



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INSTITUTO MIGUEL LILLO

**PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA
DEL RÍO DEL CAMPO Y SU INFLUENCIA EN EL
PROYECTO DE PRESA DE EMBALSE POTRERO DEL
CLAVILLO (CATAMARCA Y TUCUMÁN, ARGENTINA)**



SERGIO MARCELO NIEVA
TESIS DE MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL
-2025-





UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INSTITUTO MIGUEL LILLO

TESIS DE MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL

**PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA
DEL RÍO DEL CAMPO Y SU INFLUENCIA EN EL
PROYECTO DE PRESA DE EMBALSE POTRERO DEL
CLAVILLO (CATAMARCA Y TUCUMÁN, ARGENTINA)**

MAESTRANDO: SERGIO MARCELO NIEVA

DIRECTOR

DR. JOSÉ SOSA GÓMEZ

CODIRECTORA

MAG. ELVIRA GUIDO

TRIBUNAL EXAMINADOR

Mag. Juan Ángel García

Dr. Marcelo Sebastián Moyano

Dr. Jorge Enrique Eremchuk



INDICE GENERAL

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos	II
Resumen	IV
Abstract.....	V

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

I.1 Generalidades	1
I.2 Objetivos	2
I.3 Ubicación y Vías de Acceso	3
I.4 Metodología de Trabajo	5
I.4.1 Tareas de Gabinete	5
I.4.2 Tareas de Campo	6
I.5 Antecedentes	6
I.5.1 Antecedentes con Pertinencia General	7
I.5.2 Antecedentes con Pertinencia Específica	9

CAPITULO II: GEOGRAFÍA FÍSICA

II.1 Altimetría	12
II.2 Orografía	15
II.3 Caracterización Climática	17
II.4 Hidrografía.....	23
II.5 Vegetación	27
II.6 Suelos	31

CAPITULO III: MARCO GEOLOGICO REGIONAL

III.1 Marco Geotectónico Regional	32
III.2 Estratigrafía	33
III.2.1 Neoproterozoico – Cámbrico inferior	36
III.2.2 Mioceno – Plioceno: Formación Aconquija	40
III.2.3 Pleistoceno	43
III.2.4 Holoceno	44

III.3 Geomorfología.....	45
III.3.1 Ambiente Serrano de las Sierras Occidentales	48
III.3.1.1 Unidades Geomorfológicas del Ambiente Serrano de las Sierras Occidentales	48
III.3.2 Ambiente de Valle Intermontano.....	49
III.3.2.1 Unidades Geomorfológicas del Ambiente de Valle Intermontano	49

CAPITULO IV: ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

IV.1 Generalidades	51
IV.1.1 Terminología Técnica.....	52
IV.2 Susceptibilidad a Deslizamientos	54
IV.2.1 Caracterización de los Factores Condicionantes	55
IV.2.1.1 Factor Pendiente o Relieve Relativo Sr	55
IV.2.1.2 Factor Litología Sl.	58
IV.2.1.3 Factor Humedad del Suelo Sh.	61
IV.2.2 Descripción de Indicadores Desencadenantes o de Disparo.....	62
IV.2.2.1 Factor Intensidad Sísmica Ts	62
IV.2.2.2 Factor intensidad Precipitaciones Extremas Tp.....	66
IV.2.3 Susceptibilidad a Deslizamientos	67
IV.3 Validación del Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos.....	71
IV.4 Limitaciones y Fortalezas de la Metodología.....	75

CAPITULO V: CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO Y ANÁLISIS CINEMÁTICO DE TALUDES

V.1 Estudios Geomecánicos	77
V.2 Características de la Presa Potrero del Clavillo	79
V.3 Clasificación Geomecánica RMR de Bieniawski.....	81
V.3.1 Estimación de la Resistencia a la Compresión Simple (UCS – <i>Unconfined Compressive Strength</i>).....	82
V.3.1.1 Índice de Campo para la Determinación de la Resistencia a la Compresión Simple	82

V.3.1.2 Índice Esclerométrico.....	83
V.3.2 Índice de Fracturamiento de Roca (RQD - <i>Rock Quality Designation</i>)	85
V.3.3 Espaciamiento de las Discontinuidades	87
V.3.4 Condiciones de las Discontinuidades.....	88
V.3.5 Condiciones de Humedad del Macizo Rocoso	89
V.3.6 Determinación del RMR Básico (Bieniawski, 1989)	89
V.3.7 Ventajas y Limitaciones del RMR.....	91
V.4 Análisis de Probabilidad de Ocurrencia de Deslizamientos	91
V.4.1 Relevamiento Estructural.....	92
V.4.2 Resultados del Análisis Cinemático de Taludes	94
V.4.2.1 Probabilidades de Deslizamiento en el Talud de la Margen Izquierda del Río de Las Cañas.....	94
V.4.2.2 Probabilidades de Deslizamiento en el Talud de la Margen Derecha del Río de Las Cañas.....	96
VI.5 Probabilidades de Caídas de Rocas o <i>Rockfalls</i>	98

CAPITULO VI: PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL

VI.1 Presentación	100
VI.2 Objetivos de la Propuesta de Plan de Gestión Ambiental	101
VI.3 Componentes del Plan de Gestión Ambiental y Acciones Estratégicas.....	102
VI.3.1 Gestión del Territorio y Usos del Suelo Basado en la Susceptibilidad a Deslizamientos.....	102
VI.3.2 Fortalecimiento del Conocimiento Geotécnico y Monitoreo Continuo	102
VI.3.3 Monitoreo Hidrometeorológico y Sistemas de Alerta Temprana.....	103
VI.3.4 Concientización, Coordinación y Preparación Ante Emergencias	103
VI.3.5 Responsabilidades y Recursos.....	104
VI.3.6 Monitoreo y Evaluación	105

CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1 Generalidades.....	106
VII.2 Conclusiones y Recomendaciones Referidas a la Zonificación de la Susceptibilidad a Deslizamientos	106

VII.2.1 Conclusiones Referidas a la Implementación de la Metodología de Mora y Vahrsons (1994)	106
VII.2.2 Recomendaciones Referidas a la Implementación de la Metodología de Mora y Vahrsons (1994).....	107
VII.3 Conclusiones y Recomendaciones Relacionadas a la Caracterización del Macizo Rocoso y al Análisis Cinemático de Taludes	108
VII.3.1 Conclusiones Referidas a la Caracterización del Macizo Rocoso y al Análisis Cinemático con el Software DIPS	108
VII.3.2 Recomendaciones Referidas a la Caracterización del Macizo Rocoso y al Análisis Cinemático con el Software DIPS	109
BIBLIOGRAFÍA	110

A mi hijo y colega Nicolás.
Uno de mis grandes orgullos.

AGRADECIMIENTOS

En esta instancia tan especial quiero expresar mi sincero agradecimiento a una serie de personas e instituciones que sin su valiosa, importante y desinteresada contribución no habría sido posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, quiero expresar un inmenso agradecimiento a mi Director, el Dr. José Sosa Gómez y a la Codirectora Mag. Elvira Guido por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo, por su constante orientación y por su paciencia al guiarme en la realización de esta maestría. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales.

Al Dr. Diego Fernández y a la Dra. Liliana Neder por su compromiso y dedicación, ya que sus valiosas observaciones y sugerencias permitieron enriquecer este trabajo.

Al Mag. Juan García y a los doctores Sebastián Moyano y Jorge Eremchuk, quienes constituyeron el tribunal examinador de este trabajo de tesis, ya que sus calificadas observaciones contribuyeron a mejorar este estudio.

Al Geól. Nicolás Nieva por su invaluable ayuda en la caracterización de macizos rocosos y en el análisis cinemático de taludes.

Al Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), principalmente a su director, el Dr. Guillermo Aceñolaza y a todo el personal de la institución por el apoyo brindado, por facilitar el acceso a la información y por la disposición de recursos para la realización de esta investigación.

A los colegas Sergio Georgieff y Miguel Del Pero por sus invalorable colaboraciones en aspectos estratigráficos y geotécnicos.

A los colegas Miguel Azarevich y Elvira Guido por su invaluable ayuda en la realización de la cartografía temática.

A la Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo de la Universidad Nacional de Tucumán, fundamentalmente al personal administrativo y académico del Departamento de Posgrado.

Al personal de Biblioteca de la facultad por su amabilidad, profesionalismo y excelencia en su servicio.

Al personal de la Cátedra de Introducción a la Geología – Procesos Geológicos quienes siempre me brindaron un constante apoyo y aliento para la realización de este trabajo.

Un enorme agradecimiento a toda mi familia en especial a mi esposa Mónica y mis hijos Nicolás y Mariela que son personas que marcan el rumbo de mi vida. Sin su ayuda, comprensión y motivación constante no me habría sido posible culminar este trabajo.

Finalmente, a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron a la realización de este trabajo y que en estos momentos mi mala memoria no me permite recordar.

Sinceramente

MUCHAS GRACIAS!!!

RESUMEN

El desarrollo de este trabajo de tesis se enfocó particularmente en investigar procesos de remoción en masa en la cuenca del río del Campo y en las laderas de la proyectada presa de Potrero del Clavillo (Catamarca y Tucumán, Argentina). Para llevar a cabo este propósito se efectuó una zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento en la cuenca del río del Campo, empleando para ello una metodología desarrollada por Mora y Vahrson (1994). Esta zonificación permitió determinar la susceptibilidad a deslizamientos por medio del análisis de cinco variables, las cuales se clasifican en factores condicionantes y factores desencadenantes o de disparo. Los factores condicionantes reúnen características propias del terreno tales como pendiente, litología y humedad del suelo, mientras que los factores desencadenantes o de disparo integran los agentes externos que propician la ocurrencia de un deslizamiento como ser sismicidad y precipitaciones intensas. Si bien la metodología se desarrolló para regiones de características climáticas diferentes, con las adecuaciones necesarias al área de estudio, demostró ser eficaz en la zonificación realizada. Se determinaron cuatro áreas de susceptibilidad a deslizamientos: alta, media, baja y muy baja.

Asimismo, en el área planeada para el proyecto de la represa Potrero del Clavillo se efectuó una caracterización geomecánica del macizo rocoso con el objetivo de evaluar su calidad. Se realizó además un análisis cinemático mediante la utilización del programa DIPS para determinar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos planares, en cuña o vuelcos. La caracterización geomecánica se efectuó mediante el RMR básico de Bieniawski (1989) obteniéndose valoraciones correspondientes a roca regular (Clase III) y roca buena (Clase II). En lo referente al análisis cinemático se identificaron la presencia de 4 juegos o familias de discontinuidades principales, la Inclinación / Dirección de Inclinación promedio de estos juegos son; J1: 55°/N 56°; J2: 77°/N 176°; J3: 61°/N 258° y J4: 79°/N 312°. El análisis de la interacción de estas familias de discontinuidades permitió determinar probabilidades de deslizamientos principalmente por cuña y subordinadamente por vuelco o *toppling*.

Área Temática: Geología - Geomecánica

Palabras Claves: Remoción en Masa – Caracterización Geomecánica – Análisis Cinemático - Cuenca del Río del Campo – Potrero del Clavillo

ABSTRACT

The focus of this thesis was particularly mass wasting research processes in the Río del Campo basin and on the slopes of the Potrero del Clavillo dam (Catamarca and Tucumán, Argentina). To achieve this, we performed a landslide susceptibility zoning in the río del Campo basin using a methodology developed by Mora and Vahrson (1994). This zoning made it possible to determine landslide susceptibility by analyzing five variables, which are classified as conditioning factors and triggering factors. The conditioning factors include site-specific and inherent characteristics of the terrain such as slope, lithology, and soil moisture, while the triggering factors encompass external agents that promote landslides, such as seismicity and intense rainfall. Although the methodology was originally developed for regions with different climatic characteristics, with the necessary adaptations to the study area, it proved effective in conducting the zoning. The implementation of this methodology allowed the identification of areas with high, medium, low, and very low susceptibility.

On the other hand, in the area planned for the Potrero del Clavillo projet dam, a geomechanical characterization of outcrops was carried out to evaluate its quality, along with a kinematic analysis using the software DIPS to determine the probability of planar, wedge, or toppling failures. The geomechanical characterization was performed using RMR basic Bieniawski's (1989), obtaining ratings corresponding to *fair rock* (Class III) and *good rock* (Class II) standards. Regarding the kinematic analysis, the presence of four main discontinuity or families was identified. The average Dip/Dip Direction of these families are: J1: 55°/N 56°, J2: 77°/N 176°, J3: 61°/N 258° and J4: 79°/N 312°. The analysis of the interaction between these discontinuity families revealed probabilities of failures, primarily wedge sliding and, to a lesser extent, toppling.

Thematic Area: Geology - Geomechanics

Keywords: Mass Wasting – Geomechanical Characterization - kinematic Analysis – Río del Campo Basin - Potrero del Clavillo

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 GENERALIDADES

Los beneficios que proporcionan las presas de embalses son indudablemente variados. La regulación fluvial a través de ellas y demás obras complementarias son motivadas por diversos propósitos, entre ellos se pueden mencionar el abastecimiento de agua para consumo humano, control de crecientes, riego de cultivos, producción de energía eléctrica, turismo, entre otros. Fundamentalmente los embalses tienen como objeto regular el recurso hídrico permitiendo transferir agua en las épocas de mayor demanda y aprovechar un porcentaje mayor de la oferta natural anual y al mismo tiempo brindar una mayor garantía de servicio (Adler, 2014).

En el caso de la presa de embalse Potrero del Clavillo se trata de un proyecto aprovechamiento hidráulico de gran envergadura que se ubicará cercana al límite entre las provincias de Catamarca y Tucumán (Argentina) y sobre el cual existen dilatadas expectativas de realización.

La presa de embalse Potrero del Clavillo se proyecta sobre la ladera oriental de las Sierras del Aconquija. Estas sierras se enmarcan en el extremo norte de la Provincia Geológica de Sierras Pampeanas, una de las principales unidades morfoestructurales del norte argentino. La obra se ubicará (Figura I.1) unos 124 km al SO de la ciudad de San Miguel de Tucumán (Tucumán) y aproximadamente a 137 km al NNO de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca (Catamarca).

El proyecto contempla múltiples propósitos como ser generación de energía hidroeléctrica, aprovisionamiento de agua para consumo humano y para la industria, riego de cultivos, control de inundaciones, turismo y recreación.

La construcción de presas de embalses a pesar de su gran significancia en lo social y económico lleva consigo una serie de problemas ambientales que son inherentes al elevado impacto que genera su emplazamiento sobre el medio, ya que modifican sustancialmente el funcionamiento de las cuencas hidrográficas involucradas. Dentro de estas afectaciones ambientales, los procesos de remoción en masa son muy importantes ya que pueden condicionar la durabilidad y funcionalidad de la obra, lo mismo que la seguridad y bienes de los habitantes afectados directa o indirectamente por la misma.

El desarrollo de este trabajo se enfocó particularmente en investigar procesos de remoción en masa en la cuenca del río del Campo (Figura I.1) y en las laderas de la proyectada presa de Potrero del Clavillo.

Para llevar a cabo lo antes indicado, primero se efectuó una zonificación de la susceptibilidad de deslizamiento en la cuenca del río del Campo, empleando para ello una metodología desarrollada por Mora y Vahrson (1994). Para la implementación de esta metodología se utilizó un sistema de información geográfica (SIG), en este caso Qgis 3.36.3, el cual es un programa gratuito de código abierto. Esta zonificación permitió determinar, en un área específica, la susceptibilidad a deslizamientos por medio del análisis de cinco variables, las cuales se clasifican en factores condicionantes y factores desencadenantes o de disparo. Los factores condicionantes reúnen características propias del terreno tales como pendiente, litología y humedad del suelo; mientras que los factores desencadenantes o de disparo integran los agentes externos que propician la ocurrencia de un deslizamiento como ser sismicidad y precipitaciones intensas.

En el área de emplazamiento del proyectado cierre del dique de Potrero del Clavillo se efectuó una caracterización geomecánica del macizo rocoso con objeto de evaluar la calidad de este. Se analizó, además, la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos planares, en cuña o vuelcos mediante un programa específico, particularmente en el área de anclaje de los estribos

I.2 OBJETIVOS

Los objetivos fueron:

- 1- Analizar la susceptibilidad a procesos de remoción en masa que pueden afectar la estabilidad de las laderas de cursos fluviales que aportaran caudal al embalse proyectado, sobre todo en el sector de elevado impacto potencial de obras.
- 2- Analizar los factores condicionantes y desencadenantes de los procesos de remoción en masa.
- 3- Generar una zonificación de la cuenca del río del Campo que refleje la susceptibilidad de las laderas involucradas a los procesos de remoción en masa.
- 4- Efectuar una caracterización geomecánica del macizo rocoso con el objetivo de evaluar su calidad.

- 5- Analizar los procesos de remoción en masa que pueden afectar la estabilidad de las laderas donde se ubicarán los estribos de la presa proyectada.
- 6- Contribuir a la toma de decisiones de las instituciones encargadas de llevar adelante el desarrollo del proyecto con objetivo que se adopten los recaudos necesarios mediante las obras civiles pertinentes para la prevención de procesos de remoción en masa que pudiesen afectar las labores.

I.3 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio comprendió la totalidad de la cuenca del río del Campo, ubicada al NE de la provincia de Catamarca, en el departamento Andalgalá (Figura I.1).

El acceso a la zona de estudio procedente desde San Miguel de Tucumán puede realizarse mediante la ruta nacional N°38 en dirección al SO, pasando por las localidades tucumanas de Famaillá, Monteros y Concepción. En esta última localidad se empalma con ruta nacional N°65, con dirección oeste, atravesando El Molino, Alpachiri y El Potrerillo (Tucumán) y se ingresa a la provincia de Catamarca. Luego de atravesar el río Chacras, se continúa por ruta provincial N°48 y se arriba a la localidad de Río Potrero.

El acceso desde San Fernando del Valle de Catamarca puede realizarse mediante la ruta provincial N°1 transitando en sentido NNO hasta empalmar con ruta provincial N°48 unos 3,5 km al sur de la localidad de Buena Vista. Esta última ruta une las localidades de El Alamito, Aconquija, El Lindero, Alto de las Juntas, El Charquiadero y Río Potrero.

Con un perímetro de 171 km y una superficie de 883 km², la cuenca del río del Campo se localiza en una depresión tectónica, de orientación NNE-SSO, constituida por el Campo del Pucará y el valle del Suncho.

El Campo del Pucará constituye un terreno de forma más o menos triangular, limitado hacia el sur por la sierra de La Carreta (2.700 m s.n.m.), los puntos más bajos corresponden a la cota de 1.700 m s.n.m., la máxima extensión longitudinal es de aproximadamente 20 km y su ancho máximo de 18 km.

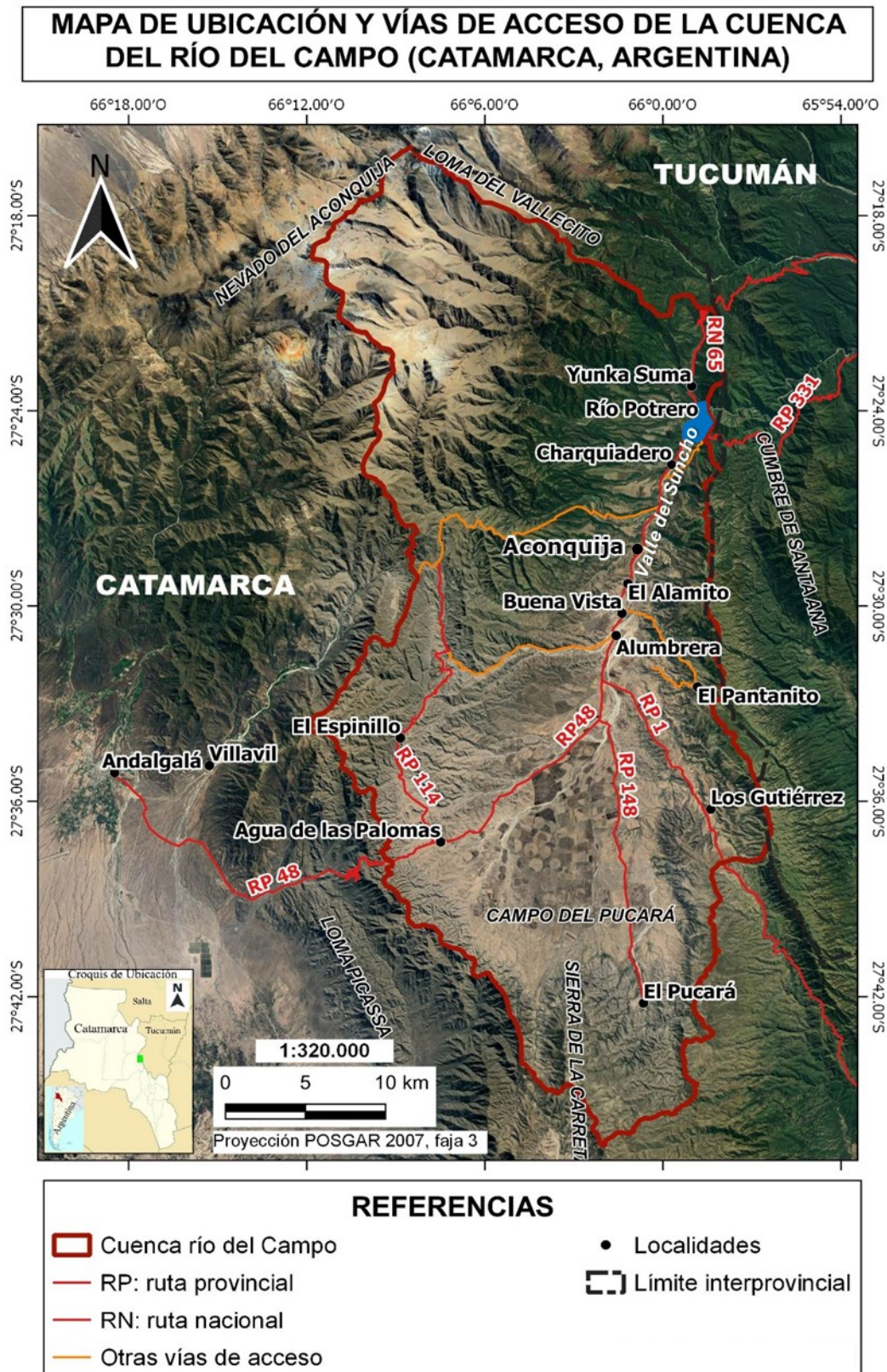


Figura I.1: Ubicación y vías de acceso al área de estudio, cuenca del río del Campo. En azul se indica el proyectado embalse Potrero del Clavillo (cota 1420 m s.n.m.). Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

Este terreno se transforma más al norte en un valle, el valle del Suncho, que es recorrido por el río del Campo, el cual al confluir con los ríos Potrero y Chacras origina el río Las Cañas. Dicho valle se encuentra flanqueado hacia el O por las estribaciones australes de los Nevados del Aconquija y hacia el E por las Cumbres de Narváez, estas últimas con alturas de alrededor de 2.500 m s.n.m.

I.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología implementada para el desarrollo de esta tesis de maestría contempló específicamente dos etapas que se indican a continuación:

I.4.1 Tareas de Gabinete:

Las tareas de gabinete realizadas fueron las siguientes:

- 1- Investigación bibliográfica en diferentes ámbitos científicos y organismos públicos con objeto de obtener información inherente al desarrollo del proyecto de la presa de embalse Potrero del Clavillo.
- 2- Recopilación y análisis de información estratigráfica, geomorfológica, estructural, hidrometeorológica y usos de suelo del área de desarrollo del proyecto.
- 3- Evaluación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en laderas de aporte al embalse proyectado, mediante la metodología de Mora y Vahrson (1994) y ajustado mediante reconocimientos de campo.
- 4- Evaluación de registros históricos de remoción en masa, determinando ubicación, tipos de movimientos y áreas afectadas.
- 5- Determinación de relaciones entre los procesos de remoción en masa con la geometría de las laderas mediante la utilización del programa DIPS que permite determinar sectores propensos a deslizamientos en cuñas, planares y vuelcos.
- 6- Caracterización geomecánica del macizo rocoso para evaluar su calidad utilizando el sistema RMR (*Rock Mass Rating*) desarrollado por Bieniawski (1973) y actualizada en 1989.
- 7- Análisis de la información obtenida durante el relevamiento geológico de campo.
- 8- Análisis de imágenes de radar e imágenes satelitales multitemporales que permitieran establecer las características y origen de las geoformas y la dinámica de generación de los procesos de remoción en masa.

- 9- Relevamiento de información cartográfica existente con el objetivo de generar cartografía de base, la cual posteriormente se amplió y ajustó con tareas de campo.
- 10- Procesamiento de toda la información y elaboración del escrito final de la tesis.

I.4.2 Tareas de Campo:

Se efectuaron las siguientes:

- 1- Relevamiento geológico con identificación de unidades litológicas, límites estratigráficos, características de suelos, grado de meteorización, elementos estructurales (diaclasas, fallas y foliaciones), principalmente en el área de cierre de la presa de embalse.
- 2- Toma de datos para la caracterización geomecánica del área de emplazamiento de la presa.
- 3- Control de campo de indicadores de neotectónica determinados sobre imágenes de radar y satelitales multitemporales.
- 4- Control de campo de la cartografía de base desarrollada en gabinete (mapa litológico, de pendientes, entre otros).
- 5- Verificación en campo de las unidades geomorfológicas determinadas en trabajos de fotointerpretación y análisis de imágenes satelitales multitemporales.
- 6- Verificación en terreno de procesos de remoción en masa determinados mediante sensores remotos.
- 7- Control en campo de la cartografía de susceptibilidad de laderas a procesos de remoción en masa.

I.5 ANTECEDENTES

La zona de estudio ha sido objeto de diversas investigaciones realizadas por numerosos autores cuyos enfoques de análisis han sido muy variados. Ante esta situación es conveniente efectuar una división de antecedentes acorde a la pertinencia de los lineamientos de investigación de este trabajo. Por este motivo se reconocen antecedentes de pertinencia general y antecedentes de pertinencia específica.

I.5.1 Antecedentes con Pertinencia General:

González Bonorino (1950c), autor de la Hoja 13e (Villa Alberdi), analiza aspectos geológicos del extremo austral de las Sierras del Aconquija y de las sierras de Ambato y Ancasti. Indica, entre otros aspectos, que los afloramientos terciarios exhiben mayores espesores en los valles tectónicos y que el único perfil relativamente completo se encuentra en el Campo del Pucará.

González Bonorino (1951a), en la Hoja 12e (Aconquija) describe la estratigrafía del basamento y de la cubierta sedimentaria de la mayor parte de las Sierras del Aconquija.

González Bonorino (1951b) analiza granitos y migmatitas en la ladera occidental de las Sierras de Aconquija.

Mon y Urdaneta (1972) analizan la geología, estratigrafía y geología estructural de la provincia de Tucumán. Proponen que las sedimentitas de la margen izquierda del río Cochuna deben denominarse Grupo Aconquija de edad neógena por correlación litoestratigráfica con la propuesta de González Bonorino (1950c).

García Salemi (1977a) analiza aspectos geomorfológicos del valle del Suncho y Campo del Pucará.

García Salemi (1977b) efectúa una reseña de la geomorfología de las Sierras Pampeanas de Tucumán y Catamarca donde hace referencia a las principales formas del relieve enfocándose en la morfogénesis de la región semiárida.

Niepagen (1981) estudia la cobertura sedimentaria cenozoica del norte del Campo del Pucará y se extiende hasta los faldeos de las Sierras del Aconquija y Cumbres de Naváez.

Vergel (1981) describe la estratigrafía del basamento y de la cubierta sedimentaria en las márgenes de los ríos El Durazno, Pantanito, Alumbra y Ojo de Agua.

Esteban (1988) identifica una nueva especie de perezoso en pelitas macizas friables en un tributario del arroyo Agua de Las Palomas (Campo del Pucará).

Gutiérrez (1990) estudia rasgos geológicos y estratigráficos del sector sudeste del valle de Las Estancias.

Duarte (1997) describió en detalle gliptodontes encontrados en Agua de Las Palomas, presentando además un listado unificado con todos los hallazgos mencionados previamente para el valle del Suncho y el Campo del Pucará.

Grimaldi (1997) realiza una evaluación espacial y temporal de la dinámica erosiva hídrica en el valle de Las Estancias.

Dal Molin y Escosteguy (2001) efectúan dataciones radimétricas en tobas pertenecientes a la Sección II del Grupo Aconquija en Escaba de Arriba obteniendo edades correspondientes al Eoceno medio.

Ahumada (2002) indica geoformas relacionadas a un ambiente periglacial en la vertiente oriental del extremo sur de las Sierras de Aconquija.

Dal Molin *et al.* (2003) en la Hoja Geológica 2766 IV (Concepción), describen características geológicas a escala regional que incluyen la cuenca media y alta del río del Campo.

Toselli *et al.* (2003) analizan la ubicuidad de cordierita y biotita en el granito Capillitas para determinar si son resultado directo de un proceso de cristalización o restitas de metamorfitas.

Fernández *et al.* (2004) elaboran la Carta Línea de Base Ambiental Concepción, indicando los principales problemas que afectan al medio físico y haciendo foco en las manifestaciones y efectos que los mismos producen en la zona.

Fernández, R. (2005) efectúa aportes al mapa de riesgo geoambiental de la provincia de Tucumán.

Fernández y Lutz (2006) elaboran la Carta de Peligrosidad Geológica 2766-IV Concepción, incrementando la información disponible sobre peligrosidad geológica en la provincia de Tucumán.

Nasif *et al.* (2007) identifican fósiles de un roedor y un perezoso y describen una columna estratigráfica parcial en la margen derecha del arroyo El Durazno en sedimentitas de la Formación Aconquija.

Gutiérrez y Mon (2008) efectúan un análisis de macroindicadores cinemáticos en la sierra de Ambato indicando que las serranías actuales deben su morfoestructura actual a un cizallamiento sinistral que produjo procesos extensivos y transpresivos en el Pleistoceno.

Larovere *et al.* (2008) analizan las características petrológicas y estructurales de la zona de cizalla dúctil que conforma la faja de deformación La Chilca.

Fernández (2009) analiza eventos de remoción en masa en la provincia de Tucumán a través de factores de control tales como precipitaciones, pendientes, orientación de las pendientes y litología. Señala que la distribución de estos

movimientos se encuentra controlada fundamentalmente por las precipitaciones e indica como factores de control, a la pendiente y al grado de meteorización.

Cisterna *et al.* (2010) efectúan un análisis de las migmatitas aflorantes en el río Las Cañas con interpretación de los eventos deformativos involucrados.

Del Pero (2010) describe la estratigrafía, arquitectura sedimentaria y propone modelos paleoambientales de la unidad II de la Formación Aconquija en la quebrada del río Pantanillo.

Del Pero y Georgieff (2011) describen la estratigrafía, sedimentología y paleoambientes de la Formación Aconquija.

Busnelli (2012) efectúa mapas de remoción en masa de la provincia de Tucumán según diferentes escenarios de cambio climático (clima húmedo y clima seco).

Ahumada *et al.* (2013) presentan un inventario de glaciares cubiertos y glaciares de escombros en las Sierras de Aconquija. Ubican glaciares de escombros y depósitos morrénicos en la zona de influencia del proyecto.

Seggiaro *et al.* (2014) efectúan un análisis de la evolución tectónica de las sierras de Hualfín, Capillitas y extremo sur del Aconquija, en la provincia de Catamarca.

Ortíz *et al.* (2019) efectúan una síntesis del registro paleontológico para el Pleistoceno del noroeste argentino, destacando al Campo del Pucará como una de las regiones de la provincia de Catamarca con mayor riqueza paleontológica de faunas pleistocénicas, principalmente mamíferos.

Nasif *et al.* (2019) efectúan un estudio biocronoestratigráfico y paleoambiental para las provincias de Catamarca, Tucumán y Santiago del Estero durante el Mioceno Tardío.

Esteban *et al.* (2019) efectúan un estudio paleontológico de vertebrados y paleoambiental para las provincias de Catamarca, Tucumán y Santiago del Estero para el Plioceno.

I.5.2 Antecedentes con Pertinencia Específica:

Neder y Guido (1994) evalúan los componentes físicos y biológicas intervinientes en el deterioro de los suelos en el valle del Pucará durante el período comprendido entre 1968 – 1986. Para ello analizaron parámetros morfométricos

hídricos, área de la llanura de inundación, vegetación, uso del suelo y procesos de erosión hídrica.

Arcuri (1999) efectúa un estudio geomorfológico de detalle referente a los estudios básicos y proyectos de ingeniería para la sistematización de las cuencas de los ríos Gastona y Medina.

Roldán (2000), dentro de los estudios básicos y proyectos de ingeniería para sistematización de las cuencas de los ríos Gastona y Medina, realiza estudios de diagnóstico y plantea diversas acciones de ordenamiento de las cuencas involucradas, identificando sectores con necesidades de control de erosión, estabilización de cauces y laderas.

La Universidad Nacional de Tucumán y JL&A (2014) efectúan un informe preliminar sobre los estudios del “Complejo Hídrico Multipropósito de los ríos Las Cañas - Gastona - Medina”.

Guido *et al.* (2014) realizan un informe de las características morfológicas y sedimentológicas de cauces relevantes en cuanto a procesos de erosión y transporte dentro del estudio del “Complejo Hídrico Multipropósito de los ríos las Cañas - Gastona - Medina”.

La Comisión Ejecutiva para Asuntos Hídricos de Tucumán (2014) confecciona un informe que proporciona una base técnica para el desarrollo sostenible del sistema hídrico Potrero del Clavillo, considerando las condiciones climáticas y meteorológicas de la región.

En el Informe de Avance N° 1, Tomo 1 Línea de Base Ambiental (2014) del Estudio del “Complejo Hídrico Multipropósito de los ríos Las Cañas - Gastona - Medina” se realiza un relevamiento expeditivo del área del proyecto. Se proponen lineamientos comunicacionales con los actores involucrados, se efectúa un análisis ecoregional expeditivo y una caracterización arqueológica del área.

Georgieff *et al.*, (2015) elaboran términos de referencias para el estudio de impacto ambiental dentro del proyecto del “Complejo Hídrico Multipropósito de los ríos Las Cañas - Gastona – Medina”.

Otros antecedentes específicos al desarrollo de la presa de embalse de Potrero del Clavillo pueden encontrarse en Adler (2014), que pueden resumirse en los siguientes:

- Compañía Argentina de Proyectos y Realizaciones Industriales (C.A.P.R.I.) (1950-1953) planteó la captación y transferencia de los afluentes superiores de los ríos Conventillo y Cochuna a una altitud superior a los 1.600 m s.n.m. y su acumulación en el embalse Potrero del Clavillo.
- Sociedad Edison de Milán (1960) plantea la separación de los aprovechamientos de los ríos Medina y Gastona. Se estudió elaboradamente el sistema del río Medina, en lo que se incluía la presa Potrero del Clavillo.
- Agua y Energía (1970) proyectó un sistema de aprovechamiento hidroeléctrico con la regulación de los ríos Gastona y Medina conduciendo sus aguas al embalse Potrero del Clavillo.
- Agua y Energía (1990) en un convenio realizado con las provincias de Tucumán y Catamarca realizó un estudio de “Optimización y Factibilidad del Sistema Potrero del Clavillo”, en el cual se proponía un esquema de aprovechamiento diferente. No se le asignaba al embalse de Potrero del Clavillo un rol de regulador anual, tan solo de regulación semanal o diaria, es decir con un volumen de agua y dimensiones de dique bastante menores.
- Proyecto Canal Federal (década del 90), la consultora Ingenoa S.A., contratada por el Consejo Federal de Inversiones, trabajó con un esquema de aprovechamiento similar al de Agua y Energía (1970) actualizando la hidrología de Potrero del Clavillo y avanzando con el proyecto de la presa de embalse compensadora de Villa Lola, como cabecera de derivación de aguas para el Canal Federal. Estos estudios potenciaron la funcionalidad del dique Villa Lola en desmedro del de Potrero del Clavillo.
- Secretaría de Energía de la Nación (2014) a través de la Subsecretaría de Energía Eléctrica y la Subsecretaría de Recursos Hídricos, con fondos de la Corporación Andina de Fomento (CAF) se financió el “Programa de Estudios en el Sector Energético de la República Argentina”, en el cual se incluyó el “Estudio del Complejo Hídrico Multipropósito de los ríos Las Cañas – Gastona – Medina”. Este estudio consta de un diseño de aprovechamiento diferente sustentado en principios que parten del esquema de aprovechamiento de Agua y Energía (1990) y del Consejo Federal de Inversiones (2000).

CAPÍTULO II

GEOGRAFÍA FÍSICA

II.1 ALTIMETRÍA

La altimetría de la cuenca del río del Campo se determinó a partir de un modelo digital de elevación (MDE) de alta resolución (RT1) de cobertura espacial 2006 – 2011 y con espaciado de píxeles de 12.5 metros, obtenido del sensor Palsar (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*). Se trata de un radar de apertura sintética (SAR) de banda L con matriz en fase que forma parte del satélite de observación terrestre avanzada ALOS, también conocido como DAICHI, de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). La descarga del MDE se realizó desde el portal Vertex de la NASA.

Es relevante destacar que el sensor Palsar posee la capacidad de penetrar nubes y vegetación, lo cual es ventajoso para obtener precisión en los datos de elevación en zonas boscosas o de condiciones climáticas adversas. Además, el espaciado de píxeles con el cual trabaja permite representaciones fehacientes de la topografía del terreno.

En la Figura II.1 se muestra un mapa altimétrico de la cuenca del río del Campo con una equidistancia de 200 metros y en la Figura II.2 un mapa de pendientes en grados.

El análisis de estas imágenes permite determinar que las menores alturas se encuentran en el fondo de valle correspondiente al Campo del Pucará y al valle del Suncho. Estas alturas se encuentran comprendidas principalmente entre 1.350 y 2.390 m s.n.m. Por otro lado, las mayores elevaciones se encuentran en el extremo NNO de la cuenca, en los Nevados del Aconquija, coincidente con la divisoria de aguas, donde se ubican los cerros Candado (5.489 m s.n.m.) y Dos Ríos (5.350 m s.n.m.)

Con respecto a las pendientes, los gradientes mayores (zonas más empinadas) se localizan principalmente al oeste y este del valle del Suncho. En el primer caso coincidente con la ladera oriental del extremo sur de los Nevados del Aconquija, y en el segundo caso con la ladera occidental de la Cumbres de Narváez.

Sectores con elevadas pendientes también se encuentran bordeando el Campo del Pucará, como ser el extremo septentrional de la sierra de La Carreta y la vertiente oriental de las Cumbres de Las Lajas.

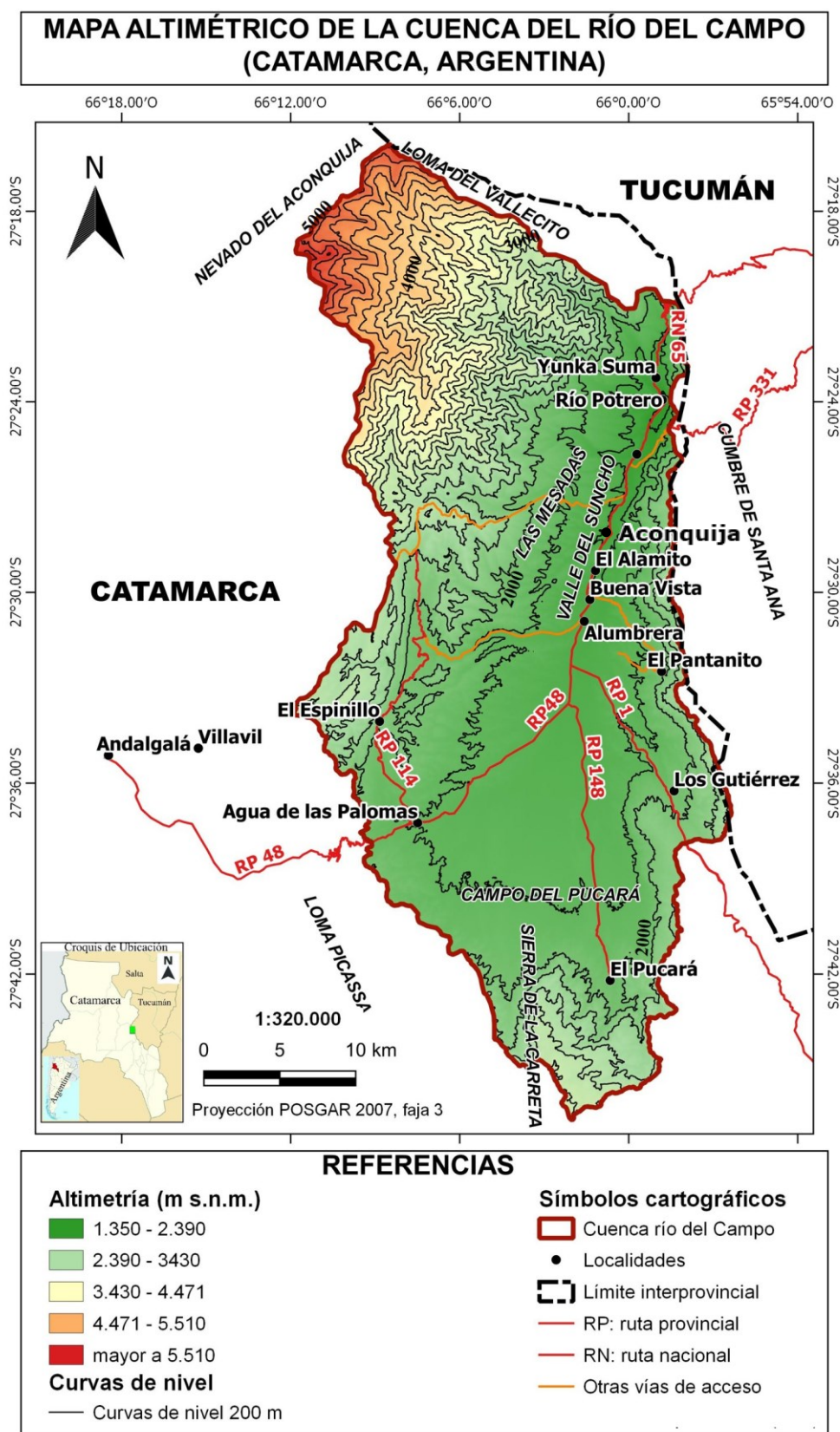


Figura II.1: Mapa altimétrico de la cuenca del río del Campo. Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

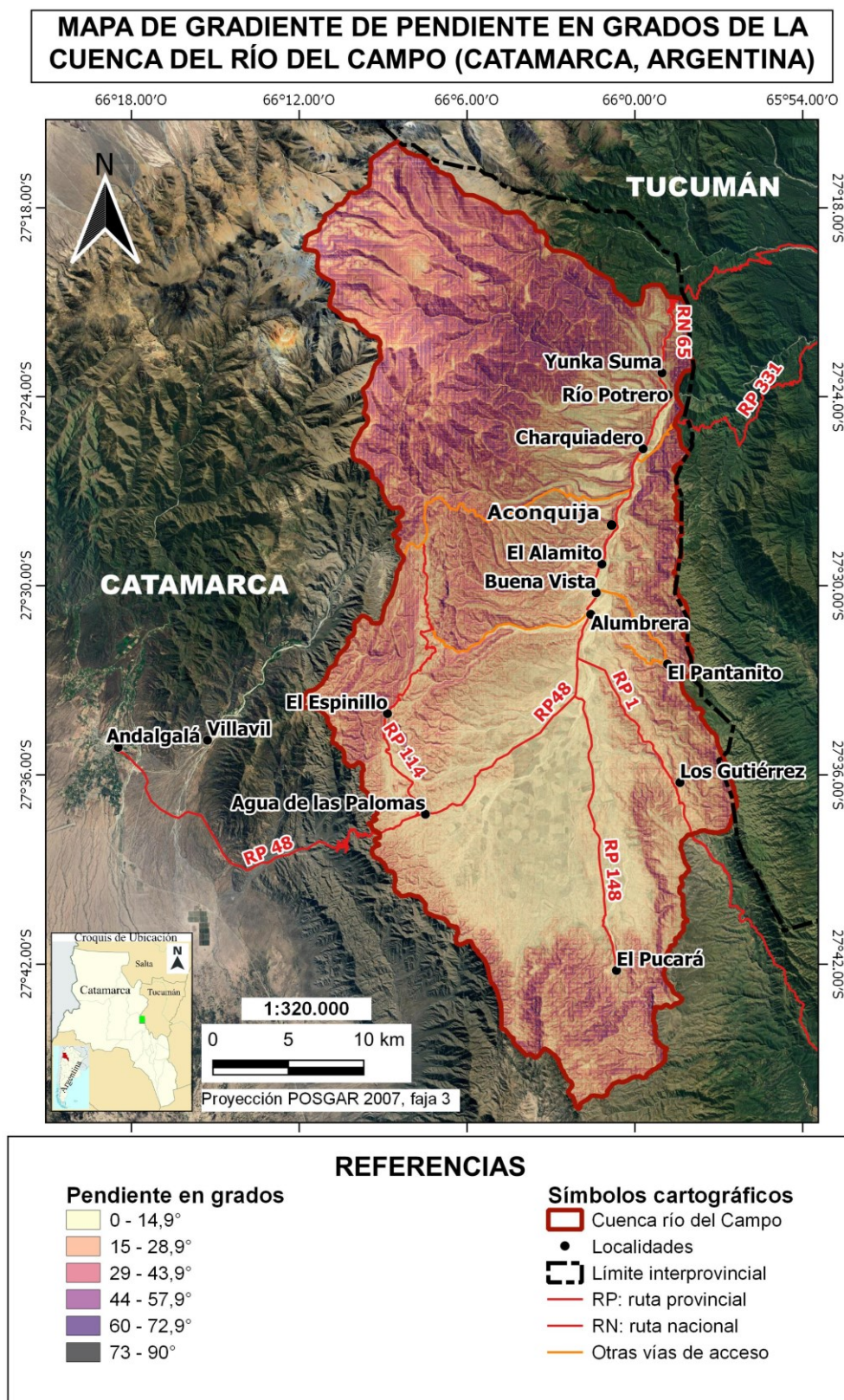


Figura II.2: Mapa de gradiente de pendiente en grados (°) de la cuenca del río del Campo. Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

II.2 OROGRAFÍA

Tanto el Campo del Pucará como el valle del Suncho constituyen parte de la unidad morfoestructural de Sierras Pampeanas Noroccidentales (Caminos, 1979) que exhibe una estructura regional típica de sierras elevadas y basculadas, separadas por fallas de tipo inversas con generación de depresiones tectónicas (campos, pampas o valles) de extensiones variadas.

En la Figura II.3 se indica el mapa orográfico del área de estudio.

El Campo del Pucará, es una extensa depresión tectónica de forma triangular cuyo vértice está orientado hacia el norte. Geográficamente se encuentra entre los paralelos 27° 30' y 27° 44' S y 66° 00' y 66° 09' O, con una altura media de 1.700 m s.n.m. Limita al norte con el valle del Suncho (1.620 m s.n.m.), al sur con la sierra de La Carreta (2.780 m s.n.m.), al este con la sierra de Narváez (2.500 m s.n.m.) y al oeste con el extremo austral de los Nevados del Aconquija (Gianfrancisco, 2011).

Los cordones montañosos que limitan al Campo del Pucará presentan cimas aplanadas, generalmente líneas de cumbres íntegras y su perfil transversal muestra diferencias morfoestructurales de simetría entre ambas pendientes. Hacia el este, se encuentra la vertiente occidental de las cumbres de Narváez la cual desciende en forma abrupta como consecuencia de una serie de fallamientos escalonados. En contraste, el flanco oriental correspondiente a las Sierras del Aconquija se caracteriza por superficies extendidas de descenso suave (Kühn y Rohmeder, 1943; González Bonorino, 1950c).

Las cumbres de Narváez, que limitan por el este al Campo del Pucará, reciben de norte a sur los siguientes nombres locales: cumbre de Suncho, cumbre de Condor Huasi, cumbre de los Alisos y cumbre de las Casas Viejas (Vergel, 1981).

El principal elemento orográfico del área son las Sierras del Aconquija, orientadas aproximadamente en sentido NNE-SSO. En el límite oeste y sector septentrional dentro del área de estudio, se destacan los Nevados del Candado con 5.489 m s.n.m. y el cerro Dos Ríos con 5350 m s.n.m. Como una prolongación sudeste de los Nevados del Aconquija se encuentran las cumbres de las Lajas - Paso de La Chilca (1.920 m s.n.m.).

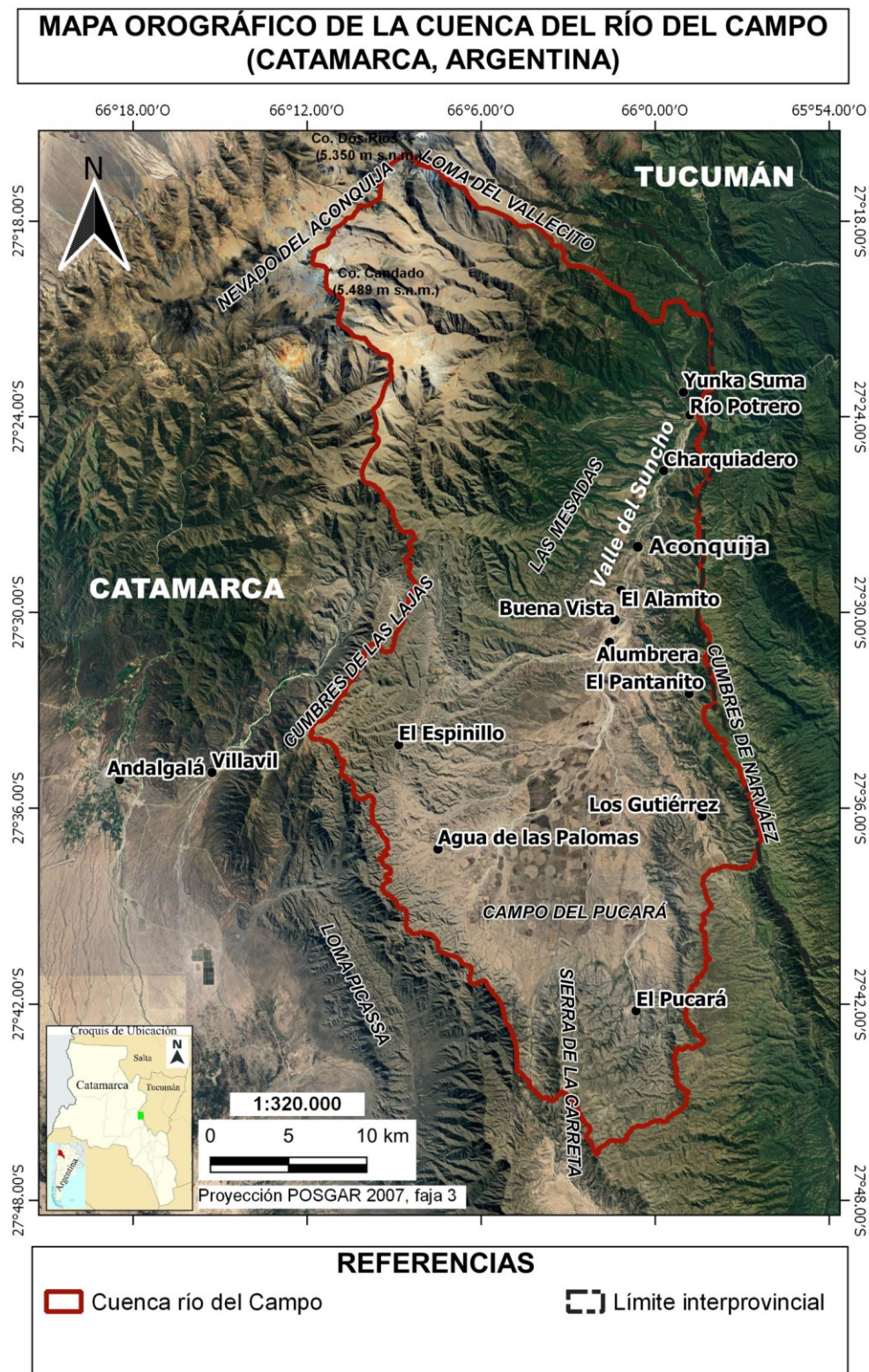


Figura II.3: Mapa orográfico del área de estudio. Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

La planicie del Campo del Pucará, levemente ondulada, desciende suavemente hacia el norte bordeada a ambos lados por terrazas o mesadas bien desarrolladas de orientación NO a NE y seccionada por ríos que se caracterizan por poseer barrancas verticales (González Bonorino, 1950c). Geográficamente, esta área tiene una cota promedio de 1.700 m s.n.m., constituye un paso de transición entre los valles y bolsones semiáridos occidentales y la llanura de Tucumán con la que se comunica por intermedio de la quebrada del río de Las Cañas. Hacia el sur, a través del valle del Singuil se comunica con el valle de Catamarca, en cuyo sector norte se encuentra el valle de Ambato (Pérez y Heredia, 1975).

Respecto al valle del Suncho, es un valle intermontano, sobreelevado, asimétrico y elongado en sentido NNE-SSO, tiene una longitud aproximada de 13 km y se encuentra delimitado por fallas de alto ángulo. El valle se desarrolla enmarcado por las cumbres de Narváez al E, por las estribaciones orientales de los Nevados del Aconquija al O, limitando al S con el Campo del Pucará.

Entre el conjunto de poblados que conforman este valle se encuentran de sur a norte: Buena Vista, El Alamito, Aconquija, El Lindero, Alto de Las Juntas, Las Rosas, El Charquiadero, Las Pampas, Río Potrero y Yunka Suma.

II.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

La región del noroeste argentino está conformada por dos unidades morfológicas contrastadas: un gran sector montañoso, al oeste y un área de llanura, hacia el este. Ambas cumplen un papel fundamental en el clima de la región. La llanura oriental permite el acceso de las masas húmedas provenientes del océano Atlántico, mientras que el macizo montañoso del oeste, interponiéndose en forma perpendicular a la componente oriental del flujo, determina un importante contraste entre las laderas a barlovento y sotavento. Dentro de este ámbito se encuentran una serie de valles y cuencas intermontanas dispuestas en sentido longitudinal y recorridas por cursos de agua que son aprovechados por la población para regadío. La depresión Campo del Pucará - valle del Suncho, es un ejemplo de ello (Bobba, 2006).

Las Sierras del Aconquija constituyen una importante barrera orográfica a las masas de aire cálido y húmedo provenientes del E. Estas masas se ven obligadas a ascender, produciéndose el enfriamiento adiabático y condensación de las mismas, lo que genera dos niveles de precipitación. El primero de estos niveles, se encuentra entre

los 1.500 y 2.500 m s.n.m., con lluvias que oscilan entre los 700 y 2.000 mm al año, alcanzando valores de 1.500 mm de media anual, con valores excepcionales de 2.500 mm, distribuidos estacionalmente en un régimen cuasi-monzónico, con verano lluvioso e invierno seco y con el 78% de las precipitaciones concentradas durante el periodo de noviembre a marzo (Minetti *et al.*, 2005b). El otro nivel, se encuentra superando los 2.500 m s.n.m., donde las lluvias disminuyen su magnitud hasta llegar a 200-300 mm anuales aproximadamente, en la zona cumbral (Ahumada *et al.*, 2013). En la Figura II.4 puede observarse un gráfico con las precipitaciones medias mensuales para el noroeste de Argentina (período 1934-1990).

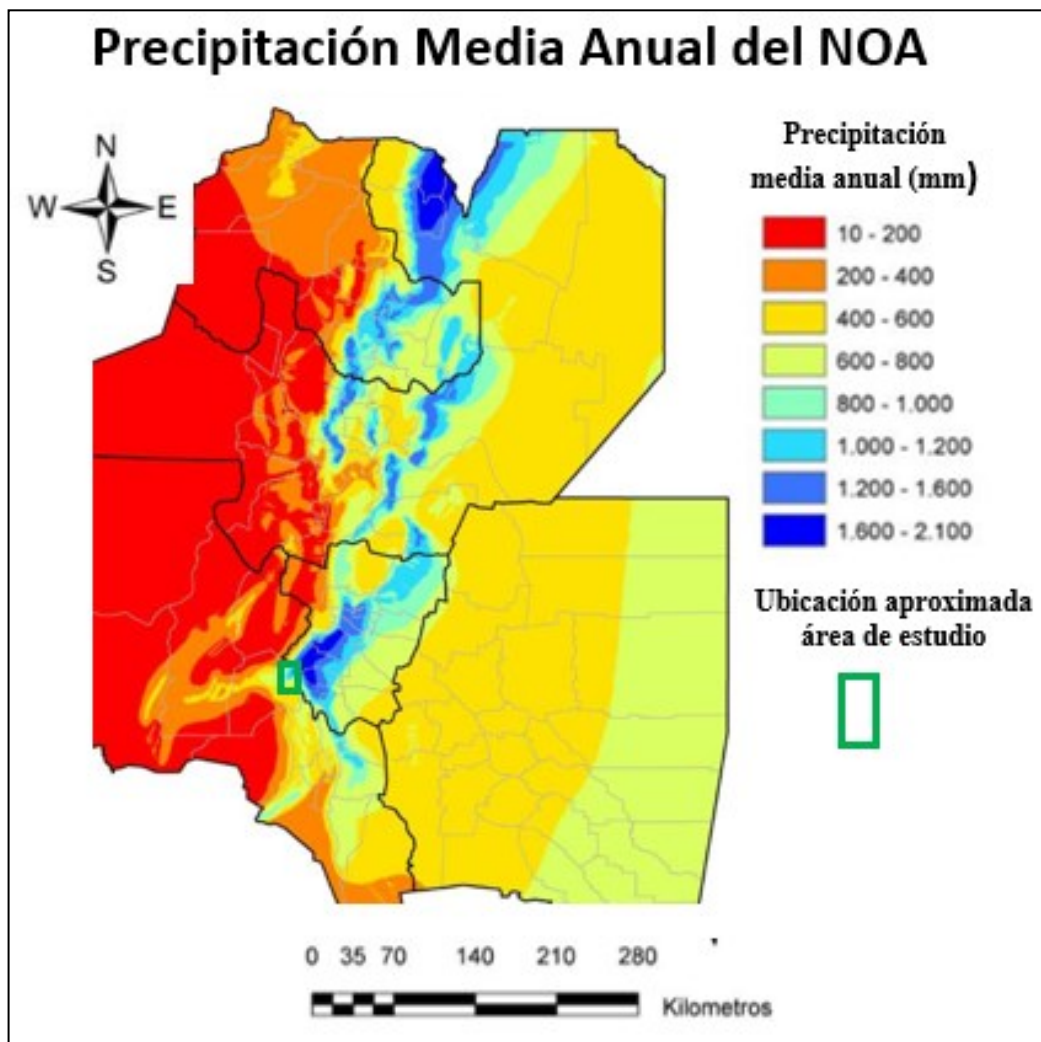


Figura II.4: Precipitaciones medias anuales para el noroeste de Argentina (período 1934-1990). En color verde puede apreciarse la ubicación aproximada del área de estudio. Fuente: Laboratorio de Teledetección y SIG-EEA Salta, INTA.

El valle del Suncho debido a su situación intermontana, presenta un microclima templado-lluvioso, con veranos húmedos e inviernos bastante secos. Hacia el sur, en lo que corresponde al Campo del Pucará, debido al marcado descenso de las precipitaciones y a las influencias de las características orográficas, el clima se torna árido-semiárido con precipitaciones estivales e inviernos secos.

Vergel (1981), para el extremo sur del valle del Suncho, indica que las precipitaciones ocurren entre los meses de diciembre a marzo, siendo cortas y muy torrenciales con valores de 500 a 600 mm anuales. En el mes de noviembre suelen registrarse caída de granizo. En invierno se producen algunas heladas y nevadas. La temperatura presenta valores máximos de diciembre a enero, con una media máxima de 19 °C y una máxima absoluta de 34 °C. Las mínimas se producen de abril a septiembre con temperaturas medias mínimas de 10 °C y mínimas absolutas de -8 °C con heladas y nevadas. La máxima media del mes más cálido es mayor a 22 °C y la mínima media está por debajo de los 8 °C. Los vientos son frecuentes entre los meses de mayo a agosto y soplan desde el norte. Durante el invierno la temperatura suele elevarse al soplar el viento Zonda, que luego, por efecto del viento sur, reduce las marcas termométricas Grimaldi (1997).

Ahumada *et al.* (2013) señalan que, para las Sierras del Aconquija, en el segmento altitudinal entre 3.800 - 5.200 m s.n.m. no existen datos meteorológicos de estaciones permanentes. En este sector, el patrón mesoclimático es marcadamente biestacional con verano cálido y húmedo e invierno templado frío y seco. Debido a que los registros térmicos en la región están directamente relacionados con la altitud, las temperaturas medias anuales descienden hacia las cumbres con un gradiente térmico regional de 0,55 °C cada 100 m. En función de este gradiente y tomando como referencia la temperatura media anual de 13,1 °C de la estación meteorológica de Tañi del Valle (la de mayor altura en la región, a 1.976 m s.n.m.), la temperatura media anual extrapolada para 4.000 m s.n.m. sería de 2,1 °C. La toporregión desde los 4.000 hasta los 5.000 m s.n.m. o más, corresponde a un clima seco de alta montaña o polar de altura EB de tipo I de la clasificación de Köppen (1923), que sería equivalente al clima de Tundra, ET de la clasificación de Köppen (1931). En este tipo de clima el suelo está frecuentemente congelado hasta considerables profundidades. La temperatura mínima media de enero se encuentra cercana a 0 °C y la de julio en el orden de los -10 °C, con más de 200 días con heladas al año (Minetti *et al.*, 2005a).

Banegas *et al.* (2001) efectúan un climatograma (Figura II.5) y un balance hidrológico en el Campo del Pucará, en los que destacan la anomalía que presenta el mes de diciembre donde se observa una sequedad imperante, a diferencia de los otros meses del período estival. Por otro lado, las elevadas precipitaciones en los meses de enero, abril y noviembre propician la recarga del agua al suelo. En dichos períodos hay una coincidencia entre la evapotranspiración real y potencial. En marzo, las lluvias adicionales se traducen en un exceso de humedad dada la propia saturación hídrica del suelo. Un rasgo curioso lo ostenta el mes de febrero donde la evapotranspiración real supera a la evapotranspiración potencial. El período comprendido entre los meses de octubre y mayo (incluido diciembre) se observa un déficit de agua determinado por las muy escasas precipitaciones, donde se puede observar una general marchitez de la vegetación. Durante el período seco se agotan las reservas hídricas, las cuales serán repuestas durante las precipitaciones del mes de noviembre.

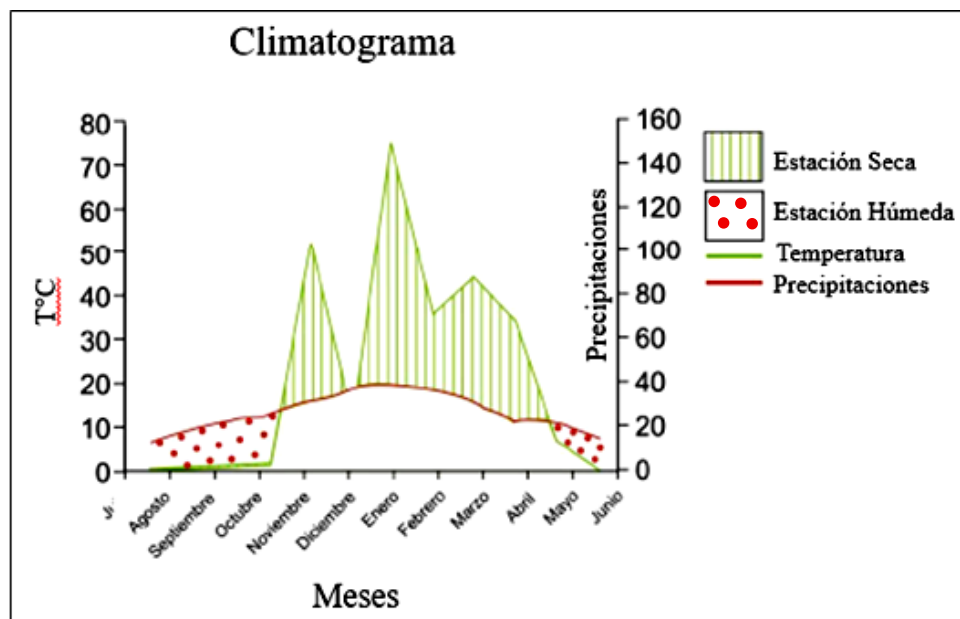


Figura II.5: Climatograma del Campo del Pucará. Fuente: Banegas *et al.* (2006).

Bobba (2006) en un perfil longitudinal dentro de la cuenca valle del Suncho - Campo del Pucará, analizó los datos de tres estaciones meteorológicas, correspondiente una a la Estación Río Potrero (situada sobre la margen izquierda del río homónimo a una altura de 1.350 m s.n.m. y operada por EVARSA (Evaluación de Recursos S.A.), la segunda a la Estación Aconquija, ubicada en la localidad homónima a 1550 m s.n.m., perteneciente a la Secretaría de Agricultura y Ganadería de la provincia de Catamarca y

la tercera a la Estación Pucará, situada en el bolsón del mismo nombre, a 1.700 m s.n.m. y perteneciente a una empresa privada. Estableció comparaciones del parámetro precipitación entre Río Potrero - Aconquija de un año (1982) y entre Río Potrero - Pucará de cinco años (1980-1984). Además, analizó datos de temperatura media mensual de Río Potrero - Aconquija de dos años (1981-1982) y de temperatura máxima y mínima diaria de cinco meses (mayo a julio de 1982) entre Aconquija y Pucará. Finalmente analizó las temperaturas máximas y mínimas anuales de seis años (1980-1985) para la estación Pucará. Determina una disminución de las precipitaciones desde la Estación Potrero a la Estación Pucara. Para la primera de estas estaciones indica que las máximas lluvias ocurren durante el mes de abril, siguiendo en importancia las de enero y diciembre. Por otro lado, las precipitaciones máximas en la Estación Aconquija se observan en enero y para la Estación Pucará señala una estación marcadamente seca de marzo a setiembre con valores inferiores a 10 mm mensuales. En esta última estación las mayores precipitaciones tienen lugar en los meses de enero, febrero y marzo. Además, manifiesta una precipitación anual de 378 mm para la Estación Pucará y 1.131,4 mm para la estación Río Potrero.

La notoria diferencia de precipitaciones de 750 mm en escasos 30 km, es explicado por Bobba (2006) en función de dos aspectos:

- La ubicación favorable que posee Río Potrero frente a la quebrada del río de Las Cañas, la cual representa la más importante entrada de masas de aire húmedas procedentes de la llanura tucumana y que, por su forma estrecha, profunda y elevada ejerce sobre aquellas un efecto embudo, lo que produce convergencia favoreciendo la continuidad del proceso generador de nubes teniendo en cuenta que el nivel óptimo de condensación se encuentra alrededor de los 1000 m s.n.m.

- La presencia de las cumbres de Narvárez, que bordean el sector oriental de la depresión, fuerzan al flujo de aire procedente del este a ascender, enfriarse adiabáticamente y a condensar, precipitando sobre las laderas a barlovento (orientales) aportando agua al sur de la llanura tucumana. Al pasar el flujo de aire hacia el interior de la cuenca, desciende y se calienta adiabáticamente, alejándose de su temperatura de punto de rocío por lo que ejerce, simultáneamente, un efecto desecante a la vez que impide el avance de las masas de aire que lograron acceder a la cuenca mediante la quebrada del río de Las Cañas. Las masas de aire que desde el E logran entrar así a la depresión, logran una segunda condensación sobre la ladera oriental de las cumbres de

Las Lajas, prolongación de los Nevados del Aconquija hacia el sur, lo que provoca el nacimiento de arroyos y ríos, los cuales llevan sus aguas al colector principal del valle, el río del Campo.

En la Tabla II.1 puede observarse un registro de precipitaciones mensuales (mm) para el período 1993-2019, obtenidas de las Publicaciones Hidrometeorológicas 2017-2018-2019 de la Red Hidrológica Nacional para la estación Potrero del Clavillo ubicada en el río de Las Cañas (27° 24'0.13" S y 65° 58'28.57" O) a 1.383 m s.n.m. Esta Estación se localiza en la provincia de Catamarca y es operada actualmente por EVARSA.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máx	Med	Total
1993	251,5	107,5	169,5	23,0	36,5	12,0	5,0	0,0	21,5	66,5	83,0	143,0	251,5	76,6	919,0
1994	147,5	207,0	53,0	47,0	45,0	4,0	8,5	3,5	13,0	121,5	86,5	218,0	218,0	79,5	954,5
1995	128,5	70,0	111,0	15,1	60,4	13,5	2,8	5,2	33,1	27,0	108,7	54,5	128,5	52,5	629,8
1996	144,9	166,8	124,5	80,4	88,3	12,9	0,0	0,0	32,0	32,0	89,9	62,1	166,8	69,5	833,8
1997	358,2	122,5	278,8	13,0	27,0	2,0	0,0	26,3	39,0	35,0	100,4	261,5	358,2	105,3	1263,7
1998	239,5	165,8	116,0	83,0	63,0	8,5	10,5	43,5	31,5	121,7	79,0	112,0	239,5	89,5	1074,0
1999	286,5	142,5	235,5	38,5	20,5	6,5	12,0	9,5	29,5	238,5	49,0	215,5	286,5	107,0	1284,0
2000	301,0	275,5	206,5	75,5	22,0	32,5	10,0	0,0	4,5	101,0	109,5	59,5	301,0	99,8	1197,5
2001	212,5	242,5	470,0	250,5	15,0	28,5	15,0	9,5	32,5	81,5	92,0	119,5	470,0	130,8	1569,0
2002	131,5	177,5	154,0	82,5	37,0	8,0	7,5	8,0	4,0	83,0	66,0	308,5	308,5	89,0	1067,5
2003	139,5	92,0	316,5	20,0	13,0	16,0	10,5	7,0	4,0	44,0	22,5	152,5	316,5	69,8	837,5
2004	136,0	168,0	158,5	112,0	45,5	18,5	2,0	7,0	17,0	6,5	96,0	179,0	179,0	78,8	946,0
2005	212,5	57,5	191,0	128,5	50,5	18,5	8,5	39,0	55,0	34,0	57,5	108,0	212,5	80,0	960,5
2006	359,0	85,5	184,5	83,0	6,0	14,5	2,5	6,5	0,0	116,5	108,0	157,0	359,0	93,6	1123,0
2007	304,5	222,0	112,0	27,5	47,5	0,5	0,5	6,0	9,0	62,0	82,5	345,5	345,5	101,6	1219,5
2008	308,0	171,5	161,5	45,0	38,0	0,5	0,5	11,0	20,5	53,5	113,5	248,0	308,0	97,6	1171,5
2009	132,0	142,0	139,5	90,5	35,0	1,0	2,5	0,0	22,5	20,0	147,5	181,5	181,5	76,2	914,0
2010	154,5	141,5	201,5	61,0	33,0	6,5	24,5	10,0	20,5	20,0	66,0	93,5	201,5	69,4	832,5
2011	232,0	443,0	148,0	115,0	14,0	14,5	7,5	0,5	8,5	112,5	77,0	129,5	443,0	108,5	1302,0
2012	95,5	258,5	111,0	173,5	24,5	2,0	12,5	0,0	19,0	46,0	132,5	88,0	258,5	80,3	963,0
2013	253,0	122,5	84,5	23,5	19,5	28,0	8,0	0,0	14,0	43,0	73,5	115,5	253,0	65,4	785,0
2014	295,5	380,0	196,0	114,5	60,0	40,0	23,0	9,5	7,5	60,0	61,5	156,0	380,0	117,0	1403,5
2015	202,0	226,5	474,0	156,0	48,5	9,5	21,0	60,5	33,5	43,5	125,0	138,0	474,0	128,2	1538,0
2016	344,0	322,5	137,5	102,0	141,0	10,5	9,5	7,0	4,5	47,5	127,0	114,0	344,0	113,9	1367,0
2017	145,5	196,5	290,5	176,0	50,0	10,5	14,0	39,0	7,5	20,5	66,5	179,0	290,5	99,6	1195,5
2018	252,0	184,5	54,0	77,0	101,0	16,0	23,0	0,5	17,0	65,5	121,0	102,5	252,0	84,5	1014,0
2019	115,5	144,0	154,0	49,0	45,5	7,0	5,5	4,5	29,0	54,5	198,0	99,0	198,0	75,5	905,5
Máximo	359,0	443,0	474,0	250,5	141,0	40,0	24,5	60,5	55,0	238,5	198,0	345,5	474,0	130,8	1569,0
Medio	217,9	186,5	186,4	83,8	44,0	12,7	9,1	11,6	19,6	65,1	94,1	153,4	286,1	90,3	1084,1

Tabla II.1: Precipitaciones mensuales para el período 1993-2019. Estación Potrero del Clavillo, río las Cañas, provincia de Catamarca. Fuente: Red Hidrológica Nacional, Publicaciones Hidrometeorológicas 2017-2018-2019.

II.4 HIDROGRAFÍA

El curso fluvial más importante de la cuenca Campo del Pucará - valle del Suncho es el río del Campo, perteneciente a la cuenca río del Campo - Las Cañas - Medina, la cual constituye la sección inferior de la cuenca endorreica del río Salí.

La cuenca el río del Campo drena mediante una densa red de diseño dendrítico, una extensa superficie de aproximadamente 883 km² mediante ríos y arroyos permanentes y temporarios. El aporte hídrico a la cuenca comprende los cursos que descienden del faldeo oriental del extremo austral de las Sierra del Aconquija (cerro Dos Ríos de 5.350 m s.n.m. y Nevado del Candado de 5.489 m s.n.m.) y cumbres de Las Lajas. Desde el sur aportan caudal los cursos provenientes del faldeo septentrional de la sierra de La Carreta (continuación de la sierra de Humaya) y por el este los cursos que descienden del faldeo occidental de la sierra de Narvárez.

La cuenca del río del Campo está integrada por cinco subcuencas hídricas, de norte a sur (Figura II.6):

- subcuenca del río Chacras
- subcuenca del río Potrero
- subcuenca del río Pisavil
- subcuenca río Punta del Agua
- subcuenca de arroyos menores del río del Campo.

La hidrografía de la cuenca del río del Campo se muestra en la Figura II.7. El río del Campo se origina a partir de la confluencia de los ríos Espinillo, Agua de las Palomas, Piscoyacu y Pucará, desde allí con dirección NNE capta los cursos que drenan el valle del Suncho. La confluencia del río del Campo con el río Chacras, en la localidad de Río Potrero, origina el río de Las Cañas que tiene orientación predominante O-E y a partir de la localidad de El Potrerillo (Tucumán) toma el nombre de río Medina, para luego denominarse río Chico, que desemboca en el embalse de Río Hondo (límite Santiago del Estero-Tucumán).

La distribución de las precipitaciones en la cubeta tectónica Campo del Pucará - valle del Suncho es uno de los factores condicionantes de la esorrentía superficial. En el caso de los ríos Potrero y Chacras, se debe considerar además que presentan un aporte hídrico procedente del deshielo en las altas cumbres de los Nevados del Aconquija.

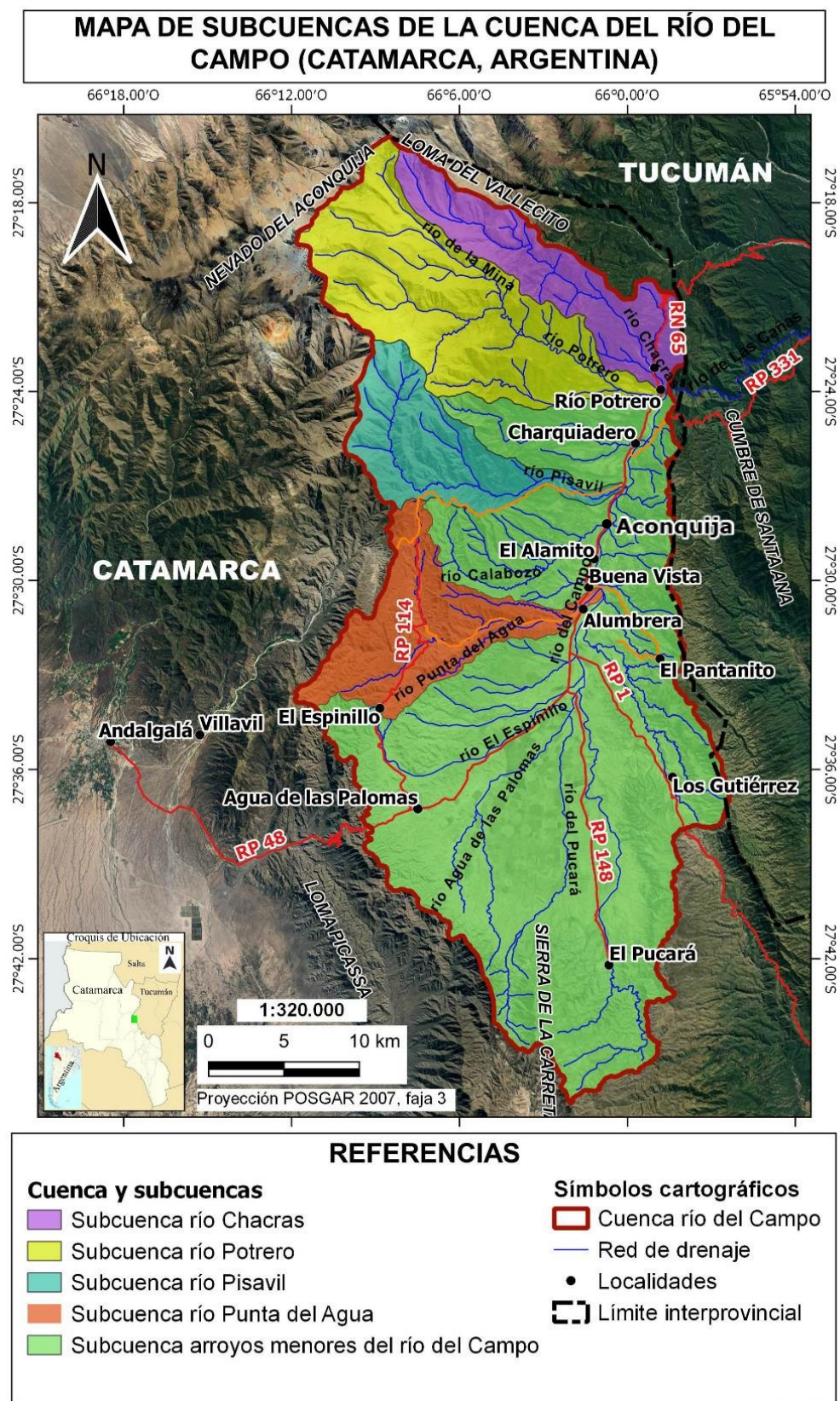


Figura II.6: Mapa de subcuencas del río del Campo. Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

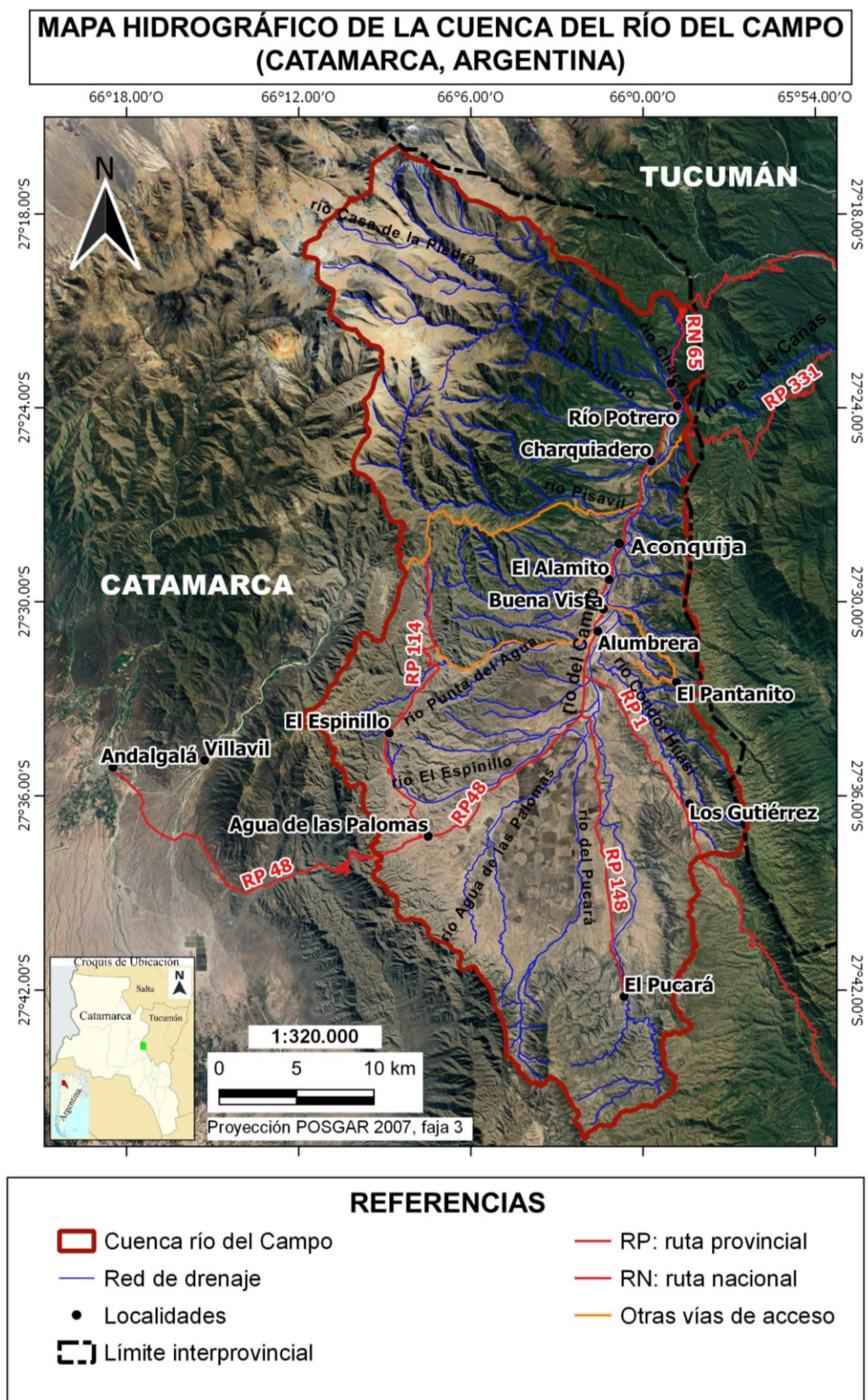


Figura II.7: Mapa hidrográfico de la cuenca del río del Campo. Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

En el valle del Suncho los ríos Chacras, Potrero, Charquiadero y Pisavil que descienden de la vertiente oriental del extremo sur de las Sierras del Aconquija tienen la particularidad de ser torrentosos y de régimen permanente, con caudales elevados durante la época estival y mínimos en invierno.

En el ámbito del Campo del Pucará los ríos se caracterizan por tener escasos caudales y ser temporarios, tal es el caso de los ríos Punta del Agua, Agua de las Palomas, Piscoyacu y Pucará. Excepciones son el arroyo El Durazno (norte del Campo del Pucará) y el río Condor Huasi (sector austral), ríos permanentes y torrenciales.

El río Espinillo drena gran parte de la vertiente oriental de la sierra de Las Lajas. El río Agua de las Palomas recibe agua desde el sur por los ríos La Echada y Corral de Barranco. El río Condor Huasi recibe aguas de los ríos La Atravesada, Ojo de Agua, La Alumbreira y Pantanillo y se origina en la localidad homónima a través de los arroyos Cuesta Ancha y Aliso Guascho. El río Pisavil recibe aportes de una extensa área de drenaje, desde la cuesta de Medanitos hasta las cuestas Colorada y Blanca, confluyendo en el río del Campo al norte de El Alamito. Por su parte, el río Charquiadero se origina en la cuesta del Medanito y atraviesa la zona de Las Mesadas hasta confluir en el río del Campo. El río Potrero tiene sus nacientes en las aguas del Nevado del Candado, en las quebradas de Choyana y del Cazador y desagua en el río del Campo. Finalmente, el río Chacras nace en el sur del Cerro Dos Ríos (5.350 m s.n.m.) y corre con rumbo ESE hasta confluir en el río del Campo y luego formar el río de Las Cañas, al pie del cerro de Las Cañas.

En la Figura II.8 se muestra un gráfico de caudales para el río de Las Cañas efectuado con datos de la Estación Potrero del Clavillo correspondientes a la serie 1943-2019. Por otro lado, en la Figura II.9 se observa un gráfico de caudales para el río del Campo efectuado con datos de la Estación Cabo San Miguel correspondientes a la serie 1952-1962. Ambas estaciones se encuentran activas y son operadas por EVARSA. Las fuentes de obtención de los datos presentados en las dos figuras anteriores son de las Publicaciones Hidrometeorológicas 2017-2018-2019 de la Red Hidrológica Nacional.

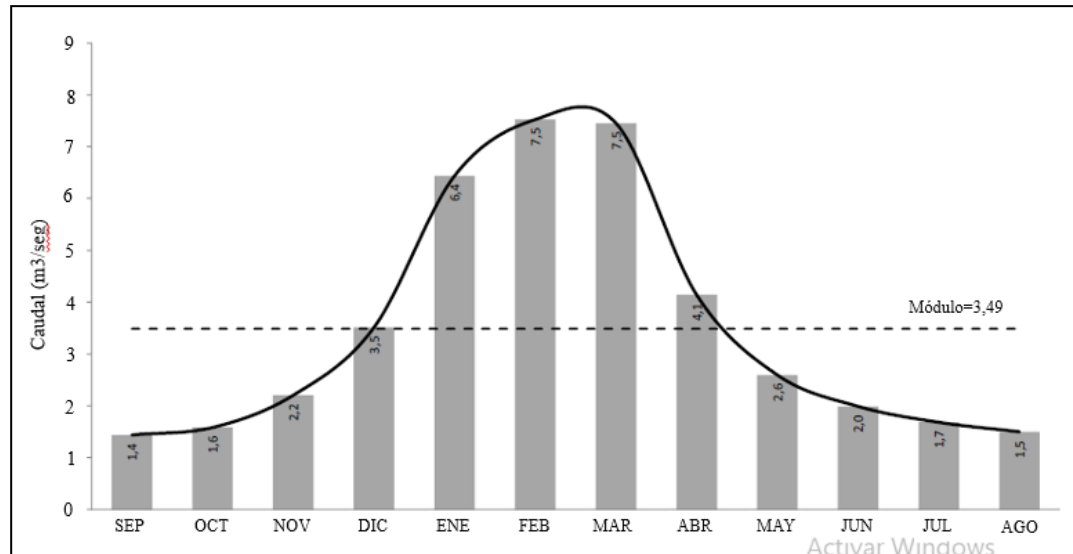


Figura II.8: Caudales del río de Las Cañas de la Estación Potrero del Clavillo, serie 1943-2019. Las barras verticales indican el caudal medio mensual y línea negra continua el Hidrograma medio mensual. Fuente: Red Hidrológica Nacional, Publicaciones Hidrometeorológicas 2017-2018-2019.

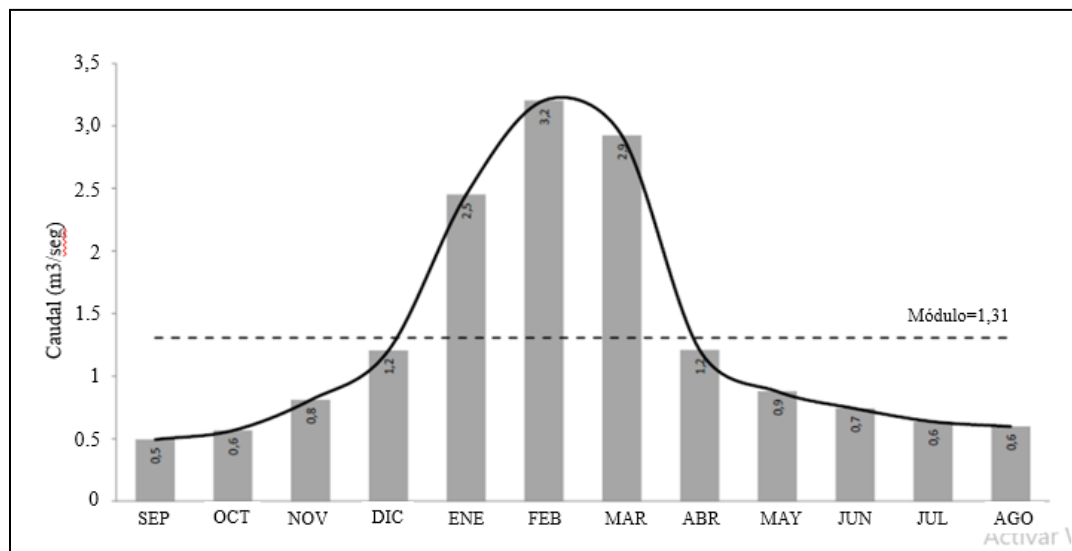


Figura II.9: Caudales del río del Campo de la Estación Cabo San Miguel, serie 1952-1962. Las barras verticales indican el caudal medio mensual y línea negra continua el Hidrograma medio mensual. Fuente: Red Hidrológica Nacional, Publicaciones Hidrometeorológicas 2017-2018-2019.

II.5 VEGETACIÓN

La marcada estacionalidad de las precipitaciones, la escasa humedad del ambiente y la amplitud térmica estacional, sumadas a la altitud constituyen los factores locales críticos que intervienen en la distribución de la vegetación.

El escalonamiento vertical de las comunidades vegetales, que cambia completamente de uno a otro lado de las Sierras de Narváez, representa un amplio espectro de recursos disponibles para las poblaciones humanas. De este modo, la

proximidad y accesibilidad a diferentes zonas ecológicas le confieren al Campo del Pucará el carácter dinámico de zona de contacto. Esta área posee un carácter de pastizal herbáceo-arbustivo antrópico y se encuentra enclavado en las Provincias Fitogeográficas del Monte y de las Yungas (Núñez Regueiro, 1998).

A nivel regional, según Oliszewski (2004) el Campo del Pucará corresponde latitudinalmente al sector sur de las Yungas y altitudinalmente a los pisos vegetales de Selva montana (700 - 1500 m s.n.m.) y Bosque montano (1.500 - 3.000 m s.n.m.). En la Figura II.10 se indican las formaciones vegetales a nivel regional.



Figura II.10: Formaciones vegetales, a nivel regional, para el área de Campo del Pucará y valle del Suncho. Tomado de Oliszewski (2004).

En el sector de Selva montana (estrato superior), se registra la presencia de grandes árboles como laurel (*Phoebe porphyria*), nogal (*Cedrela lilo*, *C. angustifolia*, *Juglans australis*), mato (*Eugenia pungens*), pacará (*E. Contortisiliquum*) y horco-cebil (*Parapiptadenia excelsa*). Un segundo estrato arbóreo está formado por las especies que no exceden los 20 m de altura como chal-chal (*Allophylus edulis*) y tala (*Prunus tucumanensis*). Por último, los arbustos que poseen entre 2 y 4 m de altura se destaca *Chusquea lorentziana*, *Piper tucumanum* y *Cestrum lorentzianum*.

En el sector de Bosques montanos, pueden diferenciarse los bosques de pino, bosques de aliso y bosques de queñoa. Por encima de esta zona se encuentran los pastizales de altura.

La provincia fitogeográfica de Monte se ubica al SO de Campo de Pucará y está constituida por los bosques xerófilos de los valles de Catamarca. El jarillal es la comunidad más característica de esta provincia. Las cactáceas son muy abundantes y en las orillas de los ríos es común la presencia de bosques de algarrobo, principalmente se registran *Prosopis* arbóreos (*P. Alba*, *P. Nigra*, *P. flexuosa* y *P. chilensis*). Se asocian con ellos el chañar (*Geoffroea decorticans*) y la brea. Estas especies arbóreas también constituyen una fuente potencial de madera para construcción y su uso como combustible.

La diferencia de humedad entre el valle del Suncho y el Campo del Pucará resulta en notables contrastes de la cubierta vegetal. Los vientos que dan lugar a las precipitaciones tienen una dirección principal SSE, mientras que en las quebradas transversales corren con dirección predominante O-E o de NO a SE. Aquellas pendientes que miran hacia el S y SE se encuentran en una situación favorable respecto de la cantidad de humedad que reciben, en contraposición de las pendientes opuestas que miran al N o NE. Se observa también que las laderas con orientación S-SO reciben menor radiación solar que las orientadas al N-NE, de modo que suman dos efectos favorables, mayor humedad y menos evaporación (Banegas *et al.*, 2001).

En las zonas de Yunka Suma y Río Potrero se encuentran bosques de aliso (*Alnus acuminata*) con ejemplares de sauco (*Sambucus peruviana*) y numerosas especies arbóreas que denotan la presencia del piso de Bosque montano. Estos bosques también están presentes en zonas de mayor altitud sobre la ladera occidental de la sierra de Narváez hasta la zona de Las Chacritas aproximadamente y en la ladera oriental de las Sierras del Aconquija. En las zonas de Charquiadero y Alto las Juntas se observan la presencia de alisos, sobre todo en las orillas de arroyos, pero ya no formando bosques, como sí lo hacen en Río Potrero y Yunka Suma (<https://paisajesdecataamarca.blogspot.com/2013/02/turismo-en-aconquija-o-las-estancias.html>)

En el extremo norte del valle del Suncho, la vegetación adquiere carácter de Selva montana en las partes bajas, constituyendo la terminación austral, ya empobrecida, de la Selva tucumano-oranense. En las alturas pasa a bosques más

abiertos y más pobres en especies arbóreas formando un manto verde oscuro bien denso que tapiza las laderas de las serranías, este es un tipo de vegetación higrófila.

A medida que las precipitaciones disminuyen hacia el sur, la selva no cesa bruscamente, sino que se mantiene en los parajes más favorecidos por la humedad o sea los que reciben lluvias algo superiores al promedio general del área. Ello ocurre en las quebradas y faldeos de dirección transversal al rumbo de las sierras, es decir de O a E. En las laderas expuestas al sur hay densa vegetación arbórea que termina en altura en bosques de alisos y queñoas, en tanto que en los faldeos que miran al norte y en las crestas de separación de quebradas vecinas, no se ven árboles sino prados de altura.

Hay dos tipos de vegetación arbórea en la selva basal y en los bosques de altura. La selva basal está integrada por especies termófilas e hidrófilas. Se destacan entre otros, el laurel negro (*Phoebe porphyria*), el cebil colorado (*Parapiptadenia excelsa*) y el tarco (*Jacarandá mimosaeifolia*). Debajo de estos árboles crece una densa vegetación de arbustos de hojas grandes (ortigas y begonias) y bambúseas, gramíneas y helechos.

Hacia los 1.500 - 1.600 m s.n.m., la selva va dejando paso a bosques más abiertos donde predominan el aliso (*Alnus jorullensis* var. *Spachii*), árbol que finalmente se hace dominante, el pino montañoso (*Podocarpus parlatorei*), el saúco (*Sambucus peruvianus*) y la queñoa (*Polylepis australis*). Estas especies señalan el límite superior de la vegetación arbórea.

Por encima de esta vegetación se extienden los pastizales altoserranos o prados montañosos, con predominio de gramíneas de los géneros *Festuca*, *Stipa*, *Paspalum* y *Aristida* junto a numerosos arbustos y hierbas de distintas familias (compuestas de los géneros *Senecio*, *Baccharis*, *Eupatorium*, *Tagetes*) *Oxalis*, *Verbena* y *Justicia*.

Desde los 3.000 hasta 4.600 m s.n.m., la vegetación toma carácter de aquella de la Puna, con matas aisladas de pastos duros, *Stipa* Sp, Yareta y plantas aisladas en las fisuras de las rocas (Psamófitas). Este tipo de vegetación más la presencia de musgos y líquenes litófitas son los últimos representantes de la vegetación macroscópica, llegando los musgos hasta los 4.800 m s.n.m. y los líquenes hasta los 5.000 m s.n.m.

Hacia el sur del valle, la vegetación es predominantemente herbácea xerófila, creciendo *Muhlenbergia asperifolia*, *Pappophorum mucronulatum*, *Aristida adscensionis* y *Baccharis filliessi*. Las dos primeras gramíneas mencionadas forman un denso césped que en ese lugar resulta útil como forraje, pese a su inferior calidad (Morláns, 1995).

II.6 SUELOS

En cuanto a las características de los suelos de la cuenca del río del Campo, solo se encontró información específica referida al Campo del Pucará en Gianfrancisco (2002). Para este sector indica suelos desarrollados sobre serranías y faldeos de sierras con relieve abrupto, bajo un clima semiárido con precipitaciones inferiores a la evapotranspiración lo que le confiere al suelo un déficit hídrico a lo largo de todo el año. Esto, sumado a la presencia de una vegetación muy escasa que aporta poca materia orgánica y al material parental de los suelos, que se encuentra constituido en profundidad por materiales predominantemente limosos de color pardo, soterrados por materiales de acarreo fluvial (compuesto principalmente por arenas muy finas de color gris), les imprimen a los suelos características muy particulares. Son suelos escasamente desarrollados, ya que por un lado la falta de agua frena los procesos de meteorización e impide la implantación de la vegetación y, por otro lado, los procesos de formación edáfica son extremadamente lentos, por lo que no han llegado a formarse suelos con perfiles bien diferenciados. El perfil tipo es del tipo A/AC/C/2C. Otra causa del escaso desarrollo o deterioro de los suelos es la poca protección arbórea que acrecienta los procesos erosivos desgastando los horizontes superficiales.

En cuanto a los valores de acidez (pH) los mismos se mantienen prácticamente constantes en profundidad, con valores bastante altos (fuertemente alcalinos), salvo en superficie que son un poco más bajos, evidenciando un escaso lavado y disolución de sales y un contenido algo superior en materia orgánica. En general estos valores son acordes a las condiciones ambientales reinantes, al material parental, a la escasez de materia orgánica y a los contenidos de materiales calcáreos. Estos valores se encuentran íntimamente ligados a los contenidos de carbonato de calcio, que se incrementan también desde la superficie y se reflejan morfológicamente como venillas y diseminados en la masa del suelo (Gianfrancisco, 2002).

Los contenidos en carbono y materia orgánica disminuyen gradualmente en profundidad y a lo largo de todo el perfil los valores son muy bajos (suelos extremadamente pobres), típicos de estos tipos de suelos y de estas condiciones ambientales. Esto se ve reflejado en los colores muy claros de los horizontes, donde el proceso de melanización es poco evidente. Con relación a los valores de fósforo total es posible observar que presentan valores elevados en superficie que luego descienden en profundidad (Gianfrancisco, 2002).

CAPÍTULO III

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

III.1 MARCO GEOTECTÓNICO REGIONAL

La región de estudio comprende una fosa tectónica constituida por la depresión de Campo del Pucará - valle del Suncho, enmarcada por las Sierras del Aconquija y Ambato y se localiza al NE de la provincia de Catamarca cerca del límite con la de Tucumán, constituyendo parte de lo que fue denominado por Caminos (1979) como Sierras Pampeanas Noroccidentales o Sierras Pampeanas Occidentales (Ramos, 1999).

Desde los primeros trabajos de González Bonorino (1950a), las Sierras Pampeanas han sido consideradas como el resultado del levantamiento de grandes bloques de basamento originados durante la deformación andina bajo un régimen compresivo. Este autor reconoció que los bloques se encuentran afectados por fallas lístricas que despegan de transiciones frágiles-dúctiles en la región inferior de la corteza. Esta hipótesis fue confirmada por Jordan y Allmendinger (1986), Introcaso *et al.* (1987), Jordan *et al.* (1989) y Ramos *et al.* (2002). El mecanismo tectónico regional que produjo el levantamiento del basamento de Sierras Pampeanas mediante deformación del tipo piel gruesa se halla íntimamente relacionado al cambio de posición de la Placa de Nazca, situación que generó el desarrollo de un antepaís fragmentado (*broken-foreland*) en los últimos 10 millones de años (Jordan *et al.*, 1983a y b). El modelo de antepaís fragmentado se basa en el hecho de mostrar altos de basamento emergentes que desarrollan un patrón morfológico que limita valles intermontanos (Alvarado y Ramos, 2010).

Tectónicamente, las Sierras Pampeanas se encuentran ubicadas en la región distal del antepaís andino, yaciendo sobre un segmento afectado por subducción subhorizontal de los Andes Centrales del Sur, aunque su extremo más septentrional se ubica en una zona de transición hacia subducción normal (Cahill e Isacks, 1992). Esta región se halla integrada casi enteramente por un conjunto de sierras elongadas en sentido N-S, limitadas por fallas de alto ángulo ($> 50^{\circ}$ - 60°), doble vergentes con exposición de basamento en los núcleos (Cristallini *et al.*, 2004). Los altos del basamento limitan cuencas, en su mayoría de edad neógena, rellenas por secuencias continentales cuyo desarrollo sugiere controles tectónicos y climáticos (Dávila *et al.*, 2005).

El basamento de las Sierras Pampeanas Occidentales constituye los núcleos de las sierras pampeanas de Tucumán, Catamarca, La Rioja, San Juan y el sector occidental de San Luis correspondiendo a un orógeno eopaleozoico (Ramos, 1988) y se caracteriza por la presencia de metamorfitas y migmatitas con una edad de metamorfismo ordovícica, que alojan una serie de granitoides calcoalcalinos. La composición de estos intrusivos varía de gabros tholeíticos, a tonalitas y granodioritas asociadas a subducción, de edad cámbrica a ordovícica media y que culmina con granitos postcolisionales de edad ordovícica superior a devónica basal. Granitos apotectónicos se emplazan en el Carbonífero inferior (Ramos, 1999). En el área de este estudio, el basamento se encuentra cubierto por sedimentitas cenozoicas de diferente naturaleza.

III.2 ESTRATIGRAFÍA

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de una secuencia estratigráfica constituida por un basamento cristalino de edad Proterozoico superior – Paleozoico inferior el cual se halla intruido por cuerpos graníticos paleozoicos. La tectónica compresiva cenozoica reactivó antiguas fallas normales, las cuales actuaron como fallas inversas generando procesos de inversión tectónica que elevaron bloques del basamento cristalino. Esta región, la cual representa segmentos de un antiguo cinturón móvil del Gondwana se halla constituido principalmente por filitas, micacitas, esquistos, gneises, anfíbolitas que evidencian condiciones de bajo, medio y alto grado metamórfico. Acompañan a estas metamorfitas migmatitas y cuerpos graníticos (Cisterna *et al.*, 2010).

Discordante sobre el basamento metamórfico-ígneo se disponen secuencias continentales de edad cenozoica.

Depósitos de edad neógena afloran principalmente en el sector oriental del área de estudio, hallándose constituidos por materiales clásticos y volcanoclásticos representados por conglomerados, areniscas, limolitas, arcilitas y tobas. Encima de estos depósitos, se disponen conglomerados, areniscas y limolitas, que por su posición topográfica y correlaciones con otras unidades son asignados al Pleistoceno y Holoceno.

En la Figura III.1 se indica el mapa geológico y en el Cuadro III.1 el cuadro estratigráfico del área de estudio.

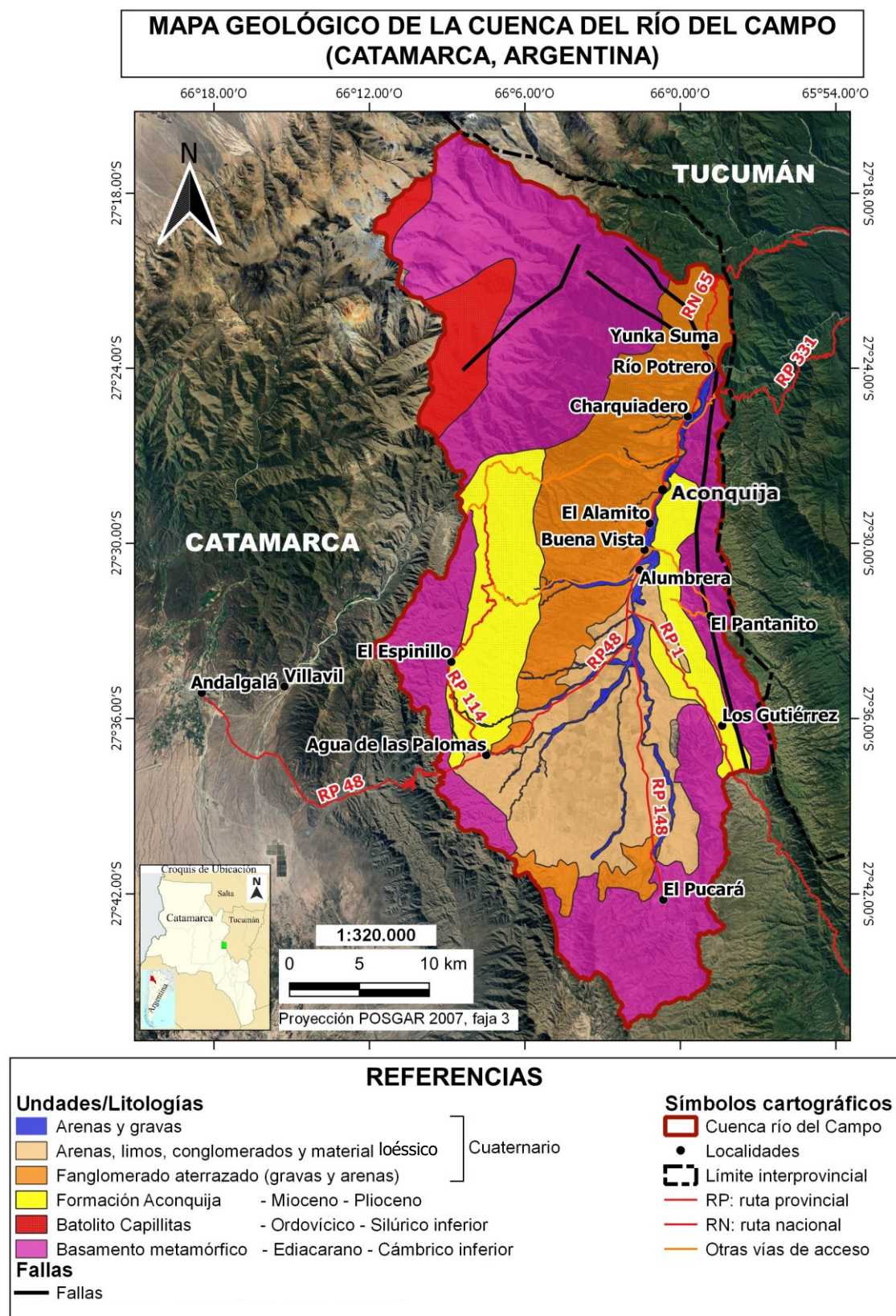


Figura III.1: Mapa Geológico de la cuenca del río del Campo. Modificado de González Bonorino (1950c y 1951a) Dal Molin *et al.* (2003) y Fernández *et al.* (2004). Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS							
Unidades Cronoestratigráficas				Unidad Litoestratigráfica			
Eonotema	Eratema	Sistema	Serie	Formación		Litología	Ciclo Tectosedimentario
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno			Conglomerados arena y gravas fluviales y de terrazas	Andino
			Pleistoceno			Limos arcillosos limos arenosos	
		Neógeno	Plioceno	Aconquija	Sección III	Areniscas arcóscicas gruesas con rodados del basamento	
			Mioceno		Sección II	Alternancia areniscas tobáceas y areniscas conglomerádicas con rodados de vulcanitas	
					Sección I	Areniscas finas tobáceas con ceniza volcánica	
	Paleozoico	Silúrico	Inferior	Batolito Capillitas		Monzogranitos porfíricos	Famatiniano
		Ordovícico					
		Cámbrico	Inferior				
Proterozoico	Neo-proterozoic	Ediacarano		Basamento Metamórfico		Esquistos, gneises migmatitas	Pampeano

Cuadro III.1: Cuadro estratigráfico del área de estudio basado en González Bonorino (1950c, 1951a), Vergel (1981), Dal Molin *et al.* (2003), Nasif *et al.* (2007), Del Pero (2010), Del Pero y Georgieff (2011).

En el cuadro III.2 se muestra un cuadro estratigráfico con las correlaciones de las diferentes unidades de la Formación Aconquija (Mioceno – Plioceno) con unidades de la sierra de Capillitas y de la llanura tucumana (Del Pero y Georgieff, 2011).

Edad	Llanura Tucumana Hoja Geológica Concepción	Las Estancias	Sierra de Capillitas
Plioceno	Corrales	Unidad III	Araucanense
	Las Cañas		
	Las Pavas		
Mioceno medio a superior	Complejo Volcánico Portezuelo de las Ánimas	Unidad II	Complejo Volcánico
	Guasayán		
	Río Salí	Unidad I	Calchaquense
Eoceno	¿Aconquija?		
Paleoceno			
Cretácico	Subgrupo Pírgua		

Cuadro III.2: Cuadro estratigráfico indicando las correlaciones de las diferentes unidades de la Formación Aconquija (Mioceno – Plioceno) con secuencias de la sierra de Capillitas y de la llanura tucumana. Fuente: Del Pero y Georgieff (2011).

III.2.1 Neoproterozoico – Cámbrico inferior:

Los núcleos de las áreas serranas se encuentran constituidos por rocas del basamento ígneo-metamórfico de edad Neoproterozoico - Paleozoico inferior (González Bonorino 1950a). Las litologías más representativas son metamorfitas, migmatitas y granitoides. Las rocas metamórficas son filitas, micacitas, esquistos, gneises y anfibolitas que evidencian condiciones de bajo, moderado y alto metamorfismo. En este contexto, existen extensos afloramientos de esquistos que integran el cinturón de "Esquistos Bandeados" (Rassmuss, 1918 y González Bonorino 1951a), el cual se extiende por la parte central de Cumbres Calchaquies, Sierras del Aconquija y en gran parte de la sierra de Ancasti (Mon y Hongn 1996). Córdoba (1994) señala que las metamorfitas indicadas son asimilables a las aflorantes en la sierra de Ambato.

Según Aceñolaza y Toselli (1977, 1981), Rapela *et al.*, (2001) y Steenken *et al.*, (2008), el cordón de Ambato se encuentra constituido por un basamento cristalino, resultado de tres eventos orogénicos: el Ciclo Pampeano (Precámbrico Superior-Cámbrico inferior), Ciclo Famatiniano (Cámbrico-Devónico Superior) y Ciclo Achaliano, (Devónico Medio-Carbonífero inferior). Este basamento cristalino, de naturaleza metasedimentaria se encuentra constituido en grado ascendente de metamorfismo, por esquistos, gneises y migmatitas.

Cisterna *et al.* (2010) indican que el metamorfismo regional vinculado al desarrollo de metamorfitas de bajo, mediano y alto grado en las Sierras Pampeanas es el resultado de un evento tectono-térmico de edad cámbrica temprana y corresponde a la orogenia Pampeana (Rapela *et al.* 1998, Sims *et al.* 1998). Por otra parte, aquellas rocas asignables al Ordovícico – Devónico (~ 500 - 390 Ma), se habrían originado durante la orogenia Famatiniana y son coincidentes con los picos de metamorfismo en diferentes áreas de las Sierras Pampeanas, como es el caso de la sierra de Ancasti (Willner 1983).

Respecto de las migmatitas, González Bonorino (1950b, c y 1951a, b) ya había identificado al oeste de las Sierras del Aconquija amplias zonas de estas rocas que se desarrollaron en dos etapas; la primera de ellas relacionada al emplazamiento sintectónico de tonalitas en esquistos, situación que generó segregaciones ricas en plagioclasa y cuarzo que gradan a venas de la misma composición (gneises inyectados). En cuanto a la segunda etapa, la indicó representada por la intrusión de cuerpos pegmatíticos ricos en feldespatos potásicos, los cuales se hallan íntimamente relacionados al emplazamiento del batolito del Aconquija.

Dal Molin *et al.* (2003), señalan una faja de máxima migmatización que pasa por la media falda oriental de las Sierras del Aconquija, apareciendo en las cumbres de Narváez (donde la migmatización aumenta hacia el este) y cumbres de Santa Ana acompañadas de granitos miloníticos. La zona de máxima migmatización se extiende hacia el norte, hasta el río Jaya, disminuyendo al oeste del mismo. La migmatización vuelve a aparecer en una faja comprendida entre los ríos Nevado y Los Reales, hacia el sur se continúa en las cumbres de Balcosna.

Las migmatitas que caracterizan a los cordones montañosos que limitan el área de estudio fueron estudiadas, entre otros autores, por Rassmuss (1918), Kittl (1938) y González Bonorino (1950b) quienes las definen como un "Complejo de Inyección" y realizan el análisis comparativo entre las manifestaciones de las Sierras de Aconquija, de Ancasti y de Ambato (González Bonorino 1978). Las metamorfitas se hallan vinculadas con granitos, granodioritas y tonalitas pre, sin y post cinemáticos (González Bonorino 1950b; 1951a, b; Toselli *et al.* 1983). Estos autores describen los cuerpos ígneos de composición predominantemente granítica y la existencia de cuerpos sintectónicos, en contacto difuso con el basamento metamórfico, emplazados originalmente en niveles profundos.

Cisterna *et al.* (2010) efectúan un estudio detallado de las migmatitas que afloran en el río de Las Cañas indicando la presencia de metatexitas (litotipo dominante) y diatexitas y en menor proporción esquistos que se presentan como resister. Estos últimos provienen del cinturón de Esquistos Bandeados (Rassmuss 1918 y González Bonorino 1951a) y conforman cuerpos que pueden alcanzar dimensiones de hasta un metro cúbico. Los esquistos son de colores grises a verdosos, se presentan con un conspicuo bandeamiento y son de grano fino a medio.

En las Fotos III.1 (A y B) se muestran afloramientos del basamento en la subida de la Cuesta del Clavillo. En las Fotos III.2 (A, B, C y D) se indican afloramientos del basamento en el área de cierre del dique de Potrero del Clavillo y en las Fotos III.3 (A y B) afloramientos del basamento en el camino a El Espinillo.



Fotos III.1: Afloramiento del basamento (esquistos bandeados) en la subida de la cuesta del Clavillo (A). En B, detalle del afloramiento donde puede observarse lo intenso del proceso de meteorización al que se encuentra sometido este basamento.



Fotos III.2: Afloramientos del basamento en el área de emplazamiento del dique de Potrero del Clavillo. A y B, gneises aflorantes en el Túnel 5. C y D migmatitas aflorantes en el río de Las Cañas.



Fotos III.3: Afloramiento del basamento en la sierra de Las Lajas en el camino a Pantanillos (A). En B, detalle de este afloramiento.

Larrovere *et al.* (2008) definen una zona de cizalla dúctil sobre el basamento metamórfico en el límite austral de las Sierras del Aconquija y su prolongación hacia el sur sobre la parte septentrional de la sierra de Ambato. Esta faja de rumbo nornoroeste-sursureste se extiende por unos 24 km, con un ancho que varía entre 1 y 4 km y está constituida por milonitas, protomilonitas y blastomilonitas que son el producto de la deformación dúctil que afectó al basamento metamórfico conformado originalmente por migmatitas y gneises. Hacia el este, esta faja de cizalla pasa transicionalmente a gneises y migmatitas a partir de la pérdida gradual de las evidencias de deformación. Mientras que hacia el oeste limita con esquistos micáceos y moteados por medio de un contacto tectónico definido por una falla inversa, la cual produce el basculamiento de la sierra. Esta falla es conocida como falla del río Chañarito o falla de Ambato. Se ha estimado una edad relativa para la actividad deformacional del Cámbrico inferior-Ordovícico Inferior. En la Foto III.4 (A y B) se observan afloramientos de gneises con inyecciones de cuerpos graníticos leucocráticos en la subida de la Cuesta de la Chilca.



Fotos III.4: Afloramientos del basamento (gneis) en la subida de la cuesta de La Chilca (A y B) donde se aprecia la inyección de un cuerpo granítico leucocrático en el gneis (A).

En el sector noreste del área de estudio aflora un cuerpo granítico perteneciente al batolito de Capillitas. González Bonorino (1951a, 1951b) en base a las características discordantes de los contactos con la roca de caja, clasifica a este cuerpo como apotectónico, al igual que los intrusivos de El Zarzo y El Arenal que en conjunto constituyen el batolito de Aconquija.

El batolito de Capillitas forma parte de los granitos hiperaluminosos, con $AS1 > 1,2$, asignados al grupo post-Dz de granitoides Famatinianos del Ordovícico (Rapela *et al.*, 1992). Consiste esencialmente en monzogranitos porfíricos de dos micas, con megacristales de feldespato potásico idiomorfo, en una matriz de grano medio a grueso, de composición granodiorítica a monzogranítica, aunque también hay variaciones equigranulares de la misma composición.

Como cuerpos intrusivos menores se encuentran granitos leucocráticos ricos en muscovita. Todas las variedades de granitos contienen cordierita, andalusita y cantidades menores de sillimanita (Toselli *et al.*, 1996).

Las dataciones realizadas por McNutt *et al.* (1975) proporcionaron una edad Rb-Sr de 413 Ma ($Sr_0=0.7146$), mientras que las edades K-Ar sobre biotita y muscovita varían entre 365 y 471 Ma (Caelles *et al.*, 1971; Linares y González, 1990). Rapela *et al.* (1999) obtuvieron una edad U-Pb SHRIMP de 470 ± 3 Ma en circones de un monzogranito porfírico de dos micas. Estos datos sugieren que el magmatismo tuvo lugar desde el Ordovícico al Silúrico tardío, indicando que el batolito de Capillitas fue emplazado durante el ciclo magmático Famatiniano (Aceñolaza y Toselli, 1973).

III.2.2 Mioceno – Plioceno: Formación Aconquija:

En el área afloran secuencias continentales de grano y estrato crecientes de naturaleza clásticas y volcaniclásticas de edad Mioceno tardío que se apoyan en discordancia angular sobre el basamento peneplanizado.

Los afloramientos neógenos se encuentran mejor expuestos en el faldeo occidental de las cumbres de Narváez, con rumbo y buzamiento de N348°/30E (Nasif *et al.*, 2007), hacia el oeste se apoyan sobre la penillanura (basamento metamórfico labrado) de las cumbres de Las Lajas con rumbo NNE-SSE y buzamientos entre 9° y 20° al Este (Del Pero y Georgieff, 2011).

González Bonorino (1950c) en el Campo del Pucará, entre Pantanillos y Agua de las Palomas describe una secuencia en la cual reconoce un conglomerado basal y tres

secciones, las cuales no poseen límites netos sino transicionales. Al conglomerado basal, al cual determina un espesor de 5 metros, lo describe de textura fina a mediana, con clastos angulosos de cuarzo, microclino, migmatita, granito, esquistos micáceos y con una matriz arenosa gruesa, arcósica, cementada por carbonato de calcio. Este autor describió una sucesión sedimentaria de aproximadamente 1.100 m que denominó Formación Aconquija, a la que ubicó en el Terciario medio-superior, y subdividió en tres secciones denominadas, de base a techo, como I, II y III. La sección I (400 m de espesor) se halla constituida por areniscas finas tobáceas grises, rosadas a castañas, ricas en ceniza volcánica; la sección II (600 m de espesor) es una alternancia de areniscas tobáceas finas, de color gris castaño claro y areniscas feldespáticas conglomerádicas y la sección III (100 m de espesor) constituida por areniscas arcósicas gruesas, de color gris rosada, friable, con capas delgadas de rodados (Foto III.5). En la Unidad II la composición de los rodados es principalmente volcánica, mientras que en la Unidad III es predominantemente granítica.



Foto III.5: Afloramiento de la Sección III de la Formación Aconquija de edad Mioceno superior – Plioceno en la sierra de Las Lajas, camino a Pantanito. Esta unidad se apoya en discordancia sobre el basamento, el cual también puede apreciarse en la imagen.

González Bonorino (1950c) realizó una correlación entre las sucesiones sedimentarias aflorantes entre el Campo del Pucará – valle de Suncho y el valle de Santa María. Así también, estableció que los niveles aterrazados cenozoicos en el faldeo inferior de las cumbres de Narváez corresponden a la sección I de la Formación Aconquija, los depósitos aflorantes en el faldeo de estas cumbres son asignables a la

sección II de la misma unidad y estimó que el depocentro del Campo del Pucará - valle del Suncho es asimétrico y aumenta de espesor hacia el NNE.

Dal Molin *et al.* (2003) describen en el faldeo occidental de las cumbres de Narváez unas areniscas grises tobáceas finas, areniscas conglomerádicas y tobas que asignan a la Formación Aconquija. Por otra parte, describen entre las cumbres de Narváez y las cumbres de las Higueras unas areniscas pardas rojizas y otras grises, también asignadas a esta unidad.

González Bonorino (1950c) en basa a correlaciones litoestratigráficas con la sucesión sedimentaria del valle de Santa María, determina una edad que abarcaría desde el Mioceno medio tardío al Plioceno.

Dal Molin *et al.* (2003) en dataciones K/Ar realizadas en depósitos asignados a la Formación Aconquija, en las inmediaciones del dique Escaba (provincia de Tucumán), indican edades de 44 Ma y 47 Ma. (Eoceno). Señalan, además, que los depósitos de la Formación Aconquija en los alrededores de Escaba corresponden a la sección I de González Bonorino (1950c). Además, estos autores extienden la edad de la base (sección I) de la formación hasta el Eoceno.

Nasif *et al.* (2007) asignan a la parte superior de la Sección II y III una edad Mioceno superior – Plioceno en base a la identificación de vertebrados fósiles hallados en el arroyo El Durazno, el cual se ubica en la vertiente occidental de las cumbres de Narváez.

Del Pero (2010) efectuó un relevamiento geológico diferenciando las tres unidades en el Campo del Pucará, indicando que en general los estratos buzan hacia el este y tienen rumbo meridiano, además determinó una discordancia de rumbo entre las unidades II y III. El base al análisis de facies, asociaciones y arquitectura aluvial propone un modelo paleoambiental de ríos de baja sinuosidad de tipo entrelazado formado por canales y barras fluviales gravosas y arenosas. Los anchos que determina para las fajas de canales varían entre 50 y 70 m, y los espesores entre 1 y 3 m.

Del Pero y Georgieff (2011) en una datación realizada sobre una toba cercana al contacto entre la unidad I y la unidad II, obtuvieron una edad de $7,43 \pm 0,13$ Ma correspondiente al Mioceno superior (Tortoniano).

III.2.3 Pleistoceno:

En el Campo del Pucará afloran depósitos loésicos limo-arcillosos y limo-arenosos asignados al Pleistoceno, conformando el relleno superficial de la gran depresión que constituye esta área. González Bonorino (1950c) indica que estos sedimentos pueden ser confundidos con loess, pero son más arenosos y carecen del contenido de carbonato de calcio característico del loess. Niepagen (1981) mencionó que en algunos sectores alcanzan un espesor cercano a los 200 m. Vergel (1981) diferenció los sedimentos de grano fino en dos horizontes, uno inferior limo-arcilloso de color pardo rojizo y uno superior limo-arenoso y color pardo grisáceo. En el sector sur del valle del Suncho, sobre el extremo norte del Campo del Pucará, esta autora refirió los primeros restos de mamíferos fósiles con buena procedencia geográfica y estratigráfica, mencionando para los niveles inferiores de estos depósitos de color pardo rojizo fragmentos de caparazón dorsal y dientes de un gliptodonte que asignó al género *Panochthus*. Del horizonte superior limo-arenoso, en las proximidades de la localidad de El Alamito, exhumó varios restos cráneo-mandibulares y postcraneanos de un camélido asignado a *Lama guanicoe* y un molar inferior determinado como *Equus* sp. Sobre la base de esta fauna, Vergel (1981) asignó el horizonte inferior al Pleistoceno tardío y el horizonte superior al lapso Pleistoceno tardío hasta el presente. En las Fotos III.6 (A y B) pueden apreciarse una secuencia limo – arcillo - arenosa en las localidades de Buena Vista y otra limo – areno – arcillosa en Agua de Las Palomas.



Fotos III.6: Afloramientos de una secuencia limo – arcillo - arenosa de coloración pardo-rojiza en la localidad de Buena Vista en cercanías del Campamento de la Dirección Provincial de Vialidad (A). En B se observa una secuencia pardo-verdosa de composición limo – areno - arcillosa en cercanías de la localidad de Agua de las Palomas (Campo del Pucará).

III.2.4 Holoceno:

González Bonorino (1950c) indica que, desde el pie de monte de las cumbres de Narváez, desde las nacientes del arroyo Piedras grandes, hasta las del arroyo La Cuesta, al sur, afloran sedimentitas homogéneas. Se observa la presencia de bloques de gran tamaño, ligeramente angulosos en la sección superior, mientras que, en la inferior, adquieren alto grado de redondeamiento. En estos conglomerados predominan los clastos de esquistos, granito y en menor proporción cuarzo. Estos conglomerados, con una potencia máxima de 9,8 m, son notables en las barrancas del arroyo El Durazno y en los ríos Pantanito y Ojo de Agua.

González Bonorino (1951a) describe como fanglomerados aterrazados a los depósitos de Las Mesadas, los cuales se ubican en el sector occidental del valle del Suncho, constituidos por sedimentos característicos de pie de monte: gravas gruesas a finas y arenas en capas lenticulares con estratificación paralela. Estos depósitos se hayan expuestos en espesores de decenas de metros en las barrancas del río del Campo. Además, señala que, en Las mesadas, debajo del horizonte edáfico se encuentra un sedimento areno - limoso de color rosado bastante friable, el cual fue registrado también en las cumbres de Narváez, tanto en la falda oriental como en su cima. González Bonorino (1950c) también señala la presencia de fanglomerados en el extremo austral del Campo del Pucará.

Vergel (1981), señala que entre El Alamito y Buena Vista, se encuentran depósitos conglomerádicos polimícticos con matriz limo – arenosa de color pardo grisáceo. Se caracterizan por la ausencia de estratificación y baja selección (Fotos III.7, A, B y C). Los clastos de estos conglomerados son de composición granítica y metamórfica y varían de 20 a 30 cm. Estos conglomerados también fueron observados en la localidad de Pantanito, donde el tamaño de los clastos es mayor (diámetros de hasta 60 cm.).

Gutiérrez *et al.* (2019) indican que en el área de Yunka Suma, sobre la margen derecha del arroyo la Quinta, aflora un conglomerado de 30 m de espesor y color grisáceo, clastos de tamaños variables, matriz soporte, con intercalaciones de capas limosas de color pardo. Los clastos son de composición granítica y metamórfica con un diámetro de hasta 50 cm. Por sobre este conglomerado se dispone una secuencia arenosa y limosa de color pardo amarillento, friable de 30 a 40 m de espesor.



Fotos III.7: A: Afloramiento de una secuencia clástica constituida por ortoconglomerados clastoportantes polimícticos de espesores decamétricos, groseramente granodecrecientes, intercalados con niveles limo - arenosos en la localidad de El Alamito. Los clastos del ortoconglomerado son principalmente de composición granítica (B y C). Nota: la regla metálica tiene una longitud de 30 cm.

Respecto de los depósitos aluviales actuales, se hayan constituidos por arenas y gravas de granulometría variable que se observan en el lecho de los ríos, arroyos y en terrazas aluviales bajas que constituyen la llanura de inundación de los mismos. El diámetro de los clastos llega a alcanzar los 2 m de diámetro (Vergel, 1981).

III.3 GEOMORFOLOGÍA

En términos generales, en el área de estudio, pueden reconocerse dos ambientes geomorfológicos que presentan diferencias morfológicas, litológicas y de edad bien contrastadas (Figura III.2). Estos sectores corresponden al Ambiente Serrano de las Sierras Occidentales y al Ambiente de Valle Intermontano (Dal Molin *et al.*, 2003; Fernández *et al.*, 2004 y Guido *et al.*, 2014).

En la Figura III.3 se indican las Unidades Geomorfológicas del área de estudio basado en Dal Molin *et al.* (2003), Fernández *et al.* (2004) y Guido *et al.* (2014).

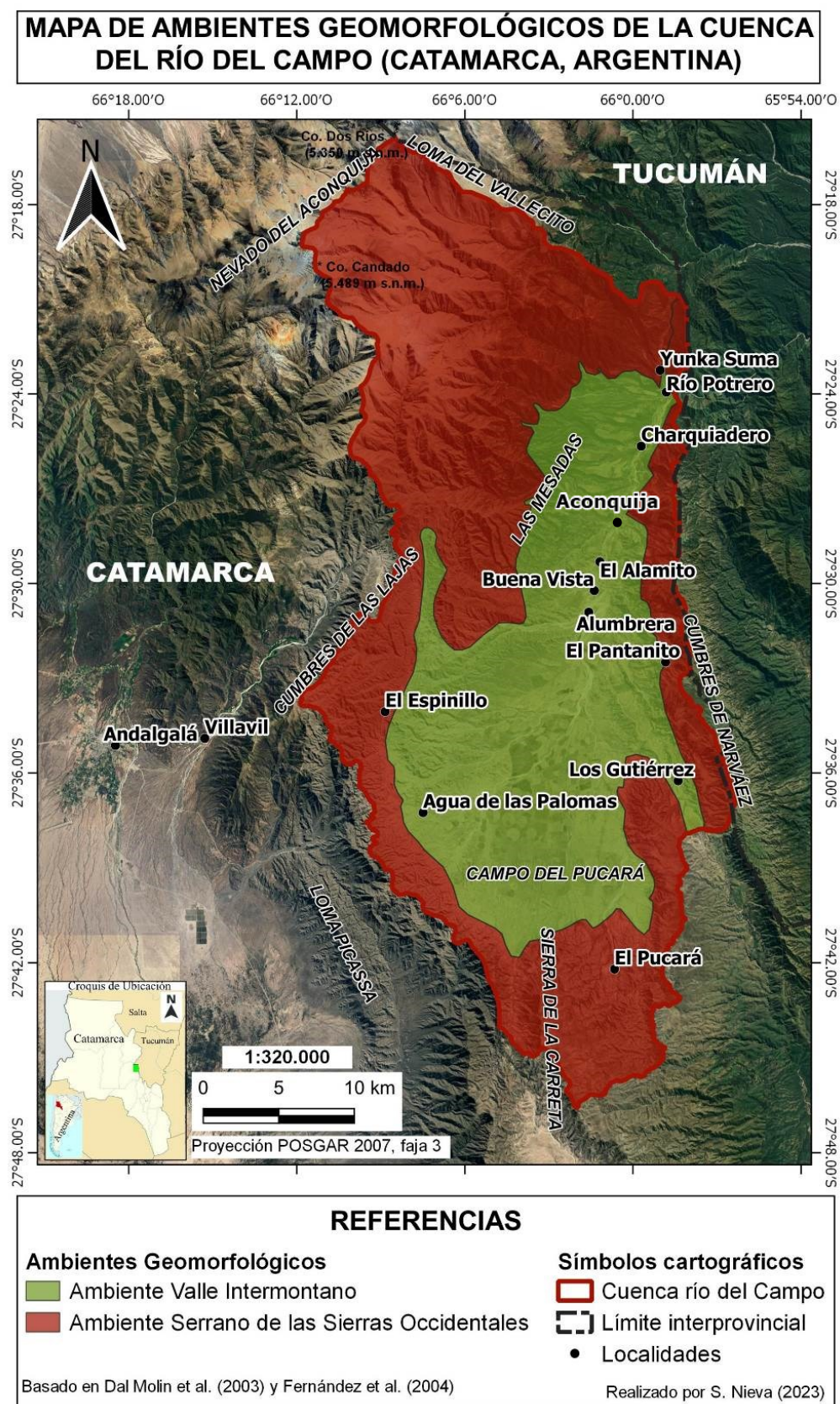


Figura III.2: Ambientes Geomorfológicos de la cuenca del río del Campo. Basado en Dal Molin *et al.* (2003), Fernández *et al.* (2004) y Guido *et al.* (2014). Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

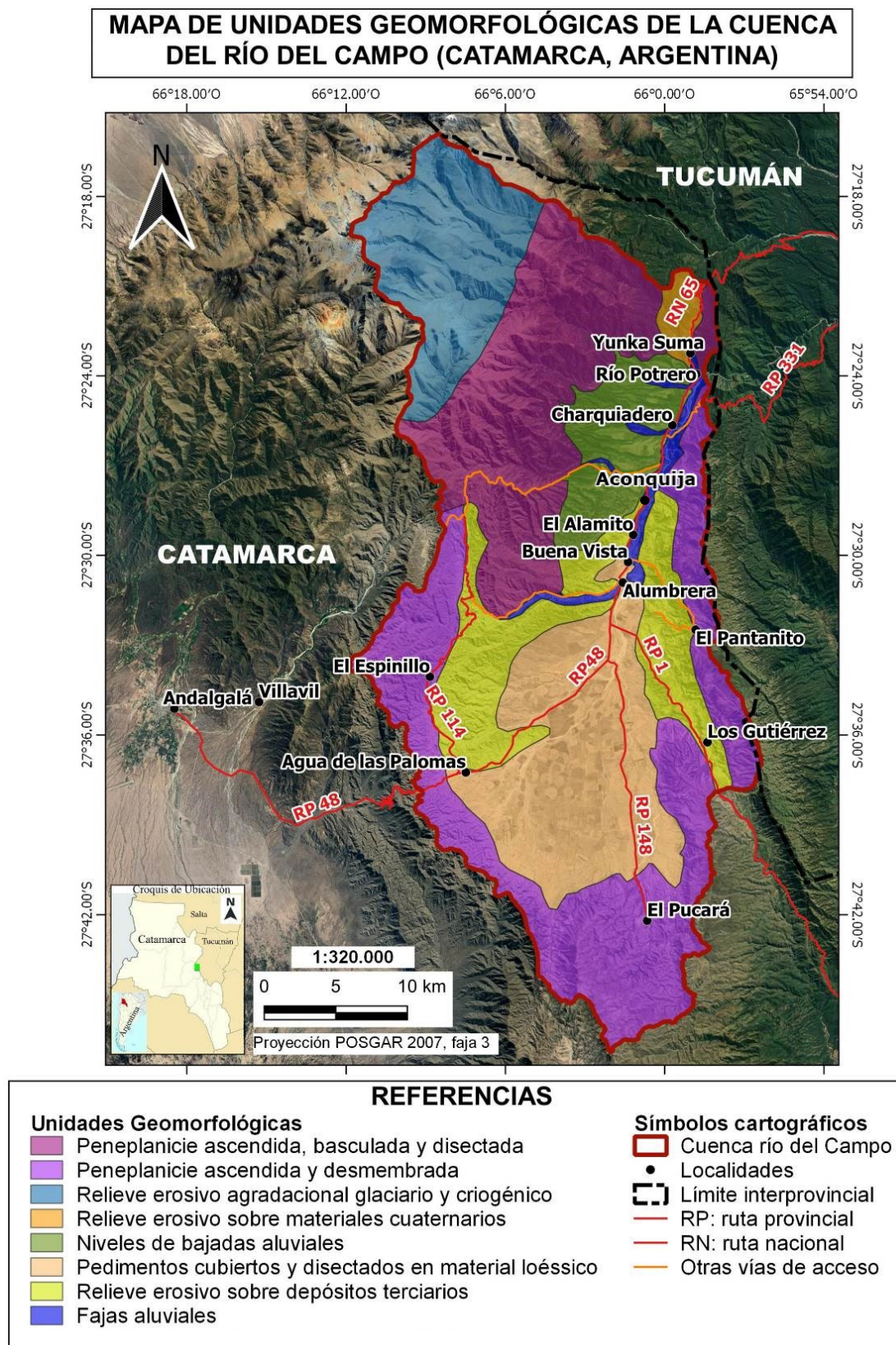


Figura III.3: Unidades Geomorfológicas de la cuenca del río del Campo. Basado en Dal Molin *et al.* (2003), Fernández *et al.* (2004) y Guido *et al.* (2014). Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

III.3.1 Ambiente Serrano de las Sierras Occidentales:

El Ambiente Serrano de las Sierras Occidentales comprende, en este estudio, a los bloques de basamento circundantes a la cuenca del río del Campo. El relieve en este sector se encuentra labrado sobre rocas del basamento, metamorfitas, migmatitas y granitoides, hallándose constituido por bloques fracturados y elevados tectónicamente donde los procesos de erosión, principalmente la actividad fluvial ha configurado el actual paisaje serrano. Los procesos tectónicos fallaron, elevaron y bascularon las rocas del basamento cristalino. Estos procesos no actuaron simultáneamente ni con la misma intensidad en toda la zona montañosa, lo que sumado al diferente tipo de litología y régimen paleoclimático originaron cordones montañosos más degradados que otros. Durante los períodos de estabilidad tectónica predominó la acción erosiva fluvial, fuertemente influenciada por la estructura geológica, de modo que los valles siguen los principales lineamientos estructurales presentes en este ambiente (Fernández *et al.*, 2004).

III.3.1.1 Unidades Geomorfológicas del Ambiente Serrano de las Sierras Occidentales:

Fernández *et al.* (2004) reconocen tres Unidades Geomorfológicas:

- Peneplanicie ascendida, basculada y disectada: reconocida principalmente en el sector occidental del área de estudio, correspondiente al extremo sur, vertiente oriental de las Sierras del Aconquija. Según Pereyra *et al.* (2002) corresponde a una superficie de planación regional, fundamentalmente debida al proceso erosivo fluvial (peneplanicie, en el sentido de Davis) labrado principalmente en metamorfitas precámbricas y granitoides del paleozoico inferior. Debido a su elevación, entre 4.000 y 5.000 m s.n.m. en las zonas más altas, y a las fuertes pendientes y precipitaciones que tienen lugar predominan los procesos de remoción en masa (flujos, deslizamientos, reptación y solifluxión), la acción erosiva fluvial y los procesos de crioclastia.
- Peneplanicie ascendida y desmembrada: se ubica en las cumbres de Narvéez al E y sierra de La Carreta al S. Constituyen sierras longitudinales que no superan los 2.500 metros de altitud, con un núcleo ígneo-metamórfico que conforman bloques de rumbo NNO-SSE, volcados al este-noreste con ángulos cercanos a los 30°. Se caracterizan por poseer continuidad en sus líneas de cumbres, una sección asimétrica con la pendiente más abrupta hacia el oeste constituido por la escarpa de falla y el flanco oriental

formado por una superficie muy regular, que constituye una característica heredada de una peneplanicie preterciaria. Esta peneplanicie se caracteriza por presentar un muy buen estado de conservación debido a las características imperantes durante la agradación terciaria que siguió a la erosión, tal como lo indican los depósitos de esa época, cuyos afloramientos sobre yacen a la peneplanicie en la base de las laderas (González Bonorino, 1950c). Los principales procesos erosivos del área la deflación, erosión fluvial y remoción en masa.

- Relieve erosivo agradacional glaciario y criogénico: localizado en el sector occidental del área de estudio (Sierras del Aconquija), en niveles altitudinales superiores a los 3.500 m s.n.m. Las principales geoformas resultantes de la actividad glaciaria son circos, artesas y morrenas. Estas últimas ocupan la parte elevada de los valles, al pie de los circos (González Bonorino, 1951a). Esta zona ha sido afectada por procesos glacifluviales y de remoción en masa, principalmente reptación (gelifluxión y solifluxión) y meteorización física por acción del hielo y las bajas temperaturas. Entre las geoformas criogénicas asociadas a procesos de remoción en masa se destacan los glaciares de escombros que fueron inventariados para la región del borde oriental de las Sierras del Aconquija por Ahumada *et al.* (2002).

III.3.2 Ambiente de Valle Intermontano:

La depresión tectónica valle del Suncho-Campo del Pucará presenta orientación N-S y NNO-SSE y exhibe severos procesos erosivos en respuesta a su fragilidad natural incrementada por la inadecuada actividad antrópica. La principal cuenca hidrográfica del área corresponde al río del Campo.

III.3.2.1 Unidades Geomorfológicas del Ambiente de Valle Intermontano:

Se identifican dentro del área correspondiente a este trabajo, cuatro Unidades Geomorfológicas (Fernández *et al.*, 2004; Guido *et al.*, 2014):

- Niveles de bajadas aluviales: abarca principalmente las superficies que se observan en la ladera oriental de las Sierras del Aconquija. Se encuentran conformados por depósitos de agradación fluvial (abanicos aluviales) y de remoción en masa (flujos densos y deslizamientos).
- Pedimentos cubiertos y disectados en material loésico: se ubican en el valle del Suncho. Constituyen geoformas poligénicas desarrolladas en material de origen eólico.

Los sedimentos de este origen son de color pardo rojizo a pardo grisáceo hacia arriba al aumentar la proporción de la arena sobre la arcilla. Cubren los sedimentos terciarios en el piedemonte de la sierra de Narváez. Se disgregan con relativa facilidad a la presión de los dedos, ofreciendo mayor resistencia al nivel inferior, probablemente por su mayor contenido en arcilla (Niepagen, 1981). Estos sedimentos loésicos, en algunos casos responden a depósitos de loess típico y en otros a loess retrabajado.

- Relieve erosivo sobre depósitos terciarios: se caracteriza por presentar un relieve compuesto por lomas y pequeños valles producto de la erosión fluvial y labrados sobre depósitos de edad neógena.

- Fajas Fluviales: se desarrolla en el río del Campo y sus afluentes, especialmente en la margen izquierda en los ríos Potrero, Charquiadero, Pisavil y Punta del Agua, de norte a sur. Las geoformas corresponden a planicies de inundación y niveles de terrazas fluviales. Niepagen (1981) identifica dos niveles de terrazas fluviales en el extremo septentrional del Campo del Pucará, en los ríos Piscoyacu, Aguas de Las Palomas, Pantanillo, Pucará y Espinillo. La red de drenaje se encuentra orientada hacia el norte con una forma de embudo en la parte sur de la cuenca del río del Campo, donde los cursos de agua aparecen cargados con predominancia de materiales finos, en cambio hacia el norte prevalecen los materiales gruesos (Niepagen, 1981).

CAPÍTULO IV

ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

IV.1 GENERALIDADES

Mediante la metodología desarrollada por Mora y Vahrson (1994) y la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG), en este caso con el programa de licencia libre y código abierto QGIS 3.4.1, se realizó la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río del Campo. La implementación de este SIG permitió un análisis espacial de los datos y la generación de un mapa de susceptibilidad.

El método de Mora y Vahrson (1994) constituye una de las herramientas utilizada en la gestión de riesgos y en la planificación y ordenamiento territorial en zonas propensas a sufrir deslizamientos, identificando zonas de alto riesgo. La efectividad del método puede variar dependiendo de la disponibilidad y calidad de los datos necesarios. Esta metodología no sustituye estudios geotécnicos de campo y de laboratorio necesarios para la protección y mitigación de riesgos correspondiente, ya que no es capaz de pronosticar el tipo de deslizamiento que podría presentarse (López *et al.*, 2020).

La metodología de Mora y Vahrson (1994) es un procedimiento relativamente simple y bastante efectivo a la hora de zonificar regiones. Se basa en parámetros que pueden determinarse de manera fácil y sin costos económicos elevados. Es muy utilizado por países en vías de desarrollo debido a que no requiere grandes inversiones ya que utiliza en su determinación las variables morfodinámicas más significativas desde el punto de vista de la inestabilidad de laderas (López *et al.*, 2020).

La zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos se realiza a partir del análisis de cinco variables que se clasifican en factores condicionantes y factores desencadenantes o de disparo. Los factores condicionantes reúnen características geomorfológicas propias del sitio de estudio tales como pendiente, litología y humedad del suelo, mientras que los factores desencadenantes integran los agentes externos que propician la ocurrencia de deslizamientos como ser sismicidad y precipitaciones intensas. Las zonificaciones generadas a partir de la metodología de Mora y Vahrson (1994) son de destacable importancia ya que pueden ser utilizadas como herramientas en la toma de decisiones respecto de zonas de interés para la asignación de recursos y

acciones concretas en la prevención, control y mitigación de deslizamientos (Chaverri Molina, 2016).

Es relevante destacar que para la aplicación de esta metodología en la cuenca del río del Campo se ajustaron parámetros como la litología, humedad del suelo e intensidad de las precipitaciones con el objetivo de adaptarlos a las condiciones específicas del área de estudio.

Es importante mencionar también, que la implementación de esta metodología ha sido amplia en América Central y en menor escala en América del Sur. A modo de ejemplos se puede mencionar países tales como Guatemala (Barillas, 2008), El Salvador (SNET 2004) y Nicaragua (INETER *et al.*, 2004). En Costa Rica se ha implementado exitosamente en el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos en diversas localidades, entre ellas la Península de Papagayo (Mora *et al.*, 2002), El Cacao de Atenas (Mora, 2004a), el cantón de San José (Mora, 2004b), Valle de Orosí (Salazar 2007) y en el corredor del poliducto entre Siquirres y Turrialba (Segura *et al.*, 2011). En Cuba, en la zona costera y cuencas hidrográficas de Sierra Maestra (Villalón-Poulu *et al.*, 2023). En América del Sur, en Colombia (López *et al.*, 2020; Ortiz Maestre *et al.*, 2022).

Barrantes *et al.*, (2011) en un estudio realizado en la microcuenca del río Sarapiquí (Costa Rica) corroboraron la coincidencia entre las zonas identificadas como de alta susceptibilidad y los deslizamientos ocurridos por el terremoto de Cinchona en 2009 el cual tuvo una magnitud MW = 6,2.

IV.1.1 Terminología Técnica:

Un aspecto importante que considerar en el desarrollo del trabajo de tesis es el significado de los términos utilizados en este capítulo. Las siguientes definiciones se describen principalmente con base en documentos tales como la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (EIRD), la Comisión Nacional de Actividades Especiales CONAE y el Departamento de Desarrollo Sostenible (DSS) de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (OEA) y el Proyecto Multinacional Andino Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA), desarrollado por los Servicios Geológicos de los países andinos, Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela, con la gerencia del Servicio Geológico de Canadá y el apoyo económico de la Agencia Canadiense para la

Cooperación Internacional (ACDI). Para mayores precisiones se puede consultar Calderón *et al.* (2010).

Susceptibilidad: mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre un determinado espacio geográfico. No implica el aspecto temporal del evento (Soldano, 2008). Vargas (2002) indica a la susceptibilidad como la predisposición natural o potencialidad que tiene un área para que se presenten fenómenos de remoción en masa bajo la influencia de agentes tales como altas precipitaciones, cortes naturales y/o artificiales y sismos.

Amenaza: evento físico, potencialmente perjudicial, fenómeno y/o actividad humana que puede causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental. Estos incluyen condiciones latentes que pueden derivar en futuras amenazas, los cuales pueden tener diferentes orígenes: natural (geológico, hidrometeorológico y biológico) o antrópico (degradación ambiental y amenazas tecnológicas). Las amenazas pueden ser individuales, combinadas o secuenciales en su origen y efectos. Cada una de ellas se caracteriza por su localización, magnitud o intensidad, frecuencia y probabilidad (ONU/EIRD, 2004). Varnes (1984) define el concepto de amenaza como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructivo dentro de un período de tiempo y en un lugar geográfico determinado.

Riesgo: probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro del ambiente) resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad. Convencionalmente el Riesgo es expresado por la fórmula: $\text{Riesgo} = \text{Amenazas} \times \text{Vulnerabilidad}$. Algunas disciplinas también incluyen el concepto de exposición para referirse principalmente a los aspectos físicos de la vulnerabilidad (ONU/EIRD, 2004).

Vulnerabilidad: condiciones determinadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de amenazas (ONU/EIRD, 2004).

Evaluación del Riesgo: metodología para determinar la naturaleza y el grado de riesgo a través del análisis de amenazas potenciales y evaluación de condiciones existentes de vulnerabilidad que pudieran representar una amenaza potencial o daño a la población, propiedades, medios de subsistencia y al ambiente del cual dependen. El

proceso de evaluación de riesgos se basa en una revisión tanto de las características técnicas de amenazas, a saber: su ubicación, magnitud o intensidad, frecuencia y probabilidad; así como el análisis de las dimensiones físicas, sociales, económicas y ambientales de la vulnerabilidad y exposición; con especial consideración a la capacidad de enfrentar los diferentes escenarios de riesgo (ONU/EIRD, 2004).

Mitigación: medidas estructurales y no-estructurales emprendidas para limitar el impacto adverso de las amenazas naturales y tecnológicas y de la degradación ambiental (ONU/EIRD, 2004).

Gestión de los Riesgos de Desastres: conjunto de decisiones administrativas, de organización y conocimientos operacionales desarrollados por sociedades y comunidades para implementar políticas, estrategias y fortalecer sus capacidades a fin de reducir el impacto de amenazas naturales y de desastres ambientales y tecnológicos consecuentes. Esto involucra todo tipo de actividades, incluyendo medidas estructurales y no-estructurales para evitar (prevención) o limitar (mitigación y preparación) los efectos adversos de los desastres (ONU/EIRD, 2004).

Deslizamientos: Sharpe (1938) lo definió como la caída perceptible o movimiento descendente de una masa relativamente seca de tierra, roca o ambas. Según Crozier (1986) un deslizamiento se define como el movimiento gravitacional hacia el exterior de la ladera y descendente de tierras o rocas sin la ayuda del agua como agente de transporte. De acuerdo con Cruden (1991) el término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad. Algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Crozier, 1991, Glade y Crozier, 2005).

IV.2 SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

La Susceptibilidad a deslizamientos (H), según la metodología empleada, es una característica que poseen las áreas tendientes a sufrir estos eventos. Representa el producto entre los factores condicionantes y desencadenantes o de disparo, según la siguiente ecuación:

$$H = FC \times FD$$

Ecuación 1

En donde:

H = Susceptibilidad a deslizamientos

FC = producto de Factores Condicionantes

FD = sumatoria de Factores Desencadenantes o de Disparo

Teniendo en cuenta que el factor FC se encuentra determinado por la interacción multiplicativa de los factores pendiente, litología y humedad del suelo y que el factor FD corresponde a la adición de los agentes de intensidad sísmica y precipitaciones extremas, se puede desarrollar la siguiente ecuación:

$$H = (Sr \times Sl \times Sh) \times (Ts + Tp)$$

Ecuación 2

En donde:

H = Susceptibilidad a deslizamientos

Sr = Pendiente o Relieve Relativo

Sl = Litología

Sh = Humedad del Suelo

Ts = Intensidad sísmica

Tp = Intensidad Precipitaciones Extremas

Factores Condicionantes

Factores Desencadenantes

IV.2.1 Caracterización de los Factores Condicionantes:

IV.2.1.1 Factor Pendiente o Relieve Relativo Sr:

Este parámetro se refiere al efecto que tiene la inclinación del terreno como agente condicionante en la susceptibilidad a deslizamientos. Se basa en el supuesto que, conforme se incrementa la pendiente, la probabilidad que ocurra un deslizamiento, también aumenta. Se evalúa utilizando un parámetro denominado relieve relativo (Rr) y se define como la máxima diferencia de elevación por kilómetro cuadrado, tal como expresa la siguiente ecuación:

$$Rr = (h_{\max} - h_{\min}) / km^2$$

Ecuación 3

En donde:

Rr = Relieve relativo

h_{max} = Elevación máxima en una cuadrícula

h_{min} = Elevación mínima en una cuadrícula

Mora (2004b), el Servicio Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador (SNET, 2004), Barillas (2008) y Segura *et al.* (2011), entre otros, para determinar el factor pendiente (Sr) han asociado el relieve relativo (m/km^2) a rangos de porcentaje de pendiente o grados de inclinación (Tabla IV.1). Esta modificación facilita la clasificación por categorías y lo expone de una forma más simple y clara.

Relieve Relativo (m/km^2)	Pendiente (%)	Inclinación (°)	Calificación	Factor Pendiente Sr
0 - 75	0,0 - 7,5	0,0 - 4,29	Muy Bajo	0
76 - 175	7,6 - 17,5	4,30 - 9,93	Bajo	1
176 - 300	17,6 - 30,0	9,94 - 16,70	Moderado	2
301 - 500	30,1 - 50,0	16,71 - 26,57	Medio	3
501 - 800	50,1 - 80,0	26,58 - 38,66	Alto	4
800 <	80,0 <	38,66 <	Muy Alto	5

Tabla IV.1: Relieve Relativo expresado en términos de porcentaje de pendiente y grados de inclinación y su valoración en el Factor Sr. Fuente: Mora (2004b), SNET (2004), Barillas (2008), Segura *et al.* (2011), Chaverri Molina (2016).

Un factor $Sr=0$ caracteriza a zonas de baja pendiente con procesos de encharcamiento, erosión, inundación y empantanamiento, mientras que por el extremo contrario un factor $Sr=5$ corresponde a pendientes abruptas con intensa erosión y probabilidades de caídas de rocas.

Como se indicó con anterioridad en el Capítulo II, para la elaboración del mapa de pendientes del área de estudio se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) de alta resolución obtenido del sensor Palsar (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar), el cual posee un espaciado de píxeles de 12.5 metros. A partir de este mapa de pendientes expresado en grados (°) se generó el mapa del Factor Pendiente o Relieve Relativo Sr que se muestra en la Figura IV.1.

Del análisis de este último mapa se desprende que del área total de la cuenca del río del Campo ($883 km^2$), el 17, 04% ($150,46 km^2$) corresponde a la categoría Muy Bajo, el 20,02% ($176,77 km^2$) a Bajo, el 18,65% ($164,68 km^2$) a Moderado, el 21,92% ($193,55 km^2$) a medio, el 16,61% ($146,67 km^2$) a Alto y finalmente el 5,76% ($50,87 km^2$) corresponde a la categoría Muy Alto.

Como puede apreciarse en el mapa, las categorías más altas corresponden a pendientes más pronunciadas, las cuales se localizan principalmente en la ladera oriental del extremo austral de los Nevados del Aconquija.

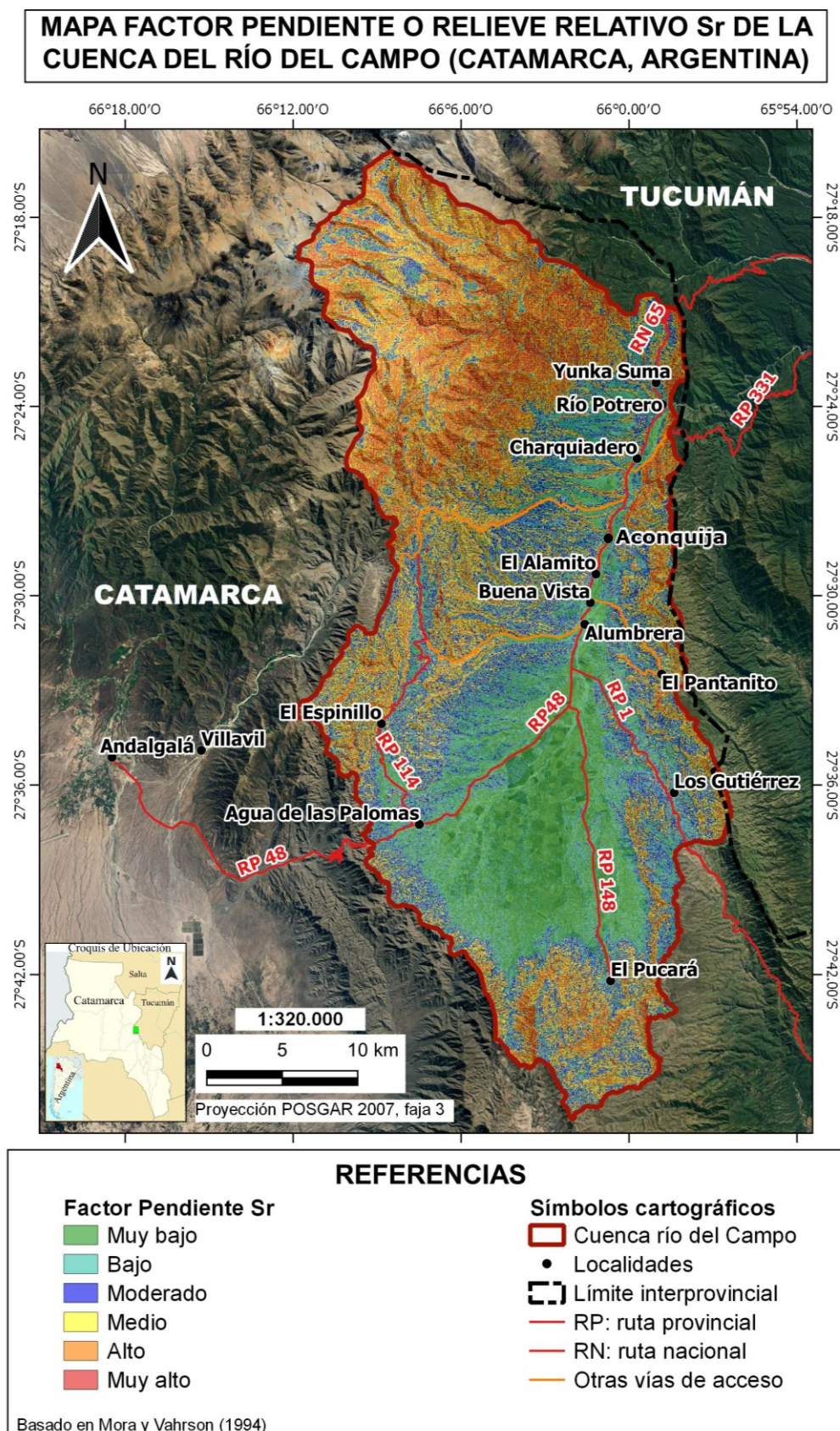


Figura IV.1: Mapa Factor Pendiente o Relieve Relativo (Sr) de la cuenca del río del Campo. Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

IV.2.1.2 Factor Litología Sl:

Este es probablemente el factor más importante y uno de los más complejos de evaluar. Idealmente, se debería utilizar información geotécnica detallada referida a la resistencia a la compresión simple de la roca y a la fracturación de esta, ya que son elementos de relevancia para evaluar este factor. Dado que la fracturación puede ocurrir en la mayoría de los tipos de roca y es una característica local, la resistencia de la roca será el factor más importante a escala global (Arnold *et al.*, 2006).

También son relevantes aspectos tales como textura, composición, grado de alteración, porosidad y permeabilidad. El factor (Sl) permite relacionar características geológicas con la incidencia de deslizamientos (Chaverri Molina, 2016).

En la Tabla IV.2 puede observarse la catalogación de diferentes litologías según su grado de susceptibilidad y valoración del factor Sl.

Litología	Características físico-mecánicas	Calificación	Valor Factor Sl
Aluviones gruesos permeables, compactos, nivel freático bajo. Calizas duras, permeables. Intrusivos poco fisurados, bajo nivel freático. Basaltos, andesitas, ignimbritas y similares, sanas permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo.	Rocas sanas muy poco meteorizadas. Resistencia al corte elevada. Fisuras sin rellenos	Bajo	1
Rocas sedimentarias poco alteradas, estratificación maciza, (decamétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, material lávico. Ignimbritas o metamorfitas medianamente fisuradas o alteradas, nivel freático a profundidades intermedias.	Resistencia al corte media a elevada. Fracturas cizallables	Moderado	2
Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, material lávico, ignimbritas, tobas poco soldadas o metamorfitas medianamente alteradas. Coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados, drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos	Resistencia al corte moderada a media. Fracturación importante	Medio	3
Aluviones fluvio-lacustres, material piroclástico poco compactado y sectores con alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente. Fracturas con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.	Resistencia al corte moderada a baja	Alto	4
Materiales aluviales, coluviales y regolitos de muy baja calidad mecánica. Material loésico. Materiales con estados de alteración avanzados y drenaje pobre. Se incluyen las categorías 3 y 4 con niveles freáticos someros sometidos a gradientes hidrodinámicos muy elevados	Resistencia al corte muy baja. Materiales blandos con muchos finos	Muy Alto	5

Tabla IV.2: Clasificación de diferentes litologías y factor Sl. Fuente: Mora y Vahrson, 1994.

Para la determinación del factor Litología SI se tomó como referencia el mapa geológico de la cuenca del río del Campo (Figura III.1, Capítulo III). En la Tabla IV.3 se indican las litologías, características físico-mecánicas, calificación y valoración del factor SI. Además, la Figura IV. 2, muestra el mapa del Factor Litología SI del área de estudio. Es relevante destacar que se incluyó el material loésico a la tabla antes indicada, el cual no estaba contemplado originalmente.

Litología	Características Físico-Mecánicas	Calificación	Valor Factor SI
Monzogranitos porfíricos	Media a elevada resistencia al corte	Moderado	2
Gneises, esquistos, migmatitas	Moderada a media resistencia al corte	Medio	3
Areniscas tobáceas, areniscas conglomeráticas, arcosas. Ortoconglomerados polimícticos.	Moderada a baja resistencia al corte	Alto	4
Material loésico, arenas y gravas de cauces y terrazas	Baja resistencia al corte	Muy Alto	5

Tabla IV.3: Litologías, características físico-mecánicas generales, calificación y valoración del factor SI en la cuenca del río del Campo. Basado en Mora y Vahrson (1994).

En términos litológicos, se encuentran cuerpos graníticos (Batolito Capillitas), a los que se les asignó una valoración de 2, correspondiente a una calificación de Moderado y con características físico-mecánicas congruentes con una resistencia al corte de media a elevada.

A los esquistos, gneises y migmatitas del basamento de edad Neoproterozoico – Cámbrico inferior se les asignó una valoración de 3, calificación Medio y con características físico-mecánicas acordes con una resistencia al corte moderada a media y con fracturación importante.

A las litologías de las secuencias neógenas correspondientes a la Formación Aconquija y a los ortoconglomerados clastoportantes polimícticos cuaternarios, característicos de pie de monte, se le asignó una valoración de 4, calificación Alto y con características físico-mecánicas congruentes con resistencia al corte moderada a baja.

El material loésico aflorante en el área de estudio se les asignó un grado de susceptibilidad Muy Alto, motivado en las características friables del material, ligado a su baja resistencia. Su caracterización dentro del Índice de Campo para la determinación de resistencia a la compresión simple corresponde a un material muy débil (R1) con una resistencia uniaxial comprendida entre 1-5 MPa (ver Capítulo V, Tabla V.2).

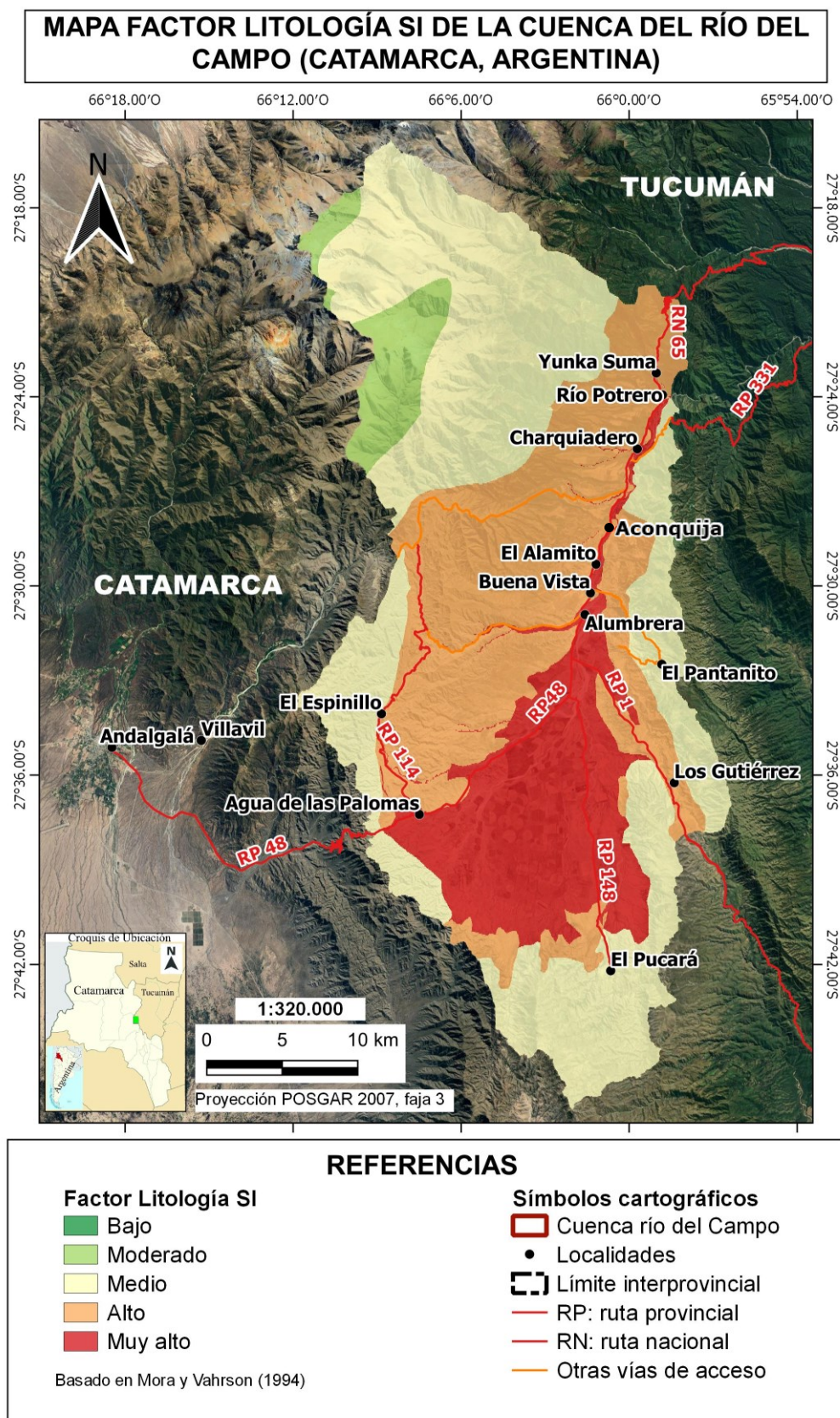


Figura IV.2: Mapa Factor Litología (SI) de la cuenca del río del Campo. Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

También se le asignó valoración 5 (calificación Muy Alto) con características físico-mecánicas acordes con una baja resistencia al corte, a los sedimentos fluviales (arenas y gravas) de cauces y terrazas de edad holocena.

IV.2.1.3 Factor Humedad del Suelo Sh

Este factor cuantifica la influencia de la humedad acumulada en el suelo en la incidencia de deslizamientos. La metodología óptima para determinar el contenido de humedad del suelo es por medio de un muestreo en el área, seguido del cálculo del balance hídrico (Chaverri Molina, 2016). Sin embargo, no siempre se tendrá disponibilidad de los medios y recursos para realizar estas determinaciones de campo, por lo que se puede estimar el contenido de humedad a partir de los datos de precipitación media mensual restando la evapotranspiración potencial promedio (Mora y Vahrson 1994).

Para la determinación del factor Sh en la cuenca del río del Campo se efectuó una modificación a la metodología original de Mora y Vahrson (1994) en lo referente a la categorización de los valores de precipitaciones promedios mensuales. En este caso en particular, se consideró como valor promedio de evapotranspiración potencial 50 mm/mes (Tabla IV.4) esto en función de la información obtenida de mapas de evapotranspiración mensual pertenecientes al “Atlas climático digital de la República Argentina” (Bianchi y Cravero, 2010). Fuente de consulta de los mapas en: http://geoportal.idesa.gob.ar/search/?keywords_slug_in=evapotranspiracion&limit=100&offset=0

Precipitación media mensual (mm/mes)	Valor Asignado
< 50	0
50 - 100	1
> 100	2

Tabla IV.4: Categorización de los valores de precipitación promedio mensual.

Al considerarse una evapotranspiración potencial promedio de 50 mm/mes, los valores de precipitación mensual inferiores a este valor, no reflejan un aumento en la humedad del terreno. Las precipitaciones superiores a 50 mm sí producen un incremento en la humedad del suelo, pudiendo su intensidad lograr la saturación del suelo (precipitaciones mayores a 100 mm).

De acuerdo con la información obtenida de la Tabla IV.4, se asigna un valor a cada mes del año, de tal forma que la sumatoria resultará en valores que oscilan entre 0 y 24. En la Tabla IV.5 se muestran los valores asociados a los distintos rangos de este índice.

Específicamente el factor Sh se obtuvo a partir de los mapas de precipitaciones mensuales de la adenda del Atlas Climático Digital de la República Argentina (Cravero *et al.*, 2017) a los cuales se categorizó teniendo en cuenta la Tabla IV.4. Con ello, se obtuvieron 12 mapas clasificados (correspondientes a cada mes del año). Posteriormente estos 12 mapas clasificados se sumaron algebraicamente para generar el mapa de Factor humedad del suelo sh mediante la clasificación indicada en la Tabla IV.5.

En la Figura IV. 3, se muestra el mapa del Factor Humedad del suelo Sh del área de estudio. En esta imagen puede observarse que la categoría Muy bajo se localiza en el sector NNO de la cuenca del río del Campo y ocupa una superficie de 13,95 km² (1,58% de la superficie total), la categoría Bajo representa una superficie de 719,38 km² (81,47%) y finalmente la categoría Medio una superficie de 149,67 km² (16,95%).

Valor Acumulado Índice Precipitación	Calificación	Factor Sh
0 - 4	Muy Bajo	1
5 - 9	Bajo	2
10 - 14	Medio	3
15 - 19	Alto	4
20 - 24	Muy Alto	5

Tabla IV.5: Factor humedad del suelo (Sh), resultante de la clasificación de los valores promedios de precipitación mensual acumulada, según Tabla IV.4. Fuente: Mora y Vahrson (1994).

IV.2.2 Descripción de Indicadores Desencadenantes o de Disparo

IV.2.2.1 Factor Intensidad Sísmica Ts:

La cuenca del río del Campo se encuentra en una región tectónicamente activa con magnitudes sísmicas de M= 6-7 relacionadas a la actividad de fallas inversas, con vergencia O y E y con orientaciones predominantes N-S (Alvarado y Ramos, 2010).

Para la determinación del factor Ts se utilizó el Mapa Global de Amenaza Sísmica para un período de retorno de 475 años (Shedlock *et al.*, 2000) realizado en el marco del GSHAP (*Global Seismic Hazard Assessment Program*) en base a lo recomendado en *Natural Disaster Hotspots Case Studies* (Arnold *et al.*, 2006).

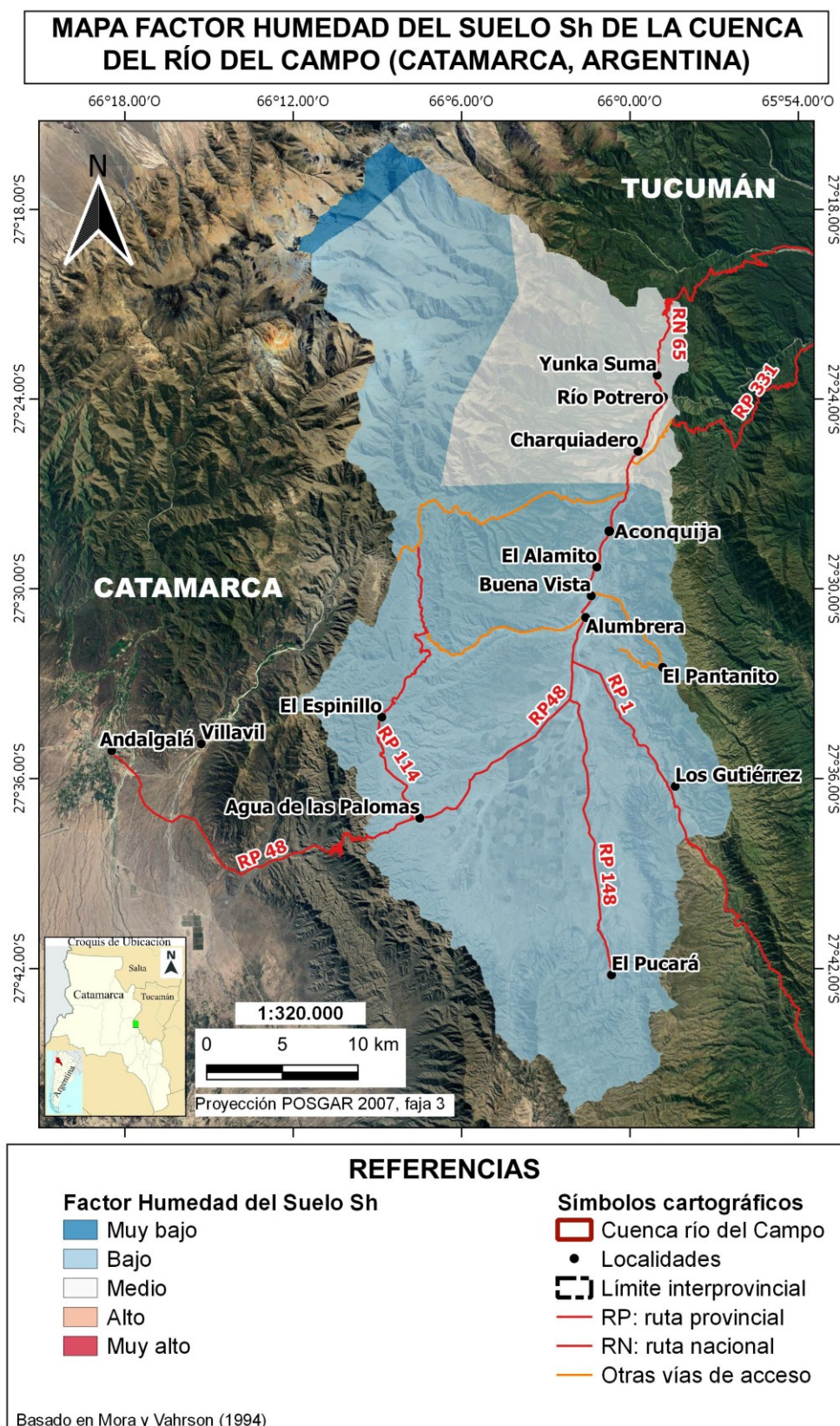


Figura IV.3: Mapa Factor Humedad del suelo (Sh) de la cuenca del río del Campo. Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

El GSHAP, Programa Global de Evaluación de Amenaza Sísmica, se diseñó para contribuir a la mitigación global de la amenaza, sirviendo como recurso para cualquier organismo nacional o regional que desee realizar estudios de diferente detalle. Se lanzó en 1992, en el Programa Internacional de la Litosfera (ILP, *International Lithosphere Program*) con el apoyo del Consejo Internacional de Uniones Científicas (CIUC, *International Council of Scientific Unions*) en el marco del Decenio Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres Naturales (UN/IDNDR, *United Nations International Decade for Natural Disaster Reduction*). El objetivo principal del programa era crear un mapa global de amenaza sísmica de forma armonizada y coordinada regionalmente, basado en métodos avanzados de evaluación probabilística de amenaza sísmica (PSHA, *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*). Esta evaluación probabilística se compone de cuatro elementos básicos: catálogo de terremotos, caracterización de la fuente del terremoto, movimiento sísmico intenso del suelo y cálculo de la amenaza sísmica. Los datos del GSHAP, con valores de aceleración máxima de terreno PGA (*Peak Ground Acceleration*) con un período de retorno de 475 años se distribuyen en 10 clases como se muestra en la Tabla IV.6.

PGA 475 (m/s ²)	Calificación	Factor Ts
0.00 – 0.50	Leve	1
0.51 – 1.00	Muy Bajo	2
1.01 – 1.50	Bajo	3
1.51 – 2.00	Moderado	4
2.01 – 2.50	Medio	5
2.51 – 3.00	Elevado	6
3.01 – 3.50	Fuerte	7
3.51 – 4.00	Bastante Fuerte	8
4.01 – 4.50	Muy Fuerte	9
> 4.50	Extremadamente Fuerte	10

Tabla IV.6: Valoraciones factor Ts con rangos de valores del PGA475 (Arnold *et al.*, 2006).

Para el caso particular de la cuenca del río del Campo, el valor del PGA475 determinado del Mapa Global de Amenaza Sísmica (Figura IV.4) se encuentra comprendido entre 1.6 m/s² y 2.4 m/s². Esta determinación es concordante con la obtenida del mapa de Peligrosidad Sísmica de Argentina del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) publicado en noviembre de 2022 (Figura IV.5). En este mapa el valor aproximado del PGA475 para el área de estudio es de 2.45 m/s². Por tales motivos el valor del factor Ts utilizado en este trabajo fue de 5 (Calificación Medio).

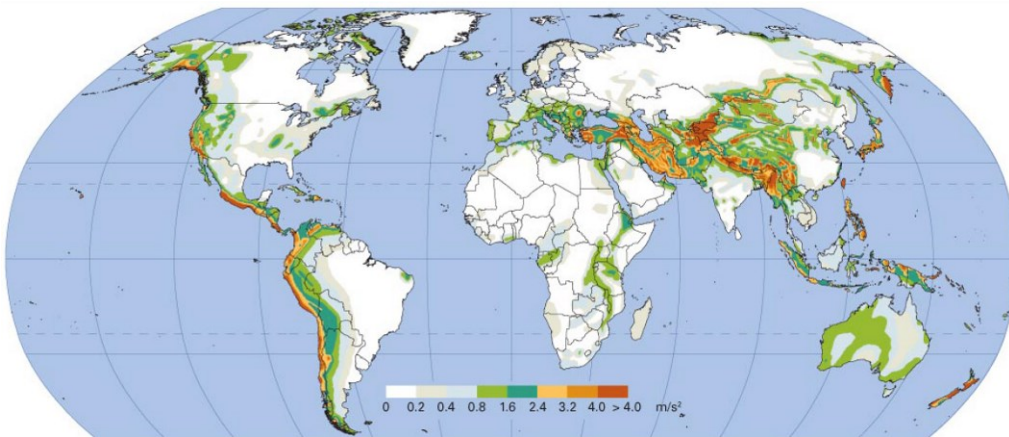


Figura IV.4: Mapa Global de Amenaza Sísmica del programa GSHAP. Indicación del PGA con un período de retorno de 475 años. Fuente: Shedlock *et al.*, (2000).

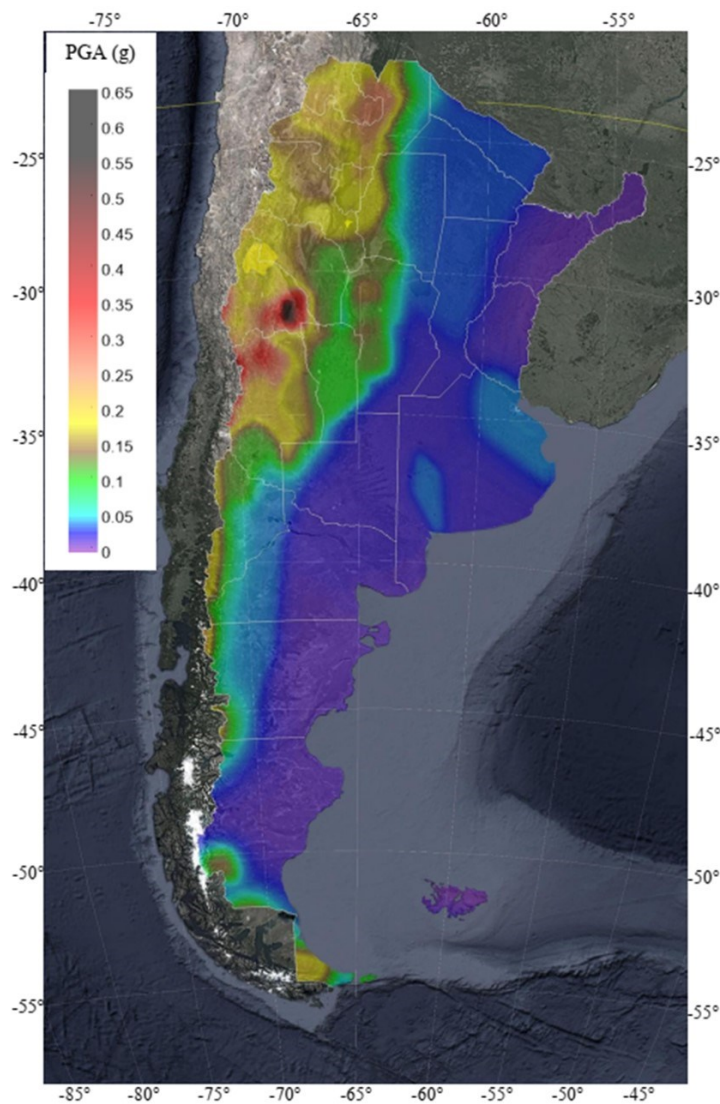


Figura IV.5: Mapa de Peligrosidad Sísmica (PGA) para la República Argentina, considerando un periodo de exposición de 50 años y 10% de probabilidad de excedencia. Periodo de retorno de 475 años. Fuente: Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES).
http://contenidos.inpres.gob.ar/actualizacion_mapa

IV.2.2.2 Factor Intensidad de Precipitaciones Extremas Tp:

Para la determinación de la precipitación máxima en 24 hs para un período de retorno de 100 años en la cuenca del río del Campo se utilizaron los mapas en línea de lluvias máximas diarias con recurrencia asociada y valor límite estimado para la República Argentina (<https://sgainacirsa.ddns.net/cirsa/mapas/pmpd.shtml>).

Estos mapas constituyen excelentes instrumentos para ser utilizados entre otras cosas, para el diseño hidrológico de medidas estructurales y no estructurales requeridas para mitigar el riesgo hídrico y para analizar la severidad de eventos pluviométricos extremos en una gran porción del territorio continental argentino. Esta herramienta ha sido desarrollada conjuntamente por la Subgerencia del Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua (INACIRSA) y de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, con la participación de múltiples instituciones nacionales, provinciales y municipales, así como particulares y empresas que suministraron registros históricos de precipitación en distintos puntos del territorio nacional. En la realización de estos mapas se utilizaron registros de 1.552 estaciones pluviométricas del territorio nacional, incluyendo algunas estaciones de países vecinos, con extensiones de registro que abarcaron entre los 10 y 105 años.

A fin de ajustar los resultados al área de estudio se realizaron consultas a responsables técnicos del proyecto. Se indicó que por encima de los 3.000 m s.n.m. las determinaciones regionales no son precisas, recomendándose verificar con datos locales. En la Tabla IV.7 se indican las valoraciones del factor Tp adoptada para la cuenca del río del Campo, elaborada en base a antecedentes regionales de deslizamientos (Fernández, 2009). Para el área de estudio se determinaron valores de precipitaciones máximas en 24 hs con un período de retorno de 100 años que variaron entre 115 mm y 172 mm, por lo que la valoración del factor Tp corresponde a 5 (Calificación Muy Alto).

Lluvia máxima 24 hs en mm (período retorno 100 años)	Calificación	Factor Tp
< 25	Muy Bajo	1
25 - 50	Bajo	2
51 - 100	Medio	3
101 - 150	Alto	4
> 150	Muy Alto	5

Tabla IV.7: Valoración del parámetro de precipitaciones máximas en 24 hs con un período de retorno de 100 años, adaptada a las características intrínsecas de la cuenca del río del Campo.

Las determinaciones de precipitaciones máximas en 24 hs con un período de retorno de 100 años obtenidas del mapa en línea de lluvias máximas diarias con recurrencia asociada y valor límite estimado para la República Argentina fueron congruentes con las obtenidas por Guillen (2014) en un estudio de diseño hidrológico e hidráulico. En la Figura IV.6 se observa el mapa de lluvias máximas diarias con un periodo de retorno de 100 años de este último autor, donde la cuenca del río del Campo exhibe precipitaciones máximas de valores entre 154 mm y 164 mm.

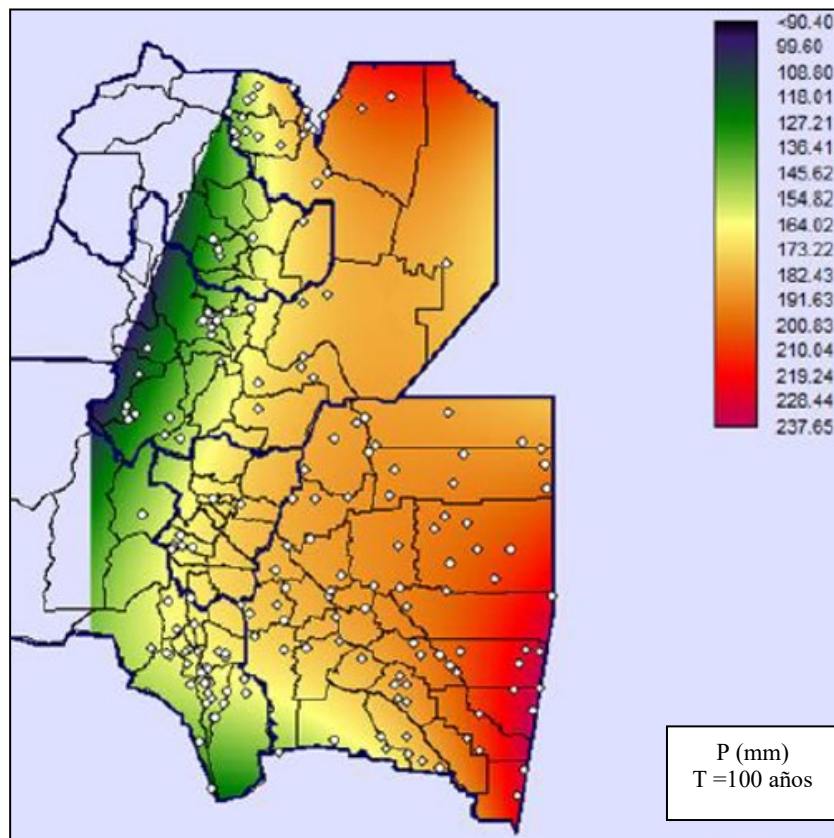


Figura IV.6: Mapa tendencial de lámina máxima diaria con un periodo de retorno de 100 años. Tomado de Guillen (2014).

IV.2.3 Susceptibilidad a Deslizamientos

El cálculo del índice de Susceptibilidad a deslizamientos del método de Mora y Vahrson (1994) se realizó a partir de la aplicación de la Ecuación 2 (página 55) en donde interactúan los factores condicionantes y factores desencadenantes.

$$H = (Sr \times Sl \times Sh) \times (Ts + Tp)$$

El valor resultante de esta operación algebraica se interpreta según la Tabla IV.8 la cual se encuentra basada en Mora (2004a) y Mora y Vahrson (1994).

Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos	Clasificación	Susceptibilidad a Deslizamiento
0 - 6	I	Muy Baja
7 - 32	II	Baja
33 - 512	III	Media
513 - 1250	IV	Alta
> 1250	V	Muy Alta

Tabla IV.8: Clasificación del índice de Susceptibilidad a deslizamientos (H). Modificado de Mora (2004a) y Mora y Vahrson (1994).

Mora (2004a) efectúa una clasificación donde a cada nivel de susceptibilidad a deslizamientos se asocian una serie de medidas correctivas o prohibitivas sumadas a indicaciones de realización de estudios específicos. Estas acciones pretenden adecuar los diferentes usos del suelo tales como urbanización, instalación de infraestructura, etc., a los diferentes escenarios que presenta este tipo de proceso de remoción en masa. Los aspectos mencionados pueden observarse en la Tabla IV.9.

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos de la cuenca del río del Campo se muestra en la Figura IV.7. La aplicación de la metodología de Mora y Vahrson (1994) permitió determinar que, en la cuenca del río del Campo, la cual posee una superficie de 883 km², el 43.86 % de su superficie (387.28 km²) corresponde a una susceptibilidad a deslizamientos Alta, el 38.92 % (343.66 km²) a una susceptibilidad Media, un 0.14 % (1.33 km²) a una susceptibilidad Baja y el 17.07 % (150.73 km²) a una susceptibilidad Muy baja. Las regiones más susceptibles a deslizamientos en el área de estudio se encuentran en la vertiente oriental de las estribaciones más australes de los Nevados del Aconquija y bordeando por el Este y Oeste la ubicación del proyectado embalse y presa de Potrero del Clavillo. La zonificación obtenida de la aplicación de esta metodología permitió identificar áreas prioritarias (susceptibilidades: media y alta) tendientes a lograr implementar acciones conducentes a un ordenamiento territorial, prevención de desastres, manejo y gestión de riesgo.

Clasificación	Susceptibilidad a Deslizamiento	Características
I	Muy Baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de media a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de media a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Media	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta ($< 50\%$) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios de estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy Alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta ($> 50\%$) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección.

Tabla IV.9: Clasificación de la susceptibilidad a deslizamientos según Mora (2004a).

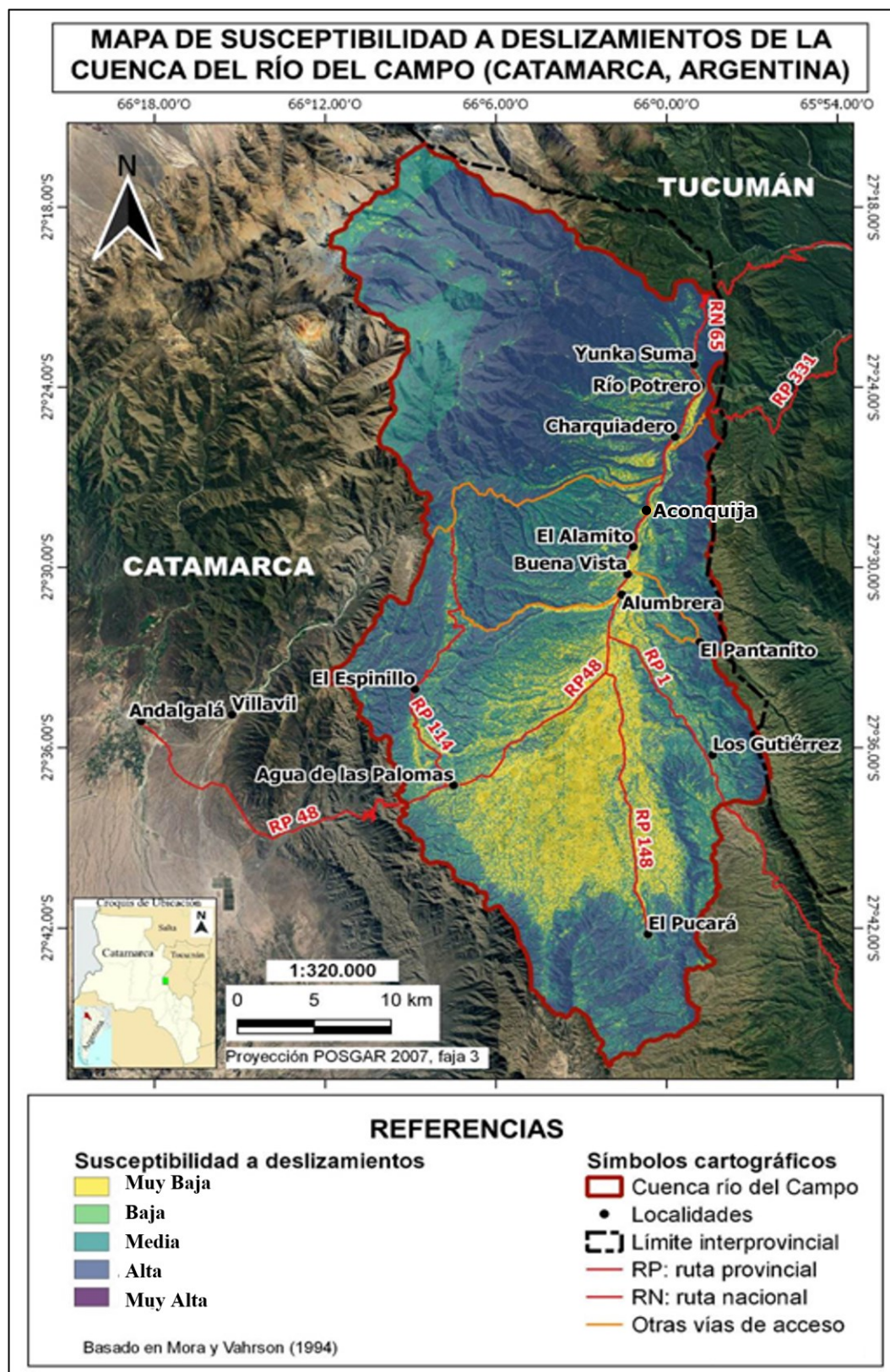


Figura IV.7: Mapa de Susceptibilidad a deslizamientos de la cuenca del río del Campo. Base planimétrica: imágenes del Google Earth Pro (junio 2024).

En la Figura IV.8 puede observarse un diagrama de flujo esquemático, indicativo del modelo cartográfico utilizado en el desarrollo de este trabajo de tesis. En el mismo puede apreciarse cómo la integración cartográfica de los diferentes factores condicionantes junto con los factores desencadenantes conduce a la obtención del mapa de susceptibilidad a deslizamientos, el cual constituye una herramienta más al ordenamiento territorial y a la toma de decisiones preventivas ante potenciales desastres.

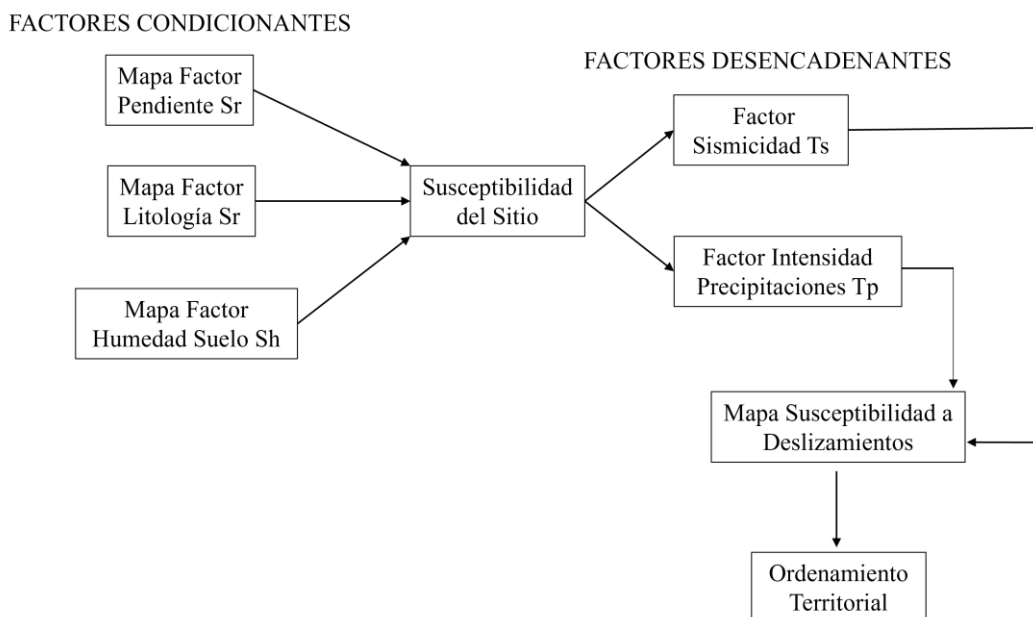


Figura IV.8: Diagrama de flujo del proceso cartográfico utilizado en el trabajo para la obtención del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

IV.3 Validación del Mapa de Susceptibilidad a deslizamientos

A partir del análisis de los antecedentes referidos a áreas en donde se identificaron deslizamientos en el área de estudio, se corrobora una muy buena correlación entre estos sectores y los resultados obtenidos en el mapa de susceptibilidad de deslizamientos.

Los mapas geomorfológicos elaborados por diferentes autores (Niepagen, 1981; Vergel, 1981 y Grimaldi, 1997) identifican y delimitan cicatrices o nichos de deslizamientos que coinciden con las áreas de mayor susceptibilidad a deslizamientos.

Se destaca también la correlación positiva de los resultados obtenidos con los eventos sucedidos en el sector occidental de la localidad de El Lindero ($27^{\circ}27'44.35''S$ y $66^{\circ}0'41.58''O$). En diciembre de 2023 aconteció un deslizamiento que afectó a varios hogares y a los servicios de energía y agua potable. Ante la necesidad de brindar

protección a la población, se llevó a cabo un trabajo conjunto entre la gobernación de la provincia de Catamarca, la intendencia de Aconquija, Vialidad Provincial y los Ministerios de Infraestructura y Obras Públicas y Seguridad de Catamarca. Se procedió a la evacuación de 12 familias afectadas y se iniciaron tareas de mitigación ambiental. De la consulta de artículos periodísticos se obtuvo un registro del sector afectado por el deslizamiento, así como las tareas proyectadas para mitigar esta situación (Foto IV.1) y el estado del área a mayo de 2025 (Foto IV.2).



Foto IV.1: Se observa la magnitud del deslizamiento ocurrido en diciembre de 2023 y las obras proyectadas a realizar por los organismos provinciales y municipales con objeto de estabilizar el deslizamiento en el área de El Lindero. Fuente: <https://www.elancasti.com.ar/informacion-general/realizan-obras-contencion-y-prevencion-el-lugar-del-derrumbe-aconquija-n542303>

Información sobre este evento también se consultó en <https://www.elancasti.com.ar/politica-y-economia/evaluaran-la-reubicacion-viviendas-riesgo-derrumbe-el-lindero-n571240> y <https://www.primerafuente.com.ar/noticias/113891/catamarca-se-derrumbo-parte-cerro-estancias>

Otros ejemplos de correlación positiva entre el mapa de susceptibilidad de deslizamientos lo constituyen los grandes deslizamientos que ocurrieron en inmediaciones del proyectado dique de Potrero del Clavillo. Uno de los más importantes se localiza en la margen izquierda del río Chacras, en cercanías de su unión con el río Potrero y el río del Campo. El material deslizado se halla constituido por bloques del basamento metamórfico que pueden llegar a alcanzar un volumen de 1 m³, ocupa una extensa área que se observa claramente en imágenes satelitales. La Foto IV.3 registra esta situación a mayo de 2025.



Foto IV.2: Situación a mayo de 2025 de la zona de la Foto IV.1. Se advierten procesos de revegetación en la cabecera del deslizamiento que contribuyen a su provisoria estabilización.

Evidencia de un deslizamiento de mayor volumen, también compuesto por bloques del basamento, se observa en la margen derecha del río del Campo, en la zona de las cumbres de Suncho y cerca de su confluencia con los ríos Potrero y Chacras. Este deslizamiento, cuya magnitud se observa en la Foto IV.4, coincide con la zona de mayor susceptibilidad de deslizamientos determinado con la metodología aplicada.



Foto IV.3: Foto de mayo de 2025 del depósito coluvial, de gran volumen, con bloques de basamento producto del deslizamiento ubicado en margen izquierda del río Chacras.



Foto IV.4: A: Depósito coluvial producto del deslizamiento ubicado en margen derecha del río del Campo, en la zona de cumbres de Suncho. Mayo de 2025.

En la Figura IV.9, en una imagen satelital de Google Earth Pro de junio de 2024, se indican los dos deslizamientos descritos en las Fotos IV.3 (A) y IV.4 (B).

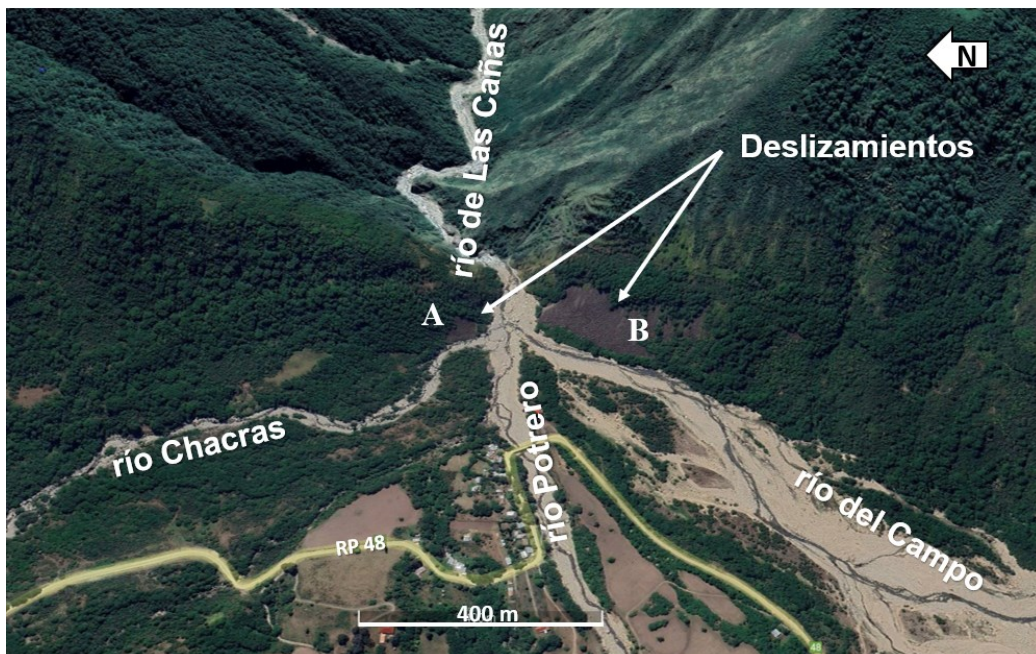


Figura IV.9: Imagen del Google Earth Pro (2024) con indicación de deslizamientos observados en Fotos IV.3 y IV.4.

IV.4 Limitaciones y Fortalezas de la Metodología

Diversos trabajos científicos dan cuenta de diferentes limitaciones de la metodología de zonificación de susceptibilidad a deslizamientos. Entre otros se destacan las apreciaciones formuladas por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2004), Barrantes *et al.* (2011), Chaverri Molina (2016), Quesada Román y Feoli Boraschi (2018), López *et al.* (2020).

Las limitaciones identificadas se relacionan principalmente a los siguientes aspectos:

- Carácter semi-cuantitativo de la metodología.
- Subjetividad inherente a la asignación de valoraciones: si bien la metodología contempla el uso de fórmulas matemáticas, la asignación de las valoraciones de algunos parámetros se basa en el juicio y experiencia de la persona que lo aplica. Esto introduce un grado de subjetividad que puede llevar a variaciones en los resultados obtenidos según la persona que lo esté aplicando.
- La metodología zonifica la susceptibilidad y no es determinativa de la peligrosidad o amenaza.
- Naturaleza simplificada del método que no abarca todas las complejidades de los procesos de inestabilidad de laderas: los deslizamientos son fenómenos complejos que involucran interacciones no lineales entre múltiples factores (geología, hidrología, geomorfología, sismología, actividad humana, etc.). Esta metodología simplifica estas interacciones a un modelo multiplicativo y aditivo de unos pocos factores clave. Al respecto no se consideran factores locales que pueden ser relevantes tales como la presencia de fallas activas, orientación de discontinuidades e influencia de la vegetación, entre las principales.
- El uso del suelo y la intervención antrópica no se ponderan en el modelado de la zonificación: no se consideran las modificaciones del terreno por la actividad humana tales como cortes, rellenos, drenajes por urbanización, deforestación o cambios del uso del suelo.

Entre los aspectos positivos, se señala que la metodología de Mora y Vahrson (1994) es una herramienta excelente para una evaluación inicial y rápida de la susceptibilidad a deslizamientos a escala regional. Sus resultados son útiles para la planificación del uso del suelo, a nivel general o para identificar áreas prioritarias destinadas a estudios más detallados.

La zonificación de susceptibilidad a deslizamientos constituye, finalmente, una valiosa herramienta en la planificación ambiental y toma de decisiones, pero no en el diseño de obras, ya que para esto se requieren estudios más específicos y de mayor detalle. Puede utilizarse, sin embargo, para un reconocimiento previo de las áreas con posibles incidencias de deslizamientos, no pudiendo sustituir de ninguna manera los estudios geotécnicos específicos de campo.

CAPITULO V

CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO Y ANÁLISIS CINEMÁTICO DE TALUDES

V.1 ESTUDIOS GEOMECAMICOS

Los estudios geomecánicos son importantes en los proyectos hidráulicos ya que permiten identificar y cuantificar las propiedades de un macizo rocoso y las características de las principales familias de discontinuidades (orientación, espaciamiento, persistencia, apertura, rugosidad, alteración, etc.).

Actualmente existen diversos sistemas de clasificación de macizos rocosos los que se orientan a estimar sus propiedades a gran escala. Estos sistemas de clasificación geomecánica son un intento de representar con un solo valor las propiedades de resistencia de un macizo rocoso, el cual normalmente es anisótropo y puede ser analizado por más de un sistema de clasificación.

Es importante poner de relevancia que las clasificaciones geomecánicas cuantifican las características de un macizo rocoso en base a descripciones geológicas cualitativas. Si bien estas surgieron para la estimación de sostenimiento de túneles, posteriormente se utilizaron para evaluar las propiedades de un macizo rocoso para la realización de otras obras ingenieriles (Guía Técnica para la Gestión de los Riesgos Mineros Causados por Fallas Geomecánicas, 2023; Guía de Criterios Geomecánicos para Diseño, Construcción, Supervisión y Cierre de Labores Subterráneas, 2017).

Las clasificaciones geomecánicas constituyen una aproximación empírica con las cuales se debe ser cuidadoso ya que los resultados obtenidos son estimaciones lo que conlleva a limitaciones. Estas limitaciones han sido abordadas con detalle por Brady and Brown (1993), Hoek *et al.*, (1995), Palmström and Broch (2006) y Bieniawski (2011).

En el área de emplazamiento del cierre del dique de Potrero del Clavillo se efectuó una caracterización geomecánica del macizo rocoso con el objetivo de evaluar su calidad. Se analizó, además, la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos planares, en cuña o vuelcos mediante un software específico, particularmente en el sector de anclaje de los estribos.

Para la caracterización del macizo rocoso en el área de cierre de la presa de Potrero del Clavillo se utilizó el sistema de Valoración del Macizo Rocos, también

conocido como clasificación geomecánica RMR (*Rock Mass Rating*) desarrollado por Bieniawski en 1973 y actualizada en 1976, 1989 y 1993.

El estudio de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos se efectuó mediante el uso del programa DIPS, que permitió identificar zonas críticas en donde son factibles deslizamientos planares, en cuña y por vuelco.

Las determinaciones de los parámetros necesarios para la realización de la clasificación del macizo rocoso y las mediciones efectuadas para determinar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos se realizaron aproximadamente a una distancia de entre 150 y 50 metros al SO del cierre proyectado de la presa tanto en la margen izquierda como derecha de la quebrada del río de Las Cañas.

Además, se realizaron determinaciones en inmediaciones del Túnel 5, localizado en la ladera de la margen izquierda del río de Las Cañas (Fotos V.1, A, B y C). El túnel 5, uno de los doce túneles realizados por las consultoras C.A.P.R.I. y Edison de Milán en las décadas del 50'y 60' del siglo pasado, tiene un rumbo general de N 345° y una longitud aproximada de 25 metros. Las coordenadas geográficas de ingreso al mismo son 27° 23' 59.8" Lat. S y 65° 58' 30.2" Long. O.



Fotos V.1: Sectores donde se realizaron las clasificaciones de macizos rocosos utilizando el método RMR y análisis cinemáticos de taludes mediante el uso del programa DIPS. **A:** margen izquierda de la quebrada del río de Las Cañas (año 2021) **B:** margen derecha del río de Las Cañas (año 2021) y **C:** entrada al Túnel 5 (año 2014).

V.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA POTRERO DEL CLAVILLO

La obra de cierre proyectada se realizaría, principalmente, en migmatitas ubicadas en proximidades a la naciente de la quebrada del río Las Cañas. En la Figura V.1 se muestra la ubicación aproximada de la presa de Potrero del Clavillo, con indicación del embalse a cota 1.420 m s.n.m.

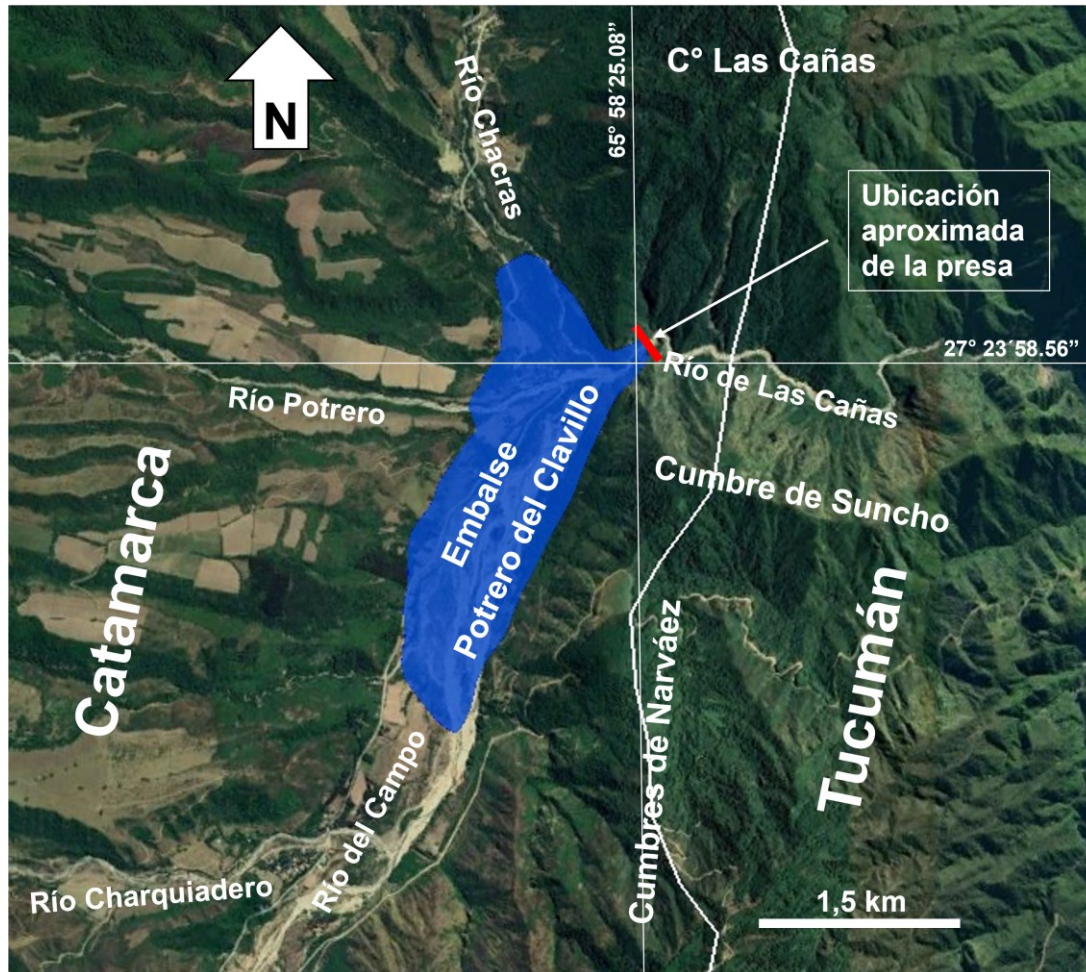


Figura V.1: Ubicación aproximada de la presa y embalse de Potrero del Clavillo. El embalse se encuentra representado a cota 1420 m s.n.m. Base planimétrica: imagen del Google Earth Pro, noviembre de 2023.

Las características de esta obra pueden consultarse en el anexo III de la Ley Nacional 27451/2018, Parque Nacional Aconquija, cesión de jurisdicción al Estado Nacional, referido al “Complejo Hídrico Multipropósito de los ríos Las Cañas-Gastona-Medina”. En este anexo se indica que la presa sería de hormigón de gravedad, de planta curva, de radio constante ($r=190.0$ m) con una longitud de 276,30 m en su coronamiento. Se construiría de Hormigón Convencional Vibrado (HCV) con una cota de coronamiento de 1.429,35 m s.n.m. El perfil transversal de la obra presentaría un

paramento agua arriba de diseño vertical, mientras que aguas abajo se lo realizaría con una pendiente de 0.75H:1V. En el perfil central la presa alcanzaría una altura de 95,85 m. La obra contaría con un vertedero libre de perfil guiado tipo WES de 7 vanos, sin compuertas, el cual se ubicaría en los bloques centrales ocupando aproximadamente la mitad de la longitud del coronamiento.

Los niveles y alturas principales de la presa serían los siguientes:

- a. Nivel de Coronamiento: 1.429,35 m s.n.m.
- b. Nivel de Embalse Máximo Extraordinario (NEME) (Q_{CMP}): 1.428,83 m s.n.m.
- c. Nivel Máximo Embalse de Diseño ($Q_{5000 \text{ años}}$): 1.427,55 m s.n.m.
- d. Nivel Cresta Vertedora / Nivel Embalse Máximo Normal (NEMN): 1.420,00 m s.n.m.
- e. Nivel Mínimo Operacional de las Turbinas: 1.390,00 m s.n.m.
- f. Nivel Mínimo Minimorum: 1.370,00 m s.n.m.
- g. Nivel Fondo de Cauce: 1.340,00 m s.n.m.
- h. Nivel Mínimo de Fundación: 1.335,20 m s.n.m.
- i. Altura Máxima de Presa (desde cota de Fundación): 94,15 m.
- j. Borde Libre (Revancha respecto del Máximo Extraordinario): 0,52 m.
- k. Capacidad del vertedero: 5.360 m³/s
- l. Volumen total del embalse: 75,42 hm³
- m. Superficie del lago: 200 ha

Por sobre el nivel del coronamiento, agua arriba, la presa dispondrá de un muro de hormigón armado que se elevaría 1,2 m por sobre el nivel de coronamiento, alcanzando de esta manera la cota 1.430,55 m s.n.m. Con ello, la obra contaría con una revancha total frente a los efectos de viento y oleajes sobre el embalse de 1,72 m. respecto del Nivel de Embalse Máximo Extraordinario (Q_{CMP}), 3 m respecto del nivel Máximo Embalse de Diseño ($Q_{5000 \text{ años}}$) y 10,55 m respecto del Nivel Cresta Vertedora / Nivel Embalse Máximo Normal. En la Figura V.2 se observa un perfil tipo de la presa de Potrero del Clavillo.

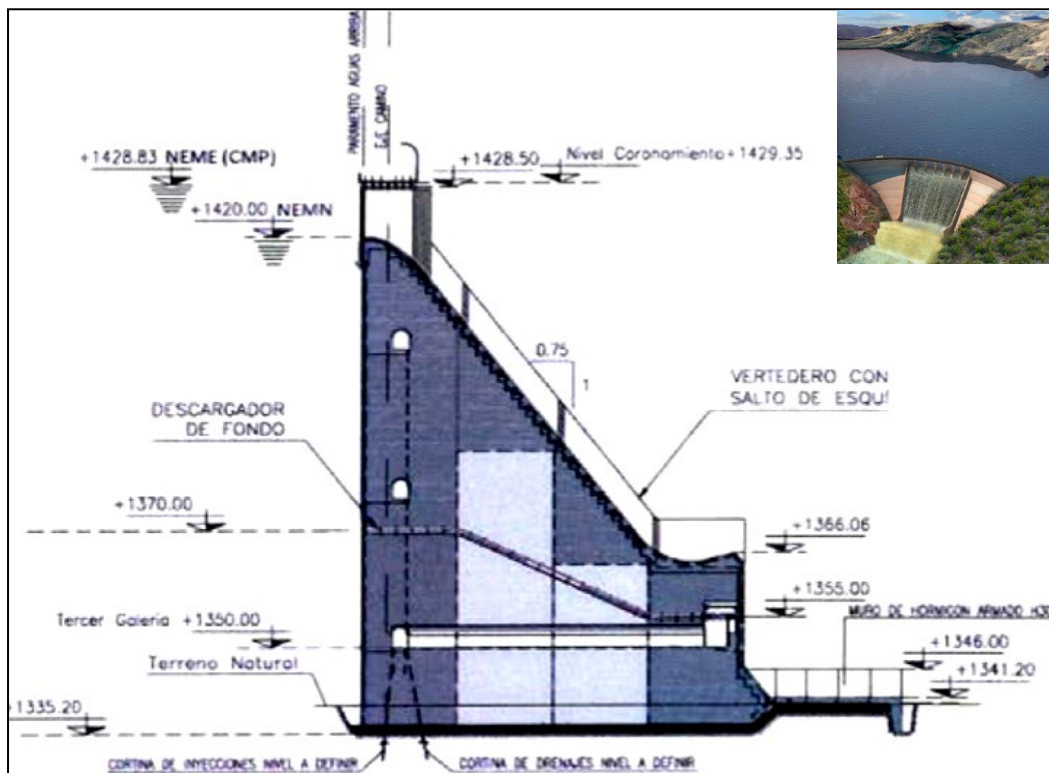


Figura V.2: Perfil tipo y representación de la presa de hormigón de Potrero del Clavillo.
Fuente: Anexo III, Ley 27451/18.

V.3 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR DE BIENIAWSKI

El sistema RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1973) es uno de los sistemas de clasificación geomecánica más utilizado en el mundo. Este sistema clasifica a los macizos rocosos de 0 a 100 puntos, correspondiendo el 0 a una roca muy mala y 100 a una muy buena. Las versiones más utilizadas son el RMR₇₆ y el RMR₈₉ los cuales incorporan la valoración de diferentes parámetros. Cada parámetro se califica con un valor numérico y la suma de las puntuaciones permite obtener el índice RMR. Los parámetros considerados para obtener el RMR básico son los siguientes:

1. Resistencia de la roca intacta: referida a la resistencia a la compresión simple de la roca intacta (valor máximo posible alcanzar 15).
2. RQD (*Rock Quality Designation*) (valor máximo posible alcanzar 20).
3. Espaciamiento de discontinuidades: se refiere al distanciamiento promedio entre las discontinuidades presentes en el macizo rocoso (valor máximo posible alcanzar 20).
4. Condiciones de las discontinuidades: se evalúa la longitud, abertura, rugosidad, relleno, alteración de las discontinuidades (valor máximo posible alcanzar 30).

5. Presencia de agua: considera características hidrogeológicas incluyendo filtraciones y presión de agua (valor máximo posible alcanzar 15).

A cada uno de los parámetros indicados se le asigna, según tablas, un valor y se suman todos ellos para obtener el índice de calidad RMR básico. El puntaje del RMR básico viene definido por la ecuación:

$$\text{RMR} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

El índice determina cinco clases de macizo rocoso (Tabla V.1), que varían desde roca muy buena (RMR: 81 - 100) a roca muy mala (RMR: 0 - 20).

Descripción	RMR Básico	Clase de Macizo Rocosó
Roca Muy Buena	81 - 100	I
Roca Buena	61 - 80	II
Rocas Regular	41 - 60	III
Roca Mala	21 - 40	IV
Roca Muy Mala	0 - 20	V

Tabla V.1: Clases de macizos rocosos y rangos de valores del RMR básico. Fuente: Bieniawski (1989).

V.3.1 Estimación de la Resistencia a la Compresión Simple (UCS – *Unconfined Compressive Strength*):

La estimación de la resistencia a la compresión simple de rocas inalteradas se efectuó mediante dos índices: a) “Índice de Campo para la Determinación de la Resistencia a la Compresión Simple” y b) “Índice Esclerométrico”. Con ambas técnicas se obtuvieron rangos de valores de resistencia similares.

V.3.1.1 Índice de Campo para la Determinación de la Resistencia a la Compresión Simple

Esta técnica permite estimar la resistencia a la compresión simple a partir de índices de campo mediante el uso de piqueta geológica y navaja. En la Tabla V.2 se indican las diferentes clases de este índice y una aproximación al rango de resistencia a la compresión simple en MPa (Guía Técnica para la Gestión de los Riesgos Mineros Causados por Fallas Geomecánicas, 2023; Guía de Criterios Geomecánicos para Diseño, Construcción, Supervisión y Cierre de Labores Subterráneas, 2017).

Categoría	Clasificación	Resistencia Uniaxial (MPa)	Índice Carga puntual (MPa)	Estimación en terreno de la resistencia
R0	Extremadamente débil	0,25 - 1	X	La roca puede ser rayada con la uña del pulgar
R1	Muy débil	1 - 5	X	La roca se desmenuza al golpearla con la punta del martillo geológico. Con una navaja se talla fácilmente
R2	Débil	5 - 25	X	Se talla con dificultad con una navaja. Con la punta del martillo geológico se producen pequeñas marcas
R3	Moderadamente resistente	25 - 50	1 - 2	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un fuerte golpe del martillo geológico.
R4	Resistente	50 - 100	2 - 4	Se requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturar la roca
R5	Muy resistente	100 - 250	4 - 10	Se requieren varios golpes con el martillo geológico para fracturar la roca
R6	Extremadamente resistente	>250	>10	Al golpear la roca con el martillo geológico solo saltan esquirlas

Tabla V.2: Índices de Campo para la determinación de la resistencia a la compresión simple. X: para rocas con resistencia uniaxial inferior a 25 Mpa los resultados del ensayo de carga puntual son poco confiables. Fuente: Guía Técnica para la Gestión de los Riegos Mineros Causados por Fallas Geomecánicas (2023).

Las determinaciones realizadas mediante estos índices en ambos márgenes del río de Las Cañas y en inmediaciones del Túnel 5, sectores en los cuales las litologías dominante son principalmente migmatitas y gneises, corresponden a rocas de categoría comprendida entre R4 y R5.

V.3.1.2 Índice Esclerométrico:

Mediante el uso del esclerómetro o martillo de Schmidt se obtuvo un valor objetivo de la resistencia a la compresión simple a partir del valor de rebote del martillo. Esta técnica constituye un ensayo que permite determinar de forma aproximada, rápida y fácil la resistencia a la compresión de la roca intacta a través de una correlación simple. El valor de rebote representativo de la roca, denominado Índice Esclerométrico o Rebotes (R) se correlaciona de forma lineal, a través de los ábacos de Deere y Miller (1966), con la resistencia a la compresión simple en función del peso unitario y la inclinación del martillo. Esta técnica proporciona una estimación a la compresión simple para un rango comprendido entre 20 y 150 MPa.

Para la determinación del índice esclerométrico en el área de cierre de la presa de Potrero del Clavillo se efectuaron determinaciones en inmediaciones del Túnel 5 y márgenes izquierda y derecha del río de Las Cañas. Los valores de rebote se

concentraron en torno a 44,92. El peso unitario determinado para estas rocas fue de 27 KN/m³. La resistencia obtenida fue de aproximadamente 120 MPa con una dispersión de ± 45 MPa (Figura V.3).

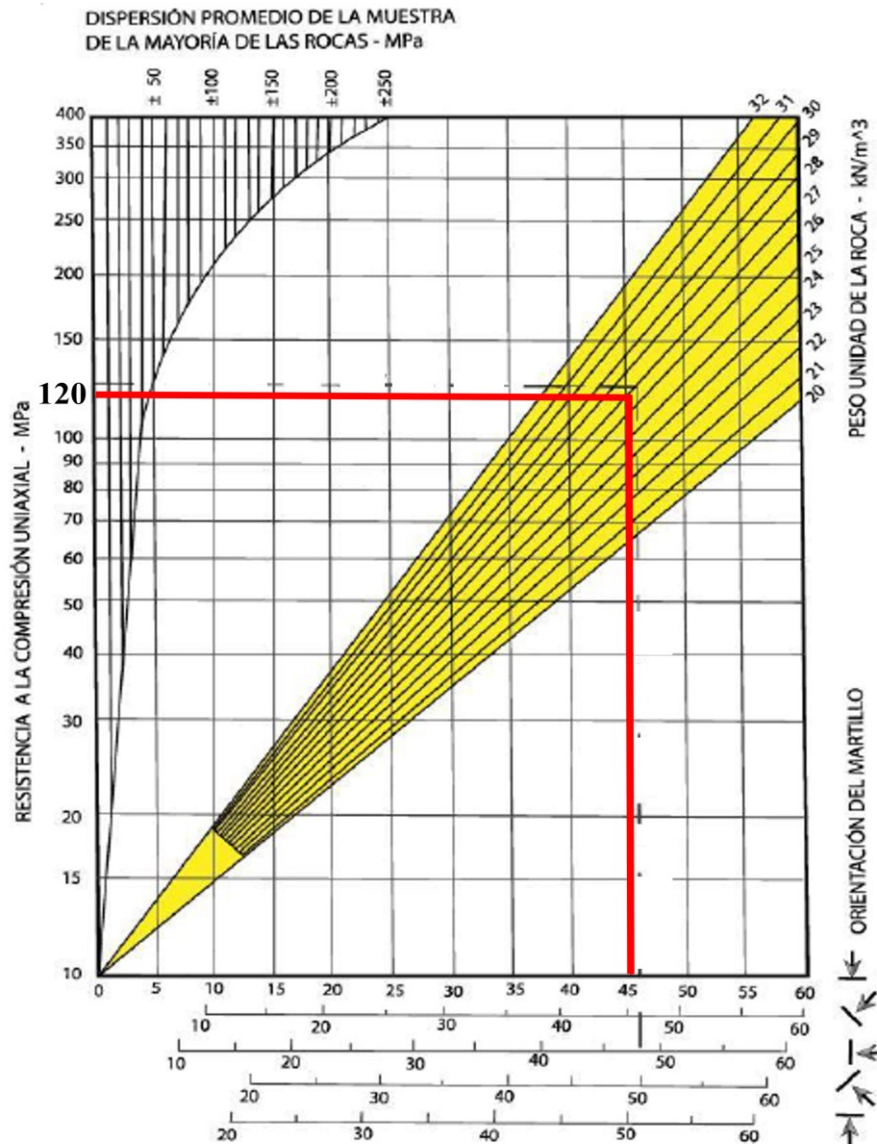


Figura V.3: Ábaco utilizado para la estimación de la resistencia a la compresión simple mediante esclerómetro (martillo Tipo L) en migmatitas y gneises aflorantes en inmediaciones del cierre proyectado de la presa de Potrero del Clavillo. Fuente: Deere y Miller (1966).

Las valoraciones del parámetro Resistencia a la Compresión Simple en el cálculo del RMR básico (Bieniawski, 1989), se estima de manera conservadora, en un valor de 7 tanto para las inmediaciones al Túnel 5 como para las rocas de los márgenes izquierda y derecha del río de Las Cañas (ver valoraciones en la Figura V.4).

V.3.2 Índice de Fracturamiento de Roca (RQD - *Rock Quality Designation*)

El índice de fracturamiento de una roca conocido como RQD (Deere y Miller 1967 y Deere, 1989) es uno de los sistemas más empleados para caracterizar la competencia de un macizo rocoso. Este índice (Tabla V.3) asigna un porcentaje de calificación que varía entre 100% (el más competente) a 0% (el menos competente).

RQD (%)	Calidad de la roca	Valoración
< 25	Muy Pobre	3
25 - 50	Pobre	8
50 - 75	Regular	13
75 - 90	Buena	17
90 - 100	Excelente	20

Tabla V.3: Calidad de la roca según RQD (Deere y Miller, 1967; Deere, 1989) con indicación de su valoración en el cálculo del RMR según Bieniawski (1989).

Este método, originalmente desarrollado para perforaciones diamantinas, se basa en medir la frecuencia del número de fracturas naturales presentes en el macizo rocoso, en la dirección que se mide. Si la frecuencia de fracturas aumenta, la valoración del RQD disminuye.

El valor del RQD es la relación expresada como un porcentaje de la suma de todas las partes de longitudes mayores o iguales a 10 cm dividido por la longitud total de la corrida de perforación.

En consecuencia, el RQD se determina de la siguiente manera:

$$\text{RQD (\%)} = \frac{\sum \text{Longitud de fragmentos} \geq 10\text{cm}}{\text{Longitud corrida perforada}} * 100$$

El RQD permite efectuar una estimación rápida y preliminar de las condiciones del macizo rocoso, la cual deberá complementarse, de ser necesario, con otro método más específico. Asimismo, el RQD tiene limitaciones referidas principalmente a no tener en cuenta la resistencia al corte de las discontinuidades (Guía Técnica para la Gestión de los Riesgos Mineros Causados por fallas Geomecánicas, 2023; Guía de Criterios Geomecánicos para Diseño, Construcción, Supervisión y Cierre de Labores Subterráneas, 2017).

Existen métodos alternativos de determinación del Índice de Calidad de Roca, entre ellos puede mencionarse calcular el RQD a partir del mapeo de discontinuidades

en las paredes del macizo rocoso. Esto consiste en emular el cálculo convencional del RQD en testigos, pero aplicándolo a lo largo de una línea de detalle o una regla colocada contra la pared del macizo y utilizando la fórmula arriba indicada (*Management of Rockfall Risks in Underground Metalliferous Mines*, 2003). En las fotos V.2 A, B y C se observan las determinaciones del RQD, con la metodología antes mencionada, en inmediaciones del Túnel 5 y en las fotos V.3 A, B y C en el río de Las Cañas en cercanías de la zona de cierre.



Fotos V.2: Determinación, con la ayuda de una cinta métrica, de las discontinuidades en tres direcciones (A, B, C) para la apreciación del RQD en las paredes del macizo rocoso aflorante en la entrada del Túnel 5. Fotos: mayo de 2025.



Fotos V.3: Determinación, con la ayuda de una cinta métrica, de discontinuidades en tres direcciones (A, B, C) para la apreciación del RQD en migmatitas del río de Las Cañas aflorantes en las inmediaciones del área de cierre. Fotos: mayo de 2025.

Como una alternativa al RQD, la frecuencia lineal de discontinuidades también es un índice para estimar la intensidad de discontinuidades en un macizo rocoso. Se calcula simplemente agregando el número de discontinuidades naturales por metro de muestreo (testigo de perforación diamantina o línea de detalle en una cara de roca). Villaescusa (1992) confeccionó una tabla (Tabla V.4), la cual relaciona las condiciones del macizo rocoso esperadas con el RQD y la frecuencia lineal de discontinuidades.

Calidad de la roca	Frecuencia lineal	RQD (%)
Muy Pobre	>17	0 – 20
Pobre	12 – 17	20 – 40
Regular	7 - 12	40 – 60
Buena	4 - 7	60 – 80
Muy Buena	1.5 - 4	80 – 95
Excelente	< 1.5	95 – 100

Tabla V.4: Relación entre RQD y frecuencia lineal (Villaescusa, 1992).

Las determinaciones del RQD realizadas en el área de emplazamiento de la presa indican calidad regular para las rocas en inmediaciones del Túnel 5 (68.8%) y calidad excelente para las rocas tanto de la margen izquierda (98.5%) como de la margen derecha (95.7%) del río de Las Cañas. Las valoraciones de este parámetro en el cálculo del RMR (Bieniawski, 1989) corresponden a 13 en cercanía a la entrada del Túnel 5 y a 20 tanto en la margen izquierda como derecha del río de Las Cañas.

V.3.3 Espaciamiento de las Discontinuidades

Este aspecto se refiere a la distancia media entre los planos de discontinuidades de cada familia presentes en el macizo rocoso. En la Tabla V.5 puede observarse las diferentes valoraciones para este parámetro.

Espaciado entre discontinuidades	> 2m	2 - 0,6 m	600 - 200 mm	200 - 60 mm	< 60 mm
Valoración	20	15	10	8	5

Tabla V.5: Valoraciones del espaciamiento de las discontinuidades en un macizo rocoso (Bieniawski, 1989).

Las valoraciones de este parámetro en el cálculo del RMR básico (Bieniawski, 1989) corresponden a 10 en inmediaciones al Túnel 5 y a 15 tanto en la margen izquierda como derecha del río de Las Cañas.

V.3.4 Condiciones de las Discontinuidades

La estabilidad de los taludes es a menudo significativamente influenciada por el arreglo de las discontinuidades, debido a que ellas se comportan como planos de debilidad tal que aún en las rocas más fuertes, la ruptura tiende a ocurrir preferentemente a lo largo de estas superficies. Debido a este hecho, es fundamental determinar las características de las discontinuidades, tales como persistencia, rugosidad, abertura, relleno e intemperismo (Guía Técnica para la Gestión de los Riesgos Mineros Causados por fallas geomecánicas, 2023; Guía de Criterios Geomecánicos para Diseño, Construcción, Supervisión y Cierre de Labores Subterráneas, 2017). En la Tabla V.6 se indican las valoraciones de diferentes condiciones de las discontinuidades.

Guías para la Clasificación según las Condiciones de las Discontinuidades					
Longitud (persistencia)	< 1m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Puntaje	6	4	2	1	0
Separación (abertura)	Ninguna	< 0,1mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Puntaje	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	ligeramente rugosa	Lisa	Superficies pulidas
Puntaje	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Duro < 5 mm	Duro > 5mm	Blando < 5mm	Blando > 5mm
Puntaje	6	4	2	2	0
Meteorización	Inalterada	Ligeramente meteorizada	Moderadamente meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta
Puntaje	6	5	3	1	0

Tabla V.6: Valoraciones de las condiciones de las discontinuidades en el macizo rocoso (Bieniawski, 1989).

Las valoraciones de este parámetro en el cálculo del RMR básico (Bieniawski, 1989) corresponde a 17 tanto para las inmediaciones al Túnel 5 como para las rocas de las márgenes izquierda y derecha del río de Las Cañas.

V.3.5 Condiciones de Humedad del Macizo Rocoso

La existencia de agua en el macizo rocoso es producida principalmente por el flujo de agua a través de las discontinuidades (conductividad hidráulica secundaria). Por tanto, este contenido debe ser registrado debido a su efecto adverso en la estabilidad de los taludes (tensión normal efectiva). La valoración del contenido de agua en condiciones generales puede observarse en la Tabla V.7.

Estado macizo rocoso	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Flujo de agua
Valoración	15	10	7	4	0

Tabla V.7: Valoraciones de la presencia de agua en el macizo rocoso producida principalmente por el flujo de agua a través de discontinuidades. (Bieniawski 1989).

Las valoraciones de este parámetro en el cálculo del RMR básico (Bieniawski, 1989) corresponde a 7 tanto para las inmediaciones al Túnel 5 como para las rocas de los márgenes izquierdo y derecho del río Las Cañas.

V.3.6 Determinación del RMR Básico (Bieniawski, 1989)

Como se indicó con anterioridad el puntaje del RMR básico viene definido por la ecuación:

$$\text{RMR} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

En el caso particular del área de emplazamiento del cierre de la presa de Potrero del Clavillo los valores de RMR básico responden a un macizo rocoso Clase III (roca regular) en inmediaciones del Túnel 5 y a un macizo rocoso Clase II (roca buena) tanto en la margen izquierda como derecha del río de Las Cañas. En la Tabla V.8 se muestran las valoraciones de los diferentes parámetros utilizados en cálculo del RMR básico.

Parámetros	Inmediaciones Túnel 5	Margen izquierda río de Las Cañas	Margen derecha río de Las Cañas
Resistencia de la roca intacta	7	7	7
RQD	13	20	20
Espaciamiento Discontinuidades	10	15	15
Condiciones Discontinuidades	17	17	17
Humedad Macizo Rocoso	7	7	7
RMR básico	54	66	66
Clase Macizo Rocoso	III	II	II
Descripción	Roca Regular	Roca Buena	Roca Buena

Tabla V.8: Valoraciones de los diferentes parámetros utilizados en el cálculo del RMR básico (Bieniawski, 1989) para el área de emplazamiento de la presa de Potrero del Clavillo.

En la Figura V.4 se muestra el modelo de planilla utilizado para la clasificación geomécanica RMR según Bieniawski (1989). Para el cálculo del RMR básico solo son necesarias las valoraciones de los cinco primeros parámetros.

A. PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN CON SUS VALORES									
Parámetros			Rango de Valores						
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de Resistencia de Carga Puntual (I _g)	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Para estos rangos es recomendable ensayos de resistencia a la compresión uniaxial		
		Resistencia a la compresión uniaxial	>250 MPa R ₆	100 - 250 MPa R ₅	50 - 100 MPa R ₄	25 - 50 MPa R ₃	5 - 25 MPa R ₂	1 - 5 MPa R ₁	<1 MPa R ₀
	Puntaje		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Puntaje		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Puntaje		20	15	10	8	5		
4	Condición de las discontinuidades (ver Fig. 1)		Superficies muy rugosas, sin continuidad, sin separación, paredes de rocas sin alteración.	Superficies rugosas, con separación < 1 mm. Paredes de roca ligeramente meteorizadas.	Superficies ligeramente rugosas, con separación < 1 mm. Paredes altamente meteorizadas.	Superficies pulidas o relleno < 5 mm de espesor o separación < 5 mm. Continuas.	Relleno blando > 5 mm de espesor. Separación > 5 mm. Continuas.		
	Puntaje		30	25	20	10	0		
5	Agua Subterránea	Flujo por cada 10 m de longitud del túnel (l/min).	Ninguno	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Presión de agua en la diacl.)/(Tensión principal mayor σ_1).	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condiciones Generales	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
	Puntaje		15	10	7	4	0		
B. AJUSTE LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES									
Orientaciones del rumbo y buzamiento			Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable		
Puntaje	Túneles y Minas		0	-2	-5	-10	-12		
	Cimentaciones		0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60		
C. TIPOS DE MACIZOS ROCOSOS DETERMINADOS A PARTIR DE LA VALUACIÓN TOTAL									
Puntaje			100 ± 81	80 ± 61	60 ± 41	40 ± 21	< 21		
Tipos de Roca			I	II	III	IV	V		
Descripción			Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala		
D. SIGNIFICADO DE LOS TIPOS DE ROCA									
Tipo de Roca			I	II	III	IV	V		
Tiempo medio de sostén			20 años, claro de 15 m.	1 año, claro de 10 m.	1 semana, claro de 5 m.	10 horas, claro de 2,5 m.	30 min, claro de 1 m.		
Cohesión del macizo rocoso (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Ángulo de fricción del macizo rocoso (°)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUÍAS PARA LA CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES									
Longitud (Persistencia)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Puntaje			6	4	2	1	0		
Separación (apertura)			Ninguna	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Puntaje			6	5	4	1	0		
Rugosidad			Muy rugosa	Rugosa	ligeramente Rugosa	Lisa	Superficies pulidas		
Puntaje			6	5	3	1	0		
Relleno			Ninguno	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Blando < 5 mm	Blando > 5 mm		
Puntaje			6	4	2	2	0		
Meteorización			Inalterada	Ligeramente meteorizada	Moderadamente meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta		
Puntaje			6	5	3	1	0		
F. EFECTO DE LA ORIENTACIÓN DEL RUMBO Y BUZAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES EN LOS TÚNELES									
Rumbo perpendicular al eje del túnel					Rumbo paralelo al eje del túnel				
Avance en el sentido del buzamiento - Buz. 45 - 90°			Avance en el sentido del buzamiento - Buz. 20 - 45°			Buzamiento 45 - 90°		Buzamiento 20 - 45°	
Muy favorable			Favorable			Muy favorable		Regular	
Avance contra el sentido del buzamiento - Buz. 45 - 90°			Avance contra el sentido del buzamiento - Buz. 20 - 45°			Buzamiento 0 - 20° independiente del rumbo			
Regular			Desfavorable			Regular			

Figura V.4: Planilla modelo utilizada para el cálculo del RMR básico según Bieniawski (1989) para rocas del área de emplazamiento de la presa Potrero del Clavillo. Fuente: Guía Técnica para la Gestión de los Riesgos Mineros causados por Fallas Geomecánicas (2023).

V.3.7 Ventajas y Limitaciones del RMR

En la Guía de Criterios Geomecánicos para Diseño, Construcción, Supervisión y Cierre de Labores Subterráneos (2017) y Guía Técnica para la Gestión de los Riesgos Mineros Causados por Fallas Geomecánicas (2023), se expresan las ventajas y limitaciones del sistema RMR de Bieniawski.

Las ventajas sobre otros métodos se encuentran principalmente en su simplicidad, versatilidad y facilidad de aplicación ya que se basa en parámetros de campo relativamente sencillos de obtener. Además, puede ser utilizado para estimar parámetros geotécnicos del macizo rocoso como ser módulo de deformación, cohesión, ángulo de fricción como también para diseñar sostenimiento de túneles y taludes.

Entre las limitaciones se citan la subjetividad en la evaluación de los parámetros, situación que puede originar variabilidad en el valor del índice. Una limitación importante es la de no considerar el estado tensional del macizo rocoso, lo cual es importante en zonas tectónicamente activas. Otro aspecto limitante ocurre en la evaluación de macizos rocosos muy fracturados, en donde el RMR puede no representar adecuadamente la calidad del macizo rocoso.

V.4 ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS

El análisis de cinemática de estabilidad de taludes en el área de emplazamiento del proyecto dique de Potrero del Clavillo se efectuó con el programa DIPS para la identificación de zonas críticas, factibles de producir deslizamientos planares, en cuña y por vuelco. Para tal fin se determinó la orientación de las discontinuidades principales, la orientación del talud, el ángulo de fricción y los límites laterales. El programa agiliza el trazado, análisis y representación de datos estructurales utilizando técnicas de proyección estereográfica. En la Figura V.5 se observan los diferentes tipos de roturas en macizos rocosos (deslizamientos planares, en cuña y vuelco o *toppling*) y sus correspondientes representaciones estereográficas (Hoek and Bray, 1981).

Los deslizamientos planares ocurren cuando las discontinuidades buzan en forma paralela hacia la cara del talud, siendo este buzamiento mucho mayor que el ángulo de fricción interna (este último ángulo representa la resistencia al corte del material). Además, el ángulo de buzamiento de las discontinuidades debe ser menor que el ángulo de la pendiente del talud.

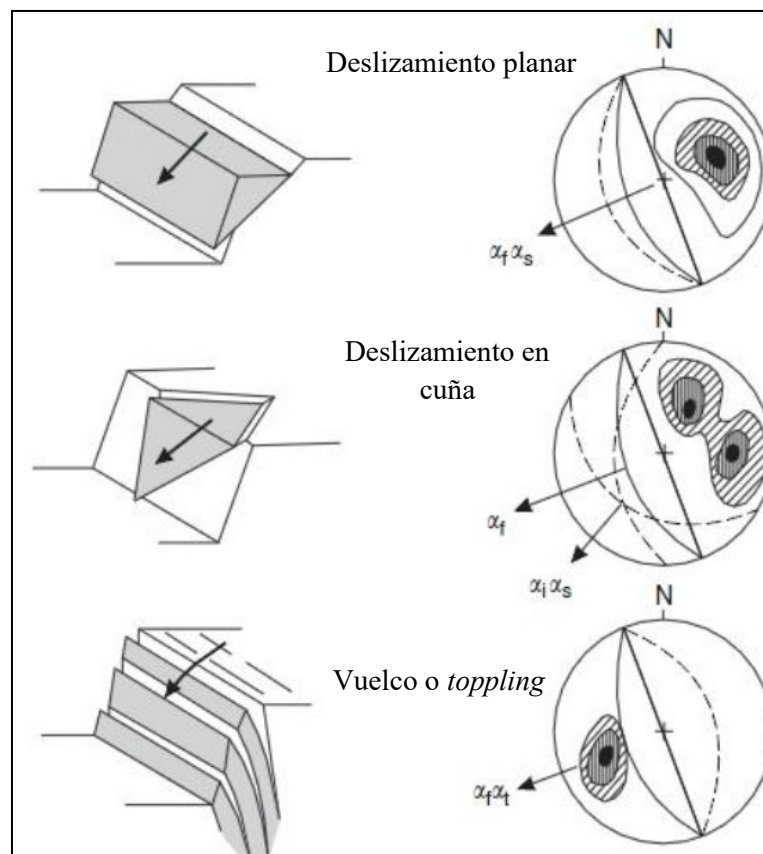


Figura V.5: Diferentes mecanismos de ruptura en taludes rocosos y sus respectivas representaciones estereográficas. Fuente: Hoek and Bray (1981).

Los deslizamientos en cuña, por otro lado, ocurren cuando un bloque de roca se desliza a través de la intersección de al menos dos direcciones de discontinuidades que se interceptan originando una cuña. La línea de intersección de estos planos debe inclinar hacia afuera de la pendiente, con un ángulo menor que la pendiente general y mayor que el ángulo de fricción interna.

En el vuelco o *toppling* el deslizamiento ocurre cuando bloques rocosos alargados, definidos por discontinuidades verticales o subverticales, giran hacia fuera de la masa rocosa alrededor de un punto o eje de pivote ubicado en la base. El ángulo de buzamiento de las discontinuidades debe ser aproximadamente paralelo a la cara del talud o incluso inclinado ligeramente hacia adentro del macizo rocoso.

V.4.1 Relevamiento Estructural

El relevamiento estructural y posterior análisis de la información obtenida mediante la utilización del programa DIPS en inmediaciones del Túnel 5 y en las márgenes izquierda y derecha de la naciente del río de Las Cañas, permitió determinar

la presencia de 4 juegos o familias de discontinuidades principales. La Inclinación / Dirección de Inclinación promedio de estos juegos de discontinuidades son; J1: 55°/N 56°; J2: 77°/N 176°; J3: 61°/N 258° y J4: 79°/N 312°. En la Figura V.6 puede observarse un diagrama de roseta construido con datos estructurales relevados en el área, mientras que en la Figura V.7 se representan los 4 juegos de discontinuidades principales identificadas

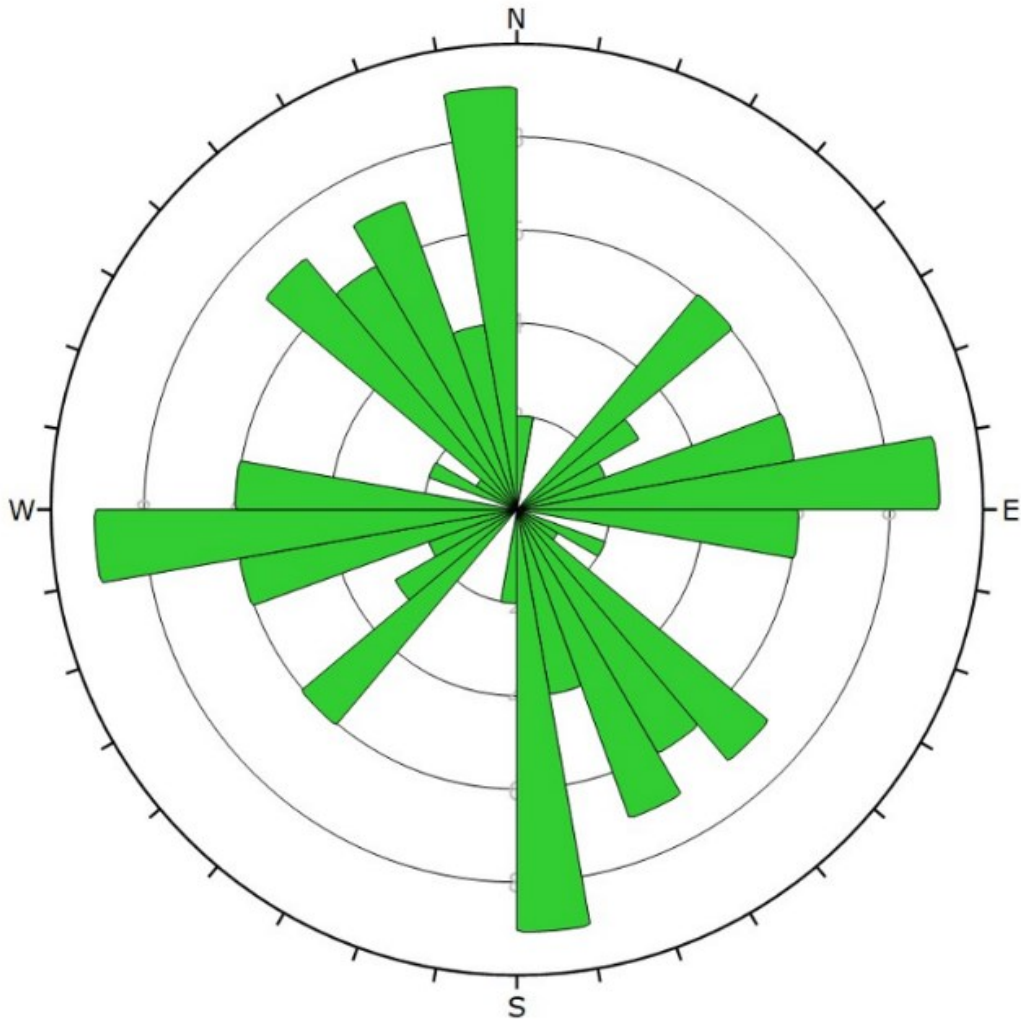


Figura V.6: Diagrama roseta construido con los datos estructurales relevados en el área de emplazamiento del cierre del dique Potrero del Clavillo. Plot Data: Apparent Strike; Face Normal tren: 0.0; Face Normal Plunge: 90.0°; Bin size: 10°; Outer Circle: 10 planes per arc; Minimum Angle to Plot: 45°; Maximum Angle to Plot: 90°.

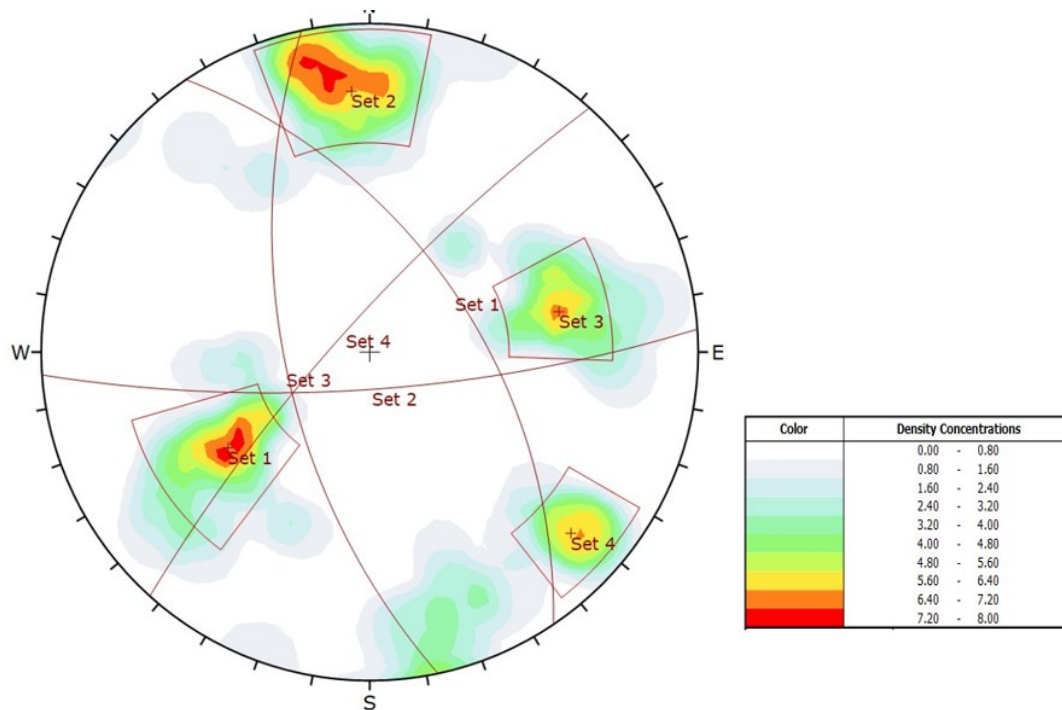


Figura V.7: Representación de los 4 juegos o familias de discontinuidades principales identificadas en el área de emplazamiento del cierre del dique Potrero del Clavillo. Los valores de Inclinación/Dirección de Inclinación promedios son para J1: 55°/N 56°; J2: 77°/N 176°; J3: 61°/N 258° y J4: 79°/N 312°

V.4.2 Resultados del Análisis Cinemático de Taludes

V.4.2.1 Probabilidades de Deslizamientos en el Talud de la Margen Izquierda del Río de Las Cañas:

Los resultados indican que existen probabilidades de deslizamientos en cuña relacionados a la intersección de los planos correspondientes a J1 y J2 (Figura V.8).

Respecto de los deslizamientos planares, en este sector su probabilidad de ocurrencia es muy baja tal (Figura V.9).

Finalmente, los deslizamientos por vuelco o *toppling* se encuentran relacionados a J4 (Figura V.10).

La orientación del talud es 80°/N140 (Inclinación/Dirección de Inclinación), el ángulo de fricción determinado mediante el Tilt Test (ensayo de inclinación) es de 35° y los límites laterales de 20°.

Se identificaron tres fallas destacables cuyas orientaciones (Inclinación/Dirección de Inclinación) son F1: 45°/N 95°, F2: 77°/N 250°, F3: 35°/N 50°. Del análisis cinemático se concluye que la falla F1 potencia, en este sector, el deslizamiento en cuña.

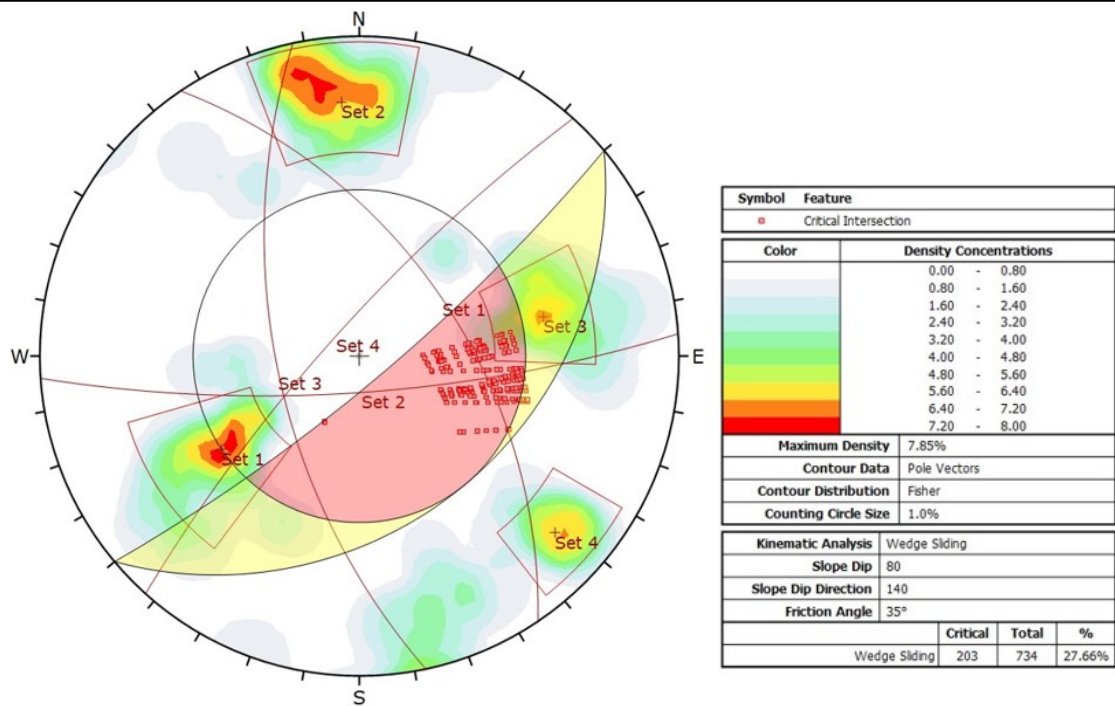


Figura V.8: La imagen muestra la probabilidad de deslizamientos en cuña relacionados a la intersección de los planos correspondientes a J1 y a J2.

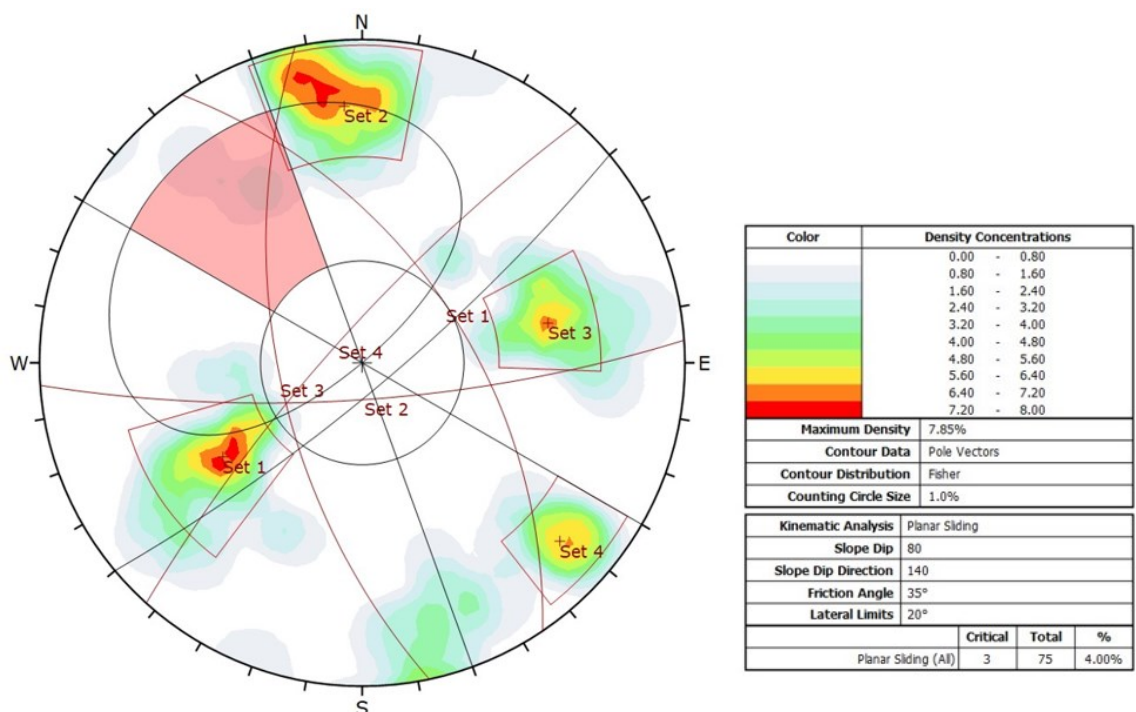


Figura V.9: Los deslizamientos planares, en este sector, tienen una muy baja probabilidad de ocurrencia.

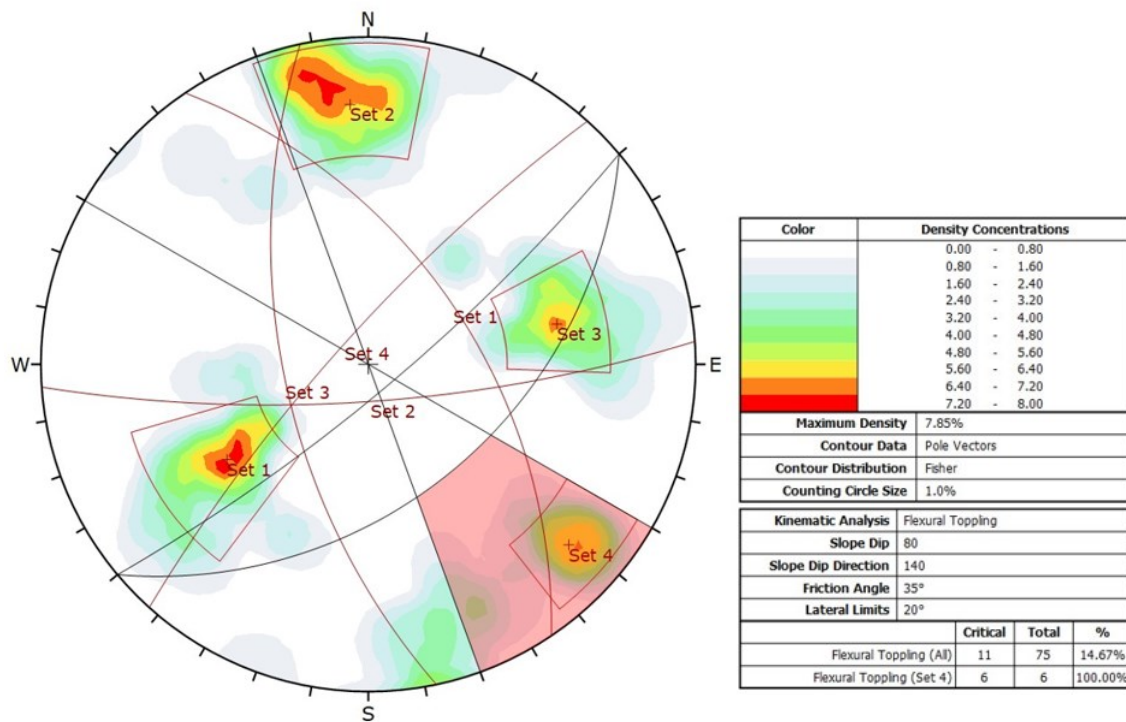


Figura V.10: Los deslizamientos por vuelco o *toppling* se encuentran relacionados a J4.

V.4.2.2 Probabilidades de Deslizamientos en el Talud de la Margen Derecha del Río de Las Cañas:

La margen derecha presenta probabilidades de deslizamientos en cuña relacionados a la intersección de dos juegos de planos, correspondientes a J1 y a J4, y a la intersección de los planos pertenecientes a J2 y a J3 (Figura V.11).

En relación con los deslizamientos planares, existe baja probabilidad de ocurrencia, encontrándose ello relacionado a J4 (Figura V.12).

Finalmente, los deslizamientos por vuelco o *toppling*, tienen muy poca probabilidad de ocurrencia en este sector (Figura V.13).

La orientación del talud es 80/N320 (Inclinación/Dirección de Inclinación), el ángulo de fricción determinado mediante el Tilt Test (ensayo de inclinación) es de 35° y los límites laterales de 20°.

Se identificaron tres fallas destacables cuyas orientaciones (Inclinación/Dirección de Inclinación) son F1: 47°/N 92°, F2: 75°/ N 247°, F3: 55°/N 60°. Del análisis cinemático se concluye que las tres fallas potencian el deslizamiento en cuña de este sector.

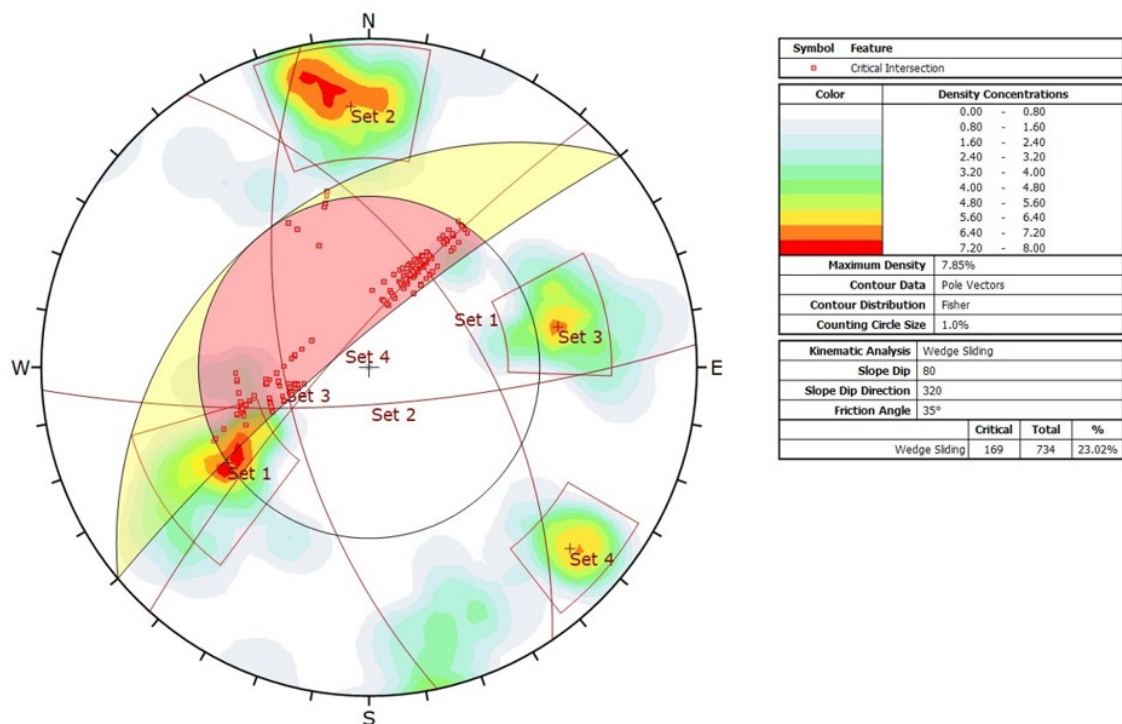


Figura V.11: Se observan las probabilidades de deslizamiento en cuña, relacionado a la intersección de dos juegos de planos (J1 y J4) y a la intersección de los planos pertenecientes a J2 y a J3.

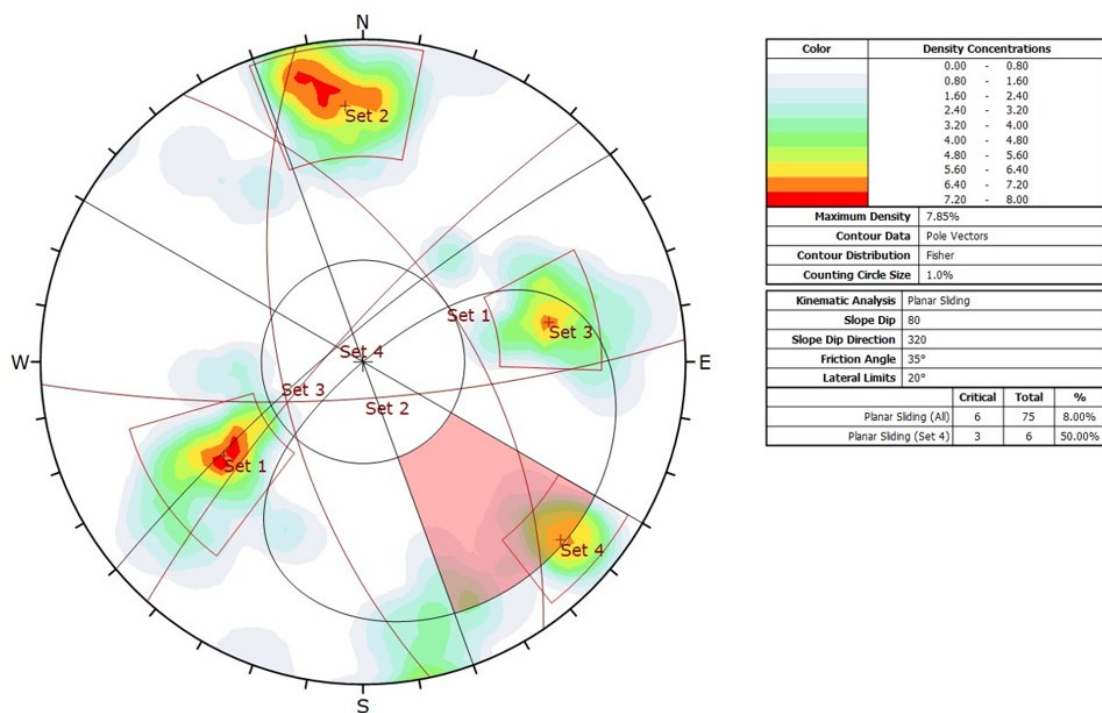


Figura V.12: Los deslizamientos planares presentan baja probabilidad de ocurrencia, encontrándose ello relacionado a J4.

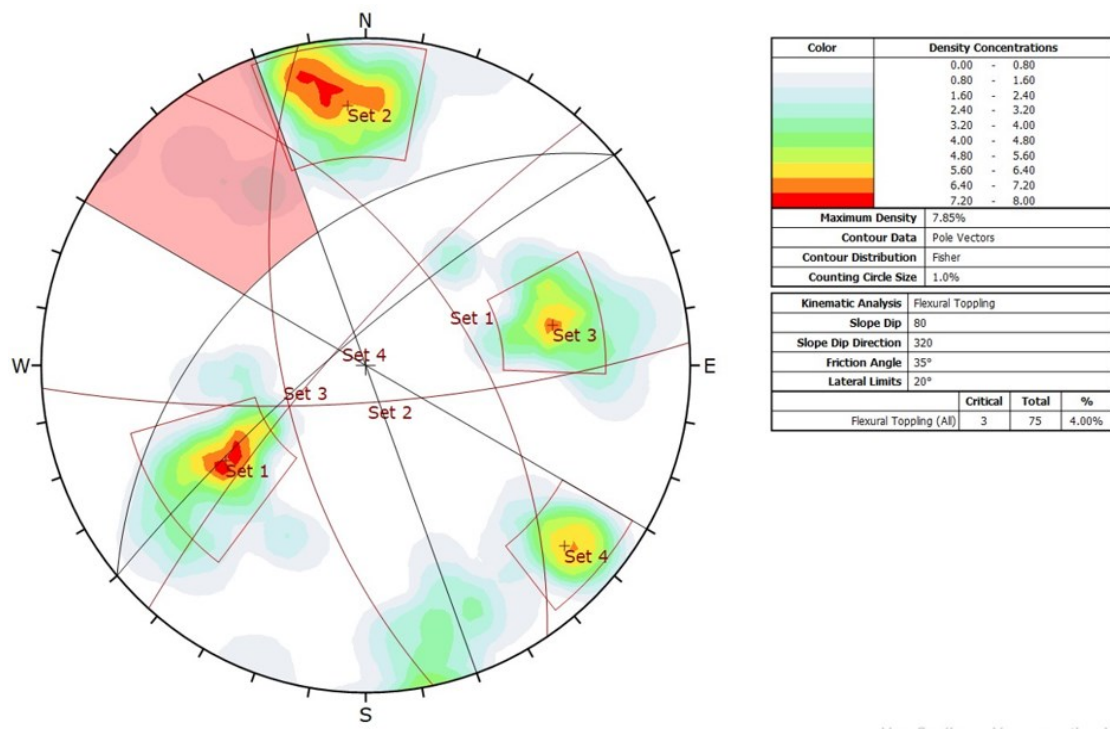


Figura V.13: Los deslizamientos por vuelco o *toppling* tienen muy poca probabilidad de ocurrencia.

V.5 PROBABILIDADES DE CAÍDAS DE ROCAS O *ROCKFALLS*

Un hecho particularmente destacable en la margen derecha del río de Las Cañas es la presencia de grandes bloques del basamento (algunos de más de 1 m³ de volumen) que se encuentran en situación de inestabilidad en el talud. Se genera, así, un permanente riesgo de desprendimientos o caída de rocas o *rockfalls* como pueden apreciarse en las fotos V.4 y V.5 (obtenidas en mayo de 2025). Este tipo de proceso de remoción en masa se caracteriza por un movimiento rápido y repentino del material rocoso por una pendiente pronunciada, como la existente en la zona. Las características estructurales y de meteorización de las rocas del lugar han contribuido a desarrollar estas condiciones de inestabilidad, que podrían materializarse en caídas rápidas ante precipitaciones intensas, actividad sísmica o actividad antrópica. Se requieren medidas de prevención y mitigación que minimicen los riesgos a personas e infraestructuras.



Foto V.4: Bloques de basamento de entre 2 y 4 m³ de volumen en situación de inestabilidad (margen derecha del río de Las Cañas).



Foto V.5: Bloques de basamento en inestabilidad en margen derecha del río de Las Cañas.

CAPITULO VI

PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL

VI.1 PRESENTACIÓN

La cuenca del río del Campo y zonas aledañas a la proyectada presa de embalse Potrero del Clavillo son áreas de incalculable valor natural y estratégico. Sin embargo, su complejidad geológica y geomorfológica, sumada a la variabilidad hidrometeorológica, presentan desafíos significativos en términos de riesgos naturales, particularmente los asociados a los procesos de remoción en masa (deslizamientos).

Los antecedentes del área de emplazamiento del proyecto, sumado a los estudios realizados en este trabajo, permiten delinear las zonas de susceptibilidad a deslizamientos y la complejidad geomecánica del macizo rocoso en el área de cierre de la presa de embalse. Esta información se torna valiosa en cuanto contribuirá a disminuir riesgos que afecten la seguridad de la población, la integridad de las infraestructuras y la sostenibilidad del ambiente.

Si bien los resultados aquí obtenidos son preliminares, contribuyen a la formación de una base sólida para la toma de decisiones de los actores e instituciones involucradas en materia de Ordenamiento Territorial, diseño de ingeniería e implementación de sistemas de alertas ante adversidades.

Las magnitudes de las infraestructuras e intervención ambiental requeridas para el desarrollo de este proyecto hidráulico hacen indispensable una planificación minuciosa y constante. Es en estas instancias donde se torna necesario el desarrollo de un Plan de Gestión Ambiental (PGA), como herramienta fundamental que asegure la coexistencia armónica entre el desarrollo humano y la preservación del ambiente.

Es importante poner de relevancia que la realización de un Plan de Gestión Ambiental requiere el compromiso de diferentes actores, tales como autoridades (provinciales y municipales), profesionales de diversas disciplinas, instituciones académicas y fundamentalmente, la participación proactiva de la población. Al integrar el conocimiento científico con la planificación y la concientización se contribuirá a que esta obra de ingeniería se desarrolle dentro de un marco de gestión responsable y eficiente que sea amigable con el entorno y otorgue seguridad y bienestar a la población.

Para la generación del Plan de Gestión Ambiental se consideraron los resultados derivados de los estudios de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río del Campo y del análisis del macizo rocoso en el área de emplazamiento del proyectado dique Potrero del Clavillo. Se consultó, asimismo, al modelo de lenguaje de inteligencia artificial (IA) desarrollado por Google (Gemini) con objeto de obtener información relevante sobre la estructura y componentes de un documento de este tipo.

El modelo de Plan de gestión Ambiental obtenido de la IA fue analizado y validado con bibliografía científica de pertinencia general y específica al desarrollo de planes de este tipo para asegurar la certeza de los datos generados. Para llevar a cabo esto se consultaron diferentes trabajos científicos: Hoek and Bray (1981), Turner and Schuster (1996), Ley General del Ambiente N°25.675 (2002), Lavell (2010), Guía para la Elaboración de una Evaluación Ambiental Estratégica (2019), Guía para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (2023) y Cipponeri (2024).

VI.2 OBJETIVOS DE LA PROPUESTA DE PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL

El PGA de la cuenca del río del Campo se fundamenta en la necesidad de minimizar riesgos de procesos de remoción en masa, realizar un uso eficiente de los recursos naturales, cumplir con la normativa ambiental vigente, implementar buenas prácticas ingenieriles y de gestión de riesgos y capacitar a la población e instituciones ante eventos ambientales adversos.

Los objetivos perseguidos con la realización de esta propuesta son:

1. Integración del conocimiento técnico generado con los mapas de zonificación de susceptibilidad a deslizamientos y los resultados de los análisis del macizo rocoso en los instrumentos de planificación territorial y de proyectos de infraestructuras.
2. Contribuir a la implementación de acciones correctivas y preventivas específicas en áreas identificadas con susceptibilidad media a alta a deslizamientos en la cuenca del río del Campo y en áreas con inestabilidad potencial del macizo rocoso en la zona de cierre del proyectado dique.
3. Promover la investigación y el monitoreo continuo para profundizar el entendimiento de los procesos geológicos e hidrológicos que influyen en las estabildades.

4. Contribuir a la coordinación de acciones de diversos actores y organismos tendientes a informar a la población y prepararla ante situaciones de emergencia relacionadas con deslizamientos.
5. Contribuir a optimizar el diseño y seguridad de la infraestructura fomentando la incorporación de consideraciones geomecánicas más rigurosas para garantizar su estabilidad a largo plazo.

VI. 3 COMPONENTES DEL PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL Y ACCIONES ESTRATÉGICAS

VI.3.1 Gestión del Territorio y Usos del Suelo Basado en la Susceptibilidad a Deslizamientos

Acciones consideradas pertinentes a realizar:

1. Incorporar el mapa de zonificación de susceptibilidad a deslizamientos, realizado mediante la metodología de Mora y Vahrson (1994), como un instrumento que resulte vinculante a los planes de Ordenamiento Territorial a nivel provincial y municipal.
2. Establecer restricciones o prohibiciones claras para nuevas construcciones en zonas identificadas con susceptibilidad media y alta.
3. Solicitar y reglamentar la realización de estudios técnicos de naturaleza geotécnica para cualquier proyecto de desarrollo urbano o infraestructura que se proponga en zonas de susceptibilidad media y alta.
4. Identificar y evaluar usos del suelo existentes en zonas de alta susceptibilidad para implementar medidas de mitigación o reubicación, si fuera necesario.

VI.3.2 Fortalecimiento del Conocimiento Geotécnico y Monitoreo Continuo

Acciones consideradas pertinentes efectuar:

1. Priorizar y ejecutar un intensivo mapeo geomecánico de detalle en el área de cierre del dique y otras zonas críticas, acompañada de ensayos de laboratorio (especialmente triaxiales) para obtener parámetros de resistencia del macizo rocoso que superen las estimaciones empíricas.
2. Establecer un equipo permanente o consultivo interdisciplinario compuesto por geólogos, geotecnistas, ingenieros civiles, hidráulicos, etc., que se constituya en

responsable de la evaluación exhaustiva de la estabilidad del macizo rocoso y la definición de medidas de ingeniería.

3. Complementar el RMR básico con el GSI (*Geological Strength Index*) de Marinos y Hoek (2000), para una caracterización más robusta de este complejo macizo rocoso. Realizar análisis geológicos integrales con foco en la caracterización y orientación de las familias de discontinuidades para identificar zonas críticas. Aplicar modelos numéricos tales como *Discrete Element Method* (DEM) y *Finite Difference Method* (FDM) y métodos tridimensionales (*Leapfrog Works*, *Geovia Surpac*, *Swedge 3D*, *Kinematic 3D*, *RocTopple 3D*) para validar y complementar los resultados de los análisis cinemáticos y del RMR básico, especialmente dadas las múltiples familias de discontinuidades identificadas.
4. Desarrollar un plan de instrumentación y monitoreo para el área de emplazamiento del dique y zonas aledañas con alta susceptibilidad, que incluya piezómetros, extensómetros, sistemas de monitoreo topográfico de alta precisión, etc.

VI.3.3 Monitoreo Hidrometeorológico y Sistemas de Alerta Temprana

Acciones consideradas pertinentes realizar:

1. Gestionar el establecimiento y operación de estaciones hidrometeorológicas en sectores estratégicos de la cuenca del río del Campo, con énfasis en la recopilación de datos de precipitaciones y caudales.
2. Implementar un sistema de alerta temprana basado en los datos hidrometeorológicos, que permita generar alertas a las autoridades y a la población ante condiciones que puedan desencadenar deslizamientos.
3. Realizar estudios para establecer la relación entre eventos de precipitación y la ocurrencia de deslizamientos, utilizando para ello la información disponible.

VI.3.4 Concientización, Coordinación y Preparación Ante Emergencias

Acciones consideradas pertinentes efectuar:

1. Diseñar e implementar programas continuos de educación y sensibilización pública sobre las posibilidades concretas de ocurrencia de deslizamientos y las

medidas de autoprotección requeridas, todo ello dirigido fundamentalmente a la población que habita en zonas de susceptibilidades media y alta.

2. Fortalecimiento de los mecanismos de coordinación entre actores locales (por ejemplo, municipio, Defensa Civil, bomberos, organizaciones comunitarias, etc.) y foráneos (autoridades provinciales, organismos de ciencia y técnica) para la difusión de información sobre situaciones de riesgo y la respuesta coordinada ante emergencias.
3. Desarrollar planes de contingencia y evacuación para zonas críticas, incluyendo rutas de evacuación, puntos de encuentro y protocolos de comunicación. Estos planes deben ser socializados con la población y las instituciones involucradas.
4. Realizar simulacros de evacuación y respuesta ante situaciones de emergencia para asegurar la preparación de la población y la eficiencia de los planes de contingencia.

VI.3.5 Responsabilidades y Recursos

La implementación de la propuesta de Plan de Gestión Ambiental requerirá de un esfuerzo coordinado de múltiples actores e instituciones entre los cuales se pueden reconocer:

1. Líderes de la implementación del plan, tales como autoridades provinciales y municipales y sus diferentes organismos, como asimismo la empresa a cargo de la ejecución de las obras de embalse.
2. Universidades y Centros o Institutos de Investigación, para la realización de estudios especializados, modelado y capacitación.
3. Población local, de la cual se requerirá una participación proactiva en la concientización y elaboración de planes locales de emergencia.

Para el desarrollo de lo indicado se deberá obtener y asignar un presupuesto específico, además de recursos humanos calificados para la ejecución de las acciones propuestas, incluyendo equipamiento, software y personal técnico especializado.

VI.3.6 Monitoreo y evaluación

Se establecerán indicadores claros para monitorear el progreso de cada acción (por ejemplo, número de estudios geotécnicos efectuados, porcentaje de población capacitada, estaciones hidrometeorológicas operativas, etc.).

Se efectuarán revisiones y actualizaciones periódicas del Plan de Gestión Ambiental, por ejemplo, cada dos años, o cuando se presenten eventos significativos que requieran revisiones. Esto permitirá incorporar nuevos conocimientos, evaluar la efectividad de las medidas implementadas y ajustar las estrategias.

Finalmente, se considera adecuado la generación de reportes periódicos tendientes a informar a las autoridades y a la población sobre el estado de la implementación del plan y los avances en la gestión de este.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1 GENERALIDADES

Se indican las conclusiones derivadas del estudio y análisis de diferentes aspectos relacionados a procesos de remoción en masa en la cuenca del río del Campo y en el sector de emplazamiento del proyecto de la presa de embalse de Potrero del Clavillo. En este sentido, se lleva a cabo una exposición de los resultados más significativos, vinculados directamente a los objetivos perseguidos con el desarrollo de esta tesis. La trascendencia de estas conclusiones radica en ofrecer una perspectiva general del proceso de remoción en masa en sectores críticos de la obra de embalse.

Finalmente, y con base en las conclusiones obtenidas, se efectúan un conjunto de recomendaciones. Estas sugerencias están orientadas fundamentalmente a señalar líneas futuras de investigación, buscando así incrementar y profundizar el conocimiento en la temática y en el área.

En consonancia con lo expuesto en párrafos anteriores se indican, en primera instancia, conclusiones y recomendaciones relacionadas a la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río del Campo por medio del método de Mora y Vahrson (1994). En segunda instancia, se indican las conclusiones y recomendaciones relacionadas a la caracterización del macizo rocoso y al análisis cinemático de taludes en el área de emplazamiento del dique de Potrero del Clavillo.

VII.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES REFERIDAS A LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

VII.2.1 Conclusiones Referidas a la Implementación de la Metodología de Mora y Vahrson (1994)

1. La aplicación de la metodología, si bien fue desarrollada para regiones de características climáticas muy diferentes a las imperantes en el área de estudio, demostró ser eficaz en la realización de una zonificación de susceptibilidad a deslizamientos con las adecuaciones necesarias.

2. La aplicación en el área de estudio de la metodología de Mora y Vahrson (1994) permitió determinar que el 43,86 % de su superficie corresponde a una susceptibilidad a deslizamientos alta, el 38,92 % a una susceptibilidad media, un 0,14 % a una susceptibilidad baja y el 17,07 % a una susceptibilidad muy baja.
3. Las regiones más susceptibles a deslizamientos se localizan en la vertiente oriental de las estribaciones más australes de los Nevados del Aconquija y bordeando por el este y oeste la ubicación del proyectado embalse y presa de Potrero del Clavillo.
4. La zonificación obtenida permitió identificar áreas prioritarias de intervención (susceptibilidades media y alta) tendientes a implementar acciones conducentes a un ordenamiento territorial, prevención, manejo y gestión de riesgos de desastres.
5. La zonificación proporcionará tanto a proyectistas urbanos como a los de la presa de embalse Potrero del Clavillo, una herramienta útil para la toma de decisiones en cuanto a la factibilidad de realizar un proyecto o a la necesidad de profundizar el análisis geológico del lugar.
6. Mediante la zonificación se logró definir y jerarquizar áreas críticas que posteriormente deberán ser sometidas a un análisis detallado y profundo por medio de métodos más específicos.
7. El uso de la metodología no sustituye, en ninguna circunstancia, estudios específicos de estabilidad de laderas como estudios geotécnicos detallados conducentes a determinar sectores de riesgo, principalmente en las áreas de susceptibilidades media y alta determinadas en la cuenca del río del Campo.

VII.2.2 Recomendaciones Referidas a la Implementación de la Metodología de Mora y Vahrson (1994)

1. Incorporar, a los planes de Ordenamiento Territorial, el mapa de zonificación de susceptibilidad a deslizamientos a fin de considerar potenciales eventos de remoción en masa en la toma de decisiones sobre usos del suelo.
2. En zonas urbanas y de emplazamiento de obras con susceptibilidad media a elevada, es recomendable profundizar los estudios técnicos tendientes a

determinar las acciones correctivas y preventivas necesarias para reducir el riesgo.

3. Coordinar la acción de actores locales y foráneos con el fin que la población se encuentre informada sobre riesgos de deslizamientos (o de otros procesos de remoción en masa) y las acciones necesarias a implementar ante situaciones de alertas y emergencias.
4. Gestionar con autoridades (provinciales y municipales) el establecimiento de estaciones hidrometeorológicas en sectores estratégicos de la cuenca del río del Campo con el objetivo de incrementar el conocimiento de parámetros climáticos e hidrológicos actualizados.

VII.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES RELACIONADAS A LA CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO Y AL ANÁLISIS CINEMÁTICO DE TALUDES

VII.3.1 Conclusiones Referidas a la Caracterización del Macizo Rocoso y al Análisis Cinemático con el Software DIPS

1. La metodología del RMR presenta ventajas sobre otras metodologías como ser su simplicidad, versatilidad y facilidad de aplicación, sin embargo, tiene limitaciones tales como la subjetividad en la evaluación de los diferentes parámetros y la falta de consideración del estado tensional del macizo rocoso, el cual es muy importante en zonas tectónicamente activas como las del área de estudio.
2. Las determinaciones del RMR básico (Bieniawski, 1989) en el área analizada, obtuvieron una valoración de 54 (Clase III, roca regular) para las inmediaciones al Túnel 5, y de 66 (Clase II, roca buena) para la margen izquierda y derecha del río de Las Cañas.
3. El relevamiento estructural y posterior análisis de la información obtenida mediante la utilización del programa DIPS en inmediaciones del Túnel 5 y márgenes izquierda y derecha de la naciente del río de Las Cañas, permitió establecer la presencia de 4 juegos o familias de discontinuidades principales.
4. En la margen izquierda del río de Las Cañas, el análisis cinemático permitió determinar una elevada probabilidad de deslizamiento por cuña relacionada a la

intersección de planos correspondientes a J1 y a J2. Además, se determinó la probabilidad de vuelco o *toppling*, relacionado a J4.

5. En la margen derecha del río de Las Cañas, el análisis cinemático permitió determinar una elevada probabilidad de deslizamiento por cuña relacionada a la intersección de dos juegos de planos, uno correspondiente a la intersección de planos de J1 y J4, y el otro a la intersección de los planos pertenecientes a J2 y a J3.

VII.3.2 Recomendaciones Referidas a la Caracterización del Macizo Rocoso y al Análisis Cinemático con el Software DIPS

1. Los resultados de las determinaciones realizadas deben considerarse preliminares por lo cual es importante, a fin de obtener resultados más representativos, intensificar el mapeo geomecánico de detalle del área de cierre y efectuar ensayos de laboratorio.
2. Es recomendable involucrar a un equipo interdisciplinario de profesionales en geología, geotecnia e ingeniería para garantizar una evaluación exhaustiva de la estabilidad del macizo rocoso que permita a los proyectistas implementar las medidas necesarias.
3. Complementar el RMR básico con otras metodologías tales como el GSI (*Geological Strength Index*) para macizos rocosos.
4. Si bien el RMR permite realizar determinaciones de cohesión y ángulo de fricción del macizo rocoso, estas constituyen estimaciones empíricas y de ninguna manera reemplazan a los ensayos triaxiales de laboratorio.
5. Efectuar un análisis geológico integral, enfocado en la caracterización y determinación de la orientación de las diferentes familias de discontinuidades lo cual permitirá identificar zonas críticas propensas a deslizamientos.
6. Teniendo en cuenta la complejidad del macizo rocoso y las familias de discontinuidades es necesario considerar la aplicación de análisis numéricos (DEM – *Discrete Element Method*, FDM – *Finite Difference Method*) y métodos tridimensionales (*Leapfrog Works*, *Geovia Surpac*, *Swedge 3D*, *Kinematic 3D*, *RocTopple 3D*) para complementar resultados obtenidos mediante el RMR básico y el programa DIPS.

BIBLIOGRAFÍA

- Aceñolaza, F. G. y Toselli, A. 1973. Consideraciones estratigráficas y tectónicas sobre el Paleozoico inferior del Noroeste Argentino. 2° Congreso Latinoamericano de Geología (Caracas) Actas 2: 755-763.
- Aceñolaza, F. G. y Toselli, A. J. 1977. Esquema geológico de la Sierra de Ancasti, provincia de Catamarca. Acta Geológica Lilloana 14: 233-259.
- Aceñolaza, F. G. y Toselli, A. J. 1981. Geología del Noroeste Argentino. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Publicación Especial N° 1287, Tucumán. 212 pp.
- Adler, F. 2014. El Futuro del agua en Tucumán. Primera Edición, 492 pp.
- Ahumada, A. 2002. *Periglacial phenomena in high mountain areas in the northwestern of Argentina*. South African Journal Of Science 98: 166-170.
- Ahumada, A., Páez, V. e Ibáñez Palacios, G. 2013. Los glaciares de escombros en la sierra de Aconquija, Argentina. Acta Geológica Lilloana 25 (1-2): 49–68.
- Alvarado P. y Ramos, V. 2010. La Estructura Ándica de las Sierras Pampeanas Basadas en los Mecanismos Focales de Terremotos en su Región Noroeste. Revista de la Asociación Geológica Argentina 67(4): 461-472.
- Arnold, M., Chen, R., Deichman, U., Dilley, M., Lerner-Lam, A., Pullen, R y Trohanis, Z. 2006. *Natural Disaster Hotspots Case Studies. The World Bank Hazard Management Unit*. Disaster Risk Management Series 6. 184 pp. Washington, D.C.
- Arcuri, C. 1999. Capítulo E: Geomorfología. En: Roldán, A. (2000) “Estudios Básicos y Proyectos de Ingeniería para la Sistematización de las Cuencas de los Ríos Gastona y Medina en la Provincia de Tucumán”. Expediente N° 2922. Consejo Federal de Inversiones.
- Banegas J., Dos Santos, D., Reynaga, C., Pérez, E y Sarzetti, L. 2001. Aporte al conocimiento del Valle del Aconquija. Trabajo Monográfico Inédito. Cátedra de Geografía Física. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. Universidad Nacional de Tucumán.
- Barillas, E. 2008. Guía metodológica para la evaluación de zonas susceptibles a deslizamientos disparados por lluvias. Guatemala.

- Barrantes, G., Barrantes, O. y Núñez, O. 2011. Efectividad de la metodología Mora–Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(47): 141-162.
- Bianchi, A. y Cravero, S. 2010. Atlas Climático Digital de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 56pp.
- Bieniawski, Z.T. 1973. *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. The Transactions of the South African Institution of Civil Engineers in South Africa 15: 335-344.
- Bieniawski, Z.T. 1976. *Rock Mass Classification in Rock Engineering*. In: Bieniawski, Z.T., Ed., Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering 1: 97-106.
- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. Wiley, New York.
- Bieniawski, Z. T. 1993. *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Bieniawski, Z.T. 2011. Errores en la aplicación de las clasificaciones Geomecánicas y su corrección. Jornada sobre la Caracterización Geotécnica del Terreno. Madrid: ADIF. 35 pp.
- Bobba, M. 2006. Clima de Montaña. El Caso del Valle del Suncho – Campo del Pucará. Dpto. de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional de Tucumán. 11pp.
- Brady, B. H. G. and Brown, E. T. 1993. *Rock mechanics for underground mining*. 2nd ed. London. 571 pp.
- Busnelli, J. 2012. Mapa de amenaza de remoción en masa de la provincia de Tucumán según diferentes escenarios de cambio climático. *Acta Geológica Lilloana* 24 (1-2): 4-33.
- Caelles, J., Clark, A., Farrar, E., McBride, S., Quirt, S. 1971. *Potassium-argon ages of porphyry copper deposits and associated rocks in the Farallón Negro-Capillitas District, Catamarca. Argent. Econ. Geol.* (66): 961-964
- Cahill, T. e Isacks, B. 1992. *Seismicity and shape of the subducted Nazca plate*. *Journal of Geophysical Research*, 97: 503-529.

- Calderón, Y., Carvajal, H. y Sandoval, J. 2010. Un análisis crítico a las metodologías de zonificación por movimientos en masa y zonificación de comportamientos especiales aplicados al ordenamiento del territorio. 13° Congreso Colombiano de Geotécnica y 7° Seminario Colombiano de Geotécnica. Manizales, Colombia. DOI:[10.13140/RG.2.2.11426.22729](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11426.22729)
- Caminos, R. 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales-Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. En Turner, J. C. (ed.) Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias 1: 225 -291, Córdoba.
- Chaverri Molina, I. 2016. Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento por medio de la metodología de Mora – Vahrson en la microcuenca de del Río Macho, San José, Costa Rica. Trabajo Final de Grado. Escuela de ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Inédito. 84 pp.
- Cipponeri, M. 2024. Evaluación y estudio de impacto ambiental. Gestión ambiental de proyectos en su etapa de concepción y diseño. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Libros de Cátedras, 253 pp.
- Cisterna, C., Mon, R. y Mena, R. 2010. Estructura interna de la franja migmatítica del núcleo cristalino de las Sierras Pampeanas Septentrionales del Noroeste Argentino. Revista de la Asociación Geológica Argentina 66 (1): 66 – 79.
- Comisión Ejecutiva para Asuntos Hídricos de Tucumán (CEAS). 2014. Sistema hídrico Potrero del Clavillo. Provincia de Tucumán. Estudios hidrometeorológicos y climáticos de aplicación al diseño, construcción y operación de las obras. informe técnico.
- Córdoba, G. 1994. Contribución al conocimiento petrológico del basamento plutónico -metamórfico del cerro de Los Ángeles, sierra de Ambato - Provincia de Catamarca -Argentina. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Catamarca, (Inédito), 205 pp. Catamarca.
- Cravero, S., Bianchi, C., Elena, H. y Bianchi, A. 2017. Clima de la Argentina. Mapas digitales mensuales de precipitaciones y precipitación menos evapotranspiración potencial: Adenda del Atlas Climático Digital de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 61pp
- Cristallini, E., Cominguez, A., Ramos, V. y Mercerat, E. 2004. *Basement double-wedge thrusting in the northern Sierras Pampeanas of Argentina (27° S); constraints from deep seismic reflection*. En McClay, K. (ed.) Thrust tectonics and

- hydrocarbon systems, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 82: 65-90, Tulsa.
- Crozier, M. 1986. *Landslides: causes, consequences and environment*. London: Croom Helm Australia Pty. Ltd.
 - Crozier, M. 1991. *Determination of palaeoseismicity from landslides*. 6° International Symposium on Landslides, 2: 1173-1180.
 - Cruden, D. 1991. *A simple definition of a landslide*. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 43(1): 27-29.
 - Dal Molin, C. y Escosteguy, L. 2001. El Gupo Aconquija (provincias de Catamarca y Tucumán): Nuevas consideraciones acerca de su edad. XI Congreso Latinoamericano de Geología. III Congreso Uruguayo de Geología. Resúmenes. Montevideo.
 - Dal Molin, C., Fernández, D. y Escosteguy, L. 2003. Hoja Geológica 2766-IV Concepción. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín 342, 41 pp.
 - Dávila, F., Astini, R. y Jordan, T. 2005. Cargas subcorticales en el Antepaís Andino y la planicie pampeana: evidencias estratigráficas, topográficas y geofísicas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 60(4):775-786.
 - Del Pero, M. 2010. Análisis paleoambiental de la porción superior de la Formación Aconquija (Neógeno) en el río Punta del Agua, valle de Las Estancias, Catamarca. Tesis de Grado Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán (inédita), 52 pp. Tucumán.
 - Del Pero, M. y Georgieff, S. 2011. Análisis paleoambiental de la sección media de la Formación Aconquija (Neógeno) en el río Pantanillo, valle de Las Estancias, Catamarca, Argentina. Serie Monográfica y didáctica 52: 185.
 - Deere, D.U. 1989. *Rock quality designation (RQD) after 20 years*. U.S. Army Corps Engrs. Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
 - Deere, D.U. and Miller, D.W. 1967. *The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Classification Systems for Engineering Purposes*. ASTM STP, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA: 91-101
 - Deere, D. U. and Miller, R. P. 1966. *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock*. Tec. Rep. No. AFWL-TR-65-116, University of Illinois, Illinois. 299 pp.

- Duarte, R. G. 1997. Gliptodontes del Pleistoceno tardío de Agua de las Palomas, Campo del Pucará, Catamarca, Argentina. Variaciones morfológicas del caparazón de Glyptodon reticulatus Owen, 1845. Ameghiniana 34 (3): 345-355.
- Esteban, G. 1988. Nuevo Mylodontidae (Edentata, Tardigrada) del Cuaternario del Noroeste argentino (Las Estancias, Catamarca). Ameghiniana 25 (2): 115-122.
- Esteban, G., Georgieff, S., Nasif, N., Ibañez, L. y Bonini, R. 2019. Marco estratigráfico, paleontología de vertebrados y paleoambientes del Plioceno de Catamarca, Tucumán y Santiago del Estero, Argentina. Opera Lilloana 52: 348-366.
- Fernández, D., Lutz, M., Villegas, D., García, M.G., Hidalgo, M., Sirombra, M., Neder, L. y García Azcárate, J. 2004. Carta de Línea de Base Ambiental 2766-IV Concepción. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín 342, 148 pp.
- Fernández, D. y Lutz, A. 2006. Carta de Peligrosidad Geológica 2766-IV Concepción. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín 365, 147 pp.
- Fernández, D. 2009. Eventos de remoción en masa en la provincia de Tucumán: tipos, características y distribución. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65(4): 748-759.
- Fernández, R. 2005. Aportes al mapa de riesgo geoambiental de la provincia de Tucumán. República Argentina. Publicación del Instituto de Riesgo geológico y Sistematización territorial. Universidad Nacional de Tucumán, 50pp.
- Glade, T. y Crozier, M. 2005. *The Nature of Landslide Hazard Impact*. In Landslide Hazard and Risk, edits. Thomas Glade, Malcom Anderson y Michael J. Crozier, 43-74.
- García Salemi, M. 1977a. Aspectos geomorfológicos del Valle del Suncho y Campo del Pucará (provincia de Catamarca). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Suplemento 35: 198-225.
- García Salemi Manuel Ángel. 1977b. Reseña geomorfológica de las sierras pampeanas de Tucumán y Catamarca (Sector comprendido entre los paralelos 26° y 28°). Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines, 6 (1-2): 43-62.
- Georgieff, S., Guido, E., Nieva, S. Gianfrancisco, Soledad, Laks, R. y Lencina, R. 2015. Términos de referencias para la elaboración del estudio de Impacto

- Ambiental. Estudio del Complejo Hídrico Multipropósito de los Ríos Las Cañas – Gastona – Medina. 150 pp.
- Gianfrancisco, M. S. 2002. Análisis de estructuras posiblemente destinadas a corrales en Campo del Pucará. Trabajo Final de Grado. Inédita. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.
 - Gianfrancisco, M. S. 2011. Prácticas materiales y espaciales en Campo del Pucará (0 al 550 d.C.). Tesis Doctoral Inédita. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de la Plata. 542pp.
 - González Bonorino, F. 1950a. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 5(3): 81-110.
 - González Bonorino, F. 1950b. Descripción geológica de las Hojas 12d (Capillitas) y 13d (Andalgalá). Dirección General de Industria Minera. Boletín 70, 100 pp. Buenos Aires.
 - González Bonorino, F. 1950c. Descripción geológica de la Hoja 13e, Villa Alberdi (Tucumán y Catamarca). Dirección Nacional de Geología y Minería Boletín 74: 1-77.
 - González Bonorino, F. 1951a. Descripción geológica de la Hoja 12e, Aconquija, Catamarca-Tucumán. Boletín de la Dirección Nacional de Minería 75, 50 pp. Buenos Aires.
 - González Bonorino, F. 1951b. Granitos y migmatitas de la Falda Occidental de la Sierra de Aconquija. Revista de la Asociación Geológica Argentina 6(3): 137-186.
 - González Bonorino, F. 1978. Descripción geológica de la Hoja 14f, San Fernando del Valle de Catamarca. Servicio Geológico Nacional de Minería. Boletín 160, 123 p. Buenos Aires.
 - Grimaldi, P. 1997. Evaluación espacial y temporal de la dinámica erosiva en el valle de las estancias. Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán (inédita), 72 pp. Tucumán.
 - Guía para la elaboración de una Evaluación Ambiental Estratégica. 2019. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Presidencia de la Nación, 28pp.
 - Guía para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental. 2023. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República Argentina. Secretaría de Cambio Climático, Desarrollo Sostenible e Innovación, 127pp.

- Guía de Criterios Geomecánicos para Diseño, Construcción, Supervisión y Cierre de Labores Subterráneas. 2017. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. Primera Edición. Lima, Perú. 269 pp.
- Guía Técnica para la Gestión de los Riesgos Mineros Causados por fallas Geomecánicas. 2023. Agencia Nacional de Minería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 307 pp.
- Guido, E., Sesma, P. y Georgieff, S. 2014. Características morfológicas y sedimentológicas de los cauces que resulten más relevantes en cuanto a procesos de erosión y transporte de sedimentos. Estudio del Complejo Hídrico Multipropósito de los Ríos Las Cañas – Gastona – Medina.
- Guillén, N. 2014. Estudios Avanzados para el Diseño Hidrológico e Hidráulico de Infraestructura Hídrica. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Tesis de Maestría. Inédita, 249pp.
- Gutiérrez, A. 1990. Geología y estratigrafía del área Cumbres de Narvárez, Condor Huasi. Departamento Andalgalá, Catamarca. Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán (inédita). Tucumán.
- Gutiérrez, A. y Mon, R. 2008. Macroindicadores cinemáticos en el bloque de Ambato, provincias de Tucumán y Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63 (1): 24 – 28.
- Gutiérrez, A., Mon, R., Ahmad, A. y Cisterna, C. 2019. *Sinistral Rotation and NNW Shortening of the Ambato Block induced by Cenozoic NE to E-W Transpression, Argentina*. International Journal of Earth Science and Geology 1(2): 74-85.
- Hoek, E. and Bray, J. 1981. *Rock Slope Engineering*. 3rd Edition, The Institute of Mining and Metallurgy, London, UK.
- Hoek E., Kaiser P. K. and Bawden W. F. 1995. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, Netherlands. A. A. Balkema Publisher.
- Informe de Avance N°1, Aspectos Socio – Ambientales y Geológicos. (2014). Línea de Base Ambiental y Social. Aspectos Comunicacionales y Legales. Estudios del Complejo Hídrico Multipropósito de los Ríos Las Cañas, Gastona y Medina. Tomo 1, 170 pp.
- Introcaso, A., Lion, A. y Ramos, V. 1987. La estructura profunda de las sierras de Córdoba. Revista de la Asociación Geológica Argentina 42(1-2): 177-187.

- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), (Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y Bundesanstalt fuer Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). (2004. Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Nicaragua: el Método Mora-Vahrson.
- Jordan, T. E. y Allmendinger, R. W. 1986. *The Sierras Pampeanas of Argentina: A modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation*. American Journal of Science 286: 737-764.
- Jordan, T., Isacks, B., Ramos, V. y Allmendinger, R. 1983a. *Mountain building model: The Central Andes*. Episodes (3): 20-26.
- Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Brewer, J., Ando, C. y Ramos, V. 1983b. *Andean tectonics related to geometry of subducted plates*. Geological Society America, Bulletin 94(3): 341-361.
- Jordan, T., Zeitler, P., Ramos, V. y Gleadow, A. 1989. *Thermochronometric data on the development of the basement peneplain in the Sierras Pampeanas, Argentina*. Journal of South American Earth Sciences 2(3): 207-222.
- Kittl, E. 1938. Estudios sobre las rocas metamórficas e intrusivas de las provincias del norte argentino. Revista Minera 9(2-3): 43-95.
- Kühn, F. y Rohmeder, G. 1943 Estudio Fisiográfico de las Sierras de Tucumán. Instituto de Estudios Geográficos. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional de Tucumán.
- Köppen, W. 1923. *Die Klimate der Erde*. Grundriss der Klimakunde. Berlin und Leipzig, 369 pp.
- Köppen, W. 1931. *Grundriss der Klimakunde*. Walterde Grueter Co.XII. Berlin und Leipzig, 388 pp.
- Larrovere, M., Toselli, A. y Rossi de Toselli, J. 2008. Petrología y estructura de la faja de deformación La Chilca, Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63: 254-263.
- Lavell, A. 2010. Gestión Ambiental y Gestión del Riesgo de Desastre en el Contexto del Cambio Climático: Una Aproximación al Desarrollo de un Concepto y Definición Integral para Dirigir la Intervención a través de un Plan nacional de desarrollo. Departamento Nacional de Planeación. Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible, Colombia. 56 pp.

- Ley Nacional 27.451. 2018. Parque Nacional Aconquija, cesión de jurisdicción al Estado Nacional. Anexo III.
- Linares, E. y González, R., 1990. Catálogo de edades radimétricas de la República Argentina 1957-1987. Asociación Geológica Argentina. Serie B Didáctica y Complementaria 19: 628 pp.
- López, R., Zuluaga, A., Gómez, F. y Tapia, L. 2020. Aplicación del Método Mora-Vahrson para Evaluar la Susceptibilidad a Deslizamiento en el Municipio de Manaure, Cesar, Colombia. Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER, 4(2): 57-70.
- Management of Rockfall Risks in Underground Metalliferous Mines. 2003. Australian Centre for Geomechanics for the Minerals Council of Australia. 160 pp.
- Marinos, P. and Hoek, E. 2000. *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. In: Proceedings of the GeoEng2000 at the international conference on geotechnical and geological engineering, Melbourne, Technomic Publishers, Lancaster, pp 1422–1446
- McNutt, R., Crocket, J., Clark, A., Caelles, J., Farrar, E., Haynes, S. y Zentili, M. 1975. *Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of plutonic and volcanic rocks of the Central Andes between latitudes 26° and 29° south*. Earth and Planetary Science Letters 27: 305-313.
- Minetti, J. L., Acuña, L. R. y Nieva, J. I. 2005a. El régimen pluviométrico del Noroeste Argentino. En: Minetti, J. L. (editor), El clima del Noroeste Argentino. Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl C: Zon Caldenius, 169-186.
- Minetti, J. L., Poblete, A. G. y Longhi, F. 2005b. Los mesoclimas del Noroeste Argentino. En: Minetti, J. L. (editor), El clima del Noroeste Argentino. Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl C: Zon Caldenius, 217-233.
- Mon, R. y Hongn, F. 1996. Estructura del basamento proterozoico y paleozoico inferior del norte argentino. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 51(1): 3-14.
- Mon, R. y Urdaneta, A. 1972. Introducción a la Geología de Tucumán, República Argentina. Revista Asociación Geológica Argentina 27(3): 309-329.

- Mora, R. 2004a. Aplicación de la metodología MVM para determinar la susceptibilidad a deslizamientos en el Bajo Cacao, Atenas, Alajuela. Escuela Centroamericana de Geología. San José Costa Rica.
- Mora, R. 2004b. Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología. San José Costa Rica.
- Mora, S. y Vahrson, W. (1994). *Macrozonation methodology for landslide hazard determination*. Bulletin of the Association of Engineering and Geologists, 31(1): 49-58.
- Mora, R., Chaves, J. y Vázquez, M. 2002. Zonificación de la Susceptibilidad al Deslizamiento: Resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del método Mora-Vahrson (Mora, R., Vahrson & Mora, S., 1992). Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas, FUNDEVI 0960-00, Vicerrectoría de Investigación 113-A0827, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- Morláns, M. 1995. Regiones Naturales de Catamarca: Provincias Geológicas y Provincias Fitogeográficas. Revista de Ciencia y Tecnología de la UNCa. 1(2): 1-42.
- Nasif, N., Esteban, G. y Georgieff, S. 2007. Nuevo registro de vertebrados para la Formación Aconquija, provincia de Catamarca, Noroeste de Argentina. Implicancias cronoestratigráficas y consideraciones paleoambientales. Acta Geológica Lilloana 21(1): 99-11261.
- Nasif, N., Esteban, G., Georgieff, S., Ibáñez, L. y Spagnuolo, C. 2019. Biocronoestratigrafía y paleoambientes del Mioceno tardío de Catamarca, Tucumán y Santiago del Estero, Argentina. Opera Lilloana 52: 229-250.
- Neder, L. y Guido, E. 1994. Monitoreo del uso del suelo y procesos morfodinámicos relacionados con la degradación ambiental en el Valle del Pucará (Provincia de Catamarca, Argentina). Terra Nostra 14- Geowissenschaftliches Lateinamerika-Kolloquium. Zusammenfassungen der Tagungsbeiträge. Tübingen: 817-827. Alemania.
- Niepagen, C. 1981. Contribución al conocimiento geológico del sector septentrional del Campo del Pucará (departamento Andalgalá, provincia de Catamarca). Tesis de

- Licenciatura Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán (inédita), 114 pp. Tucumán.
- Núñez Regueiro, V. 1998. Arqueología, historia y antropología de los sitios de Alamito. Ediciones INTERDEA. 346pp. Argentina.
 - Olszewski, N. 2004. Utilización de recursos vegetales en Campo del Pucará (Andalgalá, Catamarca) durante el Período Formativo (200- 500 d.C.). Análisis de macrorrestos. Tesis doctoral Inédita. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.
 - Organización Naciones Unidas y Secretaría Interinstitucional de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ONU/EIRD). 2004. Vivir con el riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres. Suiza.
 - Ortiz, P.E., D.A. García López, M.C.; Madozzo Jaén y G.I. Esteban. 2019. Síntesis actualizada del registro paleontológico pleistoceno en el noroeste argentino. Opera Lilloana 52: 574-605.
 - Ortiz Maestre, V., Polo Mendoza, C., Giraes Puerta, D. y Manco Jaraba, D. 2022. Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa implementando el método Mora-Vahrson modificado para el corregimiento de Chemesquemena (César, Colombia). Tecnura, 27(77): 1-21. Universidad Francisco José de Caldas.
 - Palmström, A. and Broch, E. 2006. Use and Misuse of Rock Mass Classification Systems with Particular Reference to the Q-System. Tunnelling and Underground Space Technology 21: 575-593.
 - Pérez, J. y Heredia, O. 1975. Investigaciones arqueológicas en el Departamento de Ambato, provincia de Catamarca. Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología 9: 59-68. Buenos Aires.
 - Pereyra, F., Lutz, M., Valladares, H. y Fernández, D. 2002. Carta de Peligrosidad Geológica 2766-II, Tucumán. Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires.
 - Quesada Román, A. y Feoli Boraschi, S. 2018. Comparación de la Metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para Determinar Áreas Susceptibles a Deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica. Revista Geográfica de América Central, (61): 17-45.
 - Ramos, V. 1988. *Tectonics of the Late Proterozoic-Early Paleozoic: a collisional history of Southern South America*. Episodes 11(3): 168-174.

- Ramos, V. 1999. *Plate tectonic setting of the Andean Cordillera*. Episodes 22(3): 183-190.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O. y Pérez, d.J. 2002. *The Pampean flat-slab of the central Andes*. Journal of South American Earth Sciences, 15: 59-78.
- Rapela, C., Coira, B., Toselli, A. y Saavedra, J. 1992. El magmatismo del Paleozoico inferior en el Sudoeste de Gondwana. En J. C. GutierrezMarco, J. Saavedra y I. Rábano (Eds.), Paleozoico Inferior de Iberoamérica. Universidad de Extremadura 21-68. Mérida.
- Rapela, C., Pankhurst, R., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J., Galindo, C. y Fanning, C. 1998. *The Pampean Orogeny of the southern Proto - Andes: Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba*. En Pankhurst, R. J. y Rapela, C. W. (eds.) The Proto-Andean Margin of Gondwana, Geological Society, London, Special Publications 142: 182-217.
- Rapela, C., Pankhurst, R., Dahlquist, J. y Fanning, C. 1999. *UPb SHRIMP ages of Famatinian granites: new constraints on the timing and tectonic setting of I- and S-type magmas in an ensialic arc*. II South American Symposium on Isotope Geology, Carlos Paz, Argentina, Actas: 264-267.
- Rapela, C., Casquet, C., Baldo, E., Dahlquist, J., Pankhurst, R., Galindo, C. y Saavedra, J. 2001. Las Orogénesis del Paleozoico inferior en el margen proto - andino de América del Sur, Sierras Pampeanas, Argentina. Journal of Iberian Geology 27: 23-41.
- Rassmuss, J. 1918. La sierra de Aconquija. 1º Reunión Nacional de la Sociedad Argentina de Ciencias Naturales, 47-69. Tucumán.
- Roldán, A. 2000. Estudios Básicos y Proyectos de Ingeniería para la Sistematización de las Cuencas de los Ríos Gastona y Medina en la Provincia de Tucumán. Informe final. CFI.
- Salazar, L. 2007. Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante el sistema de información geográfico ILWIS utilizando el método Mora & Varhson, 1991. San José Costa Rica.
- Secretaría Interinstitucional de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, Naciones Unidas (EIRD/ONU). 2004. Vivir con el Riesgo: Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres

- Seggiaro, R., Caffè, P., Becchio, R., Galli, C., Arnosio, M. y Da Poián, G. 2014. Evolución tectónica andina entre las sierras de Hualfin, Capillitas y extremo sur de Aconquija, provincia de Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71(4): 500-512.
- Segura, G., Badilla, E. y Obando, L. 2011. Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. *Revista Geológica de América Central*, 2(45): 101-121.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). 2004. Memoria técnica para el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de tierra en El Salvador. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos naturales. San Salvador. El Salvador. 18pp.
- Sharpe, C. 1938. *Landslides and Related Phenomena: A Study of Mass Movement of Soil and Rock*. Columbia University Press, New York.
- Shedlock, K., Giardini, D., Grünthal, G. y Zhang, P. 2000. *The GSHAP Global Seismic Hazard Map*. *Seismological Research Letters*, 71(6): 679-686.
- Sims, J., Ireland, T., Camacho, A., Lyons, P., Pieters, P., Skirrow, R., Stuart Smith, P. y Miró, R. 1998. *U-Pb, Th-U and Ar-Ar geochronology from the southern Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the Palaeozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin*. En Pankhurst, R. J. y Rapela, C. W. (eds.) *The Proto-Andean Margin of Gondwana*, Geological Society, Special Publications 142: 259-281, London.
- Soldano, A. (2008). Conceptos sobre Riesgo. Síntesis temática realizada para el Foro Virtual de la Red Interamericana de Mitigación de Desastres. Conae, Comisión Nacional de Actividades Espaciales y el Departamento de Desarrollo Sostenible de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, OEA/DSS. Argentina.
- Steenken, A., S. Siegesmund, K. Wemmer y López de Luchi. 2008. *Time constraints on the Famatinian and Achaian structural evolution of the basement of the Sierra de San Luis (Eastern Sierras Pampeanas, Argentina)*. *Journal of South American Earth Sciences* 25: 336-358.
- Toselli, A., Reissinger, M., Durand, F. y Bazán, C. 1983. Rocas graníticas. En Aceñolaza, F., Miller, H. y Toselli, A. (eds.) *Geología de la Sierra de Ancasti*, *Münsterische Forschungen zur Geologie und Paläontologie*, Hefte 59: 79-99, Münster.

- Toselli, A., Rossi, J., Willner, A. y Bernhardt, H. 2003. Composiciones químicas de cordieritas y biotitas en granitos y enclaves ¿origen ígneo o metamórfico? 10º Congreso Geológico Chileno. Actas. Concepción.
- Toselli, A., Sial, A., Saavedra, J., Rossi De Toselli, J. y Pinto Ferreira, V. 1996. *Geochemistry and Genesis of the S-Type, Cordierite-Andalusite-Bearing Capillitas Batholith, Argentina*. International Geology Review 38 (11): 1040-1053.
- Turner, A. and Schuster, R. 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, The National Academies Press. Washington DC. 675 pp.
- Universidad Nacional de Tucumán y JL&A, 2014. Informe de Relevamiento inicial. Documento N° PDC.MT.01.00.00, Revisión 00. Estudio del Complejo Hídrico Multipropósito de los Ríos Las Cañas- Gastona-Medina Programa de Estudios en el Sector Energético de la República Argentina (CAF 6567).
- Varnes, D. 1984. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Natural Hazards. UNESCO. París, Francia.
- Vargas, R. 2002. Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos Municipio de La Celia, Departamento de Risaralda. (Informe final). Pereira, Colombia
- Vergel, M. 1981. Contribución al conocimiento geológico del sector austral del Valle del Suncho, provincia de Catamarca. Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, 120 pp. Tucumán.
- Villaescusa, E. (1992). *A review and analysis of discontinuity mapping data*. 6º ANZ Conference on Mine Geomechanics. Christchurch.
- Villalón-Poulut, L., Rosabal-Domínguez, S., Beyris-Mazar, A. y Calderón-Montoya, E. 2023. Susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la zona costera y cuencas hidrográficas de la Sierra Maestra. *Minería y Geología*. 39(4): 220-234.
- Willner, A.P. 1983. Evolución metamórfica. En Aceñolaza, F., Miller, H. y Toselli, A. (eds.) *Geología de la Sierra de Ancasti*, Münsterische Forschungen zur Geologie und Paläontologie, Hefte 59: 189 - 200, Münster.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INSTITUTO MIGUEL LILLO

TESIS DE MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL

**PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA
DEL RÍO DEL CAMPO Y SU INFLUENCIA EN EL
PROYECTO DE PRESA DE EMBALSE POTRERO DEL
CLAVILLO (CATAMARCA Y TUCUMÁN, ARGENTINA)**

Maestrando
Dr. Sergio M. Nieva

Director
Dr. José Sosa Gómez

Codirectora
Mag. Elvira Guido

TRIBUNAL EXAMINADOR

Mag. Juan A. García

Dr. Marcelo S. Moyano

Dr. Jorge E. Eremchuk