



Antecedentes socio-ecológicos del SN Yerba Loca: pasado presente y futuro

Antecedentes socio-ecológicos del SN Yerba Loca: pasado presente y futuro



**ANTECEDENTES SOCIO-ECOLÓGICOS DEL
SN YERBA LOCA: PASADO PRESENTE Y FUTURO**

ISBN: 978-956-414-179-4

Diciembre 2022

Coordinación:

Fabiola Orrego M.

Rafael Ascanio V.

Edición:

Fabiola Orrego

Rosanna Ginocchio

Luz María de la Fuente

Diego Parra

Diseño y diagramación:

Verónica Zurita V.

Ilustraciones:

Oswaldo Torres

Fotografías:

Rafael Ascanio

Jean François Casale

Luz María de la Fuente

Rosanna Ginocchio

David Vásquez

Patricio Jaure

WCS/Mariana Thienel

Archivo Anglo American

Los créditos fotográficos de las figuras se indican en su respectiva leyenda.

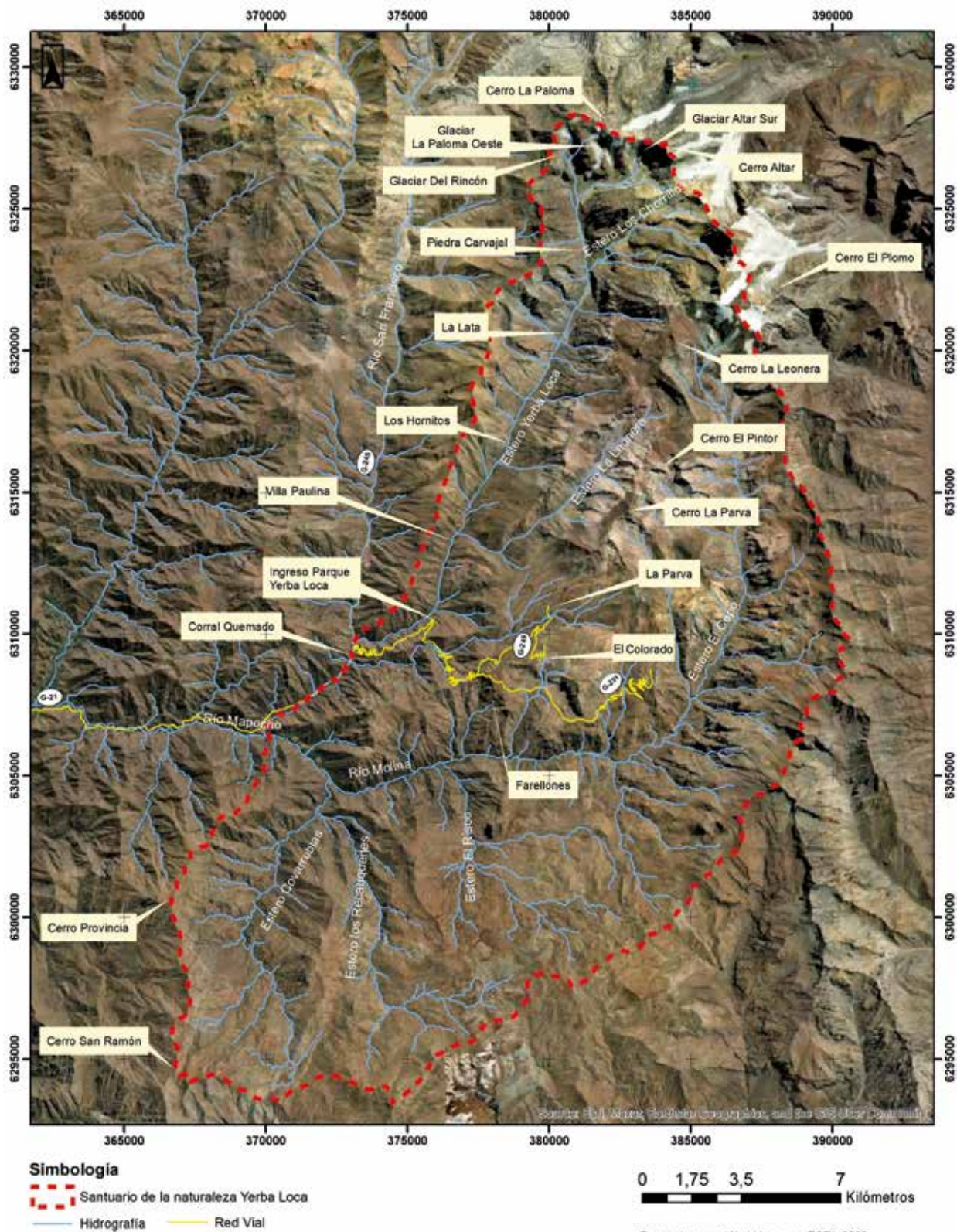
Imprenta:

Alerce Talleres Gráficos



ÍNDICE

Presentación	8	CAPÍTULO 4	86
<i>Marcela Bocchetto.</i>	<i>Página</i>	Flora de las vegas altoandinas del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL) y su relación con la calidad del agua.	<i>Página</i>
Prólogo	10	<i>Luz María de la Fuente, Josefina Hepp , Vinka Anic, Jean François Casale , Rosanna Ginocchio.</i>	
<i>Rafael Ascanio, Fabiola Orrego.</i>	<i>Página</i>		
Introducción	13	CAPÍTULO 5	112
<i>Rosanna Ginocchio, Luz María de la Fuente.</i>	<i>Página</i>	Influencia de las características químicas del suelo en la distribución altitudinal de la vegetación del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL).	<i>Página</i>
	24	<i>Rosanna Ginocchio, Vinka Anic, Jean François Casale, Luz María de la Fuente.</i>	
CAPÍTULO 1	<i>Página</i>		
Cordillera y sociedad: Historia de la ocupación humana del cajón del río Mapocho.		CAPÍTULO 6	140
<i>Pablo Camus.</i>		Creando y uniendo piezas de planificación para la acción efectiva de conservación: el caso del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca.	<i>Página</i>
CAPÍTULO 2	40	<i>Mariana Thienel , Antonieta Eguren , Nicole Püschel, Bárbara Saavedra.</i>	
Geología y Geomorfología de la cuenca del estero Yerba Loca, Chile central.	<i>Página</i>		
<i>Jorge Clavero, Waldo Pérez-Martínez, Valentina Ramírez, Benjamín Castro-Cancino, Idania Briceño-De-Urbaneja, Paulina Vidal-Páez, Alejandro Tamayo.</i>		Glosario	168
CAPÍTULO 3	64		<i>Página</i>
Recambio y anidamiento de la herpetofauna a lo largo del gradiente altitudinal del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca.	<i>Página</i>		
<i>Sergio A. Castro, Rafael Ascanio.</i>			





Antecedentes socio-ecológicos del SN Yerba Loca: pasado presente y futuro

Presentación

En Anglo American nos hemos planteado el propósito de re-imaginar la minería para mejorar la vida de las personas. Para canalizar este propósito, generamos nuestro Plan Minero Sustentable, el cual plantea grandes objetivos desafiantes en tres pilares fundamentales: contar con comunidades prósperas, ser líderes corporativos confiables y mantener un medio ambiente saludable.

Dentro del pilar Medio Ambiente Saludable, nos hemos planteado la meta de generar un impacto positivo en la conservación de la biodiversidad con miras al año 2030. Para ello, además de implementar proyectos específicos, estamos trabajando para apoyar la creación y gestión adecuada de área silvestres protegidas. En esta línea, hemos renunciado de forma voluntaria a cualquier desarrollo futuro de actividades productivas en las propiedades mineras (8.400 ha) para apoyar la creación del Parque Nacional Glaciares de Santiago.

Además, administramos una parte del Santuario de la Naturaleza Los Nogales, donde contamos con un Plan de Manejo y estamos realizando diferentes proyectos y actividades de conservación e investigación.

También apoyamos la gestión, conservación y administración de otros seis santuarios de la naturaleza, dentro de los que se encuentra el de Yerba Loca. En este último, desde 2018 apoyamos las mejoras de infraestructura para los visitantes, contribuimos a la creación de su plan de manejo y fomentamos diversas actividades de educación ambiental, dentro de las que destaca el libro de "Flora y fauna de Lo Barnechea". Así también, hemos contribuido al levantamiento de antecedentes humanos y ecológicos que han resultado centrales para entender el funcionamiento de estos ecosistemas, su historia y uso por parte de los seres humanos, y así desarrollar acciones de conservación efectiva.

Durante años hemos estudiado –junto a universidades, científicos y expertos– la zona de montaña de Lo Barnechea y sus principales cuencas. Esto nos ha permitido contar con información significativa sobre la situación de los glaciares, de los recursos hídricos y la flora y fauna que rodea a la mina Los Bronces, nuestra principal operación en Chile.

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de los diferentes trabajos realizados representan un importante cúmulo de conocimientos del más alto nivel, validados por la comunidad científica, y son un aporte a la ciencia nacional, así como a la gestión territorial. Es por esto que queremos hacerlos públicos y compartirlos con las personas, académicos y/o gestores del territorio.

Esperamos que los datos, proyecciones y propuestas descritas en esta publicación se conviertan en un insumo útil para la discusión de políticas públicas, estrategias de conservación y actividades productivas que conversen de mejor manera con la situación actual y futura de este valioso ecosistema. Sabemos que existen muchos desafíos sociales y ambientales en la zona que requieren de la participación activa de diversos actores locales y, dentro de ese panorama, este libro se presenta como una nueva capa de evidencia que nos permite comprender cómo el funcionamiento de este ecosistema cambiará en el futuro y cómo podemos tomar parte en su conservación. Esperamos que su lectura les resulte provechosa y los reencante con la naturaleza tanto como a nosotros.

Marcela Bocchetto

Gerenta de Cambio Climático y Biodiversidad
Anglo American



Prólogo

El Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL), ubicado en la zona cordillerana de la comuna de Lo Barnechea, es un área donde convergen importantes atributos naturales y humanos. Por una parte, posee una interesante historia geológica que ha generado notables gradientes geográficos y edáficos a lo largo del territorio. Solo por dar un ejemplo, el gradiente altitudinal del santuario varía entre los 1.300 a los 5.340 m s.n.m., lo que determina una altísima variabilidad climática y, por tanto, ecológica. De hecho, este territorio forma parte del *hotspot* de biodiversidad de los ecosistemas de tipo mediterráneo, con una proporción importante de especies de flora y fauna nativa y endémica.

En la actualidad, el SNYL y su entorno son áreas de gran interés para el desarrollo social y económico no solo de las comunidades residentes y visitantes de la zona, sino que para toda la población de la Región Metropolitana debido a los servicios ecosistémicos que aporta, tales como:

- Servicios de provisión, gracias a su rica historia de ganadería trashumante y minería de la plata, cobre y antiguos caminos forjados por mineros y arrieros que hoy constituyen las rutas de acceso a sectores como Los Bronces, Farellones o Valle Nevado.
- Servicios de regulación, gracias a sus reservas de agua dulce y su aporte a la calidad de aire de la Región Metropolitana.
- Servicios culturales, como la generación de espacios de educación, recreación y los atractivos turísticos dentro del territorio del santuario, entre otros.

Debido a su interés de entender el funcionamiento de los ecosistemas de montaña, su interacción histórica con las comunidades humanas, así como aportar a la conservación de la biodiversidad, Anglo American ha estudiado –junto a universidades, científicos y expertos– el área de Yerba Loca para conocer sus antecedentes sociales y ecológicos. Gracias a ello, se ha recopilado una gran cantidad de información de alta calidad que nos permite entender sus dinámicas pasadas y condiciones actuales y, a partir de ello, proyectar medidas para contribuir a su conservación en el futuro.

“Antecedentes socioecológicos del SN Yerba Loca: pasado, presente y futuro” es una publicación que busca relevar la importancia socioecológica, histórica, actual y futura del SNYL en la zona central del país. Para ello, hemos recopilado y actualizado evidencia técnica y científica de distintas áreas del conocimiento generada en los últimos años de forma directa o indirecta por Anglo American e investigadores del Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad de la Pontificia Universidad Católica de Chile para ponerla a disposición de las personas, la comunidad científica, las comunidades y el sector público. El contenido de este libro gira en torno a la historia, ecología y conservación de los ecosistemas de montaña del SNYL y su entorno. Como tal, incorpora datos, proyecciones y propuestas en ámbitos tan diversos como la planificación territorial, geología, fauna o botánica.

Más allá de los desafíos que implica presentar la mayor cantidad de datos posibles al público, hemos prestado especial atención a que la forma de narrar los valores y desafíos de estos sistemas, así como las distintas mediciones que se realizaron en cada sitio sean claras y útiles para quien las lee. Sin duda, deseamos aportar con la mayor cantidad de información, pero también hemos puesto especial esfuerzo en que esta sea fácil de entender, y que represente un insumo útil para la proyección de investigación en las distintas áreas del conocimiento que aquí presentan sus resultados.

El contenido de esta publicación integra evidencia socioambiental y científica, tomando como punto focal la presencia humana en el territorio. Inicia con la descripción ambiental del área (introducción) y la historia de la ocupación humana en Yerba Loca y la cuenca alta del río Mapocho desde épocas precolombinas hasta mediados del siglo XX, culminando con la creación del SNYL (Capítulo 1). En estos apartados se presta especial atención a la ocupación humana del territorio, así como la relación humano-naturaleza y el aprovechamiento de los recursos naturales en el territorio.

En el Capítulo 2 se presentan los antecedentes abióticos del SNYL. Específicamente, se hace un interesante resumen de la historia geológica de los últimos 40 millones de años de la evolución andina, tanto del volcanismo y sedimentación como de la tectónica y alzamiento de la cordillera, aspectos fundamentales para entender la génesis, evolución y estado actual del área.

Posteriormente, en los Capítulos 3, 4 y 5, se exponen los antecedentes bióticos (flora y fauna) y su relación con las características y condiciones abióticas (clima, altitud, edafología, etc.), siempre en conversación con elementos humanos o del paisaje. En particular, en el Capítulo 3 se analizan los patrones ecológicos existentes detrás de la distribución altitudinal de los reptiles (diversidad alfa y beta). Luego, en el Capítulo 4, se muestra la relación entre la calidad de agua, los depósitos de cobre presentes naturalmente en el área y la estructuración de las comunidades vegetales. Por su parte, el Capítulo 5 muestra un análisis entre las características químicas del suelo y la distribución altitudinal de la flora.

Finalmente, en el Capítulo 6, se expone el caso de estudio para la conservación efectiva del SNYL. En este, se aborda el desafío de la conservación biológica en la zona y se muestran los principales resultados, experiencias y aprendizajes del proceso de elaboración de los planes de manejo de tres predios que forman parte del Santuario.

Todos estos antecedentes se han dispuestos de forma tal de establecer un hilo entre las características históricas de la zona, sus atributos abióticos, las especies que lo habitan y las comunidades humanas que lo utilizan y se encargan de su protección en el presente y hacia el futuro.

Esperamos que los datos, proyecciones y propuestas descritas en esta publicación se conviertan en un insumo útil para la discusión de políticas públicas, estrategias de conservación y actividades productivas que conversen de mejor manera con la situación actual y futura del Santuario y su entorno.

Sabemos que existen muchos desafíos sociales y ambientales en la zona que requieren de la participación activa de diversos actores, y dentro de ese panorama, este libro se incorpora como una nueva herramienta. Por tanto, esperamos que su lectura les resulte provechosa y los reencante con esta magnífica área.

Rafael Ascanio V.

Gerencia de Cambio Climático y Biodiversidad
Anglo American.

Fabiola Orrego M.

Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad
Pontificia Universidad Católica de Chile.







Introducción

Santuario de la Naturaleza Yerba Loca

Rosanna Ginocchio ^{1,2*}, Luz María de la Fuente ¹

1. Center of Applied Ecology and Sustainability, Pontificia Universidad Católica de Chile. Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 340, Santiago, Chile.
2. Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.

*rginocch@uc.cl

El Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL) está ubicado en la comuna de Lo Barnechea (Región Metropolitana de Santiago) al nororiente de la ciudad de Santiago. Tiene una superficie de 39.029 ha y está constituido por predios de origen público y privado, además de un área urbana que comprende cuatro

centros de esquí (Farellones, El Colorado, La Parva y Valle Nevado). Los principales predios privados que forman parte del SNYL son el fundo Santa Lucía, el fundo Santa Matilde y el fundo Lo Encañado¹. Por otro lado, el Parque Yerba Loca es un predio público de 11.029 hectáreas¹, de propiedad de la Municipalidad de Lo Barnechea y actualmente administrado por la Corporación Robles de Cantillana. Tanto el Parque como el Santuario, deben su nombre al estero Yerba Loca. Este nombre deriva de una planta herbácea perenne llamada Yerba loca (*Astragalus looseri* spp.), perteneciente a la familia de las fabáceas. Varias de ellas crecen asociadas a cursos de agua y vegas entre los 1.800 y los 3.200 m s.n.m. y posee alcaloides en sus tejidos, los que son tóxicos para el ganado (Figura 1).



Figura 1. Cuenca del estero Yerba Loca. Se observa el estero, laderas abruptas y depósitos de remoción en masa (izquierda). Inflorescencia de la planta Yerba Loca (*Astragalus* sp.) en el SNYL (derecha).

1. Thienel et al., capítulo 6.



Esta cuenca constituye gran parte del SNYL y ha servido como sitio de estudio de diversas investigaciones, como varias de las presentadas en este libro. Esta cuenca se caracteriza por su fuerte gradiente altitudinal, que va entre los 1.350 y 5.380 m s.n.m.

El estero Yerba Loca tiene una longitud de 22 km y fluye por una estrecha cuenca de origen glaciar que se extiende de noreste a suroeste². Nace en el cerro La Paloma y confluye en el río San Francisco, el cual al unirse al río Molina, proveniente del sector oriente del SNYL, dan origen al río Mapocho. A lo largo del estero Yerba Loca tributan los esteros La Leonera y Chorrillos del Plomo.

Esta cuenca constituye gran parte del SNYL y ha servido como sitio de estudio de diversas investigaciones, como varias de las presentadas en este libro. Esta cuenca se caracteriza por su fuerte gradiente altitudinal, que va entre los 1.350 y 5.380 m s.n.m.². La geomorfología de esta cuenca es el resultado de eventos volcánicos, magmáticos y tectónicos recientes, con una evolución definida por procesos glaciares y de remociones en masa, los cuales han derivado en el característico paisaje de cordillera, con laderas abruptas y presencia de deslizamientos que se distribuyen en los valles a lo largo de la cuenca del estero². La evolución geológica y geomorfológica que han definido el paisaje de la cuenca del estero Yerba Loca se describe en el Capítulo 2.

En el extremo norte de la cuenca del estero Yerba Loca se encuentran los cerros La Paloma (4.910 m s.n.m.) y Altar (5.180 m s.n.m.), en el oeste el cordón de la Sierra Bella y hacia el este los cerros Leonera (4.954 m s.n.m.), Pintor (4.180 m s.n.m.) y La Parva (4.050 m s.n.m.). Los glaciares principales de la cuenca son La Paloma, Del Rincón, Altar Sur y Piedra Carvajal².

En los ecosistemas de alta montaña ocurren variaciones en el clima con el aumento de la altitud. Por ejemplo, las precipitaciones de tipo agua cambian a precipitaciones tipo nieve y granizo, disminuyen las temperaturas y aumenta la radiación ultravioleta (Brown et al., 1998; Cavieres y Arroyo, 1999; Cavieres et al., 2000; Arroyo et al., 2002). Con estas limitaciones ocurre un recambio altitudinal de especies y la disminución altitudinal en la biodiversidad, la cobertura vegetal del suelo y la altura de la vegetación, lo cual refleja las distintas capacidades de los seres vivos para tolerar las temperaturas extremas, el viento, la capa de nieve, la escasa disponibilidad de agua y la presencia de permafrost (Squeo et al., 1996). Bajo estas condiciones y a lo largo de este gradiente altitudinal, se reconocen variaciones tanto en la composición como en la abundancia de distintas especies de flora y fauna.

2. Clavero et al., capítulo 2.



Figura 2. Fauna del SNYL. Especies de reptiles, culebra de cola larga (*Philodryas chamissonis*) (arriba) y lagartija (*Liolaemus nigroviridis*) (centro). Cometocino (*Phrygilus gayi*) en la vega La Lata (abajo).

Para la fauna, estos ambientes representan un importante desafío, condicionado por las extremas condiciones invernales. En el caso de animales con mayor capacidad de desplazamiento, como aves y grandes mamíferos, se producen migraciones altitudinales, mientras que en el caso de aquellos con menor capacidad de dispersión se han desarrollado estados metabólicos especiales, como la hibernación de anfibios y reptiles (Lobos et al., 2021). El SNYL representa para este último grupo un importante centro de riqueza y endemismo (Andrade-Díaz et al., 2017), donde es posible encontrar distintas especies de lagartos, culebras (Figura 2) y lagartijas (Figura 2), especialmente del género *Liolaemus*³. De esta forma, la cuenca del estero Yerba Loca se consideró un interesante sitio de estudio de reptiles a lo largo de su gradiente altitudinal y cuyos resultados se detallan en el Capítulo 3 de este libro. Adicionalmente, es posible encontrar, pero en menor variedad, anfibios, los cuales habitan preferentemente en vegas, quebradas y arroyos, siendo el más numeroso el sapo espinoso (*Rhinella spinulosa*).

Las aves habitan diversos hábitats, como vegas o esteros, zonas de quebradas y matorrales. Entre las aves que se pueden avistar están el minero cordillerano (*Geositta rufipennis*), el cometocino (*Phrygilus gayi*) (Figura 2), el chincol (*Zonotrichia capensis*) y el picaflor cordillerano (*Oreotrochilus leucopleurus*); a gran altura en las quebradas rocosas se puede apreciar planeando al cóndor (*Vultur gryphus*), que destaca por su gran envergadura. En cuanto a los mamíferos, predominan los de menor tamaño, llamados micromamíferos, como los roedores. De las especies más pequeñas se pueden avistar durante la noche el ratón oliváceo (*Abrothrix olivaceus*) y el lauchón orejudo (*Phyllotis darwini*). Sin embargo, se pueden encontrar especies de mayor tamaño como el zorro culpeo (*Lycalopex culpaeus*). También existe una alta presencia de animales domésticos, como cabras, vacas, burros y caballos, además de conejos y liebres (Anglo American, 2018).

La flora altoandina de esta zona tiene un alto endemismo, derivada de su evolución aislada en cuencas de ríos o esteros separadas por grandes cerros y de la gran heterogeneidad ambiental, particularmente debido a las características climáticas y **edáficas**, resultantes de la compleja topografía, geología y mineralogía de los Andes centrales. La gran

3. Castro y Ascanio, capítulo 3.

biodiversidad de especies nativas y endémicas de plantas (Figura 3), estimada en cerca de 500 taxones, se dispone en una superficie territorial muy pequeña de la cuenca del estero Yerba Loca (0,7% de la superficie total de la Región Metropolitana de Santiago), pero que corresponde al 34% de la flora nativa de la Región Metropolitana (Arroyo et al., 2002).

Dentro del SNYL, la zona altoandina corresponde a la faja altitudinal que va desde el límite de la vegetación arbórea (sobre los 2.000 m s.n.m.) hasta el fin de la vegetación en las altas cumbres (aprox. 3.600 m s.n.m.) (Cavieres et al., 2000). Bajo los 2.000 m s.n.m. los tipos de vegetación incluyen un matorral esclerófilo mediterráneo típico de baja altitud y matorral suculento (900-1.500 m s.n.m.) y un bosque esclerófilo montano dominado por *Kageneckia angustifolia* (1.600-2.000 m s.n.m.) (Arroyo et al., 2002). Sobre los 2.000 m s.n.m., tal como describiera el botánico chileno Gualterio Looser en 1932 después de una excursión botánica y zoológica realizada a la cordillera al oriente de Santiago con la cooperación de la Compañía Minera Disputada de Las Condes, "... Allí [2.000 m s.n.m.] comienza la zona netamente cordillerana que llega hasta las nieves eternas". Él propuso llamar a la zona entre los 2.000 y los 2.200 m s.n.m. zona subandina y a la superior como zona andina (Looser, 1932). Sin embargo, actualmente se describen tres pisos vegetacionales en esta faja altitudinal (Cavieres et al., 2000): el piso subandino entre los 2.000 y los 2.500 m s.n.m., dominado por arbustos y herbáceas anuales, el piso andino entre los 2.500 y los 3.000 m s.n.m., con dominancia de arbustos en cojín y hierbas perennes en roseta, y el piso andino superior entre los 3.000 y los 3.800 m s.n.m., dominado por hierbas perennes en roseta (Figura 4). Además, en los pisos andino y andino superior del SNYL es posible reconocer la presencia de humedales o vegas altoandinas. Las vegas altoandinas corresponden a formaciones vegetales asociadas a cursos de agua (Arroyo et al., 2002) y que por sus características de dependencia principalmente de factores hidrológicos y edáficos, más que de las condiciones climáticas del lugar (Escobar et al., 2021), han sido descritas como formaciones vegetales azonales (Squeo et al., 2006). Las principales vegas en la cuenca del estero Yerba Loca son La Lata a 2.795 m s.n.m., Piedra Carvajal a 3.250 m s.n.m. y Chorrillos del Plomo a 3.270 m s.n.m. (Ginocchio et al., 2008).

Aunque los gradientes climáticos y de radiación

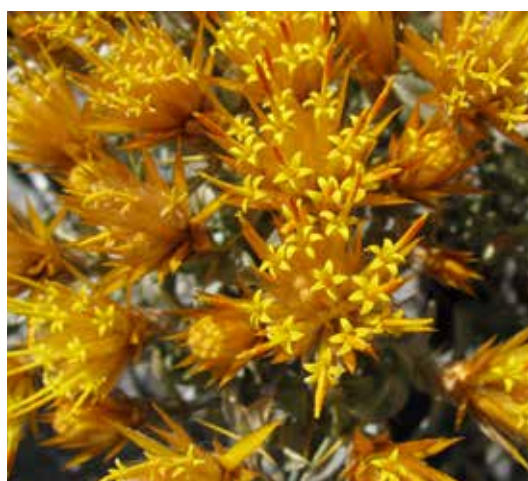
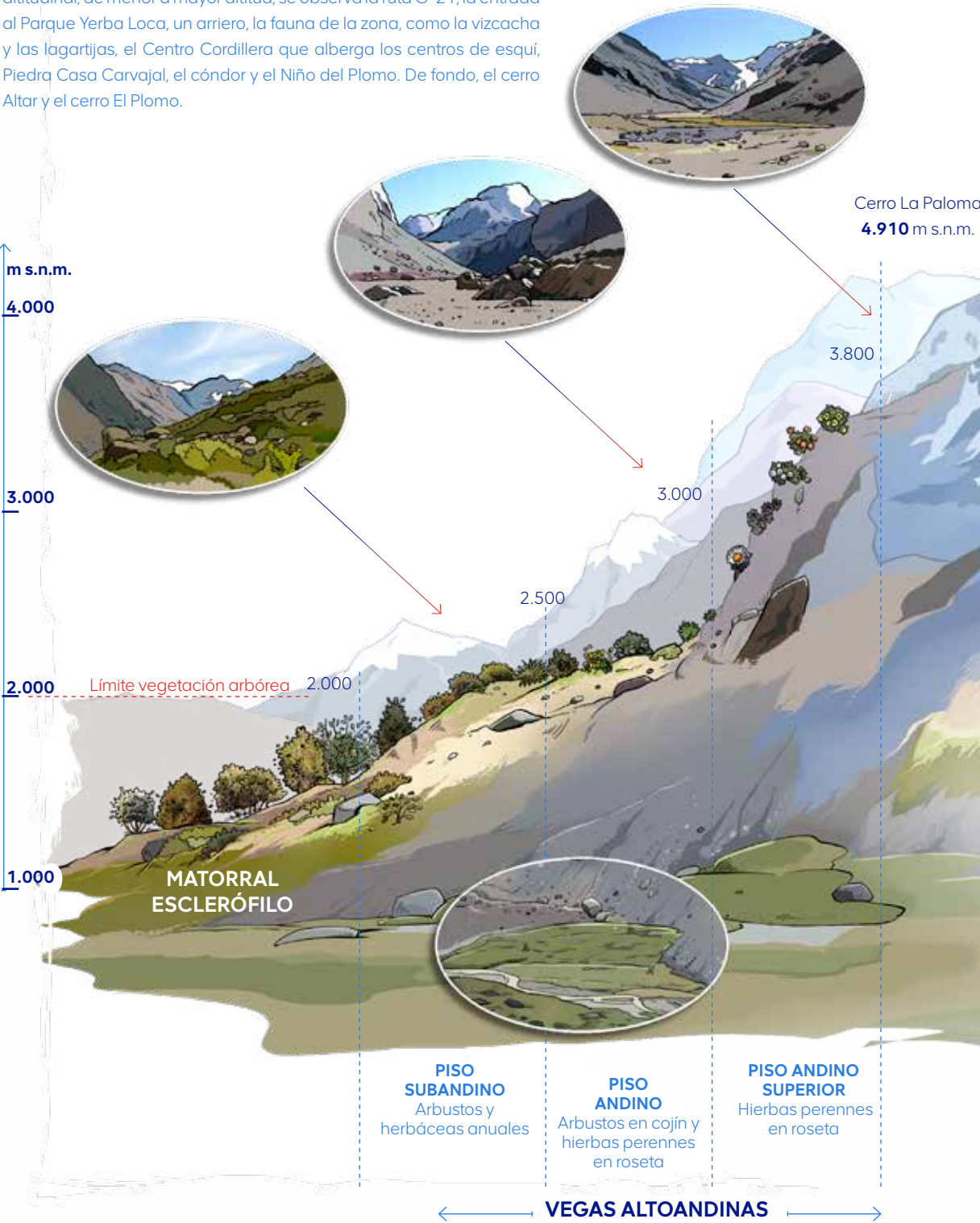


Figura 3. Flora del SNYL. *Gaultheria caespitosa* (arriba), *Azorella madreporica* (centro) y *Chuquiraga oppositifolia* (abajo).

Figura 4. Flora, fauna y lugares icónicos del SNYL. Se representan los pisos altitudinales de vegetación (izquierda). En un gradiente altitudinal, de menor a mayor altitud, se observa la ruta G-21, la entrada al Parque Yerba Loca, un arriero, la fauna de la zona, como la vizcachita y las lagartijas, el Centro Cordillera que alberga los centros de esquí, Piedra Casa Carvajal, el cóndor y el Niño del Plomo. De fondo, el cerro Altar y el cerro El Plomo.





Fuente: Elaboración propia

ultravioleta han sido tradicionalmente descritos como los factores más importantes en determinar los gradientes altitudinales de la vegetación en los ecosistemas de montaña, algunos estudios han demostrado que la heterogeneidad ambiental asociada a la variación en la topografía y las características del sustrato, tales como la estabilidad y la granulometría, el contenido de materia orgánica y de nutrientes, la acidez y el contenido de minerales, también pueden afectar la distribución espacial y la abundancia de las plantas en los ecosistemas montañosos (Squeo et al., 2006; Körner, 2003; Anic et al., 2010). En el caso de los ecosistemas cordilleranos andinos de Santiago, la vegetación ha tenido una historia evolutiva ligada no sólo a períodos de glaciación y los cambios tectónicos, sino que también al desarrollo de **depósitos cupríferos neógenos**, representados actualmente por una franja de **pórfidos de cobre** (Deckart et al., 2014). El SNYL se ubica en el extremo sur de este megadepósito cuprífero, conocido como Río Blanco-Los Bronces-Yerba Loca, por lo que existen importantes mineralizaciones e impregnaciones de cobre aún no explotadas en el sector altoandino de La Paloma – Los Sulfatos, ubicado al sureste del estero Yerba Loca (Bassi, 1982). En este sector afloran mineralizaciones superficiales de calcopirita y pirita primarias y **andesitas porfídicas**, determinando valores anómalos de cobre y de otros metales en los suelos superficiales y en las aguas de drenaje de algunas quebradas (Arias y Cruzat, 1974; Henríquez, 1974), las que también influenciaron los procesos evolutivos de la vegetación altoandina en desarrollo.

La importancia del valor ecológico (p. ej. biodiversidad, servicios ecosistémicos entre otros) de las formaciones montañosas en Chile, como la zona de la cordillera andina de Santiago en general y el SNYL en particular, ha comenzado a ser considerada por los distintos actores a nivel nacional sólo en las últimas décadas (Cavieres et al., 2021). Sin embargo, el valor ecológico que históricamente nos han brindado ha sido descrito con bastante anterioridad en el ámbito científico (p. ej., Looser, 1932; Hellmich, 1934; Reiche, 1934-1937). Por ejemplo, se han realizado estudios científicos que demuestran la importancia de los endemismos de las plantas y las relaciones históricas y biogeográficas de la vegetación (p. ej. Squeo et al., 1998; Teillier, 1998; Weigend et al., 2002; Young et al., 2002), que evidencian interacciones biológicas entre las especies, tales como el efecto nodriza de algunas plantas en cojín (p. ej. Arroyo et al., 2003; Cavieres et

al., 2008), la importancia de los polinizadores para la reproducción (p. ej. Arroyo y Uslar, 1993; Pérez et al., 2013; Arroyo et al., 2020), la tolerancia a la sequía por frío en plantas (p. ej. Sierra-Almeida et al., 2016), los efectos de la invasión de plantas exóticas (p. ej. Fuentes-Lillo y Pauchard, 2019), la influencia de calidad del agua en la riqueza y abundancia de especies vegetales en vegas altoandinas (Ginocchio et al., 2008) y la influencia de las características químicas del suelo en la distribución de las plantas altoandinas (Anic et al., 2010), entre otras. Los principales resultados de estas dos últimas publicaciones, correspondientes a un estudio científico realizado entre 2005 y 2008 en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, se presentan en los capítulos 4 y 5 de la presente publicación y entregan los únicos estudios realizados sobre la influencia de la calidad química del suelo y de las aguas en la riqueza y abundancia de la flora y vegetación altoandina del SNYL, actualizado en base al nuevo conocimiento que se ha recopilado 10 años después. A partir de la evidencia científica es que se considera que las formaciones montañosas han tenido un papel clave en el origen y la mantención de la diversidad biológica del país (Antonelli et al., 2009; Aagesen et al., 2012; Andrade-Díaz et al., 2017).

A pesar de que se ha ido acumulando evidencia sobre los atributos ecológicos, se reconoce que poco comprendemos acerca de las funciones y servicios ecosistémicos de estos ecosistemas de montaña de la zona central del país, aspectos necesarios de esclarecer al momento de promover su conservación y/o uso sustentable (MEA, 2005; Vásquez-Lavín y Ginocchio, 2021). Este conocimiento cobra aún mayor relevancia al considerar que estos ecosistemas y su importante biodiversidad podrían estar en riesgo a causa del cambio climático y de los patrones de ocupación y cambio en el uso de la tierra (MEA, 2005; Cavieres et al., 2021; Vásquez-Lavín y Ginocchio, 2021). Por ello, la gestión de conservación dentro de áreas protegidas es fundamental para la conservación de la biodiversidad en el largo plazo, donde la efectividad de la gestión dependerá de una serie de factores, entre ellos la habilidad de los gestores privados y públicos de identificar tareas, reconocer competencias y lograr activar tareas integradas y colaborativas en favor del objetivo común de conservación⁴. El detalle de la propuesta de planificación para una acción efectiva de conservación dentro del SNYL se encuentra en el Capítulo 6.

El SNYL corresponde a un Área de Preservación

4. Thienel et al., capítulo 6.



Figura 5. Vestigios históricos en el SNYL. Implementos usados para la extracción de mineral (izquierda). Casa Piedra Carvajal en la vega Piedra Carvajal (derecha).

A pesar de que se ha ido acumulando evidencia sobre los atributos ecológicos, se reconoce que poco comprendemos acerca de las funciones y servicios ecosistémicos de estos ecosistemas de montaña de la zona central del país, aspectos necesarios de esclarecer al momento de promover su conservación y/o uso sustentable (MEA, 2005; Vásquez-Lavín y Ginocchio, 2021).

Ecológica con un valor excepcional para la conservación de la biodiversidad de flora y fauna nativa y endémica de la zona y para la contribución hídrica que suponen las cabeceras de cuencas existentes en el área. De esta forma, aporta directamente a la protección de especies y ecosistemas amenazados, pues en el santuario se han registrado alrededor de veinte especies que están clasificadas en alguna categoría de amenaza. Estas características especiales han determinado que el SNYL se encuentre dentro del *hotspot* con prioridad de conservación descrito para Chile central (Reid, 1998) y del Sitio Prioritario para la conservación de la biodiversidad Alto de la Cuenca del Mapocho. Sin embargo, los usos permitidos para el

territorio del SNYL son científicos, culturales, educativos, recreacionales, deportivos y turísticos, los que sintetizan tanto la historia natural como la historia humana de la cordillera andina de Santiago. Esta última se inicia con las primeras ocupaciones humanas en la cuenca del río Mapocho y considera una serie de ciclos de ocupación precolombino, ganadero y minero (Figura 5), y como estas sociedades se relacionaron en el tiempo con el entorno cordillerano⁵. La historia de la ocupación humana en la cuenca alta del río Mapocho, particularmente en el SNYL, da inicio a este libro con el Capítulo 1, que narra la historia entre nuestra sociedad y la cordillera.

5. Camus, capítulo 1.

REFERENCIAS

- Aagesen, L., Bena M. J., Nomdedeu, S., Panizza, A., López, R. P., y Zuloaga, F. O. (2012). Areas of endemism in the southern central Andes. *Darwiniana*, 50, 218-251. <http://dx.doi.org/10.2307/41825710>
- Andrade-Díaz, M. S., Hibbard, T. N., y Díaz-Gómez, J. M. (2017). Identifying endemism areas: An example using neotropical lizards. *South American Journal of Herpetology*, 12, 61-75. <https://doi.org/10.2994/SAJH-D-16-00038.1>
- Anic, V., Hinojosa, L. F., Díaz-Forestier, J., Bustamante, E., de la Fuente, L. M., Casale, J. F., de la Harpe, J. P., Montenegro, G., y Ginocchio, R. (2010). Influence of soil chemical variables and altitude on the distribution of high-alpine plants: the case of the Andes of central Chile. *Artic, Antarctic, and Alpine Research*, 42, 152-163.
- Anglo American. (2018). *Flora y Fauna Lo Barnechea*. Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, Municipalidad de Lo Barnechea.
- Antonelli, A., Nylander, J. A. A., Persson C., y Sanmartín, I. (2009). Tracing the impact of the Andean uplift on Neotropical plant evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 9749-9754.
- Arias, J., y Cruzat, A. (1974). *Estudio geoquímico en el área de la mina Río Blanco-Andina, Provincia de Aconcagua*. IIG & Compañía Minera Andina, Santiago.
- Arroyo, M. T. K., y Uslar, P. (1993). Breeding systems in a temperate mediterranean-type climate montane sclerophyllous forest in central Chile. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 111, 83-102.
- Arroyo, M. T. K., Marticorena, C., Matthei, O., Muñoz, M., y Pliscoff, P. (2002). Analysis of the contribution and efficiency of the Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, 33° S in protecting the regional vascular plant flora (Metropolitan and Fifth regions of Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 75, 767-792.
- Arroyo, M. T. K., Cavieres, L. A., Peñaloza, A., y Arroyo-Kalin, M. A. (2003). Positive associations between the cushion plant *Azorella monantha* (Apiaceae) and alpine plant species in the Chilean Patagonian Andes. *Plant Ecology*, 169, 121-129.
- Bassi, H. G. (1982). *Geología y potencialidad minera del distrito cuprífero Bronces-Yerba Loca, provincia de Santiago, Chile*. Actas Quinto Congreso Latinoamericano de Geología, Argentina III, 111-145.
- Brown, J. H., Lomolino, M. V., y Brown, T. E. (1998). *Biogeography*. Sinauer Associates, Inc. Publishers. Sunderland, Massachusetts, Estados Unidos.
- Cavieres, L. A., y Arroyo, M. T. K. (1999). Lapse-rate in the Río Molina valley, province of Santiago, central Chile (33°S). *Revista Geográfica Terra Australis*, 44, 79-86.
- Cavieres, L. A., Peñaloza, A., y Arroyo, M. T. K. (2000). Altitudinal vegetation belts in the high-Andes of central Chile (33°S). *Revista Chilena de Historia Natural*, 73, 331-344.
- Cavieres, L. A., Quiroz, C. L., y Molina-Montenegro, M. A. (2008). Facilitation of the non-native *Taraxacum officinale* by native nurse cushion species in the high Andes of Central Chile: are there differences between nurses? *Functional Ecology*, 22, 148-156.
- Cavieres, L. C., Valencia, G., y Hernández, C. (2021). Calentamiento global y sus efectos en plantas de alta-montaña en Chile central: una revisión. *Ecosistemas*, 30, 2179.
- Deckart, K., Silva, W., Spröhnle, C., y Vela, I. (2014). Timing and duration of hydrothermal activity at the Los Bronces porphyry cluster: an update. *Mineralium Deposita*, 49, 535-546.
- Escobar, M., Correa, D., Girón, G., Faúndez, L., y Saldivia, P. (2021). Flora y vegetación de la porción alta de la cuenca del estero Ortiga, S.N. Los Nogales, Región Metropolitana. En R. Ascanio, F. Orrego, R. Ginocchio, y L. M. de la Fuente. (Eds.), *Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho* (pp. 114-141). Alerce Talleres Gráficos. Santiago, Chile.
- Fuentes-Lillo, E., y Pauchard, A. (2019). Invasiones en montañas: ¿Cuánto hemos avanzado en los últimos 10 años y cuáles son los desafíos para los ecosistemas de los Andes? *Gayana Botánica*, 76(2), 141-155. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432019000200141>
- Ginocchio, R., Hepp, J. A., Bustamante, E., Silva, Y., de la Fuente, L. M., Casale, J. F., de la Harpe, J. P., Urrestarazu, P., Anic, V., y Montenegro, G. (2008). Importance of water quality on plant abundance and diversity in high-alpine meadows of the Yerba Loca Natural Sanctuary at the Andes of north-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81, 469-488.

- Hellmich, W. (1934). Die Eidechsen Chiles insbesondere die Gattung *Liolaemus*. Nach den Sammlungen Goetsch-Hellmich. Abhandlungen. Bayerischen Akademie der Wissenschaften. *Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse*, 24, 1-140.
- Henríquez, H. (1974). *Prospección hidrogeoquímica en el sector adyacente a la mina Río Blanco, Compañía Minera Andina S.A., Provincia de Aconcagua, Chile*. IIG & Compañía Minera Andina, Santiago.
- Körner, C. (2003). *Alpine plant life-Functional plant ecology of high mountain ecosystems*. Springer. Berlin, Alemania.
- Lobos, G., Tapia, G., Alzamora, A., Rebolledo, N., Salinas, H., Trujillos, J. C., Girón, G., y Ascanio, R. (2021). Antecedentes ecológicos del Puma *Puma concolor* (Linneo 1771) en ambientes altoandinos de Chile central. En R. Ascanio, F. Orrego, R. Ginocchio, y L. M. de la Fuente. (Eds.), *Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho* (pp. 142-157). Alerce Talleres Gráficos. Santiago, Chile.
- Looser, G. (1932). Excursión botánica y zoológica a la alta Cordillera de Las Condes. *Anales de la Universidad de Chile*, 6, 275-302. [Doi:10.5354/0717-8883](https://doi.org/10.5354/0717-8883)
- MEA (Millenium Ecosystem Assessment). (2005). *Ecosystems and human well-being: Current state and trends*. DC Island Press. Washington, Estados Unidos.
- Pérez, F., León, C., y Muñoz, T. (2013). How variable is delayed selfing in a fluctuating pollinator environment? A comparison between delayed selfing and a pollinator-dependent *Schizanthus* species of the high Andes. *Evolutionary Ecology*, 27, 911-922.
- Reiche, K. (1934-1937). *Geografía botánica de Chile*. Imprenta Universitaria. Santiago, Chile.
- Reid, W. V. (1998). Hotspots of biodiversity. *TREE*, 13, 275-280.
- Sierra-Almeida, A., Reyes-Bahamonde, C., y Cavieres, L. A. (2016). Drought increases the freezing resistance of high-elevation plants of the Central Chilean Andes. *Oecologia*, 181(4), 1011-1023. <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3622-5>
- Squeo, F. A., Rada, F., García, C., Ponce, M., Rojas, A., y Gutiérrez, J. R. (2006). Productividad y diversidad florística de la vega Tambo, Cordillera de Doña Ana. En P. J. Cepeda. (Ed.), *Geología de los Andes desérticos. La alta montaña del Valle del Elqui* (pp. 325-351). Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Squeo, F. A., Cavieres, L., Arancio, G., Novoa, J., Matthei, O., Marticorena, C., Rodríguez, C., Arroyo, M. T. K., y Muñoz, M. (1998). Biodiversidad vegetal de Antofagasta. *Revista Chilena de Historia Natural*, 71, 571-591.
- SSqueo, F. A., Rada, F., García, C., Ponce, M., Rojas, A., y Azócar, A. (1996). Cold resistance mechanisms in high desert Andean plants. *Oecologia*, 105, 552-555.
- Teillier, S. (1998). Flora y vegetación alto-andina del área de Collahuasi-Salar de Coposa, Andes del norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 71, 313-329.
- Vásquez-Lavín, F., y Ginocchio, R. (2021). Contribución de los ecosistemas de montaña al bienestar humano. En R. Ascanio, F. Orrego, R. Ginocchio, y L. M. de la Fuente. (Eds.), *Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho* (pp. 11-23). Alerce Talleres Gráficos. Santiago, Chile.
- Weigend, M., Mohr, O., y Motley, T. J. (2002). Phylogeny and classification of the genus *Ribes* (Grossulariaceae) based on 5S-NTS sequences and morphological and anatomical data. *Botanische Jahrbücher für Systematik, Pflanzengeschichte und Pflanzengeographie*, 163-182.
- Young, K. R., Ulloa, C. U., Luteyn, J. L., y Knapp, S. (2002). Plant evolution and endemism in Andean South America: an introduction. *The Botanical Review*, 68(1), 4-21.





Capítulo 1

Cordillera y sociedad: Historia de la ocupación humana del cajón del río Mapocho

Pablo Camus^{1*}

1. Instituto de Historia. Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política. Pontificia Universidad Católica de Chile. Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago.
*pcamusg@uc.cl

RESUMEN

Este capítulo sintetiza estudios, documentos y otras fuentes de información relacionadas con la historia de la ocupación humana del cajón del río Mapocho. A partir de la documentación recabada se realiza un análisis de los ciclos de ocupación precolombino, ganadero y minero, enfatizando las interacciones entre sociedad, economía y ambiente cordillerano. Los resultados demuestran una amplia evidencia de ocupación humana que se remonta a tiempos inmemoriales. Se analizan las diferentes formas políticas, económicas y sociales en que estas sociedades concibieron en el tiempo su relación con el entorno y las distintas huellas, vestigios y memorias que estos modos de ocupación han dejado en el cajón del río Mapocho y en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL) en particular.

La relevancia de este capítulo sobre la ocupación humana de la precordillera del cajón del río Mapocho es comprender como los distintos ciclos de poblamiento han dejado una huella hasta el presente que puede contextualizar y orientar acciones futuras basadas en el conocimiento de patrimonio material e inmaterial existente en una zona de alto interés humano y ecológico.

1. LA OCUPACIÓN PRECOLOMBINA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO MAPOCHO

1.1. Cazadores, recolectores y alfareros

Los territorios de Chile central fueron habitados desde tiempos inmemoriales por diversos grupos cazadores-recolectores con “sistemas de vida de alta movilidad espacial”. Con el transcurso de los milenios algunas de estas agrupaciones fueron “reduciendo la amplitud de sus movimientos”, cimentando lentamente formas de vida más sedentarias al implementar nuevas tecnologías como el cultivo de plantas y la alfarería. Hacia el inicio del primer milenio antes de Cristo, período denominado “alfarero temprano”, la subsistencia se basaba aun en la utilización de productos silvestres como frutillas, peumo, lúculo, leguminosas, gramíneas y especialmente quínoa, además de la caza de guanacos. Pero hacia el 200 d. C. distintos grupos locales optaron por un modo de vida predominantemente hortícola, mientras que otros continuaron ligados a la caza y la recolección, especialmente en los espacios cordilleranos (Falabella et al., 2017).

Una de las particularidades de la ocupación humana de Chile central es la diversidad y heterogeneidad cultural en términos de expresiones materiales, patrones de asentamiento, prácticas de subsistencia y de funebria existentes entre las distintas identidades grupales que habitaban el territorio. De acuerdo con la investigación arqueológica estos grupos no conformaron una entidad política centralizada, sino que se constituyeron como sociedades archipiélago, con unidades de base y caseríos dispersos relativamente autosuficientes y con formas de integración fluidas, sin presentar jerarquías sociales institucionalizadas, como lo demuestran los complejos arqueológicos formados

por las agrupaciones humanas denominadas Llolleo y Bato (Falabella et al., 2017).

De acuerdo con Rubén Stehberg, la productividad de los ambientes y espacios cordilleranos eran de interés para los diversos grupos trashumantes que intentaban subsistir en aquellos parajes. Entre los 600 y 700 m s.n.m. internándose por los valles y cajones y hasta los 1.700 m s.n.m. el paisaje estaba constituido por especies de litre, quillay, boldos, maitenes, colliguay y maquis. En los claros crecían matorrales y gramíneas de marcado desarrollo primaveral capaces de suministrar frutos silvestres comestibles, plantas de recolección, madera y leña para los inviernos. El bosque cobijaba diversas especies de aves y de roedores comestibles, junto con especies de caza mayor. Entre los 1.700 y 2.000 - 2.300 m s.n.m. la vegetación estaba constituida por matorrales achaparrados que proveían de frutos comestibles, leña y buenos cotos de caza. Entre los 2.000 y 2.800 m s.n.m. la vegetación se localizaba solo en el fondo de los valles o en lugares protegidos. No obstante, la cubierta vegetal de tipo herbácea, con gran desarrollo en el verano, era capaz de sostener una masa ganadera abundante una vez retiradas las nieves. Entre los 2.400 y 3.800 m s.n.m., las especies vegetales predominantes eran las llaretas, capaces de proporcionar fuego abundante y durable que permitía soportar el frío y desarrollar labores relacionadas con el cuidado de animales y la caza. Además, en esta área, la masa ganadera debió ser abundante ya que para los camélidos su mejor biotopo lo constituyen las vegas que se extienden hasta los 3.500 metros de altitud (Stehberg, 1980a).

La ubicación de los asentamientos cerca de los pasos transcordilleranos y de los recursos clave hace probable que estos grupos hayan participado de circuitos más amplios de movilidad e intercambio, accediendo a bienes de zonas ecológicas más bajas (Falabella et al., 2017). El clima templado con estación seca prolongada agotaba los pastos del valle, obligando a desplazar las tropillas de llamas a zonas de media montaña, donde se hallaban las veranadas. Los cazadores-recolectores que se desplazaban al interior del cajón aprovechaban las prolongaciones transversales de la cordillera y la existencia de una sucesión de vegas y veranadas.

Las excavaciones estratigráficas realizadas en el Complejo Arrayán, compuesto por los sitios Novillo Muerto y Los Llanos, demuestran la existencia de una ocupación pre cerámica tardía, constituida por bandas

de pastores y de cazadores de camélidos (Stehberg, 1980b). El asentamiento Los Llanos, de alrededor del 400 d. C., presentó vínculos con el horizonte alfarero central y el complejo Molle. Alrededor del año 1000 d. C. fueron desplazados por grupos portadores de la tradición cerámica perteneciente al Complejo Aconcagua. Las evidencias de fauna encontradas demostraron una economía de caza-recolección-pastoreo combinadas con relaciones de intercambio con el valle durante el período Aconcagua. La excavación de Novillo Muerto demostró la complejidad y diversidad cultural de los asentamientos de la precordillera del cajón del Mapocho, ya que, pese a la proximidad de los sitios excavados, éstos no fueron ocupados por los mismos grupos. En tiempos tardíos, Novillo Muerto fue poblado por agrupaciones provenientes del sur del río Maipo que buscaban pastos para sus rebaños de llamas, mientras que, Los Llanos, presenta restos cerámicos del complejo Aconcagua. La evidencia arqueológica demuestra que Novillo Muerto es re-ocupado por grupos incaicos, pruebas que no fueron halladas en Los Llanos (Stehberg, 1980b).

En suma, la subsistencia humana en esta región era factible durante todo el año, mediante el uso alternado y complementario de sus nichos ecológicos y sus capacidades para proveer alimentos silvestres, leña y pastos para la mantención de animales durante el estío. A partir de los limitados recursos que se pueden obtener del medio cordillerano, estas agrupaciones humanas lograron sobrevivir adaptándose al ambiente en que se hallaban insertas. Antecedentes etnohistóricos confirman la existencia y permanencia de un pueblo cazador y recolector, bien adaptado al medio, de gran movilidad y escaso número conocido como chiquillanes (Stehberg, 1980a).

1.2. Cultura Aconcagua: vestigios y presencia cordillerana

El complejo cultural Aconcagua habitó entre el río Aconcagua y Angostura de Paine durante el período comprendido entre los siglos IX y XV d. C., creando una forma de vida original en el contexto del mundo andino. Estos grupos compartían costumbres y modos de hacer andinos, pero también manifiestan diferencias en las preferencias por determinados estilos alfareros, adornos y prácticas funerarias. Utilizaban los fértiles valles del Aconcagua y el Maipo para cazar, recolectar, cultivar, domesticar animales y elaborar una cerámica decorada de manera singular y característica que los dotó de

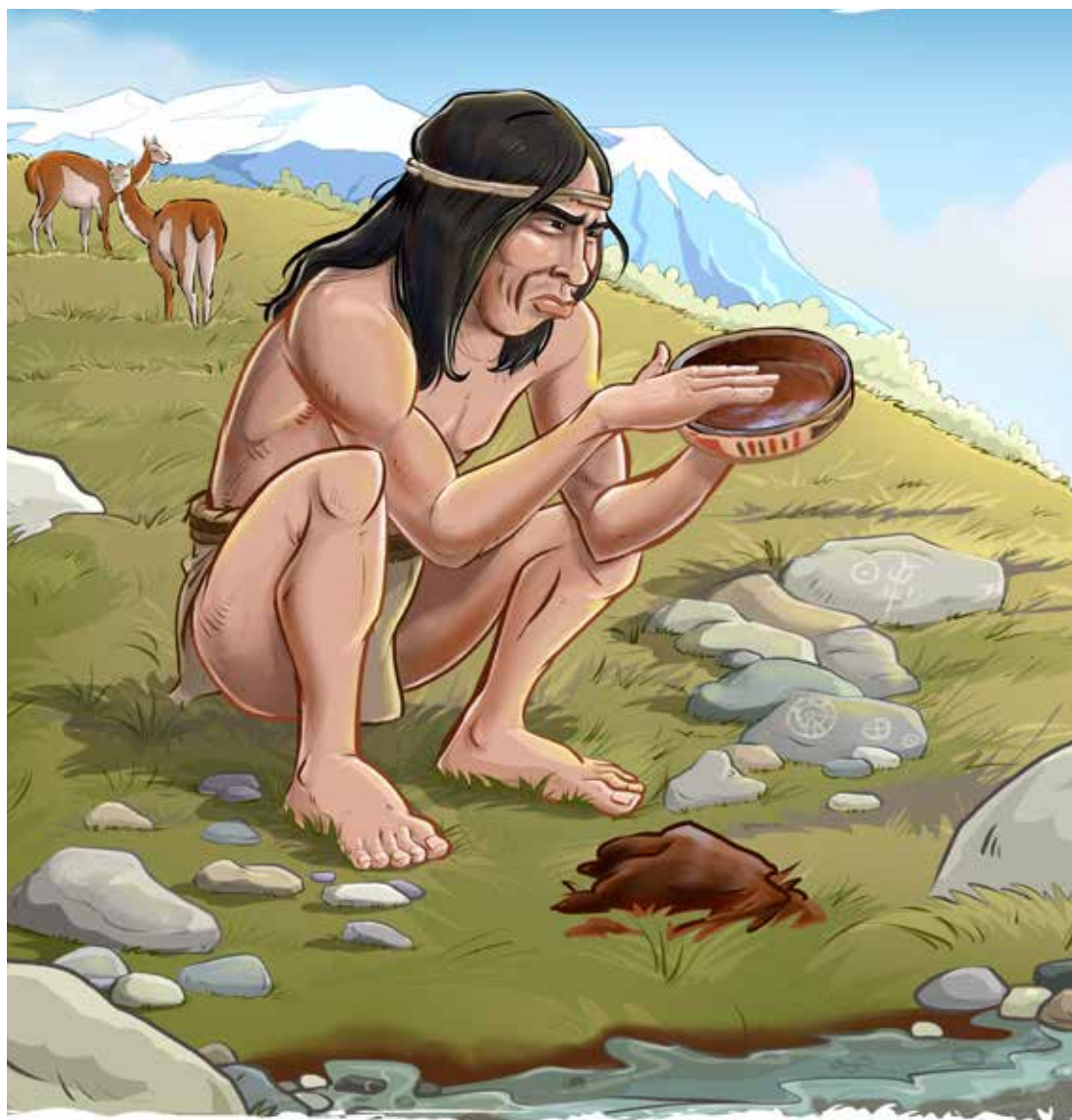


Figura 1. Ilustración de un hombre de la cultura Aconcagua realizando alfarería en la zona altoandina de Chile central.

Los Aconcagua se distribuían desde la cordillera de los Andes hasta la costa, una ocupación extensiva que les permitía acceder a múltiples recursos a partir de una complementariedad económica a lo largo del eje este-oeste.

una original identidad. Asimismo, crearon espacios simbólicos y rituales particulares para sus muertos construyendo notables cementerios, verdaderas necrópolis en forma de túmulos que asemejan conos elevados y achatados de piedras y tierra dispersos en el espacio (Sánchez y Massone, 1995).

Como sus antecesores, tampoco mantenían una estructura administrativa jerárquica ni una estratificación social. La unidad social se delimitaba a la familia extendida, aunque toda la población de la cuenca tiene un grado de integración cultural y material que demuestran flujos de información que trascienden lo local o familiar (Cornejo et al., 2003). Si bien los Aconcagua habrían participado de las principales concepciones del mundo andino, las habrían adecuado a la realidad de los espacios ecológicos en que se hallaban insertos.

Los Aconcagua se distribuían desde la cordillera de los Andes hasta la costa, una ocupación extensiva que les permitía acceder a múltiples recursos a partir de una complementariedad económica a lo largo del eje este-oeste. Los distintos grupos habitaban un valle o localidad, o bien ocupaban lugares más distantes pero relacionados por lazos de parentesco, reciprocidad y solidaridad que eran revitalizados en fiestas y rituales. En los espacios litorales y en particular en las áreas de la desembocadura de los ríos, en los valles y quebradas de la costa, cultivaban la tierra y obtenían productos marinos como algas, peces, moluscos y bivalvos. En el valle los asentamientos siguieron un patrón disperso, a modo de caseríos, no constituyéndose como aldeas. Los lugares de habitación se disponían en las terrazas fluviales, a pie de monte, o a lo largo de esteros y ríos, y en asociación con las tierras más fértiles y aptas para la horticultura, para lo cual desarrollaron una red de canales de regadío. En las áreas de precordillera y cordillera, tanto de la Costa como de los Andes, los Aconcagua se dedicaban a la obtención de piedras líticas y a la caza de guanacos, habitando en cuevas y aleros, conocidas como casas de piedra (Sánchez y Massone, 1995).

El complejo Aconcagua desarrolló una cultura material evidenciada por el hallazgo de una serie de herramientas asociadas a actividades económicas como la caza y faena de animales; y la recolección, cultivo y molienda de vegetales. En los sitios arqueológicos se han encontrado puntas de proyectil,

raspadores, raederas, lascas, láminas, palas de piedra, morteros y manos de moler (probablemente maíz, zapallo y poroto, además de frutos silvestres y semillas de algarrobo). Se han desenterrado herramientas de hueso y fibras de lana para textilera, además de evidencias de prácticas metalúrgicas expresadas especialmente en la elaboración de aros y collares. También se han encontrado instrumentos musicales como un silbato finamente elaborado en combabalita. Uno de los aspectos más sobresalientes de la **cultura Aconcagua** es su alfarería (Figura 1), que destaca por la variedad de sus formas y por su singular decoración geométrica, siendo característica su tonalidad anaranjada o salmón con diseños originales como trinacrios, triángulos con pestañas, rombos, rectángulos y otras figuras con puntos u otros motivos, además del particular tipo cruz: “En la cordillera y precordillera de Chile Central, en grandes paredes rocosas y también en bloques monolíticos se encuentra un estilo de arte rupestre característico y con una fuerte identidad, es el llamado estilo Aconcagua” (Sánchez y Massone, 1995).

En la cuenca alta del río Mapocho, además del complejo Arrayán compuesto por los aleros de Los Llanos y Novillo Muerto, se encuentra el complejo arqueológico Farellones que está integrado por los sitios Yerba Loca y Barros Negros. Salvo Novillo Muerto, estos asentamientos o **casas de piedra**, que son habitaciones características del paisaje cordillerano construidas completando los aleros de rocas con murallas de piedra, han sido vinculados con la cultura Aconcagua. En Yerba Loca se encuentran los sitios Casa Piedra Carvajal, Casa Piedra La Vega, Chullucas y Los Lunes; en Barros Negros se hallan las casas de piedra Los Lajeros, Las Vacas y Piedra del Indio. En la confluencia del estero Yerba Loca con el río San Francisco se encuentra Los Tordos (Stehberg, 1980a).

A mediados del siglo XIV, el complejo cultural Aconcagua se vio enfrentado a la expansión del Estado inca. Parte de estas agrupaciones debieron sufrir transformaciones radicales producto de la dominación, pero la aculturación e integración fue solo parcial y afectó de diversos modos y en determinados lugares a las sociedades preexistentes, muchas de las cuales se resistieron al señorío inca. Así, pese a la dominación incásica, persistieron parte de las unidades sociales básicas encabezadas por los jefes de familia y sus redes de comunicación e interacción, lo que da cuenta del fracaso en el intento de reducción a pueblos o aldeas

pues se trataba de una población habituada a vivir en caseríos dispersos (Falabella et al., 2017).

1.3. Los Incas, las montañas sagradas y el Niño del cerro El Plomo

Entre los siglos XV y primer tercio del XVI, el Imperio inca logró dominar un extenso territorio y centenares de pueblos andinos creando un nuevo orden político, económico y social en la región. Con eficacia administrativa, burocrática y militar extendió sus fronteras y conquistó un vasto espacio desde Ecuador hasta Chile. En los centros neurálgicos del imperio levantaron ciudades monumentales que albergaron a miles de habitantes. Construyeron cerca de 1.500 asentamientos tales como tambos, pucarás, santuarios, factorías y centros administrativos. Tendieron puentes, acueductos y levantaron terrazas agrícolas. Trazaron cerca de veinticinco mil kilómetros de caminos y lograron “domesticar como ninguna otra cultura el ambiente montañoso de los Andes” (Stehberg, 1995).

Existe amplia evidencia arqueológica que demuestra la presencia inca en la cuenca del Mapocho - Maipo, que aparece como un mosaico con áreas plenamente incorporadas y otras al margen del imperio, sea por su beligerancia o bien por falta de interés económico. Los incas construyeron centros administrativos y adoratorios imperiales, establecieron mitimaes (grupos étnicos trasladados por el imperio para desarrollar labores en un territorio que éste último dispusiera de acuerdo con sus necesidades) e intensificaron la producción de maíz, el cuidado de camélidos domésticos y otros bienes. En sus dominios realizaron intervenciones a nivel socioeconómico y tecnológico, extendiendo los sistemas de canalización de aguas, la tecnología relacionada con la minería, la infraestructura del sistema vial y sus instalaciones, las cuales se superpusieron y se articularon de distinto modo con los asentamientos humanos locales previos a la conquista.

En años recientes, Stehberg (2021) ha planteado que al arribar los españoles al valle del Mapocho había una ciudadela incásica al poniente del cerro Huelén, sobre cuyas bases se fundó la ciudad de Santiago. Entre otros vestigios hallados sobresalen el Camino del Inca, red vital para administrar, controlar y explotar los recursos que se incorporaban a los dominios del Inca. Entre los cementerios encontrados destaca La Reina, a los pies de la cordillera pues correspondería a una tumba para la élite incaica, que incluyó ajueros con

alfarería, metales, queros de madera e inclusive andas o rampas. Otra huella son los pucarás que ya no son concebidos solo como fortalezas sino como espacios públicos y festivos que articulaban distintos adoratorios o huacas jerarquizadas dentro de un mundo sagrado que no era natural, sino impuesto para inculcar los nuevos principios ordenadores de la sociedad y la economía imperial.

A estos sitios arqueológicos se deben agregar los adoratorios de altura, ubicados en los cerros Peladeros y El Plomo, montaña tutelar que domina el valle de Santiago y próximo al SNYL, donde se encontró un niño sacrificado como ofrenda en excelentes condiciones de conservación, intocado, junto a textiles, metalurgias, restos de pelos, uñas, plumas, hojas de coca y concha de mullo. Como señala Cabeza (1986), la veneración de las montañas parece estar asociada a su capacidad de proporcionar aguas y alimentos, y a la adoración al sol. Los motivos para la elección del cerro El Plomo debieron ser su altitud y visibilidad desde gran distancia, así como los glaciares permanentes, el nacimiento del Mapocho, sus minerales, su accesibilidad, su relación con el solsticio de invierno, además de su probable significación religiosa anterior a los incas. El sol, visto desde Santiago y del sector sur del río Mapocho, aparece sobre el cerro El Plomo durante el solsticio de invierno, indicando los períodos de siembra. Estos santuarios que se extendían desde el Ecuador a Chile eran un mecanismo que “permitía la unidad y cohesión política y económica del imperio, necesaria para someter”, incorporar y “controlar territorios tan extensos” como distantes (Cabeza, 1986).

En una expedición realizada entre 1922 y 1924, para buscar una mina legada por su abuelo, Guillermo Chacón y su compañero de aventuras Ascencio Carrasco descubrieron un conjunto de ruinas que no tenía explicación por la altura del hallazgo. Años después volvieron y encontraron tres estatuillas antropomorfas. El secreto se mantuvo hasta que la prensa publicó en 1929 algunos artículos sobre los hallazgos de Chacón. En 1954 organizó otra expedición donde excavó una pirca que medía entre 3 y 4 metros de largo, 1 de alto y 1,80 de ancho (Cabeza, 1986). Continuaron excavando hasta que llegaron al piso de la pirca donde encontraron una piedra que, al levantarla, les permitió descubrir el cuerpo de un niño enterrado. Eran las 3 de la tarde y llevaban 6 horas de trabajo, soportando la altura, el frío y el viento. “Jaime Ríos, el más joven, comenzó a vomitar sangre y

sufrir un fuerte dolor de cabeza, por lo que, a pesar del increíble hallazgo, debieron regresar” (Cabeza, 1986).

“Días después de volver a Puente Alto se dirigieron al Museo Nacional de Historia Natural, donde fueron recibidos por Grete Mostny, jefa de la sección antropología”. Ante su interés, los mineros contestaron que estaba “oculto en la cordillera pero que podían traerlo para tratar la venta”. Tras algunas negociaciones, tres investigadores llegaron a la casa de Chacón quedando profundamente impresionados por la importancia excepcional de los objetos que inspeccionaron y el extraordinario estado de conservación del cuerpo del niño. Chacón quería 85.000 pesos, pero terminó por aceptar 45.000. Hasta ese instante no se habían percatado del inmenso valor de su descubrimiento. En los días siguientes, la prensa nacional destacó el notable hallazgo que atrajo la mirada del país y del extranjero. Exhibido a las pocas semanas, en un solo día fueron a ver al niño del cerro El Plomo 5.000 personas. Al mismo tiempo, se inició el interés por la investigación arqueológica del sitio (Cabeza, 1986).

Este sitio, compuesto por un adoratorio y un enterratorio, se transformó en la evidencia empírica de la relación de las culturas andinas y de los incas en particular con las montañas y del sagrado significado que les otorgaban al ofrendar un niño para solicitar ayuda de los dioses y asegurar así la vida de la comunidad.

2. LA HACIENDA LAS CONDES: PROPIETARIOS, CAPATACES, VAQUEROS E INQUILINOS

2.1. Límites y genealogía de la Hacienda Las Condes

Según el historiador Carlos Larraín, la propiedad de mayor renombre y envergadura de toda la región que se extiende hacia el oriente de Santiago fue la hacienda Las Condes en la cual, como se ha señalado, se han encontrado también múltiples manifestaciones de ocupaciones precolombinas. Antiguamente se designaba a esta propiedad con diferentes nombres, entre ellos, San José de la Sierra o Dehesa de San José, o bien, hacienda de la cordillera de los Condes de Sierra Bella, o también, la cordillera de los Condes o la Dehesa de los Condes (Larraín, 1952).

Alejadas de Santiago, transcurrieron cerca de cuarenta años desde que se inició la dominación hispana sin que ningún conquistador solicitase en merced aquellas remotas comarcas. Antón Díaz, “un opaco soldado” (Larraín, 1952), fue el primer interesado en estos territorios al solicitar al gobernador Rodrigo de Quiroga 3 mercedes y 1 merced al gobernador Sotomayor, las cuales una vez concedidas, le otorgaron el dominio de toda la cordillera que se extiende desde el río Mapocho por el norte hasta el río Colorado por el sur; por el oriente la actual República Argentina y por el poniente los cerros Apoquindo, Lo Co, La Reina, Peñalolén y Macul. Sin embargo, todas estas mercedes caducaron en 1587 pues Antón Díaz no dejó herederos (Larraín, 1952).

Según el historiador Carlos Larraín, la propiedad de mayor renombre y envergadura de toda la región que se extiende hacia el oriente de Santiago fue la hacienda Las Condes en la cual, como se ha señalado, se han encontrado también múltiples manifestaciones de ocupaciones precolombinas.

De acuerdo con el Consejo de Monumentos Nacionales “la Casa patronal de la hacienda Las Condes, construida en el siglo XVII, es un nítido reflejo de la arquitectura colonial. Presenta una estructura en forma de H compuesta por naves edificadas en adobe sobre base de piedra, con techumbre de madera y tejas. Sus gruesos muros de adobe tienen un espesor de 120 cm, y están recubiertos en cal. La fachada interna del edificio presenta galerías que dan a patios cerrados. En el interior de la casona, se observan pisos de arcilla cocida, además de pilares, vigas y dinteles de roble, ciprés y patagua. La fachada principal presenta un balcón de madera que da a un bello jardín geométrico con una pila al centro. A un costado de la casa se levanta una capilla construida en el mismo estilo” (Consejo de Monumentos Nacionales, s/f).

De acuerdo con Larraín, quien elaboró una minuciosa genealogía de Las Condes, tras la muerte de Antón Díaz, el soldado vizcaíno Martín de Zamora obtuvo las mercedes otorgadas a Díaz y algunas más, ampliando los límites de la hacienda. A su muerte la propiedad pasó a su hijo Miguel de Zamora, pero fue rematada en 1639 y adjudicada a Ascencio Zavala, quien a su muerte la heredó a su hijo primogénito Ambrosio de Zavala. Éste la vendió a Pedro de Torres quien estableció uno de los primeros mayorazgos, vinculando sus casas de la Plaza Mayor de Santiago y la Hacienda San José de la Sierra. Tras su muerte, la hija de Pedro Torres y Cristóbal Messia, dejaron la propiedad a su hijo Diego Messia y Torres. Su hijo, Cristóbal Messia, oidor de la ciudad de Lima, pasó a ser el cuarto conde de Sierra Bella. Aunque tuvo varios hijos con su esposa Josefa de Aliaga sólo sobrevivió María Josefa Messia quien se casó y vivió en Perú con José Manuel de la Fuente y Carrillo de Albornoz, marqués de San Miguel de Híjar. Su hija María Josefa de la Fuente y Messia fue la sexta condesa de Sierra Bella, y la hija de ésta, Carmen Vásquez de Acuña y Messia, la séptima. Por esta sucesión de condesas se ha atribuido el nombre de la propiedad a Las Condes. Carmen, casada con Manuel de Santiago y Concha, una vez

abolidos los mayorazgos en 1852, divide la propiedad entre sus hijos José María, Pedro y Joaquín de Santiago Concha y Vásquez de Acuña, los que a su vez venden la hacienda a Pedro Fernández Concha. Cuando en 1914 se efectuó la partición de sus bienes, la hacienda Las Condes se dividió en tres hijuelas adjudicadas a sus herederos Carlos, Pastor, Manuel, María, Rafael y Mercedes (Larraín, 1952).

2.2. Trabajos y vida cotidiana en una sociedad tradicional cordillerana

Desde tiempos coloniales, en el cajón del río Mapocho un actor fundamental han sido los **arrieros**. Además de sus destrezas en el manejo del ganado, su oficio les otorgó un acabado conocimiento de los rincones cordilleranos lo cual les permitió guiar a viajeros, naturalistas, cateadores, andinistas y arqueólogos. En su vivida descripción de la hacienda Las Condes, Rafael Herrera (1968), por muchos años capataz de la propiedad, describe con notables detalles las actividades y labores de los vaqueros, inquilinos y peones cuidadores de la propiedad y del ganado, principal actividad de aquellos parajes. En el Potrero Grande había once majadas donde se podían poner seis piños de 1.500 a 1.600 cabezas de ganado ovejuno. En el cajón de Quempo había dos grandes majadas donde convenía poner un solo piño de 2.000 ovejas. En Barrancones había cuatro majadas que podían mantener un solo piño de 2.000 ovejas. En el cajón de El Arrayán había cuatro majadas donde se podían poner dos piños de 3.000 ovejas (Herrera, 1968).

En su escrito Herrera demuestra un profundo conocimiento no solo de los trabajos asociados a la ganadería y otras labores de la hacienda, sino que también de la geografía y del ambiente cordillerano, de sus potencialidades, de los peligros que acechaban, así como también de las aventuras y anécdotas vividas por los arrieros. Luego de precisar los límites de la extensa propiedad, pues era “muy necesario para el manejo del fundo saber y conocer los límites de esta hacienda”, describe los distintos cursos de agua, lagunas, vegas y vertientes, detalla las labores esenciales, como, por ejemplo, mantener siempre expeditos y limpios los desagües, poner atención en los riegos y en la distribución y dotación de los potreros y majadas, y preparar a tiempo los potreros para esperar los rodeos grandes de octubre y abril. Las veranadas e invernadas

organizaban las labores de la hacienda y el rodeo de abril tenía la finalidad de sacar todos los ganados de la cordillera y traerlos a las invernadas.

En el rodeo de octubre -indica Herrera- se hacía la cuenta general del ganado y era esencial para repartir las misiones y tareas que cada vaquero e inquilino debía cumplir en torno al manejo de los animales. Se citaba a los vaqueros y peones a una parada general en el cajón del Arrayán, en casa del primer vaquero, Jacinto Lastra, donde se disponía de la gente, “despachando a cada vaquero con los peones que crea conveniente, a presencia del capataz”. Este rodeo tenía por objetivo “una junta general del ganado”, además de “sacar y contar prolijamente todos los ganados para soltarlos a la cordillera”, y, si era necesario, “señalar, marcar, descornar y capar los animales”. El capataz y el administrador en persona viajaban con los operarios y con los piños de vacunos hasta llegar a los potreros. El menor descuido en el arreo cordillera arriba producía grandes perjuicios como vacas que “paren en el cajón o en el campo”, y terneros que eran “devorados por los buitres”. De madrugada, una vez desayunados, “el capataz desde su grupo dará una voz de mando a los vaqueros ¡vamos a caballo! Y los vaqueros se apresuran a obedecer y también a su vez gritan todos a su gente ‘arriba niños!’ Es de advertir que esto es precioso y que hay algo de admirar al contemplar aquel cuadro en que no se ve sino respeto, y obediencia en aquella gente”. El aprecio por los arrieros también lo expresa al señalar que el desprendimiento y cariño de cada uno es algo novelesco ya que todos cuentan lo que han pasado, los apuros en que se han visto involucrados y las hazañas que han vivido, como también los chascarros sufridos (Herrera, 1968).

En seguida, Herrera describe detalladamente las tareas y los vaqueros responsables, además de los peones encargados de llevar el ganado a cada rincón cordillerano, los cuales conoce y expone con precisión, describiendo cajones, ríos, manantiales, lomas, potreros, cordones, quebradas, saltos de agua y cualquier otro hito geográfico que permitiese ubicarse y sobrevivir en la inmensidad cordillerana.

Sobre el rodeo en Yerba Loca indicó: “El vaquero Emilio Herrera con seis peones se va al cajón de Molina cubre la loma del viento, los portillos, el alto del toro, los maquicillos y las masas, volará el arreo a los barrancones, y nos espera en parada, acordonado, en el portezuelo de los barrancones. Jacinto Lastra

con 5 peones, irá a la leonera cubriendo todos los manantiales, las vegas de las vacas y bota su arreo a los barrancones, y se acordona también como él. El vaquero Emilio Herrera y Carmen León, con 5 peones irá a las tórtolas, cubrirá la quebrada del manzano, la loma de canales, este arreo es sencillo, y bota a los barrancones se acordona también y nos espera. El vaquero Cosme Morales con 6 peones irá a las vallas, cubre los barro, y el cerro colorado, y hará lo mismo que los demás. El capataz revisará todas las cuadrillas” (Herrera, 1968).

Las alturas cordilleranas eran un lugar de trabajo peligroso, complejo y desafiante. Al respecto Herrera señalaba “encontré un pobre inquilino llamado José Gana, con el caballo gastado, y no podía subir la cuesta porque al infeliz, las fuerzas le faltaban, para andar de a pie” “¡Ahí si el lector hubiera visto aquel cuadro hubiera sufrido como yo sufrí! Al ver a aquella calamidad, lo cierto es que el hambre, el cansancio y la puna habían trasnido sus huesos”. En otra oportunidad indicó se “disparó un toro del piño que había en el chiquero” pero el inquilino que debió seguir el animal tuvo la “desgracia que su caballo se arrolló por el suelo en una fatal vuelta que le quebró la pierna” (Herrera, 1968).

Herrera da cuenta de las casas de piedra “más notables y cómodas de esta hacienda Las Condes que hacen uso y sirven con frecuencia los sirvientes del campo”. De este modo, la profusa actividad económica ganadera permitió habitar estacionalmente muchas de estas casas. En el Arrayán, Herrera nombra las casas del agua del sapo, bandurrias, leonera, alto, casa colorada, ortigas, veliz, duraznito, cruces, agachadita y el extenso caletón de Javier. En quebrada seca las casas gotera y lacena. Pasando a la yerba loca las más usadas eran carvajales y muy al interior las casas del finado Calisto Morales, vega, vacas, barrancones y mortero. Pasando a Molina, las más grandes eran maitenes, quilos, trargüen, paico y alfalfal. En el cajón de los Penitentes se hallaban las casas “covarrubias, chupalla y chillón” (Herrera, 1968).

3. LOS YACIMIENTOS DE LAS CONDES Y EL DESARROLLO DE LA MINERÍA

3.1. Las primeras huellas de labores mineras en el cajón del río Mapocho

La minería en el cajón del río Mapocho se remonta a tiempos preincaicos. Ya en tiempos coloniales, el gobernador Manuel de Amat envió una carta al Rey en que informaba el descubrimiento de plata en los faldeos de la cordillera de Quempo. No obstante, la extracción de estos yacimientos requería de una alta tecnología e inversión que desalentó a muchos mineros. Sin embargo, los cateadores siguieron explorando las alturas cordilleranas. Impulsados por la creencia indígena de que la plata se cría en las punas y “allí solo canta y aletea la esperanza del minero” (Vicuña Mackenna, 1882). El incipiente desarrollo tecnológico y el mejor precio de ciertos metales impulsó la búsqueda de nuevos yacimientos y la explotación de algunas minas ya conocidas y abandonadas. En el siglo XIX, “ganaron fama” las quebradas y montañas de la hacienda Las Condes por la gran cantidad de minerales de cobre y algunos de plata hallados, especialmente al interior del río San Francisco, en los arroyos Yerba Loca y Arrayán, y los ríos Cepo y Molina, todos afluentes del río Mapocho (Vicuña Mackenna, 1882).

El mineral de La Condes -dice Vicuña Mackenna- tiene un origen mitológico. Su descubridor sería un emisario de José de San Martín, el coronel Ramón Picarte, que cruzando y recruzando la cordillera entre 1815 y 1816, por diversos parajes para encontrar las mejores y más recónditas rutas, descubrió un inmenso yacimiento de plata. Antes de morir, Picarte habría contado que al cruzar la cordillera huyendo de los realistas después del desastre de Rancagua se había encontrado con un cerro “plomo”, que miraba hacia Chile y Argentina, el cual “era todo de plata” (Vicuña Mackenna, 1882).

Antonio de Hermida, rico hacendado, en su testamento del 22 de diciembre de 1831, indicó que legaba un trapiche en la boca del cajón del río Mapocho, lo cual evidencia actividad minera en la zona. Los médicos Carlos Segeth y Lorenzo Sazié explotaron la mina Las Arañas, situada en el cajón de San Francisco, que en 1877 rindió 4.440 gramos de plata. Entonces, la principal mina era Isolina, a una altitud de 4.000

metros, que fue vendida por 23.000 libras esterlinas a la compañía inglesa The Condes Mining Company.

El macizo El Plomo era considerado la cabeza de la región minera de Las Condes. De allí se desprendían numerosos estribos que bajaban rápidamente hacia el sur – oeste, formando profundas quebradas cuyas aguas nutren el caudal del río Mapocho. Las minas estaban situadas entre los 2.900 y los 4.200 m s.n.m. En el cerro El Medio se encontraba el yacimiento San Francisco, que producía los minerales de mejor ley en plata. Más arriba las minas San Lorenzo, San Luis, Carmen, Delirio, Fortuna y Rosario. Bajando hacia las faldas del cajón de Valenzuela estaban las minas San José, Difícil, Veta Negra y otras. Hacia el sur estaban Isolina y Chilena, que eran el centro de una importante agrupación de minas. Por todos lados había innumerables emprendimientos mineros. En las faldas del cajón de los Piches se hallaban Salvadora y Azulillos. En Yerba Loca estaban San Rafael y su grupo, más al interior del cajón, Santa Rita y otras.

Los yacimientos del cajón del río Mapocho eran conocidos desde tiempos inmemoriales, fueron muchos los que se disputaron el honor de haber descubierto estos minerales; entre ellos, Toribio Olivares, Zenón Ortiz y Guillermo Soto se atribuyeron el hallazgo, pero -según Vicuña Mackenna- sus conocimientos mineralógicos no pasaban de “haber visto los brillantes crestones de los Bronces”. Quien logró dar con el mineral fue Nazario Elguin, una leyenda de la minería poco reconocida por la historia de Chile. Nacido en Julio de 1815 en el asiento minero de Caleu fue hijo y nieto de mineros. Trabajó en las minas del padre de Benjamín Vicuña Mackenna con quienes trabó amistad. Con el tiempo, Elguin se transformó en un reconocido cateador. En 1869, los habilitadores Vicente Costa y Ángel Sassi buscaron a Nazario Elguin para pedirle que visitara la quebrada de San Francisco. El experimentado cateador se internó por las quebradas cordilleranas y en el paraje llamado Cancha de Carreras, “notó con asombro que estaba pisando un inmenso rebosadero de metal” (Vicuña Mackenna, 1882).

Tras los hallazgos de Elguín se intensificaron los cateos por todos los cajones cordilleranos afluentes del río Mapocho, e incluso antiguos minerales de plata se redescubrieron y revalorizaron. Al mismo tiempo, comenzaron los conflictos por la propiedad de los hallazgos y el mineral de Las Condes se transformó en



Los yacimientos del cajón del río Mapocho eran conocidos desde tiempos inmemoriales, fueron muchos los que se disputaron el honor de haber descubierto estos minerales; entre ellos, Toribio Olivares, Zenón Ortiz y Guillermo Soto se atribuyeron el hallazgo, pero -según Vicuña Mackenna- sus conocimientos mineralógicos no pasaban de “haber visto los brillantes crestones de los Bronces”

“un tercer patio de los tribunales de justicia” (Vicuña Mackenna, 1882). Pero, mientras proseguían los conflictos, Elguin denunció una estaca independiente en un paraje solitario en nombre de la sociedad Sassi, Elguin y Costa. Ganados los litigios, el yacimiento San Francisco quedó dividido entre la Descubridora para Costa y Sassi, y el nuevo hallazgo, Los Bronces, para Elguin.

Unos veinte años después, el mineral de Las Condes reunía unas “doce empresas cuyos propietarios eran Jorge Phillips, José de Respaldiza, dueño éste de la mayor parte de las minas del cajón de Yerba Loca, C. Andrada, Carlos Cousiño y Cía., Francisco de Paula Ossandon, Agustín H. Elguín, dueño de Los Bronces; Enrique Concha y Toro, dueño de las minas del cajón de Duarte, Olivos, El Plomo, Valenzuela, Piches y otras, y también de la fundición San Enrique, en la puerta de Las Condes.” Otros propietarios eran “Ismael Infante, Juan Barboza, Ricardo Montaner, Ángel Sassi y Francisco de Paula Pérez, dueño de las minas del cajón de San Francisco” (de Ramón, 1985).

Hacia fines de siglo XIX, la actividad minera era intensa en el cajón del río Mapocho por lo que se habían formado algunos asentamientos humanos. Los lugarejos más importantes eran San Enrique, a 18 km de Santiago, y con una población concentrada en torno a un establecimiento de fundición. Barnechea de 418 habitantes, con una población diseminada en fincas; Maitenes con un establecimiento de fundición a 30 km al este de Barnechea; Bodegas llamado así por ser el depósito de minerales y mercaderías para el consumo de los operarios de las minas de Las Condes. Estaba al pie del cerro San Francisco, que tiene “numerosas minas que bajan los metales a las bodegas por medio de andarivel” (Espinoza, 1897). En 1916, los distintos yacimientos de esta región mineral formaron una sola compañía denominada Minera Disputada de las Condes, iniciándose así la “explotación moderna de los minerales del cajón del río Mapocho” (Sagredo, 1990).

3.2. Mineros, infraestructura y vida cotidiana

De acuerdo con una carta que Francisco de Paula Pérez le escribe a Vicuña Mackenna en 1882, al estar situados en las grandes alturas cordilleranas, los yacimientos del mineral de Las Condes “quedaban cubiertos por las nieves lo que obligaba a desalojarlos a inicios del invierno para volver a establecer faenas a mediados de primavera” (Vicuña Mackenna, 1882). Por años las habitaciones de los mineros fueron “casuchas de mala muerte que no protegían del frío”. Los trabajadores preferían cobijarse en los socavones antes que sufrir las bajas temperaturas al interior de sus viviendas. Con el paso del tiempo se hizo perentorio construir casas adecuadas a las alturas cordilleranas capaces de cobijar sin peligro a los trabajadores pues, a poco andar, laboraban en las minas más de 800 mineros que por las contingencias ambientales estaban expuestos a enfermedades como la influenza, que tenía “un alto costo humano”. En 1889, por ejemplo, éste mal causó tantas víctimas en el mineral de San Rafael de Yerba Loca que obligó “a poner término a los trabajos a principios de marzo de 1890” (Boletín de la Sociedad Nacional de Minería, 1890c).

A esas alturas, las condiciones de trabajo eran extremas y de alto riesgo. Además, requerían de un gran desafío tecnológico e ingenieril que implicaba también capital, mucho trabajo y perseverancia. Hacia 1886 la profundidad vertical de las minas alcanzaba nada menos que 86 a 90 m para San Agustín de Nazario Elguin, 70 m para San Lorenzo y 115 m para Tránsito, pertenecientes a Gregorio Donoso. Todas las labores se hacían a mano y en forma subterránea, como lo eran también algunas de las habitaciones y sus comunicaciones con las minas. Los yacimientos pertenecientes a Elguin eran los que ocupaban más operarios: 20 en San Agustín y 65 en San Lorenzo; y producían la mayor cantidad de mineral: 90 y 340 cajas, respectivamente; y sólo 30 Tránsito, que era la única que ocupaba, además de obreros, 28 caballos. Pronto las oportunidades de trabajo en labores mineras atrajeron a miles de trabajadores. En 1890, entraron “a beneficiar aquellas minas más de 7.000 mineros de todas partes de la República”. Una de las minas que “mayor número de mineros ocupa diariamente, es la de José de Respaldiza, situada en el famoso cajón de Yerba Loca y denominada San Rafael” (Boletín de la Sociedad Nacional de Minería, 1890a).

Las leyes del mineral de Las Condes variaban entre el 6 y el 26%, por lo que algunos yacimientos no eran productivos si no se mejoraban los caminos o se implementaban nuevas formas de transporte del mineral extraído. Para mejorar la producción y el flujo de minerales y pertrechos era imperioso reconstruir los malísimos caminos y proveer de pastos para los animales de carga. La puna, las alturas y farellones, las nieves eternas y la geografía eran los grandes obstáculos que retardaban la explotación del mineral de Las Condes. Cerca de 4.000 mulas hacían un lento acarreo de los minerales, alimentando varios establecimientos de fundiciones de plomo y plata, como también de cobre.

Para superar estos inconvenientes, los mineros organizaron la compañía Sociedad Anónima del Camino de Las Condes que reunió a varios habilitadores, entre otros Ángel Sassi, Federico Rivadeneira, Nazario Elguin, Francisco de Paula Pérez, José de Respaldiza. Su objetivo era la construcción de un camino carretero para unir los minerales del cajón del río Mapocho con la ruta de Las Condes a Santiago. El proyecto fue aprobado por ley de la república el 31 de agosto de 1880. Los inversionistas esperaban que el camino centuplicase las actividades productivas de la región minera. Sin embargo, dadas las dificultades que imponía la geografía cordillerana, el capital se agotó rápidamente con la construcción de unos cuantos kilómetros lo que originó una serie de pleitos judiciales con el contratista, además de la deserción de accionistas (Laborde, 2021).

En estas circunstancias, el acaudalado cateador y minero Nazario Elguin asumió por su cuenta y sacrificio la materialización del anhelado proyecto. En la construcción del camino laboraron cerca de 300 operarios y trabajadores. Gracias a su iniciativa, empeño y capital, hacia 1882 se pudo abrir una ruta que permitió transportar el mineral con carretas hasta Maitenes donde había una fundición. La construcción de la nueva ruta hizo posible la explotación de minas que daban minerales de un 10 a un 12% de ley, que por el alto costo de transporte no eran posibles de trabajar con ganancias hasta entonces. Al concluir la construcción del camino carretero se abarataron estos costos y estos yacimientos se hicieron más rentables, aun cuando los mineros reclamaron por los peajes que les impuso Elguin (Sesiones del Congreso Nacional, 1889).

José de Respaldiza fue un extraordinario protagonista de las exploraciones mineras y la explotación del cajón de Yerba Loca. De acuerdo con la crónica de Joaquín Walker Martínez, con “la seguridad científica del metalurgista experto penetró por los ásperos farellones del cajón” (Boletín de la Sociedad Nacional de Minería, 1890b). Una vez explorado el cajón de Yerba Loca, desde Corral Quemado “arrancó un camino de cuatro metros de ancho, a sus expensas, sin auxilio de socio alguno ni subvención gubernativa. Ascendió primero por áspera cuesta de cuatro y medio km, a una altura de más de 600 m, y dado este atrevido salto continuó siempre ascendiendo, ocho o diez km más”. Al término del camino echó los cimientos de villa Paulina, “hermoso oasis en aquellas serranías” (Boletín de la Sociedad Nacional de Minería, 1890b).

Incluso, mas digna de admiración -dice Walker Martínez- fue la imponente construcción de andariveles para transportar el mineral realizada por José de Respaldiza. Cuando al diputado y hombre de negocios le señalaron donde estaban las minas, pensó que “nada veía. Miraba sí como unas aves mitológicas surcaban el aire llevando sobre sus dilatadas alas bolsas de metal, rollos de cable de alambre, barras de hierro, cargas de leña, etc. Eran los carros aéreos de tres andariveles que hacen todo el acarreo desde las minas, labrados en la cresta de los cerros en que la nieve es perpetua”. Y, en seguida, señalaba “muchos trabajos industriales he tenido la ocasión de admirar en mi vida; pero allí, al considerar las dificultades con que ha tenido que llegar cada rueda o tornillo de hierro, cada pieza de madera, hasta establecer esa fácil explotación, no sabía qué admirar más, si los caprichos de la naturaleza, que ha rodeado de tantas dificultades el codiciado metal, o la audacia de los hombres para dominarla y arrancárselo” (Boletín de la Sociedad Nacional de Minería, 1890b).

Bajando de las alturas se encontraba el pueblito de Lo Barnechea, donde se asentaron una serie de quintas de recreo, **chinganas**, fondas y cantinas a las que acudían tras el arduo trabajo en las montañas cientos de mineros los fines de semana y los días de fiesta, y aun en la semana, atraídos por la música, las carreras de caballos y otras diversiones como la venta de alcohol, los juegos de azar y el baile, lo cual estaba prohibido arriba, en las faenas cordilleranas (Laborde, 2021). Lo mismo sucedía en el campamento Pérez Caldera y en la población La Ermita, donde llegaban los mineros a refugiarse ante las irregularidades del tiempo que suspendía los trabajos en las minas. Ya en la zona propiamente minera: “En los Maitenes se vendía alcohol en tres fondas aun cuando había ley seca desde el domingo a partir de las cinco de la tarde” (Laborde, 2021). De acuerdo con el relato de Armando de Ramón, al recorrer el lugar, el subdelegado local indicó que vio “con pena el estado vergonzoso en que había encontrado a no menos de cien trabajadores. En todo el camino, de trecho en trecho, había hombres tendidos exánimes por el estado de ebriedad en que yacían” (De Ramón, 1985). Es posible que la fiesta y el alcohol hayan sido un sedante ante la extenuante y dura vida cotidiana en las entrañas de las montañas. En este contexto, varios dueños de minas se quejaban de que “no podían continuar con las labores mineras pues sus trabajadores no solo habían fallado el lunes, sino también el martes y el miércoles”, lo cual les irrogaba cuantiosas pérdidas. Por ello, los dueños de las pertenencias mineras ofrecieron contribuir con una cuota de diez pesos mensuales cada uno para costear los gastos de policía en Las Condes (De Ramón, 1985).

Los yacimientos del mineral de Las Condes “quedaban cubiertos por las nieves lo que obligaba a desalojarlos a inicios del invierno para volver a establecer faenas a mediados de primavera” (Vicuña Mackenna, 1882). Por años las habitaciones de los mineros fueron “casuchas de mala muerte que no protegían del frío”.

4. VALORACIÓN DEL AMBIENTE Y CREACIÓN DEL SNYL

Desde tiempos inmemoriales la inmensa cordillera que se extiende al oriente de la ciudad de Santiago ha sido objeto de fascinación incluso religiosa de los habitantes del valle. De acuerdo al relato de Laborde (2021), tras la independencia, los naturalistas contratados para conocer y valorar el territorio nacional se interesaron por ascender a las cumbres cordilleranas. Las comisiones de gobierno para definir los límites fronterizos con Argentina profundizaron los conocimientos de los espacios cordilleranos. A fines del siglo XIX, con la valiosa ayuda de los arrieros, los “alemanes del Deutscher Turnverein de Santiago ascendieron una cima que bautizaron Bismarck” (Laborde, 2021). En 1896 miembros de este club escalaron el cerro El Plomo. Posteriormente, miembros del Club Cordillera alcanzaron la cima del cerro Altar. Estos pioneros, mal equipados para las alturas cordilleranas y sin “mapas ni señaléticas, identificaron los accesos y mejores rutas e incentivaron a otros a subir las montañas” (Laborde, 2021). En las primeras décadas del siglo XX² se fundó el Club Alemán Andino de Santiago, con el paso del siglo se formaron mas clubes de andinismo. En este contexto surgiría también el “cultivo del esquí a nivel local”. En 1937 se trazó Farellones y fue el empresario “Agustín Edwards el que gestionó la construcción de un camino a Farellones durante el segundo gobierno de Alessandri Palma”. En 1938 se inauguró el emblemático Hotel Posada de Antonio Padrós y poco después la Universidad de Chile construyó un refugio para 150 personas. En la década de 1950 se inauguró el primer andarivel, “movido por un tractor a parafina”. En 1962 se realizó el Campeonato Mundial de Esquí el que impulsó la construcción de avenida Kennedy (Laborde, 2021).

En 1971, Elfriede Maurach Martinoff, esposa de Hans von Kiesling, uno de los promotores de Farellones, donó a la Municipalidad de Las Condes la cuarta hijuela de Yerba Loca, situada entre el cerro El Plomo y La Paloma, declarado Santuario de la Naturaleza por Decreto

Nº 937 del Ministerio de Educación Pública del 24 de julio de 1973. La declaración relevó “la necesidad de conservar las especies arbóreas existentes (...), la ecología original de la precordillera y las posibilidades turísticas que ofrecía por la belleza natural de la región” (Ministerio de Educación Pública, 1973).

RECAPITULACIÓN

Como se ha podido establecer, la ocupación humana del cajón del río Mapocho hunde sus raíces en tiempos inmemoriales. La evidencia arqueológica ha demostrado la presencia de bandas cazadoras recolectoras y de grupos alfareros que utilizaban los diversos recursos naturales que ofrecían los ambientes cordilleranos los que, a su vez, fueron considerados como espacios sagrados como lo demuestra el niño inca del cerro El Plomo. Tras la conquista española animales europeos como vacunos, caballos y asnos transformaron los ambientes y la economía cordillerana, dando origen a una ocupación asociada a la explotación ganadera. Con la inserción de Chile en los mercados internacionales y la activación de la demanda de minerales el cajón del río Mapocho se ha visto sometido a una intensa explotación minera. En el último tiempo los espacios cordilleranos han sido revalorizados como espacios turísticos y de conservación e investigación de la biodiversidad allí existente, superponiéndose en un mismo territorio intereses mineros, ganaderos, turísticos, arqueológicos y de conservación de la biodiversidad.

2. N. de los E.: Ante la falta de mayores trabajos que revisen la interacción humana en el SNYL y sus alrededores en el periodo reciente (s. XX), debemos trabajar con las pocas fuentes disponibles que encontramos actualmente, donde el libro del escritor Miguel Laborde supone un importante apoyo, ya que logra compilar gran parte de los datos y material de archivo fotográfico de la zona. Además, el propio recuento que hace el Club Alemán Andino de Santiago (junto con su archivo fotográfico) es otra manera de aproximarse a la revisión histórica del Santuario, pero específicamente centrado en las exploraciones deportivas y turísticas.

REFERENCIAS

- Boletín de la Sociedad Nacional de Minería. Número 20 (1890a). Santiago, Sociedad Nacional de Minería.
- Boletín de la Sociedad Nacional de Minería. Número 22 (1890b). Santiago, Sociedad Nacional de Minería.
- Boletín de la Sociedad Nacional de Minería. Número 27 (1890c). Santiago, Sociedad Nacional de Minería.
- Cabeza, A. (1986). *El santuario en altura Inca cerro El Plomo* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Consejo de Monumentos Nacionales (s. f.). Inmueble denominado Casona de Las Condes y su entorno. Recuperado 18 de septiembre de 2022, de <https://www.monumentos.gob.cl/monumentos/monumentos-historicos/inmueble-denominado-casona-condes-su-entorno>
- Cornejo, L., Falabella, F., y Sanhueza, L. (2003). Patrón de Asentamiento y Organización Social de los Grupos Aconcagua de la Cuenca del Maipo. *Revista Chilena De Antropología*, (17), 77-104.
- Decreto 937 de 1973 [Ministerio de Educación Pública]. Declara santuario de la naturaleza al fundo "Yerba Loca", comuna de Las Condes, provincia de Santiago. 24 de julio de 1973. Ministerio de Educación Pública.
- Espinoza, E. (1897). *Geografía descriptiva de la República de Chile*. Imprenta y Encuadernación Barcelona. Santiago, Chile.
- Falabella, F., Uribe M., Sanhueza, L., Aldunate, C., Hidalgo, J. (Eds.). (2016). *Prehistoria en Chile. Desde sus primeros habitantes hasta los incas*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
- Herrera, R. (1968). Memoria sobre la hacienda Las Condes en 1895. *Boletín de la Academia Chilena de la Historia*, 79, 121-205.
- Laborde, M. (2021). *Lo Barnechea. Crónicas de su historia*. Corporación Cultural Lo Barnechea. Santiago, Chile.
- Larrain, C. (1952). *Las Condes*. Nascimento. Santiago, Chile.
- De Ramón, A. (1985). Estudio de una periferia urbana: Santiago de Chile 1850- 1900. *Historia*, 20, 199-289.
- Sagredo, R. (1990). *Chile país minero: historia del Mineral de Las Condes*. Museo Histórico Nacional. Santiago, Chile.
- Sánchez, R., y Massone, M. (1995). *Cultura Aconcagua*. Centro de Investigaciones Barros Arana. Santiago, Chile.
- Sesiones del Congreso Nacional. (1889). Sesión 21. Extraordinaria en 2 de diciembre de 1889. Santiago, Chile.
- Stehberg, R. (1980a). Ocupaciones prehispánicas en el Arrayán, con especial referencia al alero de novillo muerto. *Boletín Museo Nacional de Historia Natural*, 37, 43-60.
- Stehberg, R. (1980b). Aproximación metodológica al estudio del poblamiento humano de los Andes de Santiago (Chile). *Boletín Museo Nacional de Historia Natural*, 37, 9-41.
- Stehberg, R. (1995). *Instalaciones incaicas en el norte y centro semiárido de Chile*. Dirección de Bibliotecas, Archivos y Museos, Centro de Investigaciones Diego Barros Arana. Santiago, Chile.
- Stehberg, R. , y Sotomayor, G. (2021). Mapocho Incaico. *Boletín Museo Nacional de Historia Natural*, 61, 85-149.
- Vicuña Mackenna, B. (1882). *El libro de la plata*. Imprenta Cervantes. Santiago, Chile.





Capítulo 2

Geología y geomorfología de la cuenca del estero Yerba Loca, Chile central

Jorge Clavero^{1,2*}, Waldo Pérez-Martínez^{1**},
Valentina Ramírez², Benjamín Castro-Cancino¹,
Idania Briceño-De-Urbaneja¹, Paulina Vidal-
Páez¹, Alejandro Tamayo³

1. Hémera, Centro de Observación de la Tierra,
Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología,
Universidad Mayor. Camino La Pirámide 5750,
Huechuraba, Santiago, Chile.

2. Amawta Geoconsultores Ltda. Almirante Pastene
185, Providencia, Santiago, Chile.

3. Gerencia de Control de Proyectos Ambientales,
Anglo American Chile, Isidora Goyenechea 2800, Las
Condes, Santiago, Chile.

*jclavero@amawta.cl

**waldo.perez@umayor.cl

RESUMEN

La cuenca del estero Yerba Loca forma parte de la cuenca alta del río Mapocho y, por ende, parte de la gran cuenca del río Maipo, Chile central. En ella, se pueden observar los resultados de la historia geológica de los últimos 40 millones de años de la evolución andina, tanto del volcanismo y sedimentación como de la tectónica y alzamiento de la cordillera. La geología del sector está marcada por la evolución de la Cuenca Abanico en el Eoceno-Oligoceno y por el magmatismo asociado al arco mioceno, eventos geológicos que generaron en la zona secuencias plegadas y falladas de origen volcánico y volcanoclástico del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (ca. 35-13 Ma), y una serie de cuerpos intrusivos miocenos (ca. 6-14 Ma) algunos de los cuales presentan localmente cuerpos de brecha hidrotermal y/o mineralización cuprífera asociada. Las estructuras del área comprenden una serie de fallas y pliegues asociados a eventos de deformación

principalmente compresiva ocurridos en el Mioceno Inferior a Medio (ca. 17-15 Ma). En el Pleistoceno-Holoceno la evolución geológica del área de la cuenca ha estado marcada esencialmente por los procesos glaciares y de remociones en masa que han modelado y siguen modelando el abrupto, activo y dinámico paisaje cordillerano. Los parámetros morfométricos, indican que la cuenca es joven y de gran potencial erosivo, presenta un escurrimiento moderado, forma alargada, una exposición NNE-SSO y pendientes de moderadas a fuertes y altitudes que oscilan entre los 1.350 y 5.380 metros. La geomorfología del área está controlada esencialmente por la actividad asociada a siete sistemas morfogenéticos: litoestructural, glaciar, periglacial, nival, gravitacional, aluvial y fluvial. Geomorfológicamente la cuenca se encuentra controlada en su desarrollo por estructuras geológicas, cuyo modelado del relieve responde a procesos de erosión y sedimentación (glaciar - aluvial - fluvial), caracterizados por su gran dinamismo debido a su posición morfoclimática periglacial.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del estero Yerba Loca se encuentra ubicada en la parte alta de la cuenca del río Mapocho. Ambas forman parte, a su vez, de la macrocuenca del río Maipo, ubicada en Chile central. La microcuenca del estero Yerba Loca está ubicada al oriente de la ciudad de Santiago, tiene una longitud aproximada de 20 km y cubre un área de hasta 110 km², y forma gran parte del Santuario de la Naturaleza del mismo nombre, ampliamente visitado por turistas y amantes de la naturaleza (Figura 1).

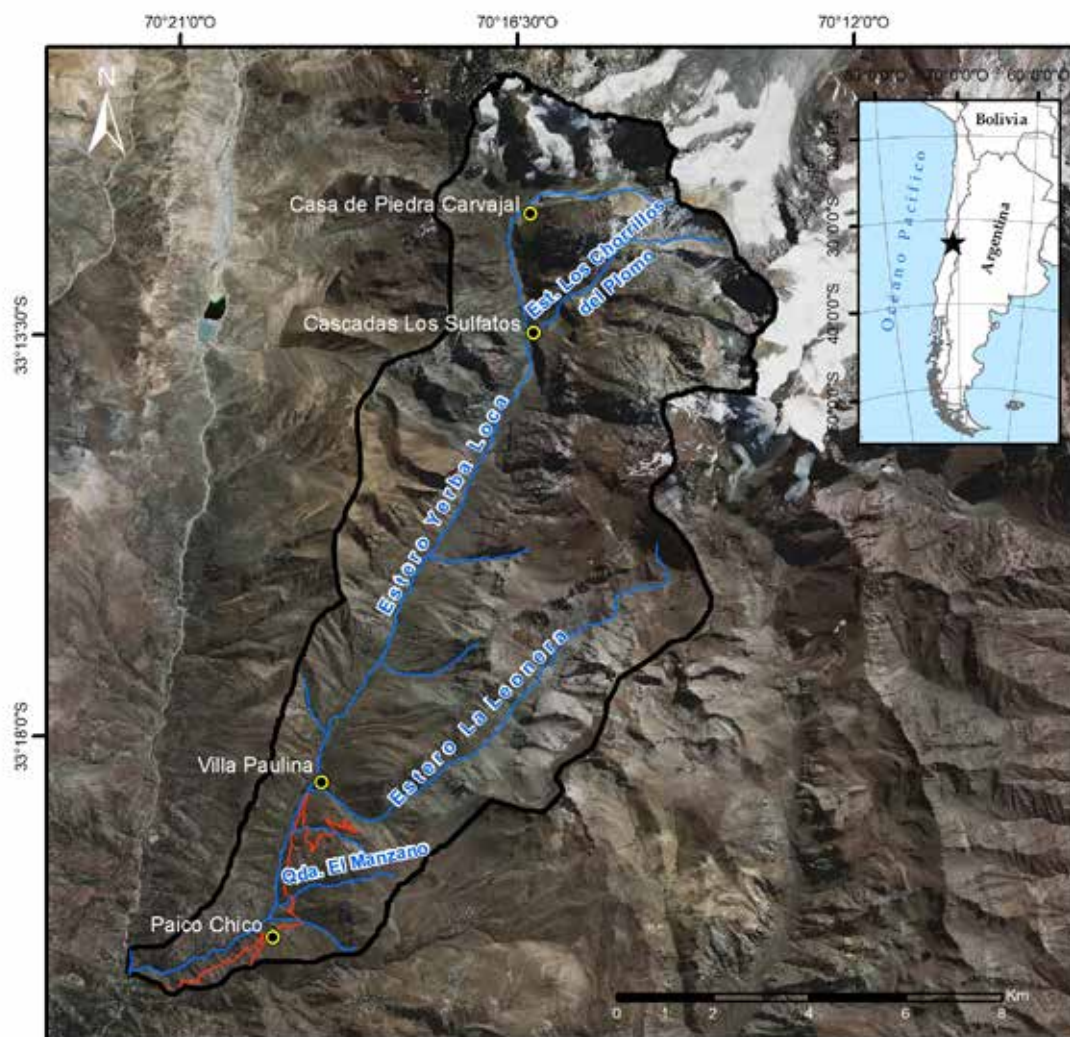


Figura 1. Ubicación de la cuenca del estero Yerba Loca. En negro se destaca la cuenca, mientras que, en rojo la red vial y en azul la red hídrica.

Las rocas y estructuras que afloran a lo largo de la cuenca representan gran parte de la evolución geológica y tectónica de los Andes de Chile central en el Cenozoico Superior, en particular los **arcos magmáticos** del Eoceno-Oligoceno y Mioceno, así como el magmatismo del Mioceno, sus depósitos minerales asociados y las estructuras asociadas a la deformación que han levantado la cordillera en este segmento andino. La geomorfología actual de la cuenca, en tanto, es reflejo no solamente de los eventos volcánicos, magmáticos y tectónicos recientes, sino también de los efectos de la ubicua actividad glacial y de remociones en masa que han afectado el área

durante el Pleistoceno Superior-Holoceno. Todo lo anterior convierte el sector de la cuenca del estero Yerba Loca en un verdadero laboratorio natural y testigo de los grandes eventos geológicos y geomorfológicos que han marcado la evolución de la cordillera de los Andes de Chile central en los últimos 40 millones de años. Este trabajo presenta nuevos antecedentes geológicos, geocronológicos y geomorfológicos que contribuyen a comprender mejor la evolución volcánica y tectónica de la precordillera de Chile central, así como de la evolución geomorfológica reciente del paisaje a través de procesos glaciares, fluviales y de remociones en masa.



En este sector, la cordillera de los Andes presenta un conjunto de características geológicas, estructurales y geomorfológicas que son consecuencia de diversos eventos geológicos relacionados con la evolución tectónica, magmática y paleogeográfica.

2. CONTEXTO GEOTECTÓNICO

La cuenca del estero Yerba Loca se encuentra ubicada en la precordillera y cordillera de Chile central, al NE de la ciudad de Santiago. La morfología y estructura de la cordillera de los Andes en este segmento son el resultado del engrosamiento cortical debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana, cuyos principales rasgos morfoestructurales se han desarrollado a partir del Oligoceno Superior (p. ej. Allmendinger et al., 2005), cuando el vector de convergencia de placas se incrementó y se hizo ortogonal al margen chileno de Sudamérica (p. ej. Somoza, 1998). En particular, en este segmento de los Andes, se identifican de oeste a este, las siguientes morfoestructuras regionales (Figura 2): Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Cuenca de Antepaís, estas dos últimas con representación solamente en Argentina. La Cordillera Principal, a su vez, se puede dividir en tres subsectores: occidental, central y oriental, en donde el sector occidental comprende la zona precordillerana de elevaciones bajas a intermedias al este de la Depresión Central (Figura 2). En este sector, la cordillera de los Andes presenta un conjunto de características geológicas, estructurales y geomorfológicas que

son consecuencia de diversos eventos geológicos relacionados con la evolución tectónica, magmática y paleogeográfica. En particular, la evolución de la denominada *Cuenca Abanico* formada en el Eoceno-Oligoceno y la actividad asociada al **arco magmático** del Mioceno representado por un voluminoso y extenso conjunto de rocas y centros de emisión volcánicos, paralelo al desarrollo de pequeñas cuencas intramontañas, acompañado del emplazamiento de una serie de cuerpos intrusivos plutónicos e hipabisales.

El dominio *Cuenca de Abanico* corresponde a una serie de cuencas relativamente independientes entre sí, alineadas en dirección principalmente NS, desarrolladas durante el Eoceno-Oligoceno (p. ej. Jordan et al., 2001), donde se acumularon voluminosas y extensas rocas principalmente volcánicas y volcanoclásticas, y sedimentarias de origen continental (Charrier et al., 2007; Muñoz-Sáez et al., 2014). Los eventos eruptivos y magmatismo asociados al arco y la formación de estas cuencas habrían comenzado hace alrededor de 40 Ma, asociados a un cambio en el **régimen tectónico** desde uno compresivo a uno extensional (Charrier et al., 2002), en el cual se desarrolló un sistema de fallas regionales que acomodaron la extensión en los márgenes de la cuenca y fallas de movimiento esencialmente normal (Fallas San Ramón y El Diablo). Estas fallas “de borde”

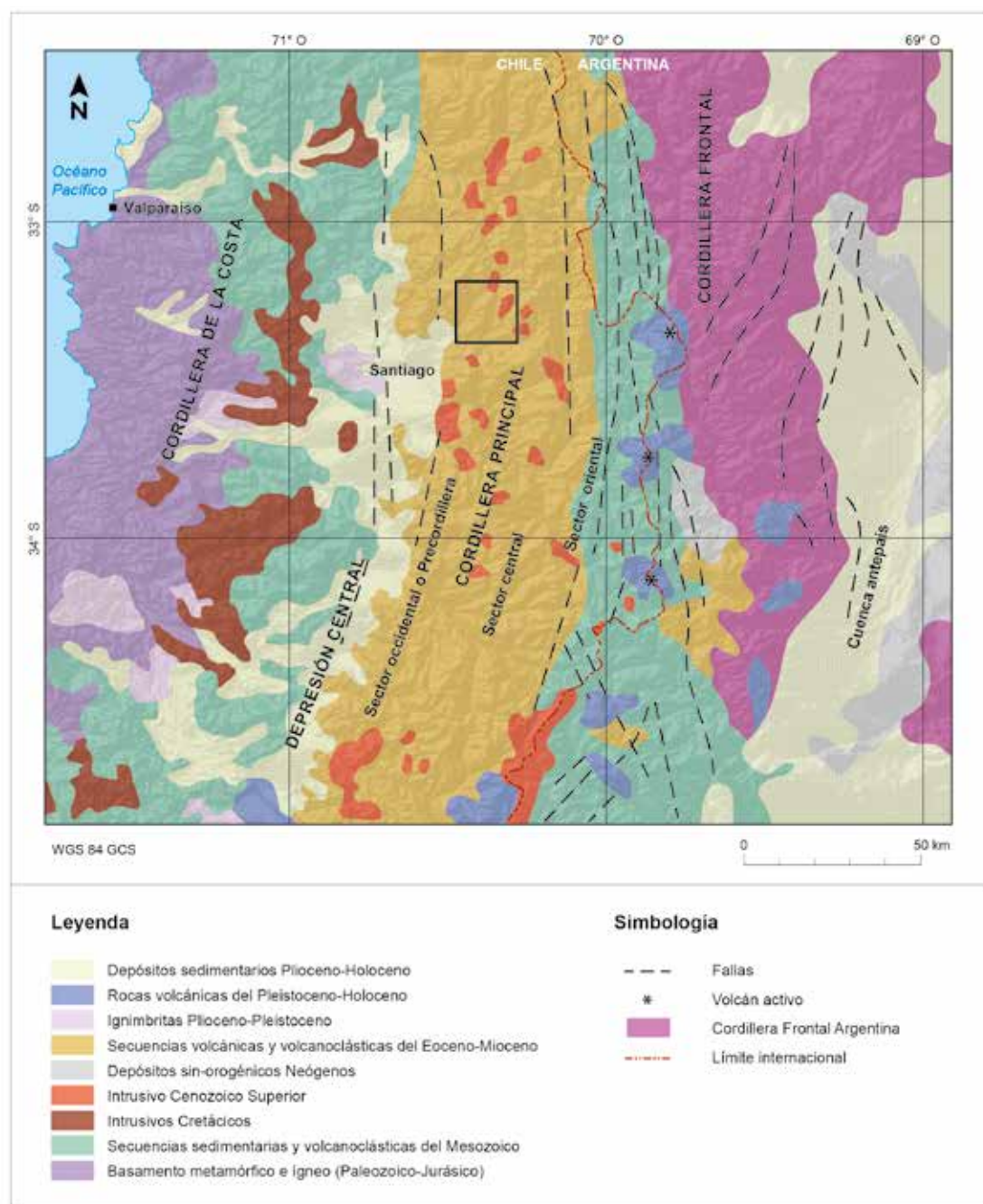


Figura 2. Marco geotectónico de Chile central y las principales morfoestructuras asociadas. Modificado de Muñoz-Sáez et al. (2014).

habrían controlado la morfología y ubicación de los depocentros, así como la depositación volcánoclastica y sedimentaria en las cuencas. Justo al sureste del área de la cuenca de Yerba Loca, en el sector del estero El Cepo, la acumulación sedimentaria habría alcanzado hasta 4.000-5.000 m de espesor (Farías, 2007; Muñoz-Sáez et al., 2014). A inicios del Mioceno (~23 Ma), nuevamente el **régimen tectónico** en Chile central cambió a uno principalmente compresivo, lo que habría generado la inversión de las fallas normales a movimiento principalmente inverso (Charrier et al., 2002). Este evento generó la deformación de las rocas ya acumuladas de la Formación Abanico y el alzamiento de estas (Muñoz-Sáez et al., 2014). El alzamiento habría ocurrido entre los 23 y 16 Ma, generando erosión y la posterior acumulación de sedimentos, que estarían representados en el área por las facies sedimentarias de la Formación Farellones (Jordan et al., 2001; Charrier et al., 2002). Simultáneamente, en el Mioceno Inferior a Medio (ca. 18 a 13 Ma) el arco magmático en este sector de los Andes estuvo muy activo y produjo grandes volúmenes de magma, cuya mayor parte emergió a la superficie formando un extenso arco volcánico, representado por las rocas de la Formación Farellones.

La simultaneidad de los eventos volcánicos y tectónicos representados por las formaciones Abanico y Farellones en este período resulta en que las rocas de ambas unidades son, en sectores, completamente concordantes, en tanto que en otros sectores presentan una fuerte discordancia angular o, incluso, **discordancias** progresivas sintectónicas (Jordan et al., 2001; Charrier et al., 2002), sumado al hecho que ambas unidades son probablemente diacrónicas a lo largo de su extensión NS (p. ej. Godoy, 2012). A esto se suma el hecho que el dominio volcánico de la Formación Farellones presenta notables discordancias internas de origen volcánico, a veces con ángulos superiores a 30°, de tipo depositacional volcánico y no están asociadas directamente a eventos tectónicos. Paralelamente y, como parte del mismo arco magmático mioceno, se emplaza una serie de cuerpos intrusivos de afinidad calcoalcalina y fuente mantélica. Posteriormente, debido a la gran carga de rocas volcánicas y sedimentarias, comienza a formarse la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua (FPCA; Ramos et al., 1996), y la migración de la deformación hacia el este, asociada a una falla inversa de bajo ángulo relacionada con la Falla El Diablo, a lo largo del borde oriental de la cuenca (Muñoz-Sáez et al., 2014). Hacia

el final del desarrollo de la FPCA, el magmatismo se caracteriza por el emplazamiento de cuerpos intrusivos, algunos relacionados al Batolito Río Blanco-San Francisco, así como otros cuerpos intrusivos de menor profundidad de emplazamiento, asociados espacial y temporalmente a diversos cuerpos de brechas hidrotermales, esencialmente de turmalina-molibdenita que están, en parte, asociadas a la mineralización cuprífera en el sector (Serrano et al., 1996; Toro et al., 2012; Deckart et al., 2014). Hacia el Mioceno Superior-Plioceno, entre los 10 y 4 Ma, comienza a terminar la migración de la deformación al este, y se produce un importante alzamiento y exhumación regional de los Andes asociado a altas tasas de erosión (Farías, 2007).

3. GEOLOGÍA DE LA CUENCA DEL ESTERO YERBA LOCA

En la cuenca del estero Yerba Loca y sectores cercanos afloran unidades geológicas estratificadas e intrusivas, además de depósitos no consolidados, cuyas edades varían desde el Oligoceno Superior Inferior al Holoceno (Hémera, 2019 y referencias en ese trabajo), incluso con deslizamientos activos en tiempos históricos (Sepúlveda et al., 2020). La distribución de estas unidades se presenta en la Figura 3 en un mapa geológico simplificado del área.

La unidad estratificada más antigua que aflora en la zona del estero Yerba Loca y sectores adyacentes corresponde a la Formación Abanico (Eoceno-Oligoceno; Charrier et al., 2002). En el sector, esta unidad está representada por, al menos, tres litofacies distintas, concordante con lo propuesto por Jara y Charrier (2014). En el sector occidental, la Formación Abanico corresponde a una secuencia suavemente plegada con ejes de orientación NNE (litofacies c; Figura 3), constituida por una secuencia sedimentaria epiclástica de hasta 200 m expuestos, con capas de areniscas a limolitas hacia el techo y conglomerados finos, medios a gruesos con lentes de areniscas que, en sectores, presentan laminación paralela, cruzada de bajo ángulo y en artesa. En el sector oriental, en el valle del río Olivares, afloran rocas de dos litofacies (litofacies a y b; Figura 3). La primera está constituida por una secuencia estratificada y plegada esencialmente volcánica efusiva de hasta 400 m de espesor expuesto, formada por lavas andesíticas con facies densas y brechosas autoclásticas, con bandeamiento de flujo

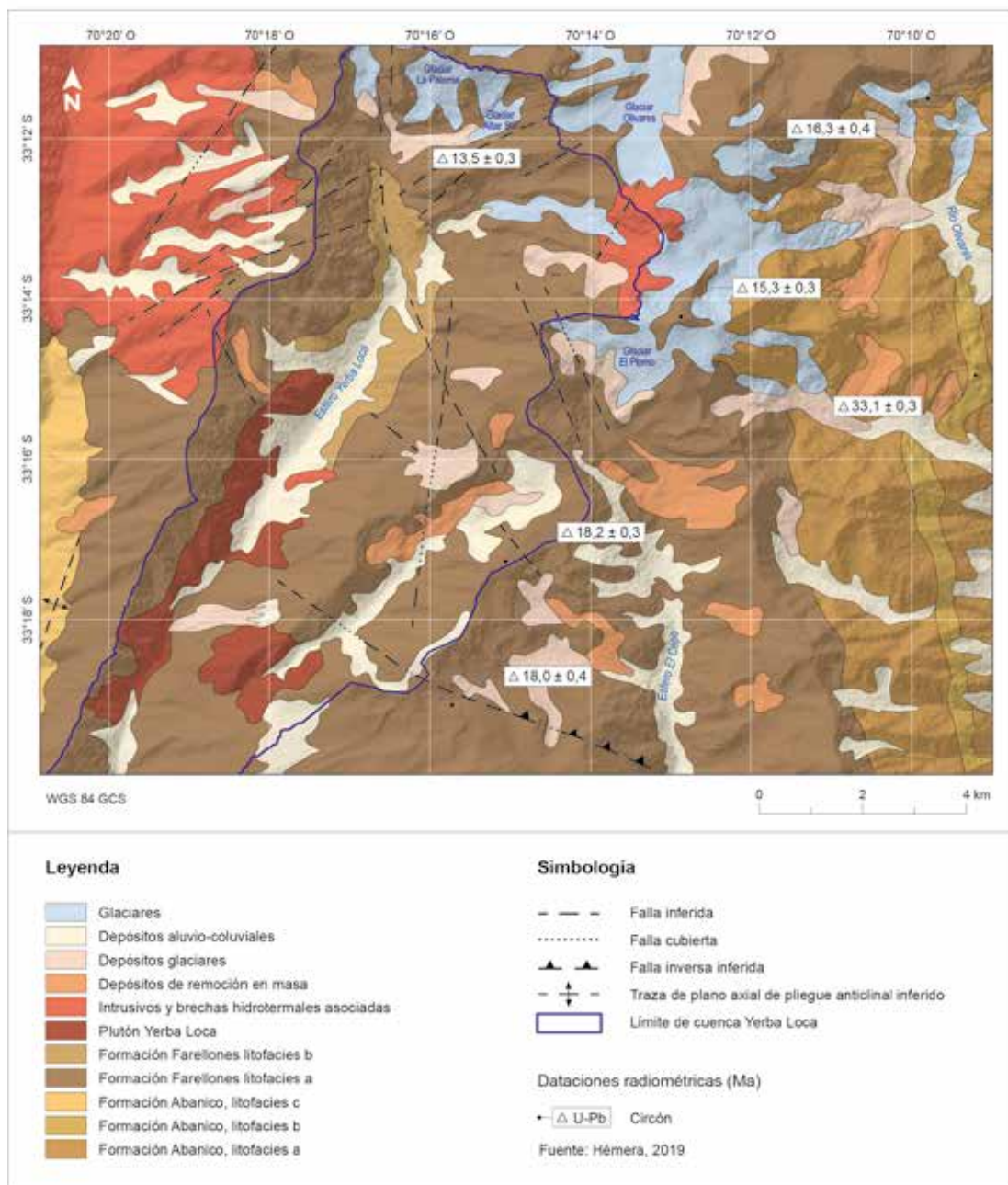


Figura 3. Mapa geológico simplificado de la cuenca del estero Yerba Loca (original a escala 1:50.000; Fuente: Hémera, 2019).

plegado bien desarrollado, con intercalaciones de tobas de ceniza a tobas de lapilli de composiciones andesítica a dacítica. Las lavas tienen textura porfírica principalmente con fenocristales de plagioclasa y piroxeno en masa fundamental afanítica, en sectores vesicular a amigdaloidal con relleno de clorita, calcita y/o esmectita. La segunda corresponde a una secuencia volcanoclástica también plegada (Figura 4 arriba izquierda y arriba derecha), de hasta 600 m de espesor expuesto, formada principalmente por rocas piroclásticas de composiciones andesítica a dacítica, en las que predominan las tobas de ceniza y las tobas de lapilli pumíceas con diversos grados de soldamiento, y con intercalaciones de conglomerados medios a limolitas rojas epiclásticos, en sectores laminados.

Las tobas de lapilli fino incluyen pómez blanquecinas, fragmentos líticos porfíricos inmersos en matriz de ceniza vítrea con cristales de plagioclasa y biotita oxidada. Una nueva edad U-Pb (uranio-plomo) en circón en una toba de ceniza, obtenida por Hémera (2019) en la vertiente occidental de la parte alta de la cuenca del río Olivares, justo al este del estero Yerba Loca (litofacies b; Figura 3), entrega una edad de ca. 33 Ma (límite Eoceno-Oligoceno; Tabla 1), lo que indicaría que en el área las rocas de esta formación representan la parte más inicial dentro de la evolución del dominio de la Cuenca Abanico y, por ende, algunas de las cuencas iniciales que dieron lugar a la sedimentación contemporánea con el profuso volcanismo que la caracteriza.



Figura 4. Fotografías representativas de las unidades volcanoclásticas estratificadas oligo-miocenas que afloran en la cuenca del estero Yerba Loca. Secuencia estratificada y ligeramente plegada de tobas con intercalaciones de areniscas y conglomerados epiclásticos de la Formación Abanico, ladera O del valle del río Olivares (arriba izquierda). Detalle de rocas sedimentarias epiclásticas de la Formación Abanico, ladera O del valle del río Olivares (arriba derecha). Secuencia volcanoclástica estratificada de la Formación Farellones en el estero Yerba Loca, formada por lavas, tobas y escasas intercalaciones (abajo izquierda). Detalle de lavas andesíticas con fracturamiento lajoso de la Formación Farellones en ladera este del estero Yerba Loca (arriba derecha).

La unidad de mayor extensión que aflora en el área de la cuenca del estero Yerba Loca corresponde a la Formación Farellones (Mioceno Inferior a Medio; Kohn, 1960). Esta unidad corresponde a una secuencia volcano-sedimentaria formada por coladas de lava dacíticas a andesítico-basálticas, domos riolíticos, tobas de lapilli generalmente dacíticas, y rocas sedimentarias como brechas, conglomerados y areniscas líticas (p. ej. Thiele, 1980; Elgueta et al., 1999; Hémera, 2019). En el área de la cuenca del estero Yerba Loca, las rocas de la Formación Farellones corresponden a una secuencia gruesamente estratificada y suavemente plegada de hasta 300 m de espesor expuesto, formada por rocas esencialmente volcánicas con muy escasas intercalaciones de rocas epiclásticas, las que pueden agruparse en dos litofacies principales. La litofacies a, que aflora en gran parte de la zona entre el estero Yerba Loca y el río Olivares (Figura 3, Figura 4 abajo izquierda) está constituida por lavas de composiciones andesítica a dacítica, por domos de composición dacítica, así como escasas intercalaciones de niveles piroclásticos compuestos por tobas de ceniza media a lapilli fino de las mismas composiciones, macizas a finamente laminadas. Las lavas andesíticas presentan facies densas y brechosas autoclásticas, con bandeamiento de flujo y/o fracturamiento lajoso bien desarrollado (Figura 4 abajo derecha). Tienen textura porfírica con

fenocristales de plagioclasa, anfíbola y piroxeno en masa fundamental vítrea con microlitos de plagioclasa. Los domos, de hasta 80 m de espesor expuesto, presentan facies brechosas autoclásticas y bandeamiento de flujo plegado muy bien desarrollados, facies densas con escasos fenocristales y masas fundamentales vítreas con diversos grados de vesicularidad y, localmente, con litofisas. La litofacies b aflora esencialmente en la parte alta de la cuenca del estero Yerba Loca (Figura 3) y está representada principalmente por rocas piroclásticas formadas por brechas piroclásticas monomíticas, tobas brechosas y tobas de lapilli fino pumíceas. Las brechas piroclásticas son ricas en fragmentos juveniles, con algunas pómez aplastadas y orientadas (*flammas*) y escasos fragmentos líticos porfíricos inmersos en matriz de ceniza gruesa a lapilli fino rica en cristales de plagioclasa y anfíbola. Las tobas brechosas se componen de abundantes fragmentos líticos porfíricos inmersos en matriz de ceniza gruesa a media rica en cristales de plagioclasa y tobas de lapilli fino a medio, líticas con matriz de ceniza fina a media, en sectores fuertemente silicificada. Cinco nuevos datos geocronológicos obtenidos mediante el método U-Pb en circones (Hémera, 2019), entregan valores entre ca. 18 Ma y ca. 13 Ma para las rocas volcánicas de la Formación Farellones en el sector del estero Yerba Loca (Tabla 1).

Tabla 1. Nuevos datos geocronológicos en el área de la cuenca del estero Yerba Loca y zonas adyacentes.
Fuente: Hémera, 2019.

Código	Coordenada Este	Coordenada Norte	Unidad	Método	Mineral	Litología	Edad (Ma) ± Error
LBR-56	392.561	6.320.483	Formación Abanico	U/Pb	Circones	Toba dacítica	33,1 ± 0,3
LBJ-06	381.009	6.324.692	Formación Farellones	U/Pb	Circones	Andesita	13,5 ± 0,3
LBJ-38	391.571	6.326.850	Formación Farellones	U/Pb	Circones	Andesita	16,3 ± 0,4
LBJ-39a	383.519	6.316.090	Formación Farellones	U/Pb	Circones	Riodacita	18,2 ± 0,3
LBR-01	382.524	6.312.762	Formación Farellones	U/Pb	Circones	Dacita	18,0 ± 0,4
LBR-55a	386.844	6.321.768	Formación Farellones	U/Pb	Circones	Andesita	15,3 ± 0,3

Las unidades oligo-miocenas estratificadas están intruidas por una serie de cuerpos intrusivos de emplazamiento plutónico a hipabisal (Figura 3). El más antiguo de los que afloran en el sector corresponde al Plutón Yerba Loca de ca. 14 Ma (Mioceno Medio; Deckart et al., 2014) el cual presenta diversas litologías desde granodioritas de anfíbola y biotita hasta monzodioritas cuarcíferas de anfíbola y escasa biotita (Deckart et al., 2014; Figura 3; Figura 5 arriba izquierda y arriba derecha). Una serie de cuerpos intrusivos más jóvenes, con edades comprendidas entre ca. 6 y ca. 11 Ma (Toro et al., 2012; Deckart et al., 2014; Piquer, 2015), se disponen en la parte intermedia a alta de la cuenca (Figura 3). Muchos de estos intrusivos están espacial y genéticamente asociados a cuerpos de brechas hidrotermales, algunas de las cuales presentan alteración y mineralización cuprífera (p. ej. Piquer, 2015).

Entre los depósitos no consolidados que afloran en la cuenca del estero Yerba Loca se reconocen, principalmente, los de remociones en masa y los de tipo coluvial, fluvial y glaciar del Pleistoceno y Holoceno. Los depósitos glaciares se disponen principalmente en las partes altas de las hoyas hidrográficas del sector, en particular en la base de valles glaciares y/o de glaciares blancos o de roca aún activos (Figura 3). Depósitos de remoción en masa de tipo deslizamiento se distribuyen en las laderas de los valles a lo largo de toda la cuenca del estero (Figura 3), habiendo ocurrido incluso en años recientes en la parte media a baja de la cuenca (Sepúlveda et al., 2020). Depósitos de remoción en masa hídricas como flujos y crecidas de detritos se disponen esencialmente como relleno parcial de los fondos de valles y quebradas (Figura 3; Figura 5).



Figura 5. Fotografías representativas de unidades intrusivas miocenas y depósitos de remoción en masa pleistocenos que afloran en la cuenca del estero Yerba Loca. Plutón Yerba Loca (Mioceno Medio), fases de tonalita de anfíbola en estero La Leonera (arriba izquierda). Detalle de monzodiorita cuarcífera de anfíbola del Plutón Yerba Loca (abajo derecha). Depósitos de remoción en masa de tipo crecida de detritos, parte alta de la cuenca del estero Yerba Loca (abajo izquierda). Lóbulo lateral abrupto de depósito de remoción en masa de tipo flujo de detritos, parte media de la cuenca del estero Yerba Loca (abajo derecha).

Desde el punto de vista estructural, el área de la cuenca del estero Yerba Loca se ubica en el denominado Dominio Cuenca de Abanico (Charrier et al., 2002, 2007), cuyos límites serían la Falla San o de Ramón, por el oeste y la Falla El Diablo por el este (Fariás, 2007). En este dominio, las rocas de la Formación Farellones presentan, en general, una estratificación subhorizontal, con suave basculamiento y desarrollo de pliegues y escasas fallas con expresión en superficie (p. ej. Carrizo et al., 2012; Piquer, 2015), aunque localmente presentan una serie de discordancias intra-volcánicas que, en sectores, llegan a tener más de 30°. En la cuenca del estero Yerba Loca propiamente tal, las estructuras de mayor relevancia corresponden a un pliegue sinclinal seguido de un anticlinal; ambos con ejes de orientación general NNE-SSO con bajas amplitud y longitud de onda, una de cuyas trazas coincidiría de forma aproximada con el eje del estero Yerba Loca.

4. GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA

4.1. Contexto general de la cuenca del estero Yerba Loca

La cuenca del estero Yerba Loca corresponde a un profundo valle con orientación preferente NNE-SSO. La cuenca evidencia erosión fluvial en zonas de menor altitud, mientras que hacia la cabecera presenta rasgos morfológicos glaciares asociados a las glaciaciones del Pleistoceno (Arroyo et al., 2002).

Destaca la presencia de los cerros La Paloma (4.910 m s.n.m.) y Altar (5.180 m s.n.m.) en el extremo N de la cuenca, el cordón de la Sierra Bella por el O y los cerros Leonera (4.954 m s.n.m.), Pintor (4.180 m s.n.m.) y La Parva (4.050 m s.n.m.) por el E. Las laderas presentan un aspecto escalonado y abrupto, debido a la disposición subhorizontal y variaciones locales de la estratificación del macizo montañoso (SERNAGEOMIN, 2019).

4.2. Hidrografía

La cuenca del estero Yerba Loca es de carácter exorreica y posee una superficie aproximada de 107,9 km². La red hidrográfica presenta un patrón de drenaje paralelo, influenciado por las estructuras geológicas presentes. El cauce principal tiene una longitud de 22 km desde su nacimiento, en el cerro La Paloma hasta la confluencia con el río San Francisco, el cual en conjunto con el río Molina dan forma al río Mapocho. Alberga dos microcuencas de orientación NE-SO que tributan al estero Yerba Loca, correspondientes a los esteros La Leonera y Los Chorrillos del Plomo.

Los glaciares y el derretimiento nival se configuran como una fuente de agua importante para la región en periodos estivales (Casassa et al., 2015), siendo relevantes en la cuenca de estudio, la presencia de los glaciares La Paloma, Del Rincón, Altar Sur y Piedra Carvajal. Según lo indicado por Clavero et al. (2021) en el área de estudio las temperaturas tendrán un aumento sostenido de hasta 3,8 °C hacia finales de siglo, acompañada de una disminución global de las precipitaciones anuales, con una alta variabilidad interanual de estas y la ocurrencia de eventos muy lluviosos de corta duración.

4.3. Morfometría

Debido a controles tectónicos y geológicos la cuenca presenta una exposición O, NO y SO, que representan el 25%, 19% y 16% de la superficie respectivamente. La Figura 6 muestra la distribución de la altitud, pendiente y orientación de las laderas en la cuenca del estero Yerba Loca. En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis morfométrico.

Los glaciares y el derretimiento nival se configuran como una fuente de agua importante para la región en periodos estivales (Casassa et al., 2015), siendo relevantes en la cuenca de estudio, la presencia de los glaciares La Paloma, Del Rincón, Altar Sur y Piedra Carvajal.

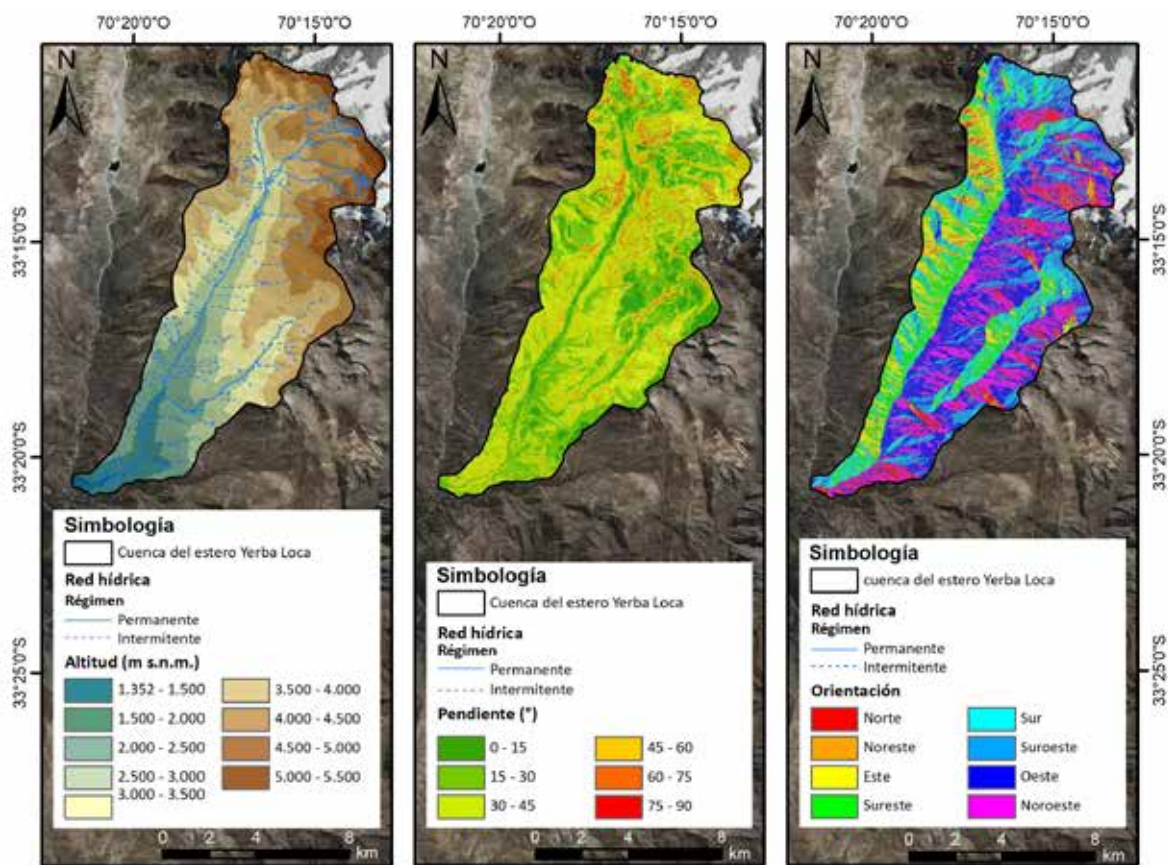


Figura 6. Altitud (m s.n.m.), pendiente (°) y orientación de las laderas de la cuenca del estero Yerba Loca. Modificado de Pérez et al. (2018).

Las altitudes de la cuenca oscilan entre los 1.350 y 5.380 m s.n.m. aproximadamente, donde el 31% de la superficie se localiza bajo los 3.000 m s.n.m., un 43% entre los 3.000 y 4.000 m s.n.m., mientras que un 26% sobre los 4.000 m s.n.m.

Las pendientes del sector fluctúan entre los 3° y 87°, clasificadas desde suaves hasta muy escarpadas (Araya-Vergara y Börgel, 1972; Ferrando, 1993). El 31% y 46% de la superficie de la cuenca presenta pendientes que oscilan entre los 15°-30° y 30°-45°, respectivamente. Mientras que el 12,5% del área presenta pendientes sobre los 45°, localizadas en la cabecera de la cuenca, con superficies escarpadas que favorecen la caída y desprendimientos de roca. Las pendientes corresponden al principal factor de desarrollo y control de las formas del relieve, y permiten entender el movimiento del agua en la cuenca.

Los elementos fisiográficos como el relieve y la pendiente (Singh et al., 2011), revelan que la escorrentía e infiltración presentan un gran potencial erosivo. Esto es consistente con el Índice de Compacidad de Gravelius de 1,65 (Tabla 2), característico de una cuenca de forma alargada que posee rapidez de escurrimiento potencial moderado y un cauce principal que puede recibir aportes de manera gradual sin represamientos debido a la presencia de altas pendientes. Este índice señala una tendencia de la cuenca a concentrar grandes volúmenes de agua en su escurrimiento, lo que sumado al desnivel (4.027 m aproximados), podría provocar inundaciones en sus puntos de descarga ante eventos de precipitaciones extremas.

Por otra parte, la densidad de drenaje de 2,23 (Tabla 2) indica que la capacidad de drenaje como respuesta ante eventos climáticos extremos sería rápida, drenando el agua desde zonas elevadas en menor tiempo

Tabla 2. Parámetros morfométricos de la cuenca del estero Yerba Loca. Modificado de Pérez et al. (2018).

Parámetro morfométrico	Resultados
Lineales	
Perímetro de la cuenca	60,9 km
Longitud del cauce principal	22 km
Longitud de la red hídrica	241 km
Superficiales	
Área o magnitud de la cuenca	107,9 km ²
Densidad de la red de drenaje	2,23
Coeficiente de compacidad	1,65
Forma de la cuenca	Alargada
Tiempo de concentración	83,43 min
Relieve	
Altitud	Entre 1.350 – 5.380 m
Desnivel	4.026,97 m
Pendiente (°)	3 – 87°
Pendiente promedio (°)	31°
Rapidez de escurrimiento potencial	Moderado
Curva hipsométrica	Paisaje joven y gran potencial erosivo

que cuencas con densidades de drenaje menores (Strahler, 1964). En la cuenca del estero Yerba Loca las altas densidades de drenaje estarían asociadas a la presencia de rocas débiles, vegetación escasa y relieve montañoso.

Finalmente, los parámetros morfométricos medidos muestran coherencia con la información de la **curva hipsométrica** (Figura 7), donde se observa que la cuenca se caracteriza por ser geomorfológicamente joven, capaz de movilizar grandes volúmenes de sedimentos y bloques de rocas.

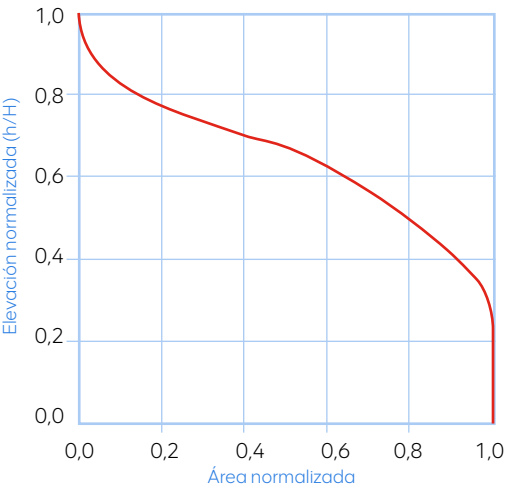


Figura 7. Curva hipsométrica de la cuenca del estero Yerba Loca. Se observa que aproximadamente más del 69% de la superficie de la cuenca presenta altitudes superiores a 3.000 m s.n.m. y valles alargados de origen fluvial.

4.4. Sistemas geomorfológicos y geoformas de la cuenca del estero Yerba Loca

El valle principal del estero Yerba Loca, desde la confluencia del río San Francisco hasta los 2.500 m s.n.m. presenta una marcada morfología fluvial, con un perfil transversal en forma de “V”. Las quebradas tributarias se desarrollan de manera incisa como canales de flujo que transportan sedimentos en temporadas invernales o lluviosas, con depósitos aluviales y coluviales en sus bases.

Desde los 2.500 hasta los 2.800 m s.n.m. los rasgos de erosión fluvial son menos evidentes y el modelado glaciar aparece de manera incipiente, con laderas

cóncavas en su base y abundante presencia de depósitos gravitacionales y aluviales en las laderas. Las quebradas tributarias se desarrollan como canales incisos, con depósitos aluvio-coluviales en sus bases y, en menor medida, como valles colgados con presencia de glaciares rocosos y depósitos glaciares en su base.

Desde los 2.800 m s.n.m. hacia la cabecera de la cuenca se evidencia una marcada morfología en “U”. La base de las laderas es cóncava y los afloramientos rocosos presentan pendientes abruptas, formando cornisas y circos glaciares que caracterizan la cabecera de las quebradas. Por otro lado, desde los 3.400 m s.n.m. hacia arriba se desarrollan glaciares de valle y rocosos en el fondo de las quebradas.

Tabla 3. Sistemas geomorfológicos y geoformas de la cuenca del estero Yerba Loca. Modificado de Pérez et al. (2018).

Sistema geomorfológico	Geoformas
Litoestructural	Cornisas Escarpes litológicos
Glaciar	Glaciar de montaña Glaciar de valle Glaciarete Glaciar rocoso Morrena de fondo Morrena central Morrena lateral Roca aborregada Grietas glaciares Circo glaciar Circo glaciar degradado Cordón morrénico Hombreira glaciar Escarpe frontal Escarpe de erosión glaciar
Periglaciar	Rampas de protalud Lóbulos de gelifluxión Lago periglaciar
Nival	Nichos de nivación
Gravitacional	Cono coluvial Conos coluviales coalescentes Hummocks Corona de deslizamiento
Aluvial	Cono aluvio-coluvial Conos aluvio-coluviales coalescentes Abanico aluvial Canal de flujo Escarpe de flujo
Fluvial	Llanura fluvio-aluvial Terraza fluvio-aluvial Escarpe de erosión fluvial

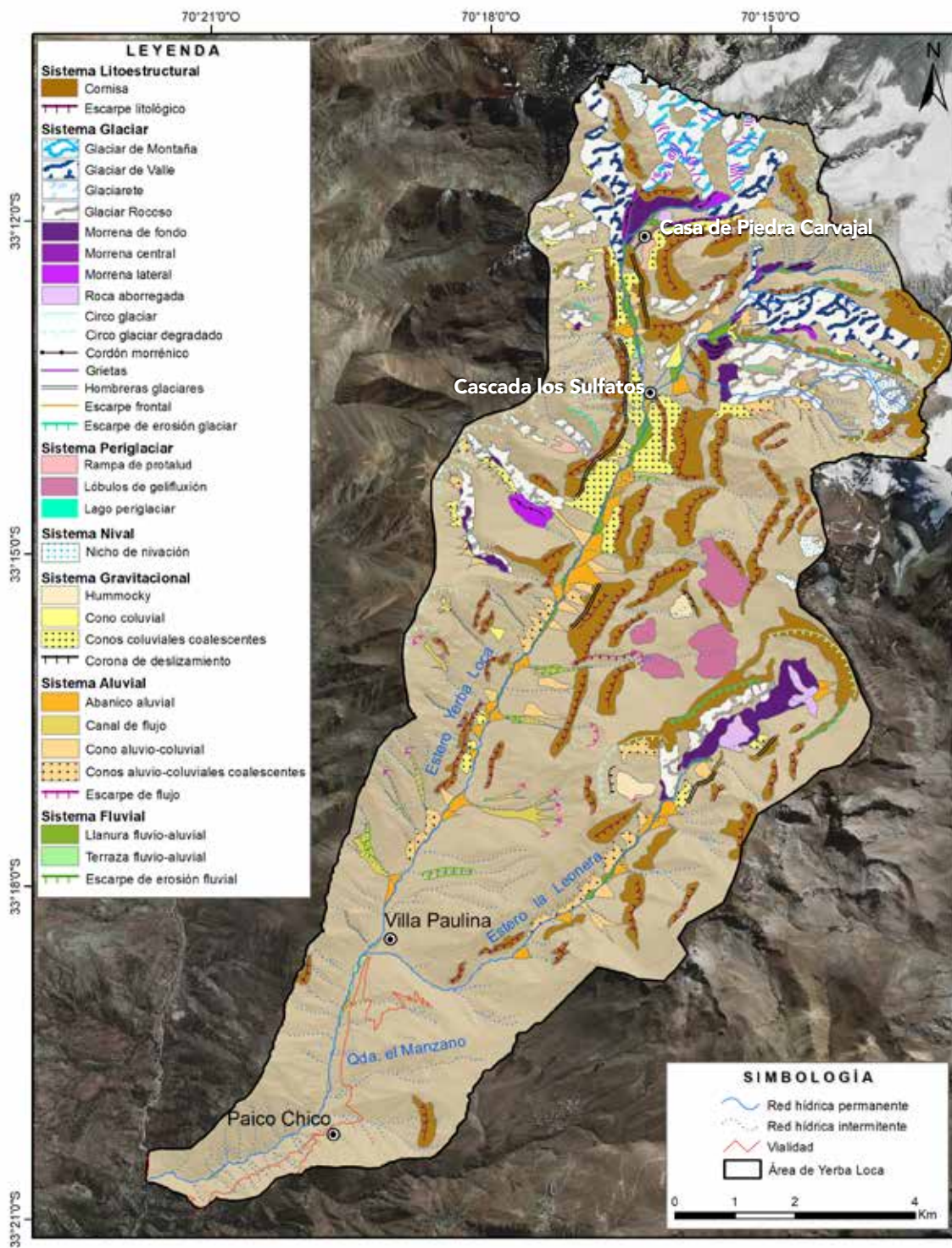


Figura 8. Mapa geomorfológico de la cuenca del estero Yerba Loca. Modificado de Pérez et al. (2018).

Los **sistemas geomorfológicos** y las **geoformas** identificados en la cuenca representan los procesos y factores que interactúan en el sector andino de Chile central, con una fuerte influencia estructural y tectónica, que determina la orientación de los valles, los cuales se encuentran modelados por procesos glaciares, periglaciares, gravitacionales, aluviales y fluviales (Pérez et al., 2018).

Los procesos erosivos se evidencian mediante la presencia de escarpes, asociados a la erosión diferencial de afloramientos rocosos que actúan como fuente de sedimentos para la formación de geoformas depositacionales. El transporte y posterior depositación de los sedimentos se expresa en la generación de morrenas a partir de glaciares en la base de las quebradas sobre los 3.500 m s.n.m.; la formación de conos coluviales en la base de las laderas por procesos gravitacionales; y depósitos aluviales próximos a los cauces con formas de abanicos y conos producto de la interacción de procesos gravitacionales e incorporación de agua en el transporte de los sedimentos.

Los sistemas y geoformas identificados en la cuenca del estero Yerba Loca se muestran en la Tabla 3 y Figura 8.

1. Sistema Litoestructural

El sistema litoestructural es consecuencia de procesos tectónicos que exponen afloramientos de roca y determinan su disposición y orientación. Las distintas litologías determinan la competencia de las rocas, que controla el aspecto en que se encuentran en superficie. Las geoformas asociadas a este sistema corresponden a cornisas y escarpes litológicos (Figura 9a).

Las cornisas se presentan como afloramientos rocosos expuestos en las laderas, en forma de voladizos elongados con abruptos escarpes. Se ubican preferentemente en las laderas de exposición O del valle principal y quebradas tributarias. La presencia de estas geoformas está condicionada por los planos estratificados de las rocas pertenecientes a las formaciones Abanico y Farellones, y a la competencia de los estratos ante los procesos erosivos.

Los escarpes litológicos se encuentran asociados al desarrollo de las cornisas que configuran la zona de origen de conos coluviales y aluvio-coluviales individuales y coalescentes. Estos se forman en respuesta

a la erosión diferencial que sufren los afloramientos rocosos, generando pendientes superiores a 65°.

2. Sistema Glaciar

El sistema glaciar es consecuencia de los procesos erosivos y de depositación glaciar que ocurren como resultado de la dinámica del hielo glaciar (Hughes y Woodward, 2009). Asociado a los procesos erosivos, se reconocen valles en forma de "U", valles colgantes, rocas aborregadas, hombreras glaciares, circos glaciares y escarpes de erosión glaciar. Agrupados en los procesos de depositación se distinguen las morrenas de diverso tipo (fondo, laterales y frontales).

Los glaciares identificados en la cuenca cubren 9,5 km² del área y corresponden a cuatro glaciares de montaña, tres glaciares de valle, dos glaciaretos y 21 glaciares rocosos (DGA, 2008). En la cabecera de la cuenca, a 4.486 m s.n.m., destaca el glaciar La Paloma, con un área de 1,2 km² (Figura 9b) cuya superficie presenta grietas transversales y longitudinales, las que marcan el límite entre las zonas de acumulación y ablación (DGA, 2008). Los glaciares rocosos se disponen de manera lingüiforme y lobulada, ubicados en quebradas tributarias entre los 3.800 y 5.000 m s.n.m. Se componen por detritos pobremente clasificados, los límites frontales y laterales son escarpados, con variaciones en la coloración que marcan el límite entre la capa activa superior y la zona inferior compuesta comúnmente por detritos de menor tamaño (Figura 9c).

Los circos glaciares se reconocen por su morfología semicircular en planta y escarpes pronunciados generados por la erosión mecánica de los glaciares. Se ubican en la cabecera de las quebradas tributarias, desde los 3.600 hasta los 4.600 m s.n.m. Al ser formas labradas sobre afloramientos rocosos, en sus bases se identifican depósitos coluviales y aluvio-coluviales (Figura 9d).

Las hombreras glaciares se reconocen como la zona de inflexión en la pendiente de las laderas, se observa que el perfil cóncavo en el tramo inferior cambia a un perfil rectilíneo o convexo hacia la zona superior. La erosión glaciar en las laderas del valle principal se observa entre los 2.700 hasta los 3.500 m s.n.m. en el sector de Casa de Piedra Carvajal. Asociados al límite de los afloramientos rocosos en las laderas, se desarrolla una cobertura detrítica de conos coluviales y aluvio-coluviales (Figura 9e).

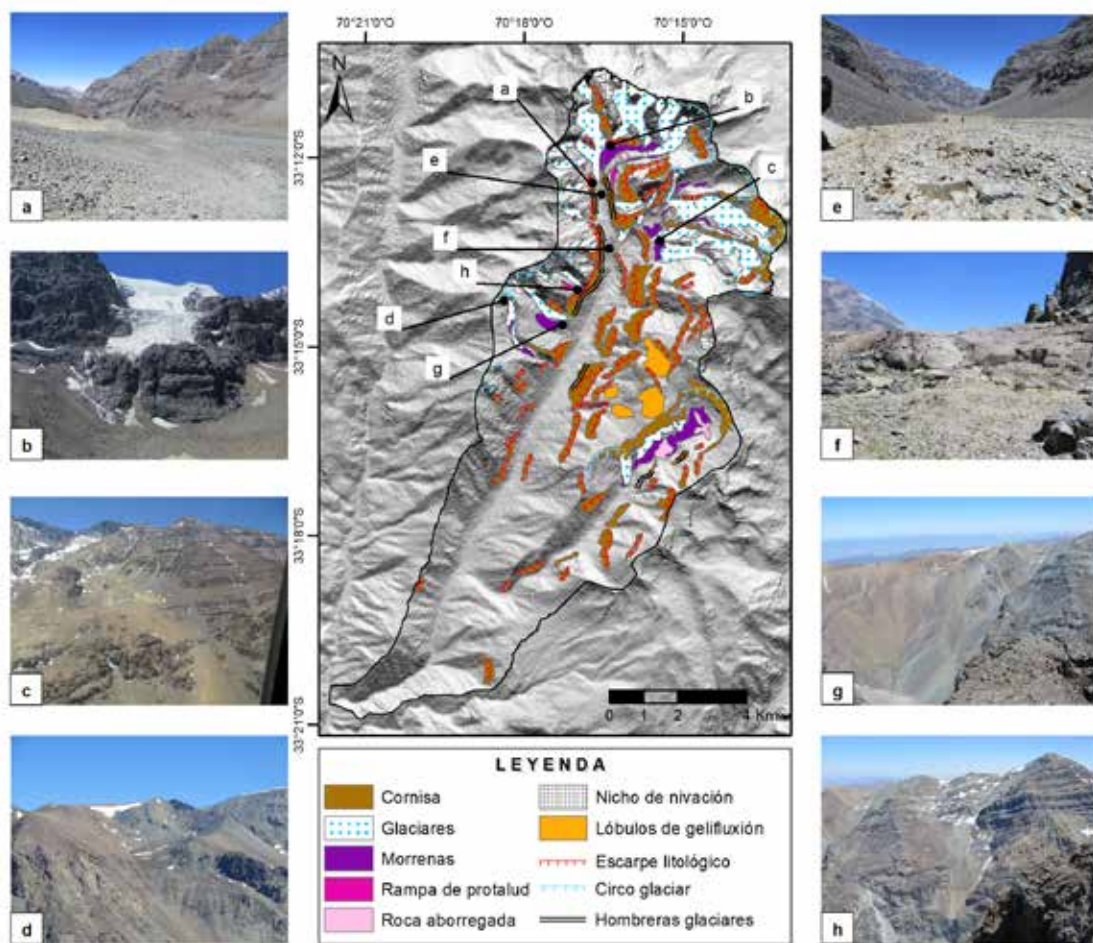


Figura 9. Distribución de las geoformas en los sistemas litoestructural, glaciar, periglacial y nival. **a)** Cornisas y escarpes litológicos; **b)** Glaciar La Paloma; **c)** Glaciares rocosos; **d)** Circo glaciar y nicho de nivación; **e)** Valle glaciar en forma de "U" y hombreras glaciares; **f)** Roca aborregada; **g)** Morrena lateral; **h)** Rampa de protalud. Modificado de Pérez et al. (2018).

Las rocas aborregadas, identificadas en el sector de Casa de Piedra Carvajal (3.600 m s.n.m.) y en la cabecera del estero la Leonera (3.500 m s.n.m.), corresponden a afloramientos rocosos ubicados en la base de las quebradas, rodeados por morrenas de fondo cuya superficie se encuentra pulida debido a la erosión glaciar (Figura 9f).

Las morrenas se localizan en el sector alto de la cuenca y en quebradas tributarias, a partir de los 3.300 m s.n.m. Se pueden identificar tres tipos: morrenas de fondo, morrenas laterales y morrenas centrales.

Las morrenas laterales ubicadas en el sector de Casa Piedra Carvajal tienen una orientación NE-SO, con extensiones máximas de 2 km y se encuentran bien preservadas, con una morfología elongada y cordones morrénicos claros y bien definidos. Las morrenas de fondo se ubican desde los 3.400 m s.n.m., donde las de mayor extensión se reconocen aguas abajo del glaciar La Paloma y en la zona superior de la quebrada del estero la Leonera, caracterizadas por su superficie lobulada y la presencia de bloques heterométricos redondeados a subangulosos inmersos en una matriz fina con abundante fracción de limo-arcilla (Figura 9g).

3. Periglaciár

El sistema periglaciár es consecuencia de los procesos de congelamiento y descongelamiento que afectan a las rocas y parte superior del suelo, permitiendo el modelado de la geomorfología en regiones andinas mediante procesos de solifluxión y otros procesos criogénicos (Trombotto et al., 2014). Las geoformas ubicadas en el área, generadas a partir de estos procesos, corresponden a rampas de protalud, lóbulos de gelifluxión y lagos periglaciares.

Las rampas de protalud se reconocen como terrazas elongadas de acumulación de detritos con marcado escarpe frontal, ubicados en la base de las laderas. En su superficie presentan surcos y crestas incipientes, de orientación paralela a las laderas en que se encuentran. Corresponden a cinco geoformas con exposición E, O y N, que cubren 0,14 km², ubicadas en el sector de Casa de Piedra Carvajal y en las quebradas tributarias desde los 3.600 m s.n.m. (Figura 9h).

Los lóbulos de gelifluxión se presentan como superficies rugosas inclinadas con desarrollo de lóbulos con exposición preferente hacia el oeste. Se ubican en la ladera oriental del valle principal a 3.600 m s.n.m. y cubren 1,4 km².

Los lagos periglaciares corresponden a dos cuerpos de agua ubicados en el glaciar Del Rincón en la cabecera de la cuenca y en el glaciar de valle ubicado al sureste de Casa de Piedra Carvajal. Cubren un área de 4.000 m² con forma circular en planta y se caracterizan por ser depresiones sobre los glaciares de valle rellenas de agua, posiblemente asociadas a depresiones de *thermokarst*.

4. Sistema Nival

Corresponden a depresiones cóncavas abandonadas por los hielos cuaternarios, en ocasiones asociados a los circos glaciares, donde se acumula nieve y se conserva debido a la depresión en la que se depositan (Figura 9d). Este sistema también se desarrolla en zonas llanas elevadas producto del antiguo modelado glaciar. La acumulación nival expuesta en las zonas de sotavento aumenta su potencial de riesgo cuando la nieve es empujada, potenciada por la inclinación y formas de las laderas (Acosta, 2006).

La pérdida de cobertura de hielo expone los materiales del sustrato y de las formaciones superficiales a otros procesos. En el extremo altitudinal inferior y por el aumento de la temperatura, ocurren procesos de fitocolonización, con especies pioneras herbáceas. Se hacen evidentes los depósitos morrénicos, abandonados en el pasado reciente de los glaciares. Se puede observar los nichos de acumulación nival en la ladera este del valle principal a 4.500 m s.n.m. y en la cabecera de la cuenca, entre los glaciares La Paloma y Del Rincón.

5. Sistema Gravitacional

El sistema gravitacional tiene una gran extensión a lo largo de la cuenca y se reconoce sobre los 2.400 m s.n.m. Se expresa en forma de conos coluviales y conos coluviales coalescentes dependiendo de las condiciones morfoestructurales. Además, destaca la presencia de un depósito de deslizamiento con morfología tipo *hummocky* (cerrillos) ocurrido en el año 2018, descrito por SERNAGEOMIN (2019) y estudiado por Sepúlveda et al. (2020).

Los conos se caracterizan por presentar fuertes pendientes (>30°) y, en sus porciones distales, se observan grandes bloques procedentes de afloramientos rocosos expuestos sobre estas geoformas. La ladera O del valle principal presenta una cobertura continua de conos coluviales coalescentes, que se desarrollan desde los 2.800 hasta los 3.500 m s.n.m. en el sector de Casa de Piedra Carvajal (Figuras 10a y 10b).

Las laderas desarrolladas sobre los 2.800 m s.n.m. marcan una disimetría con las laderas expuestas a menores elevaciones, debido a procesos glaciares pasados y periglaciares actuales. El desarrollo de los conos coluviales tiene directa relación con la exposición de afloramientos rocosos tras el retiro de las masas de hielo glaciar.

El depósito con morfología *hummocky* asociado al proceso de remoción en masa de tipo deslizamiento, ocurrido durante el año 2018, se localiza en la ladera este del valle principal, entre las coordenadas 382.121 E – 6.319.331 N y tiene una superficie de 0,1 km². Presenta una superficie escalonada perpendicular a la dirección de movimiento E-O y una corona de deslizamiento principal de 580 m de extensión (Figura 10c, extraída de SERNAGEOMIN, 2019).

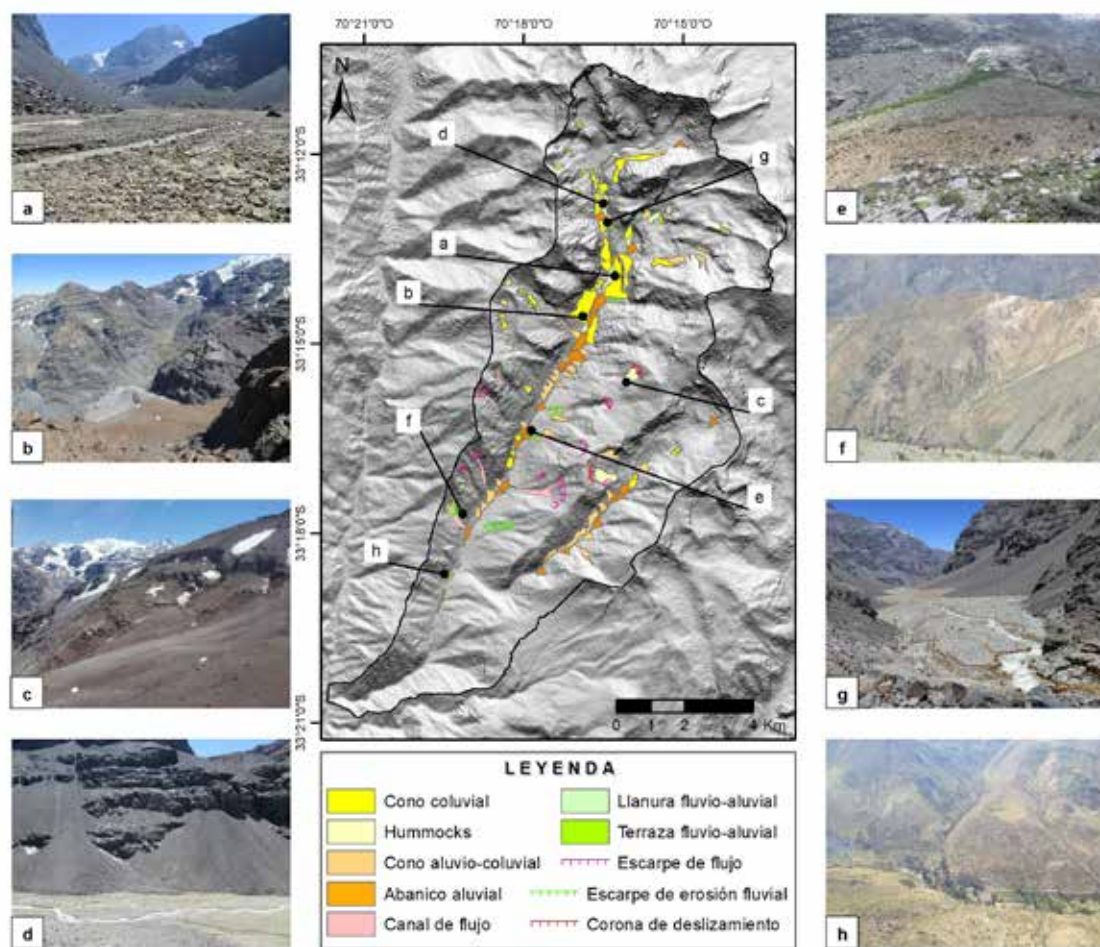


Figura 10. Distribución de las geoformas en los sistemas gravitacional, aluvial y fluvial: **a)** Conos coluviales y llanura fluvio-aluvial; **b)** Conos coluviales coalescentes; **c)** Hummocks (cerrillos) y corona de deslizamiento (extraída de SERNAGEOMIN, 2019); **d)** Conos aluvio-coluviales coalescentes; **e)** Abanico aluvial; **f)** Canal de flujo y escarpes fluviales; **g)** Llanura fluvio-aluvial y conos aluvio-coluviales; **h)** Terraza fluvio-aluvial con vegetación. Modificado de Pérez et al. (2018).

6. Sistema Aluvial

En el sistema aluvial se observan conos aluvio-coluviales y abanicos aluviales, constituidos por sedimentos originados por distintos procesos de transporte torrencial, depositados en las partes más bajas de los valles y a los pies de las laderas. En este sistema, destaca la presencia de canales de flujo y escarpes asociados a la proveniencia del material que rellena las quebradas y alimenta los abanicos.

Los conos aluvio-coluviales presentan pendientes aproximadas de 20° y se originan a partir de procesos mezclados de flujos aluviales en altas pendientes y caída de rocas. Se disponen de manera aislada, como también de manera coalescente. Se ubican en el valle principal desde los 2.100 m s.n.m., mientras que en la quebrada del estero La Leonera se hacen presentes desde los 2.600 m s.n.m. Los conos aluvio-coluviales aislados alcanzan extensiones máximas de hasta 800 m (Figura 10d).



Los abanicos aluviales tienen pendientes de reposo entre 5° y 15°, se ubican preferentemente en la base del estero Yerba Loca desde los 1.800 m s.n.m. y, en la base de la quebrada del estero La Leonera desde los 2.500 m s.n.m.

Los abanicos aluviales tienen pendientes de reposo entre 5° y 15°, se ubican preferentemente en la base del estero Yerba Loca desde los 1.800 m s.n.m. y, en la base de la quebrada del estero La Leonera desde los 2.500 m s.n.m. Se reconocen por su morfología de abanico, en donde el ápice se encuentra asociado a quebradas profundas tributarias y en su superficie, generalmente suave, destaca la presencia de incisiones asociadas a canales que descienden desde las quebradas (Figura 10e). El material que compone los abanicos se asocia a escarpes de flujo reconocidos aguas arriba de los depósitos. Las quebradas por las que se transportaron los sedimentos se reconocen como canales de flujo, las cuales presentan morfologías elongadas y lobuladas (Figura 10f).

7. Sistema Fluvial

A partir de los procesos de depositación fluvial, en este sistema se reconocen las terrazas y llanuras fluvio-aluviales mientras que, asociado a los procesos erosivos, se reconocen los escarpes de erosión fluvial.

Las llanuras fluvio-aluviales se originan a partir del proceso de desborde ocasional de los esteros y

quebradas que permite la depositación de sedimentos finos en zonas con pendientes máximas de 5°. Estas llanuras son afectadas y alimentadas por procesos aluviales causados por flujos provenientes de quebradas tributarias y conos aluvio-coluviiales que se entrelazan en las partes externas de las llanuras. Se ubican en el valle principal del estero Yerba Loca, distribuidos en tres sectores a lo largo del estero entre los 2.500 y 4.000 m s.n.m., y cubren una superficie aproximada de 0,83 km². En el sector alto de la cuenca (entre los 3.200 y 4.000 m s.n.m.) la llanura fluvio-aluvial se encuentra fuertemente influenciada por la fusión del hielo glaciar (Figura 10g).

Las terrazas fluvio-aluviales corresponden a superficies planas con pendientes de hasta 5°, adyacente a los esteros y quebradas compuestos por sedimentos de origen fluvial y aluvial. Se ubican en el valle principal del estero Yerba Loca, desde los 1.400 m s.n.m., 1 km hacia el este de la confluencia con el río San Francisco hasta los 1.900 m s.n.m. en el sector de Villa Paulina. Se caracterizan por estar ubicadas por sobre el nivel actual del estero, con un desnivel aproximado entre 5 y 10 m (Figura 10h).

5. CONCLUSIONES

La cuenca del estero Yerba Loca forma parte del sector occidental de la Cordillera Principal en este segmento andino, comprendida entre la Depresión Central por el oeste y la parte central de la Cordillera Principal por el este. Las unidades y estructuras geológicas que afloran en este sector representan esencialmente el dominio tectono-magmático de la Cuenca de Abanico del Eoceno-Oligoceno, así como del arco magmático del Mioceno y de la deformación principalmente compresiva del Mioceno Inferior a Medio (ca. 17-15 Ma), todo representado en el sector por secuencias estratificadas y plegadas, asignadas a las formaciones Abanico y Farellones. Las rocas de la Formación Abanico se agrupan en tres litofacies en el sector, una formada por rocas volcánicas esencialmente efusivas (litofacies a), otra formada por rocas piroclásticas con intercalaciones de rocas sedimentarias epiclásticas (litofacies b) y otra constituida por rocas principalmente sedimentarias, muchas de ellas de origen epiclástico (litofacies c). Una nueva edad obtenida en tobas en la parte alta de la cuenca del río Olivares, indica una edad de ca. 33 Ma para la litofacies b. Las rocas de la Formación Farellones en el sector se agrupan en dos litofacies, una formada principalmente por rocas volcánicas efusivas, andesíticas a dacíticas, y escasas intercalaciones piroclásticas (litofacies a), y otra constituida esencialmente por rocas piroclásticas, andesíticas a dacíticas (litofacies b). Cinco nuevas edades en diversas rocas de esta unidad entregan valores entre ca. 18 Ma y ca. 13 Ma. Estas unidades estratificadas están localmente intruidas por una serie de cuerpos intrusivos de emplazamiento plutónico a hipabisal, cuyas edades varían de ca. 14 Ma (Plutón Yerba Loca) a ca. 6-11 Ma (cuerpos intrusivos de la parte media a alta de la cuenca), algunos de los cuales presentan cuerpos de brechas hidrotermales y mineralización cuprífera asociada. Las unidades geológicas más jóvenes corresponden a aquellas que modelan hasta el día de hoy el dinámico y activo paisaje precordillerano de la cuenca del estero, los que corresponden esencialmente a depósitos de origen glaciar, fluvial, coluvial y depósitos de remoción en masa de diversos orígenes.

Del punto de vista geomorfológico, la cuenca corresponde a un relieve joven y geomorfológicamente activo, con un potencial de escurrimiento moderado y

la movilización de grandes volúmenes de sedimentos como consecuencia de la evolución tectónica de las rocas deformadas de las formaciones Abanico y Farellones, principalmente. El modelado geomorfológico de la zona es el resultado del desarrollo de glaciaciones durante el Pleistoceno Superior y las condiciones periglaciares preponderantes posteriores, donde el retroceso de las masas glaciares habría expuesto afloramientos rocosos que favorecen la generación de conos coluviales y aluvio-coluviales que cubren las laderas y los glaciares de valle. El transporte de sedimentos ocurre por procesos gravitacionales, aluviales y fluviales, fuertemente condicionados por las características climáticas, litológicas y estructurales del área.

La taxonomía de las formas del relieve, en función de los procesos geomorfológicos identificados, fueron asociados a siete sistemas geomorfológicos: litoestructural, glaciar, periglaciar, nival, gravitacional, aluvial y fluvial. Las geoformas del sistema litoestructural (cornisas y escarpes litológicos) son las de mayor cobertura dentro de la cuenca (13,3 km²) y se presentan como respuesta a los procesos erosivos que afectan a las rocas y se constituyen, además, como fuente de sedimentos para la generación de geoformas depositacionales. El sistema glaciar constituye el segundo sistema de mayor cobertura (12,6 km²), mientras que, los sistemas gravitacional y aluvial cubren 2,9 y 4,2 km² respectivamente, siendo estos últimos los sistemas de transferencia de sedimentos más recientes y activos, en respuesta a los procesos de erosión y a aquellos asociados a eventos climáticos extremos.

Debido a que el área de estudio consiste en un relieve joven y geomorfológicamente activo, con una alta disponibilidad de sedimentos y afloramientos expuestos, se espera que la cuenca siga siendo una zona susceptible a la generación de procesos de remociones en masa ante el escenario de cambio climático global proyectado, que generaría el aumento de la temperatura, el retroceso de los glaciares y el aumento en la recurrencia de eventos climáticos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a B. Droguett, G. Anabalón, R. Quiroga, y R. Arcos de Amawta Geoconsultores, R. Börgel y L. Sánchez de la Universidad Mayor, por sus contribuciones en las etapas iniciales del estudio.

REFERENCIAS

- Acosta, E. (2006). *Estudio geomorfológico y estimación de la susceptibilidad a flujos de derrubios y desprendimientos de roca en el Valle de Benasqué (Pirineo Aragonés)* (Tesis doctoral). Instituto Geológico y Minero de España, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- Allmendinger, R. W., González, G., Yu, J., Hoke, G., y Isacks, B. (2005). Trench-parallel shortening in the northern Chilean Forearc: Tectonic and climatic implications. *Geological Society of American Bulletin*, 117, 89-104. <https://doi.org/10.1130/B25505.1>
- Araya – Vergara, J. F., y Börgel. (1972). *Definición de parámetros para establecer un Banco Nacional de Riesgos y Amenazas Naturales. Criterios para su Diseño*. ONEMI/PNUD Uchile/92/009/A. Chile. pp. 219.
- Arroyo, M., Marticorena, C., Matthei, O., Muñoz, M., y Plissock, P. (2002). Análisis de la contribución y eficiencia del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, 33° S, en la protección de la flora vascular regional (regiones Metropolitana y Quinta de Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 75(4), 767-792. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2002000400012>
- Casassa, G., Apey, A., Bustamante, M., Marangunic, C., Salazar, C., y Soza, D. (2015). Contribución hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del Río Maipo. Enviado a XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile.
- Carrizo, D., Comte, D., y Silva, W. (2012). Estructura del distrito cercano Los Bronces, Anglo American Chile: tectónica y tomografía sísmica. Reporte confidencial, Anglo American CAT4, 27 pp.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gans, P., Kay, S. M., Muñoz, N., Wyss, A. R., y Zurita, E. (2002). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36° S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 117-139. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00009-3)
- Charrier, R., Pinto, L., y Rodríguez, M. P. (2007). *Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile*. En Moreno, T. y Gibbons, W. (Eds.). *The Geology of Chile* (21-114). The Geological Society, London. <https://doi.org/10.1144/GOCH.3>
- Clavero, J., Droguett, B., Bambach, N., Pérez-Martínez, W., Aguirre, I., Ramírez, V., Vidal-Páez, P., Briceño-Urbaneja, I., y Tamayo, A., (2021). Remociones en masa asociadas a lluvias intensas (rainfall-induced) en escenarios de cambio climático en la cuenca del estero Yerba Loca, Chile central. En F. Orrego. (Ed), *Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho* (82-11). Anglo American, Chile.
- Deckart, K., Silva, W., Spröhnle, C., y Vela, I. (2014). Timing and duration of hydrothermal activity at the Los Bronces porphyry cluster: an update. *Mineralium Deposita*, 4(5), 5-35. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-014-0512-9>
- Dirección General de Aguas (DGA). (2008). *Identificación de glaciares de roca*. S.I.T. 167 (4), Recuperado de: https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/33083/DGA_2008_Identificacion_glaciares_roca.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Elgueta, S., Charrier, R., Aguirre, R., Kieffer, G., y Vatin-Perignon, N. (1999). *Volcanogenic sedimentation model for the Miocene Farellones Formation, Andean Cordillera, Central Chile*. Enviado a Symposium International on andean Geodynamics (p. 228-231), Göttingen, Germany.
- Farías, M. (2007). *Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile central durante el Neógeno* (Tesis doctoral). Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.
- Ferrando, F. (1993). Clasificación hidrodinámica de Chile. *Cuadernos I. Geográfica*, 57-74. <https://doi.org/10.18172/cig.1003>
- Godoy, E. (2012). Sobre el variable Marco Geotectónico de las formaciones Abanico y Farellones y sus equivalentes al sur de los 35° Lat. S. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69 (4), 570 – 577.
- Hémera. (2019). Estudio de geología, geomorfología y peligros naturales en el sector alto de la cuenca del río Mapocho. Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Reporte confidencial para Anglo American Chile. Julio, 2019.
- Hughes, P. D., y Woodward, J. C. (2009). Glacial and Periglacial Environments. En J. C. Woodward (Ed.), *The Physical Geography of the Mediterranean Basin* (353-383), Oxford University Press, Oxford.
- Jara, P., y Charrier, R. (2014). Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Meso-Cenozoico de la Cordillera Principal de Chile entre 32° y 32°30'S: Implicancias estructurales y paleogeográficas. *Andean Geology*, 41 (1), 174-209.

- Jordan, T. E., Burns, W. M., Veiga, R., Pángaro, F., Copeland, P., Kelley, S., y Mpodozis, C. (2001). Extension and basin formation in the Southern Andes caused by increased convergence rate: A mid-Cenozoic trigger for the Andes. *Tectonics*, 20, 308-324. <http://doi.org/10.1029/1999TC001181>
- Klohn, C. (1960). Geología de la cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, Colchagua y Curicó. *Instituto de Investigaciones Geológicas*, Santiago, Boletín 8, 95.
- Muñoz-Sáez, C., Pinto, L., Charrier, R., y Nalpas, T. (2014). Influence of depositional load on the development of a shortcut fault system during the inversion of an extensional basin: The Eocene – Oligocene Abanico Basin case, central Chile Andes (33° - 35°S). *Andean Geology*, 41(1), 1-28. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV41n1-a01>
- Pérez, W., Briceño, I., y Vidal, P. (2018). Caracterización geomorfológica de la microcuenca del estero Yerba Loca mediante imágenes de alta resolución. En C. Mena Frau, Y. Ormazábal Rojas, V. Barrientos Lardinois (Eds.), *Geomática Aplicada* (188-196). Editorial Universidad de Talca.
- Piquer, J. (2015). *Structural Geology of the Andes of Central Chile: Controls on Magmatism and the Emplacement of Giant Ore Deposits* (Tesis doctoral). ARC Centre of Excellence in Ore Deposits (CODES), School of Physical Sciences, University of Tasmania, Australia.
- Ramos, V. A., Aguirre Urreta, M. B., Álvarez, P. P., Cegarra, M. I., Cristallini, E. O., Kay, S. M., Lo Forte, G. L., Pereyra, F. X. y Pérez, D. J., (1996). Geología de la región del Aconcagua, provincias de San Juan y Mendoza. Subsecretaría de Minería de la Nación. Dirección Nacional del Servicio Geológico. Anales 24. Buenos Aires, Argentina.
- Sepúlveda, S., Alfaro, A., Lara, M., Carrasco, J., Olea-Encona, P., Rebolledo, S., y Garcés, M. (2020). An active large rockslide in the Andean paraglacial environment: the Yerba Loca landslide, central Chile. *Recent landslides*, 18, 697-705. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01564-7>
- Serrano, L., Vargas, R., Stambuk, V., Aguilar, C., Galeb, M., Holgrem, C., Contreras, A., Godoy, S., Vela, I., Skewes, A., y Stern, C. (1996). The late miocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 5(5) 119-130. [Doi.org/10.5382/SP.05.09](https://doi.org/10.5382/SP.05.09)
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2019). Remoción en masa en Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. INF-2019. Metropolitana-01. Gobierno de Chile.
- Singh, P. K., Suyash, K., y Singh, U. C. (2011). Groundwater resource evaluation in the Gwalior area, India, using satellite data: An integrated geomorphological and geophysical approach. *Hydrogeology Journal*, 19(7), 1421-1429. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-011-0758-6>
- Somoza, R. (1998). Update Nazca (Farallon)-South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the Central Andean Region. *Journal of South American Earth Sciences*, 11, 211-125. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(98\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(98)00012-1)
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. En V. T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*, 4, 39-76.
- Thiele, R. (1980). Hoja Santiago, Región Metropolitana, Escala 1:250.000. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile* N° 29, 21 p.
- Toro, J. C., Ortúzar, J., Zamorano, J., Cuadra, P., Hermosilla, J., y Spröhnle, C. (2012). Protracted Magmatic-Hydrothermal History of the Río Blanco-Los Bronces District, Central Chile: Development of World's Greatest Known Concentration of Copper. *Society of Economic Geologists*. <https://doi.org/10.5382/SP.16.05>
- Trombott, D., Wainstein, P., y Arenson, L. U. (2014). *Guía Terminológica de la geocriología Sudamericana*. Vazquez Mazzini Editores. Buenos Aires, Argentina.





Capítulo 3

Recambio y anidamiento de la herpetofauna a lo largo del gradiente altitudinal del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca

Sergio A. Castro^{1,2*}, Rafael Ascanio³

1. Departamento de Biología, Facultad de Química y Biología, Universidad de Santiago de Chile, Av. Libertador Bernardo O'Higgins 3363, Santiago, Chile.

2. Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES), Av. Libertador Bernardo O'Higgins 340, Santiago, Chile.

3. Gerencia de Carbono Neutralidad y Biodiversidad, Anglo American. Edificio Titanium, La Portada Av. Isidora Goyenechea 2800, Piso 47 Las Condes, Santiago.

*sergio.castro@usach.cl

RESUMEN

En el presente capítulo se analiza la distribución y composición de reptiles presentes a lo largo de un gradiente altitudinal en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL). Se examinó la composición de 20 pisos altitudinales entre los 1.300 y 3.500 m s.n.m. El registro de la herpetofauna en toda la cuenca arrojó un total de 14 especies, compuesta por 12 especies de lagartijas y dos especies de culebras. Entre las especies de lagartijas, la mayor parte correspondió a representantes del género *Liolaemus*. Con esta información, se analizaron los patrones de riqueza específica (α -diversidad) para los distintos pisos

altitudinales, y además se cuantificó la diversidad espacial o β -diversidad, con sus respectivos componentes de recambio y anidamiento.

Los resultados mostraron que la riqueza de especies de reptiles aumentó hasta los 2.000 m s.n.m., pero luego se redujo conforme incrementó la altitud. Se observó una correlación cuadrática negativa y significativa entre la riqueza y la altitud ($r = -0,772$; $P < 0,05$). Por su parte, la β -diversidad osciló entre valores 0 y 1, para nula o total diferencia composicional, respectivamente. Al descomponer este parámetro, se encontró que los valores asociados al recambio distribucional fueron más importantes en determinar el valor de β -diversidad que el anidamiento. Estos resultados indican que la distribución de reptiles a lo largo del SNYL ocurre principalmente como resultado de un relevo de especies; no obstante, el menor valor del anidamiento espacial cobró importancia a mayor altitud, denotando un empobrecimiento de los ensambles con la altura.



Desde el punto de vista biológico, los ambientes montañosos representan un importante desafío para los seres vivos, pues diversas condiciones ambientales, como precipitaciones, irradiación, humedad y temperatura, se modifican en la medida que se asciende (Ferreyra et al., 1998; Sendiña-Nadal, 2006).

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de alta montaña albergan un sinnúmero de especies de plantas y animales, que aportan una serie de servicios ecosistémicos a los seres humanos (MEA, 2005; TEEB, 2010). En este marco, la cordillera de los Andes no es una excepción, ya que, a lo largo de su extenso recorrido sustenta, y ha sustentado a lo largo de la historia (Golte, 2014), a numerosas comunidades y asentamientos humanos que dependen parcial o totalmente de sus comunidades biológicas (Egan y Price, 2017; Mengist et al., 2020).

En Chile, la importancia ecológica de la cordillera de los Andes ha comenzado a ser medida recientemente (López-Angulo et al., 2018; Cavieres et al., 2021), aunque su relevancia como soporte de biodiversidad fue advertida con anterioridad (Hellmich, 1934; Reiche, 1934-1937). En la actualidad, se considera que los Andes, por su extensión latitudinal y altitudinal, ha tenido un papel clave en el origen y mantención de

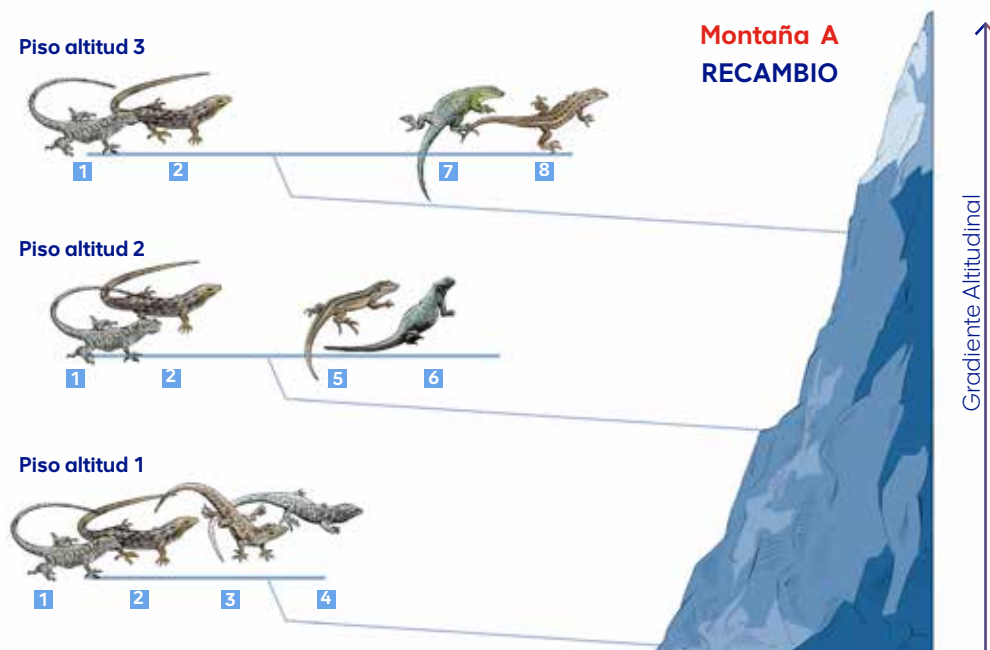
la diversidad biológica del país (Antonelli et al., 2009; Aagesen et al., 2012; Andrade-Díaz et al., 2017). Sin embargo, este rol podría estar en riesgo a causa del cambio climático, y de los patrones de ocupación y uso de la tierra (MEA, 2005; Cavieres et al., 2021). Esta atención en torno a los ecosistemas de montaña se profundiza aún más en la medida que se reconoce que poco se comprende acerca de su ecología, un aspecto necesario de esclarecer al momento de promover la conservación y/o uso sustentable de su biodiversidad (MEA, 2005).

Desde el punto de vista biológico, los ambientes montañosos representan un importante desafío para los seres vivos, pues diversas condiciones ambientales, como precipitaciones, irradiación, humedad y temperatura, se modifican en la medida que se asciende (Ferreyra et al., 1998; Sendiña-Nadal, 2006). Quizás, la condición más evidente de observar es el descenso de la temperatura, la que ocurre a una tasa de 0,6 o 1,0 °C, cada 100 o 150 m de altura, dependiendo

de la latitud (Sendiña-Nadal, 2006). De esta manera, el descenso térmico puede restringir la actividad biológica, así como limitar la distribución altitudinal de las especies. Este hecho es particularmente cierto en el caso de organismos ectotermos, cuya actividad metabólica depende de un suministro externo de calor (Pough et al., 2001; McCain, 2010). Por tanto, si las condiciones térmicas no son adecuadas para una especie determinada, probablemente, esta condición representará una barrera ambiental que restringirá su distribución altitudinal (Pough et al., 2001).

Los **reptiles** son un grupo de organismos conocidos por su metabolismo ectotermo, lo que significa que el calor necesario para el funcionamiento de su maquinaria metabólica depende de una provisión externa, básicamente de la radiación solar (Pough et al., 2001; Vidal y Labra, 2008). De hecho, las especies de este grupo necesitan exponerse al sol para capturar de manera directa la radiación, lo que les permitirá adquirir la temperatura necesaria para su actividad (Pough et al., 2001). Este calor lo pueden captar también al tomar contacto con superficies calientes, como rocas o piedras expuestas a la radiación (Pough et al., 2001); el simple contacto con estas superficies permitirá la transferencia de calor por conducción desde dicha superficie al organismo (Pough et al., 2001; Vidal y Labra, 2008).

Dada la importancia de la temperatura en el desempeño biológico de los reptiles y que, además cada especie presenta un comportamiento característico a esta condición, es posible esperar que la composición de especies se modifique con la altitud. De esta manera, el recorrido altitudinal de cualquier sistema montañoso permitiría evidenciar que la cantidad y tipología de especies de reptiles cambie. Este tipo de variación en la composición podría estar dado por un relevo o "recambio" de especies (Figura 1a; Baselga, 2010), o por efecto de un "**anidamiento**" espacial, por la pérdida de especies conforme se asciende (Figura 1b; Baselga, 2010). Tanto el recambio como el anidamiento pueden ocurrir simultáneamente (Figura 1c; Baselga, 2010), modificando de manera independiente la diversidad espacial, por lo que resulta clave cuantificar la importancia de cada uno de estos procesos espaciales. Tanto el recambio como el anidamiento forman parte de una aproximación conceptual más amplia que busca comprender el ordenamiento de la biodiversidad en el espacio, una faceta de la biodiversidad conocida como **β -diversidad** (Whittaker, 1960). Bajo esta aproximación conceptual, la β -diversidad es el resultado de procesos de recambio y anidamiento, componentes que se relacionan a su vez, de manera aditiva, (β -diversidad= recambio + anidamiento) (Baselga, 2010). En su análisis,



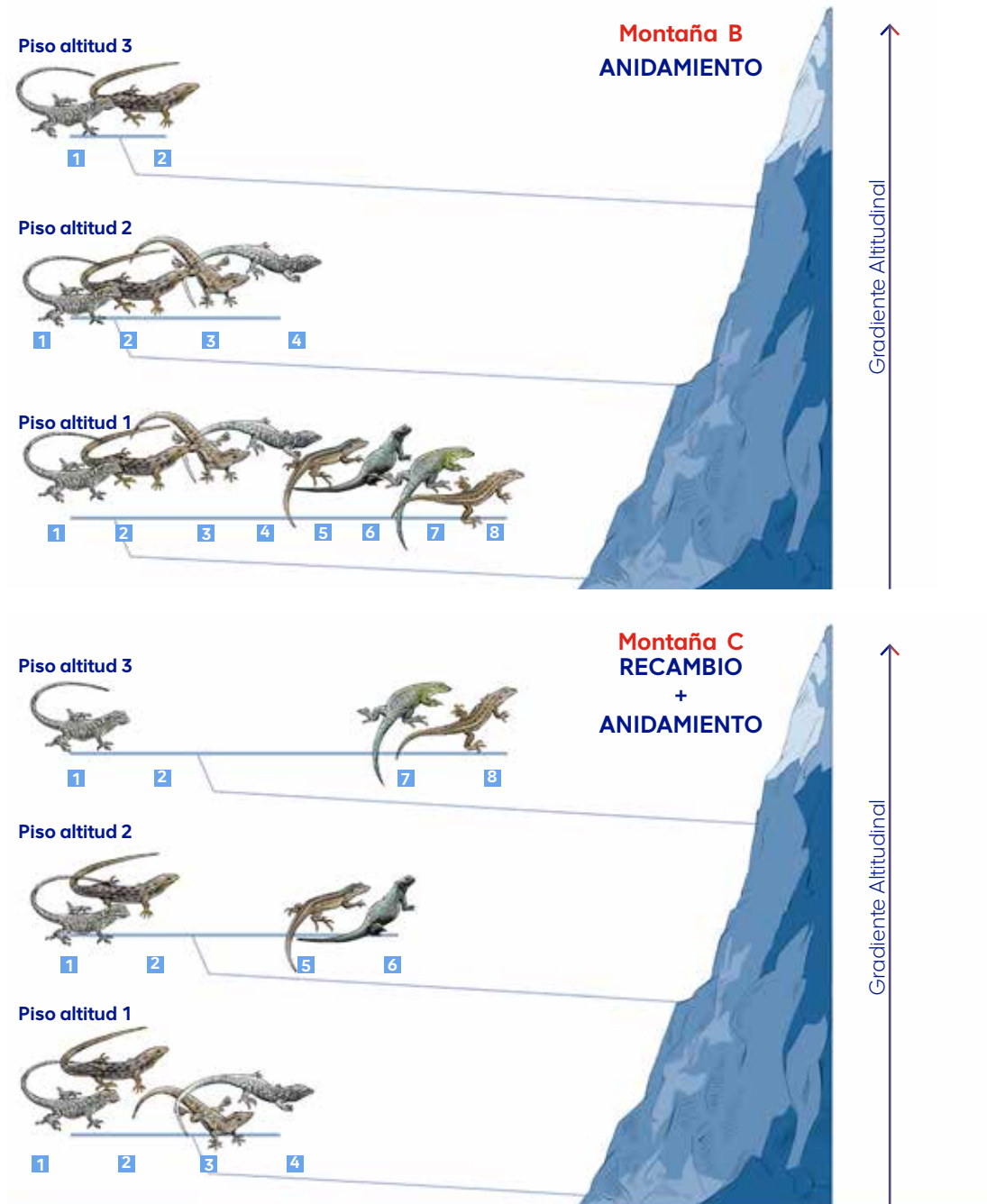


Figura 1. Diagrama que ilustra la importancia del recambio y anidamiento distribucional de reptiles, a lo largo de un gradiente altitudinal en tres montañas hipotéticas (**a, b y c**). Cada montaña posee la misma riqueza regional (ocho especies). En el caso de la **Montaña a**, hay dos especies comunes en los tres pisos altitudinales y otras dos especies propias, exclusivas de cada piso; esto denota que el cambio composicional entre estos pisos altitudinales obedece a un patrón de relevo o recambio distribucional. En la **Montaña b**, los pisos altitudinales están completamente contenidos unos en otros, ya que, los pisos más pobres en especies son un subconjunto del piso inferior, denotando la distribución altitudinal está gobernada por anidamiento. En la **Montaña c**, los sitios cambian su composición gracias a un efecto combinado de recambio y anidamiento.

la β -diversidad describe y busca explicar las diferencias composicionales entre áreas, y en complemento al estudio de la α -diversidad, permiten establecer la manera en que la diversidad regional (γ -diversidad) se halla repartida o distribuida en diversos sitios o comunidades (Whittaker, 1960).

En Chile, varias especies de reptiles pueden sobrevivir en ambientes de alta montaña (Hellmich, 1934; Donoso-Barros, 1966), superando incluso los 5.000 m s.n.m. (Schulte et al., 2000; Pincheira-Donoso y Núñez, 2005; Demangel, 2016). Sin embargo, poco se sabe de las adaptaciones morfológicas, fisiológicas y conductuales que les permiten vivir a esta altitud (Carothers et al., 2001; Navas, 2002; Núñez, 2010; Boretto et al., 2018). Por ejemplo, un atributo reproductivo más o menos prevalente, es la condición de viviparí (Donoso-Barros, 1966; Núñez, 2010). Esta adaptación consiste en que el desarrollo embrionario de las crías de especies de altitud ocurre al interior del cuerpo materno, a *contra sensu* del modo ovíparo más característico en reptiles, que consiste en un desarrollo al interior de un huevo depositado en el medio externo (Pough et al., 2001). El hecho de que las especies de reptiles de Chile puedan presentar adaptaciones a la vida en montaña, indica que responden en mayor o menor medida a esta condición. Por ello, la composición de especies a lo largo de la gradiente altitudinal podría reflejar modificaciones, no solo en la riqueza específica (α -diversidad), sino que también en β -diversidad.

El Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL) está situado en una cuenca que se emplaza en la precordillera de Chile central, recorriendo un amplio rango altitudinal, que va entre los 1.300 a 5.340 m s.n.m. (Arroyo et al., 2002). A lo largo de este gradiente altitudinal, se reconocen distintas especies de reptiles, entre los que se hallan especies de lagartijas, lagartos y culebras (Anglo American, 2021). Si bien varias especies han sido registradas en altitudes cercanas a los 4.000 m s.n.m. la distribución altitudinal de estos taxones no ha sido analizada. El SNYL es parte de un sistema montañoso más extenso, que por su historia geológica, asociada a la emergencia de la cordillera de los Andes y glaciaciones/desglaciaciones, ha dejado una huella en la diversidad de flora y fauna en la zona central de Chile, donde los reptiles no son la excepción (Hellmich, 1934; Fuentes y Jaksic, 1979). En efecto, el SNYL pertenece a un importante centro de riqueza y endemismo de reptiles (Andrade-Díaz et al., 2017),

que concentra un alto porcentaje de especies con estatus de conservación comprometido (Pincheira-Donoso y Núñez, 2005; Anglo American, 2021). Por esta razón, este ecosistema se constituye en un interesante y apropiado laboratorio natural que permite estudiar los cambios de composición, riqueza (α -diversidad) y diversidad espacial (β -diversidad) de reptiles a lo largo de su amplio gradiente altitudinal.

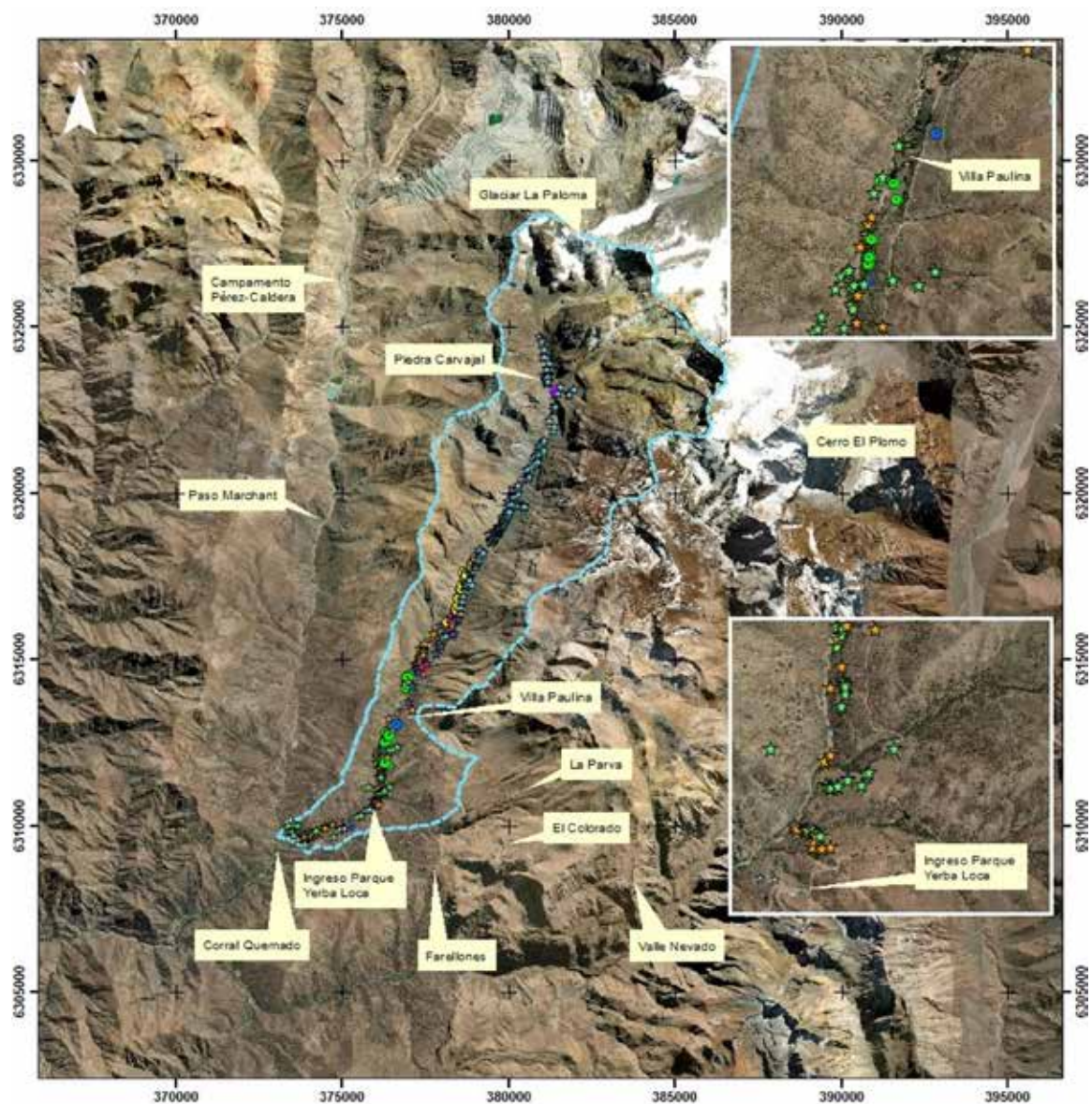
En este capítulo, se describen y analizan patrones de diversidad local (α -diversidad) y espacial (β -diversidad) a lo largo de un gradiente altitudinal que cubre entre los 1.370 y 3.340 m s.n.m., en el SNYL. La información procede de estudios prospectivos realizados por especialistas, en el contexto del levantamiento de línea-base y monitoreo de biodiversidad por parte de la empresa Anglo American. Básicamente, aquí se pretende establecer de qué manera la riqueza de lagartijas, lagartos y culebras documentados para el SNYL se ordena a lo largo del gradiente altitudinal; y de ser así, evaluar de qué manera el recambio y/o anidamiento espacial son responsables de este cambio en la diversidad.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de Estudio

El SNYL (33°S; Figura 2) está inserto en una quebrada precordillerana, que se extiende a lo largo de un rango altitudinal, rodeado por montañas que pueden alcanzar entre los 1.150 a 5.500 m s.n.m. aproximadamente (Arroyo et al., 2002). Por su ubicación geográfica, en las cercanías del valle del río Mapocho, este sitio ha estado expuesto a una extensa historia de impacto humano, que se inició con los primeros pobladores del valle central y se ha extendido hasta la actualidad.

El SNYL se extiende por unos 17 km en sentido norte-sur, siguiendo el recorrido del estero homónimo. Los tipos de vegetación incluyen matorral esclerófilo mediterráneo típico de baja altitud y matorral suculento (900-1.500 m s.n.m.), bosque esclerófilo montano dominado por *Kageneckia angustifolia* (1.600-2.000 m s.n.m.) y vegetación altoandina (2.000-3.600 m s.n.m.) (Arroyo et al., 2002). Además, es posible reconocer la presencia de humedales andinos, conocidos como “vegas”. Los tramos superiores del estero Yerba Loca debajo del cerro La Paloma, contienen una de las extensiones más grandes y mejor conservadas



Leyenda

- | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ★ <i>Liolaemus bellii</i> | ● <i>Liolaemus leopardinus</i> | ★ <i>Liolaemus schroederi</i> |
| ● <i>Liolaemus chillensis</i> | ★ <i>Liolaemus monticola</i> | ★ <i>Liolaemus tenuis</i> |
| ★ <i>Liolaemus fitzgeraldi</i> | ★ <i>Liolaemus nigroviridis</i> | ▲ <i>Phymaturus darwini</i> |
| ★ <i>Liolaemus lemniscatus</i> | ● <i>Liolaemus nitidus</i> | ● <i>Philodryas chamissonis</i> |
| ★ <i>Liolaemus fuscus</i> | | ▲ <i>Tachymenis chilensis</i> |

Simbología

- cuenca

Fuente Imagen: World Imagery, ESRI, 2022

Figura 2. Cartografía de SNYL. En símbolos de colores se muestran sitios con avistamiento de distintos ejemplares de reptiles. Las especies se indican usando los nombres científicos, cuyos nombres vernáculos o comunes se indican en Tabla 2.

de turberas altoandinas (Arroyo et al., 2002). Por sobre los 3.600 m s.n.m., la vegetación vascular es prácticamente ausente.

2.2. Muestreo de reptiles del SNYL

Entre los años 2012 y 2020, se realizaron recorridos estacionales a lo largo de los distintos pisos altitudinales del SNYL. Estas campañas fueron efectuadas en diferentes estaciones del año, incluyendo aquellas menos favorables para los reptiles. En total, se realizaron 17 campañas de terreno ocurridas en primavera (2012-2020), verano (2013-2014, y 2016-2018), otoño (2015-2016) e invierno (2014).

El procedimiento de muestreo de reptiles en los distintos pisos altitudinales se realizó mediante dos métodos. El primero implicó el recorrido de transectos de 200 m de largo y 4 m de ancho, a una velocidad de aproximada de 2 km/h, dentro de la cual se registró la presencia de ejemplares pertenecientes a las distintas especies. El segundo método de muestreo implicó la búsqueda activa de ejemplares y/o de evidencias indirectas (p. ej., madrigueras, mudas, entre otros), bajo troncos y piedras. Este procedimiento se adoptó en muestreos de otoño e invierno, temporadas menos favorables para la actividad de reptiles en el SNYL. Los individuos observados fueron determinados a nivel de especie, registrándose la altitud en que dicha observación ocurrió.

De acuerdo con los registros disponibles (628 especímenes observados en terreno) a lo largo del gradiente altitudinal, se distinguieron 20 pisos altitudinales, que fueron arbitrariamente definidos cada 100 m de altitud. Los sitios se numeraron correlativamente, usando el acrónimo “YL” (Tabla 1). Debido a que entre los 1.500-1.600 m s.n.m. solo se registró un espécimen, este piso altitudinal no fue incluido en el análisis.

A partir de la información disponible, se confeccionó una matriz distribucional de especies x piso altitudinal. Para cada sitio, se registró la presencia (con valor uno; 1) o ausencia (con valor cero; 0) de las distintas especies observadas; estas totalizaron 14 taxones, representados por 12 especies de lagartijas (*Liolaemus bellii* Gray, *Liolaemus chiliensis* (Lesson), *Liolaemus fitzgeraldi* Boulenger, *Liolaemus fuscus* Boulenger, *Liolaemus lemniscatus* Gravenhorst, *Liolaemus leopardinus* Müller & Hellmich, *Liolaemus monticola* Müller & Hellmich, *Liolaemus nigroviridis* Müller & Hellmich, *Liolaemus nitidus* (Wiegmann), *Liolaemus schroederi* Müller & Hellmich, *Liolaemus tenuis* (Duméril & Bibron 1837), y *Phymaturus darwini* Núñez, Veloso, Espejo, Veloso, Cortés & Araya; Tabla 2) y dos culebras, *Philodryas chamissonis* (Wiegmann) y *Tachymenes chilensis* (Schlegel) (Figura 3, Tabla 2).

Tabla 1. Sitios del SNYL y ubicación en el gradiente altitudinal.

Sitio	Piso Altitudinal	Sitio	Piso Altitudinal
YL1	1.300-1.400 m s.n.m.	YL11	2.400-2.500 m s.n.m.
YL2	1.400-1.500 m s.n.m	YL12	2.500-2.600 m s.n.m.
YL3	1.600-1.700 m s.n.m.	YL13	2.600-2.700 m s.n.m.
YL4	1.700-1.800 m s.n.m.	YL14	2.700-2.800 m s.n.m.
YL5	1.800-19.00 m s.n.m.	YL15	2.800-2.900 m s.n.m.
YL6	1.900-2.000 m s.n.m.	YL16	2.900-3000 m s.n.m.
YL7	2.000-2.100 m s.n.m.	YL17	3.000-3.100 m s.n.m.
YL8	2.100-2.200 m s.n.m.	YL18	3.100-3.200 m s.n.m.
YL9	2.200-2.300 m s.n.m.	YL19	3.200-3.300 m s.n.m.
YL10	2.300-2.400 m s.n.m.	YL20	3.300-3.400 m s.n.m.



Liolaemus bellii



Liolaemus chiliensis



Liolaemus fitzgeraldi



Liolaemus fuscus



Liolaemus tenuis



Liolaemus lemniscatus



Liolaemus leopardinus



Phymaturus darwini



Liolaemus monticola



Liolaemus nigroviridis



Philodryas chamissonis



Liolaemus nitidus



Liolaemus schroederi



Tachymenes chilensis

Figura 3. Especies de reptiles presentes en el SNYL. Bajo cada fotografía, se indica el nombre científico de la especie. Créditos *Liolaemus fitzgeraldi*: Patricio Jaure; *Liolaemus chiliensis*: David Vásquez.

Tabla 2. Composición de reptiles (lagartijas y culebras) del SNYL. Se indica su nombre vernacular y estatus de conservación, de acuerdo con la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN); EN: En Peligro; LC: Preocupación Menor; NT: Casi Amenazada; NE: No Evaluada.

Categoría taxonómica	Nombre vernacular	Estado de Conservación
Familia Liolaminidae		
<i>Liolaemus bellii</i>	Lagartija parda de Santiago	LC
<i>Liolaemus chiliensis</i>	Lagartija chilena	LC
<i>Liolaemus fitzgeraldi</i>	Lagartija de Fitzgerald	LC
<i>Liolaemus fuscus</i>	Lagartija parda	LC
<i>Liolaemus lemniscatus</i>	Lagartija lemniscata	LC
<i>Liolaemus leopardinus</i>	Lagartija leopardo	EN
<i>Liolaemus monticola</i>	Lagartija de los montes	LC
<i>Liolaemus nigroviridis</i>	Lagartija negro-verdosa	LC
<i>Liolaemus nitidus</i>	Lagarto nítido	LC
<i>Liolaemus schroederi</i>	Lagartija de Schroeder	LC
<i>Liolaemus tenuis</i>	Lagartija esbelta	LC
<i>Phymaturus darwini</i>	Matuasto de Darwin	NE
Familia Colubridae		
<i>Philodryas chamissonis</i>	Culebra de cola larga	LC
<i>Tachymenis chilensis</i>	Culebra de cola corta	NT

2.3. β-diversidad a lo largo de la distribución altitudinal

Con el objeto de analizar la β-diversidad de los distintos pisos altitudinales, así como el efecto del recambio y anidamiento sobre la composición de reptiles en el SNYL, se utilizó el índice de disimilitud de Sørensen (Ecuación 1), el índice de Simpson (Ecuación 2), y el índice de anidamiento (Ecuación 3), para el cálculo de β-diversidad, recambio y el anidamiento, respectivamente (Baselga, 2010).

Ecuación 1: $\beta_{sor} = \frac{(b + c)}{(2a + b + c)}$

Ecuación 2: $\beta_{sim} = \frac{\min(b,c)}{(a + \min(b,c))}$

Ecuación 3: $\beta_{nes} = \frac{a \cdot (\max\{b,c\} - \min\{b,c\})}{(2a + \min\{b,c\} + \max\{b,c\}) \cdot (a + \min\{b,c\})}$

Todos estos algoritmos se calcularon contrastando pares de pisos altitudinales, donde *b* y *c* representan la riqueza registrada en los pisos que se comparan (descartando las especies compartidas), mientras que *a* es el número de especies compartidas entre ellos. Los valores obtenidos por estos índices oscilan entre 0 y 1, lo que denota el valor mínimo y máximo guarismo.

2.4. Análisis de diversidad

Con el objeto de explorar la relación entre los distintos indicadores de diversidad de reptiles (αy β-diversidad) y la altitud en el SNYL, se realizaron cuatro análisis. En primer lugar, se estudió la relación entre la riqueza y la altitud a través de análisis de regresión-correlación, donde se implementaron modelos lineal, cuadrático, exponencial, logarítmico y potencial. En todos estos análisis se usó la altitud como variable independiente, en tanto que la riqueza de especies correspondió a la variable dependiente.



Se registraron 629 especímenes de reptiles en el SNYL en un rango altitudinal que cubrió entre los 1.372 y 3.344 m s.n.m.

Mediante análisis de varianza (ANOVA), se comparó la distribución de frecuencia de registros altitudinales para todas las especies detectadas. Solo dos especies fueron excluidas de este análisis (*L. chiliensis* y *L. fitzgeraldi*), por el escaso número de registros ($n=1$ y $n=2$, respectivamente).

En tercer lugar, mediante una prueba de *t* de Student para muestras pareadas, se comparó la distribución de los valores de recambio y anidamiento obtenidos para todos los pisos altitudinales comparados en pares. Este análisis permitió establecer si ambos componentes de la β -diversidad difieren estadísticamente.

Finalmente, se realizaron regresiones-correlaciones entre los valores promedio de recambio y anidamiento obtenidos para cada piso y los niveles altitudinales de dichos pisos con el fin de evaluar si tanto el recambio como el anidamiento difieren en importancia a lo largo del gradiente altitudinal. El nivel altitudinal fue considerado como variable independiente, en tanto que el promedio de recambio y promedio de anidamiento fueron las variables dependientes.

3. RESULTADOS

3.1. Composición de especies de reptiles

Se registraron 629 especímenes de reptiles en el SNYL en un rango altitudinal que cubrió entre los 1.372 y 3.344 m s.n.m. Al ordenar la información de acuerdo con los 20 pisos altitudinales (YL1 – YL20), la composición de reptiles arrojó un total de 14 taxones (Tabla 1). De estas especies, 12 fueron lagartijas de la familia Liolaemidae, con 11 representantes de *Liolaemus* (*L. bellii*, *L. chiliensis*, *L. fuscus*, *L. lemniscatus*, *L. leopardinus*, *L. monticola*, *L. nigroviridis*, *L. nitidus*, *L. schroederi*, *L. tenuis*) y una especie del género *Phymaturus* (*P. darwini*). Adicionalmente, se registraron dos especies de culebras, *P. chamissonis* y *T. chilensis*, ambas de la familia Colubridae (Tabla 2).

Ninguna de las 14 especies de reptiles fue registrada a lo largo de todo el gradiente altitudinal (Figura 3). Cinco de ellas (*L. fuscus*, *L. leopardinus*, *L. nigroviridis*, *L. tenuis*, y *T. chilensis*), mostraron una distribución continua a lo largo de dos o más pisos altitudinales, en tanto que las siete restantes presentaron hiatos distribucionales; es decir, una distribución discontinua en la que hubo uno o más pisos altitudinales en que dicha especie no fue observada (Figura 4).

La especie más ampliamente distribuida fue *L. bellii*, pues fue registrada en 12 de los 20 pisos examinados

Figura 4. Distribución altitudinal (m s.n.m.) para 14 especies de reptiles del SNYL; n/i: piso altitudinal no incluido en análisis.

	1.300-1.400	1.400-1.500	1.500-1.600	1.600-1.700	1.700-1.800	1.800-1.900	1.900-2.000	2.000-2.100	2.100-2.200	2.200-2.300
<i>Liolaemus bellii</i>			n/i							
<i>Liolaemus chiliensis</i>			n/i							
<i>Liolaemus fuscus</i>			n/i							
<i>Liolaemus lemniscatus</i>			n/i							
<i>Liolaemus leopardinus</i>			n/i							
<i>Liolaemus monticola</i>			n/i							
<i>Liolaemus nigroviridis</i>			n/i							
<i>Liolaemus nitidus</i>			n/i							
<i>Liolaemus pictus</i>			n/i							
<i>Liolaemus schroederi</i>			n/i							
<i>Liolaemus tenuis</i>			n/i							
<i>Philodryas chamissonis</i>			n/i							
<i>Phymaturus darwini</i>			n/i							
<i>Tachymenis chilensis</i>			n/i							

(Figura 4), cubriendo un rango entre los 2.100 y los 3.400 m s.n.m.; por su parte, *L. monticola* y *L. schroederi* también mostraron una distribución amplia, presente en nueve y ocho de los pisos altitudinales, respectivamente (Figura 4). En contraste, *L. chiliensis* (entre 1.900 y 2.000 m s.n.m.) y *L. fitzgeraldi* (entre 2.600 y 2.700 m s.n.m.) fueron especies que solo fueron observadas en un único piso altitudinal; por tanto, mostraron los menores rangos de distribución (Figura 4).

En términos de la frecuencia de registros u observaciones en terreno, es notable la variación en la distribución altitudinal que mostraron las 12 especies de reptiles del SNYL (Figura 5). En efecto, hubo diferencias estadísticamente significativas al comparar la frecuencia de registros de todas las especies, a lo largo del gradiente altitudinal (ANOVA, $F = 23,3$; $P < 0,05$). Llama la atención que solo dos especies (*L. fuscus* y *L. tenuis*) mostraron una distribución simpátrica (Figura 5), que no difirió estadísticamente entre sí ($MS = 1,1$; $P > 0,05$); en tanto, el resto de las comparaciones entre especies mostró diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

El mejor ajuste de correlación entre altitud y riqueza de reptiles en el SNYL estuvo determinado por una regresión cuadrática de pendiente negativa ($Riqueza = -2 \times 10^{-6} (Altitud)^2 + 0,0087 Altitud - 3,7$; Figura 6). En este modelo, la regresión fue $r = 0,772$, ($P < 0,05$), el mayor valor obtenido en comparación a los otros modelos de correlación. De esta manera y de acuerdo al modelo cuadrático, el incremento en altitud a partir de los 1.500 m s.n.m. en adelante, implicó un incremento en la riqueza de reptiles, tendencia que se mantuvo hasta los 2.000 m s.n.m., aproximadamente (Figura 6). A partir de esta altitud, la riqueza declinó hasta, aproximadamente, los 3.400 m s.n.m. donde se encontró solo una especie (*L. bellii*). Es importante destacar que por sobre los 2.300 m s.n.m., solo se observó la presencia *L. bellii*, la que puede ser acompañada por *P. darwini*, al menos hasta los 3.300 m s.n.m.

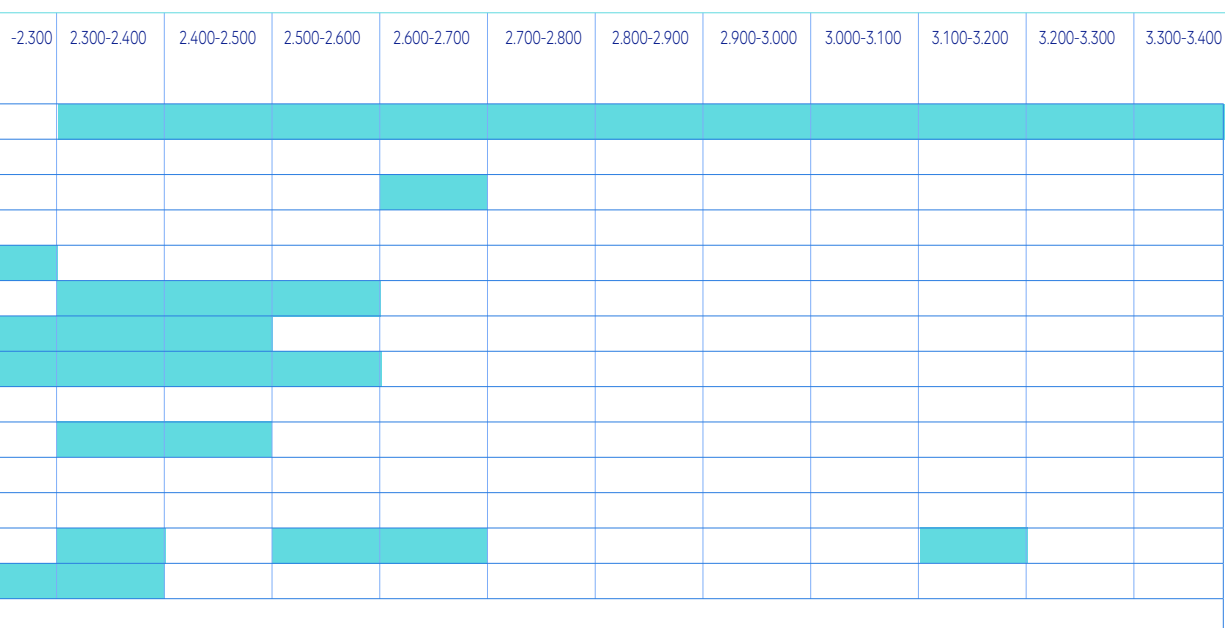
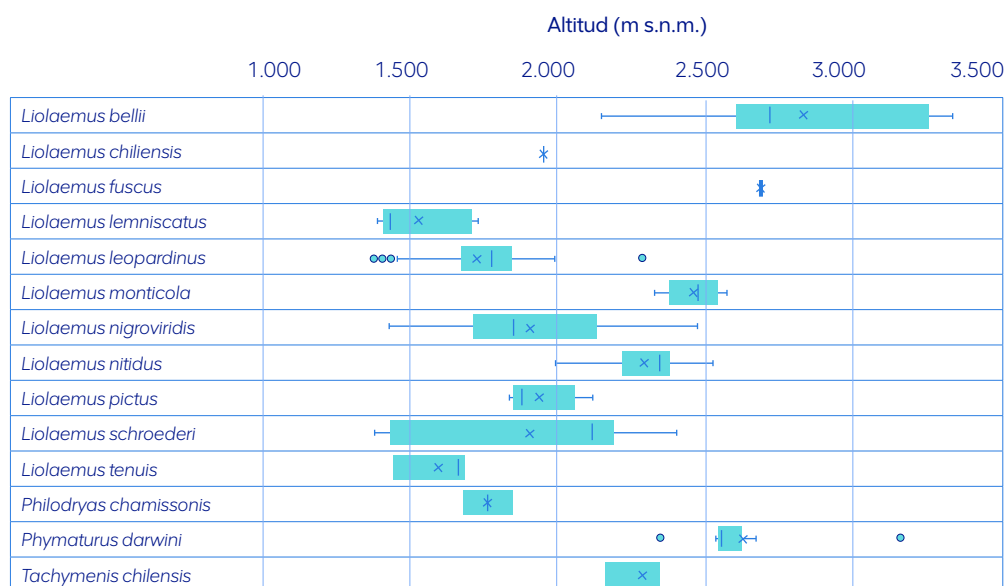


Figura 5. Distribución del número de registros de reptiles en el SNYL, de acuerdo a la altitud.



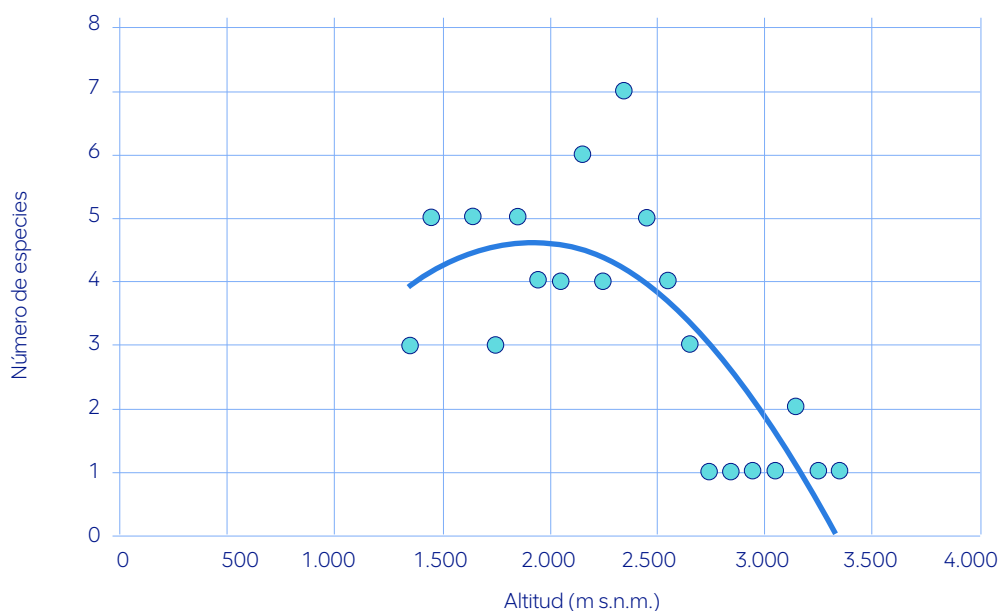


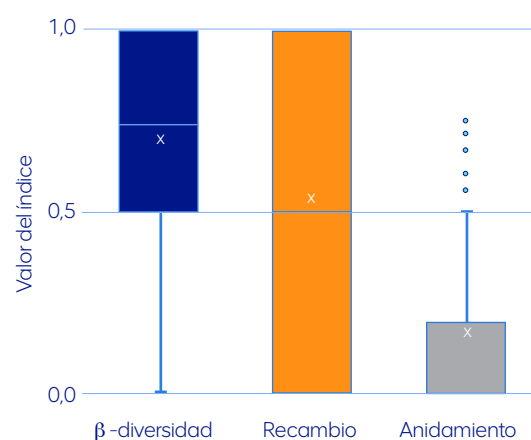
Figura 6. Número de especies (riqueza específica) de reptiles en el SNYL, en un gradiente de altitud. La línea representa la tendencia de correlación cuadrática de mejor ajuste ($r = 0,772$; $P < 0,05$).

3.2. Diversidad espacial de la herpetofauna

Los valores de diversidad espacial (β -diversidad) de las especies de reptiles en el SNYL varió entre un máximo de 1 (pisos altitudinales completamente diferentes en la composición de especies) y un mínimo de 0 (pisos altitudinales que comparten todas las especies de reptiles), con un valor promedio de 0,68 (Figura 7). Pese a lo anterior, la distribución de valores de β -diversidad, tuvo una moda igual a 1, registro obtenido para 69 de las 191 comparaciones entre pares de pisos altitudinales. Esta distribución de valores de α -diversidad implica un alto nivel de diferencia entre pisos altitudinales, especialmente cuando se comparan los pisos de ambos extremos del gradiente. En efecto, al comparar los valores del índice de Sørensen obtenidos entre los pisos YL1-YL9 (ubicados en el extremo más bajo de SNYL; Tabla 1) con aquellos entre YL13 y YL20 (ubicados en el extremo más alto de SNYL; Tabla 1), se constató la prevalencia de los valores iguales a la unidad (1), lo que denota que estos pisos altitudinales difieren completamente en la composición de sus especies.

Al descomponer la β -diversidad en recambio y anidamiento, se evidenció un interesante panorama. El recambio altitudinal en el SNYL osciló entre 0 y 1, con un valor promedio 0,53 y una mediana de 0,5 (Figura 7). En tanto, los valores de anidamiento estuvieron entre 0 y 0,75, con un promedio de 0,15 y una mediana de 0 (Figura 7). Al comparar ambas distribuciones, se encontró que los valores de recambio fueron estadísticamente mayores a los de anidamiento ($t = 15,2$; $P < 0,05$; Figura 7). Estos resultados indican que las diferencias de composición entre los diferentes pisos altitudinales del SNYL ocurren principalmente como consecuencia de un relevo distribucional, y en menor proporción, por variaciones la riqueza (número de especies).

Al examinar la correlación entre los valores promedio de recambio y anidamiento (calculados por piso altitudinal) con la altitud (Figura 8), se encontró que la importancia del recambio tendió a declinar con la altitud ($r = -0,724$) en tanto que el anidamiento exhibió una tendencia opuesta ($r = 0,617$). Ambas tendencias fueron significativas ($P < 0,05$). Estos resultados destacan la importancia del recambio a altitudes cercanas a los 1.500 m s.n.m., la que, en términos porcentuales,



representó el 90% de los valores de β -diversidad; mientras que el anidamiento tuvo una importancia equivalente al 10%. En contraste, a mayores niveles altitudinales (3.400 m s.n.m.), la importancia del recambio fue del 70% del valor de la β -diversidad, mientras que la importancia del anidamiento aumentó al 30%.

Figura 7. Distribución de los componentes de recambio y anidamiento para la β -diversidad de reptiles en 20 pisos altitudinales del SNYL. La línea transversal al interior del cajón corresponde a la mediana de la distribución; en tanto que la cruz corresponde al promedio.

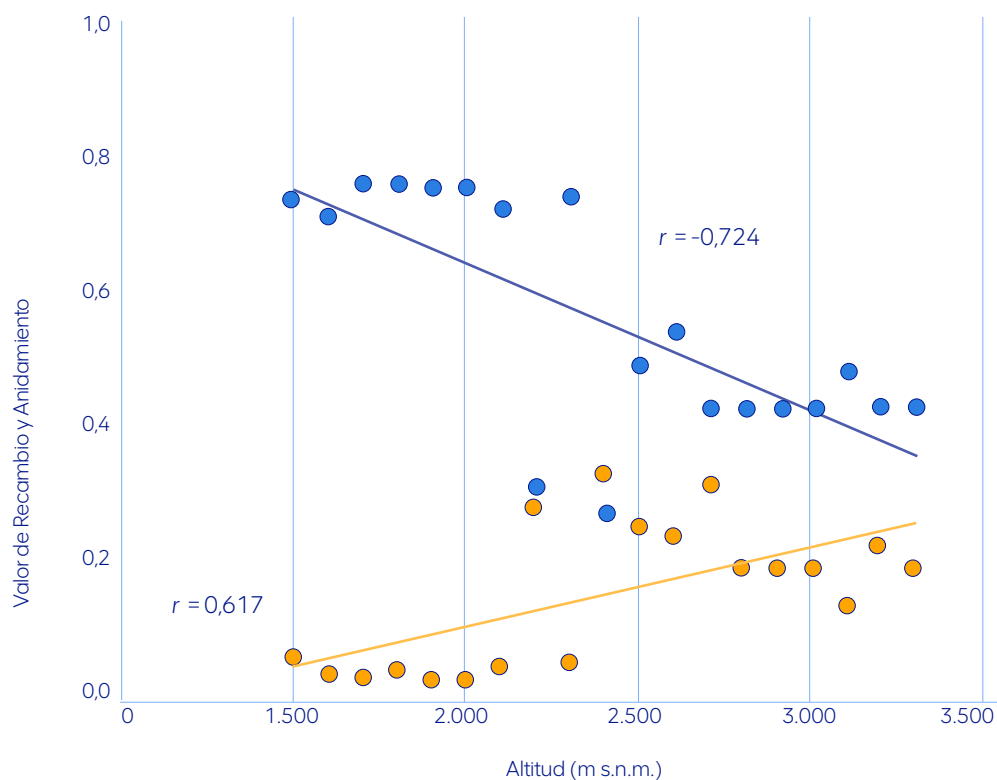


Figura 8. Correlaciones de los valores promedio de recambio (círculos y línea azul) y anidamiento (círculos y línea naranja) de reptiles a lo largo del gradiente altitudinal del SNYL.



A lo largo de la extensión altitudinal del SNYL, fue posible registrar la presencia de 14 especies de reptiles: 12 lagartijas y dos culebras. Esta diversidad ha sido registrada a lo largo de 8 años de muestreo, acumulando 629 especímenes avistados.

4. DISCUSIÓN

A lo largo de la extensión altitudinal del SNYL, fue posible registrar la presencia de 14 especies de reptiles: 12 lagartijas y dos culebras. Esta diversidad ha sido registrada a lo largo de 8 años de muestreo, acumulando 629 especímenes avistados. Entre las lagartijas, la alta diversidad o riqueza específica del género *Liolaemus*, que incluyó al 78,5% de las especies de reptiles, es un hecho notable. La predominancia de especies de *Liolaemus* en la composición de reptiles en diversas áreas y localidades de Chile central, es un hecho que ha sido destacado por otros estudios (Hellmich, 1934; Donoso-Barros, 1966; Fuentes y Jaksic, 1979). En el caso particular de la cuenca del SNYL es importante destacar que esta área ha sido reconocida como un centro de diversidad y endemismo regional (Pincheira-Donoso y Núñez, 2005; Núñez, 2010; Demangel, 2016), donde la radiación de *Liolaemus* ha producido una alta riqueza de especies, muchas de ellas endémicas (Andrade-Díaz et al., 2017). No obstante, escasos antecedentes se disponen acerca de los cambios espaciales en riqueza y diversidad de reptiles a lo largo de distintos hábitats disponibles en el gradiente altitudinal que representa el SNYL.

Los resultados obtenidos en el presente capítulo muestran que la α -diversidad tiene un comportamiento no-lineal respecto de la altitud. En efecto, el número de especies de reptiles tendió a aumentar desde los sitios de menor altitud (1.400 m s.n.m.) alcanzando a un valor máximo a mediana altitud (2.000 m s.n.m.), y luego declina hasta los 3.400 m s.n.m. Este tipo de comportamiento de la riqueza de reptiles en relación con el gradiente altitudinal ha sido documentado para otras comunidades herpetológicas de Chile, lo que no solo incluye a la riqueza específica (Pinto et al., 1965; Fuentes y Jaksic, 1979; Zunino y Riveros, 1981; Rau et al., 1998; Díaz et al., 2002), sino también su abundancia (Mella-Ávila y Mella-Romero, 2020). Este fenómeno puede ser explicado por la existencia de estresores o filtros ambientales que afectan la riqueza en ambos extremos del gradiente; por una parte, en la porción superior del gradiente, las limitaciones asociadas a la altitud pueden explicar esta declinación (Pough et al., 2001), en tanto que en la porción inferior (bajo los 2.000 m s.n.m.), probablemente la pérdida de condiciones de hábitat sea un mecanismo más importante (Mella-Ávila y Mella-Romero, 2020).

La lagartija *L. bellii*, estuvo presente en la mayor parte de los sitios estudiados (12 de los 20 sitios),

distribuyéndose de manera casi continua, entre los pisos 2.100 y 3.400 m s.n.m. La mayor frecuencia de registros de esta especie ocurrió entre los 2.600 y 3.300 m s.n.m. De acuerdo con los registros analizados, *L. bellii* es una especie excepcional pues ninguna otra especie de lagartija, lagarto o culebra exhibe un patrón de distribución altitudinal tan amplio. De acuerdo con Núñez et al. (2010), *L. bellii* alcanza los 3.053 m s.n.m., en tanto que, en el presente estudio, se registró en sitios localizados a 3.344 m s.n.m. Solo cinco especies de lagartijas fueron observadas por sobre los 2.500 m s.n.m.: *L. bellii*, *L. fitzgeraldi*, *L. leopardinus*, *L. nigroviridis* y *P. darwini*; en tanto que ninguna culebra fue registrada a estos niveles altitudinales. De estas lagartijas, todas ellas son vivíparas (Pincheira-Donoso y Núñez, 2005; Demangel, 2016), condición que constituye una adaptación a la vida en este tipo de ambientes (Núñez, 2010). Otra especie de distribución altitudinal extrema en el SNYL es *P. darwini*, la que puede alcanzar los 3.500 m s.n.m. (Demangel, 2016) pero aquí fue observada a 3.167 m s.n.m. Esta especie es vivípara, de hábitos tróficos herbívoros, y vive asociada a manchones de vegetación (Núñez et al., 2010); presenta una distribución geográfica restringida y por ello, es una

especie endémica (Núñez et al., 2010). Aunque la UICN no registra esta especie en alguna categoría de conservación (ver Tabla 2), *P. darwini* ha sido declarada "En Peligro" por el Sistema de Clasificación de Especies del Ministerio del Medio Ambiente de Chile (Diario Oficial, 2015).

De acuerdo con la composición de reptiles registrada en los diferentes pisos altitudinales del SNYL, se observó que la distribución de la β -diversidad estuvo relacionada positivamente con la distancia en altitud. Es decir, a mayor distancia altitudinal entre los pisos altitudinales, mayor es el valor de α -diversidad. Este fenómeno es esperado en atención a que la riqueza declina con la altitud. Sin embargo, un interesante resultado del presente análisis es que el componente de recambio espacial fue significativamente mayor que el anidamiento. Este hecho indica que la composición de reptiles en el SNYL se organiza a lo largo de la altitud principalmente en un patrón de relevo de especies. Sin embargo, la importancia relativa del recambio composicional declinó con la altitud, de 0,719 (a 1.500 m s.n.m.) a 0,429 (a 3.300 m s.n.m.). El anidamiento, por su parte, tuvo un comportamiento inverso, teniendo valores





Los resultados descritos previamente pueden tener importantes implicancias en términos de la conservación de la herpetofauna del SNYL, especialmente a la luz del cambio climático global (Navas, 2002; Josse et al., 2011; Fajardo et al., 2020; Cox et al., 2022).

de 0,058 a 1.500 m s.n.m. y 0,188 a 3.300 m s.n.m. En síntesis, el recambio o relevo de especies constituye el principal factor que determina la distribución de la diversidad de reptiles en el SNYL, aunque por sobre los 2.500 m s.n.m., el anidamiento (empobrecimiento de los ensambles) cobra mayor importancia relativa.

Los resultados descritos previamente pueden tener importantes implicancias en términos de la conservación de la herpetofauna del SNYL, especialmente a la luz del cambio climático global (Navas, 2002; Josse et al., 2011; Fajardo et al., 2020; Cox et al., 2022). De acuerdo con las predicciones de cambio climático que se han establecido para Chile central, es probable que las temperaturas tiendan a incrementarse (IPCC, 2014), haciendo menos drástico el gradiente térmico ambiental a lo largo de la altitud en el SNYL. Esta condición propiciaría que las especies de reptiles puedan extender su distribución desde pisos de menor altitud hacia los de mayor altitud. Por lo que, al menos en este escenario hipotético, las especies de reptiles del SNYL, que en su mayor proporción muestran estatus de conservación comprometido, se verían favorecidas. En contraste, aquellas especies que se hallan actualmente en el extremo superior del gradiente altitudinal podrían experimentar efectos

adversos, enfrentando temperaturas altas, un régimen térmico para el cual no se hallan adaptados. En este caso, la respuesta fisiológica que despliegan estas especies para enfrentar las nuevas condiciones ambientales, será clave para permitir su subsistencia. Como consecuencia de lo anterior, la diferencia en composición entre sitios se reduciría, lo que promovería una reducción en la β -diversidad. En complemento, un aspecto de mayor relevancia para la biología de los reptiles se relaciona con la disponibilidad de hábitat para la consecución de su ciclo de vida. De no mediar modificaciones ambientales que favorezcan la mantención o recuperación de hábitat para estos reptiles, es improbable que su estatus de conservación mejore.

En resumen, la distribución de especies de reptiles a lo largo del amplio gradiente altitudinal del SNYL, muestra que la composición de especies se incrementa y luego se reduce conforme aumenta la altitud. Este cambio composicional se evidencia como una tendencia de declinación en β -diversidad asociado al incremento de la altitud, la que está principalmente determinado por recambio distribucional y en menor medida, por anidamiento debido al empobrecimiento de la riqueza específica, sin relevo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin la participación de un gran número de profesionales y especialistas, por lo tanto, queremos agradecer a todas las personas que participaron en las diferentes etapas de este trabajo, desde la planificación y ejecución de los monitoreos ambientales, hasta la revisión del manuscrito, pasando por la integración de los datos, la cartografía y la edición del capítulo. Sergio A. Castro agradece con especial atención a Fabiola Orrego por la invitación a hacerlo parte de esta iniciativa, así como por su gestión, disposición y empeño en sacar adelante el presente capítulo.



REFERENCIAS

- Aagesen, L., Bena M. J., Nomdedeu, S., Panizza, A., López, R. P., y Zuloaga, F. O. (2012). Areas of endemism in the southern central Andes. *Darwiniana*, 50, 218-251. <http://dx.doi.org/10.2307/41825710>
- Andrade-Díaz, M. S., Hibbard, T. N., y Díaz-Gómez, J. M. (2017). Identifying endemism areas: An example using neotropical lizards. *South American Journal of Herpetology*, 12, 61-75. <https://doi.org/10.2994/SAJH-D-16-00038.1>
- Anglo American. (2021). *Animales silvestres*. En Illánz J. y Asociados. Línea Base: Capítulo 3.17. Santiago, Chile.
- Antonelli, A., Nylander, J. A. A., Persson C., y Sanmartín, I. (2009). Tracing the impact of the Andean uplift on Neotropical plant evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 9749-9754.
- Arroyo, M. T. K., Marticorena, C., Matthei, O., Muñoz, M., y Pliscoff, P. (2002). Analysis of the contribution and efficiency of the Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, 33° S in protecting the regional vascular plant flora (Metropolitan and Fifth regions of Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 75, 767-792. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2002000400012>
- Baselga, A. (2010). Partitioning the turnover and nestedness difference components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 1324-1334.
- Boretto, J. M., Cabezas-Cartes, F., y Ibarguengoytia, N. R. (2018). Slow life histories in lizards living in the highlands of the Andes Mountains. *Journal of Comparative Physiology B-Biochemical Systems and Environmental Physiology*, 188, 491-503.
- Carothers, J. H., Jaksic, F. M., y Marquet, P. A. (2001). Altitudinal zonation among lizards of the genus *Liolaemus*: Questions answered and unanswered questions. *Revista Chilena de Historia Natural*, 74, 313-316.
- Cavieres, L. C., Valencia, G., y Hernández, C. (2021). Calentamiento global y sus efectos en plantas de alta montaña en Chile central: una revisión. *Ecosistemas*, 30, 2179.
- Cox, N., Young, B. E., Bowles, P., Fernández, M., Marin, J., Rapacciuolo, G., Böhm, M., Brooks, T. M., Hedges, S. B., Hilton-Taylor, C., Hoffmann, M., Jenkins, R. K. B., Tognelli, M. F., Alexander, G. J., Allison, A., Ananjeva, N. B., Auliya, M., Avila, L. J., Chapple, D. G., ... Xie, Y. (2022). A global reptile assessment highlights shared conservation needs of tetrapods. *Nature*, 605, 285-290.

- Demangel, D. (2016). *Reptiles en Chile*. Fauna Nativa Ediciones. Santiago, Chile.
- Diario Oficial de la República. (2015). *Decreto 38: Aprueba y oficializa clasificación de especies silvestres según su estado de conservación*. Decreto Supremo del Ministerio Secretaría General de la República, Reglamento para la Clasificación de Especies Silvestres, Proceso: 11^{vo}.
- Díaz, I., Sarmiento, C., Ulloa, I., Moreira, R., Navia, R., Véliz, E., y Peña, C. (2002). Vertebrados terrestres de la Reserva Nacional Río Clarillo, Chile central: representatividad y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75, 433-448.
- Donoso-Barros, R. (1966). *Reptiles de Chile*. Ediciones Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Egan, P. A., y Price, M. F. (2017). *Mountain ecosystem services and climate change: A global overview of potential threats and strategies for adaptation*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. París, Francia.
- Fajardo, V., Burguete, M., y González-Morales, J. C. (2020). Calentamiento global y la fisiología de ectotermos: el caso de tres lacertilios mexicanos. *Ciencia Ergo-Sum*, 27, 136-146.
- Ferreyra, M., Cingolani, A., Ezcurra, C., y Bran, D. (1998). High-Andean vegetation and environmental gradients in northwestern Patagonia, Argentina. *Journal of Vegetation Science*, 9, 307-316.
- Fuentes, E. R., y Jaksic, F. M. (1979). Lizards and rodents: An explication for their relative diversity species in Chile. *Archivos de Biología y Medicina Experimentales* (Chile), 12, 179-190.
- Golte, J. (2014). Cultura y naturaleza andinas. En Kingman-Garcés, E. (Ed.), *Ciudades de los Andes*. Institut français d'études andines. Lima, Perú.
- Hellmich, W. (1934). Die Eidechsen Chiles insbesondere die Gattung *Liolaemus*. Nach den Sammlungen Goetsch-Hellmich. Abhandlungen. Bayerischen Akademie der Wissenschaften. *Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse*, 24, 1-140.
- Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G., Barrena, V., Becerra-Ramírez, M. T., Cabrera, E., Chacón-Moreno, E., Ferreira, W., Peralvo, M., Saito, J., Tovar, A., y Naranjo, L. G. (2011). Physical geography and ecosystems in the Tropical Andes. En Herzog, S. K., Martínez, R., Jørgensen, P. M., y Holm Tiessen (Eds.), *Climate change and biodiversity in the Tropical Andes*. MacArthur Foundation, IAI, SCOPEE. París, Francia.
- López-Angulo, J., Pescador, D. S., Sanchez, A. M., Mihoc, M. A. K., Cavieres, L. A., y Escudero, A. (2018). Determinants of high mountain plant diversity in the Chilean Andes: From regional to local spatial scales. *PLoS ONE*, 13, e0200216.
- McCain, C. M. (2010). Global analysis of reptile elevational diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 541-553.
- Millenium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and human well-being: Current state and trends*. DC Island Press Washington, Estados Unidos.
- Mella-Ávila, J. E., y Mella-Romero, J. (2020). Riqueza y abundancia de reptiles en un gradiente altitudinal en la Cordillera de Los Andes (36° S) de Chile y Argentina. *Boletín Chileno de Herpetología*, 7, 34-41.
- Mengist, W., Soromess, T., y Legese, G. (2020). Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps. *Science of The Total Environment*, 702, 134581.
- Navas, C. A. (2002). Herpetological diversity along Andean elevational gradients: Links with physiological ecology and evolutionary physiology. *Comparative Biochemistry and Physiology a Molecular and Integrative Physiology*, 133, 469-485.
- Núñez, H. (2010). Saurios de altura. En Jara-Arancio, P. (Ed.), *Guía de campo de la zona altoandina de Chile*. Productora Gráfica Andros, Ltda. Santiago, Chile.
- Núñez, H., Veloso, A., Espejo, P., Veloso, C., Cortés, A., y Araya, S. (2010). Nuevas especies de *Phymaturus* (grupo *palluma*) para la zona Cordillerana Central de Chile (Reptilia, Sauria, Liolaemidae). *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural de Chile*, 59, 41-74.
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). En Mach, K.J., Planton, S., y von Stechow C. (Eds.), Annex II: *Glossary. Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change pp. 117-130.
- Pincheira-Donoso, D., y Núñez, H. (2005). Las especies chilenas del género *Liolaemus* Wiegmann. 1834 (Iguania: Tropiduridae: Liolaeminae). Taxonomía, sistemática y evolución. *Publicación Ocasional, Museo Nacional de Historia Natural* (Chile), 59, 1-486.

Pinto, A., Hermosilla, W., di Castri, F., y Astudillo, V. (1965). Distribución altitudinal y diversidad trófica de la herpetofauna del cerro El Roble, Chile. *Investigaciones Zoológicas Chilenas, (Número especial)*, 32-40.

Pough, F. H., Andrews, P. M., Cadle, J. E., Crump, M. L., Savitzky, A. H., y Wells, K. D. (2001). *Herpetology*. Prentice Hall. New York, Estados Unidos.

Rau, J. A., Zuleta, C., Gant, A., Saiz, F., Cortés, A., Yates, L., Spotorno, A. E., y Couve, E. (1998). Biodiversidad de artrópodos y vertebrados terrestres del Norte Grande de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 71, 527-554.

Reiche, K. (1934-1937). *Geografía botánica de Chile*. Imprenta Universitaria. Santiago, Chile.

Schulte II, J. A., Macey, J. R., Espinoza, R. E., y Larson, A. (2000). Phylogenetic relationships in the iguanid lizard genus *Liolaemus*: multiple origins of viviparous reproduction and evidence for recurring Andean vicariance and dispersal. *Biological Journal of the Linnean Society*, 69, 75-102.

Sendiña-Nadal, I. (2006). *Fundamentos de meteorología*. Universidad Santiago de Compostela. Compostela, España.

The Economics of Ecology and Biodiversity (TEEB). (2010). *Mainstreaming the economics of nature: A synthesis of the approach, conclusions, and recommendations*. Recuperado de http://www.teebweb.org/Portals/25/TEEB%20Synthesis/TEEB_SynthReport_09_2010_online.pdf.

Vidal, M., y Labra, A. (2008). *Herpetología de Chile*. Science Verlag. Santiago, Chile.

Whittaker, R. H. (1960). Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 30, 279-338.

Zunino, S., y Riveros, G. (1981). Distribución de reptiles y su relación con la vegetación en Parque Nacional La Campana, Chile central. *Anales del Museo de Historia Natural de Valparaíso (Chile)*, 14, 185-188.





Capítulo 4

Flora de las vegas altoandinas del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL) y su relación con la calidad del agua

Luz María de la Fuente¹, Josefina Hepp³,
Vinka Anic⁴, Jean François Casale⁵, Rosanna
Ginocchio^{1,2*}

1. Center of Applied Ecology and Sustainability,
Pontificia Universidad Católica de Chile. Avenida
Libertador Bernardo O'Higgins 340, Santiago, Chile.

2. Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente,
Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia
Universidad Católica de Chile. Avenida Vicuña
Mackenna 4860, Santiago, Chile.

3. Centro UC Desierto de Atacama, Pontificia
Universidad Católica de Chile. Avenida Vicuña
Mackenna 4860, Santiago, Chile.

4. Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas,
Universidad de Concepción. Barrio Universitario,
Concepción, Chile.

5. Consultor Independiente, Konrad Zuse 1472, La
Serena, Chile.

*rginocch@uc.cl

tres vegas del SNYL; Chorrillos del Plomo (ChP), Piedra Carvajal (PC) y La Lata (LL). En cada una de ellas se midieron parámetros químicos del agua como **pH**, conductividad eléctrica, sulfatos y contenido de metales (Cu, cinc (Zn) y hierro (Fe)). En total se identificaron 29 especies, mayoritariamente nativas y **hemicriptófitas**. A pesar de la similitud de riqueza entre las vegas, la más pequeña (ChP) tiene la mayor riqueza (18 especies). Se observó una alta variabilidad en la calidad del agua entre las vegas y dentro de ellas. Aguas con alta acidez y elevado nivel de Cu tienen un efecto negativo en la riqueza. En aguas ácidas y ricas en Cu se desarrollan unas pocas especies, como *Festuca purpurascens*, *Colobanthus quitensis* y *Arenaria rivularis*. En cambio, en aguas neutras y con bajos contenidos de Cu dominan especies como *Werneria pygmaea*, *Plantago barbata* y *Patosia clandestina*.

RESUMEN

Las vegas son **formaciones vegetales azonales** que dependen del constante abastecimiento de agua. En la cuenca del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL) la calidad del agua de los esteros y quebradas es variable y en algunos casos está relacionada con la existencia de depósitos de pórfidos de cobre (Cu), lo cual genera un drenaje de aguas ácidas, con altos contenidos de sulfatos y metales. Estas características pueden tener un papel importante en la estructuración de las comunidades vegetales ya que se estaría ejerciendo una selección de especies de plantas tolerantes a metales y aguas ácidas. En este estudio se evaluó la **riqueza**, abundancia y cobertura vegetal en

1. INTRODUCCIÓN

Las vegas altoandinas son formaciones vegetales asociadas a cursos de agua, de amplia distribución en la cordillera de los Andes (Ruthsatz, 1995; Arroyo et al., 2002). Son lugares con humedad permanente donde crece abundante vegetación (Teillier et al., 2011). Las características de estas dependen principalmente de factores hidrológicos y edáficos, más que de las condiciones climáticas del lugar (Ruthsatz, 1995; Escobar et al., 2021); por ello, han sido descritas como formaciones azonales dentro de la zona andina (Squeo et al., 2006).



El Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL) se ubica en una de las cuencas de la cordillera de los Andes centrales donde existe un gran depósito de pórfido de cobre en las elevaciones altas de la cuenca del estero Yerba Loca (Serrano et al., 1994).

El agua de las vegas ubicadas en la zona centro-norte de Chile suele provenir de cursos subterráneos y superficiales derivados de la lluvia y el deshielo (Ruthsatz, 1995). La duración y la estacionalidad con que permanece saturado el suelo, el tipo de suelo, la química del agua y las características del drenaje influyen en el número, tipo y distribución de las especies de plantas, tanto dentro de las vegas como entre ellas (Squeo et al., 2006).

El Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL) se ubica en una de las cuencas de la cordillera de los Andes centrales donde existe un gran depósito de pórfido de cobre en las elevaciones altas de la cuenca del estero Yerba Loca (Serrano et al., 1994). En esta cuenca la calidad de las aguas está fuertemente relacionada con su hidrología, en particular con los procesos nivo-glaciares, y la geología de sus cuencas de cabecera (Montserrat et al., 2021). En las áreas mineralizadas ocurre un fenómeno natural conocido como drenaje ácido de roca (DAR), el cual se evidencia como un drenaje de aguas ácidas, con altos contenidos de sólidos disueltos totales y con concentraciones elevadas de sulfatos y metales (Montserrat et al., 2021). Esto ocurre, por ejemplo, en el sector del estero Chorrillos del Plomo, tributario del estero Yerba Loca, producto

del drenaje de rocas alteradas por acción hidrotermal (Barceló, 1984).

Por otro lado, en el sector de la vega La Lata, en la vertiente Norte del estero Yerba Loca, existen depósitos de plata, hierro, plomo y cobre que fueron explotados históricamente para la extracción de plata (Monge, 1948). Los botaderos de estériles, abandonados por esta actividad, han generado drenaje ácido de mina (DAM), el cual ocurre por la exposición de estos desechos al ambiente. Esto, sumado a las mineralizaciones naturales existentes serían responsables de la calidad anómala de las aguas del estero Yerba Loca en términos de pH ácido, alto contenido de sulfato y altas concentraciones de minerales (Ginocchio et al., 2008; Valenzuela-Díaz et al., 2020). Estas características pueden tener un papel importante en la estructuración de las comunidades vegetales en las vegas del SNYL, ya que las aguas ácidas y ricas en metales son altamente tóxicas para la mayoría de las especies de plantas (Adriano, 2001; Ginocchio et al., 2002; Ginocchio y Baker, 2004).

Alrededor del año 2000 existían diversos estudios florísticos de las especies vegetales que habitaban la cordillera de los Andes en Chile central. Por ejemplo, en el SNYL estaban los estudios realizados por Aravena

(2002) y Arroyo et al. (2002). Sin embargo, eran escasos los estudios donde se evaluara la importancia de los gradientes hidroquímicos del agua sobre la biodiversidad y distribución espacial de la vegetación en las vegas altoandinas. Bajo ese contexto, entre el año 2005 y 2008 se realizó un estudio científico que consideraba estas relaciones dentro del SNYL; parte de sus resultados se entregan en este capítulo (Ginocchio et al., 2008; Hepp, 2006). Así entonces, en esta zona, continuaron las contribuciones de estudios en cuanto a la descripción de la flora (Riedemann et al., 2008; Teillier et al., 2011; Anglo American, 2018; Escobar et al., 2021), interacciones planta-polinizador e invasiones de plantas exóticas (Sierra-Almeida et al., 2016; Fuentes-Lillo y Pauchard, 2019).

En la actualidad, una de las principales amenazas de las vegas altoandinas sigue siendo el sobrepastoreo (Aravena, 2002; Teillier et al., 2011; Escobar et al., 2021), el aumento de afluencia de los visitantes (Arroyo et al., 2002), las actividades deportivas de alta montaña (Anglo American, 2018) y la cercanía a faenas mineras (Escobar et al., 2021). A ello se ha sumado la disminución de las precipitaciones debido a la "mega sequía" que se viene manifestando desde el año 2010 (Garreaud et al., 2020). Los efectos de este fenómeno han sido evidenciados en la hidrología de la cuenca, con un aumento en la severidad del DAR en el estero de Yerba Loca durante el período 2010-2017, mostrando un pH más bajo, así como mayores valores de conductividad eléctrica, dureza, sulfatos y Cu entre otros (Valenzuela-Díaz et al., 2020).

Así, los ecosistemas andinos de Chile central son una de las zonas más vulnerables al cambio climático a nivel mundial (Durán et al., 2021), lo cual releva la importancia de tener catastros actualizados de los recursos naturales (Escobar et al., 2021), especialmente en sistemas azonales hídricos, ya que dependen directamente del recurso hídrico y funcionan como indicadores de la sanidad del ecosistema andino en el contexto de la mega sequía y del uso antrópico del agua (Escobar et al., 2021).

Considerando la escasa información que aún existe sobre la composición florística de las vegas altoandinas y su relación con la calidad química del agua, sumado al nuevo escenario de cambio climático, es que el objetivo de este capítulo es aportar antecedentes acerca de la relación entre la calidad química del agua y la distribución y abundancia de las especies vegetales

en las vegas de SNYL, para que sirva de base para futuros estudios en el área.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitio de estudio y características generales de las vegas

La cuenca del estero Yerba Loca ($33^{\circ}15' S$, $70^{\circ} 18' O$) se ubica en un valle cerrado de origen glaciar que va de noreste a suroeste en la cordillera de los Andes de Chile central, siguiendo el cauce del estero Yerba Loca (Arroyo et al., 2002). Sus principales afluentes son el estero La Leonera y el estero Chorrillos del Plomo, además de numerosas vertientes provenientes de los deshielos de primavera-verano (Barceló, 1984). El agua del estero Yerba Loca presenta gran cantidad de sulfatos, por lo que no es recomendada para consumo humano, ni del ganado.

Las tres vegas seleccionadas para el estudio fueron La Lata (LL), Piedra Carvajal (PC) y Chorrillos del Plomo (ChP). Las dos primeras se encuentran en el curso del estero Yerba Loca, mientras que la última en el curso del estero Chorrillos del Plomo (Figura 1).

La vega LL se encuentra a 2.795 m s.n.m., es relativamente plana y tiene una superficie de 18.190 m² (Figura 2). Es abastecida y cruzada por el estero Yerba Loca, con aguas de color rojizo, y por aguas drenadas de las laderas del valle. Tiene varios afloramientos u "ojos" de agua. Un área del lado norte de la vega está influenciada por DAM, generado por una pila estéril abandonada de una explotación histórica de pequeña escala de plata (Hepp, 2006).

La vega ChP se ubica en una terraza abierta con zonas planas y otras con bastante pendiente; es la más pequeña, con una superficie de 5.755 m², y se encuentra a 3.270 m s.n.m. (Figura 2). Está principalmente abastecida por el estero del mismo nombre y existen algunos afloramientos u "ojos" de agua (Hepp, 2006).

La vega PC se encuentra a 3.250 m s.n.m., siendo la más grande de las tres. Cubre una superficie de 26.180 m² y se encuentra en un terreno bastante plano con varios afloramientos u "ojos" de agua y pequeños cursos de agua (Figura 2). Es abastecida por el estero Yerba Loca, que evidencia color rojizo, por aguas drenadas de las laderas del valle y de pequeños cursos con coloración blanca (Hepp, 2006).

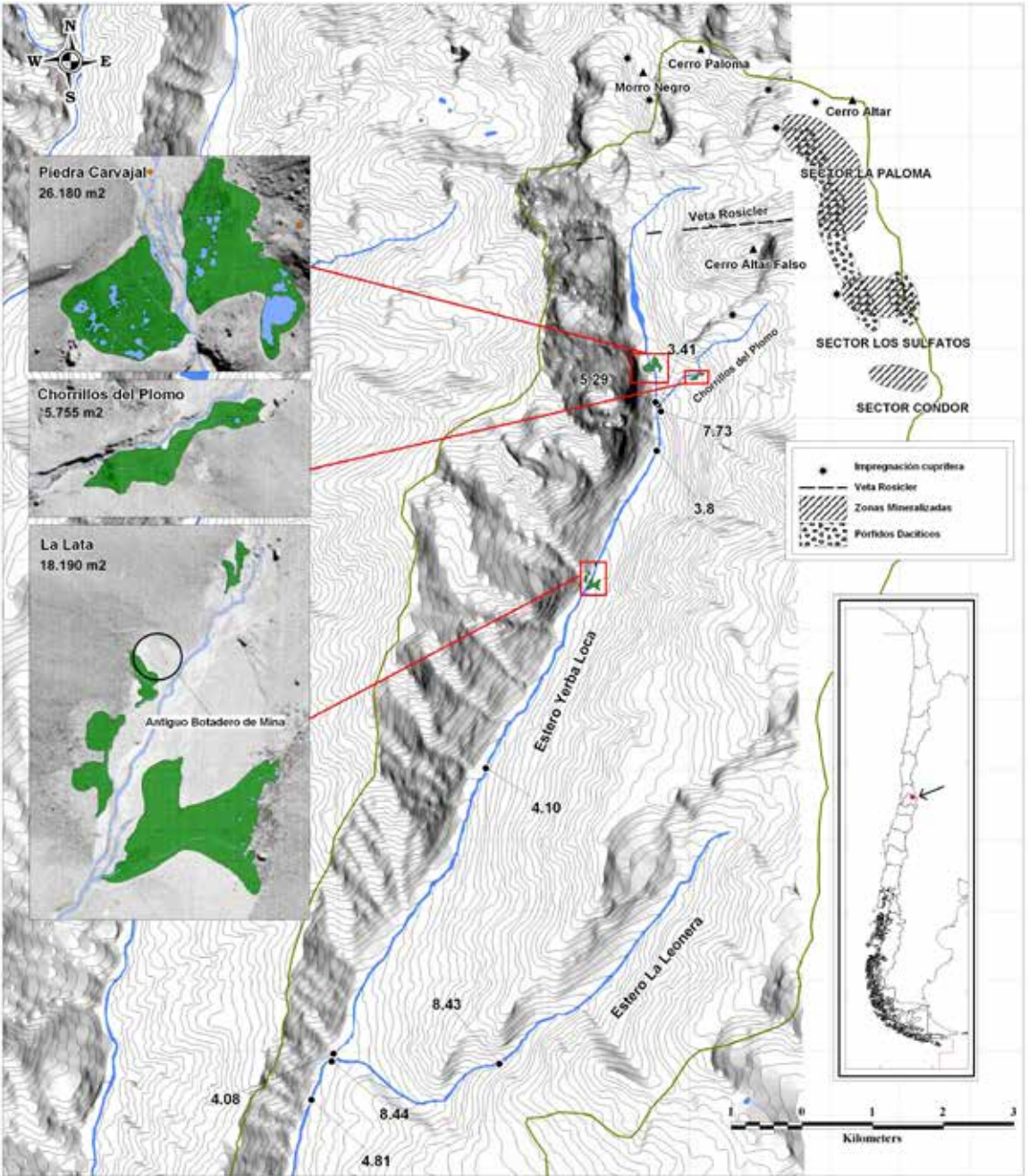


Figura 1. Mapa con la ubicación espacial de las tres vegas seleccionadas, Piedra Carvajal (imagen superior izquierda), Chorrillos del Plomo (imagen central izquierda) y La Lata (imagen inferior izquierda).



Figura 2. Vegas estudiadas del SNYL, La Lata (imagen arriba), Chorrillos del Plomo (imagen central) y Piedra Carvajal (imagen abajo); en esta última se observan los afloramientos u “ojos de agua”.

2.2. Caracterización de la flora y colecta vegetal

Las mediciones para caracterizar la flora y colectar las muestras vegetales se realizaron durante la estación de crecimiento estival, de los años 2006 y 2007. Para definir los puntos de muestreo se construyó una grilla general que abarcó las tres vegas. Posteriormente, se seleccionaron y georreferenciaron puntos dentro de las vegas de interés utilizando fotografías aéreas y satelitales. Estos puntos fueron localizados en terreno con un GPS (Garmin, modelo: eTrex Venture). El número de puntos seleccionados por vega fueron: LL 6 puntos, ChP 10 puntos y PC 9 puntos. En cada uno, se demarcó un cuadrante de 5 m x 5 m (25 m²) (Figura 3), en cuyo interior se identificaron todas las especies vegetales (riqueza) y su abundancia en base a la cobertura absoluta estimada a partir de la frecuencia de aparición en una grilla de 10 x 10 líneas, espaciadas cada 50 cm (Figura 3). La cobertura fue estimada con el método Braun-Blanquet descrito por Kent y Coker (1994). La escala de cobertura fue: + (menor a 1% de cobertura), 1 (1-5%), 2 (6-25%), 3 (26-50%), 4 (51-75%), 5 (76-100%). Además, se realizó un censo de todas las especies presentes en las tres vegas para generar

un listado florístico. La clasificación taxonómica fue actualizada con el catálogo de las plantas vasculares de Chile (Rodríguez et al., 2018). Las especies fueron clasificadas de acuerdo a su origen geográfico y su forma de vida según la clasificación de Raunkiaer (1937).

Con el fin de identificar especies vegetales tolerantes a condiciones anómalas de agua, como acidez y alta concentración de metales, se recolectaron vástagos de plantas que dominaban en microambientes influenciados por aguas anómalas. Para la colecta se escogieron 10 sitios de muestreo con diferentes calidades de agua. Las muestras vegetales fueron llevadas al laboratorio para determinar la concentración de Cu, Zn y Fe. En el laboratorio las muestras se lavaron con agua ultrapura, se secaron a 45 °C hasta peso constante, se molieron finamente y fueron digeridas. Luego se analizó la concentración de los metales Cu, Zn y Fe por ICP-MS (ELAN 6100 con autosampler AS90; Perkin-Elmer, Uberlinger, Alemania). Las metodologías utilizadas para los análisis químicos siguieron los protocolos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés).

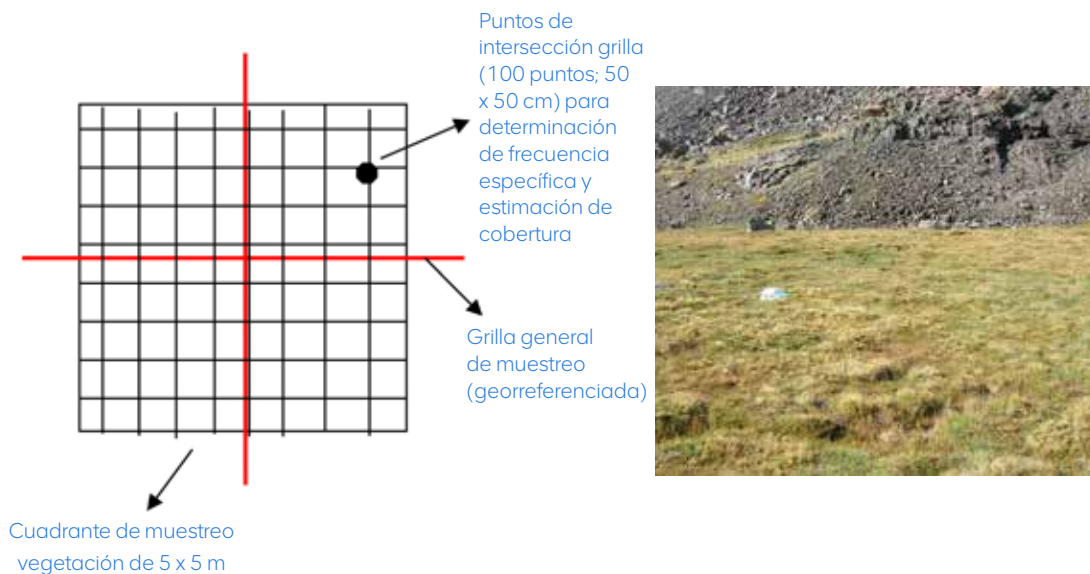


Figura 3. Diseño del cuadrante de muestreo de vegetación en cada punto de intersección de la grilla general de muestreo (imagen izquierda). Establecimiento del cuadrante en terreno (imagen derecha).



La vega ChP es la que tuvo el valor promedio más bajo de pH (5,6), lo cual indica que posee las aguas más ácidas. Además, tuvo la mayor CE, dureza y sulfatos, y menor contenido de Cu que el resto de las vegas.

2.3. Caracterización y colecta de las muestras de agua

Se colectaron muestras de agua en los mismos puntos de muestreo de la vegetación, siempre que fuera posible. Adicionalmente, se tomaron muestras de agua en otros sitios de las tres vegas; 30 puntos en LL, 13 puntos en ChP y 43 puntos en PC. Durante la colecta en terreno se les midió el pH y la conductividad eléctrica (CE) con un equipo portátil (Hanna Instruments, modelo: HI98130). Las muestras se pusieron en frascos plásticos, previamente lavados con ácido para asegurar que estuvieran libres de impurezas, y fueron llevadas al laboratorio para la caracterización química.

A las muestras se le determinó la concentración de sulfatos con un cromatógrafo iónico (DIONEX 120X), la concentración de calcio (Ca) y magnesio (Mg) usando un AAS (Perkin Elmer, modelo: AAnalyst 300), el Cu disuelto total, Zn, cadmio (Cd), plomo (Pb) y Fe, con un espectrofotómetro de masas (ICP-MS; ELAN 6100

AS90; Perkin-Elmer, Uberlinger, Alemania). Todas las metodologías utilizadas para los análisis siguieron los protocolos de la EPA. La dureza de las aguas se estimó a partir de los contenidos de Ca y Mg.

2.4. Análisis de datos

La comparación de los parámetros químicos del agua entre vegas se analizó mediante el análisis no paramétrico univariado de Kruskal Wallis. Para evaluar la relación entre los parámetros químicos del agua y la riqueza de las especies en todos los sitios de muestreo se realizó una correlación Spearman, al igual que para evaluar la relación entre contenido de metales en vástagos y contenido de metales en aguas. Se realizó una clasificación fitosociológica de la flora identificada en los 25 sitios de muestreo como un análisis exploratorio de asociación de plantas siguiendo el sistema Braun Blanquet descrito por Kent y Coker (1994). Todos los análisis se realizaron en el software Statistica 6.0.

3. RESULTADOS

3.1. Química de las aguas

En la Tabla 1 se muestran las características químicas del agua de las tres vegas altoandinas seleccionadas. Se observan diferencias significativas entre los valores promedios de las vegas para el pH, la CE, los sulfatos, la dureza y en los contenidos disueltos totales de Cu y Zn.

La vega ChP es la que tuvo el valor promedio más bajo de pH (5,6), lo cual indica que posee las aguas más ácidas. Además, tuvo la mayor CE, dureza y sulfatos, y menor contenido de Cu que el resto de las vegas. Las aguas de la vega LL fueron ligeramente ácidas (6,4), presentaron los valores más bajos de sulfatos y dureza, pero los niveles más altos de Cu y Zn totales disueltos. A su vez, las aguas de la vega PC fueron neutras, con nivel intermedio de Cu disuelto total y con la concentración más baja de Zn total disuelto.

Dentro de las vegas se observó una alta variabilidad en los parámetros químicos del agua (Tabla 1, diferencia entre Max y Min), particularmente en términos de pH, donde la mayor variabilidad se encontró en la vega PC, con valores desde 4,7 (muy ácido) a 10,8 (muy básico) (Tabla 1), los cuales se pueden observar en la variabilidad de color de los puntos mostrados en la Figura 4 para la vega. Al mismo tiempo, la vega ChP presentó una menor variabilidad de pH, con valores que van de 4,0 (muy ácido) a 6,5 (neutro) (Tabla 1; Figura 4). En cuanto a otros parámetros como los sulfatos, la mayor variabilidad estuvo en la vega PC (10 veces más en el Max que en el Min); en cuanto al Cu total disuelto y el Zn total disuelto, la mayor variabilidad se encontró en la vega LL (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización química de las aguas de las vegas Piedra Carvajal, Chorrillos del Plomo y La Lata en el SNYL. Los valores $p < 0,05$ indican que existe diferencia significativa entre vegas. CE: Conductividad eléctrica, DE: Desviación estándar.

Vega		Altitud (m s.n.m.)	pH	CE (mS/ cm)	Sulfato (mg/L)	Dureza (mg/L CaCO ₃)	Metal Disuelto Total (mg/L)				
							Cu	Zn	Cd	Pb	Fe
Piedra Carvajal	Media	3.256	7,6	0,4	160,3	168,6	475,5	29,4	0,2	0,3	55,8
	DE		1,5	0,2	125,1	132,2	690,2	29,9	0,1	0,3	130,5
	Max		10,8	0,9	396,7	475,0	1970,0	78,0	0,5	0,8	403,0
	Min		4,7	0,1	31,0	40,0	1,0	3,0	0,1	0,0	3,0
	N		52	52	9	9	9	9	9	9	9
Chorrillos del Plomo	Media	3.265	5,6	0,7	327,5	499,4	40,7	114,7	0,3	0,2	38,3
	DE		0,7	0,1	27,5	30,4	23,6	13,3	0,1	0,0	7,2
	Max		6,5	1,0	358,0	523,0	67,0	126,0	0,4	0,3	45,0
	Min		4,0	0,6	320,0	465,0	22,0	100,0	0,2	0,2	31,0
	N		23	23	3	3	3	3	3	3	3
La Lata	Media	2.810	6,4	0,4	82,9	81,1	2579,3	138,6	0,3	1,0	18,9
	DE		1,4	0,2	82,9	81,1	2579,3	138,6	0,3	1,0	18,9
	Max		8,7	0,7	300,6	401,0	6006,0	337,0	0,8	2,6	73,0
	Min		4,3	0,2	90,1	176,0	10,0	7,0	0,1	0,1	10,0
	N		36	36	9	9	9	9	9	9	9
Kruskal Wallis	df		2	2	2	2	2	2	2	2	2
ANOVA by ranks	H		27,04	36,35	6,29	11,04	7,32	8,75	5,02	3,9	5,41
	p		< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,01	< 0,05	< 0,05	0,08	0,14	0,07

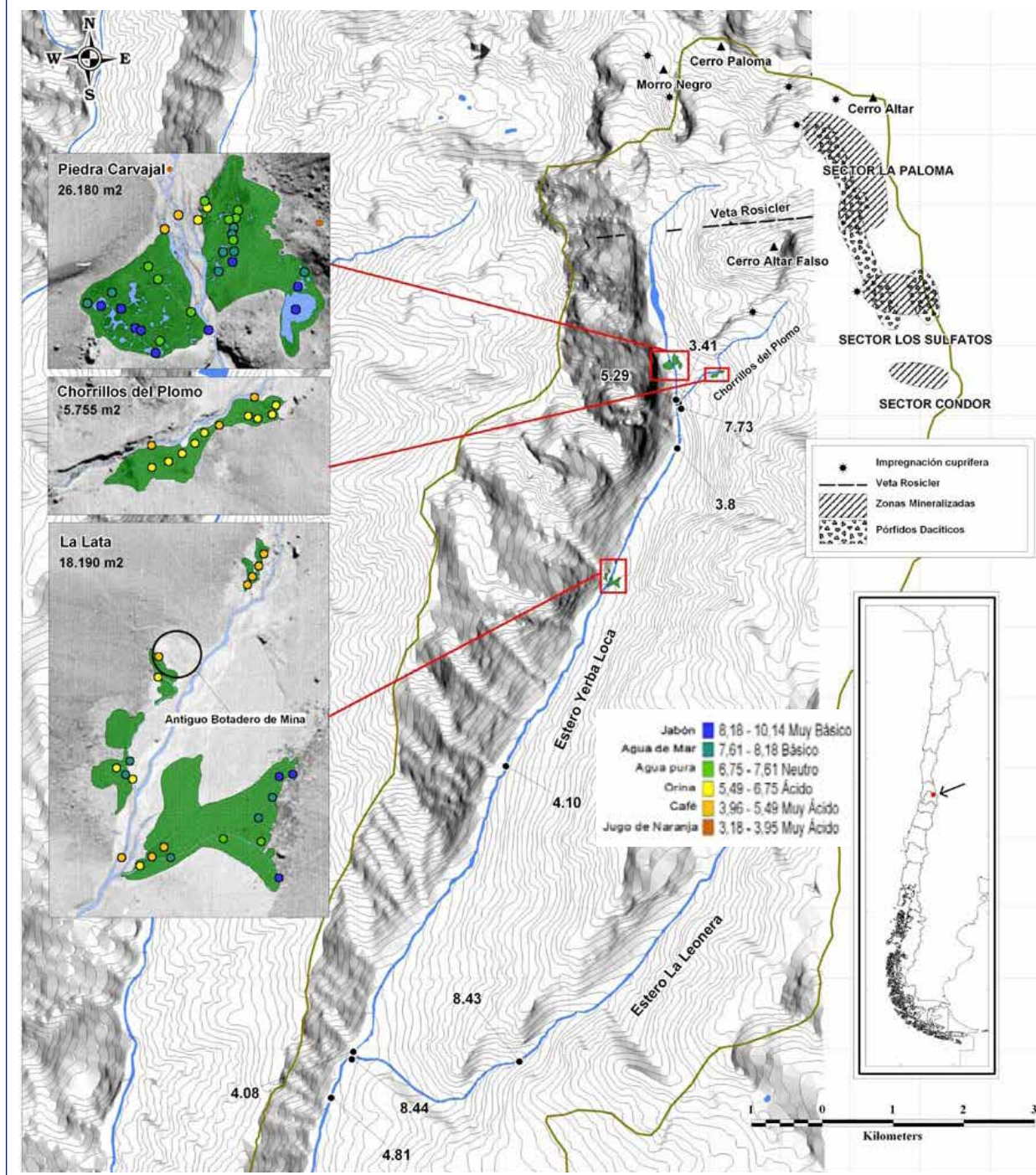


Figura 4. Valores del pH del agua en distintos puntos de muestreo en las vegas Piedra Carvajal, Chorrillos del Plomo y La Lata en el SNYL. El color de los puntos indica el valor del pH que se presenta con ejemplos en la tabla de escala de pH (modificado de Ginocchio et al., 2008). Las fotografías muestran las diferentes calidades de agua; en las de aguas normales se pueden observar animales bebiendo de los afloramientos de agua (página siguiente).



Aguas anómalas
(ácidas y con minerales)



Aguas normales
(neutras y sin minerales)



Entre las tres vegas estudiadas se encontró una riqueza de 29 especies de plantas vasculares, las que se agrupan en 26 géneros y 16 familias (Tabla 2).

3.2. Flora y vegetación

Entre las tres vegas estudiadas se encontró una riqueza de 29 especies de plantas vasculares, las que se agrupan en 26 géneros y 16 familias (Tabla 2). Además de las especies identificadas a nivel de especie, hubo tres plantas que fueron identificadas a nivel de género (*Erigeron* sp., *Poa* sp. y *Lemna* sp.), las cuales no fueron incluidas en los análisis. Las familias que tuvieron mayor representación de especies son Poaceae (6 especies), Caryophyllaceae (3 especies), Cyperaceae (3 especies) y Asteraceae (3 especies). Según su origen geográfico, el 90% de las plantas son nativas, 3% endémicas y 7% exóticas. En cuanto a su forma de vida (Raunkiaer, 1937), el 86% son hemicriptófitas (dejan sus yemas de renuevo a la altura de la superficie del suelo), 7% terófitas (dejan semillas para la siguiente estación de crecimiento) y 7% nanofanerófitas (dejan sus yemas de renuevo por sobre la superficie del suelo) (Tabla 2). Las únicas representantes de esta última forma de vida son las especies *Empetrum rubrum* Vahl ex Willd. y *Gaultheria caespitosa* Poepp. & Endl. La cobertura

en las vegas fue desde el 53% al 88%, siendo la que tuvo menor cobertura la vega LL y la que tuvo mayor cobertura PC (Tabla 2).

Dentro de cada vega, los valores de riqueza fueron similares variando entre 16 y 18 especies por vega (Tabla 2). Entre ellas, destaca la vega ChP, que tuvo el mayor número de especies en la menor superficie de terreno (Tabla 2). Por otro lado, la vega LL tuvo menor riqueza (16 especies), pero es la que tuvo el mayor número de especies únicas (7 especies). Existen siete plantas que son comunes, es decir, que se repiten en las tres vegas, *Carex macloviana* d'Urv., *Cerastium arvense* L., *Erigeron andicola* DC., *Festuca purpurascens* Banks & Sol. ex Hook. f., *Hypochaeris thrincioides* (J. Remy) Reiche, *Plantago barbata* G. Forst. y *Werneria pygmaea* Gillies ex Hook. & Arn. Por otro lado, existen especies compartidas entre pares de vegas, siendo las vegas ChP y PC las que más comparten (6 especies). Al contrario, muy pocas se comparten entre LL y PC (1 especie), y LL y ChP (1 especie).

Tabla 2. Flora vascular de las vegas estudiadas en el SNYL. Se indica la familia, forma de vida (H: hemicriptófito, Nf: nanofanerófito, T: terófito), origen fitogeográfico (N: nativa, En: endémica, Ex: exótica), presencia en vegas y grupos de formaciones vegetales según el análisis fitosociológico (Los números indican clase de frecuencia 1: 1-20%, 2: 21-40%, 3: 41-60%, 4: 61-80%, 5: 81-100%). ¹Indica especies vegetales no vasculares, no incluidas en la riqueza, pero consideradas en los grupos de asociaciones fitosociológico.

Especie	Familia	Forma de vida/Origen	Vega			Grupo vegetal		
			PC	ChP	LL	I	II	III
<i>Acaena magellanica</i> (Lam.) Vahl	Rosaceae	H/N		Si		1		
<i>Arenaria rivularis</i> Phil.	Caryophyllaceae	H/N			Si			1
<i>Calandrinia affinis</i> Gillies ex Arn.	Montiaceae	H/N			Si	1		
<i>Calceolaria biflora</i> Lam.	Calceolariaceae	H/N			Si	1		
<i>Carex atropicta</i> Steud.	Cyperaceae	H/N	Si	Si		1	3	
<i>Carex macloviana</i> d'Urv.	Cyperaceae	H/N	Si	Si	Si	3	3	4
<i>Cerastium arvense</i> L.	Caryophyllaceae	H/Ex	Si	Si	Si	1	2	2
<i>Colobanthus quitensis</i> (Kunth) Bartl.	Caryophyllaceae	H/N		Si	Si		1	1
<i>Deschampsia venustula</i> Parodi	Poaceae	H/N	Si		Si	1		1
<i>Deyeuxia chrysostachya</i> E. Desv.	Poaceae	H/N		Si			5	
<i>Deyeuxia velutina</i> Nees & Meyen var. <i>velutina</i>	Poaceae	H/N	Si			1		
<i>Draba gilliesii</i> Hook. & Arn.	Brassicaceae	H/N		Si			1	
<i>Eleocharis pseudoalbibracteata</i> S. González & Guagl.	Cyperaceae	H/N	Si	Si		1	1	
<i>Empetrum rubrum</i> Vahl ex Willd.	Ericaceae	Nf/N		Si		1		
<i>Erigeron andicola</i> DC.	Asteraceae	H/N	Si	Si	Si	4		
<i>Erythranthe glabrata</i> (Kunth) G.L. Nesom	Phrymaceae	T/N			Si			
<i>Festuca magellanica</i> Lam.	Poaceae	H/N	Si	Si		3	1	
<i>Festuca purpurascens</i> Banks & Sol. ex Hook.f.	Poaceae	H/N	Si	Si	Si	2	1	5
<i>Gaultheria caespitosa</i> Poepp. & Endl.	Ericaceae	Nf/N	Si	Si		2		
<i>Gentiana prostrata</i> Haenke	Gentianaceae	T/N	Si	Si		1		
<i>Hypochaeris thrincioides</i> (J. Remy) Reiche	Asteraceae	H/En	Si	Si	Si	2	2	
<i>Juncus stipulatus</i> Nees & Meyen	Juncaceae	H/N			Si	1		1
<i>Lobelia oligophylla</i> (Wedd.) Lammers	Campanulaceae	H/N			Si	1		
<i>Patosia clandestina</i> (Phil.) Buchenau	Juncaceae	H/N	Si	Si		3		
<i>Phleum alpinum</i> L.	Poaceae	H/Ex	Si			1		
<i>Plantago barbata</i> G. Forst.	Plantaginaceae	H/N	Si	Si	Si	4		
<i>Stuckenia filiformis</i> (Pers.) Boehm.	Potamogetonaceae	H/N	Si					
<i>Trifolium polymorphum</i> Poir.	Fabaceae	H/N			Si	1		
<i>Werneria pygmaea</i> Gillies ex Hook. & Arn.	Asteraceae	H/N	Si	Si	Si	5	2	
Bryophyta ¹						3	2	2
<i>Sphagnum</i> sp. ¹	Sphagnaceae					1	1	
Superficie (m ²)			26.180	5.755	18.190			
Cobertura total (%)			87,8	75,6	52,4			
Riqueza			17	18	16			
Especies únicas			3	4	7			
Especies comunes			14	14	9			
Especies comunes con una vega			7	7	2			
Especies comunes con dos vegas			7	7	7			
Número de especies total						25	13	8
Número de puntos de muestreo						11	6	8

Las plantas se pueden agrupar en tres grupos de similitud florística: grupo I que está representado en las tres vegas, grupo II representado solo en ChP, y grupo III representado en las tres vegas. En la Tabla 2 aparecen caracterizadas las formaciones de plantas dominantes, secundarias y raras que existen en cada grupo. Además, existieron algunas especies de plantas acuáticas que dominaban pequeñas lagunas presentes en las vegas PC y LL, como *Juncus stipulatus* Nees & Meyen, *Lemna* sp. y *Stuckenia filiformis* (Pers.) Boehm.; las microalgas también fueron bastante comunes en estas lagunas.

El grupo I corresponde a una formación vegetal de alta diversidad (25 especies) con un alto número de especies dominantes. Estas especies corresponden a *Patosia clandestina* (Phil.) Buchenau, *Festuca magellanica* Lam., *Plantago barbata*, *Carex macloviana*, *Erigeron andicola* y *Werneria pygmaea*, las cuales se encuentran acompañadas por un grupo diverso de especies secundarias (Tabla 2). Esta formación vegetal estuvo presente en las tres vegas estudiadas, en áreas donde la calidad del agua era normal; es decir, aguas neutras, con baja dureza y CE, y bajos niveles de minerales. Este grupo mostró algunas diferencias entre las vegas; en PC fue frecuente y crecía como una pradera continua, alcanzando hasta el 75% de la cobertura total. En cambio, en la vega de ChP estaba restringido a parches muy pequeños de gran pendiente, y cambiaban las especies secundarias, apareciendo dos nuevas: *Gaultheria caespitosa* y *Empetrum rubrum*. Asimismo, este grupo alcanzó hasta un 60% de cobertura total en la vega LL, pero se presentó como parches con plantas de menor altura que en la vega PC (4 cm de altura versus 8 cm de altura, respectivamente).

El grupo II es una formación vegetal con 13 especies, casi la mitad de especies que el grupo I. Este grupo está dominado por *Deyeuxia chrysostachya* E. Desv., *Carex atropicta* Steud. y *C. macloviana* (Tabla 2), acompañado de tres especies secundarias (*Werneria pygmaea*, *Hypochaeris thrincioides* y *Cerastium arvense*) y siete especies menos representadas. Esta formación vegetal estuvo representada solo en la vega ChP, donde fue dominante, con altos valores de cobertura (46% a 100%) y alcanzó hasta 17 cm de altura. De acuerdo al nivel de humedad del suelo, *C. atropicta* (dominante en áreas de bajo contenido de agua) es reemplazada por *C. macloviana* (dominante en zonas húmedas) como especie secundaria. Esta formación vegetal parece estar asociada a aguas ácidas a ligeramente ácidas,

que tienen alta dureza (por ejemplo, en los niveles de calcio) y altos niveles de sulfato, pero bajos contenidos de minerales, como Cu y Fe totales disueltos.

El grupo III corresponde a una formación vegetal de muy baja diversidad, ya que tiene solo ocho especies (Tabla 2). Su cobertura total varía del 32% al 99%, y dominó las zonas donde existían cursos de aguas muy ácidas de color azul o aspecto lechoso. Se presentó en las tres vegas estudiadas y alcanzó 30-40 cm de altura. Las especies dominantes fueron *Festuca purpurascens* y *Carex macloviana* (Figura 5), con sólo dos especies secundarias importantes (*Cerastium arvense* y una briófitas).

3.3. Relación entre los parámetros de calidad de aguas y las especies vegetales

En la Tabla 3 se muestran las correlaciones existentes entre los diferentes parámetros determinados en las aguas, y entre ellos y la riqueza vegetal. La CE del agua estuvo significativa y positivamente correlacionada con el sulfato, la dureza y el Zn total disuelto, mientras que el sulfato estuvo significativa y positivamente correlacionado con la dureza y el Zn total disuelto (Tabla 3). El Cu total disuelto estuvo significativa y positivamente correlacionado con el Zn total disuelto y a la vez, ambos metales estuvieron significativa y negativamente correlacionada con el pH (Tabla 3). Es decir, la concentración de Cu y Zn aumentó con la disminución del pH (mayor acidez) del agua, mientras que la salinidad (medida como CE) aumentó con el aumento de los contenidos de sulfato y la dureza del agua.

A su vez, la riqueza de especies vegetales estuvo correlacionada significativa y positivamente con el pH del agua, mientras que estuvo significativa y negativamente correlacionada con el Cu total disuelto. Así, la acidificación y el enriquecimiento de metales, como el Cu, de las aguas dieron como resultado una marcada reducción en el número de especies. De hecho, las aguas ácidas y ricas en Cu estuvieron dominadas por unas pocas especies, entre ellas *Festuca purpurascens* y *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl.

Las relaciones entre el contenido de metales en el agua y el contenido de metales en los tejidos vegetales aéreos de plantas recolectadas en terreno mostraron correlaciones significativas y positivas



Así, la acidificación y el enriquecimiento de metales, como el cobre (Cu) de las aguas dieron como resultado una marcada reducción en el número de especies.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Spearman(r_s) entre los parámetros químicos del agua y la riqueza de especies vegetales en los puntos de muestreo de las tres vegas del SNYL. Los números en negrita indican correlaciones significativas ($p<0,05$).

	pH	CE	Sulfato	Dureza	Cu	Zn	Fe	Riqueza
pH	1,00							
CE	-0,38	1,00						
Sulfato	-0,42	0,94	1,00					
Dureza	-0,22	0,86	0,83	1,00				
Cu	-0,82	0,27	0,28	0,18	1,00			
Zn	-0,74	0,62	0,56	0,51	0,83	1,00		
Fe	0,03	0,39	0,23	0,39	-0,15	0,17	1,00	
Riqueza	0,68	-0,05	-0,09	0,01	-0,59	-0,40	0,22	1,00

entre los contenidos de Cu y Zn en los vástagos y los niveles totales disueltos de estos metales en el agua ($r_s = 0,86$ y $p<0,01$ para Cu; $r_s = 0,62$ y $p<0,05$ para Zn). Dentro de las especies evaluadas, destacó la especie *F. purpurascens* (Figura 5), la cual se desarrolló en un amplio gradiente de calidad del agua en términos de pH (4,7 a 7,9) y Cu total disuelto (33 a 6.143 $\mu\text{g/L}$; Tabla 4), determinando así un amplio rango de contenido de Cu en los vástagos (45 a 1.026 mg/kg peso seco). Otra especie que también se desarrolla en sitios con altos niveles de Cu en el agua (446 a 2.410 $\mu\text{g/L}$) es *C. macloviana* (Figura 5), concentrando al igual que *F.*

purpurascens altos contenidos de Cu en sus vástagos (desde 181 a 487 mg/kg) en relación con las otras especies. Se menciona, además, un musgo (bryophyta, planta no vascular) que se desarrolla en aguas ácidas y ricas en Cu (aproximadamente 6.000 $\mu\text{g/L}$) en la vega La Lata y posee altos contenidos de Cu total en los tejidos aéreos (2.731 a 6.034 mg/kg peso seco) (Tabla 4) (Figura 5).

Tabla 4. Contenido de metales en los vástagos y características químicas de algunas de las aguas donde fueron colectadas las especies vegetales en las vegas del SNYL.

Especie	Vega	Sitio	Metal en vástagos			Características químicas del agua			
			Cu mg/ kg	Zn mg/ kg	Fe mg/ kg	Metales totales disueltos (µg/L)			pH
						Cu	Zn	Fe	
<i>Festuca purpurascens</i>	Piedra Carvajal	1	1.026	43					
		2	348	57					
		3	286	34					
		4	282	70	144	1.120	78	8	5,3
		5	131	27					
		6	62	48					
	La Lata	1	324	72	610	6.143	337	22	5,0
		2	299	122	132	5.959	328	19	5,1
		3	145	47	1.103	34	20	12	8,0
		4	78	28	257	2.410	97	10	5,8
		5	45	34	422	754	76	73	4,7
	Chorrillos del Plomo	1	14	188	111	33	118	38	5,7
<i>Deyeuxia chrysostachya</i>	Chorrillos del Plomo	1	20	54	191				
		2	17	54	137	33	118	38	5,7
<i>Carex macloviana</i>	La Lata	1	487	88	312	2.410	97	10	5,8
	Piedra Carvajal	1	181	58	553	446	34	16	6,2
<i>Gaultheria caespitosa</i>	Chorrillos del Plomo	1	31	54	439				5,8
	Piedra Carvajal	1	18	88	226				
<i>Juncus stipulatus</i>	La Lata	1	69	70	1.146	10	7	31	8,3
<i>Empetrum rubrum</i>	Chorrillos del Plomo	1	38	52	390				5,7
<i>Deschampsia venustula</i>	Piedra Carvajal	1	32	42	236	11	18	34	6,7
<i>Werneria pygmaea</i>	Piedra Carvajal	1	13	43	97	5	3	14	9,6
Bryophyta	La Lata	1	2.731	375	3.054	5.959	328	19	5,1
		2	6.034	259	2.270	6.006	328	19	5,1



Figura 5. Especies vegetales asociadas a distintas calidades de agua en las vegas del SNYL. *Deyeuxia chrysostachya*, *Festuca purpurascens* y *Carex macloviana* creciendo en sitios con aguas ácidas (imágenes de la izquierda). *Werneria pygmaea*, *Calceolaria biflora* y *Erigeron andicola* creciendo en sitios con aguas neutras.

ENSAYO DE TOLERANCIA A COBRE EN *FESTUCA PURPURASCENS*

En las vegas del SNYL se encontró la especie *Festuca purpurascens*, la que es capaz de crecer en sitios con amplio rango de concentraciones de Cu en el agua. Por esto se consideró que era una buena candidata para llevar a laboratorio y estudiar su tolerancia al Cu.

El estudio se hizo mediante un cultivo hidropónico con semillas recolectadas en distintos sitios de las vegas LL y PC. Las plantas se hicieron germinar en perlita con agua y luego fueron trasladadas a una solución nutritiva. A las 3 semanas comenzó la prueba aplicando Cu en las siguientes concentraciones: 0; 0,125; 0,250; 0,5 y 1,0 mg Cu/L como sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$). Este ensayo duró siete días en una sala con temperatura, fotoperiodo e

intensidad lumínica controlada. Al comienzo y al final del experimento se midió la raíz más larga de cada planta para determinar la elongación radicular de cada una de ellas.

Finalmente, los resultados de las pruebas de tolerancia al Cu indicaron que la elongación de la raíz no se inhibe significativamente al aumentar las concentraciones de Cu. Todos los individuos probados mostraron ser tolerantes al Cu, independiente de la calidad del agua de su sitio de procedencia. Con ello se puede concluir que *Festuca purpurascens* es tolerante al Cu y podría ser usada en programas de remediación de sitios contaminados con Cu.



Figura 6. Sitios de colecta de semillas de *Festuca purpurascens* en el SNYL, sitio control con aguas normales (izquierda) y sitio con aguas anómalas (derecha).

4. DISCUSIÓN

4.1. Calidad de las aguas

La alta heterogeneidad química de las aguas que drenan las tres vegas estudiadas se debería a fenómenos naturales, como los provenientes del DAR que ocurre en la faja longitudinal de depósitos de pórfido Cu-Mo que pasa por el SNYL y se extiende a lo largo de los Andes norcentrales (32-34° S, 70° O), denominada Río Blanco-Los Bronces-El Teniente (Barceló, 1984). También tendría un factor antropogénico, debido a actividades mineras, como es el caso de desechos dejados por explotaciones históricas de plata, y que se ubica a un costado de la vega LL (pila de estériles). Estos fenómenos producen la acidificación del agua superficial, el aumento de la salinidad y el enriquecimiento mineral en esta zona de Chile central, tal como ha sido descrito en otras zonas de alta montaña del mundo (Verplanck et al., 2009).

Las diferencias en la calidad del agua se encontraron tanto entre las vegas como dentro de ellas. Las mayores anomalías fueron en términos de pH, donde las aguas entre las vegas variaron desde 7,6 en PC, 6,4 en LL y hasta 5,6 en ChP. Además, dentro de cada vega existió una alta variabilidad de pH; dos unidades en ChP y 4-5 unidades en las otras dos vegas. En cuanto al Cu total disuelto también se encontraron variaciones entre las vegas ChP (41 µg/L), PC (476 µg/L) y LL (2.579 µg/L). Además, nuevamente se evidenció una gran variabilidad para este parámetro dentro de cada vega; tres veces en ChP y de 600 a casi 2.000 veces en las otras dos vegas. Estas variaciones se deben a la gran diversidad de fuentes de agua que abastecen a las vegas. Se evidenciaron así altas heterogeneidades ambientales en cuanto a la calidad de las aguas en las vegas altoandinas de estudio en el SNYL.

Resultados similares han sido documentados para las aguas de esta zona, tanto en los registros de altos niveles de metales como en los de alta acidez, entre otros parámetros (Valenzuela-Díaz et al., 2020; Montserrat et al., 2021). Sin embargo, estos valores podrían tener ciertas disimilitudes debido a la disminución de las precipitaciones causada por la mega sequía de la última década (Garreaud et al., 2020). Se debe tener presente que la composición de las aguas está directamente relacionada con los procesos nivo-glaciares, y la geología de sus cuencas de cabecera, por lo tanto,

cambios hidrológicos implicarían la disminución del caudal y un aumento del derretimiento glaciar debido al aumento de las temperaturas, lo cual se traduciría en un empeoramiento en la calidad de las aguas de la cuenca (Montserrat et al., 2021). Probablemente estos cambios afectarían la composición florística y estructura vegetal que depende directamente de estas aguas.

4.2. Flora y vegetación de las vegas

Dentro de las familias que dominaban las vegas estudiadas del SNYL están las Poaceae (6 especies) y Cyperaceae (3 especies), ambas representativas de estos ecosistemas (Teillier et al., 2005). Según el origen fitogeográfico, la mayoría de las especies registradas en las vegas corresponden a nativas (90%), y solo un 3% es endémico. Este último valor es bajo, sin embargo, esperable según los resultados encontrados por Escobar et al. (2021) en la cuenca del estero Ortiga (cuenca alta del río Mapocho) y Arroyo et al. (2002) en el SNYL, quien lo atribuye a la gran proporción de flora altoandina que es compartida con la cordillera de los Andes del lado argentino. El porcentaje restante corresponde a especies exóticas (7%), lo cual indicaría un bajo impacto de origen antrópico. Uno de los principales impactos que afectan las vegas es el pastoreo trashumante (Fuentes-Ramírez et al., 2011), el cual se puede cuantificar considerando la proporción de especies exóticas y el tipo de forma de vida (Hauenstein et al., 1988). Por ejemplo, las praderas de la Reserva Nacional Alto Biobío (Región de la Araucanía) que, a pesar de presentar un bajo número de especies exóticas, y una alta proporción de hemiptófitas como forma de vida, indicaría un grado medio de perturbación (Fuentes-Ramírez et al., 2011). En las vegas del SNYL existe un alto porcentaje de especies hemiptófitas (86%), que serían las más frecuente en estos tipos de ecosistemas (Teillier, 2005). Estos tipos de especies estarían adaptadas a soportar el pisoteo y ramoneo de animales (Fuentes-Ramírez et al., 2011), lo cual estaría indicando algún grado de perturbación por ganado. El resto de las especies corresponden a terófitas (7%) y nanofanerófitas (7%). Este último representado por dos especies de la familia Ericaceae, *Gaultheria caespitosa* y *Empetrum rubrum*, ambas presentes únicamente en la vega ChP, la cual se encuentra a mayor altitud y es la de más difícil acceso.

La riqueza fue similar en las tres vegas (16 a 18 especies) y estuvo dentro del rango de especies

(seis a 19) descritas para otras vegas altoandinas (Squeo et al., 1994; Teillier, 2005). Sin embargo, lo interesante es la relación del número de especies con el tamaño de la vega, como ocurrió en la vega ChP, la cual posee la menor superficie, pero tuvo el mayor número de especies. Esta vega tuvo además la mayor representación de asociaciones vegetales ya que en ella se observaron los tres grupos resultantes de la clasificación fitosociológica.

Para las vegas altoandinas de la zona centro-norte de Chile se han descrito dos formaciones vegetales principales; una corresponde a vegas dominadas por especies de la familia Juncaceae que se desarrollan en forma de cojín, como *Patosia clandestina* y *Oxychloë andina* Phil., y vegas dominadas por pastos como *Deschampsia caespitosa* (L.) P. Beauv. y *Deyeuxia velutina* Nees & Meyen (Squeo et al., 2006). El grupo I es similar al primer tipo de vega (tipo cojín), y ha sido descrito como la comunidad *Patosia clandestina*-*Juncus balticus*, considerada representativa de las vegas altoandinas del centro-norte de Chile (Luebert y Plischoff, 2017). Este grupo estuvo presente en las tres vegas y está dominado por las especies *Patosia clandestina*, *Festuca magellanica*, *Plantago barbata* y *Werneria pygmaea*, muy similar a las especies encontradas en las vegas de la cordillera de Los Patos en la Región de Valparaíso (Luebert y Gajardo, 2004). Este grupo en la vega ChP estuvo restringido a parches muy pequeños de gran pendiente, y con la presencia de dos especies secundarias, *Gaultheria caespitosa* y *Empetrum rubrum*, ambas escasas en esta zona de distribución y consideradas relictos de la última glaciación (Teillier et al., 2005; Teillier et al., 2011). Los grupos II y III son similares al segundo tipo de vega (dominada por pastos). El grupo II está compuesta por *Deyeuxia chrysostachya*, *Carex atropicta* y *C. macloviana*, y estuvo solo presente en la vega ChP, donde fue dominante. El grupo III tiene muy baja diversidad y está dominada por *Festuca purpurascens* y *Carex macloviana*, estando presente en las tres vegas estudiadas.

Dentro del listado florístico hubo tres especies que no están registradas en el catálogo de las plantas vasculares de Chile (Rodríguez et al., 2018) para la zona geográfica del estudio (Región Metropolitana de Santiago); estas fueron *Arenaria rivularis* Phil., *Stuckenia filiformis* y *Gaultheria caespitosa*.

4.3. Relación de las plantas con la calidad del agua

Los resultados indican que los parámetros como el pH y el Cu total disuelto en las aguas son factores que determinan la distribución, diversidad y abundancia de las plantas que habitan las vegas del SNYL. Las variaciones de estos parámetros podrían explicar los cambios en la estructura de la comunidad vegetal entre y dentro de las vegas. Por ejemplo, la vega ChP presentó, en general, aguas más ácidas con mayor contenido en sulfatos, pero menor contenido de metales que las vegas LL y PC. Las dos últimas vegas tienen aguas neutras a ligeramente ácidas, bajas en sulfatos, pero altas en metales. Estas diferencias podrían estar explicando la presencia y distribución de los grupos vegetacionales en las vegas estudiadas.

Dentro de la vega ChP existió una alta variabilidad en la calidad de las aguas, que podría estar explicando la presencia y distribución de los grupos vegetacionales en esta reducida área. Sin embargo, debido a su mayor pendiente y micro topografía compleja, también existirían otros gradientes involucrados, como la humedad y salinidad del suelo. Esta vega es la única que posee los tres grupos de formación vegetal, grupo I (vega tipo cojín con aguas neutras), grupo II (vega de pastos con aguas ácidas y bajo contenido de Cu) y grupo III (vega de pastos y aguas muy ácidas). Las vegas LL y PC comparten calidades de agua similares, y presentan dos tipos de áreas, unas con aguas neutras y bajos contenidos de metales, y otras con aguas impactadas por AMD/ARD. En las áreas con aguas neutras dominó el grupo I (vega tipo cojín), que tiene alta diversidad (25 especies) y está compuesta principalmente por *Patosia clandestina*, *Werneria pygmaea*, entre otras. En el área donde se identificaron aguas muy ácidas y con alto contenido de metales dominó el grupo III (vega de pastos), con muy baja diversidad y dominada por *Festuca purpurascens*. Las plantas de este grupo alcanzaron 30-40 cm de altura, mayor al resto de la altura encontrada en los otros grupos, lo que podría estar relacionado a cierto grado de selectividad de parte del ganado. Sería interesante evaluar si los tipos generales de vegetación de las vegas altoandinas, tipo cojín y de pastos (Squeo et al., 2006) pueden considerarse como indicadores de calidades de aguas superficiales. Al respecto, Luebert y Plischoff (2017) describen a un piso vegetacional intrazonal como "Turberas alcalinas", con acumulación de materia



Los resultados indican que la riqueza de plantas se redujo significativamente al aumentar la acidez y el contenido de cobre (Cu) en las aguas superficiales.

orgánica y pH neutro, donde crecen formaciones tipo cojines dominado por Juncaceae (*Patosia clandestina* en los Andes mediterráneos) junto a gramíneas.

La variación del pH y el contenido de Cu total disuelto en las aguas de las vegas, producto del DAR, seleccionaría poblaciones específicas de plantas resistentes a metales (Reimann y Garrett, 2005). El Cu y el Zn son micronutrientes esenciales para todos los organismos, pero pueden ser tóxicos en altas concentraciones (Adriano, 2001). Los niveles de Cu y Zn totales disueltos estuvieron en la mayoría de los casos muy por encima de los criterios de calidad de agua para la vida acuática recomendados por la EPA (valor calculado de 16,5 $\mu\text{g/L}$ para Cu en aguas puras del centro-norte de Chile según Villavicencio et al. (2005); 120 $\mu\text{g/L}$ para Zn según la EPA, (1999)), por lo que deberían ser tóxicos para organismos acuáticos y plantas. Sin embargo, algunos organismos pueden tolerar ciertos metales, como algunas especies vegetales que crecen en las vegas del SNYL. Este sería el caso de *Festuca purpurascens* y algunos musgos, los cuales habitaban en aguas con altos niveles de Cu sin presentar síntomas de toxicidad, y además fueron capaces de sobrevivir con altos contenidos de Cu en sus tejidos aéreos (1.026 y 6.034 mg/kg, respectivamente). Como referencia, el rango de Cu observado en tejidos aéreos (peso seco) de cultivos y árboles frutales varía

de 4 a 40 mg/kg (Adriano, 2001) y de 2,7 a 21 mg/kg en plantas acuáticas (Harrison, 1998).

Los resultados indican que la riqueza de plantas se redujo significativamente al aumentar la acidez y el contenido de Cu en las aguas superficiales. Solo algunas especies pudieron desarrollarse en esta condición estresante, como fue el caso de *Arenaria rivularis* y *Colobanthus quitensis*, descrita como especie tolerante a concentraciones elevadas de Cu (Cuba-Díaz et al., 2017). Estas especies no estuvieron representadas en otras áreas (Grupo I, aguas normales) y, por lo tanto, en estas vegas se podrían definir como plantas indicadoras de aguas ricas en metales. Otra especie que se podría considerar como indicadora de aguas ácidas es *Festuca purpurascens*, sin embargo, esta especie estuvo representada en los tres grupos vegetacionales, ya que fue capaz de habitar en sitios con aguas con amplios rangos de pH y concentración de Cu. Esto la convierte en una buena candidata para estudios de tolerancia, por ejemplo, al Cu, mediante pruebas estándar de laboratorio de dosis-respuesta (Ginocchio et al., 2002; Ginocchio y Baker, 2004) (ver recuadro). Los resultados de estos ensayos sirven para identificar especies que podrían ser usadas para la rehabilitación ambiental, la mitigación de problemas ambientales asociadas al sector minero, y/o en fitoestabilización (Ginocchio y Baker, 2004).



Estas especies además pueden ser utilizadas con otros fines, por ejemplo, *Stuckenia filiformis*, registrada en este estudio, ha sido propuesta como una especie bioindicadora de metales para la primera etapa de contaminación de los ríos (Harguinteguy et al., 2014).

En este estudio, se expone la importancia de los factores químicos del agua en la abundancia y diversidad de las plantas que habitan las vegas altoandinas del SNYL. Sería necesario aumentar el esfuerzo de muestreo y ampliar la zona geográfica de estudio para verificar si este fenómeno se repite en otras vegas altoandinas de la zona central de Chile, con el fin de obtener resultados más concluyentes y generales.

5. CONCLUSIÓN

En las vegas del SNYL se encontró una alta variabilidad en la calidad del agua entre las vegas y dentro de ellas. Existe una correlación significativa entre la calidad del agua y la riqueza de especies vegetales, la cual disminuye en aguas ácidas y con altos niveles de Cu. Se establecieron tres grupos de asociaciones vegetales, los cuales dependen de la calidad del agua. Se espera que este estudio sirva como línea base, para que futuros estudios puedan cuantificar la dinámica y estructura de un ecosistema frágil que depende directamente del recurso hídrico de la cuenca del estero Yerba Loca, y que debido a la mega sequía que afecta la zona hace más de una década, ha provocado el empeoramiento de la calidad de sus aguas.

AGRADECIMIENTOS

ANID PIA/BASAL FB0002 y FONDECYT 1050130 (R. Ginocchio). Guardaparques del SNYL y Centro Cordillera, Municipalidad de Lo Barnechea. Los autores agradecen los valiosos aportes de Patricio Rodríguez, Elena Bustamante, Paola Urrestarazu, Yasna Silva, Jean Paul de la Harpe y Solange Vargas.

REFERENCIAS

- Adriano, D. C. (2001). *Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals*. Springer-Verlag. New York, USA.
- Anglo American. (2018). *Flora y Fauna Lo Barnechea*. Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, Municipalidad de Lo Barnechea.
- Aravena, X. (2002). *Caracterización florística y vegetal del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, Lo Barnechea, Región Metropolitana* (Tesis pregrado). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Arroyo, M. T. K., Marticorena, C., Matthei, O., Muñoz, M., y Pliscoff, P. (2002). Análisis of the contribution and efficiency of the Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, 33° S in protecting the regional vascular plant flora (Metropolitan and fifth regions of Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 75, 767-792. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2002000400012>
- Barceló, J. (1984). *Geología del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, Región Metropolitana, Chile*. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile.
- Cuba-Díaz, M., Marín, C., Castel, K., Machuca, Á., y Rifo, S. (2017). Effect of copper (II) ions on morpho-physiological and biochemical variables in *Colobanthus quitensis*. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(2), 429-440. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000031>
- Durán, L., Venegas-González, A., Pérez-Martínez, W., Vidal-Páez, P., Aravena, C., Morales, N., Briceño-de-Urbaneja, I., y Tamayo, A. (2021). Cambio climático, recursos vegetacionales y ganadería: proyecto piloto de restauración pasiva en el Santuario de la Naturaleza Los Nogales, Región Metropolitana de Santiago, Chile. En R. Ascanio, F. Orrego, R. Ginocchio, y L. M. de la Fuente (Eds.), *Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho* (pp. 228-247). Alerce Talleres Gráficos. Santiago, Chile.
- Environmental Protection Agency (EPA). (1999). *National recommended water quality criteria – corrected*. EPA Publication 822-Z- 99-001. Office of Water, National Technical Information Service. USA.
- Escobar, M., Correa, D., Girón, G., Faúndez, L., y Saldívia, P. (2021). Flora y vegetación de la porción alta de la cuenca del estero Ortiga, S.N. Los Nogales, Región Metropolitana. En R. Ascanio, F. Orrego, R. Ginocchio, y L. M. de la Fuente (Eds.), *Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho* (pp. 114-141). Alerce Talleres Gráficos. Santiago, Chile.
- Fuentes-Lillo, E., y Pauchard, A. (2019). Invasiones en montañas: ¿Cuánto hemos avanzado en los últimos 10 años y cuáles son los desafíos para los ecosistemas de los Andes? *Gayana Botánica*, 76(2), 141-155. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432019000200141>
- Fuentes-Ramírez, A., Pauchard, A., y Hauenstein, E. (2011). Composición de la flora de praderas andinas en la Reserva Nacional Alto Bío-Bío (Lonquimay-Chile) y su relación con el régimen de pastoreo. *Gayana Botánica*, 68(1), 28-39. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432011000100004>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., y Veloso - Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010-2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Ginocchio, R., Toro, I., Schnepf, D., y Macnair, M. R. (2002). Copper tolerance in populations of *Mimulus luteus* var. *variegatus* exposed and non-exposed to copper pollution. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, 2, 151-anglo156. <https://doi.org/10.1144/1467-787302-018>
- Ginocchio, R., y Baker, A. M. J. (2004). Metallophytes in Latin America: a remarkable biological genetic resource scarcely known and studied in the region. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77, 185-194. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2004000100014>
- Ginocchio, R., Hepp, J., Bustamante, E., Silva, Y., de la Fuente, L. M., Casale, J. F., de la Harpe, J. P., Urrestarazu, P., Anic, V., y Montenegro, G. (2008). Importance of water quality on plant abundance and diversity in high-alpine meadows of the Yerba Loca Natural Sanctuary at the Andes of north-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81(4), 469-488. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2008000400003>
- Harguinteguy, C. A., Cirelli, A. F., y Pignata, M. L. (2014). Heavy metal accumulation in leaves of aquatic plant *Stuckenia filiformis* and its relationship with sediment and water in the Suquia river (Argentina). *Microchemical Journal*, 114, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.12.010>

- Harrison, B. J. (1998). *Copper information sourcebook*. International Copper Association Ltd. New York, USA.
- Hauenstein, E., Ramírez, C., Latsague, M., y Contreras, D. (1988). Origen fitogeográfico y espectro biológico como medida del grado de intervención antrópica en comunidades vegetales. *Medio Ambiente*, 9(1), 140-142.
- Hepp, J. (2006). *Vegas altoandinas del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca: biodiversidad y factores microambientales* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Kent, M., y Coker, P. (1994). *Vegetation description and analysis. A practical approach*. John Wiley and Sons. Chichester, Inglaterra.
- Luebert, F., y Gajardo, R. (2004). Antecedentes sobre la vegetación de la cordillera de los Patos, Andes de Chile central (Región de Valparaíso, V). *Chloris chilensis*, 7(2).
- Luebert, F., y Pliscoff, P. (2017). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
- Monge, L. (1948). *Minas San Rafael, Elena y Silvia, Cajón de Yerba Loca, Santiago, Chile*. Santiago, Chile.
- Montserrat, S., Quezada, S., Dionizis, D., Ojeda, P., y Lagos- Zuñiga, M. (2021). Hidrología y química de aguas en la cuenca alta del río Mapocho. En R. Ascanio, F. Orrego, R. Ginocchio, y L. M. de la Fuente (Eds.), *Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho* (pp. 26-45). Alerce Talleres Gráficos. Santiago, Chile.
- Raunkiaer, C. (1937). *Plant life forms*. Oxford University Press. London, United Kingdom.
- Reimann, C., y Garrett, R. G. (2005). Geochemical background-concept and reality. *Science of the total environment*, 350(1-3), 12-27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.047>
- Riedemann, P., Aldunate, G., y Teillier, S. (2008). *Flora nativa de valor ornamental, Chile, zona cordillera de los Andes*. Salesianos Impresores S. A. Chile.
- Rodríguez, R., Marticorena, C., Alarcón, D., Baeza, C., Cavieres, L., Finot, V. L., Fuentes, N., Kiessling, A., Milhoc, M., Pauchard, A., Ruiz, E., Sanchez, P., y Marticorena, A. (2018). Catálogo de las plantas vasculares de Chile. *Gayana Botánica*, 75(1), 1-430. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432018000100001>
- Ruthsatz, B. (1995). Vegetation und Ökologie tropischer Hochgebirgsmoore in den Anden Nord-Chiles. *Phytocoenologia*, 25(2), 185-234. <http://dx.doi.org/10.1127/phyto/25/1995/185>
- Serrano, L., Vargas, R., Stambuk, V., Aguilar, C., Blondel, J., Galeb, M., Holmgren, C., Contreras, A., Godoy, S., Vela, I., Skewes, M. A., y Stern, C. H. R. (1994). The late Miocene Río Blanco – Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes. En F. Camus, R. H. Sillitoe, y R. Petersen (Eds.), *Andean copper deposits: new discoveries, mineralizations, styles and metallogeny* (pp. 119-130). Society of Economic Geologists, Special Publication N° 5. Littleton, Colorado, USA.
- Sierra-Almeida, A., Reyes-Bahamonde, C., y Cavieres, L. A. (2016). Drought increases the freezing resistance of high-elevation plants of the Central Chilean Andes. *Oecologia*, 181(4), 1011-1023. <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3622-5>
- Squeo, F. A., Osorio, R., y Arancio, G. (1994). *Flora de los Andes de Coquimbo: cordillera de Doña Ana*. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Squeo, F. A., Ibacache, E., Warner, B. G., Espinoza, D., Aravena, R., y Gutiérrez, J. R. (2006). Productividad y diversidad florística de la vega Tambo, Cordillera de Doña Ana. En P. J. Cepeda (Ed.), *Geología de los Andes desérticos. La alta montaña del Valle del Elqui* (pp. 325-351). Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Teillier, S. 2005. Contribución al conocimiento de la flora y la vegetación de las vegas de la cuenca del río de Las Taguas, departamento Iglesias, San Juan, Argentina. *Chloris chilensis*, 8(2).
- Teillier, S., Marticorena, A., y Niemeyer, H. (2011). *Flora andina de Santiago, guía para la identificación de las especies de las cuencas del Maipo y del Mapocho*. Puntografix. Chile.

Teillier, S., Aldunate, G., Riedemann, P., y Niemeyer, H. (2005). *Flora de la Reserva Nacional Río Clarillo*. Impresos Socías Ltda. Chile.

Valenzuela-Díaz, M. J., Navarrete-Calvo, A., Caraballo, M. A., McPhee, J., García, A., Correa-Burrows, J. P., & Navarro-Valdivia, L. (2020). Hydrogeochemical and environmental water quality standards in the overlap between high mountainous natural protected areas and copper mining activities (Mapocho river upper basin, Santiago, Chile). *Journal of Hydrology*, 588, 125063. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125063>

Verplanck, P. L., Nordstrom, D. K., Bove, D. J., Plumlee, G. S., y Runkel, R. L. (2009). Naturally acidic surface and ground waters draining porphyry-related mineralized areas of the Southern Rocky Mountains Colorado and New Mexico. *Applied Geochemistry*, 24(2), 255-267. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.11.014>

Villavicencio, G., Urrestarazu, P., Carvajal, C., De Schamphelaere, K. A. C., Janssen, C. R., Torres, J. C., y Rodríguez, P. H. (2005). Biotic ligand model prediction of copper toxicity to *Daphnids* in a range of natural waters in Chile. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 24, 1287-1299. <https://doi.org/10.1897/04-095r.1>





Capítulo 5

Influencia de las características químicas del suelo en la distribución altitudinal de la vegetación del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL)

Rosanna Ginocchio ^{1,2,*}, Vinka Anic ³, Jean François Casale ⁴, Luz María de la Fuente ¹

1. Center of Applied Ecology and Sustainability, Pontificia Universidad Católica de Chile. Avenida Libertador Bernardo O'Higgins 340, Santiago, Chile.

2. Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.

3. Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Barrio Universitario, Concepción, Chile.

4. Consultor Independiente, Konrad Zuse 1472, La Serena, Chile.

*rginocch@uc.cl

RESUMEN

Tradicionalmente se ha considerado que la variación altitudinal en el tipo de vegetación presente en ecosistemas de montaña se explica principalmente por el cambio que ocurre en las condiciones climáticas. Posteriormente, se ha encontrado que esta variación también responde a otros cambios ambientales que ocurren con la altitud como la topografía y el tipo de suelo. Sin embargo, son escasos los estudios en los que se haya evaluado la importancia de la variación en las características químicas del suelo (p. ej. contenido de nutrientes, acidez/alcalinidad, contenido de metales) para explicar los cambios vegetacionales altitudinales, particularmente en los sistemas de montaña chilenos (**altoandinos**). Este aspecto tendría particular relevancia en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL), donde son frecuentes grandes extensiones de **depósitos de pórfidos de cobre** en las zonas altas de la cordillera. Estos depósitos determinan contenidos

más altos de metales en los suelos (p. ej. cobre, cinc), los que pueden ser tóxicos para la mayoría de las plantas, excepto para las **plantas metalófitas**. En este estudio se evaluó la influencia de las características químicas del suelo en la distribución y abundancia de las plantas altoandinas del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL), con énfasis en los contenidos de metales. Se realizó un **muestreo geobotánico** en 73 sitios distribuidos entre los 2.000 y los 3.330 m.s.n.m. Los resultados indicaron que las principales características químicas del suelo que explican la variación en la composición de la vegetación altoandina son los contenidos de cobre total, de materia orgánica y de fósforo y nitrógeno disponibles, independientemente de la variación en altitud. Las especies altoandinas *Armeria maritima*, *Caioophora coronata* y *Montiopsis potentilloides* están asociadas a suelos con alto contenido de cobre total y podrían ser metalófitas para este metal.

1. INTRODUCCIÓN

Las variaciones climáticas que se producen a lo largo del gradiente altitudinal de montaña (o altoandinos) determinan cambios espaciales en la diversidad, cobertura, **formas de vida** (Chauvier et al., 2021) y productividad de las plantas (Körner, 2003). Por ejemplo, las partes altas del gradiente altitudinal se caracterizan por estaciones cortas para el crecimiento de la vegetación, debido a la extensa cobertura de nieve y a las bajas temperaturas del aire y del suelo existentes durante la mayor parte del año.



Las variaciones climáticas que se producen a lo largo del gradiente altitudinal de montaña (o altoandinos) determinan cambios espaciales en la diversidad, cobertura, formas de vida (Chauvier et al., 2021) y productividad de las plantas (Körner, 2003).

Estas características climáticas han determinado el desarrollo de adaptaciones morfológicas y fisiológicas particulares en las plantas de alta montaña (alpinas o altoandinas), tales como una baja estatura (por ej. plantas achaparradas o en cojín), la presencia de grandes raíces o rizomas subterráneos que almacenan carbohidratos en el caso de las plantas perennes, la sobrevivencia por medio de dormancia de semillas en el suelo en el caso de las plantas anuales y una gran resistencia de los tejidos vegetales a las temperaturas de congelamiento (Körner, 2003). Sin embargo, otros factores ambientales también influyen en la distribución espacial de las plantas en los ecosistemas de montaña, tales como la variación en la granulometría, la disponibilidad de nutrientes y el contenido de materia orgánica del suelo, la intensidad de la radiación ultravioleta y del viento, la topografía y la orientación de las laderas a la radiación solar y la estabilidad del sustrato, entre otros (Körner, 2003; Scherrer y Guisan, 2019). En los sistemas de montaña del hemisferio norte también existe evidencia de la influencia de la variabilidad química del suelo sobre los patrones espaciales de distribución de la vegetación alpina, ya que las especies vegetales poseen diferentes requerimientos de nutrientes y habilidades competitivas respecto a éstos (Leuschner y Ellenberg, 2017; Buri et al.,

2020). Por ejemplo, la acidez del suelo (suelos calcáreos versus silíceos) (Schmidtley y Ewald, 2003; Darmody et al., 2004) y la variación en los contenidos de hierro, de sulfato (Wiser et al., 1996), de nitrógeno (Körner, 2003) y de fósforo (Arnesen et al., 2007) en el suelo se han descrito como factores edáficos importantes en explicar las relaciones planta-suelo en los ecosistemas de alta montaña de Europa, América del Norte y del Ártico.

En general, son escasos los estudios sobre la influencia de los factores químicos del suelo en la distribución y composición espacial de la flora altoandina en Sudamérica, en comparación con los diversos estudios disponibles para la flora alpina del hemisferio norte (p. ej. Chauvier et al., 2021). Por ejemplo, en Chile se ha documentado que el patrón de variación espacial de la vegetación en la tundra magallánica de la cordillera de Pichué, Chiloé, sería consecuencia de la diferencia en nutrientes y metales presentes en los suelos (Ruthsatz, 1993), mientras que la variación altitudinal de la vegetación en el área desértica de los Andes sería modificada por la existencia de una alta variabilidad espacial en factores edáficos y microclimáticos (Squeo et al., 1993; 1996). Sin embargo, estos estudios no especifican qué factor(es) químico(s) del suelo serían los principales condicionantes de los cambios vegetacionales observados.

Una zona geográfica interesante para estudiar la influencia de las propiedades químicas del suelo sobre la variación espacial en la composición y diversidad de las plantas altoandinas en Chile es el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL). El SNYL es un ecosistema altoandino con una diversidad muy alta de especies vegetales nativas y endémicas (Arroyo et al., 2002) y que posee una compleja variación mineralógica de sustratos, ya que el material parental del suelo está constituido por rocas de distintos tipos (por ej. ígneas, sedimentarias y meta-sedimentarias) y por la existencia de la **franja metalogénica** Río Blanco-Los Bronces-Yerba Loca, ubicada entre los 2.000 y los 4.100 m s.n.m. (Moreno y Gibbons, 2007). Esta franja metalogénica constituye el sistema de **pórfidos de cobre** más grande del mundo (Camus, 2003). La coexistencia de estos depósitos de minerales con la vegetación altoandina del SNYL desde el **Mioceno-Plioceno** superior (Hinojosa, 1996; Hinojosa y Villagrán, 1997), o sea entre veintitrés y uno coma ocho millones de años atrás, sugiere que la evolución florística de la vegetación altoandina habría estado influenciada por los altos contenidos de metales del suelo, principalmente de cobre, molibdeno, hierro y azufre (Camus, 2003). Sin embargo, no existen estudios al respecto.

Los suelos con altos contenidos de metales pueden resultar tóxicos para las plantas (Reeves y Baker, 2000) y constituyen agentes de selección de especies vegetales que poseen mecanismos de tolerancia a altos contenidos de metales en el suelo (Corzo Remigio et al., 2020), las que se denominan plantas metalófitas (Baker et al., 2010). Cuando se produce un estrés permanente por exceso de un metal en el suelo, como cobre, sobre una formación vegetal en particular, como lo ocurrido en el Mioceno-Plioceno Superior en los Andes de Chile central, se desencadena un proceso microevolutivo a través del cual se seleccionan ya sea aquellos individuos de una especie (ecotipos o metalófitas facultativas) o todos los individuos de una especie (metalófitas obligadas), los que poseen características genéticas específicas que les permiten completar sus ciclos de vida en esas nuevas condiciones ambientales (Baker et al., 2000; Baker et al., 2010). En ambos casos (metalófitas obligadas y facultativas), los mecanismos de tolerancia a concentraciones elevadas de metales están determinados genéticamente y dependen de mecanismos eficientes de secuestro del metal en sus tejidos, ya que las plantas tolerantes acumulan concentraciones más altas de metales en sus **vástagos**

y/o en sus raíces, en relación al común de las especies vegetales (Corzo Remigio et al., 2020).

Existen evidencias de evolución de tolerancia a concentraciones elevadas de cobre en especies vegetales desarrolladas sobre mineralizaciones cupríferas en diversas partes del mundo. Por ejemplo, algunas metalófitas del género *Becium* sólo crecen en mineralizaciones cupríferas específicas del Arco de Cobre en Zaire, África (tolerancia constitutiva; Baker et al., 1994; Brooks, 1998); poblaciones de especies comunes han desarrollado variantes tolerantes a cobre al establecerse sobre suelos metalizados (ecotipos), tal como *Mimulus guttatus* DC. en el distrito minero de cobre de Copperopolis en California, Estados Unidos (Macnair et al., 1993) y como *Erythranthe lutea* (L.) G.L. Nesom var. *variegata* (Lodd.) (ex *Mimulus luteus* var. *variegatus*) en la zona minera de Sewell en la cuenca alta del río Cachapoal, Región del Libertador Bernardo O'Higgins de Chile (Ginocchio et al., 2002). Sin embargo, la mayoría de las metalófitas descritas hasta ahora están restringidas a pocas regiones geográficas de mineralizaciones superficiales en el mundo (Baker et al., 2010).

De esta forma, si una importante y única diversidad florística altoandina ha coexistido y evolucionado en nuestros ambientes ricos en minerales de los Andes centrales desde el Mioceno-Plioceno superior, incluida la cordillera de Santiago y el SNYL, es razonable pensar que las plantas metalófitas son frecuentes en Chile, particularmente en las zonas cordilleranas altas, donde son frecuentes las anomalías de minerales. Esta idea ya fue mencionada por el naturalista Juan Ignacio Molina en su libro "*Compendio de la historia geográfica, natural y civil del Reyno de Chile*" publicado en 1788 (reimpresión Molina, 2000). Molina (2000) indica que todas las tierras altas del norte y centro de Chile están cubiertas con hermosas y únicas plantas debido a lo fértil del suelo por la presencia de piritas ricas en diversos minerales, las que no sólo se encuentran en capas profundas del suelo sino también formando vetas a nivel superficial, y al calor interno generado por la descomposición de los metales. Sus pensamientos surgieron del hecho que los suelos altoandinos chilenos estaban cubiertos profusamente con minerales y abundante vegetación, la que no mostraba síntomas de toxicidad, incluso cuando se establecía sobre yacimientos de minerales y mineralizaciones superficiales. Sin embargo, la importancia de los gradientes de contenidos de



Si una importante y única diversidad florística altoandina ha coexistido y evolucionado en nuestros ambientes ricos en minerales de los Andes centrales desde el Mioceno-Plioceno superior, incluida la cordillera de Santiago y el SNYL, es razonable pensar que las plantas metalófitas son frecuentes en Chile, particularmente en las zonas cordilleranas altas, donde son frecuentes las anomalías de minerales.

minerales en los suelos en la distribución altitudinal de las especies altoandinas ha sido escasamente estudiada. En el presente capítulo se describen los principales resultados de un estudio científico realizado entre el 2005 y el 2008 en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, parte del cual fue publicado en Anic et al. (2010). Los objetivos del estudio fueron determinar si las características químicas del suelo del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca afectan la distribución y abundancia de las plantas altoandinas presentes en el sector, con énfasis en el contenido de cobre, e identificar plantas metalófitas a cobre. Este capítulo corresponde a la adaptación de ese artículo científico para el conocimiento del público general, además de entregar resultados previamente no publicados. Adicionalmente, se han actualizado las citas, las imágenes y la discusión en base al nuevo conocimiento que se ha recopilado 10 años después.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Muestreo de la vegetación y del suelo

Se realizó un **muestreo geobotánico** a lo largo de un gradiente altitudinal (1.970 a 3.323 m s.n.m.) en la cuenca del estero Yerba Loca durante las estaciones de primavera-verano de los años 2005-2006 y 2006-2007. Se demarcó una grilla georreferenciada de 800 x 800 m por toda la superficie del PYL sobre la cota de los 2.000 m s.n.m., utilizando fotografías aéreas, imágenes satelitales y cartas digitales; los puntos de intersección de la grilla fueron definidos como los sitios de muestreo equidistantes. La grilla fue modificada según la accesibilidad real a los puntos de intersección, dependiendo de la presencia de accidentes topográficos (p. ej. quebradas), quedando un total de 73 sitios de muestreo (Figura 1). En cada sitio de muestreo se estableció una parcela de 25 m² para el muestreo de la vegetación y del suelo superficial.

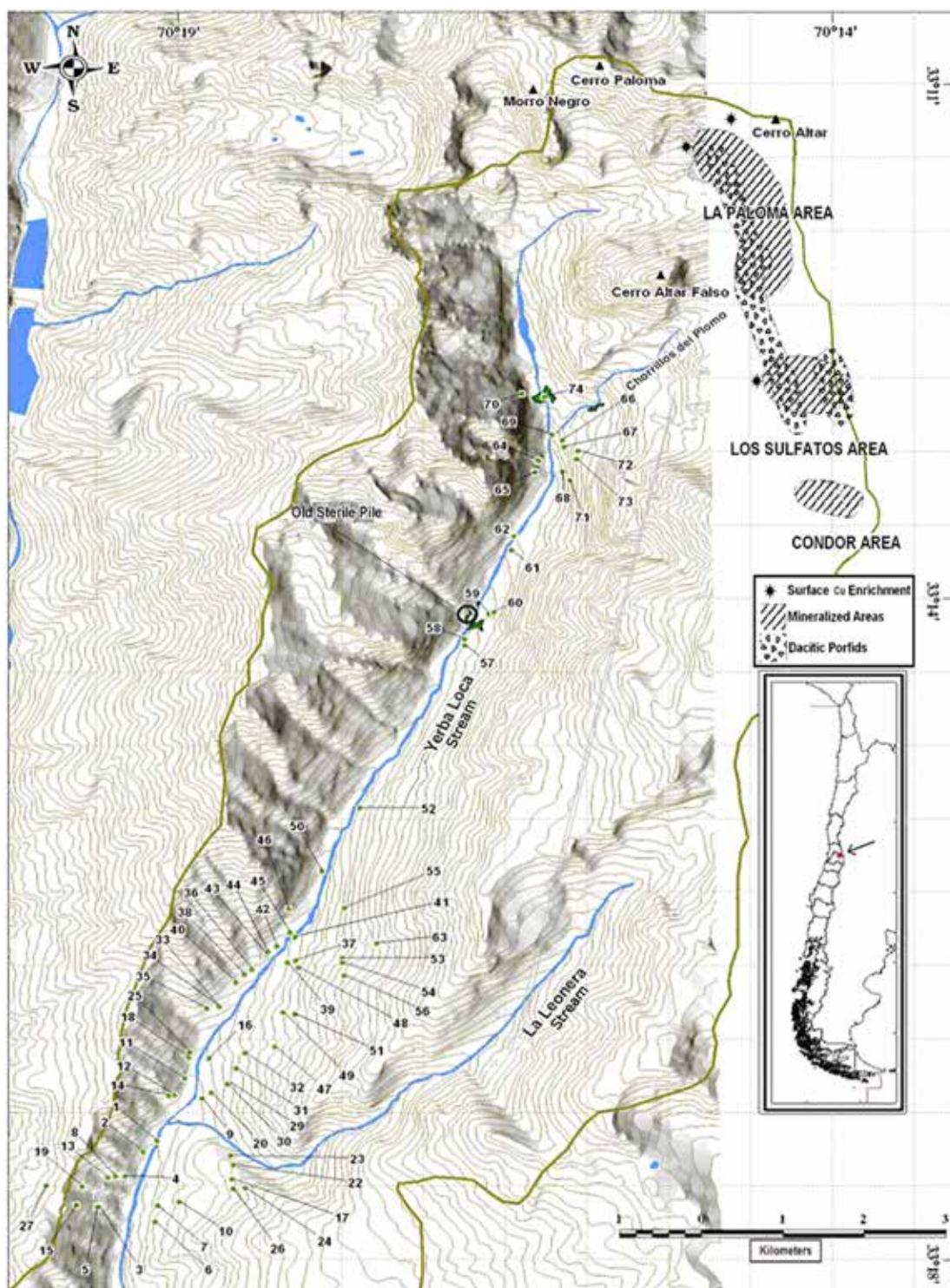


Figura 1. Mapa que indica la ubicación geográfica de los 73 sitios de muestreo de vegetación y suelos (círculos verdes) definidos para el estudio dentro del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. También se muestra la ubicación de los depósitos minerales de pórfidos de cobre en las zonas altas del santuario (Modificado de: Anic et al., 2010).

Cada parcela de 25 m² se subdividió en 100 cuadrantes de 0,25 m² cada uno, para determinar la riqueza de especies vegetales (biodiversidad) y el porcentaje de cobertura de cada especie vegetal identificada, usando la metodología de Braun-Blanquet (Kent y Coker, 1992). Adicionalmente, se tomaron 3 sub-muestras de suelo superficial (0-20 cm de profundidad), de volúmenes iguales, dentro de una diagonal imaginaria trazada dentro de la parcela, usando volúmenes estándares de muestreo. Las 3 sub-muestras se mezclaron homogéneamente dentro de una bolsa de plástico limpia, con cierre hermético, para generar una muestra compuesta de suelo, representativa de la parcela. Todas las muestras de suelo colectadas fueron transportadas a un laboratorio de análisis para ser caracterizadas químicamente, como se describe más abajo.

2.2. Caracterización química de los suelos

Una vez en el laboratorio, las muestras compuestas de suelo fueron secadas en una estufa de aire forzado a 30 °C, tamizadas con un tamiz a 2 mm y almacenadas en contenedores de plástico, según el protocolo estandarizado de la U.S. EPA (1995). Se registró el peso de la fracción de suelo > 2 mm (retenida por el tamiz) y se determinó la fracción < 2 µm por granulometría a través del método de Bouyoucos (USDA, 2004). En la fracción de suelo < 2 mm se determinaron el pH, los macronutrientes disponibles (nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K)), el contenido de materia orgánica (MO), las concentraciones totales de cobre (Cu), cinc (Zn) y hierro (Fe) y la textura del suelo, usando protocolos estandarizados (U.S. EPA, 1995; USDA, 1996; USDA, 2004; Sadzawka et al. 2006).

2.3. Muestreo de vástagos y determinación del contenido de cobre

En base a los resultados del muestreo geobotánico inicial, se realizó un muestreo de vástagos de plantas del área de estudio durante febrero y marzo del 2008. Para ello, se seleccionaron seis sitios cuyos suelos superficiales presentaron concentraciones elevadas de cobre (> 370 mg/kg). A ellos se les sumó un sitio de muestreo en el que se observó una mayor cobertura de una de las especies con distribución óptima en suelos con alto contenido de cobre. Para este sitio se obtuvo una muestra compuesta de suelo superficial la que fue caracterizada para concentraciones de Cu, Zn y Fe totales, usando la misma metodología

descrita anteriormente. En cada sitio de muestreo de vástagos se estableció una parcela de 25 m², donde fueron recolectados los vástagos de entre dos y seis individuos de las especies vegetales presentes. Los vástagos recolectados por cada especie vegetal y sitio de muestreo fueron colocados en bolsas de plástico con cierre hermético, para ser luego procesados en el laboratorio como muestras compuestas. Una vez en el laboratorio, las inflorescencias o flores, frutos y/o semillas fueron removidas de las muestras. Los vástagos fueron lavados con agua desionizada y secados en estufa de aire forzado a 44 °C durante 72 horas, para remover las partículas de suelo adheridas a los tejidos vegetales. Luego fueron procesadas, usando protocolos estandarizados de laboratorio (U.S. EPA, 1995), para determinar las concentraciones totales de cobre presentes en los vástagos.

2.4. Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de correlación de Spearman para evaluar las relaciones entre las características químicas del suelo y la altitud y los contenidos de macronutrientes disponibles (N y P) y el contenido de MO, dado que estas características no mostraron distribución normal de acuerdo a las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk (Zar, 1984). Adicionalmente, se realizó la prueba no-paramétrica de Kruskal-Wallis para evaluar diferencias significativas entre las concentraciones promedios de Cu total entre tres rangos altitudinales (1.970-2.260, 2.310-2.740 y 2.800-3.320 m s.n.m.), seguida de comparaciones múltiples no-paramétricas entre grupos con la prueba de Duncan (Zar, 1984).

Se realizó un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) para determinar si las características químicas del suelo analizadas daban cuenta de la variación en la composición de la vegetación altoandina presente en el SNYL. Para obtener un modelo de ordenación que incluyera sólo aquellas características químicas del suelo que contribuyen significativamente a la composición de las especies se realizó una prueba de permutación parcial de Monte Carlo con 1.000 permutaciones (Ter Braak y Smilauer, 2002), con el fin de evaluar la significancia estadística de las características ambientales consideradas.

En adición al ACC, la similitud florística entre los sitios de muestreo fue analizada a través del índice de similitud de Jaccard (Kent y Coker, 1992) y mediante una técnica

El ACC es una técnica de análisis de gradiente directo donde la composición de especies es directa e inmediatamente relacionada con las variables ambientales medidas (Ter Braak, 1986; Palmer, 1993; Leps y Smilauer, 2003). A través del uso de este método de ordenación se obtienen diagramas de ordenación que expresan no sólo patrones de variación de la composición florística sino que también muestran las principales relaciones entre las especies vegetales y las variables ambientales analizadas (Kent y Coker, 1992).

de agrupamiento (algoritmo UPGMA) o agrupamiento por pares mediante ligamiento promedio (Llorente-Bousquets y Morrone, 2001). El índice de similitud de Jaccard permite medir la semejanza entre los sitios de muestreo, en términos de las especies vegetales presentes. Para calcular el índice de Jaccard se construyó una matriz de presencia-ausencia de las especies vegetales en los sitios de muestreo, obteniéndose posteriormente una matriz de similitud. Sobre la base de esta matriz se construyó un dendrograma usando el algoritmo UPGMA. Para determinar las agrupaciones estadísticamente significativas en el dendrograma, la robustez de los nodos fue evaluada por el método de remuestreo o Bootstrap, con 1.000 aleatorizaciones y un nivel de confianza del 95%.

Se usó el programa CANOCO 4.5 para realizar el Análisis de Correspondencia Canónico (ter Braak y Smilauer, 2002) y el programa Statistica 8.0 (StatSoft, 2008) para realizar las pruebas de Kruskal-Wallis y los análisis no-paramétricos de correlación de Spearman.

3. RESULTADOS

3.1. Flora y vegetación

Se identificaron 207 especies de plantas vasculares y una especie briófitas en los 73 sitios de muestreo distribuidos a lo largo del gradiente altitudinal altoandino del SNYL (ver listado en Anexo), pertenecientes a 53 familias y 115 géneros. Las familias más representadas fueron Asteraceae (45 especies), Poaceae (36 especies) e Iridaceae (10 especies). De acuerdo con el análisis de las coberturas relativas de las formas de vida presentes en los sitios de muestreo a lo largo del gradiente altitudinal se determinó que las formas de vida dominantes en los sitios de mayor altitud (3.100 a 3.300 m s.n.m.) fueron las hierbas perennes y las especies en cojín mientras que las especies arbustivas y las hierbas anuales dominaron en los sitios de menor altitud (1.970 a 2.300 m s.n.m.) (Figura 2), tal como se ha descrito para estos pisos altitudinales.

Sobre la base del índice de similitud de Jaccard se distinguieron dos grupos de sitios de muestreo de vegetación. El primero agrupó a la mayoría de los sitios de muestreo (1 a 60) ubicados entre los 1.970 y los 2.830 m s.n.m. y el segundo agrupó a los sitios de mayor altitud (61 a 73), ubicados entre los 2.840 y los 3.320 m s.n.m., ratificando los cambios en la composición florística con la altitud (Figura 3). Entre las especies vegetales presentes exclusivamente a menor altitud (1.970 - 2.830 m s.n.m.) destacan *Acaena sericea*, *Alstroemeria pallida*, *Azorella prolifera*, *Berberis empetrifolia*, *Bromus catharticus*, *Calceolaria thyrsiflora*, *Cynoglossum creticum*, *Ephedra chilensis*, *Haplopappus schumanni*, *Quinchamalium chilense*, *Schizanthus hookerii*, *Stachys philippiana* y *Valeriana stricta*. Algunas de las especies vegetales que sólo fueron encontradas en los sitios de muestreo de mayor altitud (2.840 - 3.320 m s.n.m.) están *Acaena leptacantha*, *Azorella madreporica*, *Bromus unioides*, *Carex macloviana*, *Draba gilliesii*, *Ephedra chilensis*, *Festuca purpurascens*, *Luzula racemosa*, *Olsynium philippii*, *Pozoa coriacea* y *Rytidosperma virescens*.

3.2. Características químicas del suelo en el gradiente altitudinal

Los suelos del área de estudio mostraron una gran variación en los contenidos de macronutrientes disponibles (N, P y K) y de MO (Tabla 1). Por ejemplo, los valores de concentración de N fluctuaron entre 0,5

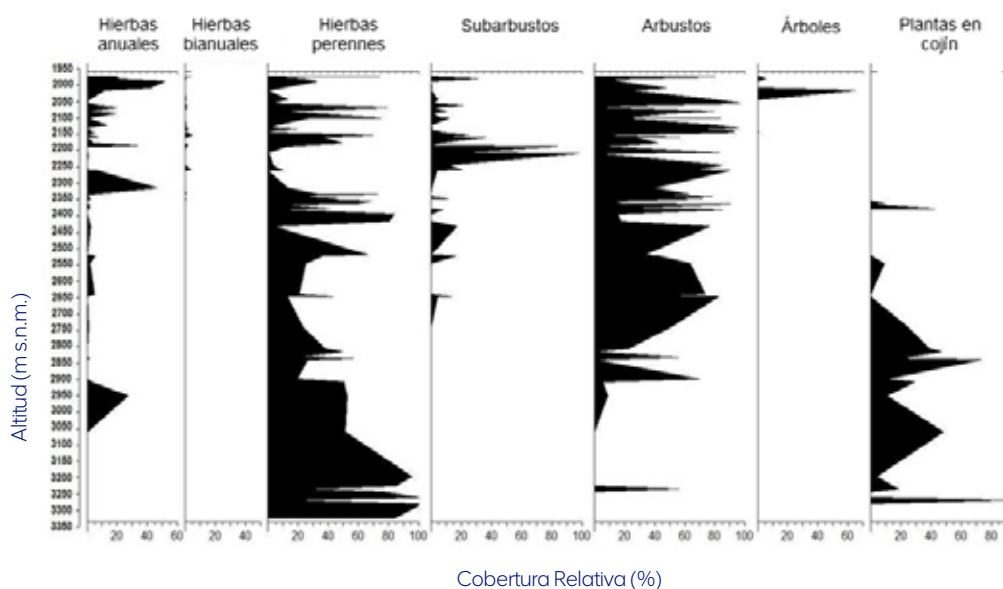


Figura 2. Cobertura relativa (%) de las formas de vida de especies vegetales presentes en el gradiente altitudinal del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (N = 73 sitios de muestreo de vegetación). Modificado de: Anic et al. (2010).

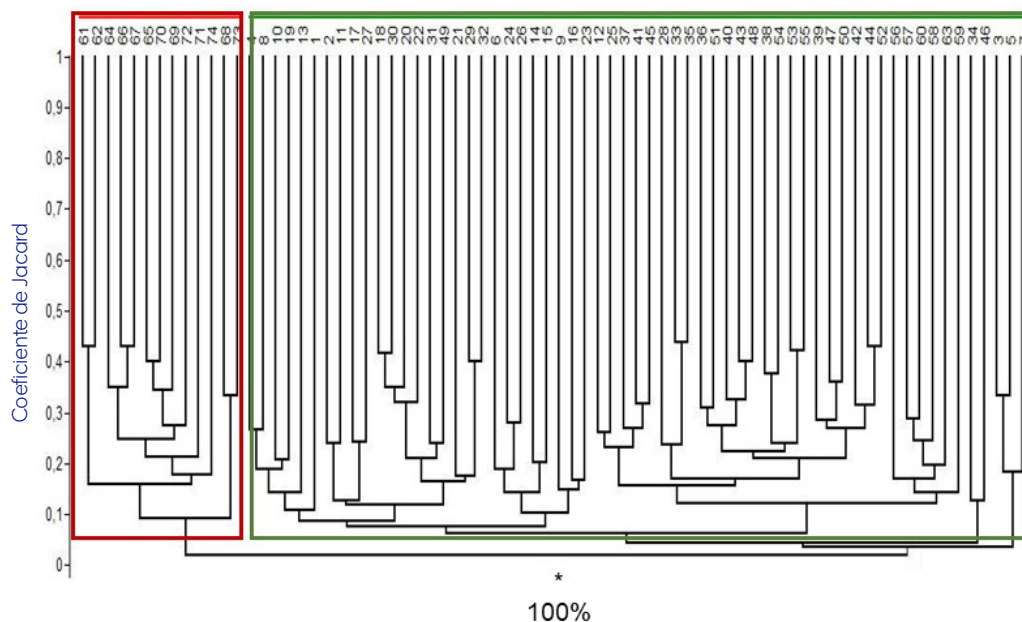


Figura 3. Dendrograma de similitud florística entre los sitios de muestreo de vegetación (N = 73) localizados en el gradiente altitudinal del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. Se observan dos agrupamientos florísticos distintos, uno con las especies de los sitios de menor altitud (1.970 a 2.830 m.s.n.m.), destacado con el recuadro verde, y otro con especies de mayor altitud (2.840 a 3.320 m.s.n.m.), destacado con el recuadro rojo. El asterisco indica el valor bootstrap del nodo.

y 76 mg/kg mientras que los de MO variaron entre 0,5 y 26% (Tabla 1). Los contenidos de MO y los contenidos disponibles de N, P y K en el suelo disminuyeron significativamente con la altitud (Tabla 1 y Figura 4), mientras que los contenidos disponibles de N y P se correlacionaron positiva y significativamente con el contenido de MO del suelo ($r_s = 0,4$; $P < 0,05$, para ambos macronutrientes). Por sobre los 2.800 m s.n.m. la mayoría de los sitios de muestreo presentaron contenidos de N y P disponibles en el suelo más bajos que los sitios de menor altitud (Tabla 1 y Figura 4). Aunque el contenido de MO se correlacionó negativamente con la altitud, la disminución de esta característica en el suelo no fue tan marcada como lo fueron las disminuciones en los contenidos de macronutrientes disponibles del suelo (MO $r_s = -0,35$ versus N y P $r_s = -0,67$ para ambos macronutrientes).

Respecto a la granulometría del suelo, los sitios de menor altitud (1.970 a 2.200 m s.n.m.) presentaron un mayor porcentaje de material particulado fino ($< 2 \mu\text{m}$),

mientras que los sitios de mayor altitud presentaron un mayor porcentaje de material particulado grueso ($> 2 \text{ mm}$) (Tabla 1 y Figura 4). El pH de los suelos varió entre 4,1 (ácido) y 7,5 (levemente alcalino) y no se correlacionó con la altitud (Tabla 1 y Figura 4). En relación con las concentraciones de metales de los suelos, la variabilidad en la concentración total de Cu fue particularmente relevante, fluctuando entre 31 y 1.265 mg/kg, seguida Zn, que tuvo una variación entre 71 y 357 mg/kg (Tabla 1). Las concentraciones totales de ambos metales en los suelos se correlacionaron positiva y significativamente con la altitud, no así el contenido total de Fe del suelo (Tabla 1 y Figura 4). Al analizar con mayor detalle la concentración de Cu total en los suelos, considerando tres rangos altitudinales en el SNYL, se encontró un aumento significativo de este metal con la altitud (Prueba de Kruskal-Wallis, $P < 0,05$) (Figura 5). La menor concentración total promedio de Cu (93,4 mg/kg) se encontró a menor altitud (1.700 a 2.260 m s.n.m.), mientras que la mayor concentración total promedio de Cu (433,2 mg/kg) se encontró en

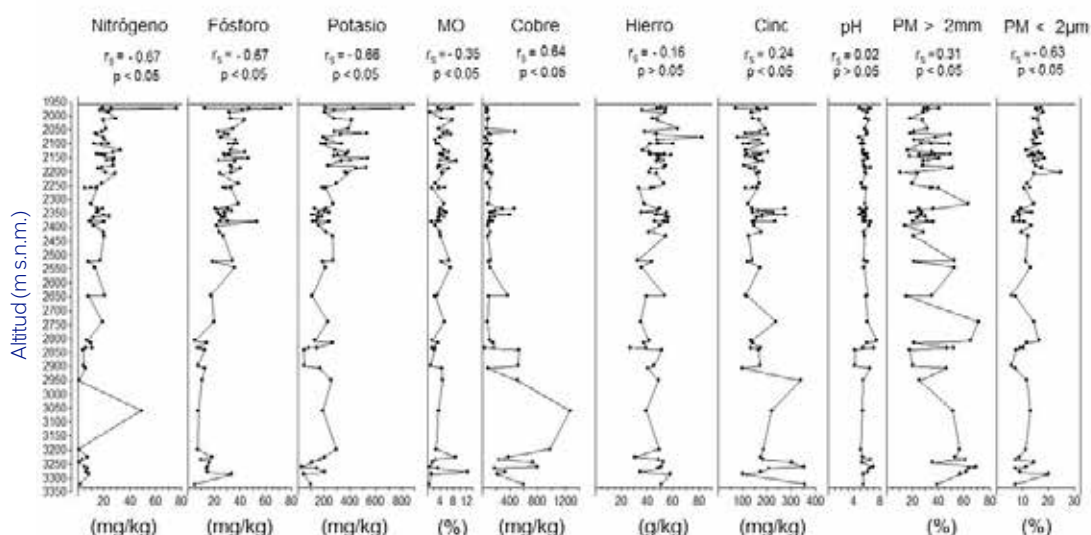


Figura 4. Variación de las características químicas del suelo en el gradiente altitudinal del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (N = 73 sitios de muestreo de suelos). Se entregan los coeficientes de correlación de Spearman (r_s) y el nivel de significancia para cada característica en el gradiente altitudinal. Modificado de: Anic et al. (2010).

Tabla 1. Valores promedio, varianza y valores extremos (mínimo y máximo) de las características químicas del suelo obtenidas en los 73 sitios de muestreo establecidos en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, según dos niveles altitudinales: nivel inferior (1.970 – 2.646 m s.n.m.) y nivel superior (2.740 – 3.323 m s.n.m.).

Característica química del suelo	Nivel altitudinal inferior				Nivel altitudinal superior			
	Promedio	Varianza	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Varianza	Valor mínimo	Valor máximo
Nitrógeno disponible (mg/kg)	19,4	98,1	5,2	76,0	8,2	116,5	0,5	49
Fósforo disponible (mg/kg)	31,7	92,0	12,9	72,0	12,7	44,7	5,0	33,8
Potasio disponible (mg/kg)	279,4	17.089,9	105,5	810,3	150,0	6.567,0	28,0	295,1
Cobre total (mg/kg)	122,2	9.015,6	41,2	470,6	414,3	115.349,3	30,5	1.265,3
Hierro total (mg/kg)	47,7	76,4	30,6	82,6	43,6	70,1	26,8	58,0
Cinc total (mg/kg)	155,9	1.664,9	71,2	276,3	202,9	6.435,7	98,7	356,5
pH	5,7	0,2	4,7	6,5	5,8	0,8	4,1	7,5
Material particulado > 2 mm (%)	31,1	127,1	10,5	63,2	48,1	287,6	18,0	71,0
Material particulado < 2 µm (%)	13,3	14,0	5,7	24,9	10,8	13,7	5,8	20,1
Materia orgánica (%)	4,7	7,0	0,9	19,6	4,7	31,0	0,5	25,9

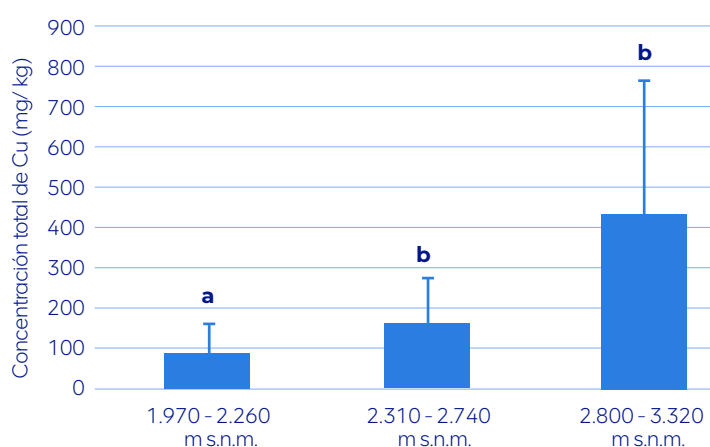


Figura 5. Valores promedio y desviación estándar de las concentraciones totales de cobre(Cu) en tres rangos altitudinales del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre los valores promedio, de acuerdo con la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis y comparaciones múltiples. Modificado de: Anic et al. (2010).

la zona más alta (2.800 a 3.320 m s.n.m.) (Figura 5), concentración que excedió la concentración de Cu total descrita como normal para los suelos del mundo, la que varía entre 2 y 250 mg/kg (Adriano, 2001).

3.3. Características químicas del suelo relacionadas con la variación en la composición de la vegetación altoandina

De las 12 características químicas del suelo analizadas (Figura 4), sólo cuatro fueron seleccionadas por su contribución significativa al modelo de ordenación ACC (prueba de permutación de Monte Carlo, $P < 0,05$). Las características seleccionadas fueron concentración total de Cu, concentraciones de N y P disponibles y contenido de MO (Figura 6). Las características químicas del suelo que no fueron incluidas en el ACC y que no contribuyeron a explicar la variación en la composición de la vegetación altoandina del SNYL corresponden a los contenidos de Zn y Fe totales, los materiales particulados >2 mm y <2 µm, el pH y el contenido de K disponible del suelo.

La Figura 6 muestra el diagrama de ordenación ACC con la distribución de los 73 sitios de muestreo (círculos)

de acuerdo con el promedio ponderado de las especies vegetales presentes en cada uno de los sitios, en relación directa con las características químicas del suelo determinadas para cada sitio (flechas). Un alto porcentaje (60%) de la variación total de la relación especies-ambiente fue explicada por la variación en la concentración de Cu total, la concentración de P disponible y la concentración de N disponible en el suelo (primer eje de ordenación), mientras que la variación en el contenido de MO fue la característica mejor correlacionada con el segundo eje de ordenación canónico (Tabla 2). Este resultado enfatiza que existiría un cambio gradual y progresivo en la composición de especies vegetales altoandinas en el SNYL, tal como se mencionó anteriormente, que no depende sólo del aumento en altitud sino de las variaciones en la concentración de Cu total, la concentración de N y P disponible y el contenido de MO en el suelo. Específicamente, se identificó una discontinuidad en el patrón de variación de la vegetación en algunos de los sitios de mayor altura, tales como el 63, 64, 65, 68 y 69, los que constituirían un conglomerado de sitios con similitud florística distinta y asociada a concentraciones más elevadas de Cu total en el suelo (Figura 6).

Tabla 2. Coeficientes de correlación de los dos primeros ejes del Análisis de Correspondencia Canónico (ACC) para las 4 características químicas del suelo seleccionadas en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. Se entregan los valores de probabilidad (P) y los F-ratio de la prueba de permutación de Monte Carlo (Modificado de: Anic et al., 2010).

Coeficientes de correlación				
Característica química	Eje 1	Eje 2	F-ratio	P
Fósforo disponible	-0,70	0,52	1,83	(0,001)
Cobre total	0,75	0,02	1,51	(0,024)
Nitrógeno disponible	-0,63	0,23	1,52	(0,017)
Materia orgánica	-0,04	0,77	1,40	(0,027)

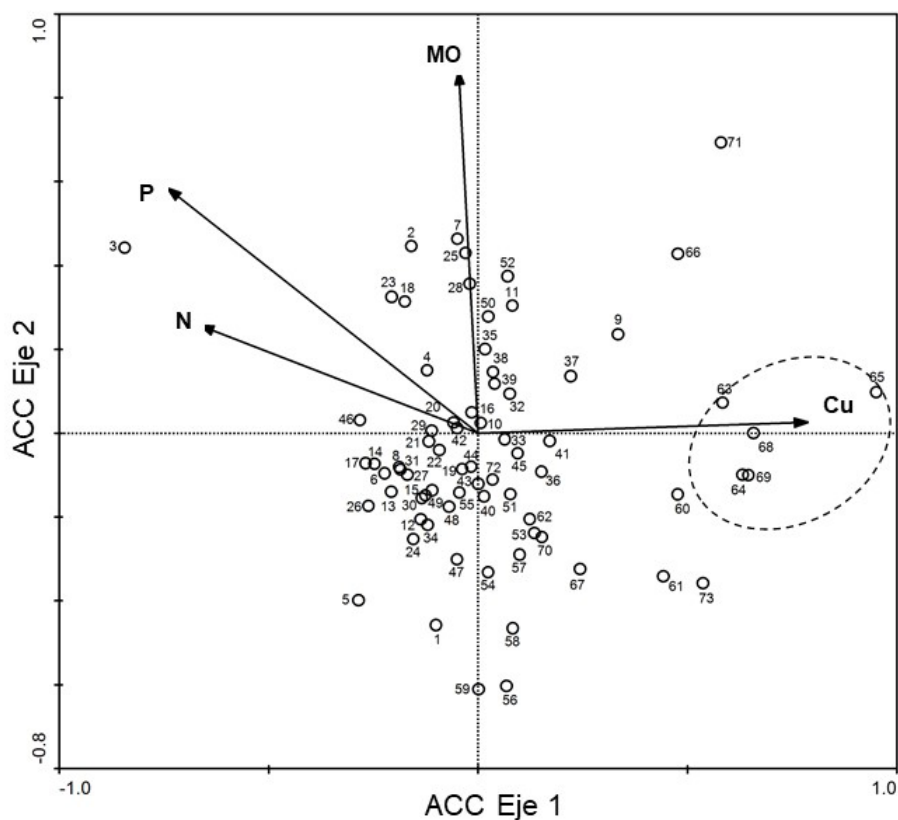


Figura 6. Diagrama de ordenación canónica que ilustra la distribución de los 73 sitios de muestreo de vegetación (círculos) y las características químicas del suelo (flechas) significativas en explicar los cambios en composición de la vegetación en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. Los dos primeros ejes explican el 59,6% de la varianza total en la relación especies-ambiente. Los números de los sitios de muestreo siguen el gradiente altitudinal. El círculo con línea entrecortada destaca una discontinuidad en el patrón de variación de la vegetación en algunos de los sitios de muestreo (63, 64, 65, 68 y 69), los que constituyen un conglomerado con similitud florística y que presentan las concentraciones más elevadas de Cu total en el suelo. Modificado de: Anic et al. (2010).

3.4. Plantas altoandinas distribuidas principalmente en suelos con concentraciones elevadas de cobre total

Al estudiar la relación entre las especies vegetales de los 73 sitios de estudio con las cuatro características químicas del suelo seleccionadas (Figura 7), se encontró que la especie *Armeria maritima* (Mill.) Willd. presentó la mayor cobertura en los sitios con los contenidos de Cu total más altos en el suelo. Luego destacan las especies *Caiophora coronata* (Gillies ex Arn.) Hook. & Arn., *Trisetum lasiolepis* E. Desv. y *Montiopsis potentilloides* (Barnéoud) D.I. Ford (Figura 8). Todas estas especies vegetales, con la excepción de *Trisetum lasiolepis*, sólo fueron encontradas en sitios de muestreo cuyos suelos presentaron contenidos muy elevados (o anómalos) de Cu total en el suelo.

En la Figura 9 se muestra la concentración promedio de Cu en los vástagos de 19 plantas altoandinas que fueron encontradas en suelos con elevadas concentraciones de Cu total. Los tejidos aéreos de estas plantas mostraron concentraciones de Cu que exceden el valor normal de concentración de este metal descrito en tejidos vegetales, el que varía entre 5 y 20 mg/kg (Adriano, 2001). Respecto a las especies vegetales que mostraron los mayores promedios ponderados con respecto al contenido total de Cu en el suelo, *A. maritima*, *T. lasiolepis* y *M. potentilloides*, fueron las con mayores concentraciones promedio de Cu en sus tejidos aéreos, las que excedieron los 100 mg/kg (Figura 9), valor considerado alto (Reeves y Baker, 2000). Sin embargo, *C. coronata* no mostró una concentración de Cu en el tejido aéreo considerada

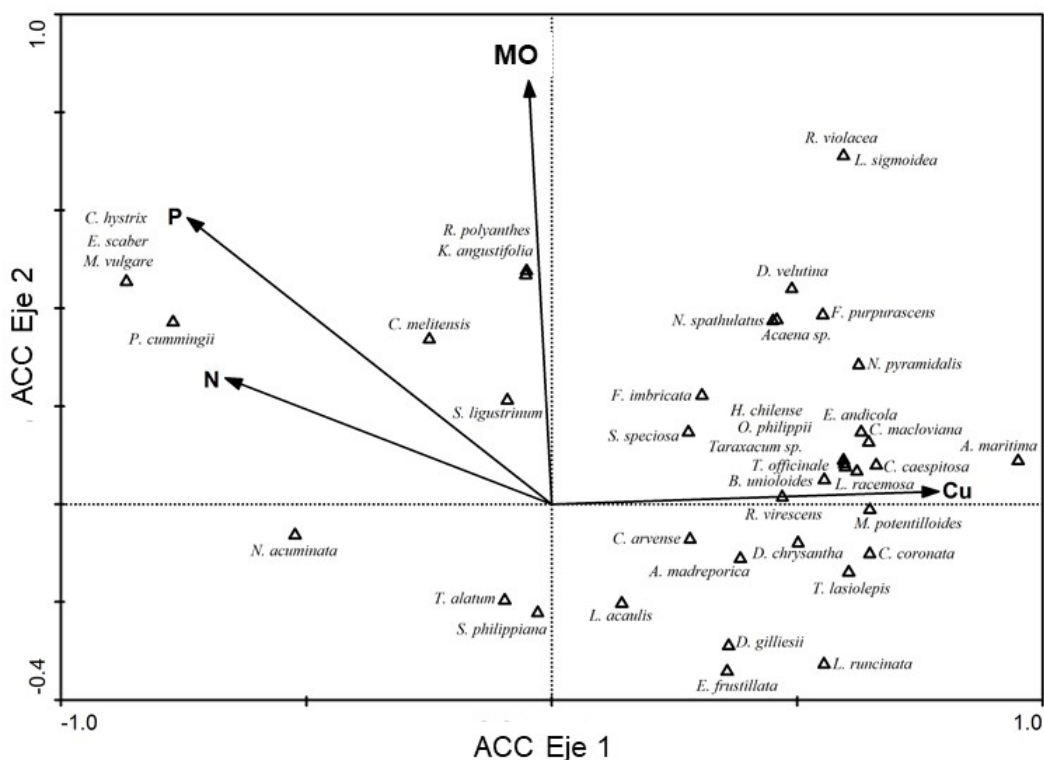


Figura 7. Diagrama de ordenación canónica ilustrando la distribución de 48 plantas vasculares altoandinas (triángulos) y las características químicas del suelo (flechas) significativas en explicar los cambios en composición de la vegetación en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. Sólo se incluyen las especies relacionadas con los dos ejes de ordenación. Nombres de especies que han sido actualizados al 2022 (ver Anexo): *Ephedra chilensis* (= *E. frustillata*), *Azorella ruizii* (ex *Laretia acaulis*), *Solanum crispum* (= *S. ligustrinum*), *Pappostipa speciosa* (ex *Stipa speciosa*), *Nastanthus scapigerus* (= *N. spathulatus*). Modificado de: Anic et al. (2010).

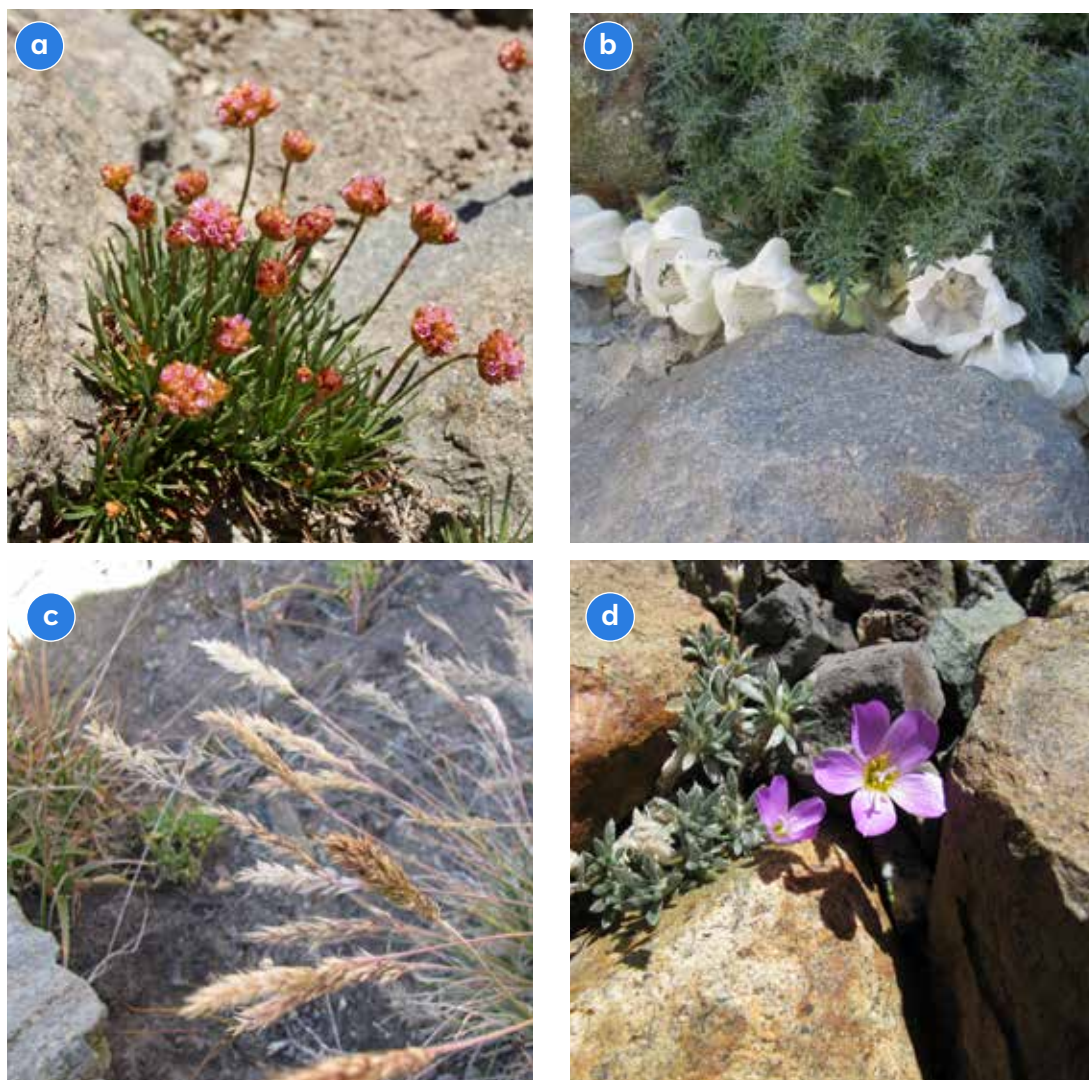


Figura 8. Especies vegetales altoandinas del SNYL asociadas a suelos con elevadas concentraciones de cobre total: *Armeria maritima* (arriba izquierda), *Caiophora coronata* (arriba derecha), *Trisetum lasiolepis* (abajo izquierda) y *Montiopsis potentilloides* (abajo derecha). Fotografías: Vinka Anic y Luz María de la Fuente.

Al estudiar la relación entre las especies vegetales de los 73 sitios de estudio con las cuatro características químicas del suelo seleccionadas (Figura 7), se encontró que la especie *Armeria maritima* (Mill.) Willd. presentó la mayor cobertura en los sitios con los contenidos de cobre (Cu) total más altos en el suelo.

alta, a pesar de haber sido colectada en un sitio con una concentración total de Cu de 1.265 mg/kg. Además de las especies vegetales altoandinas ya mencionadas, se encontraron otras especies vegetales que también mostraron altos contenidos de Cu en sus vástagos, tales como *Calandrinia caespitosa* Gillies ex Arn., *Azorella madreporica* Clos, *Cerastium arvense* L. y *Draba gilliesii* Hook. & Arn. (Figura 9). El contenido de Cu en los vástagos de estas especies evidencia la existencia de altas concentraciones de este metal en los suelos.

4. DISCUSIÓN

El presente estudio demuestra que existen gradientes importantes en las características químicas de los suelos del SNYL, los que influyen en la variación de la composición de la vegetación altoandina en forma independiente de los cambios altitudinales. De importancia particular serían los gradientes de contenidos de N y P disponibles, de contenido de MO y de concentración de Cu total en los suelos, los que explicarían un alto porcentaje de la varianza total en la composición de especies de la vegetación altoandina del SNYL. Es importante destacar que el pH del suelo, uno de los factores más importantes en explicar las relaciones planta-ambiente en los ecosistemas alpinos de Europa, Norteamérica y el ártico (Gough et al., 2000; Schmidtlein y Ewald, 2003; Darmody et al., 2004;

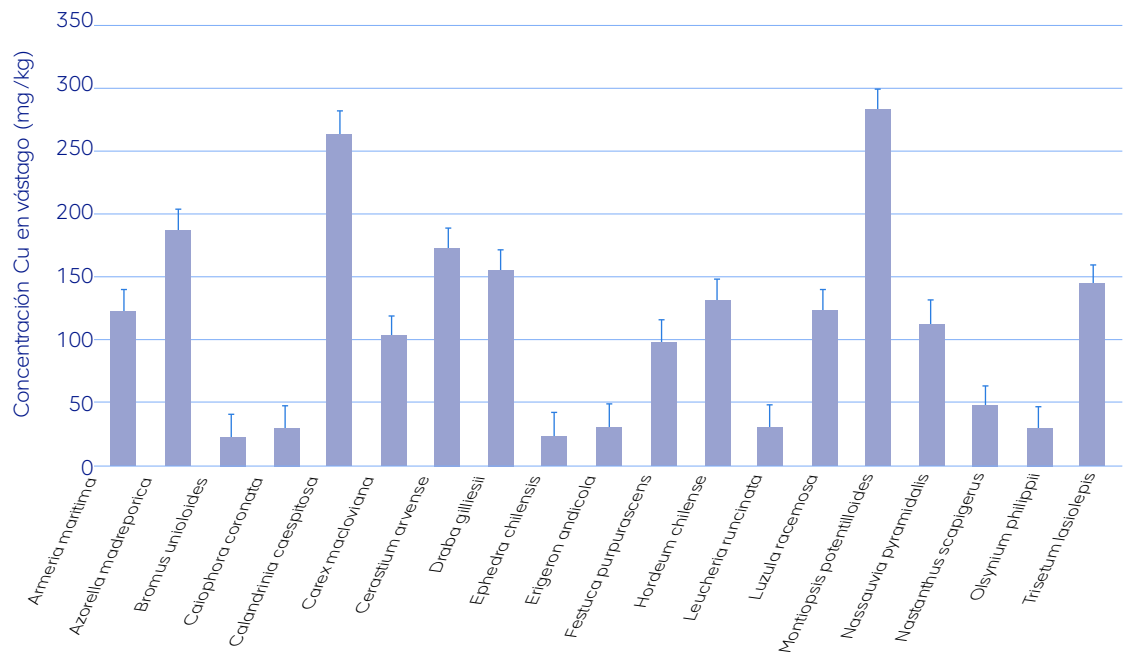


Figura 9. Concentración de cobre en vástagos de 19 especies vegetales altoandinas que crecen en suelos con concentraciones elevadas de cobre total en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. Se muestran los valores promedio y el error típico. Nombres de las especies actualizados al 2022 (ver Anexo). Modificado de: Anic et al. (2010).

Arnesen et al., 2007), parece no ser una característica edáfica relevante en los suelos del SNYL. Sin embargo, la tendencia de que las características del suelo cobran mayor relevancia que las condiciones climáticas en determinar la flora y vegetación de mayor altitud en los ecosistemas de montaña se condice con lo indicado en la literatura (p. ej. Chauvier et al., 2021).

Existe evidencia de que cambios en la disponibilidad de los macronutrientes N y P en los suelos están asociados a cambios en la composición de las comunidades vegetales (Güsewell, 2004; Wijesinghe et al., 2005), dado que los distintos requerimientos de nutrientes por parte de las plantas determinan su distribución (Wenk y Dawson, 2007). Específicamente, se ha demostrado que la variación espacial en la disponibilidad de N y P en los suelos da cuenta de la variación florística en ambientes de alta montaña (Cavieres et al., 2000; Arnesen et al., 2007). Respecto al contenido de N del suelo, Cavieres et al. (2000) señalan que esta variable se relaciona con la delimitación de los pisos altitudinales de vegetación en los Andes de Chile central, lo que confirma la influencia del contenido de N del suelo sobre la distribución espacial de las plantas altoandinas. Por otra parte, el análisis de gradiente directo realizado por Arnesen et al. (2007) sugieren que el P del suelo derivado de la roca madre influye sobre la composición florística y la vegetación en la cordillera alpina de Troms, norte de Noruega. A través de experimentos de fertilización realizados en ecosistemas de alta montaña se han podido establecer los efectos de los contenidos de N y P disponibles en el suelo en la abundancia y diversidad de estas comunidades vegetales (Heer y Körner, 2002).

En general, se ha propuesto que la deficiencia o la baja disponibilidad de P y N que caracteriza a los suelos de altura en los sistemas de montaña pueden ser un factor limitante para la vegetación alpina (Arnesen et al., 2007). La zona altoandina del SNYL no sería una excepción a este fenómeno, considerando que las concentraciones de N y P disponibles en los suelos disminuyen significativamente con la altura (Figura 3). Ambas características químicas del suelo se correlacionan positiva y significativamente con el contenido de MO del suelo, destacando la importancia del mantillo u hojarasca como una fuente importante de estos nutrientes en los sistemas altoandinos. El contenido de MO del suelo no muestra una reducción relevante con la altitud en el SNYL, pero las menores

tasas de descomposición/mineralización de la MO existentes en las condiciones climáticas de altura podrían explicar los menores contenidos de estos nutrientes en las zonas más altas. Además de ser una fuente de macronutrientes, la MO del suelo tiene un rol relevante en la estructura y la capacidad de retención de humedad del suelo (Schaezel y Anderson, 2005). Estos efectos también podrían dar cuenta de la relevancia de esta característica del suelo en determinar la distribución y abundancia de las plantas altoandinas.

La influencia de las concentraciones totales de metales en los suelos en la composición de la flora y vegetación de los sistemas de montaña ha sido mucho menos investigada, particularmente en Chile. Los resultados de este estudio indican que la concentración total de Cu en el suelo es una de las características químicas del suelo de mayor influencia en la variación de la composición de especies altoandinas, al menos en el SNYL. Esta característica está relacionada con una discontinuidad en el patrón de variación de la composición de especies vegetales, el que es casi continuo a lo largo del gradiente altitudinal del SNYL, tal como se ha demostrado en otros gradientes altitudinales de sistemas de montaña (p. ej. Auerbach y Schmida, 1993). Esta discontinuidad en el patrón de la vegetación ocurre en los sitios del SNYL cuyos suelos tienen las concentraciones totales de Cu más altas, las que exceden los 250 mg/kg. Cambios abruptos o discontinuidades en el patrón de distribución de las especies vegetales se han identificado en áreas metalíferas de origen natural, en las cuales la composición florística de los suelos normales contrasta con la composición florística de los sitios con contenidos elevados o anómalos de Cu en el suelo, donde dominan plantas tolerantes a los metales o metalófitas (Baker et al., 2010).

El Cu es un micronutriente esencial para las plantas (Adriano, 2001). Sin embargo, el estrés por exceso de Cu en el suelo constituye un poderoso inhibidor del crecimiento vegetativo y puede causar la muerte de aquellas poblaciones de plantas que no poseen mecanismos de resistencia (Baker, 1987), limitando su distribución hacia suelos metalíferos, tal como los que se encuentran a mayor altitud en el SNYL (Figura 3). Es esperable entonces que las poblaciones de las especies vegetales que tienen óptimos de distribución en los sitios con mayor concentración total de Cu en el suelo, tales como *A. maritima*, podrían haber

desarrollado estrategias o mecanismos de resistencia a la presencia de altos contenidos de Cu en el suelo, tales como la evasión o la tolerancia (Baker, 1987; Orcutt y Nielsen, 2000).

Los altos contenidos de Cu presentes en los vástagos de las especies vegetales que tienen óptimos de distribución en los suelos anómalos en Cu, tales como *Armeria maritima*, *Trisetum lasiolepis* y *Montiopsis potentilloides*, sugieren que tales especies y/o ecotipos podrían poseer tolerancia a Cu, a través de la acumulación de ese metal en sus tejidos (Baker et al., 2000). Cabe destacar que ninguna de estas especies puede ser considerada hiperacumuladora de Cu, dado que las concentraciones de este metal en sus vástagos se encuentran muy por debajo del criterio de hiperacumulación de Cu definido (> 1.000 mg/kg; Reeves y Baker, 2000). Respecto a las especies vegetales que se distribuyen en suelos anómalos en Cu y que presentan bajos contenidos de Cu en sus vástagos, tal como *Caipophora coronata*, estas podrían evitar la translocación de este elemento desde la raíz hacia el vástago y constituir especies o ecotipos tolerantes excluyentes (Baker et al., 2000), o constituir especies evasoras que crecen en micrositos con menores contenidos de Cu (Baker, 1987). Existe evidencia de que *A. maritima* posee tolerancia a altas concentraciones de Zn y plomo (Pb) en los suelos, siendo descrita como una especie metalófila local (Antonovics et al., 1971; Simon, 1978), dado que sólo ha sido encontrada en suelos metalíferos (Baker, 1987). Esta especie ha sido usada como indicadora de la existencia de altos contenidos de Cu en los suelos (Antonovics et al., 1971; Orcutt y Nilsen, 2000). Además, se ha descrito que la subespecie *A. maritima* ssp. *halleri* también es metalófila y se distribuye en sitios cuyos suelos presentan altas concentraciones de Cu y Pb (Reeves y Baker, 2000). De acuerdo a lo anterior y sobre la base de la distribución de las poblaciones de *A. maritima*, esta especie sería la mejor planta indicadora de suelos con altos contenidos de Cu en las zonas altoandinas del SNYL y quizá de la cordillera de Santiago.

La ocurrencia de los efectos del exceso de un metal sobre la vegetación y el desarrollo de tolerancia dependen de que el metal se encuentre biodisponible en los suelos (Eijsackers, 1987), lo que es determinado por ciertas características fisicoquímicas del suelo, tales como el pH y el contenido de MO (Adriano, 2001). Las elevadas concentraciones de Cu total de los suelos

determinadas en algunos sitios de muestreo dentro del SNYL se encontrarían disponibles para las plantas altoandinas que se distribuyen en estos sitios, ya que la mayoría ha incorporado altos contenidos de Cu en sus tejidos aéreos (> 100 mg/kg), los cuales son considerados bastante anómalos y tóxicos para la mayoría de las plantas (Adriano, 2001). Sin embargo, la capacidad de tolerancia a Cu de estas plantas altoandinas debe ser evaluada a través de ensayos estándares de laboratorio dosis-respuesta.

La riqueza de especies vegetales y la variación florística del SNYL son muy altas, con un número total de especies de plantas vasculares descritas de 500 (Arroyo et al., 2002), a pesar de que el área corresponde a un valle glaciar más bien pequeño de la cordillera de Santiago. De hecho, Arroyo et al. (2002) estimaron que el SNYL tiene un 28% más de especies vegetales que lo esperado por la superficie del área, siendo así un sitio extraordinario por su biodiversidad vegetal. La alta heterogeneidad ambiental presente en el santuario, explicada en parte por el gradiente altitudinal, por la variación en las características químicas del suelo (p. ej. concentraciones disponibles de N y P, contenido de MO, concentración total de Cu) identificadas en el presente estudio, y de la variación en factores climáticos, topográficos, de exposición a la radiación solar, de acumulación de nieve, de humedad del suelo y de microclimas, entre otros, que han sido descritos en la literatura (p. ej. Cavieres y Arroyo, 1999; Cavieres et al., 2000; Boyce et al., 2005) explicarían esta alta riqueza de especies vegetales.



A pesar de la influencia del gradiente altitudinal en la variación en la composición de especies en la vegetación altoandina del SNYL, la variación de algunas características químicas del suelo, particularmente los contenidos de nitrógeno y fósforo disponibles, el contenido de materia orgánica y la concentración total de cobre del suelo, también dan cuenta de la variación florística observada en el santuario.

5. CONCLUSIÓN

Algunas propiedades químicas del suelo son muy relevantes en explicar los patrones de distribución espacial de las plantas altoandinas en el SNYL, cordillera de Santiago. A pesar de la influencia del gradiente altitudinal en la variación en la composición de especies en la vegetación altoandina del SNYL, la variación de algunas características químicas del suelo, particularmente los contenidos de nitrógeno y fósforo disponibles, el contenido de materia orgánica y la concentración total de cobre del suelo, también dan cuenta de la variación florística observada en el santuario. La existencia de heterogeneidad espacial en los recursos edáficos altoandinos resultaría en oportunidades de diferenciación de nicho ecológico y de coexistencia de las especies vegetales en el largo plazo, lo que tendría consecuencias importantes en los patrones de variación espacial y en la riqueza de especies vegetales presentes en la vegetación de la cordillera de Santiago.

Los suelos con altas concentraciones de cobre total alteran el patrón de distribución de las plantas altoandinas del SNYL, determinando la presencia de especies con distribución óptima en suelos con anomalías de cobre, tales como *Armeria maritima*, *Caiophora coronata* y *Montiopsis potentilloides*. Estas especies metalófitas serían tolerantes a este metal, pero esto debe ser corroborado experimentalmente. La especie *A. maritima* podría, sin embargo, ser usada como una especie indicadora de suelos altoandinos con altos contenidos de cobre o anomalías de cobre.

AGRADECIMIENTOS

ANID PIA/BASAL FB0002 y FONDECYT 1050130 (R. Ginocchio). Guardaparques del SNYL y Director del Centro Cordillera, Municipalidad de Lo Barnechea. Los autores agradecen los valiosos aportes del Dr. Luis Felipe Hinojosa, Universidad de Chile, Elena Bustamante, Paola Urrestarazu, Yasna Silva y Jean Paul de la Harpe a la investigación realizada.

REFERENCIAS

- Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals*. Second edition. Springer, New York, USA.
- Anic, V., Hinojosa, L. F., Díaz-Forestier, J., Bustamante, E., de la Fuente, L. M., Casale, J. F., de la Harpe, J. P., Montenegro, G., y Ginocchio, R. (2010). Influence of soil chemical variables and altitude on the distribution of high-alpine plants: the case of the Andes of central Chile. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 42, 152-163.
- Antonovics, J., Bradshaw, A. D., y Turner, R. G. (1971). Heavy metal tolerance in plants. *Advances in Ecological Research*, 7, 1-85.
- Arnesen, G., Beck, P. S. A., y Engelskjøn, T. (2007). Soil acidity, content of carbonates, and available phosphorous are the soil factors best correlated with alpine vegetation: evidence from Troms, north Norway. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39, 189-199.
- Arroyo, M. T. K., Marticorena, C., Matthei, O., Muñoz, M., y Plischoff, P. (2002). Analysis of the contribution and efficiency of the Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, 33°S, in protecting the regional vascular plant flora (Metropolitan and Fifth regions of Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 75, 767-792.
- Auerbach, M. y Shmida, A. V. I. (1993). Vegetation change along an altitudinal gradient on Mt Hermon, Israel—No evidence for discrete communities. *Journal of Ecology*, 81, 25-33.
- Baker, A. J. M. (1987). Metal tolerance. *The New Phytologist*, 106, 93-111.
- Baker, A. J. M., Reeves, R. D. y Hajar, A. S. M. (1994). Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl. (Brassicaceae). *New Phytologist*, 127, 61-68.
- Baker, A. J. M., McGrath, S. P., Reeves, R. D., y Smith, J. A. C. (2000). Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. En: N. Terry y G. S. Bañuelos (Eds.), *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* (pp. 85-107). Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA.
- Baker, A. J. M., Ernst, W. H. O., van der Ent, A., Malaisse, F., y Ginocchio, R. (2010). Metallophytes: the unique biological resource, its ecology and conservational status in Europe, central Africa and Latin America. En: L. C. Batty y K. B. Hallberg (Eds.), *Ecology of Industrial Pollution* (pp. 7-40). Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.
- Boyce, R. L., Clark, R., y Dawson, C. (2005). Factors determining alpine species distribution on Goliath Peak, Front Range, Colorado, U.S.A. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37, 88-96.
- Bradshaw, A. D., y Hardwick, K. (1989). Evolution and stress-genotypic and phenotypic components. *Biological Journal of the Linnean Society*, 37, 137-155.
- Brooks, R. R. (1998). *Plants that hyperaccumulate heavy metals. Their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining*. Cab International, Inglaterra.
- Buri, A., Grand, S., Yashiro, E., Adatte, T., Spangenberg, J. E., Pinto-Figueroa, E., Verrecchia, E., y Guisan, A. (2020). What are the most crucial soil variables for predicting the distribution of mountain plant species? A comprehensive study in the Swiss Alps. *Journal of Biogeography*, 47, 1143-1153.
- Camus, F. (2003). *Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile.
- Cavieres, L. A. y Arroyo, M. T. K. (1999). Tasa de enfriamiento adiabático del aire en el Valle del Río Molina, Provincia de Santiago, Chile central (33°). *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 44, 79-86.
- Cavieres, L. A., Peñaloza, A. y Arroyo, M. T. K. (2000). Altitudinal vegetation belts in the high-Andes of central Chile (33°S). *Revista Chilena de Historia Natural*, 73, 331-344.
- Chauvier, Y., Thuiller, W., Brun, P., Lavergne, B., Descombes, P., Karger, D. N., Renaud, J., y Zimmermann, N. E. (2021). Influence of climate, soil, and land cover on plant species distribution in the European Alps. *Ecological Monographs*, 91(2), e01433.
- Corzo Remigio, A., Chaney, R. L., Baker, A. J. M., Edraki, M., Erskine, P. D., Echevarria, G., y van der Ent, A. (2020). Phytoremediation of high value elements and contaminants from mining and mineral wastes: opportunities and limitations. *Plant and Soil*, 449, 11-37. doi: 10.1007/s11104-020-04487-3
- Darmody, R. G., Thorn, C. E., Schlyter, P., y Dixon, J. C. (2004). Relationship of vegetation distribution to soil properties in Kärkevagge, Swedish Lapland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36, 21-32.

- Eijsackers, H. (1987). The impact of heavy metals on terrestrial ecosystems: biological adaptation through behavioral and physiological avoidance. En: O. Ravera (Ed.), *Ecological Assessment of Environmental Degradation, Pollution and Recovery* (pp. 245–259). Elsevier Scientific Publishers, Amsterdam, Países Bajos.
- Fiedler, P. L. (1985). Heavy metal accumulation and the nature of edaphic endemism in the genus *Calochortus* (Liliaceae). *American Journal of Botany*, 72, 1712–1718.
- Ginocchio, R., Toro, I., Schnepf, D., y Macnair, M. R. (2002). Copper tolerance in populations of *Mimulus luteus* var. *variegatus* exposed and non-exposed to copper pollution. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, 2, 151–156.
- Gough, L., Shaver, G. R., Carol, J., Royer, D. L., y Laundre, J. A. (2000). Vascular plant species richness in Alaskan arctic tundra: the importance of soil pH. *Journal of Ecology*, 88, 54–66.
- Güsewell, S. (2004). N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 164, 243–266.
- Heer, C. y Körner, C. (2002). High elevation pioneer plants are sensitive to mineral nutrient addition. *Basic and Applied Ecology*, 3, 39–47.
- Hinojosa, L. F. (1996). *Estudio paleobotánico de dos tafofloras en la precordillera de Chile central (La Dehesa) e inferencias sobre la vegetación y el clima Terciario de Austrosudamérica*. (Tesis de Magister). Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Santiago.
- Hinojosa, L. F., y Villagrán, C. (1997). Historia de los bosques del sur de Sudamérica, I: antecedentes paleobotánicos, geológicos y climáticos del Terciario del cono sur de América. *Revista Chilena de Historia Natural*, 70, 225–239.
- Hoffmann, A., Arroyo, M. K., Liberona, F., Muñoz, M., y Watson, J. (1998). *Plantas altoandinas en la flora silvestre de Chile*. Ediciones Fundación Claudio Gay. Santiago, Chile.
- Kent, M., y Coker, P. (1992). *Vegetation Description and Analysis: a Practical Approach*. John Wiley and Sons, Chichester, Inglaterra.
- Körner, C. (2003). *Alpine plant life—Functional plant ecology of high mountain ecosystems*. Springer, Berlín, Alemania.
- Leps, J., y Smilauer, P. (2003). *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO*. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.
- Leuschner, C., y Ellenberg, H. (2017). *Ecology of Central European non-forest vegetation: coastal to alpine, natural to man-made habitats: vegetation ecology of Central Europe*. Volume 2. Springer, Berlín, Alemania.
- Llorente-Bousquets, J., y Morrone, J. J. (2001). *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: teorías, conceptos, métodos y aplicaciones*. UNAM, Ciudad de México, México.
- Macnair, M. R., y Baker, A. J. M. (1994). Metal-tolerant plants: an evolutionary perspective. En: M. E. Farago (Ed.) *Plants and the chemical elements* (pp. 67–85). VCH, Weinheim, Alemania.
- Macnair, M. R., Smith, S. E., y Cumbes, Q. J. (1993). Heritability and distribution of variation in degree of copper tolerance in *Mimulus guttatus* at Copperopolis, California. *Heredity*, 71, 445–455.
- Molina, J. I. (2000). *Compendio de la historia geográfica, natural y civil del Reyno de Chile. Primera Parte*. Segunda Edición. Biblioteca del Bicentenario. Pehuén Editores Ltda., Santiago, Chile.
- Moreno, T., y Gibbons, W. (2007). *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, Inglaterra.
- Nicora, E., y Rúgolo de Agrasar, Z. (1987). *Los géneros de Gramíneas de América Austral*. Ediciones Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Orcutt, D. M., y Nilsen, E. T. (2000). *The Physiology of Plants under Stress: Soil and Biotic Factors*. John Wiley and Sons, Nueva York, USA.
- Palmer, M. W. (1993). Putting things in even better order: the advantages of canonical correspondence analysis. *Ecology*, 74, 2215–2230.
- Reeves, R., y Baker, A. (2000). Metal-accumulating plants. En: I. Raskin y B. D. Ensley (Eds.), *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment* (pp. 193–229). John Wiley and Sons, Nueva York, USA.
- Ruthsatz, B. (1993). Flora and ecological conditions of high Andean mires of Chile between 18°00' (Arica) and 40°30' (Osorno) S Lat. *Phytocoenologia*, 23, 157–199.
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. L.,

- Flores, H., y Reaman, A. (2006). *Métodos de análisis de suelos recomendados para los suelos de Chile*. Serie Actas INIA, 34, Santiago, Chile.
- Schaetzl, R. J., y Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.
- Scherrer, D., y Guisan, A. (2019). Ecological indicator values reveal missing predictors of species distributions. *Scientific Reports*, 9, 1–8.
- Schmidtlein, S., y Ewald, J. (2003). Landscape patterns of indicator plants for soil acidity in the Bavarian Alps. *Journal of Biogeography*, 30, 1493–1503.
- Simon, E. (1978). Heavy metals in soils, vegetation development and heavy metal tolerance in plant populations from metalliferous areas. *New Phytologist*, 81, 175–188.
- Squeo, F., Veit, H., Arancio, G., Gutiérrez, J. R., Arroyo, M. T. K., y Olivares, N. (1993). Spatial heterogeneity of high mountains vegetation in the Andean desert zone of Chile. *Mountain Research and Development*, 13, 1–10.
- Squeo, F. A., Rada, F., García, C., Ponce, M., Rojas, A., y Azócar, A. (1996). Cold resistance mechanisms in high desert Andean plants. *Oecologia*, 105, 552–555.
- StatSoft Inc. (2008). *Statistica. Data analysis software system*, <http://www.statsoft.com>.
- Teillier, S., Aldunate, G., Riedemann, P., y Niemeyer, H. (2005). *Flora de la Reserva Nacional Río Clarillo*. Impresos Socias Ltda. Chile.
- ter Braak, C. J. F. (1986). Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67, 1167–1179.
- ter Braak, C. J. F., y Smilauer, P. (2002). *Canoco Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination* (versión 4.5). Microcomputer Power, Ithaca, Nueva York, USA.
- U.S Department of Agriculture. (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report 42, version 4.0, Department of Agriculture, National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, Washington D.C., USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (1995). *Test methods for evaluating solid waste: physical/chemical methods—Physical/chemical methods, method SW-846*. Third edition. Department of Commerce, National technical Information Service, Springfield, Virginia, USA.
- Wenk, E. y Dawson, T. (2007). Interspecific differences in seed germination, establishment, and early growth in relation to preferred soil type in an alpine community. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39, 165–176.
- Wijesinghe, D. K., John, E. A., y Hutchings, M. J. (2005). Does pattern of soil resource heterogeneity determine plant community structure? An experimental investigation. *Journal of Ecology*, 93, 99–112.
- Wiser, S. K., Peet, R., y White, P. S. (1996). High-elevation rock outcrop vegetation of the southern Appalachian Mountains. *Journal of Vegetation Science*, 7, 703–722.
- Zar, J. H. (1984). *Biostatistical Analysis*. Second edition.

ANEXO

Listado de plantas altoandinas encontradas en 73 sitios de muestreo de vegetación establecidos en el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. Formas de vida: (A) Hierba anual, (B) Hierba Bianual, (H) Hierba perenne, (HC) Hemicriptófito cespitoso, (S) Subarbusto, (F) Arbusto, (T) Árbol, (AT) Arbusto trepador, (AB) Anual o Bianual y (G) Geófito (Fuentes: Nicora y Rúgolo de Agrasar, 1987; Hoffmann et al., 1998; Arroyo et al., 2002; Teillier et al., 2005). Líneas punteadas indican especímenes identificados a nivel de género o familia.

Nº de identificación en ACC	Nombre Científico	Clase	Familia	Forma de Vida
1	<i>Acaena pinnatifida</i> Ruiz & Pav.	Magnoliopsida	Rosaceae	H
2	<i>Acaena sericea</i> J. Jacq	Magnoliopsida	Rosaceae	H
3	<i>Acaena leptacantha</i> Phil.	Magnoliopsida	Rosaceae	H
4	<i>Acaena</i> sp.	Magnoliopsida	Rosaceae	---
5	<i>Adesmia exilis</i> Clos	Magnoliopsida	Fabaceae	H
6	<i>Adesmia mucronata</i> Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Fabaceae	H
7	<i>Adesmia</i> sp.	Magnoliopsida	Fabaceae	---
8	<i>Adiantum chilense</i> Kaulf. var. <i>hirsutum</i> Hook. & Grev.	Polypodiopsida	Pteridaceae	H
9	<i>Alstroemeria exerens</i> Meyen	Liliopsida	Alstroemeriaceae	G
10	<i>Alstroemeria pallida</i> Graham	Liliopsida	Alstroemeriaceae	G
11	<i>Anarthrophyllum cumingii</i> (Hook. & Arn.) F. Phil.	Magnoliopsida	Fabaceae	F
12	<i>Armeria maritima</i> (Mill.) Willd.	Magnoliopsida	Plumbaginaceae	H
13	<i>Anisomeria coriacea</i> D. Don	Magnoliopsida	Phytolaccaceae	H
14	<i>Anthriscus caucalis</i> M. Bieb.	Magnoliopsida	Apiaceae	A
15	Apiaceae	Magnoliopsida	Apiaceae	---
16	<i>Astragalus looseri</i> I.M. Johnst.	Magnoliopsida	Fabaceae	H
17	<i>Avena sterilis</i> L.	Liliopsida	Poaceae	A
18	<i>Azorella madreporica</i> Clos	Magnoliopsida	Apiaceae	S
19	<i>Bromus berteroaanus</i> Colla	Liliopsida	Poaceae	A
20	<i>Baccharis glutinosa</i> Pers (ex <i>B. pingraea</i>)	Magnoliopsida	Asteraceae	H
21	<i>Baccharis rhomboidalis</i> J. Remy	Magnoliopsida	Asteraceae	F
22	<i>Berberis empetrifolia</i> Lam.	Magnoliopsida	Berberidaceae	F
23	<i>Brassica rapa</i> L.	Magnoliopsida	Brassicaceae	A
24	Brassicaceae 1	Magnoliopsida	Brassicaceae	---
25	Brassicaceae 2	Magnoliopsida	Brassicaceae	---
26	<i>Bowlesia incana</i> Ruiz & Pav.	Magnoliopsida	Apiaceae	A
27	<i>Bromus catharticus</i> Vahl	Liliopsida	Poaceae	AH
28	<i>Bromus hordeaceus</i> L.	Liliopsida	Poaceae	A
29	<i>Bromus setifolius</i> J. Presl	Liliopsida	Poaceae	H
30	<i>Bromus</i> sp.	Liliopsida	Poaceae	---
31	<i>Bromus tunicatus</i> Phil.	Liliopsida	Poaceae	H
32	<i>Bromus unioloides</i> H.B.K.	Liliopsida	Poaceae	ABH
33	Bryophyta			---
34	<i>Caiophora coronata</i> (Gillies ex Arn.) Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Loasaceae	H
35	<i>Blumenbachia dissecta</i> (Hook. & Arn.) Weigend & Grau (ex <i>Caiophora espigneira</i>)	Magnoliopsida	Loasaceae	H
36	<i>Calceolaria andina</i> Benth.	Magnoliopsida	Calceolariaceae	S

37	<i>Calceolaria arachnoidea</i> Graham	Magnoliopsida	Calceolariaceae	H
38	<i>Calceolaria purpurea</i> Graham	Magnoliopsida	Calceolariaceae	H
Nº de identificación en ACC	Nombre Científico	Clase	Familia	Forma de Vida
39	<i>Calceolaria segethii</i> Phil.	Magnoliopsida	Calceolariaceae	F
40	<i>Calceolaria thyrsoiflora</i> Graham	Magnoliopsida	Calceolariaceae	F
41	<i>Calopappus acerosus</i> Meyen	Magnoliopsida	Asteraceae	H
42	<i>Calycera sessiliflora</i> Phil.	Magnoliopsida	Calyceraceae	A
43	<i>Carex andina</i> Phil.	Liliopsida	Cyperaceae	H
44	<i>Carex macloviana</i> d'Urv.	Liliopsida	Cyperaceae	H
45	<i>Centaurea melitensis</i> L.	Magnoliopsida	Asteraceae	A
46	<i>Centaurium</i> sp.	Magnoliopsida	Gentianaceae	---
47	<i>Cerastium arvense</i> L.	Magnoliopsida	Caryophyllaceae	H
48	<i>Oriastrum apiculatum</i> (J. Remy) A.M.R. Davies (ex <i>Chaetanthera apiculata</i>)	Magnoliopsida	Asteraceae	H
49	<i>Chaetanthera chilensis</i> (Willd.) DC.	Magnoliopsida	Asteraceae	H
50	<i>Chaetanthera flabellata</i> D. Don	Magnoliopsida	Asteraceae	A
51	<i>Cheilanthes glauca</i> (Cav.) Mett.	Polypodiopsida	Pteridaceae	H
52	<i>Dysphania chilensis</i> (Schrad.) Mosyakin & Clemants (ex <i>Chenopodium chilense</i>)	Magnoliopsida	Chenopodiaceae	AB
53	<i>Chrysanthemum parthenium</i> (L.) Bernh.	Magnoliopsida	Asteraceae	H
54	<i>Chuquiraga oppositifolia</i> D. Don	Magnoliopsida	Asteraceae	F
55	<i>Cissarobryon elegans</i> Kunze ex Poepp.	Magnoliopsida	Francoaceae	HF
56	<i>Clarkia tenella</i> (Cav.) H.F. Lewis & M.R. Lewis	Magnoliopsida	Onagraceae	A
57	<i>Colletia hystrix</i> Clos	Magnoliopsida	Rhamnaceae	F
58	<i>Colliguaja integerrima</i> Gillies & Hook.	Magnoliopsida	Euphorbiaceae	F
59	<i>Collomia biflora</i> (Ruiz & Pav.) Brand	Magnoliopsida	Polemoniaceae	A
60	<i>Conyza</i> sp.	Magnoliopsida	Asteraceae	---
61	<i>Cuscuta chilensis</i> Ker Gawl.	Magnoliopsida	Convolvulaceae	A
62	<i>Diplolepis mucronata</i> (Decne.) Hechem & C. Ezcurra (ex <i>Cynanchum chilense</i>)	Magnoliopsida	Apocynaceae	H
64	<i>Cynoglossum creticum</i> Mill.	Magnoliopsida	Boraginaceae	B
65	<i>Deyeuxia erythrostachya</i> E. Desv.	Liliopsida	Poaceae	H
66	<i>Deyeuxia velutina</i> Nees & Meyen (ex <i>Calamagrostis velutina</i>)	Liliopsida	Poaceae	H
67	<i>Deyeuxia chrysantha</i> J. Presl	Liliopsida	Poaceae	H
68	<i>Draba gilliesii</i> Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Brassicaceae	H
69	<i>Eccremocarpus scaber</i> Ruiz & Pav.	Magnoliopsida	Bignoniaceae	F
70	<i>Ephedra chilensis</i> C. Presl (= <i>E. frustillata</i>)	Gnetopsida	Ephedraceae	F
72	<i>Epilobium</i> sp.	Magnoliopsida	Onagraceae	---
73	<i>Erigeron andicola</i> DC.	Magnoliopsida	Asteraceae	H
74	<i>Erigeron</i> sp.	Magnoliopsida	Asteraceae	---
75	<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Hér. ex Aiton	Magnoliopsida	Geraniaceae	A
76	<i>Escallonia alpina</i> Poepp. ex DC.	Magnoliopsida	Escalloniaceae	F
77	<i>Euphorbia collina</i> Phil.	Magnoliopsida	Euphorbiaceae	H
78	<i>Fabiana imbricata</i> Ruiz & Pav.	Magnoliopsida	Solanaceae	F
79	<i>Festuca acanthophylla</i> E. Desv.	Liliopsida	Poaceae	H
80	<i>Festuca purpurascens</i> Banks & Sol. ex Hook.f.	Liliopsida	Poaceae	H
81	<i>Galium eriocarpum</i> Bartl. ex DC.	Magnoliopsida	Rubiaceae	H
82	<i>Galium suffruticosum</i> Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Rubiaceae	S
83	<i>Gamochoaeta stachydifolia</i> (Lam.) Cabrera	Magnoliopsida	Asteraceae	H
84	<i>Geranium bertereanum</i> Colla	Magnoliopsida	Geraniaceae	H
85	<i>Geranium core-core</i> Steud.	Magnoliopsida	Geraniaceae	H
86	<i>Geranium bertereanum</i> Colla (ex <i>G. submolle</i>)	Magnoliopsida	Geraniaceae	H

87	<i>Guindilia trinervis</i> Gillies ex Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Sapindaceae	F
Nº de identificación en ACC	Nombre Científico	Clase	Familia	Forma de Vida
88	<i>Haplopappus arbutoides</i> J. Remy	Magnoliopsida	Asteraceae	H
89	<i>Haplopappus schumannii</i> (Kuntze) G.K. Br. & W.D. Clark	Magnoliopsida	Asteraceae	F
90	<i>Haplopappus velutinus</i> J. Remy	Magnoliopsida	Asteraceae	F
91	<i>Haplopappus</i> sp.1	Magnoliopsida	Asteraceae	---
92	<i>Haplopappus</i> sp.2	Magnoliopsida	Asteraceae	---
93	<i>Homalocarpus dichotomus</i> (Poepp. ex DC.) Mathias & Constance	Magnoliopsida	Apiaceae	A
94	<i>Hordeum berterioanum</i> E. Desv.	Liliopsida	Poaceae	A
95	<i>Hordeum chilense</i> Roem. & Schult.	Liliopsida	Poaceae	H
96	<i>Hordeum comosum</i> J.Presl	Liliopsida	Poaceae	H
97	<i>Hordeum</i> sp.	Liliopsida	Poaceae	---
98	<i>Hypochaeris</i> sp.	Magnoliopsida	Asteraceae	---
99	<i>Juncus stipulatus</i> Nees & Meyen	Liliopsida	Juncaceae	H
100	<i>Mulguraea scoparia</i> (Gillies & Hook.) N. O'Leary & P.	Magnoliopsida	Verbenaceae	F
101	<i>Peralta scoparia</i> (ex <i>Junellia scoparia</i>)	Magnoliopsida	Verbenaceae	F
102	<i>Junellia spathulata</i> (Gillies & Hook.) Moldenke	Magnoliopsida	Verbenaceae	F
103	<i>Kageneckia angustifolia</i> D. Don	Magnoliopsida	Rosaceae	T
104	<i>Koeleria permollis</i> Steud.	Liliopsida	Poaceae	H
105	<i>Koeleria</i> sp.	Liliopsida	Poaceae	---
106	<i>Lactuca virosa</i> L.	Magnoliopsida	Asteraceae	B
107	<i>Azorella ruizii</i> G.M. Plunkett & A.N. Nicolas (ex <i>Laretia acaulis</i>)	Magnoliopsida	Apiaceae	S
108	<i>Lathyrus subandinus</i> Phil.	Magnoliopsida	Fabaceae	H
109	<i>Leucheria rosea</i> Poepp. ex Less.	Magnoliopsida	Asteraceae	H
110	<i>Leucheria runcinata</i> D. Don	Magnoliopsida	Asteraceae	H
111	<i>Leucocoryne alliacea</i> Miers ex Lindl.	Liliopsida	Amarylidaeae	H
112	<i>Loasa pallida</i> Gillies ex Arn.	Magnoliopsida	Loasaceae	A
113	<i>Loasa sigmoidea</i> Urb. & Gilg	Magnoliopsida	Loasaceae	H
114	<i>Luzula racemosa</i> Desv.	Liliopsida	Juncaceae	H
115	<i>Madia sativa</i> Molina	Magnoliopsida	Asteraceae	A
116	<i>Malesherbia linearifolia</i> (Cav.) Pers.	Magnoliopsida	Passifloraceae	H
117	<i>Marrubium vulgare</i> L.	Magnoliopsida	Lamiaceae	H
118	<i>Muehlenbeckia hastulata</i> (Sm.) I.M. Johnst.	Magnoliopsida	Polygonaceae	F
119	<i>Montiopsis andicola</i> (Gillies) D.I. Ford	Magnoliopsida	Montiaceae	H
120	<i>Calandrinia caespitosa</i> Gillies ex Arn.	Magnoliopsida	Montiaceae	H
121	<i>Montiopsis potentilloides</i> (Barnéoud) D.I. Ford	Magnoliopsida	Montiaceae	H
122	<i>Azorella prolifera</i> (Cav.) G.M. Plunkett & A.N. Nicolas (ex <i>Mulinum spinosum</i>)	Magnoliopsida	Apiaceae	S F
123	<i>Mutisia latifolia</i> D. Don	Magnoliopsida	Asteraceae	AT
124	<i>Mutisia</i> sp.	Magnoliopsida	Asteraceae	---
125	<i>Mutisia subulata</i> Ruiz & Pav.	Magnoliopsida	Asteraceae	S
126	<i>Mutisia subulata</i> Ruiz & Pav. fma. <i>rosmarinifolia</i> (Poepp. & Endl.) Cabrera	Magnoliopsida	Asteraceae	S
127	<i>Nardophyllum lanatum</i> (Meyen) Cabrera	Magnoliopsida	Asteraceae	F
128	<i>Nassauvia aculeata</i> (Less.) Poepp. & Endl.	Magnoliopsida	Asteraceae	HS
129	<i>Nassauvia axillaris</i> (Lag. Ex Lindl.) D. Don	Magnoliopsida	Asteraceae	F
130	<i>Nassauvia looseri</i> Cabrera	Magnoliopsida	Asteraceae	H

Nº de identificación en ACC	Nombre Científico	Clase	Familia	Forma de Vida
131	<i>Nassauvia pyramidalis</i> Meyen	Magnoliopsida	Asteraceae	H
132	<i>Nastanthus scapigerus</i> (J. Remy) Miers	Magnoliopsida	Calyceraceae	H
133	<i>Nicotiana acuminata</i> (Graham) Hook.	Magnoliopsida	Solanaceae	A
134	<i>Olsynium scirpoideum</i> (Poepp.) Goldblatt	Liliopsida	Iridaceae	H
135	<i>Olsynium</i> sp.	Liliopsida	Iridaceae	---
136	<i>Olsynium junceum</i> (E. Mey. ex C. Presl) Goldblatt	Liliopsida	Iridaceae	H
137	<i>Olsynium philippii</i> (Klatt) Goldblatt	Liliopsida	Iridaceae	H
138	<i>Oxalis</i> aff. <i>erythrorhiza</i> Gillies ex Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Oxalidaceae	H
139	<i>Oxalis compacta</i> Gillies ex Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Oxalidaceae	H
140	<i>Oxalis berteriana</i> Barnéoud	Magnoliopsida	Oxalidaceae	AH
141	<i>Oxalis</i> sp.	Magnoliopsida	Oxalidaceae	---
142	<i>Oxalis squamata</i> Zucc.	Magnoliopsida	Oxalidaceae	H
143	<i>Perezia carthamoides</i> (D. Don) Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Asteraceae	H
144	<i>Perezia poeppigii</i> Less.	Magnoliopsida	Asteraceae	H
145	<i>Phacelia brachyantha</i> Benth.	Magnoliopsida	Boraginaceae	A
146	<i>Phacelia cumingii</i> (Benth.) A. Gray	Magnoliopsida	Boraginaceae	A
147	<i>Phacelia secunda</i> J.F. Gmel.	Magnoliopsida	Boraginaceae	H
148	<i>Plantago grandiflora</i> Meyen	Magnoliopsida	Plantaginaceae	H
149	<i>Plantago lanceolata</i> L.	Magnoliopsida	Plantaginaceae	H
150	<i>Poa holciformis</i> J. Presl	Liliopsida	Poaceae	H
151	<i>Poa resinulosa</i> Nees ex Steud.	Liliopsida	Poaceae	H
152	<i>Poa</i> sp.	Liliopsida	Poaceae	---
153	<i>Poa trivialis</i> L.	Liliopsida	Poaceae	H
154	Poaceae 1	Liliopsida	Poaceae	---
155	Poaceae 2	Liliopsida	Poaceae	---
156	Poaceae 3	Liliopsida	Poaceae	---
157	Poaceae 4	Liliopsida	Poaceae	---
158	Poaceae 5	Liliopsida	Poaceae	---
159	<i>Vulpia</i> sp.	Liliopsida	Poaceae	---
160	<i>Trisetum</i> aff. <i>lasiolepis</i> E. Desv.	Liliopsida	Poaceae	H
161	<i>Polygala salasiana</i> Gay	Magnoliopsida	Polygalaceae	H
162	<i>Polygonum bowenianum</i> Phil.	Magnoliopsida	Polygonaceae	H
163	<i>Pozoa coriacea</i> Lag.	Magnoliopsida	Apiaceae	H
164	<i>Trisetum caudulatum</i> Trin.	Liliopsida	Poaceae	H
165	<i>Quinchamalium chilense</i> Molina (= <i>Q. parviflorum</i>)	Magnoliopsida	Schoepfiaceae	H
167	<i>Famatinia andina</i> (Phil.) Ravenna (ex <i>Rhodophiala andina</i>)	Liliopsida	Amaryllidaceae	H
168	<i>Rhodolirium montanum</i> Phil. (ex <i>Rhodophiala rhodolirion</i>)	Liliopsida	Amaryllidaceae	H
169	<i>Ribes cucullatum</i> Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Grossulariaceae	F
170	<i>Ribes nemorosum</i> Phil.	Magnoliopsida	Grossulariaceae	F
171	<i>Ribes punctatum</i> Ruiz & Pav.	Magnoliopsida	Grossulariaceae	F
172	<i>Ribes trilobum</i> Meyen	Magnoliopsida	Grossulariaceae	F
173	<i>Rytidosperma violaceum</i> (E.Desv.) Nicora	Liliopsida	Poaceae	H
174	<i>Rytidosperma virescens</i> (E.Desv.) Nicora	Liliopsida	Poaceae	H
175	<i>Schinus molle</i> (Phil.) Engl.	Magnoliopsida	Anacardiaceae	T
176	<i>Schizanthus hookeri</i> Gillies ex Graham	Magnoliopsida	Solanaceae	AB
177	<i>Scyphanthus elegans</i> Sweet	Magnoliopsida	Loasaceae	AB
178	<i>Senecio anthemidiphyllus</i> J. Remy	Magnoliopsida	Asteraceae	F
179	<i>Senecio bustillosianus</i> J. Remy	Magnoliopsida	Asteraceae	H
180	<i>Senecio clarioneifolius</i> J. Remy	Magnoliopsida	Asteraceae	S

Nº de identificación en ACC	Nombre Científico	Clase	Familia	Forma de Vida
181	<i>Senecio davilae</i> Phil.	Magnoliopsida	Asteraceae	S
182	<i>Senecio eruciformis</i> J. Remy	Magnoliopsida	Asteraceae	S
183	<i>Senecio polygaloides</i> Phil.	Magnoliopsida	Asteraceae	F
184	<i>Senecio</i> sp.	Magnoliopsida	Asteraceae	---
185	<i>Sisyrinchium arenarium</i> Poepp.	Liliopsida	Iridaceae	H
186	<i>Sisyrinchium arenarium</i> Poepp. ssp. <i>adenostemon</i> (Phil.) Ravenna	Liliopsida	Iridaceae	H
187	<i>Sisyrinchium cuspidatum</i> Poepp.	Liliopsida	Iridaceae	H
188	<i>Sisyrinchium graminifolium</i> Lindl.	Liliopsida	Iridaceae	H
189	<i>Sisyrinchium</i> sp.	Liliopsida	Iridaceae	---
190	<i>Solanum crispum</i> Ruiz & Pav. (= <i>S. ligustrinum</i>)	Magnoliopsida	Solanaceae	F
191	<i>Solenomelus segethii</i> (Phil.) Kuntze	Liliopsida	Iridaceae	H
192	<i>Stachys albicaulis</i> Lindl.	Magnoliopsida	Lamiaceae	H
193	<i>Stachys philippiana</i> Vatke	Magnoliopsida	Lamiaceae	H
194	<i>Pappostipa chrysophylla</i> (E. Desv.) Romasch. (ex <i>Stipa chrysophylla</i>)	Liliopsida	Poaceae	H
195	<i>Pappostipa speciosa</i> (Trin. & Rupr.) Romasch. (ex <i>Stipa speciosa</i>)	Liliopsida	Poaceae	H
196	<i>Taraxacum</i> sp. 1	Magnoliopsida	Asteraceae	---
197	<i>Taraxacum</i> sp. 2	Magnoliopsida	Asteraceae	---
198	<i>Tetraglochin alatum</i> (Gillies ex Hook. & Arn.) Kuntze	Magnoliopsida	Rosaceae	F
199	<i>Triptilion capillatum</i> (D. Don) Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Asteraceae	A
200	<i>Trisetum lasiolepis</i> E. Desv.	Liliopsida	Poaceae	H
201	<i>Tropaeolum leptophyllum</i> G. Don	Magnoliopsida	Tropaeolaceae	H
202	<i>Tropaeolum sessilifolium</i> Poepp. & Endl.	Magnoliopsida	Tropaeolaceae	H
203	<i>Tropaeolum tricolor</i> Sweet	Magnoliopsida	Tropaeolaceae	H
204	<i>Valeriana bridgesii</i> Hook. & Arn.	Magnoliopsida	Caprifoliaceae	H
205	<i>Valeriana stricta</i> Clos	Magnoliopsida	Caprifoliaceae	S
206	<i>Valeriana</i> sp. 1	Magnoliopsida	Caprifoliaceae	---
207	<i>Valeriana</i> sp. 2	Magnoliopsida	Caprifoliaceae	---
208	<i>Verbascum thapsus</i> L.	Magnoliopsida	Scrophulariaceae	B
209	<i>Vicia vicina</i> Clos	Magnoliopsida	Fabaceae	H
210	<i>Viola aff. philippii</i> Leyb.	Magnoliopsida	Violaceae	H
211	<i>Viviania marifolia</i> Cav.	Magnoliopsida	Francoaceae	F
212	<i>Balbisia gracilis</i> (Meyen) Hunz. & Ariza (ex <i>Wendtia gracilis</i>)	Magnoliopsida	Francoaceae	S
213	<i>Latace andina</i> (Poepp.) Sassone fma. <i>andina</i> (Poepp.) Crosa (ex <i>Zoellnerallium andinum</i>)	Liliopsida	Amaryllidaceae	H





Capítulo 6

CREANDO Y UNIENDO PIEZAS DE PLANIFICACIÓN PARA LA ACCIÓN EFECTIVA DE CONSERVACIÓN:
EL CASO DEL SANTUARIO DE LA NATURALEZA YERBA LOCA

Creando y uniendo piezas de planificación para la acción efectiva de conservación: el caso del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca

Mariana Thienel^{1*}, Antonieta Eguren¹, Nicole Püschel¹, Bárbara Saavedra¹

1. Wildlife Conservation Society – Chile. Luis Thayer Ojeda 0115 oficina 705, Providencia, Santiago, Chile.
*mthienel@wcs.org

RESUMEN

El desafío de la conservación consiste en el desarrollo de procesos integrados y articulados en los territorios, que puedan ser implementados de manera efectiva en contextos desafiantes como los impuestos por el cambio climático. Los planes de manejo son el instrumento propio de la gestión de áreas protegidas, y su diseño e implementación debe reflejar este desafío. Se comparten acá los principales resultados, experiencias y aprendizajes del proceso de elaboración de los planes de manejo de tres predios que forman parte del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL). En su desarrollo, Wildlife Conservation Society (WCS) diseñó y ejecutó un proceso participativo utilizando la metodología de los Estándares de Conservación de la Alianza para las Medidas de Conservación, en torno a la priorización de valores de biodiversidad y sus amenazas, tanto a nivel predial como del Santuario integrado, realizando un análisis integral y sistematizando información contextual para finalmente hacer propuestas de acciones de gestión en conservación del SNYL en cada predio.

1. INTRODUCCIÓN

La crisis global de pérdida de **biodiversidad** desafía el diseño e implementación de medidas efectivas e integradas de conservación, especialmente en áreas protegidas, las que constituyen el instrumento más reconocido para la gestión de la conservación de biodiversidad. Esto se suma a persistentes problemas de representatividad de las áreas de protección presentes en áreas de alto valor, como es el caso de la zona central de Chile (Maxwell et al., 2020). A diferencia de lo que sucede en la zona austral de nuestro país, los ecosistemas de Chile central, pese a representar a una de las zonas ecológicas más valiosas y a la vez una de las más degradadas de nuestro país, y consideradas por ello como **hotspot de biodiversidad** (Myers et al., 2000; MMA, 2018), tienen escasa representación dentro del conjunto de áreas protegidas chilenas (Pliscoff, 2009; Moya et al., 2014). Dado el carácter sistémico, integrado y posicionado de la biodiversidad, la gestión de su conservación precisa de la articulación efectiva en los territorios. En el caso de Chile central, donde la propiedad de la tierra es mayoritariamente privada, la integración entre la acción de conservación pública y privada es ineludible. Así, el establecimiento de áreas de protección privada es una tarea imperiosa para aportar a la reducción de la brecha de representación en esta zona. No obstante, el establecimiento de áreas de protección en zonas subrepresentadas no resuelve por sí solo el desafío de la conservación de la biodiversidad, sino que representa sólo un primer paso en el proceso de conservación real en los territorios, el que requiere de



La naturaleza y biodiversidad de la cordillera de los Andes en Chile central conecta a sus habitantes con su conservación, representando una invitación ecológica para la colaboración, de trabajo de cuidado de las estructuras y procesos socioecológicos básicos que permiten proteger y mantener la biodiversidad.

la gestión efectiva de las áreas de protección. El desafío en la zona central de Chile entonces es doble.

La naturaleza y biodiversidad de la cordillera de los Andes en Chile central conecta a sus habitantes con su conservación, representando una invitación ecológica para la colaboración, de trabajo de cuidado de las estructuras y procesos socioecológicos básicos que permiten proteger y mantener la biodiversidad. En especial se espera que los planes de manejo en áreas protegidas respondan a la necesidad de gestión integrada en función de la protección de los atributos de biodiversidad por los cuales fueron declaradas. Esto es especialmente desafiante en el caso de los Santuarios de la Naturaleza (SN), los que en su mayoría están a cargo de entes privados, quienes, tal como ocurre con el Estado en Chile, no siempre cuentan con los recursos y/o capacidades para su diseño e implementación efectiva. De hecho, de los 12 SN que existen en la Región Metropolitana de Santiago, solo 2 cuentan con planes de manejo -elaborados con la metodología de los Estándares de Conservación- aprobados por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), mientras que el

resto se encuentra en vías de aprobación. Es así como, en su rol de supervigilancia de las áreas protegidas, el MMA realiza diversos esfuerzos para apoyar a privados en esta labor. Por ejemplo, dentro de la Red de Santuarios de la Naturaleza de la Región Metropolitana¹, uno de los objetivos es lograr que todos los SN de la región pudiesen contar con un plan aprobado a fines del año 2021, meta aún en consecución.

Tal es el caso del SNYL, el que está conformado por diversos predios y propietarios de origen público y privado, incluyendo los fundos Yerba Loca, de propiedad de la Municipalidad de Lo Barnechea; junto con Santa Lucía y Santa Matilde, ambos de propietarios privados. Si bien el Estado de Chile avanzó en el desarrollo de un Plan de Manejo para el SNYL (PdM-SNYL) en 1983, éste solo incluyó su porción pública, dejando fuera de la gestión de conservación una fracción importante del territorio protegido. Asimismo, este plan fue válido por un corto período de tiempo (6 años) y solo fue implementado parcialmente. Sumado a esto, el área no cuenta con una estructura de gobernanza u otro mecanismo de coordinación entre los propietarios,

1. <https://mma.gob.cl/red-de-santuarios-de-la-naturaleza-de-la-region-metropolitana-realiza-nueva-sesion-de-trabajo/>

algunos de los cuales incluso ignoran que sus predios están declarados bajo una figura de protección oficial del Estado.

Reconociendo el valor ecológico de la zona precordillerana de Santiago, las necesidades y restricciones a la conservación en la zona central de Chile, sumado al compromiso y experiencia de WCS en la práctica científica de la conservación y la necesidad de aportar desde el sector privado a la conservación (Saavedra y Simonetti, 2011; WCS, 2015), WCS se sumó a la elaboración de los planes de manejo de los principales predios que forman parte del SNYL (fundo Sta. Lucía, Sta. Matilde y fundo Yerba Loca) (Figura 1), desafiando su integración desde su etapa de diseño, con miras a generar de manera articulada esta herramienta clave para la **conservación efectiva** de los ecosistemas de valor global existente en esta porción de los Andes, bajo procesos integrados que individualizarán los desafíos y oportunidades particulares de cada predio.

Liderado por el MMA -institución responsable de los Santuarios de la Naturaleza en Chile-, y de la mano de consultores, recientemente se generó una instancia público-privada para avanzar en el desarrollo de un proceso de gestión integrada del SNYL, que se espera pueda servir de paraguas para cobijar y guiar a todos los propietarios que forman parte de esta área protegida. En el marco de esta planificación, los planes de manejo prediales elaborados por WCS fueron utilizados como principal insumo a dicho espacio, en vista de que su elaboración contó con una alta participación de los grupos de interés vinculados al SNYL, incluyendo a la SEREMI del MMA de la Región Metropolitana de Santiago y los consultores a cargo de la propuesta para generar el plan de gestión integrado.

1.1. Estándares de Conservación

La práctica de la conservación de biodiversidad es compleja, singular e involucra la integración de múltiples capacidades asociadas a la gestión de la biodiversidad, incluyendo aspectos de gobernanza y administración, financiamiento, planificación y manejo. Para abordar esta complejidad, es preciso focalizar los esfuerzos en intereses comunes y factibles que promuevan la colaboración entre actores, maximicen las oportunidades y recursos humanos, económicos u otros que estén disponibles, abran espacios integradores para compartir las experiencias y aprendizajes y, con esto, incrementar las probabilidades de obtener

resultados positivos en la gestión de la conservación de la biodiversidad existente en los territorios y, consecuentemente, asegurar los beneficios que esta provee a las sociedades.

A nivel global, la práctica científica de la conservación viene desarrollando y poniendo a prueba estándares para sistematizar y escalar herramientas que permitan avanzar en conservación efectiva de la biodiversidad con base en conocimiento; incluyendo criterios, métodos de planificación y lenguaje; así como también compartiendo y promoviendo conocimientos, experiencias y capacidades. La Alianza para las Medidas de Conservación (*Conservation Measures Partnership*, CMP), integrada por diversas ONG, entre ellas la WCS, ha venido desarrollando los Estándares de Conservación (EC) (anteriormente llamados Estándares Abiertos para la Práctica de la Conservación), cuya primera versión fue publicada en 2004, y posteriormente actualizada en tres oportunidades (2007, 2013 y 2020). Los EC constituyen la herramienta más avanzada para la conservación efectiva, entregando un marco conceptual para la planificación y gestión de la conservación en territorios como el SNYL.

Los EC son una herramienta que constituye un sistema robusto de planificación, manejo y monitoreo de proyectos de conservación, que incorpora indicadores para la medición objetiva de los resultados esperados, definidos *a priori*. A través de cinco pasos cíclicos e iterativos (Figura 2), esta herramienta entrega una guía para la toma de decisiones programáticas en la compleja gestión de la biodiversidad. Estos lineamientos han sido adoptados por la autoridad ambiental nacional del MMA y otros actores relevantes (WCS, 2015; CONAF, 2017).

Los EC enmarcan procesos de conservación a diferentes escalas de acción, permitiendo, de forma cíclica e iterativa, planificar e implementar acciones de conservación bajo el enfoque del manejo adaptativo, de reducción de amenazas y monitoreo de su efectividad en torno al logro de objetivos de conservación anticipadamente definidos en base al mejor conocimiento disponible. Uno de los requisitos de esta herramienta es el involucramiento de actores clave que directa e indirectamente se vinculan con la biodiversidad de un área y poseen interés en su gestión, con el fin de intercambiar información honesta, en espacios seguros, que ayuden a cultivar relaciones en el largo plazo y prever los efectos (positivos o negativos)



Figura 1. Fundo Santa Lucía (arriba), fundo Santa Matilde (centro) y fundo Yerba Loca (abajo), todos predios del SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.



Figura 2. Ciclo de los Estándares de Conservación. Fuente: Traducido y modificado desde la *Conservation Measurement Partnership* (2020).

sobre sus modos de vida de las actividades planificadas. Asimismo, se involucran personas con conocimiento y experiencia en gestión, ya sea en la biodiversidad local y sus amenazas, como en el contexto político, social y económico del área.

De manera inicial, se identifican y priorizan los objetos de conservación del área, los que corresponden a componentes de la biodiversidad representativos y esenciales del área, ya sea para mantener su estructura y funcionamiento, o bien, para servir de paraguas que permitan focalizar acciones de conservación y conectar con las contribuciones que las poblaciones humanas reconocen y valoran en dicha biodiversidad (CMP, 2020). Estos son los elementos sobre los cuales se centra el proceso de planificación y monitoreo.

Se describe acá este proceso de planificación realizado en tres predios del SNYL, con miras a levantar ejemplos replicables en otras áreas de protección, privadas y públicas, de la Región Metropolitana de Santiago y más allá.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Santuario de la Naturaleza Yerba Loca (SNYL)

El SNYL se ubica en la comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, en el sector nororiente de la provincia de Santiago y abarca 39.029 ha, siendo el área protegida más grande a nivel regional y el SN con mayor envergadura de Chile central. Junto al SN Los Nogales (11.025 ha), son las únicas áreas protegidas oficialmente establecidas en esta comuna (Figura 3). Dentro del SNYL, destacan algunos hitos geográficos, tales como el cerro El Plomo (5.424 m s.n.m.) y el glaciar La Paloma (4.910 m s.n.m.), y localidades como La Parva y Farellones.

El SNYL está conformado por diferentes predios de propiedad pública y privada (Tabla 1), así como también posee un área urbana donde se sitúan los cuatro centros de esquí icónicos de la comuna (Farellones, El Colorado, La Parva y Valle Nevado). Fue declarado por el Estado de Chile en 1973 bajo la Ley n° 17.288 sobre Monumentos Nacionales "considerando la necesidad de conservar las especies arbóreas existentes, la ecología original de la precordillera; y las posibilidades

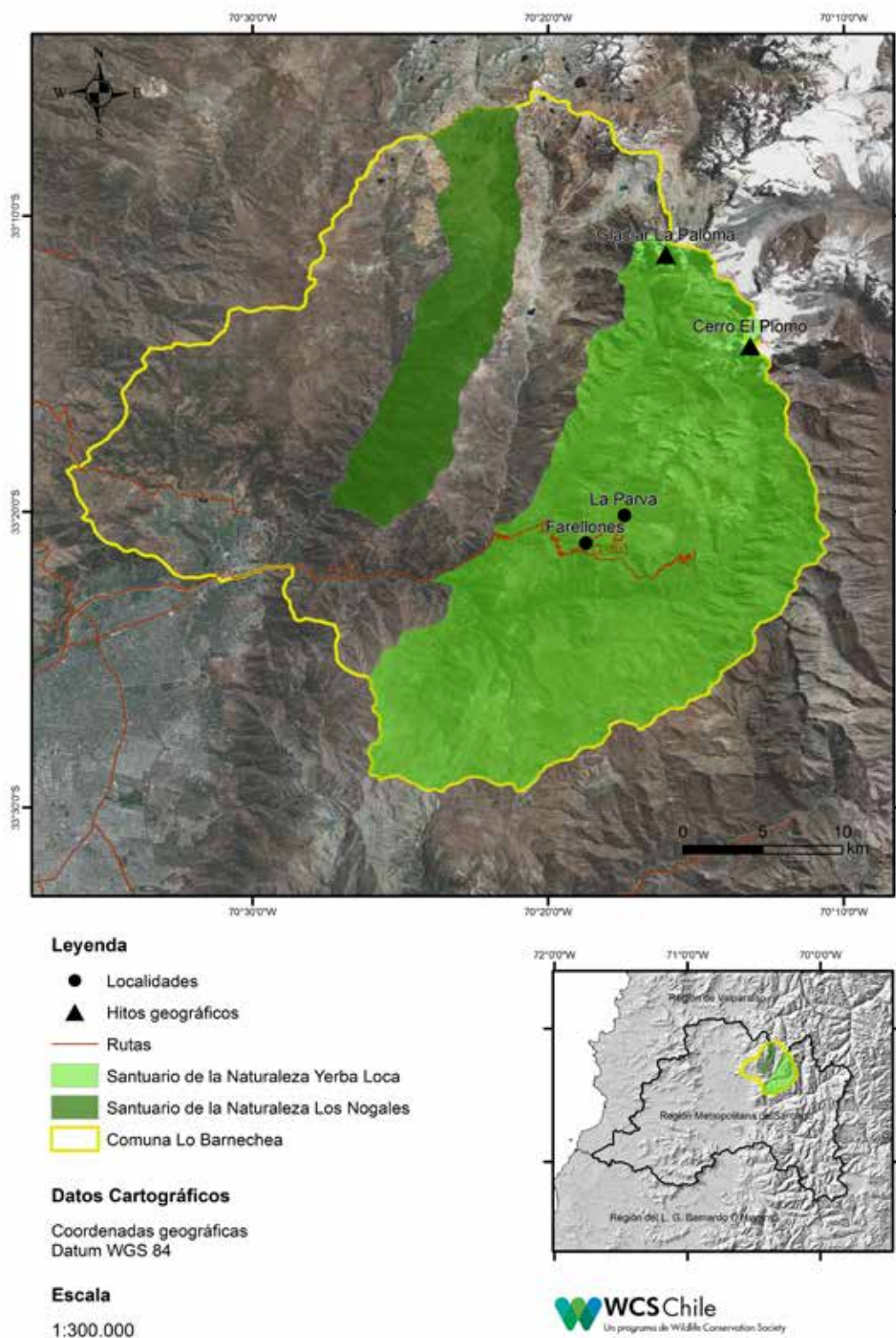


Figura 3. Áreas Silvestres Protegidas de la comuna de Lo Barnechea: Santuario de la Naturaleza Los Nogales y SNYL, Región Metropolitana de Santiago, Chile central. Fuente: Elaboración propia en base a información georreferenciada del Consejo de Monumentos Nacionales.



Tabla 1. Predios que conforman el SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central. En negrita se destaca aquellos predios que fueron foco de elaboración de planes de manejo por WCS.

Predio	Superficie aproximada (ha)	Administración
Fundo Santa Lucía	14.308	Privada
Fundo Yerba Loca*	11.029	Pública
Fundo Santa Matilde	~6.700	Privada
Fundo Lo Encañado	~9.200	Privada
Centro Cordillera	756	Mixta**

* Se refiere a la Primera Porción del fundo Cuarta Higuera de Yerba Loca de propiedad de la Municipalidad de Lo Barnechea; ** Área Urbana según Plan Regional Comunal.

turísticas que ofrece por la belleza natural de esa región” (DS 937/73 Ministerio de Educación Pública).

Al ubicarse dentro del *hotspot* de biodiversidad con prioridad de conservación descrito para Chile (Myers et al., 2000; MMA, 2018), el SNYL tiene un valor excepcional para la conservación de la biodiversidad de la zona con clima de tipo mediterráneo de Chile, albergando un total de 500 taxones vegetales, lo que representa un 34% de toda la flora vascular reportada para la Región Metropolitana de Santiago, y un 17% de la ecorregión mediterránea, situación que no se replica en otra área protegida de la precordillera andina (Arroyo et al., 2002).

El SNYL presenta una alta heterogeneidad geológica y geomorfológica, propia de la alta cordillera que, sumado a su historia biogeográfica, explica la alta diversidad biológica presente. Esto se observa claramente en la diversidad de pisos vegetacionales existentes en el SNYL, lo que incluyen la formación de

bosque esclerófilo mediterráneo andino de *Quillaja saponaria* Molina y *Lithrea caustica* (Molina) Hook. & Arn. que domina el área bajo los 1.700 m s.n.m., a la vez que entre los 1.400 y 2.200 m s.n.m. existe el Bosque esclerófilo mediterráneo andino de *Kageneckia angustifolia* D. Don y *Guindilia trinervis* Gillies ex Hook. & Arn. Entre los 1.600 y 2.900 m s.n.m. aparece el Matorral bajo mediterráneo andino de *Chuquiraga oppositifolia* D. Don y *Nardophyllum lanatum* (Meyen) Cabrera, el que se mezcla con el piso del Matorral bajo mediterráneo andino de *Azorella Ruizii* G.M. Plunkett & A.N. Nicolas (ex *Laretia acaulis*) y *Berberis empetrifolia* Lam. entre los 2.000 y 3.000 m s.n.m. en laderas occidentales. Sobre los 3.500 m s.n.m. domina el Herbazal mediterráneo andino de *Nastanthus scapigerus* (J. Remy) Miers (ex *Nastanthus spathulatus*) y *Menonvillea spathulata* (Gillies & Hook.) Rollins (Luebert y Pliscoff, 2017). Existen en el SNYL formaciones azonales como las vegas, que corresponden a ecosistemas de humedales altoandinos con vegetación hidrófila, las que contrastan

en el entorno y que son de gran relevancia para el sostenimiento integral de los ecosistemas altoandinos.

El SNYL aporta directamente a la protección de especies y ecosistemas amenazados, donde se han registrado alrededor de 20 especies que están clasificadas en alguna categoría de amenaza, entre las que destaca el cacto spinifloro (*Austrocactus spiniflorus* (Phil.) F. Ritter), el sapo de pecho espinoso de la Parva (*Alsodes tumultuosus*), el matuasto (*Phymaturus darwini*) y el gato andino (*Leopardus jacobita*), todas ellas catalogadas en peligro de extinción. Los pisos vegetacionales de bosque esclerófilo mediterráneo andino, tanto de *Quillaja saponaria* y *Lithrea caustica*, como de *Kageneckia angustifolia* y *Guindilia trinervis* son considerados Vulnerables (Plischoff, 2015).

La naturaleza y biodiversidad del SNYL contribuye también a la mantención de actividades y modos de vida humana en la Región Metropolitana de Santiago, tales como la provisión y purificación de agua, la provisión de alimento para ganado, la regulación del clima local, el control de desastres naturales como deslizamientos de tierra, prevención de la erosión, formación de suelos, el soporte de biodiversidad de Chile central, la significancia espiritual y de inspiración, la recreación y oportunidades de educación (WCS, 2020). Ejemplo de esto es la presencia de 34 glaciares de diverso tipo (montaña, valle, roca) en la cuenca del estero Yerba Loca hasta la junta del estero San Francisco al interior del SNYL, los que suman una superficie de 9,26 km² y tienen un rendimiento hídrico anual de al menos 0,263 L/s/ha (Cassasa *et al.*, 2015). Estos cuerpos de hielo cumplen un rol relevante en la conservación de esta agua para la Región Metropolitana de Santiago, donde habita el 40% la población del país y cuyos habitantes diariamente consumen alrededor de 0,001 km³ de agua (SISS, 2020).

El valor del SNYL para la sociedad de Chile central es de larga data, lo que se evidencia en los más de 100 sitios y objetos arqueológicos existentes en el área, que datan de 8 a 6 mil años a. C. y que incluyen sitios como Casa de Piedra Carvajal, además de talleres líticos, pircas y piedras tacitas, muchas de las cuales se encuentran en las vías de paso que hasta el día de hoy son utilizadas por los habitantes y visitantes de la zona. Uno de los grupos étnicos de mayor trascendencia y que dejó grandes rastros físicos de su ocupación fueron los incas. Para este imperio, el cerro El Plomo, un ícono dentro del SNYL, era su santuario más austral y un

referente para la orientación y para su conexión con el sol, cuya vía de comunicación la ejercían a través del cóndor, considerado un animal sagrado (Stehberg y Sotomayor, 2012). Como se ha mencionado en el primer capítulo, el uso de la zona que actualmente constituye el SNYL ha sido dinámico y sostenido en el tiempo, incluyendo el uso ganadero que se ha mantenido desde el año 1500, donde el SNYL proveía de forraje a grandes majadas de animales que estacionalmente eran trasladados y vigilados por arrieros y vaqueanos. Actualmente, si bien el 97,4% de la población de la comuna de Lo Barnechea, donde se encuentra el SNYL, es urbana, existen grupos sociales cuyos modos de vida y costumbres son rurales y se asocian con la cultura arriera de montaña, practicando una ganadería extensiva tradicional y trashumante estival.

2.2. Etapas de elaboración de los PdM-SNYL

WCS diseñó y ejecutó el proceso integrado de elaboración de los nuevos PdM-SNYL de los fundos Santa Lucía, Santa Matilde y fundo Yerba Loca, identificando, convocando y facilitando la participación de actores clave; determinando, sistematizando y compartiendo en forma asequible, oportuna y simple la información relevante al proceso y apoyando y orientando la toma de decisiones de los actores, con miras a la co-construcción de una planificación a 5 años para la gestión de la conservación efectiva del SNYL.

El diseño y planificación de estos PdM-SNYL se realizó a través de 3 procesos independientes (pero complementarios entre los fundos) tuvo una duración de 12 meses (entre 2019 y 2020) y consideró el desarrollo no-lineal de los requerimientos planteados por los EC (pasos 1 y 2, véase Figura 2); recopilando y levantando información de base de los contextos ecológico, normativo, político, social y climático, en terreno y en gabinete.

El proceso se inició con la recopilación de antecedentes de base sobre usos actuales, proyecciones de inversión, intereses de desarrollo predial, líneas de base ambientales, instrumentos de ordenamiento territorial, planes, políticas y programas oficiales. Posteriormente, se integró la información recopilada y para cada fundo se seleccionaron participativamente los objetos de conservación y se determinaron las amenazas (actividades humanas)

más relevantes que degradan su condición. Asimismo, se definió con los propietarios una visión, o estado futuro deseable de conservación, el cual es necesario para guiar y dar coherencia a los esfuerzos de conservación que se realizan en un corto plazo.

Dado que los EC permiten, además, integrar otros enfoques metodológicos que informan la práctica de la conservación, el proceso incorporó la Planificación Climáticamente Informada (Stein et al., 2014), considerando los potenciales efectos del cambio climático tanto en la biodiversidad del área (p. ej. factores de vulnerabilidad), como en las conductas de las personas para adaptarse a dichos cambios (p. ej. aumento de peligros naturales). De esta forma, se incorporó la dimensión climática a partir de la literatura científica disponible, sumado a los resultados de un estudio mandado previamente por Anglo American respecto a los cambios proyectados en la temperatura, precipitación, hidrología y riesgo de aluviones en el área para el período 2030-2050². Estos estudios fueron utilizados para proyectar, de manera cualitativa, los potenciales efectos del cambio climático sobre los objetos de conservación de los predios, identificándose con esto amenazas climáticas potenciales para el SNYL. Para WCS, este ejercicio fue una primera aproximación a la incorporación de la dimensión climática al proceso de planificación usando los EC, lo que a la fecha no se encontraba formalmente incorporada en dicha metodología.

La etapa de Planificación de los EC precisa de la aplicación de un enfoque ecosistémico e integrado, que deriva en la generación de un modelo situacional por fundo, esto es, una representación esquemática que permite visualizar, de manera integrada, las relaciones existentes entre los objetos de conservación, sus amenazas y los factores que subyacen a ellas en el área de estudio. A partir de estos modelos, y sobre la base de una teoría de cambio, para cada objeto de conservación y amenaza se determinaron, respectivamente, objetivos y metas de conservación específicas, medibles, alcanzables, relevantes y limitadas en el tiempo (SMART, por sus siglas en inglés), los que constituirán el corazón del plan de manejo y que derivan en los planes de acción anual para cada administrador. Además, permiten definir *a priori* los indicadores de éxito en base a teorías de cambio sustentadas por conocimiento, los que guían

el monitoreo de efectividad de la medida tomada, con énfasis en la mitigación de amenazas y recuperación de la biodiversidad. Este monitoreo es clave para la gestión adaptativa en base a resultados objetivos de conservación en el territorio, más allá del cumplimiento administrativo de la acción. Las acciones específicas de manejo fueron identificadas y definidas considerando la cooperación y asociatividad, siendo clave identificar acciones pertinentes a las amenazas y el modelo situacional, que puedan tener impacto amplio y que sean relevantes a la gestión de la conservación. Esto permite focalizar e invertir de mejor manera los siempre escasos recursos para la conservación. Finalmente, el proceso precisa de la identificación de actores clave para la implementación efectiva del plan, o en caso de no estar disponibles, proponer acciones estratégicas que ayuden en el proceso de generar capacidades humanas.

2.3. Elaboración participativa de los PdM-SNYL

El trabajo participativo se desarrolló mediante reuniones y talleres de trabajo con los propietarios y gestores del área (p. ej. Seremi MMA de la Región Metropolitana de Santiago, administradores privados, propietarios de los predios). En estos talleres se trabajó en la definición de la visión para el fundo, sus objetos de conservación y amenazas, a través de lluvias de ideas y discusiones grupales; en la validación de modelos situacionales; en la formulación tanto de objetivos de conservación para cada objeto, como de metas para cada amenaza priorizada; y en el desarrollo de estrategias para la conservación de los objetos en base a la reducción de las amenazas detectadas.

En una segunda etapa, se trabajó en la sistematización de la información, análisis y generación de propuestas de acciones de gestión para la conservación de la biodiversidad del SNYL. Para complementar este trabajo, se realizaron entrevistas semi estructuradas a actores clave, tales como habitantes históricos y otros usuarios de interés (p. ej. guardaparques, ganaderos, operadores turísticos), donde se indagó sus percepciones respecto de la biodiversidad del área, las amenazas presentes en el territorio y los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad y sus modos de vida.

2. Los modelos fueron desarrollados por MetOffice y se basaron en el archivo CMIP5, para la vía de concentración RCP 8.5.

Finalmente, se llevó a cabo un taller ampliado que congregó a todos quienes habían participado de los talleres previos, así como representantes de otras iniciativas en curso que pudiesen ser potenciales socios en la implementación de acciones. Durante este taller ampliado, se presentaron los resultados preliminares de los procesos de planificación por cada predio y se invitó a los participantes a comentar sobre las estrategias propuestas y discutir sobre los desafíos y oportunidades para la implementación de los planes de manejo, integrando estos comentarios en la versión final de propuestas.

3. RESULTADOS

3.1. Proceso participativo

En total, en el proceso de elaboración de los PdM-SNYL participó un total de 42 personas, considerando la ejecución de siete talleres, tres visitas a terreno y nueve entrevistas (Figura 4).

El trabajo de planificación en cada fundo se inició a través de una reunión de coordinación con sus propietarios y administradores, además de una visita de reconocimiento a los principales lugares de interés de cada área, que pudiesen estar asociados a sitios de alto valor para la conservación y/o tuviesen potencial de uso público. Posteriormente, se llevaron a cabo diversos

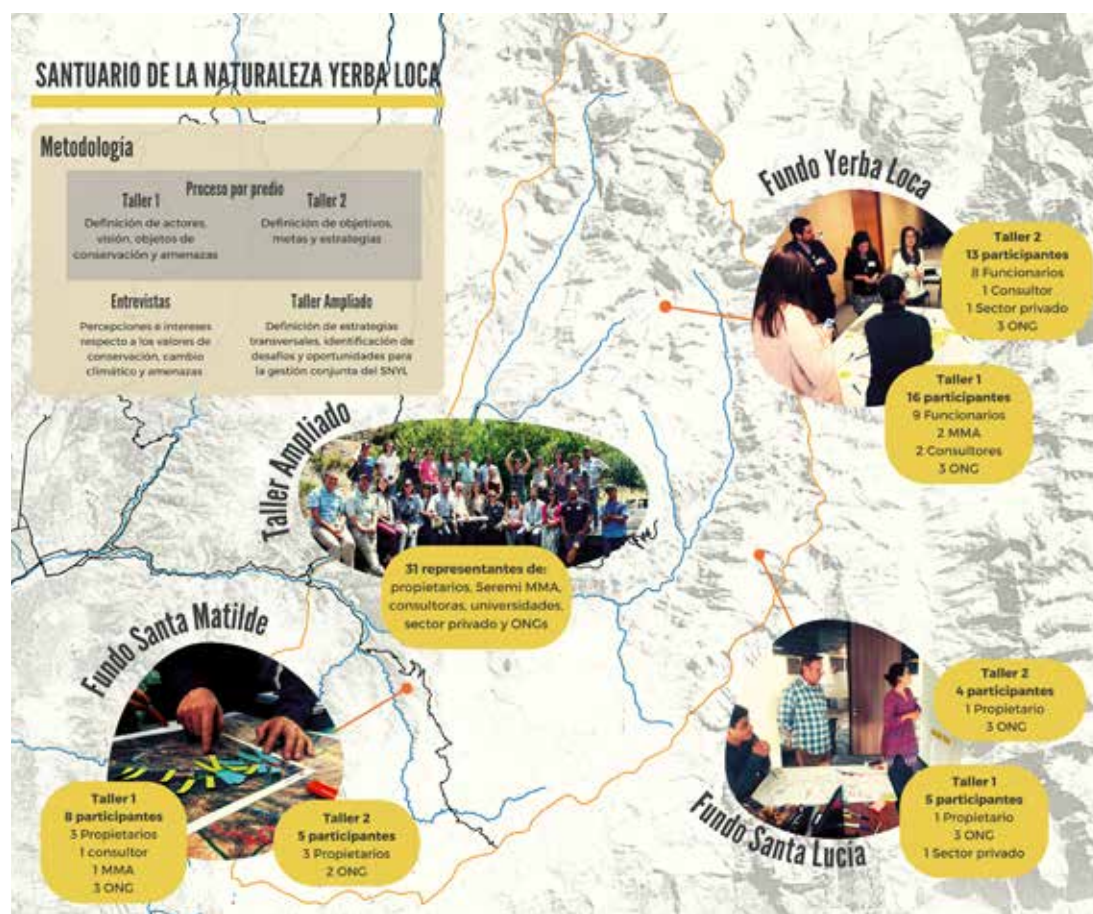


Figura 4. Resumen de la metodología y actividades del proceso participativo de planificación en predios del SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

talleres de trabajo para cada fundo, a los que asistieron sus propietarios, administradores y encargados de la elaboración del plan de manejo liderado por el MMA (Seremi MMA de la Región Metropolitana y consultores). En el caso del predio de la Municipalidad de Lo Barnechea, asistieron funcionarios municipales con competencia en la gestión del área (p. ej. Departamento de Montaña, Dirección de Medio Ambiente Aseo y Ornato, Sección de Higiene Ambiental). También se llevaron a cabo nueve entrevistas a actores clave del SNYL, tales como habitantes y otros usuarios de interés (p. ej. guardaparques, ganaderos y operadores turísticos), quienes expresaron diversas percepciones e intereses respecto a los valores de conservación, amenazas del área y efectos del cambio climático.

Al taller ampliado asistieron propietarios, Seremi MMA de la Región Metropolitana, consultoras, académicos, Anglo American y WCS, quienes aportaron con diferentes opiniones respecto a los procesos de

planificación de los predios, la definición de objetos de conservación, amenazas y estrategias. Asimismo, los participantes identificaron una serie de desafíos y oportunidades relativos a la implementación de los planes de manejo prediales del SNYL (Tabla 2), los que permitieron alimentar, posteriormente, las acciones estratégicas de los mismos.

3.2. Planificación del manejo predial

Las visiones establecidas para cada uno de los tres fundos del SNYL se centraron en las aspiraciones de desarrollo de los propietarios, en concordancia con el logro de los objetivos de conservación, considerando, además, las particularidades de cada área, lo que se describe en la Tabla 3.

Los objetos de conservación definidos para los predios del SNYL incluyen objetos biológicos como vegas, bosque esclerófilo y objetos culturales, como

Tabla 2. Desafíos y oportunidades para la implementación de los planes de manejo prediales del SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

Desafíos	Diversidad de actores e intereses
	Falta de confianza, cohesión y canales de comunicación entre actores relevantes
	Ausencia de un sistema de gobernanza
	Falta de mirada integral para la planificación territorial
	Marco legislativo pobre e inflexible
	Falta de capacidad de fiscalización de accesos y actividades
	Necesidad de financiamiento
	Falta de acceso a la información
	Falta de educación ambiental
Oportunidades	Alianzas con privados y otros actores para cubrir necesidades de planes de manejo
	Integración y sinergia entre los distintos predios del SNYL
	Municipalidad activa y competente dentro de los actores del SNYL con capacidad de impulsar ciertos procesos
	Promoción de capacitación y educación de montaña
	Presencia de una fuerte identidad cultural de montaña
	Generación de una estrategia de educación ambiental unificada para el SNYL, utilizando el territorio e iniciativas existentes
	Existencia de fuentes diversas de financiamiento
	Particularidades del territorio como oportunidad para su desarrollo integral
	Contexto actual habilitante para la implementación de los planes
	Desarrollo económico para el área

Tabla 3. Particularidades y visión de cada fundo del SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

Predio	Particularidades del área	Visión
Fundo Santa Lucía	<ul style="list-style-type: none"> - Ruta patrimonial incaica hacia cerro El Plomo - Presencia de ecosistemas altoandinos relativamente bien conservados - Espacio para la conservación a través del turismo y educación sustentables 	<p><i>"Protegido por el Santuario Inca del cerro El Plomo, el valle se abre como un lugar único, sagrado y recuperado para la ciudad de Santiago, siendo un destino de excelencia para el turismo sustentable* y un ejemplo de conservación en la zona central"</i></p> <p>*(Dirigido al uso público)</p>
Fundo Santa Matilde	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de ecosistemas boscosos y matorrales amenazados - Gran legado familiar para la cultura arriera - Potencial para el desarrollo turístico y recreativo en torno al río Molina 	<p><i>"Al alero del río Molina, el fundo Santa Matilde es un gran parque natural en la precordillera de Santiago, que promueve el disfrute de la naturaleza con respeto, la protección de la flora, la fauna y las tradiciones arrieras, a través del fomento productivo sustentable e innovador"</i></p>
Fundo Yerba Loca	<ul style="list-style-type: none"> - Importante contribución a la provisión hídrica de Santiago por glaciares y esteros - Gran foco de turismo, deporte, educación ambiental y cultura de montaña en la Región Metropolitana de Santiago 	<p><i>"Entre frangeles y llaretas, el Parque Andino Yerba Loca es un referente de la conservación del patrimonio ambiental y la cultura de montaña, que brinda bienestar e importantes servicios para la Región Metropolitana, a través de la educación y la recreación para un mundo sostenible".</i></p>



Figura 5. Vega (vegetación azonal) en fundo Santa Lucía, perteneciente al SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

restos arqueológicos, entre otros, cuyas principales características por las cuales fueron seleccionados, así como las presiones que ejerce el cambio climático sobre ellos, se describen en la Tabla 4.

Las amenazas más importantes a los objetos de conservación en los predios del SNYL incluyen incendios, especies exóticas invasoras, así como

actividades como ganadería o turismo no sustentable, entre otras, y se resumen en la Tabla 5.

Las modelaciones de los efectos del cambio climático en el área permiten proyectar que algunas amenazas podrían intensificarse, como es el caso de la amenaza “contaminación y extracción de agua” (Baeza, 2018). La consideración de este fenómeno

Tabla 4. Descripción y potenciales efectos del cambio climático sobre los objetos de conservación de los predios del SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

Objeto de conservación	Descripción	Consideraciones de cambio climático
Vegas (Figura 5)	<ul style="list-style-type: none"> - Contribuye a la regulación hídrica - Es hábitat de flora y fauna exclusivo a este tipo de vegetación 	Altamente vulnerables a los efectos del cambio climático, dada su alta fragilidad frente a perturbaciones en la disponibilidad de agua y las proyecciones de una disminución de ésta, tanto a nivel superficial como subterráneo (Squeo et al., 2006; MMA, 2011; Buonomo y Amato, 2017).
Bosque esclerófilo (Figura 6)	<ul style="list-style-type: none"> - Provee protección de laderas frente a degradación del suelo por erosión - Ecosistema altamente amenazado 	Se proyectan cambios en su rango de distribución y composición de especies, pudiendo algunas especies desaparecer de estos ecosistemas (IEB, 2010; ODEPA, 2013).
Sistema hidrobiológico (Figura 7)	<ul style="list-style-type: none"> - Contribuye a la integridad hídrica de las cuencas - Clave para la provisión de agua 	Modelaciones climáticas proyectan una disminución de las reservas de nieve, retroceso glaciar, disminución de temperaturas y mayores temperaturas, afectando la disponibilidad total de agua de la cuenca (Pizarro et al., 2013; Cassasa et al., 2015; Buonomo y Amato, 2017).
Restos arqueológicos y paleontológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Legado de culturas precolombinas - Flora fosilizada por estudiar 	El cambio climático podría agravar los procesos que producen daño a los sitios arqueológicos, debido a que su conservación depende de un equilibrio hidrológico, químico y biológico con el suelo que los contiene (UNESCO, 2009).
Cultura arriera	<ul style="list-style-type: none"> - Saberes y tradiciones de subsistencia en la montaña 	Los efectos del cambio climático, en cuanto a la disminución en la disponibilidad de agua y la consecuente disminución en la disponibilidad de talaje para el ganado, ponen en peligro la continuidad de la actividad.
Culturas de montaña	<ul style="list-style-type: none"> - Diversidad de formas de habitar y visitar la montaña, incluidas la cultura arriera, la cultura deportiva (montañistas, alpinistas, esquiadores), sus rutas y refugios 	El aumento de eventos de deslizamientos de tierra pondría en riesgo el acceso seguro a la montaña (Oterra, 2017). Sumado a esto, la disminución en la disponibilidad de agua y nieve podría promover un cambio en las prácticas deportivas en torno a la montaña.



Figura 6. Bosque esclerófilo en fundo Santa Matilde, perteneciente al SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.



Figura 7. Sistema hidrobiológico en fundo Yerba Loca, perteneciente al SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

Tabla 5. Amenazas a los objetos de conservación de los predios del SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central. V:vegas; B:bosque esclerófilo; H:sistema hidrobiológico; R:restos arqueológicos y paleontológicos; C:cultura arriera; M:cultura de montaña.

Amenazas principales	Predio		
	Fundo Santa Lucía	Fundo Santa Matilde	Fundo Yerba Loca
Riesgo de incendios	V,B,R	V,B	-
Ganadería no sustentable	V,B,H,R	V,B,H	V,B,H
Contaminación y extracción de agua	H,V	H	H
Turismo no regulado / malas prácticas de visitantes	V,B,H,R	V,B,H	V,B,H,M
Destrucción de material	R	-	-
Obras no reguladas	-	B	-
Especies exóticas invasoras	B,H	B,H	-
Perros libres	-	-	B
Pérdida de saberes	-	C	M
Operación minera no sustentable	-	-	V,H

permitió establecer metas plausibles para cada una de las amenazas identificadas. En el caso del SNYL, la disminución de la disponibilidad hídrica proyectada agravaría la presión de extracción de agua, al aumentar la brecha entre su oferta y demanda en la cuenca (Santibañez, 2018). Algo similar ocurriría para el caso de la contaminación, donde estos eventos serían más graves al haber menos disponibilidad de agua en el sistema y, en consecuencia, una menor capacidad de dilución de contaminantes (Baeza, 2018; Clavero et al., 2021).

Por otro lado, la mega sequía que afecta la zona central del país (Buonomo y Amato, 2017), ha obligado a disminuir la carga de ganado en veranadas

e invernadas producto de la falta de talaje³. Esta situación podría intensificarse debido a la disminución de la disponibilidad de agua asociado al fenómeno de cambio climático (Oterra, 2017). Esta situación genera, por un lado, impactos negativos sobre la persistencia de la cultura arriera, dada la menor carga de ganado, pero a su vez, disminuiría la presión sobre el sistema, siendo una oportunidad para regularizar la actividad y promover prácticas de manejo en las zonas de veranadas, mitigando así los daños que tiene la actividad sobre los recursos vegetacionales.

Para cada uno de estos objetos de conservación y amenazas, se identificaron los factores de causalidad que subyacen a ellas, cuyas relaciones

Las modelaciones de los efectos del cambio climático en el área permiten proyectar que algunas amenazas podrían intensificarse, como es el caso de la amenaza “contaminación y extracción de agua” (Baeza, 2018).

3. Percepciones rescatadas en entrevistas realizadas a dueños de ganado del SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

se representaron a través de modelos situacionales específicos, posicionados, integrados e informados por conocimiento (Figuras 8 a 10). Entre las principales similitudes identificadas en los predios destaca la dificultad en la gestión del agua, producto de sus diferentes usos en el área (consumo y operación de

centros de esquí) y la falta de un mecanismo de gestión y fiscalización adecuado. También destaca como similitud el manejo ganadero radicado en la práctica tradicional de esta actividad en la zona (Figura 11), cuyas cargas actualmente generan presión sobre los objetos de conservación a raíz de algunas prácticas no

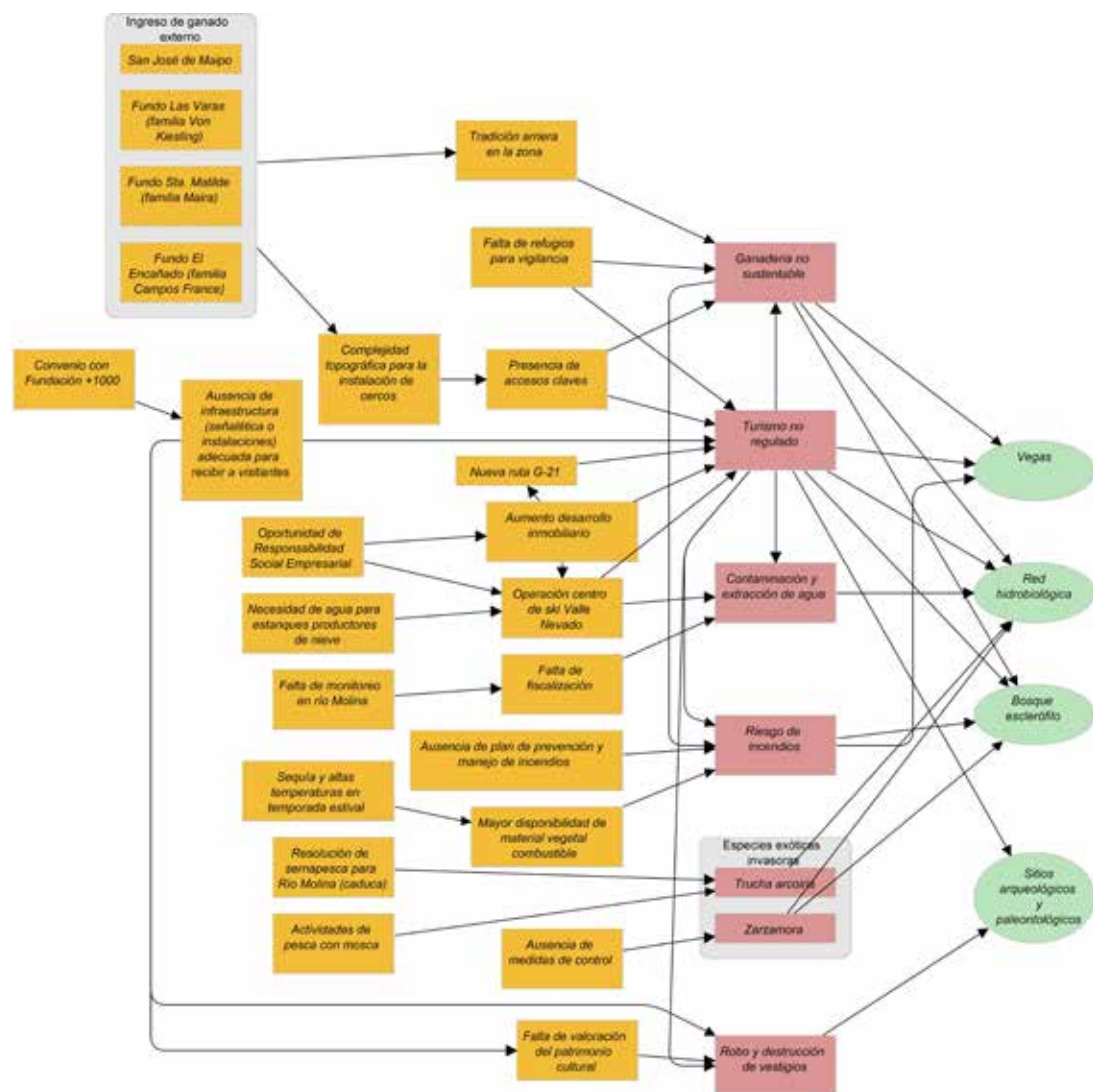


Figura 8. Modelo situacional del fundo Santa Lucía, perteneciente al SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central. Se señalan las relaciones causales entre factores contribuyentes (cajas naranjas) y las amenazas directas (cajas rosadas) a los objetos de conservación ecológicos y cultural (óvalos verdes).

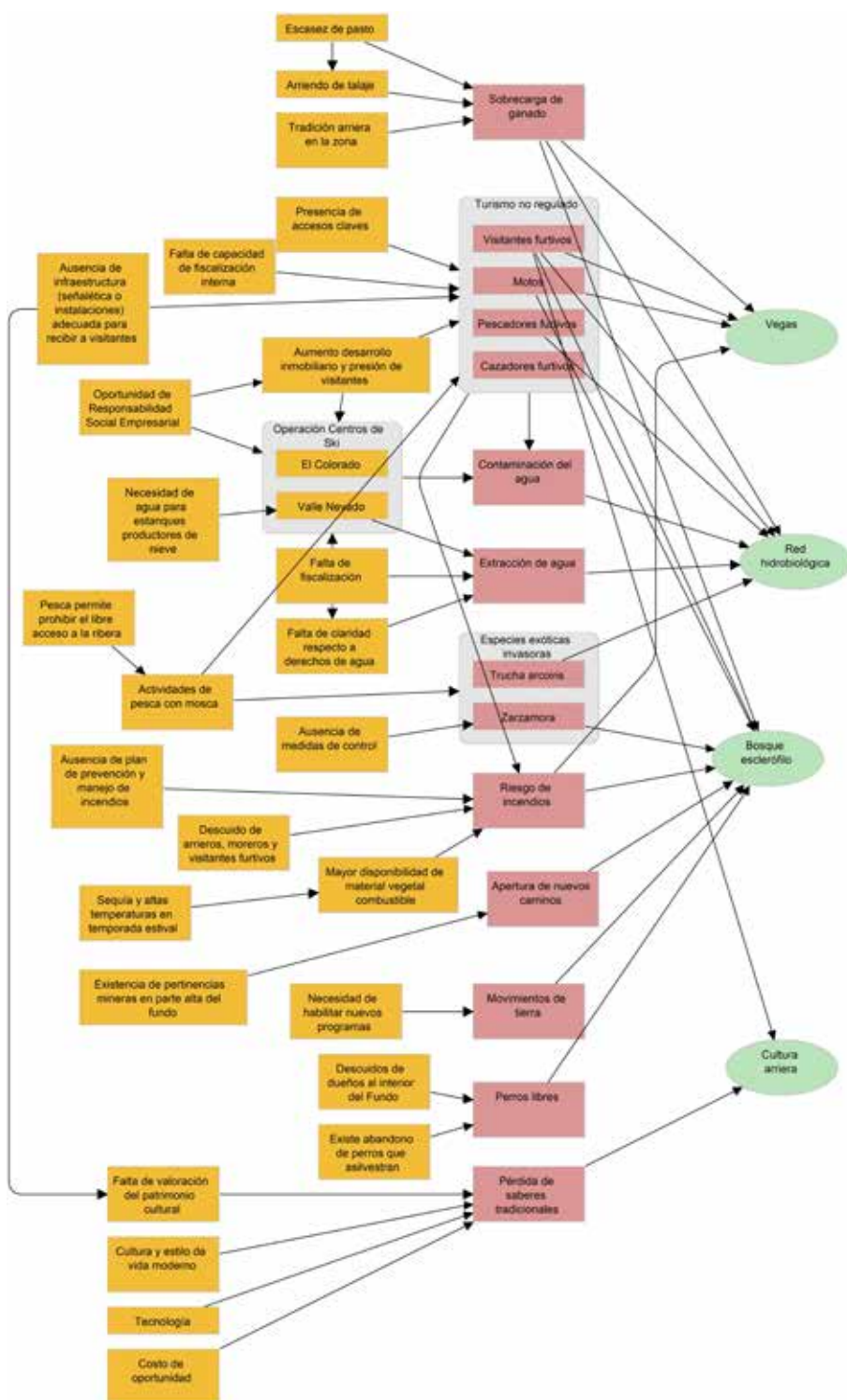


Figura 9. Modelo situacional del fundo Santa Matilde, perteneciente al SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central. Se señalan las relaciones causales entre factores contribuyentes (cajas naranjas) y las amenazas directas (cajas rosadas) a los objetos de conservación ecológicos y cultural (óvalos verdes).

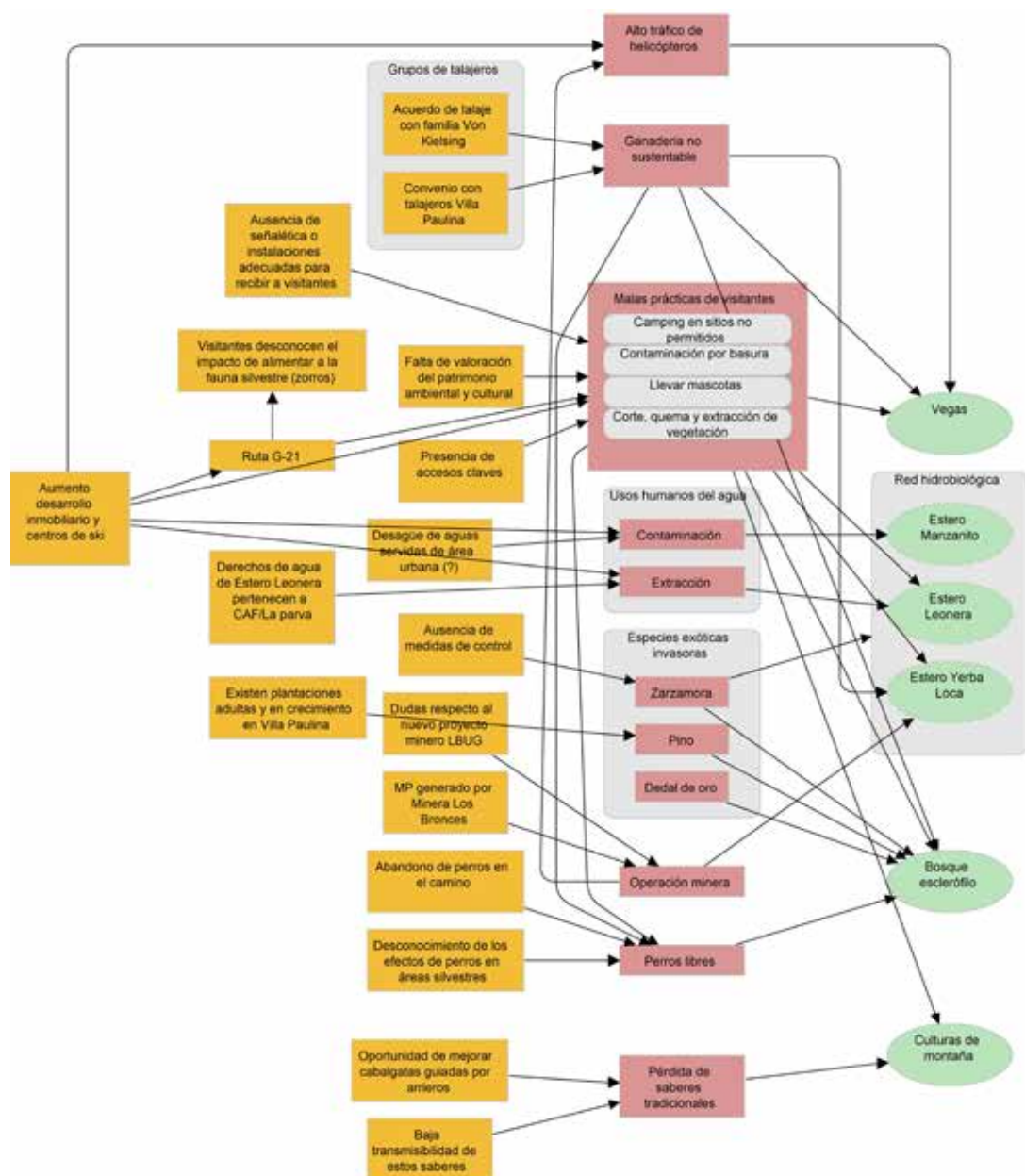


Figura 10. Modelo situacional de la cuarta hijuela del fundo Yerba Loca, perteneciente al SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central. Se señalan las relaciones causales entre factores contribuyentes (cajas naranjas) y las amenazas directas (cajas rosadas) a objetos de conservación ecológicos y cultural (óvalos verdes).

sustentables (p. ej. sobrepastoreo por arriando excesivo de talaje, ingreso a sitios ecológicamente sensibles) y la menor disponibilidad de forraje debido a la escasez hídrica y el aumento de temperaturas. Asimismo, destacan aspectos relacionados al uso por visitantes que derivan de la dificultad en regular el ingreso a sitios sensibles y las malas prácticas de los visitantes (p. ej. realización de fogatas, ingresos con mascotas y camping en sitios no permitidos) (Figura 12), lo que se suma a la falta de infraestructura y señalética para las visitas. Entre las principales diferencias de la situación de conservación de los predios, destaca el desarrollo de obras y actividades no reguladas en uno de los fundos (apertura de caminos y la habilitación de sitios para

la construcción de infraestructura de uso recreativo), así como también la influencia de la operación minera y de centros de esquí aledaños en otro de los fundos, derivada de la generación de material particulado y el alto tráfico de helicópteros, respectivamente.

En cada predio y para cada objeto de conservación y amenaza se establecieron respectivamente objetivos y metas específicas de conservación (véase Tablas 6 y 7 como ejemplo).

Dado que los fundos comparten los mismos objetos de conservación biológicos, así como también presentan amenazas comunes, pueden avanzar de

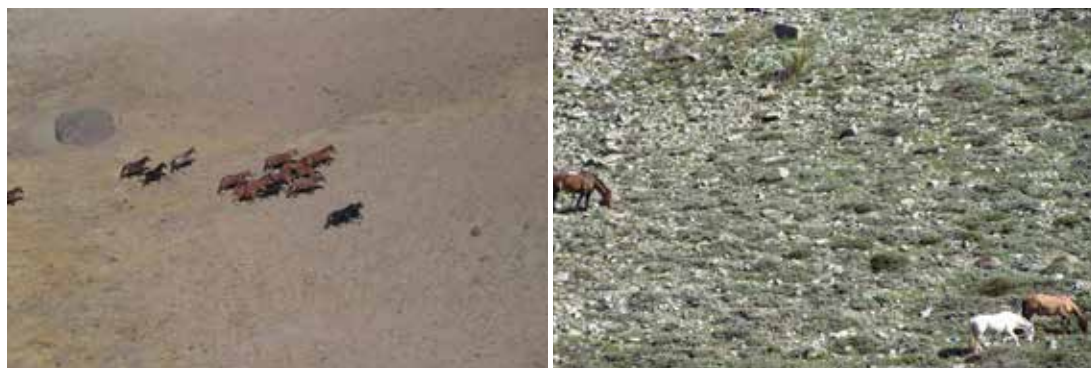


Figura 11. Ganadería extensiva en el SNYL. Fundo Santa Lucía (imagen izquierda) y fundo Yerba Loca (imagen derecha), comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.



Figura 12. Indicios de fogata en fundo Yerba Loca, perteneciente al SNYL comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

Tabla 6. Ejemplo de objetivos definidos para los objetos de conservación de los predios que conforman el SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

Objeto de conservación	Objetivo
Sistema Hidrobiológico	En 5 años, la red hídrica del fundo Santa Lucía mantendrá calidades fisicoquímicas* y caudales que permiten tanto mejorar la condición ecológica de las comunidades acuáticas** como contribuir a la provisión para el consumo humano. (*) La calidad del agua deberá ser acorde a lo establecido a la norma secundaria de agua para la cuenca del Maipo. (**) Vegetación de ribera, anfibios, avifauna y macroinvertebrados bentónicos.
Vegas	En 5 años, las vegas del fundo Santa Lucía continuarán brindando servicios ecosistémicos de regulación hídrica y como hábitat de especies sensibles y amenazadas.
Bosque esclerófilo	En 5 años, el bosque esclerófilo del fundo Santa Lucía mejorará su condición ecológica, aumentando su cobertura y regeneración natural.
Sitios arqueológicos y paleontológicos	En 5 años, los sitios arqueológicos y paleontológicos del fundo Santa Lucía se encuentran catastrados, y su integridad y existencia no ha disminuido.
Cultura arriera	En 5 años, la cultura arriera en el fundo Santa Matilde es reconocida, valorada y compartida con visitantes, manteniéndose vigente en las comunidades arrieras de la zona de montaña.
Cultura de montaña	En 5 años, en el Parque Andino Yerba Loca la cultura de montaña será reconocida, valorada y compartida en las comunidades tradicionales y modernas (montañistas), manteniéndose así vigente.

Tabla 7. Ejemplo de metas para las amenazas a los objetos de conservación presentes en los predios que conforman el SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central.

Amenazas a los objetos de conservación	Objetivo
Riesgo de incendios	Hacia 2025, se ha tenido una respuesta oportuna y planificada ante cualquier evento de incendio en el fundo.
Contaminación y extracción de agua	Hacia 2024, se ha tenido una respuesta oportuna y planificada ante cualquier evento de alteración de los cursos de agua (DGA, junta de vigilancia, Aguas Cordillera S.A., otros actores).
Ganadería no sustentable	Hacia 2025, se ha logrado disminuir el ingreso de ganado externo en un 60-80%, restringiéndolo al sector Ojos de Agua.
Turismo no regulado	Hacia 2025, el turismo en el fundo se encuentra formalizado en función del uso público y las malas prácticas se han controlado en un 60-80%.
Invasión de especies (zarzamora y trucha)	Hacia 2025, la densidad de zarzamora ha disminuido entre un 50-80% y la trucha no ha aumentado su distribución restringida al río Molina.
Robo y destrucción de material arqueológico y paleontológico	Hacia 2025, no se registran nuevas pérdidas ni destrucción de sitios y material arqueológico y paleontológico, en base a catastro inicial.
Pérdida de saberes	Hacia 2025, se desarrolla diversas alternativas de sustento para familias de arrieros locales que permiten rescatar y transmitir los saberes tradicionales, acercando a visitantes a la cultura arriera y al vínculo con la naturaleza.
Obras y actividades no reguladas	Hacia 2025, el 100% de las obras y actividades existentes en el fundo habrán sido evaluadas según la normativa ambiental y aquellas nuevas, seguirán una tramitación formal dentro del marco legal aplicable.
Operación minera	Hacia 2025, la operación minera y sus impactos potenciales cuenta con un plan de seguimiento público, con participación de la comunidad local y de las instituciones públicas competentes.
Perros de vida libre	Hacia 2025, se ha mejorado el estándar sanitario y reproductivo de perros de arrieros y vecinos del área urbana.

forma colaborativa hacia el logro de dichos objetivos y metas, a través de la implementación conjunta de las acciones diseñadas y del monitoreo integrado de sus variables, con la consecuente optimización de recursos. Con esta consideración, fue posible el diseño de lineamientos estratégicos con acciones comunes que permiten avanzar hacia la gestión territorial integrada del SNYL, estableciendo un mecanismo con el cual articular las acciones de conservación tanto en el terreno público como en los privados. Los principales lineamientos estratégicos se basaron en el abordaje integrado de amenazas prioritarias compartidas por los objetos de conservación, los que incluyeron: prevención y manejo

coordinado de incendios; protección del recurso hídrico; manejo de la ganadería; planificación del uso público; control de especies invasoras de zarzamora y trucha; restauración ecológica; protección y puesta en valor de sitios arqueológicos y paleontológicos; rescate y promoción de la cultura arriera; y reconocimiento y puesta en valor de la cultura de montaña (resumen en Figura 13).

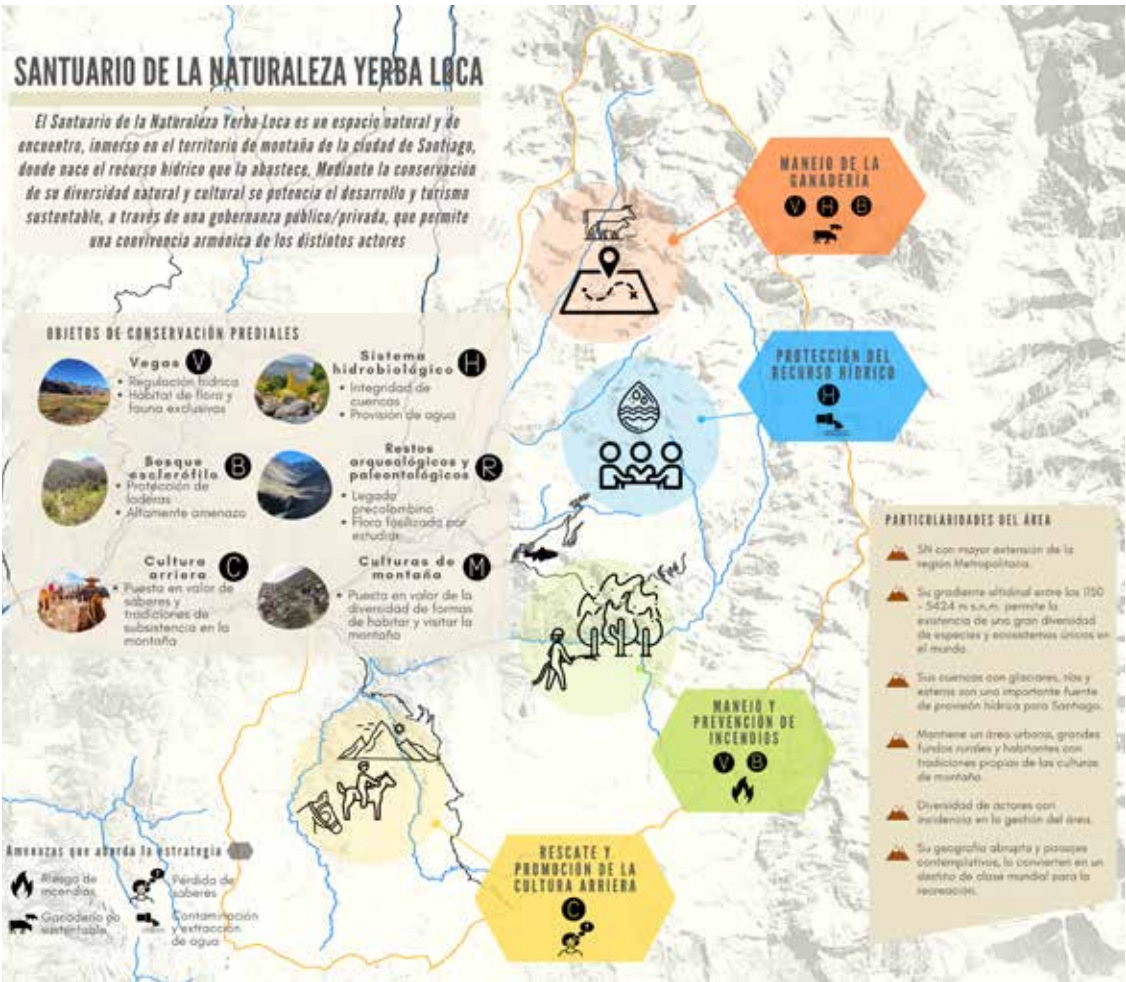


Figura 13. Principales estrategias integradas para la gestión efectiva de la conservación de la biodiversidad para el SNYL, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago, Chile central, y los principales predios que lo conforman.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La gestión efectiva de la conservación de la biodiversidad precisa de sistemas sólidos de planificación, gestión, seguimiento y aprendizaje, que permitan basar las acciones de conservación en el mejor conocimiento disponible, y el aprendizaje adaptativo y deliberado (CMP, 2020), particularmente en contextos de urgencia climática y de pérdida de biodiversidad. En particular, la gestión de conservación dentro de áreas protegidas es fundamental para aportar a la conservación de biodiversidad en el largo plazo, permitiendo el desarrollo e implementación de estrategias que reduzcan las amenazas que afectan a los valores naturales y culturales del área. Sin embargo, la efectividad de la gestión de la conservación dependerá de una serie de factores, tanto internos como externos al área, y de la habilidad de los gestores privados y públicos de reconocer e identificar aquellas tareas que son posibles de abordar según sus propias competencias y alcances, de articular con agentes externos cuando es pertinente, y activar tareas integradas y colaborativas en favor del objetivo común de conservación.

El proceso de avanzar hacia la gestión efectiva de la biodiversidad toma tiempo, partiendo por la activación de los procesos de planificación para la conservación al desarrollo de los contextos que permitan su implementación en los territorios. En este sentido, la elaboración de los planes de manejo prediales del SNYL constituye un avance hacia la planificación para la conservación de las áreas protegidas de Chile central, que ha permitido alimentar el proceso oficial llevado a cabo por el MMA y ha logrado sentar las bases para la gestión integral de este santuario en torno a su

manejo. Asimismo, el desarrollo de planes a nivel predial es un paso indispensable en el reconocimiento de la diversidad de capacidades, oportunidades, intereses y condiciones habilitantes de cada unidad. Esta situación es compartida por otros SN que están constituidos por diversos propietarios (p. ej. SN los Nogales, SN campo dunar de la Punta de Concón).

Una de las dificultades más importantes en la gestión de conservación del SNYL ha sido la falta de comunicación y entendimiento entre los propietarios que lo componen. Esto deriva, por un lado, de la ausencia de mecanismos (implícitos o explícitos) para la gestión integrada y coordinada del territorio como área protegida y, por otro, con una falta de incentivos y marcos legales que promuevan la conservación de biodiversidad en el país. Este fenómeno tiene reflejo en la ausencia de un mandato constitucional que reconozca y promueva el valor de la biodiversidad para el bienestar actual y futuro de la sociedad chilena (Galdámez et al., 2021), así como en la ausencia de otras piezas legislativas, como una Ley de biodiversidad y áreas protegidas.

La conservación efectiva de la biodiversidad precisa abordar la gestión de un territorio como el SNYL, en el que confluyen distintos actores de la sociedad, tanto públicos como privados, de forma integral. La planificación de conservación es una herramienta estratégica e indispensable para generar un marco común desde un sentido ecológico. Esto queda en evidencia en la zona de montaña de Lo Barnechea, con ecosistemas, procesos ecológicos, servicios ecosistémicos, especies y paisaje amenazados, así como amenazas comunes y transversales a los distintos fundos. No es casualidad que la definición de los objetos de conservación fuese similar en los diferentes

La conservación efectiva de la biodiversidad precisa abordar la gestión de un territorio como el SNYL, en el que confluyen distintos actores de la sociedad, tanto públicos como privados, de forma integral.

procesos, considerando que todos ellos representan elementos clave para el sostenimiento de estructuras socio-ecológicas que permiten la mantención de ecosistemas y de aspectos esenciales del bienestar de las personas que se vinculan a los diferentes predios. Al mismo tiempo, muestra la robustez de la metodología aplicada, la que independientemente de los procesos, permite identificar amenazas y valores de conservación comunes. Ello, a pesar de que cada propietario tiene distintos intereses y capacidades.

El proceso, actualmente en curso, mediante el cual el MMA espera entregar un instrumento de gestión de la conservación único para el SNYL, espera nutrirse de la planificación predial compartida acá. El desafío, sin embargo, de fortalecer y promover un trabajo colaborativo entre los propietarios, es una tarea por construir. Ello por cuanto requiere de grandes esfuerzos financieros y humanos para la gestión de las áreas protegidas, que son elementos escasos en Chile (Saieh, 2015).

A pesar de que uno de los aspectos clave para la gestión exitosa de conservación es el desarrollo de estructuras de gobernanza robustas, que integren a los actores relevantes no sólo en los territorios, sino a otras escalas de gestión como nacional o regional, esta es una tarea todavía pendiente en la zona central de Chile, donde existen escasos ejemplos de gestión de conservación. En este contexto, el desarrollo de modelos de gestión integrada de conservación, que promuevan la coordinación entre diversos propietarios de áreas protegidas y agencias del Estado como el MMA, representa un aporte significativo que va en el sentido correcto. Más aún, dado que el trabajo de planificación de EC no tiene como objetivo generar un documento, sino establecer un proceso participativo que pueda servir de pivote para la posterior implementación de las tareas de conservación. El trabajo de planificación integrada para el SNYL desarrollado por WCS, permitió reconocer a múltiples actores clave, tanto públicos como privados, convocándolos en espacios cuidados de discusión respecto a los desafíos y oportunidades para la gestión efectiva del SNYL, y los diversos roles que cada actor tiene en ella. Asimismo, se destacó la necesidad de generar y fortalecer alianzas para avanzar en la protección y puesta en valor de los valores naturales y culturales del área, en conjunto con abrir espacios para compartir aprendizajes y generar confianzas entre actores con visiones comunes.

Finalmente, es importante destacar que, a pesar de la contribución significativa que resulta de la acción informada y coordinada de conservación por parte de actores privados como los aquí mencionados, ella no reemplaza la tarea del Estado. La urgencia y la magnitud de los desafíos de conservación de la biodiversidad de Chile central precisan de un actor que pueda velar por la generación del bien común, convocar a todos los actores relevantes y catalizar con incentivos y apoyos específicos la articulación de todos los actores de la sociedad civil en torno a la tarea siempre compleja e integrada de la conservación. Casos como el expuesto acá, donde propietarios de parte del SNYL ni siquiera estaban en conocimiento de las condicionantes que dicha designación impone sobre la gestión de su propiedad, o la falta de financiamiento para activar y monitorear tareas específicas de conservación, son condiciones que deben ir siendo subsanadas y favorecidas por el liderazgo del Estado. Lo anterior, junto con el desafío de encontrar estrategias que concilien los usos del área con sus objetivos de conservación, manteniendo expectativas realistas de las actividades que se pueden desarrollar en cada predio, en el sentido de promover el compromiso sostenido de los propietarios en la implementación de las medidas para la conservación de la biodiversidad local, en beneficio de las generaciones actuales y futuras del país.

AGRADECIMIENTOS

WCS agradece a todas aquellas personas e instituciones que participaron de los procesos de elaboración de los planes de manejo prediales del SNYL, incluyendo a sus propietarios, administradores, guardaparques, usuarios y autoridades gubernamentales.

REFERENCIAS

- Ahumada, M., Aguirre, F., Contreras, M., y Figueroa, A. Chile. Ministerio del Medio Ambiente (MMA, SAG, DGA). (2011). *Guía para la conservación y seguimiento ambiental de humedales andinos*. Recuperado de <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26045>
- Arroyo, M. T. K., Marticorena, C., Matthei, O., Muñoz, M., y Pliscoff, P. (2002). Analysis of the contribution and efficiency of the Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, 33° S in protecting the regional vascular plant flora (Metropolitan and Fifth regions of Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 75(4), 767–792. [Doi.org/10.4067/s0716-078x2002000400012](https://doi.org/10.4067/s0716-078x2002000400012)
- Baeza, E. (2018). Situación de los recursos hídricos en Chile. Asesoría Técnica Parlamentaria. Recuperado de https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25323/2/Informe_Recurso_Hidricos_en_Chile.pdf
- Buonomo, E., y Amato, R. (2017). Los Bronces Chilean climate and water availability project: Final analysis and conclusions. Met Office Hadley Centre. Reporte confidencial.
- Cassasa, G., Apey, A., Bustamante, M., Marangunic, C., Salazar, C., y Soza, D. (2015). Contribución hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del río Maipo. En *Actas XIV Congreso Geológico Chileno* (pp. 768–772). La Serena, Chile: Colegio de Geólogos de Chile A.G.
- Clavero, J., Droguett, B., Bambach, N., Pérez-Martínez, W., Aguirre, I., Ramírez, V., Vidal-Páez, P., Briceño-Urbaneja, I., y Tamayo, A. (2021). Remociones en masa asociadas a lluvias intensas (rainfall-induced) en escenarios de cambio climático en la cuenca del estero Yerba Loca, Chile central. En Ascanio, R., Orrego, F., Ginocchio, R., y de la Fuente, L. M. (Eds.), *Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho* (pp. 82–113). Anglo American y CAPES. Santiago, Chile
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). (2008). *Biodiversidad de Chile: Patrimonio y desafíos*. Ocholibros Editores. Santiago. Chile.
- Conservation Measures Partnership (CMP). (2020). Open standards for the practice of conservation. Versión 4.0. Recuperado de <http://conservationstandards.org/wp-content/uploads/sites/3/2020/12/CMP-Open-Standards-for-the-Practice-of-Conservation-v4.0-English.pdf>
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2017). *Manual para la planificación del manejo de las áreas protegidas del SNASPE*. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo. Santiago, Chile.
- Decreto 937 de 1973 [Ministerio de Educación Pública]. Declara santuario de la naturaleza al fundo “Yerba Loca”, comuna de Las Condes, provincia de Santiago. 24 de julio de 1973. Ministerio de Educación Pública.
- Galdámez L, Millaleo, S., y Saavedra, B. (Eds.). (2021). *Una constitución socioecológica para Chile: Propuestas integradas*. Red de Constitucionalismo Ecológico. Pehuén. Santiago, Chile.
- Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB). (2010). Estudio de vulnerabilidad de la biodiversidad terrestre en la eco-región mediterránea, a nivel de ecosistemas y especies, y medidas de adaptación frente a escenarios de cambio climático. Licitación N°1588-133-LE09. Recuperado de <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26033>
- Luebert, F., y Pliscoff, P. (2017) *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile* (2da ed.). Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
- Maxwell, S. L., Cazalis, V., Dudley, N., Hoffmann, M., Rodrigues, A. S. L., Stolton, S., Visconti, P., Woodley, S., Kingston, N., Lewis, E., Maron, M., Strassburg, B. B. N., Wenger, A., Jonas, H. D., Venter, O., y Watson, J. E. M. (2020). Area-based conservation in the twenty-first century. *Nature*, 586(7828), 217–227. [Doi.org/10.1038/s41586-020-2773-z](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2773-z)
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press. Washington, DC, Estados Unidos.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2018). *Biodiversidad de Chile. Patrimonio y Desafíos* (3ra ed.). Santiago, Chile.
- Moya, D., Herreros, J., y Ferreyra, J. (2014). *Representatividad actual de los pisos vegetacionales en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas y de sitios*

prioritarios para la conservación en Chile. Documento de Trabajo. Proyecto MMA / GEF-PNUD Creación de un Sistema Nacional de Áreas Protegidas para Chile: Estructura Financiera y Operacional. Santiago, Chile.

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., y Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>

Noss, R. F. (1990). Indicators for Monitoring Biodiversity: A Hierarchical Approach. *Conservation Biology*, 4(4), 355–364. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1990.tb00309.x>

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2013). Estudio: “Cambio Climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía”. Informe Final. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/12/cambioClimatico2013.pdf>

Oterra Universidad Mayor. (2017). Case Study Climate Change Risk Analysis.

Pizarro, R., Balocchi, F., Vera, M., Aguilera, A., Morales, C., Valdés, R., Sangüesa, C., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., y Olivares, C. (2013). Influencia del cambio climático en el comportamiento de los caudales máximos en la zona Mediterránea de Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(2), 05–19. Reporte confidencial.

Pliscoff, P. (2009). Análisis de Representatividad Ecosistémica de las Áreas Protegidas Públicas y Privadas en Chile. En GEF-CONAMA-PNUD (Eds.), *Creación de un Sistema Nacional Integral de Áreas Protegidas para Chile: Documentos de trabajo* (pp. 25–100). Recuperado de https://issuu.com/proyectogefchile/docs/documento_de_trabajo

Pliscoff, P. (2015). Aplicación de los criterios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) para la evaluación de riesgo de los ecosistemas terrestres de Chile. Recuperado de https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/08/Informe-final-Eval-ecosistemas_publicacion_16_12_15_sfm.pdf

Saavedra B., y Simonetti, J. (2011). Private Conservation. The example that Wildlife Conservation Society Builds from Tierra del Fuego. En E. Figueroa. (Ed.), *Biodiversity Conservation in the Americas: Lessons and Policy Recommendations* (pp. 357–392). Editorial FEN-Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Saieh, R. (2015). Informe Final. Asesoría en Gestión Estratégica para la Sostenibilidad Financiera del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Chile. Proyecto GEF-PNUD-MMA. Recuperado de https://issuu.com/proyectogefchile/docs/documento_de_trabajo

Santibañez, F. (2018). Reflexiones y Desafíos al 2030: Perspectiva de especialistas externos. El Cambio Climático y los Recursos Hídricos de Chile. Recuperado de <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/9160>

Sector Sanitario de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). (2020). Informe de Gestión del Sector Sanitario de la Superintendencia de Servicios Sanitarios. Recuperado de https://www.siss.gob.cl/586/articles-19431_recurso_1.pdf

Stehberg, R., y Sotomayor, G. (2012). Mapocho Incaico. *Boletín Museo Nacional De Historia Natural*, 61, 85–149.

Stein, B.A., Glick, P., Edelson, N., y Staudt, A. (Eds.) (2014). *Climate-Smart Conservation: Putting Adaptation Principles into Practice*. National Wildlife Federation. Washington D.C., Estados Unidos.

Squeo, F., Warner, B., Aravena, R., y Espinoza, D. (2006). Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79(2), 245–255. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2006000200010>

UNESCO (2009). *Cambio climático y patrimonio mundial*. Paris, Francia.

Wildlife Conservation Society (WCS). (2015). *Análisis, adaptación y sistematización de estándares para la planificación del manejo en Iniciativas de Conservación Privada y Áreas Marinas Costeras Protegidas de Múltiples Usos*. Proyecto MMA / GEF-PNUD "Creación de un Sistema Nacional Integral de Áreas Protegidas para Chile: Estructura Financiera y Operacional". Recuperado de <http://biblioteca.cehum.org/handle/123456789/191>

Wildlife Conservation Society (WCS). (2020). Planes de Manejo prediales del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. Lo Barnechea, región Metropolitana, Chile. Período 2020-2024. Reporte confidencial.



Glosario



α -diversidad: riqueza o número total de especies a nivel local, o en sitio en particular.

β -diversidad: concepto que alude a la organización u ordenamiento espacial de la diversidad de especies al interior de una región.

γ -diversidad: riqueza o número total de especies a nivel regional.

Altoandinos: referidos a las altas cumbres de la cordillera de los Andes en todo el oeste de América del Sur.

Andesita porfídica: roca ígnea volcánica con un alto contenido de sílice (52%-63%) y de textura porfídica; o sea con abundantes fenocristales de plagioclasa (de color gris-blanco) flotando en una masa micro-cristocristalina (incolores y transparente).

Arriero: persona que guía al ganado de un lugar a otro aprovechando al máximo los recursos que la zona permite. El arriero vela por la seguridad y alimentación del ganado.

Anidamiento: distribución espacial consistente en que un área o comunidad está conformada por un subconjunto de especies de otra comunidad más diversa.

Arco magmático: franja elongada, geoméricamente paralela al contacto convergente (subducción) entre placas tectónicas, formado por una alineación o cadena de volcanes y por cuerpos intrusivos emplazados a diversas profundidades.

Biodiversidad: variedad y variabilidad de la vida en sus tres dimensiones (composicional, estructural y funcional) y niveles jerárquicos (genes, poblaciones, ecosistemas y paisajes). Es la base fundacional que origina y sustenta una amplia gama de servicios ecosistémicos indispensables para la supervivencia y bienestar humanos.

Briófita: planta del grupo de las criptógamas con tallos y hojas, pero sin vasos vasculares ni raíces verdaderas. Absorben el agua y los nutrientes por sus hojas. Un ejemplo son los musgos.

Casa de Piedra: características de la cordillera de los Andes, en Chile y Argentina, son construcciones en torno a una roca funcional a ser completada con murallas de piedra. Construidos desde los tiempos prehispánicos fueron utilizados como refugio por pastores y arrieros.

Chingana: principal espacio de sociabilidad popular y entretenimiento durante el siglo XIX y parte del siglo XX en Chile en el que se une el canto, baile, la comida, el trago

y el juego. Etimológicamente, proviene del quechua "chincana", que quiere decir escondrijo, aunque algunos lo adjudican a la acepción "chingar", vocablo que significaba beber con frecuencia vinos o licores.

Clasificación fitosociológica: es un método que analiza las especies de una comunidad vegetal y las agrupa en asociaciones que presentan una combinación de taxones característicos.

Conservación efectiva: se refiere al resultado tangible de recuperación de biodiversidad degradada en cualquiera de sus dimensiones o componentes, en ecosistemas terrestres, marinos o acuáticos. Ella implica conocer cómo se manifiesta el éxito de medidas implementadas, bajo qué escenario o contextos funcionan, cómo es posible adaptarlas oportunamente para tener un impacto mayor en conservación.

Cultura Aconcagua: se refiere a una población precolombina agro alfarera que habitaba Chile entre los ríos Aconcagua y Cachapoal (900-1540 d. C.).

Curva hipsométrica: distribución estadística de la topografía de una cuenca, obtenida mediante el cálculo del área de la superficie en función de la elevación. Se relaciona con la etapa de desarrollo geomorfológico en la que se encuentra la cuenca.

Depósitos de pórfidos de cobre: tipo de mineralización de origen magmático e hidrotermal que constituyen la principal fuente de extracción tanto de cobre como de molibdeno. Se pueden subdividir en dos grupos: los yacimientos donde prima el molibdeno y aquellos donde prima el cobre, también conocidos como Mo-(Cu) y Cu-(Mo), respectivamente. El nombre pórfido refiere a su típica asociación a rocas de textura porfírica, de grandes feldespatos y una matriz fina.

Discordancia: superficie de contacto entre dos unidades de roca que representa un *gap* o *hiatus* en la depositación debido a erosión, meteorización y/o no depositación.

Distribución simpátrica: es un tipo de distribución en que dos o más especies comparten la totalidad o gran parte de su rango distribucional. También se aplica para señalar que dos o más especies co-ocurren en una región geográfica determinada, independientemente de sus respectivos rangos.

Edáfico: perteneciente o relativo al suelo; resultante de o influido por factores del suelo o de otros substratos en lugar de por factores climáticos.

Efecto nodriza (de las plantas): ocurre cuando una planta facilita el establecimiento de plántulas (ya sea de su misma especie u otras) bajo o entre su dosel, ya que ofrece condiciones más favorables para la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas.

Endémica: corresponde a una especie que crece solo en un área o territorio determinado; en este caso se refiere a una especie que crece naturalmente solo en Chile.

Especies dominantes: seres vivos que ejercen una gran influencia sobre la composición y la forma de una comunidad biológica. Se trata de especies de gran éxito ecológico y abundantes dentro del grupo comunitario.

Especies nativas: corresponden a especies indígenas o autóctonas que pertenecen a una región o ecosistema determinados, en el ámbito de la biogeografía.

Forma de vida (de las plantas): concepto propuesto por Raunkiaer en 1934, que denota la apariencia general de las plantas y las clasifica de acuerdo a la posición de las yemas u órganos de renuevo, a partir de los cuales se desarrollarán nuevos brotes o follaje; considera cinco hábitos o formas de vida: árbol o fanerófita, arbusto o caméfito, hierba perenne geófito, hierba perenne hemicriptófita y hierba anual o terófito.

Formaciones vegetales azonales: tipo de vegetación que está asociada a factores locales de sitio, específicamente a la presencia permanente de humedad o anegamiento constante, como los bofedales y las vegas altoandinas.

Franja metalogénica: área geográfica de generación de depósitos de minerales en eras geológicas pasadas (p. ej. Mioceno-Plioceno) y por ende con concentración de metales, donde se ubican los yacimientos metalíferos en el territorio.

Geoforma: forma del relieve, caracterizada por ser un cuerpo tridimensional que tiene forma, tamaño, volumen y topografía definida, generada por procesos morfogenéticos endógenos y exógenos.

Hemicriptófita: categoría de forma de vida vegetal según el sistema de Raunkiaer. Se refiere a las plantas que dejan sus yemas de renuevo a nivel del suelo, lo cual les permite sobrevivir a estaciones adversas.

Hijuela: terreno o parcela en la que se divide un fundo.

Hotspot de biodiversidad: se definen como regiones donde se concentra un mínimo de 1.500 especies de plantas vasculares endémicas —equivalente al 0,5 por ciento del total de plantas vasculares en el mundo—, una alta proporción de vertebrados endémicos, y en donde el hábitat original ha sido fuertemente impactado por las acciones del ser humano. El hotspot descrito para Chile, abarca el Norte chico y la zona central, incluyendo los bosques lluviosos tipos Norpatagónico y Valdiviano, bosques deciduos dominados por varias especies de *Nothofagus* (*N. obliqua*, *N. alessandri*, *N. macrocarpa*),

el bosque esclerófilo típico y matorrales del área de clima mediterráneo de Chile central, los desiertos de lluvia de invierno del Norte Chico, y la flora altoandina que se desarrolla por sobre la línea arbórea o su equivalente fitogeográfico en la cordillera de los Andes y en la cordillera de la Costa.

Hummock: rasgo morfológico de montículos y crestas que caracterizan la superficie de depósitos de deslizamiento de suelo y/o roca; y avalanchas de detritos.

Mioceno-Plioceno Superior: divisiones de la escala temporal geológica de la era Cenozoica. El Mioceno abarca desde los 23 a los 5,3 millones de años atrás, mientras que el Plioceno abarca desde los 5,3 a los 1,8 millones de años atrás. En el Mioceno surgieron diversas cordilleras montañosas y fue una etapa con una gran expansión a nivel biológico, donde existieron grandes variedades de mamíferos. En el Pleistoceno ocurrieron grandes glaciaciones, apareció el hombre moderno y se extinguieron mamíferos de gran tamaño como el mamut y el mastodonte.

Morfometría: medición y análisis matemático de la configuración de la superficie terrestre, la forma, tamaño, propiedades hidrológicas, erosivas y físicas del relieve y suelo de una cuenca. Entrega información sobre las características del sistema de drenaje, patrón topográfico, dimensión de las formas del relieve, control litológico y estructural del patrón de drenaje.

Muestreo geobotánico: inventario realizado en terreno, sobre parcelas de estudio de interés definidas, en las cuales se determina al mismo tiempo las especies de plantas presentes y las características fisicoquímicas del suelo sobre el cual crecen esas especies vegetales identificadas.

Objetos de conservación: entidades tangibles que son el foco de un proyecto de conservación y hacia las cuales se dirigen los objetivos finales. Son la base para el establecimiento de metas, el diseño de acciones y la medición de la efectividad. En general, corresponden a estructuras o procesos ecológicos como hábitats, especies o procesos ecológicos clave, que representan y abordan el conjunto completo de la biodiversidad dentro del alcance del proyecto. No obstante, también pueden ser foco del proyecto aspectos culturales materiales (p. ej. sitios arqueológicos) y no-materiales (p. ej. tradiciones) y/o a aspectos clave del bienestar humano (p. ej. salud respiratoria, acceso a agua).

pH: medida que indica la cantidad de iones de hidrógeno en una solución, por ejemplo, en el agua. La cantidad de iones determinará si una solución es ácida (menor valor), neutra (pH 7,0) o básica (mayor valor).

Plantas metalófitas: plantas que pueden tolerar contenidos elevados de metales en el suelo (p. ej. cobre, níquel, cadmio, plomo), los que son normalmente tóxicos para la mayoría de las plantas. Dentro de este tipo de plantas están las metalófitas obligadas, las que sólo crecen en suelos con contenidos elevados de metales, y las metalófitas facultativas, las que pueden vivir en suelos con contenidos normales y con contenidos elevados de metales en el suelo.

Pórfidos de cobre: tipo de mineralización de origen magmático e hidrotermal (minerales cristalizados a partir de una solución acuosa y caliente de origen magmático o volcánico). Estos minerales constituyen la principal fuente de extracción de cobre.

Recambio: Distribución espacial consistente en que un área o comunidad está conformada por un conjunto de especies que es reemplazado en otras comunidades.

Régimen tectónico compresivo: concepto que engloba el campo de estrés de la corteza en el cual se genera principalmente compresión (con ejes perpendiculares a la orientación del esfuerzo principal) y que conlleva a la formación de pliegues y fallas esencialmente de movimiento inverso, de gran relevancia en la formación de cadenas montañosas, como por ejemplo los Andes.

Reptiles: agrupación de estatus de Clase de los vertebrados, que incluye organismos que poseen escamas y un desarrollo en tipo de huevo amniota. Incluye los siguientes órdenes taxonómicos: Crocodylia; Rhynchocephalia; Squamata; Testudines. En Chile continental, su biodiversidad se encuentra representada solo por Squamata, orden al que pertenecen los lagartijas (algunos llamados lagartos) y culebras.

Riqueza: es el número total de especies que habita un lugar determinado.

Rizoma: tallo subterráneo de ciertas plantas, generalmente horizontal, que por un lado echa ramas aéreas verticales y por el otro, raíces.

Sistema geomorfológico: conjunto de características de las formas del relieve y sus interrelaciones. Tienen comportamientos complejos y su estado de equilibrio está condicionado a los cambios en el medio ambiente y la influencia de procesos de erosión y sedimentación.

Vástago: unidad formada por las hojas y el tallo de una planta; o sea las estructuras vegetativas de una planta que se desarrollan sobre el suelo (aéreas).



