS) y un factor de reducción (JP), comprendido entre 0 (para macizos completamente desintegrados) y 1 (para macizos completamente masivos), de forma que  $RMI = UCS \cdot JP$

Este último parámetro se calcula a partir de una serie de características geológicas, geomecánicas y geométricas del macizo rocoso, medidas en el sitio, mediante la expresión  $JP = 0,2 \cdot jC^{1/2} \cdot Vb^D$

El factor  $jC$ , puede calcularse a su vez, mediante la expresión  $jC = (jL \cdot jR / jA)$ . Existen diferentes métodos para estimar estos tres parámetros, según Palmström (1995). En el presente trabajo, se estima  $jL$  a partir de los valores de persistencia de las discontinuidades, mientras que el cociente  $jR/jA$  se calcula como  $jR/jA \approx \arctg(\phi) = \arctg(\phi_b + i) = \arctg[\phi_b + JRC \log(JCS/UCS)]$ , siendo  $JCS$  la resistencia a la compresión uniaxial de las paredes de las discontinuidades.

Por su parte, el parámetro  $Vb = \beta \cdot Jv^{-3}$ , siendo  $\beta \approx 20 - 7 e_{max} / e_{min}$ .

Finalmente, el último parámetro involucrado puede hallarse como  $D = 0,37 jC^{-0,2}$ .

A partir de los relevamientos geomecánicos efectuados en el sitio, se estimaron los siguientes parámetros:

UCS = 160 MPa  
 $jL = 1$   
 $\phi_b = 32^\circ$   
 $JRC = 4$   
 $JCS = 40 \text{ MPa}$   
 $e_{max} = 0,8 \text{ m}$   
 $e_{min} = 0,4 \text{ m}$   
 $Jv = 5,8$



$$jC = jL \arctg [\emptyset b + JRC \log (JCS/UCS)] = 1 \arctg [32 + 4 \log (160/40)] = \arctg (34) = 1,54$$

$$Vb = (20 - 7 e_{max}/e_{min}) \cdot Jv^{-3} = (20 - 7 \cdot 0,8/0,4) \cdot 5,8^{-3} = 6 \cdot 0,005 = 0,03$$

$$D = 0,37 jC^{-0,2} = 0,37 \cdot 1,54^{-0,2} = 0,34$$

$$JP = 0,2 \cdot jC^{1/2} \cdot Vb^D = 0,2 \cdot (1,54)^{1/2} \cdot 0,03^{0,34} = 0,2 \cdot 1,24 \cdot 0,89 = 0,22$$

$$RMi = USC \cdot JP = 160 \text{ MPa} \cdot 0,22$$

Lo que implica que la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso corresponde a un 22% de la de la matriz rocosa, siendo **RMi = 35 MPa**.

### Estabilidad de taludes

A partir del análisis cinemático y geomecánico desarrollado, se evaluó la posibilidad de ocurrencia de una falla en cuña, definida por la intersección de las familias de discontinuidades 1 y 2.

Dada la configuración geométrica de los bloques formados por las discontinuidades, surge de este análisis que no es posible la conformación de cuñas que pudiesen deslizar hacia la cara libre del talud.

### Sector inferior

En el sector inferior de la escalera, donde la pasarela gira 90°, se han evidenciado signos de erosión compatibles con el deslizamiento de un bloque de roca y/o suelo, que ha arrastrado parte de la vegetación (Fig. A1.12)

Se llevó a cabo un análisis de estabilidad del talud remanente, a fin de conocer la probabilidad de que los movimientos en la ladera evolucionen desfavorablemente.

En función de este análisis, se determinó que no están dadas las condiciones para que se generen deslizamiento en este sector, en condiciones secas (Fig. A1.15). Por su parte, en condiciones saturadas (Fig. A1.16), la probabilidad de fallo es del 2%, con un factor de seguridad de 1,27.

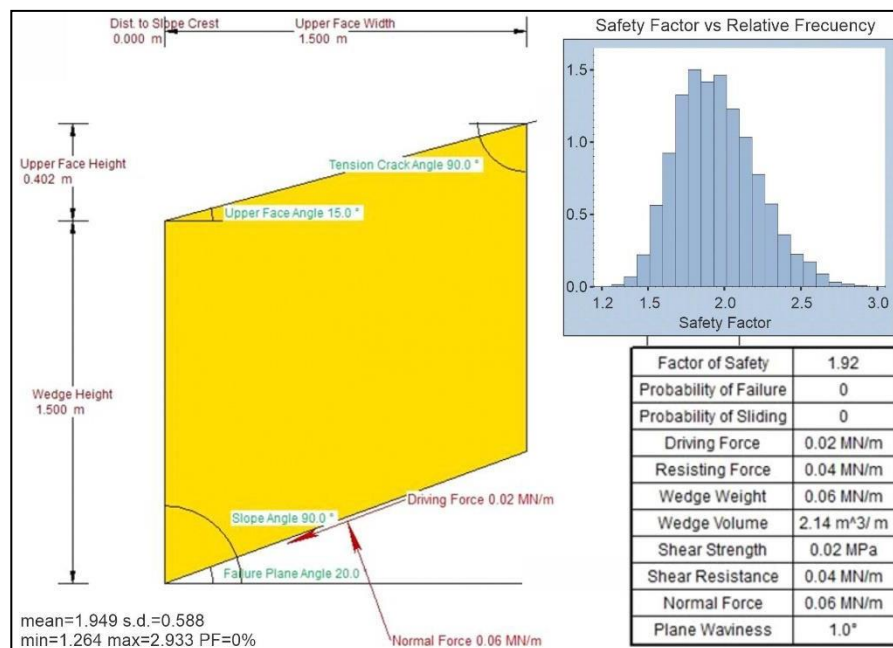


Figura A1.15. Modelo probabilístico de equilibrio límite para análisis por falla plana en condición seca. Se asume que el bloque presenta una geometría cúbica delimitada por una grieta de tracción ubicada a 1,5m del frente del afloramiento.

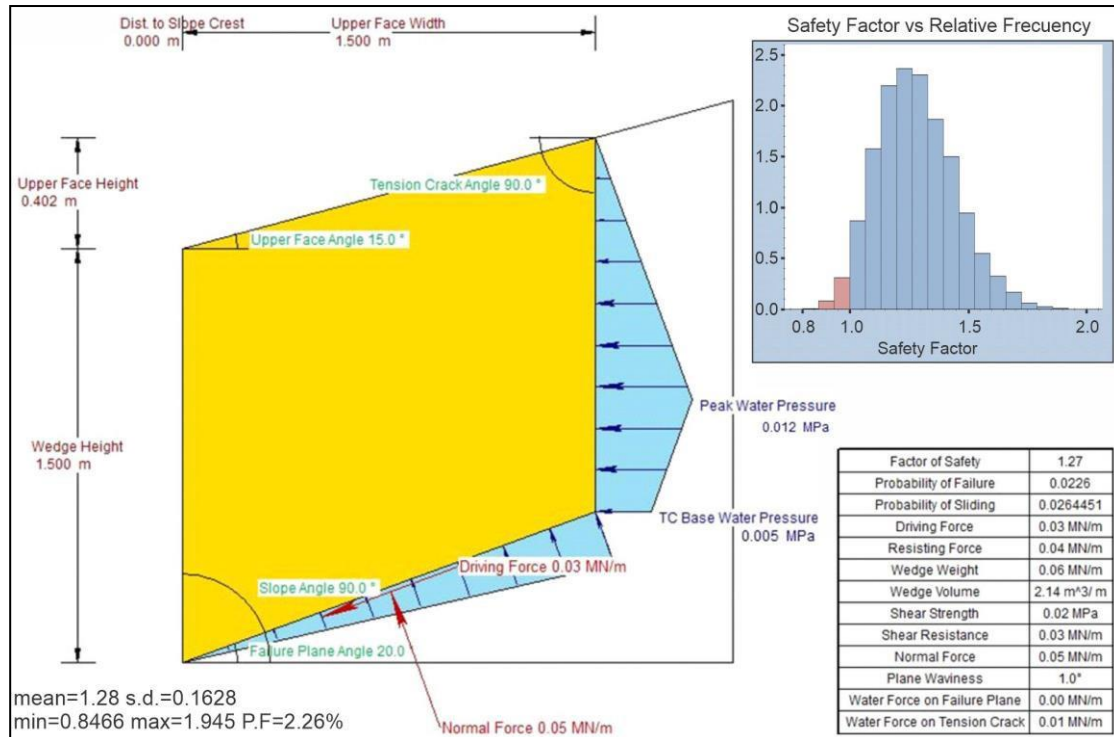


Figura A1.16. Modelo probabilístico de equilibrio límite para análisis por falla plana en condición saturada. Se asume que el bloque presenta una geometría cúbica delimitada por una grieta de tracción ubicada a 1,5m del frente del afloramiento.

## 6. Estación N°6

En el sector del Salto Alvar Nuñez, (Estación N°6) se detecta un bloque inestable que puede caer por volcamiento acantilado abajo (Fig. A1.17). La caída de este bloque, podría generar la desestabilización de otro bloque que apoya sobre este, generando un deslizamiento planar. Sin embargo, se ha podido constatar que la pasarela descansa sobre un bloque situado hacia el interior de la colada, que aún no ha desarrollado las condiciones necesarias para generar la inestabilidad (grietas de tracción, socavación de la base, etc). No obstante, esta situación queda advertida como un proceso activo que puede evolucionar hacia un escenario de mayor peligrosidad en el futuro, por lo que se recomienda su monitoreo.



*Figura A1.17. Bloque en posición de vuelco. Nótese la discontinuidad subvertical abierta que limita el bloque y el plano de deslizamiento que forma la base.*

## ANEXO II - CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS

### 1. Introducción:

Las clasificaciones geomecánicas constituyen un método fundamental para la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, ya que permiten obtener parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo (González de Vallejo et al., 2002). Dentro de las clasificaciones más utilizadas se pueden mencionar: Q (Barton et al., 1974), RMR (Bieniawski, 1989) y GSI (Hoek y Marinos, 2000). Si bien estas clasificaciones han sido desarrolladas para su aplicación en túneles y en especial para el cálculo de sostenimiento de los mismos, los parámetros RMR y GSI se han ido consolidando como un índice geomecánico para la evaluación de las propiedades de macizos rocosos en general. A continuación, se realiza una breve descripción de los criterios empleados en cada caso.

### 2. Clasificación RMR

Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo, de excavación y sostenimientos en túneles (González de Vallejo et al., 2002). Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad RMR, *rock mass rating*, que varía de 0 a 100.

Los criterios utilizados en esta clasificación se muestran a continuación (Bieniawski, 1989):

PARAMETROS		ESCALA DE						
Resist. de la roca intacta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Carga Puntual	80	80- 40	40-20	20-10	< 10		
	σ <sub>c</sub>	2000	2000-1000	1000-500	500-250	250-100	100-30	30-10
<b>Valor</b>		<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
RQD (%)		> 90	90-75	75-50	50-25	< 25		
<b>Valor</b>		<b>20</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>3</b>		
Espaciamiento de Disc. (m)		> 3	3-1	1-0.3	0.3-0.05	< 0.05		
<b>Valor</b>		<b>30</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>5</b>		
Estado de discontinuidades	Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, paredes de roca dura	Ligeramente rugosa, <1mm de separación paredes de roca dura	Ligera. rugosa, <1mm de separación paredes de roca suave	Espejo de falla o relleno de espesor <5mm o abiertas 1-5mm, fisuras continuas	Relleno blando de espesor <5mm, fisuras continuas			
<b>Valor</b>		<b>25</b>	<b>20</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>0</b>		
Agua Subterránea	Cant. infiltración en 10m de túnel (L/min.)	Ninguna	25	25-125	>125			
	Presión de agua	Cero	< 0.2	0.2-0.5	0.5			
	Esfuerzo principal							
	Situación general	Totalmente Seco	Húmedo agua intersticial	Ligera presión de agua	Serios problemas de agua			
<b>Valor</b>		<b>10</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>0</b>			

Cuadro A2.1: Parámetros y escala de valores (Bieniawski, 1989).

Corrección por orientación de las discontinuidades (Bieniawski, 1989):

Orientación		Muy Favorables	Favorables	Regular	Desfavorables	Muy Desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-25	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Cuadro A2.2: Corrección por orientación de las discontinuidades (Bieniawski, 1989).

### 3. Clasificación SMR

El SMR es una adaptación del RMR de Bieniawski desarrollada por Romana Ruíz (1985) para caracterizar taludes excavados en roca.

El cálculo consiste en un ajuste del índice RMR por la orientación de la discontinuidad, a través de cuatro parámetros cuantitativos, tres dependientes de las relaciones geométricas entre la discontinuidad y el talud y un cuarto que depende del método de excavación empleado.

El SMR se calcula mediante la expresión:

$$SMR = RMR_b + F1 \times F2 \times F3 \times F4$$

Dónde:

RMR<sub>b</sub> es el índice RMR básico resultante de aplicar la clasificación de Bieniawski.

F1 depende del paralelismo (A) entre las direcciones de las discontinuidades y del talud. Varía entre 0.15 y 1.0. Adopta el valor de 0.15 cuando el ángulo entre el plano de la discontinuidad y el talud es mayor de 30° y, por tanto, la probabilidad de rotura es muy pequeña. Sin embargo, cuando ambos planos son paralelos o subparalelos, alcanza el valor de 1.0.

F2 se refiere al buzamiento de la discontinuidad B, siendo β<sub>j</sub> en roturas planas. Su valor varía entre

0.15 a 1.0. Vale 0.15 cuando el buzamiento de la junta es menor que 20° y 1.0 para buzamientos mayores de 45°. Para la rotura por vuelco, F2 toma el valor de 1.0.

F3 se refiere a la relación entre los buzamientos del talud y de las discontinuidades. Adopta los valores originales propuestos por Bieniawski, que son siempre negativos.

F4 es un factor de corrección que depende del método de excavación empleado para la ejecución del talud.

Type of failure	Auxiliary angles	Very favorable	Favorable	Normal	Unfavorable	Very unfavorable	
Parallelism	P	$ \alpha_j - \alpha_s $					
	T	A= $ \alpha_j - \alpha_s - 180 $	> 30°	30 – 20°	20 – 10°	10 – 5°	< 5°
	W	$ \alpha_i - \alpha_s $					
	<b>P/T/W</b>	$F_1$	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Dip angle	P/W	B= $\beta_j$ or $\beta_i$	< 20°	20 – 30°	30 – 35°	35 – 45°	> 45°
	<b>P/W</b>	$F_2$	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
	T			1.00			
Dip relationship	P	$\beta_j - \beta_s$	> 10°	10 – 0°	0°	0 – (-10)°	< (-10)°
	W	C= $\beta_i - \beta_s$					
	T	$\beta_j + \beta_s$	< 110°	110 – 120°	> 120°	-	-
	<b>P/T/W</b>	$F_3$	0	-6	-25	-50	-60
Excavation method ( $F_4$ )							
	Natural slope			+15	Blasting or mechanical	0	
	Presplitting			+10	Deficient blasting	-8	
	Smooth blasting			+8			





Cuadro A2.3: actores de ajuste del SMR. P: rotura plana; T: rotura por vuelco; W: rotura en cuña. Modificado de Romana (1997) y Anbalagan et al. (1992).

## 4. Clasificación GSI

El GSI o Índice de Resistencia Geológica, indica la reducción de la resistencia de un macizo rocoso con respecto a la roca intacta para diferentes condiciones geológicas. En este sistema la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso se realiza a partir de observaciones geológicas de campo, las cuales se basan en la apariencia del macizo a nivel de estructura (estado de fracturamiento, forma de los bloques y la unión entre ellos), y a nivel de condición de la superficie (calidad de discontinuidades, grado de alteración y erosión, tipo de recubrimiento).

Una vez realizadas las observaciones se escoge en la *tabla modelo*, la situación que más se acerca a la realidad del macizo a estudiar, obteniendo de esta forma, el valor del GSI.

Los valores del GSI varían desde 1 hasta 100, correspondiendo los valores cercanos al 1 a las situaciones del macizo rocoso de menor calidad, es decir con la superficie muy erosionada, con arcilla blanda en las juntas, y con una estructura poco resistente debido a las formas redondas, y a la gran cantidad de fragmentación que sufre el macizo. Por el contrario, los valores cercanos a 100, corresponden a macizos de gran calidad, ya que significa una estructura marcada por una pequeña fragmentación en la que abundan las formas prismáticas y superficies rugosas sin erosión.

<p><b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI)</b></p> <p>According to rock mass structure and discontinuity surface conditions observed on the rock mass at site, select the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the GSI from the contours.</p>	<b>JOINT SURFACE CONDITION</b>	<b>VERY GOOD</b> – very rough, fresh, un-weathered Joint surfaces	<b>GOOD</b> – rough, slightly weathered, stained joint surfaces	<b>FAIR</b> – Smooth, moderately weathered, and altered surfaces	<b>POOR</b> – Slickensided, highly weathered surfaces with compact coating or fillings or angular fragments.	<b>VERY POOR</b> – Slickensided, highly weathered, surfaces with soft clay coating or filling
<p><b>ROCK MASS STRUCTURE</b></p>		⇨ Decreasing of Surface Quality ⇨				
 <p><b>BLOCKY</b> – very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal joint sets</p>	⇨ Decreasing Interlocking of Rock Blocks ⇨	80	70			
 <p><b>VERY BLOCKY</b> – interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faced angular blocks formed by four or more joint sets.</p>		60	50			
 <p><b>BLOCKY/FOLDED</b> – folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks.</p>		40		30		
 <p><b>CRUSHED</b> – poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks.</p>				20	10	

Cuadro A2.4: Criterios propuestos para la clasificación de macizos rocosos mediante el índice GSI (Marinos y Hoek 2000).