



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

**CARTA GEOMORFOLÓGICA Y DINÁMICA SEDIMENTARIA DE LA CUENCA DE LA
LAGUNA LO ENCAÑADO (33°40'S-70°8'O), REGIÓN METROPOLITANA.**

Memoria para optar al título profesional de geógrafa

ANDREA IGNACIA URZÚA FLORES

Profesor Guía: Dr. Pablo Sarricolea

Profesora Co-Guía: Dra. Magdalena Fuentealba

SANTIAGO – CHILE

2022

Agradecimientos

*Esta memoria está dedicada a ti papá,
el guerrero más grande del mundo*

A MI FAMILIA

Resumen

Cambio Global ha traído serios problemas a nivel mundial, lo que está produciendo cambios en la superficie terrestre. Entre estos cambios se pueden destacar los que tienen relación con características geomorfológicas, lo cuales pueden desencadenar riesgos geomorfológicos por los procesos actuales de la evolución terrestre y el relieve. Los cambios en la superficie terrestre se ven reflejados en los lagos, ya que estos son considerados como reservorios de los sedimentos y materia orgánica que proviene de las cuencas. Lo cual es importante considerando que tienen la capacidad de almacenar información de los procesos que ocurren en la superficie.

La presente memoria aborda el análisis en la dinámica cuenca-lago de la Laguna lo Encañado (33°40'S-70°8'O, 2489 m.s.n.m.) a partir de la construcción de una carta geomorfológica y la relación que tiene con la secuencia sedimentaria lacustre. Esta información sirve para conocer y comprender la geomorfológica del lugar y cómo se comporta la cuenca con el análisis de sus sedimentos encontrados en la laguna.

Conceptos clave: Carta geomorfológica, Dinámica sedimentaria, Cambio Global, Lagos, Riesgos Geomorfológicos.

Índice de contenido

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	8
1.1 Introducción	8
1.2 Planteamiento del problema y estado del asunto.....	9
1.2.1 Cambio Global	9
1.2.2 Riesgos Geomorfológicos	10
1.2.3 Lagos.....	11
1.3 Área de estudio	13
1.3.1 Climatología.....	14
1.3.2 Geología.....	15
1.3.3 Vegetación.....	17
1.4 Objetivos	19
1.4.1 Objetivo general.....	19
1.4.2 Objetivos específicos	19
CAPÍTULO 2: METODOLÓGICO	20
2.1 Elaborar una carta geomorfológica de la cuenca de la laguna lo Encañado	20
2.2 Analizar y correlacionar los testigos sedimentarios de la secuencia de Laguna lo Encañado.....	22
2.3 Establecer relaciones entre la carta geomorfológica y los aportes sedimentarios del lago.	25
CAPÍTULO 3: RESULTADOS	27
3.1 Carta geomorfológica	27
3.1.2. Pendiente.....	28
3.1.3 Perfiles	30
3.1.4. Unidades identificadas en la cartografía.....	33
3.2 Analizar los testigos sedimentarios de la secuencia de Laguna lo Encañado.....	43
3.3 Relaciones entre la carta geomorfológica y los aportes sedimentarios del lago	55
3.3.1 Relación de unidades geomorfológicas con la carta geológica	56
CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	58
4.1 Discusión.....	58
4.2 Conclusión	59
CAPÍTULO 5: BIBLIOGRAFÍA	61
Anexos	65

Índice de figuras

Figura 1. Aspectos que aportan al Cambio Global. (<i>Cambio Global: una mirada desde la biología</i> , Cabrera, 2019).	9
Figura 2. Principales fenómenos de remoción en masa en Chile. Fuente: Hauser et al., 1993.	11
Figura 3. Localización de Laguna lo Encañado (33°40'S 70°8'W, 2489 msnm). De régimen nival, recibe los máximos aportes durante la primavera austral (octubre-diciembre). Sus afluentes son Estero del Manzanito y recibe aportes por infiltración de Laguna Negra ubicada al norte.	13
Figura 4. Zonas Climáticas de la Región Metropolitana según Köppen-Geiger, IDE, 2019.	14
Figura 5. Mediciones de la estación meteorológica Embalse el Yeso del año 2010. Obtenido de publicación de Ecosistemas auspiciado por Fundaciones s Lush Charity Pot, Marisla, Patagonia Inc. y Weeden, 2021.	15
Figura 6. Imagen de una ladera de la cuenca de la Laguna lo Encañado, Fuentealba 2021.	18
Figura 7. Metodología para realizar los objetivos específicos, elaboración propia, 2022. 20	
Figura 8. Datación PbCs del testigo MAUEN-LLE12-1B-1G, obtenida de laboratorio de Ecología y Paleoecología de la Universidad Católica, 2013.....	24
Figura 9. Ubicación de los testigos obtenidos a través de los terrenos del año 2012-2013 por los proyectos Medlant y Holochill en la Laguna lo Encañado, elaboración propia con información obtenida de los proyectos Medlant y Holochill, 2022.....	25
Figura 10. Perfil topográfico, elaborado por la Ilustre Municipalidad de San José de Maipo, 2022.	27
Figura 11. Pendiente de la cuenca de la laguna lo Encañado, elaboración propia con DEM Alos Palsar de la Región Metropolitana, 2022.....	29
Figura 12. Cartografía de ubicación de perfiles en la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022.	30
Figura 13. Perfil 1 de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022....	31
Figura 14. Perfil 2 de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022....	31
Figura 15. Perfil 3 de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022....	32
Figura 16. Perfil 4 de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022....	33

Figura 17. Carta geomorfológica de Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022.....	35
Figura 18. Imagen satelital de vertientes simple con escamas, elaboración propia con información obtenido en Google Earth Pro, 2022.....	37
Figura 19. Imagen satelital de vertientes con cara libre rugosa, elaboración propia con información obtenido en Google Earth Pro, 2022.....	38
Figura 20. Imagen satelital de circos glaciares de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia con información obtenida de Google Earth Pro, 2022.....	40
Figura 21. Imagen satelital de glaciar rocoso ubicado en la cuenca de la laguna lo Encañado, elaboración propia con información obtenida de Google Earth Pro, 2022.	41
Figura 22. Imagen satelital de morrenas y remanentes morrénicos de la cuenca de la Laguna lo Encañado. elaboración propia con información obtenida de Google Earth Pro, 2022.	42
Figura 23. Contenido de Carbono Orgánico Total de los testigos CHILL-LLE13-1B-1G, MAUEN-LLE12-6A-1G, MAUEN-LLE12-5A-1G, MAUEN-LLE12-4A-1G, MAUEN-LLE12-2A-1G, MAUEN-LLE12-1B-1G y MAUEN-LLE12-1A-1G en profundidad. En la figura se observa los niveles (achurado gris) que muestran una fluctuación similar, y las edades presentes en esos dos testigos 1960 para MAUEN-LEE12-1B-1G y 2793 para MAUEN-LLE12-1A-1G.....	44
Figura 24. Identificación de datación en el testigo MAUEN-LLE12-1B-1G, elaboración propia con información obtenida de los proyectos Medlant y Holochill, 2022.	46
Figura 25. Comparación de Cloro (Cl) de los testigos MAUEN-LLE12-6A-1G y MAUEN-LL12-1A-1G.....	47
Figura 26. Comparación de Cloro (Cl) de los testigos MAUEN-LLE12-6A-1G Y CHILL-LLE13-1C-1G.....	48
Figura 27. Correlación de Cloro (Cl) e imagen del testigo CHILL-LLE13-1C-1G, elaboración propia, 2022.....	49
Figura 28. Unidades identificadas para el input terrestre del testigo MAUEN-LLE12-1A-1G, elaboración propia, 2022.	52
Figura 29. Relación entre oscilaciones de Titanio y relaciones Zr/Rb del testigo MAUES-LLE12-1A-1G en base a su profundidad, elaboración propia, 2022.	54
Figura 30. Relación de unidades geomorfológicas con la carta geológica, elaboración propia, 2022.....	56

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Clasificación de pendientes, Fuente: Araya-Vergara & Börgel (1972), Young (1972) y Ferrando (1993) en Palma, 2018.</i>	21
Tabla 2. <i>Dimensiones de los testigos cortos, Obtenido a través de los proyectos Medlant y Holochill de los años 2012 y 2013.</i>	23
Tabla 3. <i>Dataciones obtenidas de los terrenos realizados por los proyectos Medlant y Holochill de los años 2012 y 2013.</i>	24
Tabla 4. <i>Área (m² y km²) total de las unidades geomorfológicas, elaboración propia, 2022.</i>	34
Tabla 5. <i>Valores mínimos y máximos, y promedio de los testigos cortos, elaboración propia, 2022.</i>	45

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 Introducción

El Cambio Global hace referencia a un conjunto de transformaciones de gran escala motivados por las actividades humanas de los componentes del Sistema Terrestre. Por ejemplo, ha habido un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (e.g., dióxido de carbono) observado principalmente a partir de la revolución industrial (Siglo XX) y especialmente a partir de la década de 1950 (IPCC, 2019). Este forzamiento antropogénico de los ciclos biogeoquímicos es el principal responsable del calentamiento global actual que está teniendo graves impactos sobre los ecosistemas y los servicios ecosistémicos que ellos prestan (CSIC, 2016). Así, estos impactos podrían traer consecuencias en la disponibilidad del recurso hídrico necesario hacia el abastecimiento de agua potable para la población y las actividades productivas (e.g. agricultura, minería) (Dionizis, 2018).

El aumento de las temperaturas en alrededor de (1°C) (IPCC, 2019) es uno de los problemas más severos que enfrenta la sociedad actualmente (Dionizis, 2018). El que se ha visto agudizado por un aumento de los eventos extremos (e.g. inundaciones) y períodos de sequías prolongadas (Corella *et al.*, 2019). Ello genera cambios en el ciclo hidrológico con consecuencias negativas como la reducción de las reservas de agua dulce en los ecosistemas mediterráneos (Corella *et al.*, 2019). El caso de Chile central es particularmente complejo. En los últimos 10 años ha estado sometido a un importante estrés hídrico con un déficit de precipitaciones que bordean un 30% (Garreaud *et al.*, 2019). Lo cual es un factor para considerar, ya que esta zona es donde se concentra la mayor proporción de habitantes del país (73,5%) (INE, 2017), por lo que está llamada 'Megasequía' puede traer como consecuencia problemas de abastecimiento de agua potable. Además, es importante considerar que los lagos andinos han experimentado una importante reducción de la lámina de agua desde un 5% a un 28% (Fuentesalba *et al.*, 2021).

Los lagos son importantes reservas de agua dulce, que pueden ayudar a enfrentar largos períodos de sequía al acumular agua durante etapas de mayor humedad. Por ello, conocer su evolución durante períodos de sequía similares a los actuales nos permite estimar su disponibilidad futura. Con ello tomar medidas de mitigación y adaptación para enfrentar eventuales problemas de escasez hídrica. También son conocidos por la sensible respuesta que tienen frente a cambios ambientales (Consejo superior de investigaciones científicas, 2006).

Esta memoria de título tiene como objetivo realizar un análisis de la dinámica cuenca-lago en la Laguna lo Encañado (33°40'S-70°8'O, 2489 m.s.n.m.) a partir de la construcción de una carta geomorfológica y su relación con la secuencia sedimentaria lacustre. Ello permitirá contar con una línea de base para comprender las consecuencias que la variabilidad del clima ha tenido sobre esta reserva de agua dulce de Chile central.

1.2 Planteamiento del problema y estado del asunto

1.2.1 Cambio Global

Existen evidencias innegables de que las actividades humanas están afectando a las condiciones climáticas del planeta. Sobre todo, en el aumento de las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero, produciendo una elevación de la temperatura a nivel mundial y afectando a la diversidad de los ecosistemas terrestres (Peñuelas et al 2005). Lo que ha contribuido en la desertificación y degradación de las tierras en varias regiones del mundo (IPCC, 2020).

El Cambio Global ha generado impactos negativos sobre el ciclo hidrológico y el clima (Consejo superior de investigaciones científicas, 2006). Las actividades humanas han tenido efectos importantes y diversos para los sistemas naturales. Por ejemplo, las emisiones de CO₂ y los óxidos de Nitrógeno por parte de la industria, el crecimiento de las ciudades, los cambios en el uso del territorio, las alteraciones en los ciclos biogeoquímicos como en la biodiversidad, los procesos de desertización y degradación son aspectos que han aportan al cambio global (Figura 1). Esto conlleva un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero que han modificado el clima del planeta, lo que en un futuro traerá graves consecuencias para la humanidad y los ecosistemas (Consejo superior de investigaciones científicas, 2006).



Figura 1. Aspectos que aportan al Cambio Global. (Cambio Global: una mirada desde la biología, Cabrera, 2019).

A nivel mundial, en los últimos cincuenta años, los seres humanos han alterado el funcionamiento y estructura de los ecosistemas alrededor del mundo, la cual ha tenido una forma rápida y generalizada que en ningún otro periodo de la historia se ha visto. Por ejemplo, entre 1960 y 2000, la extracción de agua de ríos y lagos se duplicó y el tiempo de retorno del agua dulce al mar se triplicó. Aunque los seres humanos ocupan un 10% del agua dulce disponible, en zonas del planeta como el norte de África el consumo de agua dulce es del 120%, agotando de manera significativa las reservas subterráneas (Consejo superior de investigaciones científicas, 2006).

En Chile, estos sucesos no se han visto aislados. Según el art.4.8 de la CMNUCC, el país es considerado altamente vulnerable frente al fenómeno de cambio climático. Por ejemplo, en el caso de la temperatura, se espera un aumento para todo el territorio nacional. El cual iría de mayor a menor en sentido norte a sur y de cordillera a océano (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2022). Por otro lado, para las precipitaciones se proyecta una disminución entre Copiapó (27°22'0,4"S 70°19'53"O) y Aysén (45°24'24"S 72°41'52"O) (IPCC, 2014). Lo que afectaría una zona en la cual habita gran parte de la población de Chile.

Es importante conocer que Chile ha sido evaluado como uno de los países más vulnerables al cambio climático global. Estudios nacionales proyectan que al 2040 se produciría una intensificación de la aridez en la zona norte, avance del desierto hacia el sur y una reducción hídrica en la zona central. También se presentará un aumento de las temperaturas previstas que traería impacto sobre las precipitaciones y recursos hídricos. Esto en conjunto con aumento en la demanda de agua traerá un mayor riesgo de sequías en el futuro (Meza *et al* 2010). Entre estos y otros fenómenos han previsto un incremento en la frecuencia y en la severidad de eventos climáticos extremos como la Megaseguía actual, lo que produce efectos negativos en la disponibilidad de agua, afectando significativamente las reservas naturales y con efectos en cascada sobre la biodiversidad de los ecosistemas.

1.2.2 Riesgos Geomorfológicos

Los cambios climáticos y tectónicos que tuvieron lugar el comienzo del cuaternario, sumado a la intensa actividad volcánica y glaciaria, crearon ambientes geomorfológicos que están en constante desarrollo de remociones en masa (Hauser, 1993; Rebolledo et al., 2004, en González, 2005). Estos mecanismos, junto con elementos climáticos, geológicos, geomorfológicos, suelos y vegetaciones, son los que determinan los riesgos geomorfológicos (González, 2005).

Los riesgos geomorfológicos están relacionados con las condiciones actuales del proceso evolutivo de la superficie y su interacción con los espacios habitados (González, 2005). Por lo que es importante conocer la geodinámica externa actual. Con la geodinámica externa se pueden determinar las características y el alcance de los procesos que tienen incidencia sobre el relieve (González, 2005). Estos fenómenos de remociones en masa se producen por el transporte de materiales rocosos, suelos y agua. Donde el agua es el principal

activador, junto con la gravedad, los cuales son capaces de modificar el paisaje (González, 2005).

Las remociones en masa están vinculadas a la interacción en el tiempo y en el espacio, de una serie de factores como son los geográficos, orográficos, climáticos, hidrológicos, geológicos y tectónicos, los que corresponden a procesos gravitacionales que están del conjunto del terreno que se desplaza a un nivel inferior al original, transportando materiales hacia las partes inferiores de las vertientes (Hauser, 1993).

En Chile, los fenómenos de remoción en masa más recurrentes son los flujos de barro y detritos, los deslizamientos y los desprendimientos (Figura 2) (González, 2005). Los cuales pueden estar vinculados significativamente con el área de estudio. Por lo cual, es fundamental conocer la dinámica de las geoformas y de los sedimentos del área de estudio.



Figura 2. Principales fenómenos de remoción en masa en Chile. Fuente: Hauser et al., 1993.

1.2.3 Lagos

Los lagos son comprendidos como cuerpos de agua continental permanentes, los cuales constituyen actualmente alrededor del 1% de la superficie terrestre (Fregenal *et al* 2010 en Consejo superior de investigaciones científicas, 2010). De acuerdo con los factores biológicos, climáticos y geológicos, los lagos se reconocen como sistemas naturales complejos, difíciles de definir, clasificar y modelizar de una forma sencilla. Entre estos factores de control, los climáticos tienen un control en la sedimentación, por lo que es considerado como el que interviene o tiene un impacto más directo en la dinámica de los lagos. Junto con la geológicas es que depende de manera directa y de forma primaria la precipitación, la insolación, régimen de vientos, la frecuencia de tormentas y su intensidad, las variaciones estacionales y la temperatura. Esta última, condicionada en gran medida las

reacciones químicas que producen sedimentos o que de una forma y otra intervienen en la dinámica del sistema (Fregenal *et al* 2010 en Giguet-Covex et al., 2011).

En la cuenca, los procesos de erosión y meteorización dependen del tipo de cobertura vegetal, material geológico y el clima existente. Esta interacción es variable en el tiempo en la medida que el clima y la vegetación cambian y de ello, depende del tipo y cantidad de material sedimentario. Los procesos y factores que dependen del clima se verán modificados a medida que el clima evolucione y se modifique. Será por tanto un factor primordial en la evolución sedimentaria a medio y largo plazo, es decir a escala geológica (Fregenal *et al* 2010).

Es por esto que los lagos son importantes, pues al corresponder a cuencas cerradas o semi-cerradas actúan como un reservorio de los sedimentos y materia orgánica provenientes de su cuenca. Además, responden rápidamente a los cambios ambientales que afectan directamente a la productividad lacustre (Leng *et al.*, 2006). Por lo que sus sedimentos, analizados a una alta resolución temporal, permiten reconstruir la respuesta de los cuerpos de agua a los cambios climáticos pasados (Fregenal & Meléndez, 2010; Giguet-Covex et al., 2011).

Así mismo, ya que los sedimentos acumulados en los lagos dependen de la cuenca en la que están insertos, la geomorfología del lugar juega un rol clave en la reconstrucción de la dinámica cuenca-lago en períodos largos (Leng *et al.*, 2006). La geomorfología permite realizar un análisis de las relaciones entre la erosión fluvial (su frecuencia e intensidad) y el aporte sedimentario a los lagos. De esta manera ver los patrones de erosión/sedimentación en la dinámica cuenca-lago. Cómo reconocer cambios de composición del sedimento detrítico o de las aguas en variaciones hidrológicas o de la forma de drenaje y distribución del agua que no tengan un origen climático (Fregenal *et al* 2010)

Como consecuencia, el estudio de los sedimentos lacustres ayuda a entender los efectos de los cambios ambientales pasados y mejorar nuestro conocimiento de la evolución de los cuerpos de agua ante eventos de sequía similares a los actuales.

1.3 Área de estudio

El área de estudio corresponde a La Laguna lo Encañado ($33^{\circ}40'S-70^{\circ}8'O$; 2489 m.s.n.m.) (Figura 3). Se ubica administrativamente en la Región Metropolitana, Provincia Cordillera, comuna San José de Maipo (Figura 3), aledaña del embalse el Yeso y la Laguna Negra. Se encuentra en la cuenca del Río Maipo Alto y es parte de la zona cordillerana de Chile central (Tapia, 2021). La Laguna lo Encañado posee una superficie de $0,39 \text{ Km}^2$ y una capacidad de $0,05 \text{ Km}^3$ de agua y se abastece de agua por medio del derretimiento de nieve del glaciar Echaurren. Lo cual hace que tenga un comportamiento hidrológico pluvial, con caudales de descarga máximos en noviembre y un caudal medio anual en régimen natural de $0,76 \text{ m}^3/\text{seg}$. Recibe aportes de la Laguna Negra por procesos de infiltración y descarga sus aguas a través del estero el Manzanito (Pincetti, 2016)

La Laguna lo Encañado, se encuentra administrada por Aguas Andinas que es la principal empresa sanitaria en Chile, encargada de captar, transportar y distribuir agua potable a 7.721.956 habitantes de la región Metropolitana. La Laguna lo Encañado junto con el Embalse El Yeso y Laguna Negra, son cuerpos de captación de agua, y tienen una capacidad calculada en 50, 220 y 648 millones de metros cúbicos respectivamente (Aguilar, 2017).

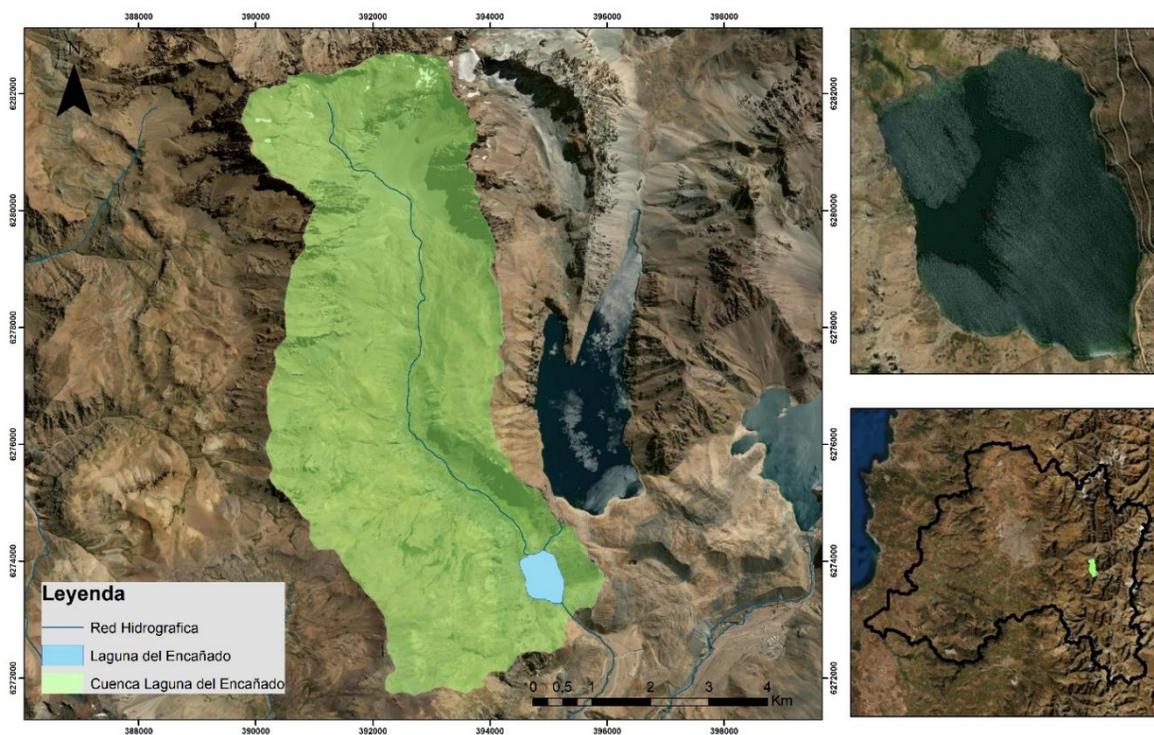


Figura 3. Localización de Laguna lo Encañado ($33^{\circ}40'S$ $70^{\circ}8'W$, 2489 msnm). De régimen nival, recibe los máximos aportes durante la primavera austral (octubre-diciembre). Sus afluentes son Estero del Manzanito y recibe aportes por infiltración de Laguna Negra ubicada al norte.

1.3.1 Climatología

La climatología de la cuenca de la Laguna lo Encañado se caracteriza por ser un clima mediterráneo frío de lluvia invernal (Figura 4). Aunque también presenta clima mediterráneo de lluvia invernal de altura y clima de tundra de lluvia invernal (Figura 4). Tiene un periodo estival seco y caluroso, y un periodo invernal frío en el cual se presentan las mayores precipitaciones (Uribe, 2015). Su temperatura media corresponde a 14°C, oscilando entre 1°C (invierno austral) y 28°C (verano austral) (Ilustre Municipalidad de San José de Maipo, 2018). Esto se debe a la altura donde se ubica la laguna.

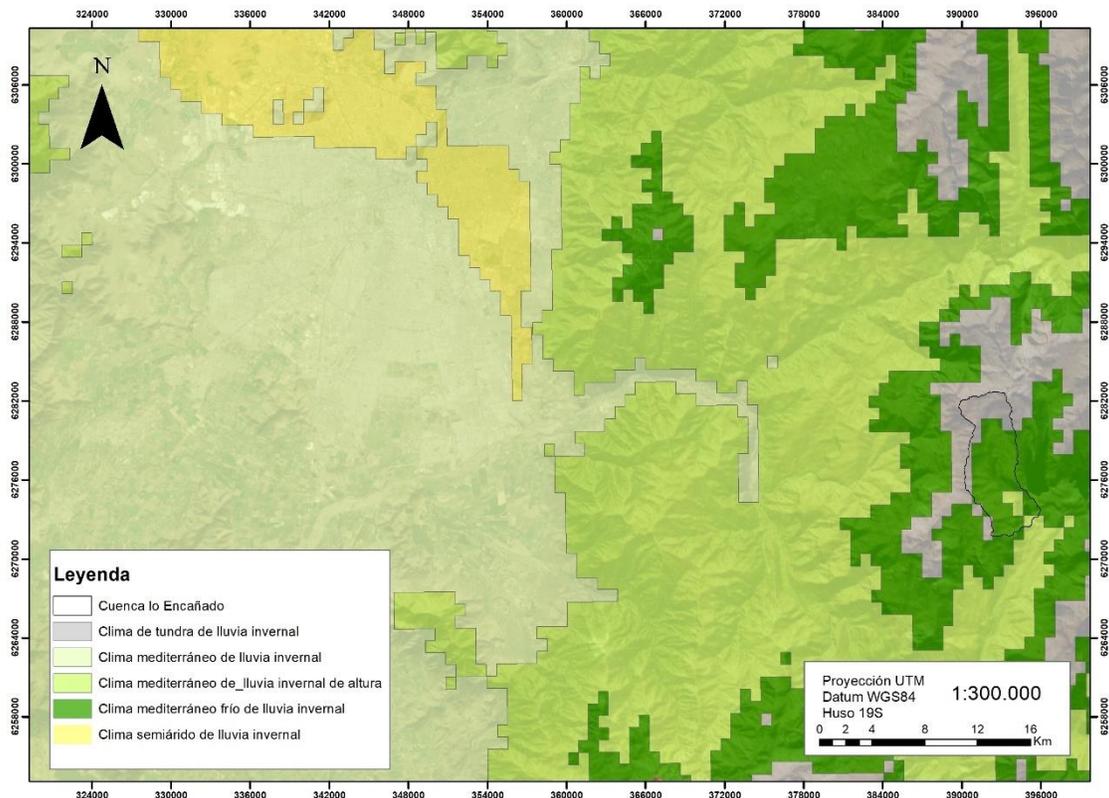


Figura 4. Zonas Climáticas de la Región Metropolitana según Köppen-Geiger, IDE, 2019.

De acuerdo con las observaciones obtenidas en la estación meteorológica Embalse el Yeso. Se tiene medición de las precipitaciones que presenta la cuenca (Figura 5). Para el caso de la Laguna lo Encañado estas precipitaciones se presentan en forma de nieve y a medida que aumenta la altura el clima se define como frío de altura, el cual es característico de áreas donde se presenta una gran proporción de nieve. Las precipitaciones se concentran durante la época invernal que abarca desde mayo a agosto (Dionizis, 2018).

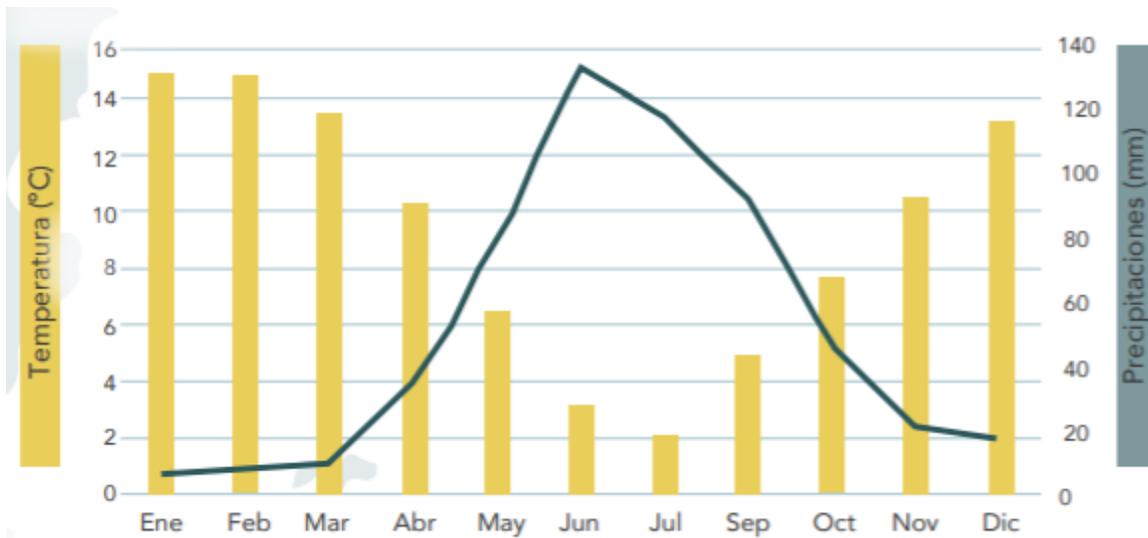


Figura 5. Mediciones de la estación meteorológica Embalse el Yeso del año 2010. Obtenido de publicación de Ecosistemas auspiciado por Fundaciones s Lush Charity Pot, Marisla, Patagonia Inc. y Weeden, 2021.

A pesar de ser una zona donde predomina las precipitaciones en forma de nieve. La cobertura de nieve ha presentado una disminución considerable para los últimos años. Estudios demuestran que de los 260,49 Ha de nieve que había en el año 1975, para el año 2020 se observó un descenso de casi un 100% (Tapia, 2021).

1.3.2 Geología

Con respecto a su geología. Está ubicado en una cuenca relativamente grande (39 Km²). La cual está compuesta en su totalidad por rocas volcánicas continentales del Cenozoico con conjuntos de minerales metamórficos de bajo grado, dominados por filosilicatos máficos (Van Daele et al., 2004).

De acuerdo con la carta geológica elaborada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en el año 1980 la cuenca de la Laguna lo Encañado se ubica en tres formaciones geológicas. Que corresponden a la Formación Abanico, Formación Farellones y Formación Colorado – La Parva.

1.3.2.1 Formación Abanico

La Formación Abanico se originó hace 40 Millones de años (Eoceno superior). En este tiempo existían numerosos volcanes alineados en dirección Norte-Sur que se ubicaban dentro de una gran cuenca. Aquí se depositaban lavas y materiales incandescentes que

eran expulsados por erupciones volcánicas. Estas erupciones volcánicas se intercalaron con sedimentos provenientes de ríos y lagos (Marmolejo, 2019).

Según la carta geológica de Santiago (1980) (Anexo 1), en el área de estudio se encuentra la Fm. Abanico, la cual corresponde a una secuencia formada por tobas y brechas volcánicas con intercalaciones de lavas y sedimentitos clásticas, y con un importante espesor de calizas. Esta formación presenta rocas volcánicas, principalmente andesíticas y riolíticas, con intercalaciones de rocas sedimentarias continentales, y se encuentra por debajo de la Formación Farellones, las cuales tienen un grado de deformación y alteración (Buglio, 2017).

1.3.2.2 Formación Farellones

La litología de la zona de estudio es Formación Farellones, perteneciente al mioceno superior. Esta formación representa un periodo de volcanismo activo, en el cual se produjeron sucesiones de coladas de lavas y grandes depósitos de erupciones volcánicas. Se estima que dicha formación se originó a partir de unas primeras grandes erupciones volcánicas del tipo caldera. Estas rellenaron el relieve con cenizas, flujos piroclásticos y materiales incandescentes. Para luego tener erupciones esporádicas de estratovolcanes que dejaron grandes flujos de lavas que se intercalaron con material volcánico (Marmolejo, 2019).

Según la carta geológica del año 1980, corresponde a una secuencia compuesta por sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas (Anexo 1). Esta Fm. Se encuentra sobre yaciendo en discordancia angular sobre la formación Abanico que constituye su piso, mientras que su techo está dado por la formación Colorado – La Parva. También predominan las unidades de lavas por sobre las tobas y brechas, mientras que la alternancia de rocas volcano clásticas más finas en tramos de 4 a 5 metros, producen una marcada estratificación en serie (Thiele 1980 en Buglio, 2017).

Se cree que el espesor es de 2.500 m, el cual va aumentando por los numerosos mantos intrusivos y lacolitos del Mioceno Superior-Plioceno que la instruyen. El techo de esta formación corresponde a la actual superficie del relieve (Thiele 1980 en Buglio, 2017).

1.3.2.3 Formación Colorado – La Parva

Por otro lado, en menor proporción, se presenta la Formación Colorado – La Parva (anexo 1). La cual se caracteriza por estar formada por areniscas de grano grueso a conglomeráticas y arcillolitas rojas (Buglio, 2017).

1.3.2.4 Depósitos de remoción en masa

La Laguna es uno de los límites del depósito de Mesón Alto. Este depósito está ubicado aguas abajo del embalse El Yeso, por el río Yeso, donde se encuentra con la Laguna Negra. Este comprende ca. 16Km² de superficie con un volumen estimado entre 4,3 km³ y 4,5 km³ (Albornoz, 2015).

El Mesón alto es considerado como depósito de remoción en masa, que es producto de un deslizamiento de roca que continuó su movimiento como una avalancha de rocas. El valle en el cual está depositado tenía con anterioridad un material distinto depositado, posiblemente una o varias morrenas, las cuales fueron cubiertas en parte por la remoción (Albornoz, 2015).

1.3.3 Vegetación

En cuanto a su vegetación, la cuenca de la Laguna lo Encañado al estar sobre los 2000 m.s.n.m corresponde a un área que sobrepasa el límite de vegetación. Desaparecen las formas arbustivas y arbóreas, reemplazándolas por las formaciones xerofitas andinas (Ilustre Municipalidad de San José de Maipo, 2018), las cuales se caracterizan por evolucionar bajo condiciones ambientales adversas, como el calor y heladas combinadas con periodos de sequía estival (Hasbún, 2020).

La Cuenda ha presentado una evolución de su cobertura de suelo, ya que en los últimos años se ha evidenciado un aumento considerable de Vegas en comparación a años anteriores. Sin embargo, el Material Rocoso y los Pastizales siguen siendo los elementos que predominan en la cuenca. Principalmente el Pastizal, ya que es el que ha ido migrando a zonas más altas y restándole porcentaje al material rocoso.

Con respecto a la cobertura de nieve, es un factor que se ha visto disminuido, ya que hay registros que para el año 2020 este habría disminuido un 100%. Sin embargo, esta sigue cayendo, pero en una menor medida (Tapia, 2020).



Figura 6. *Imagen de una ladera de la cuenca de la Laguna lo Encañado, Fuentealba 2021.*

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la relación entre la geomorfología de la cuenca y el registro sedimentario de la Laguna lo Encañado (33°40'S-70°8'O).

1.4.2 Objetivos específicos

- 1) Elaborar una carta geomorfológica de la cuenca de la Laguna lo Encañado
- 2) Analizar los testigos sedimentarios de la secuencia de la Laguna lo Encañado y relacionarlos con registros mediante proxys de geoquímica.
- 3) Establecer relaciones entre la geomorfológica y los registros sedimentarios del lago.

CAPÍTULO 2: METODOLÓGICO

La metodología se basa en el análisis de la dinámica cuenca-lago. Los lagos y sus cuencas están hidrológicamente vinculados, por lo que los procesos que ocurren en su cuenca (e.g., incremento de la erosión) son registrados en los lagos (Giguet-Covex et al., 2011; Mclauchlan et al., 2013; Corella et al., 2019).

La siguiente figura presenta los pasos metodológicos para los objetivos específicos mencionados con anterioridad:

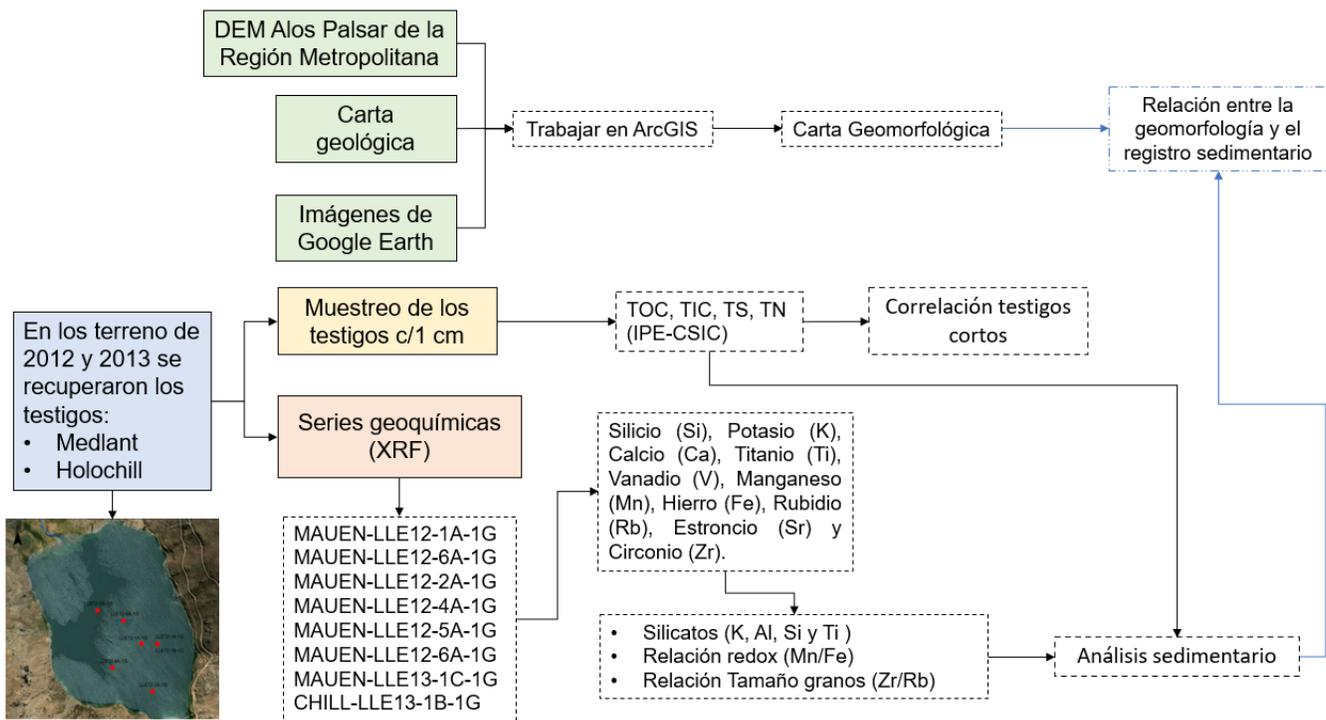


Figura 7. Metodología para realizar los objetivos específicos, elaboración propia, 2022.

2.1 Elaborar una carta geomorfológica de la cuenca de la laguna lo Encañado

La elaboración de la carta geomorfológica se basará en el concepto de sistemas de la clasificación de Araya – Vergara (1985, 1996). La cual está concebida como una base para comprender los procesos morfogenéticos actuales y para realizar una clasificación de los fenómenos que muestran encadenamiento entre ellos. En este contexto, la elaboración de la carta es de gran importante para conocer como la geomorfología incide en la dinámica sedimentaria de la cuenca de la Laguna lo Encañado.

Esta metodología relaciona a las vertientes como sistemas y no como vertientes individuales simples. Lo cual hace referencia a los taxones de varios tipos de vertientes

individuales que se combinan de una manera especialmente para conformar el sistema o la gran vertiente. Con esta metodología, se trata de identificar los interfluvios que separan a los colectores de orden más avanzado en la cuenca y su papel en la morfogénesis del sistema (Araya, 1985). Por lo cual se resalta las influencias estructurales, ya que con estas se ven las posibilidades de afloramiento rocosos que pueden tomarse en cuenca como potenciales aportes de sedimentos (Araya, 1985).

De igual manera, se mencionan las formas de base de vertientes o de contacto entre montaña y cuenca intermontaña. En esta sección se encuentran los conos y los glacia, los cuales son los principales depósitos correlativos de las formas de erosión de montaña. Estas formas son conocidas como manifestaciones de la dinámica del Cuaternario y permiten conocer la evolución de las condiciones de la dinámica de depósito a través del Cuaternario Reciente y la influencia de sus materiales en la dinámica actual de los lechos, los cuales sirven de sustrato (Araya, 1985).

También se tendrán presentes las formas glaciales y nivales. Considerando que el área de estudio se encuentra inserto en un ambiente donde hay de estas características. Es importante mostrar los ambientes glaciales y periglacial, considerando que son decisivos para las relaciones entre erosión, transporte y sedimentación (Soto, 2003).

Para la elaboración de la carta geomorfológica, se utilizó la carta geológica de la Región Metropolitana 1:250.000 del año 1980, un modelo digital de elevación (DEM) Alos Palsar de la Región Metropolitana y fotografías satelitales obtenidas en Google Earth Pro del año 2021. Para la construcción de la carta, se tomará un archivo DEM que permite sacar la pendiente, la cual se determinará según la clasificación Araya-Vergara & Börgel (1972), Young (1972) y Ferrando (1993) (Tabla 1).

Pendientes %	
Clases	Descripción
Horizontal	0-2
Suave o leve	2,1-5
Moderada	5,1-10
Fuerte	10,1-20
Muy fuerte a moderadamente escarpada	20,1-30
Escarpada	30,1-45
Muy escarpada a acantilada	>45

Tabla 1. Clasificación de pendientes, Fuente: Araya-Vergara & Börgel (1972), Young (1972) y Ferrando (1993) en Palma, 2018.

Luego de la construcción de la cartografía de pendientes, se generó una toma de perfiles de la cuenca. Los cuales fueron tomados en Google Earth Pro para mostrar la diferencia en pendientes y altitud que se presenta en la cuenca.

Con respecto a las fotografías, se realizó una fotointerpretación de la cuenca para determinar y delimitar las formas mencionadas anteriormente de la metodología de Araya-Vergara (1985). Luego de obtener el resultado de la carta geomorfológica, se realizó un análisis detallado de las unidades identificadas. Con la elaboración de una tabla resumen que indique el área en m² y km² que tienen las unidades geomorfológicas.

2.2 Analizar y correlacionar los testigos sedimentarios de la secuencia de Laguna lo Encañado.

Para el análisis y la correlación de los testigos lacustres, se contó con información obtenida por el proyecto Medlant y Holochill de los años 2012 y 2013 respectivamente.

En 2012 y 2013 se realizaron una serie de terrenos para recuperar 8 testigos cortos de sedimentos de Laguna lo Encañado (Tabla 2). Estos testigos tienen una extensión inferior a 1 metro de largo (Tabla 2). Ellos fueron abiertos y muestreados cada 1 cm en el Instituto Pirenaico de Ecología (España). Se estimó el contenido de carbono orgánico total (TOC%), carbono inorgánico total (TIC%), el azufre (TS%) y el nitrógeno total (TN%) en un LECO en el Instituto Pirenaico de Ecología. Además, se obtuvieron las series geoquímicas utilizando un escáner de fluorescencia de rayos X en la Universidad de Barcelona en un XRF core scanner. Donde se obtuvo información de elementos como el Sílice (Si), Argón (Ar), Potasio (K), Calcio (Ca), Titanio (Ti), Vanadio (V), Manganeseo (Mn), Hierro (Fe), Rodio (Rh), Rubidio (Rb), Estroncio (Sr) y Circonio (Zr). Toda esta información se obtuvo cada 4 mm. También, algunos de estos testigos han sido escogidos para datar con ¹⁴C y Pb.Cs (Tabla 3).

Testigos cortos	Extensión de testigos en centímetros
MAUEN-LLE12-1A-1G	72
MAUEN-LLE12-1B-1G	52
MAUEN-LLE12-2A-1G	37
MAUEN-LLE12-4A-1G	34
MAUEN-LLE12-5A-1G	57
MAUEN-LLE12-6A-1G	67
MAUEN-LLE13-1C-1G	53
CHILL-LLE13-1B-1G	69

Tabla 2. Dimensiones de los testigos cortos, Obtenido a través de los proyectos Medlant y Holochill de los años 2012 y 2013.

Para la correlación de los testigos cortos, se construirán gráficos de carbono orgánico total (TOC) con el fin de identificar los niveles que presentan oscilaciones similares entre sí. Esto a través de los valles y pick que presenta cada testigo.

A través del análisis de estas variables, se construirá el modelo de edad en base a las dataciones ^{14}C que ya se cuentan (Tabla 3 y Figura 8). Ello se realizó trasladando las dataciones a un único testigo (CHILL-LLE13-1B-1G) mediante las correlaciones entre los testigos sedimentarios hechas inicialmente. De esta manera, se correlacionaron los ambientes deposicionales con el período en que fueron depositados. Esta información se podrá contrastar con información climática disponible para el área de estudio (Morales et al., 2020).

Tipo de muestra	Profundidad	Edad Radiocarbono (yr BP)	Pb Cs	1 sgima error
Water DIC	13-15	1115	-	30
Leaves LLE12-1 ^a	37-38	-	-	-
Leaves LLE12-1 ^a	53-54	-	-	-
Bulk sediment LLE12-1 ^a	71-72	2793	-	32
MAUEN-LLE12-2 ^a -1G	37	-	-	-
MAUEN-LLE12-4 ^a -1G	34	-	-	-
MAUEN-LLE12-5 ^a -1G	57	-	-	-
MAUEN-LLE12-6 ^a -1G	67	-	-	-
MAUEN-LLE12-1B-1G	52	-	1960	-
organic LLE13-1 ^a -1U-1	24-25	170	-	33
organic LLE13-1 ^a -1U-1	56.5 – 57-5	1155	-	29
organic LLE13-1 ^a -1U-2	65-66	5205	-	34
organic LLE13-1 ^a -2U-2	8.5-9.5	1387	-	35
organic LLE13-1 ^a -3U	126-127	3182	-	31
Plant (large) LLE13-1 ^a -4U	50-51	567	-	30
Plant (large) LLE13-1C-1G	52-53	Modern	-	-

CHILL-LLE13-1B-1G	69	-	-	-
-------------------	----	---	---	---

Tabla 3. Dataciones obtenidas de los terrenos realizados por los proyectos Medlant y Holochill de los años 2012 y 2013.

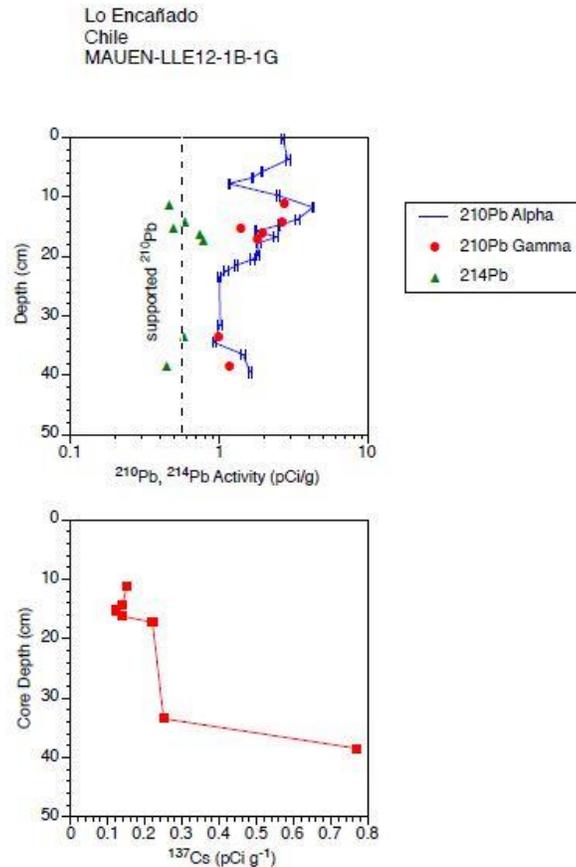


Figura 8. Datación PbCs del testigo MAUEN-LLE12-1B-1G, obtenida de laboratorio de Ecología y Paleoecología de la Universidad Católica, 2013

De este modo, para identificar las unidades sedimentarias, se utilizará el análisis de series geoquímicas que ya han sido obtenidas en un escáner de Núcleo de Fluorescencia de Rayos X (XRF) de la Universidad de Barcelona. Este es un sistema de análisis no destructivo que se utiliza para el análisis de elementos mayores y menores mediante el escaneo de la superficie de núcleos sedimentarios. Por lo que, se analizaron las series geoquímicas de los testigos MAUEN-LLE12-1A-1G y MAUEN-LLE12-6A-1G, los cuales contienen elementos como el Sílice (Si), Argón (Ar), Potasio (K), Calcio (Ca), Titanio (Ti), Vanadio (V), Manganeso (Mn), Hierro (Fe), Rodio (Rh), Rubidio (Rb), Estroncio (Sr) y Circonio (Zr).

Finalmente, se realizó el análisis de un testigo lacustre que presente XRF (MAUEN-LLE12-1A-1G O MAUEN-LLE12-6A-1G) para ver el porcentaje de algunos elementos que se encuentren en la cuenca. Esto se llevará a cabo para conocer el input de material terrígeno que se encuentra en el área de estudio. Por lo cual, el testigo que se escogerá será en función de su ubicación en la laguna (Figura 9). Es importante destacar, que estos testigos fueron obtenidos el año 2012-2013 por los proyectos Medlant y Holochill para la Laguna lo Encañado.

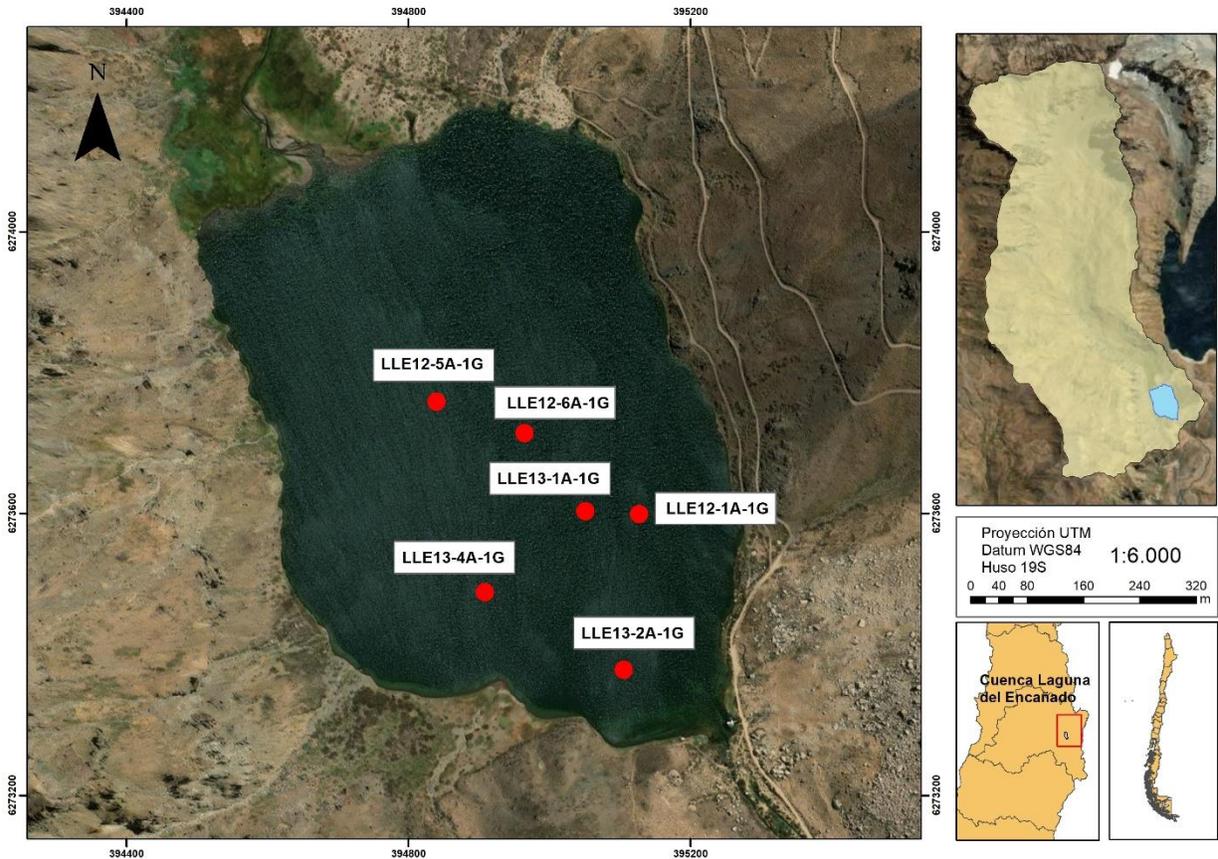


Figura 9. Ubicación de los testigos obtenidos a través de los terrenos del año 2012-2013 por los proyectos Medlant y Holochill en la Laguna lo Encañado, elaboración propia con información obtenida de los proyectos Medlant y Holochill, 2022.

2.3 Establecer relaciones entre la carta geomorfológica y los aportes sedimentarios del lago.

Por último, la comparación de la geomorfología de la cuenca y el análisis litoestratigráfico de sedimentos de la Laguna lo Encañado mostrará el origen de los aportes minerales de la cuenca del lago. Con ello, se espera comprender cómo ha evolucionado el lago a los

ambientes pasados. De igual manera, se realizó una relación de los procesos que se pueden observar para la laguna. De esta forma, obtener un análisis de la dinámica de la cuenca de la Laguna lo Encañado.

Para este objetivo, se usarán elementos que tengan un aporte terrígeno, como son el Ti, Fe, Si, K y la relación Zr/Rb. A través de estos elementos se analizará si la laguna está recibiendo aportes de la cuenca, y si se presentó algún evento que quedó registrado en ella.

El Titanio (Ti) se seleccionó por su conservación en procesos de transporte y meteorización, el Silicio (Si) por presentarse en abundancia en minerales que están asociados a la productividad, el Hierro (Fe) por sus condiciones redox del lado o por los aportes detríticos y los cambios en el origen de los sedimentos, el Potasio (K) por ser un indicador de productividad, y la relación Zr/Rb por ver el tamaño de grano y la composición de los sedimentos (Kylander, 2011).

Por último, se realizó una relación entre la carta geológica (1980) y el resultado de la carta geomorfológica. De esta manera, reconocer que parte de las unidades identificadas en la carta geomórfica se encontraron en la carta geológica.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1 Carta geomorfológica

Morfológicamente, la zona donde se encuentra el área de estudio es un territorio montañoso en el cual predominan las zonas de pendiente superiores a los cinco grados. En rasgos generales, la geomorfología se puede clasificar en cuatro unidades principales. Valle, piedemonte, cordillera media y alta cordillera, como se puede ser en la Figura 10. Esta geomorfología es la que hace contar con las principales reservas de agua potable de la Región Metropolitana, como son el Embalse El Yeso, Laguna Negra y Laguna lo Encañado (Ilustre Municipalidad del Cajón del Maipo, 2018).

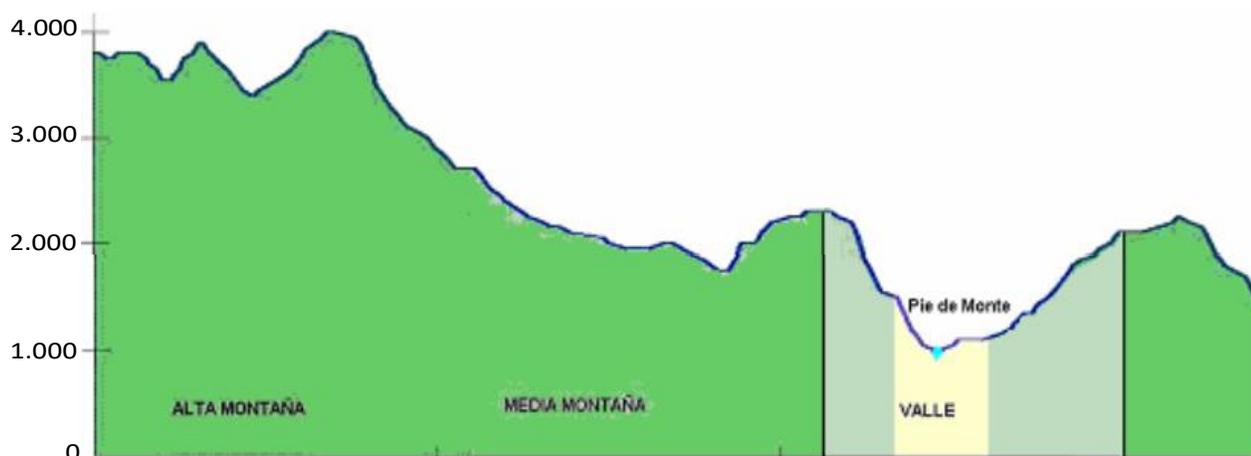


Figura 10. Perfil topográfico, elaborado por la Ilustre Municipalidad de San José de Maipo, 2022.

Geomorfológicamente, Araya-Vergara (1985), describe las formas que se encuentran en el cordón transversal y media montaña como relieves generalmente monocinales con buzamiento sensibles hacia el este. Describe el estilo tectónico discordante como un proceso muy dislocado con manteos comúnmente mayores a 60°, lo que causaría la aparición vertientes de hog-back dispersas entre los monocinales suaves. Esta taxonomía la toma considerando a las vertientes como sistemas, las que son unidades integrales de geología y procesos dinámicos actuales (Soto, 2003). De igual forma, evalúa la importancia que tienen como aportador de masas, sobre todo en los procesos de vertientes modeladas en rocas estratificadas con afloramientos rocosos, desprovistas de vegetación y fuerte pendiente.

La cuenca de la Laguna lo Encañado se encuentra inserta en un ambiente morfoclimático de media montaña (Araya, 1985). Esto determina que las geoformas presentes se hayan producido bajo paleoclimas o bajo climas recientes (Soto, 2003). Esta información es relevante para la correcta realización de una carta geomorfológica, ya que todo lo pasado tiene un registro que puede ayudar a entender el comportamiento actual. Por lo que, para la caracterización de los aspectos geomorfológicos, se realizó un análisis de las formas y de procesos de los sistemas de vertientes.

3.1.2. Pendiente

Los ambientes de montaña, como son los que están insertos en dominios y pisos morfoclimáticos periglaciares, tienen una fuerte pendiente que produce una alta dinámica morfogénica (Delgado, 2007). Esto se relaciona con la evolución de geoformas, ya que constantemente se está produciendo una alteración en las formas por la evolución de estas. Producto de que el medio físico presenta diferentes subsistemas interrelacionados que constantemente están evolucionando de sí mismos (Universidad Católica de Chile, 2022). De acuerdo con la cartografía (Figura 11), se puede determinar que gran parte de la cuenca presenta pendiente $6,1^{\circ}$ - 15° y $15,1^{\circ}$ - 30° , y zonas que superan los 30° . Esto se puede comprobar con imágenes satelitales, ya que se observa que estas zonas presentan gran pendiente, las cuales son muy escarpadas. Según Delgado (2007), una cuenca que sobrepasa los 25° , es una cuenca que está propensa a sufrir condiciones propicias para generar caídas, avalanchas, deslizamientos, flujos y arroyada.

Las pendientes bajas $0-1^{\circ}$ y $1,1-3^{\circ}$ son las que presentan una menor superficie en la cuenca. Estas se ubican principalmente en el fondo de valle cerca del lago y el curso de agua principal de la cuenca. Esta zona se caracteriza por tener bajas pendientes que muestran el bajo nivel de inclinación que presenta la cuenca.

La elaboración de esta cartografía ayuda a conocer la superficie de la cuenca, la cual apoya en la construcción de la carta geomorfológica del área lo Encañado.

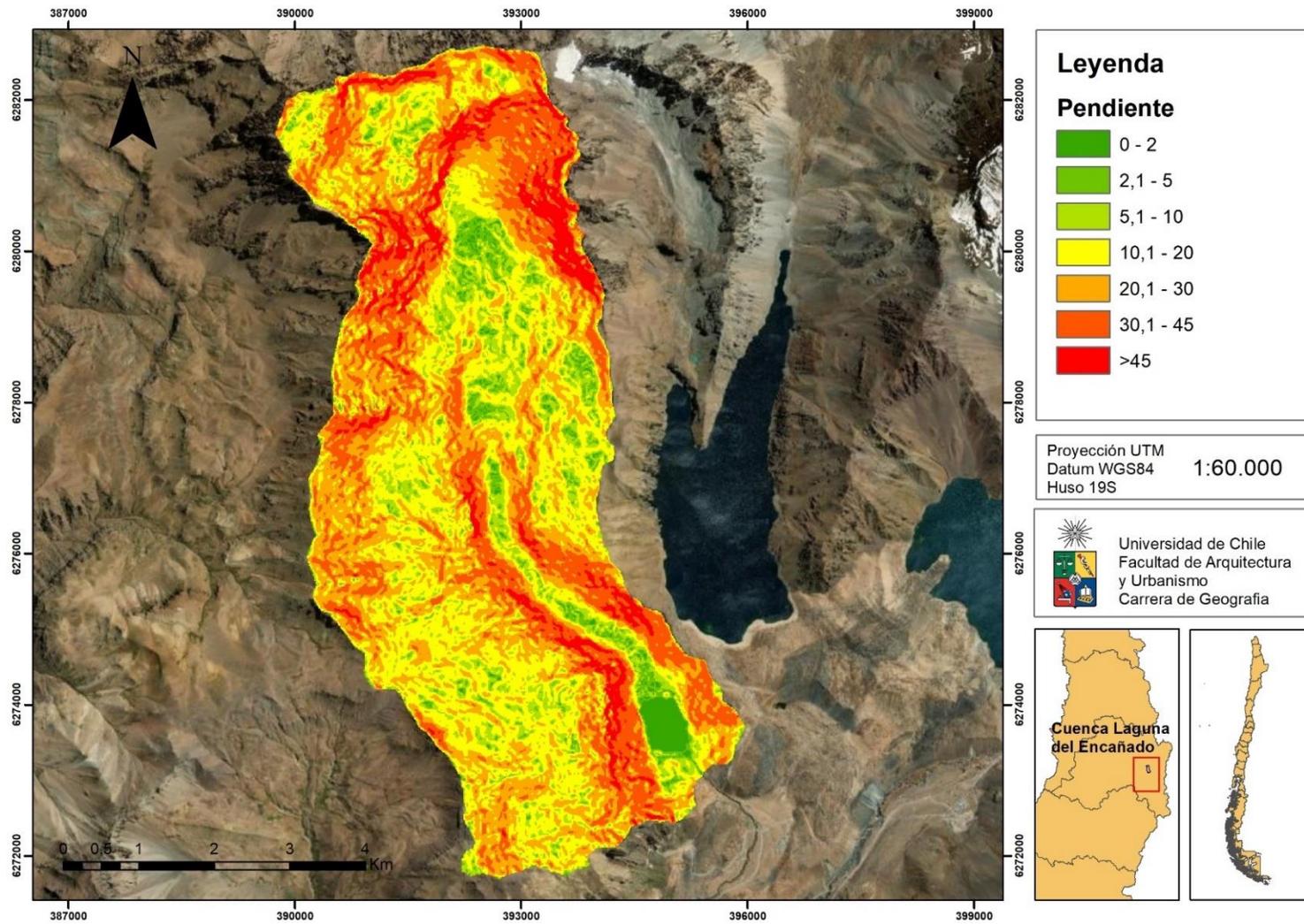


Figura 11. Pendiente de la cuenca de la laguna lo Encañado, elaboración propia con DEM Alos Palsar de la Región Metropolitana, 2022.

Para un mayor análisis de la cuenca, se tomaron de ejemplos cuatro perfiles que se encuentran en el área de estudio. Dependiendo del grado de inclinación que presentan. Estos ejemplos se observan en la Figura 12.

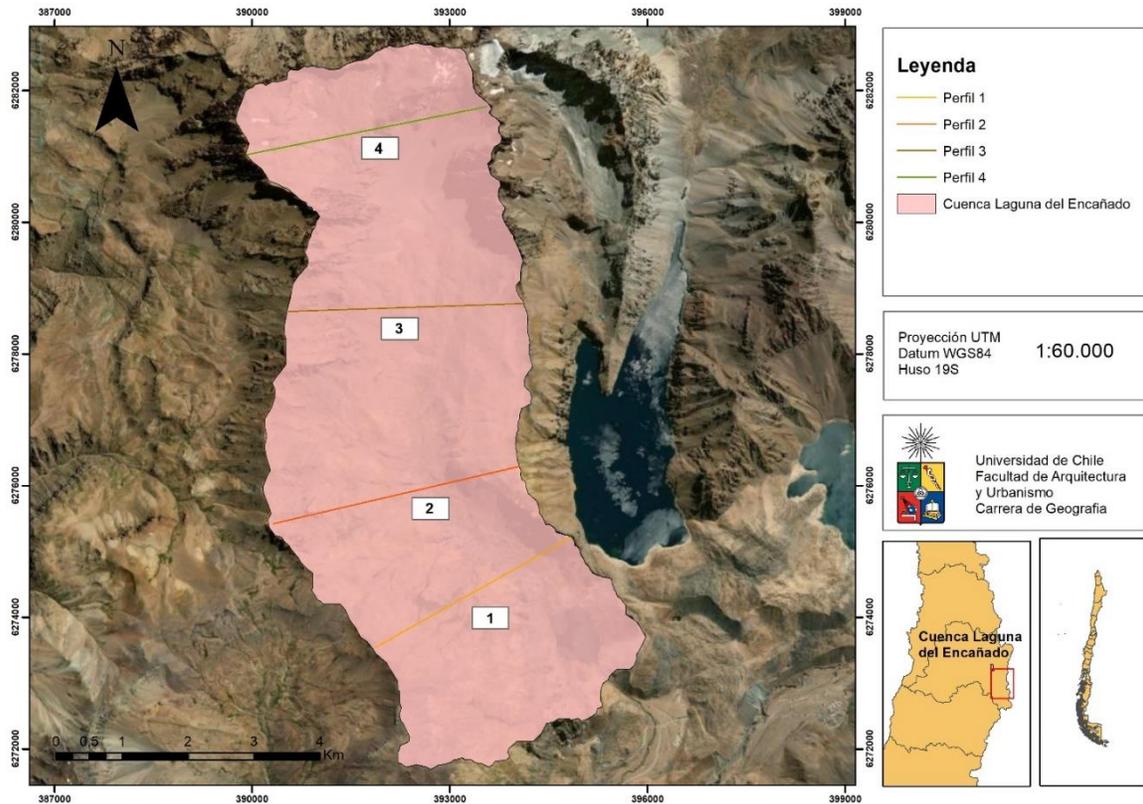


Figura 12. Cartografía de ubicación de perfiles en la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022.

3.1.3 Perfiles

Se realizaron gráficos de la elevación en m.s.n.m. de los perfiles topográficos, los cuales están representados en las Figuras 13, 14, 15 y 16. Estos fueron elegidos de acuerdo con su distribución dentro de la cuenca, para ver en detalle los cambios en su superficie.

En primer lugar, el perfil n°1 (Figura 13) es el más cercano a la laguna, presenta una elevación máxima de 3.400 m.s.n.m. y un mínimo de 2.500 m.s.n.m. De acuerdo con esto, se puede observar que la ladera norte tiene mayor longitud e inclinación, la cual cambia hacia una ladera escarpada hasta los 0,025 Km. Desde esa distancia, se observa como disminuye la altitud, lo cual tiene relación con la zona donde está el curso de agua principal y la laguna. Por otro lado, la ladera sur presenta una elevación que alcanza los 2.800 m.s.n.m.

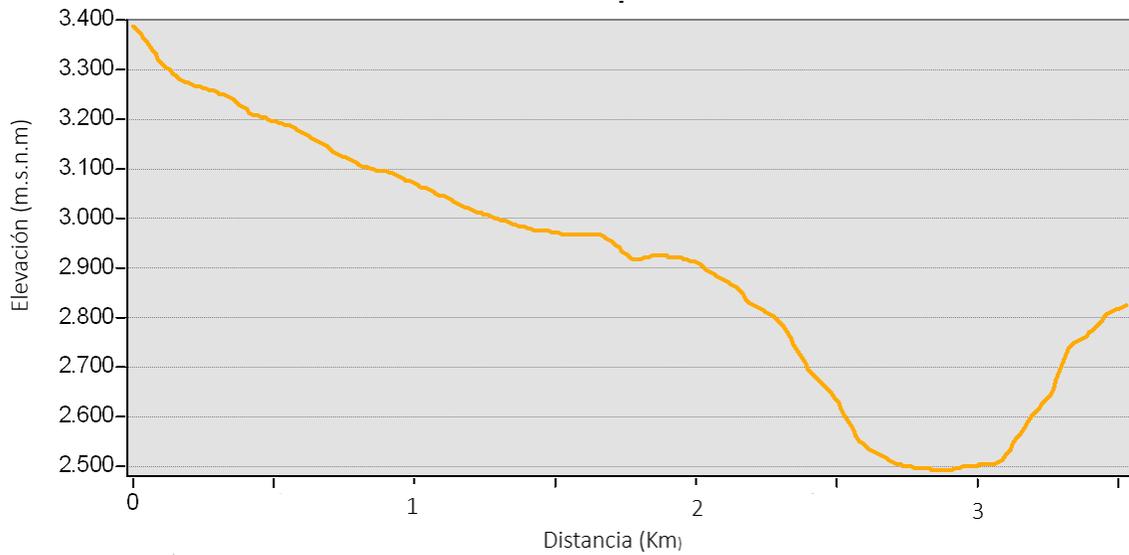


Figura 13. Perfil 1 de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022.

El perfil 2 (Figura 14) muestra características similares al anterior. Sin embargo, se observa cómo la ladera norte tiene una mayor elevación que alcanza los 3.450 m.s.n.m. Con respecto a la ladera sur, sigue características similares que el perfil 1, pero esta si tiene una mayor elevación la cual supera los 3.000 m.s.n.m.

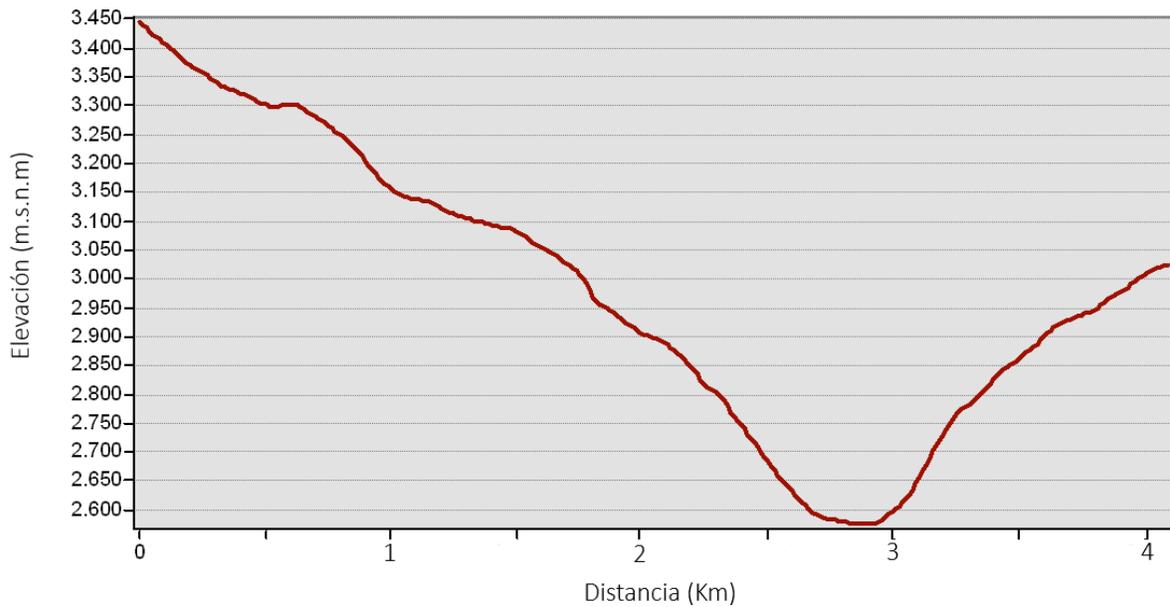


Figura 14. Perfil 2 de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022.

El perfil 3 (Figura 15) es el que muestra una inclinación menos abrupta, eso quiere decir que el cambio de pendiente se muestra progresivamente y no con cambios pronunciados. Sin embargo, si presenta un aumento en altitud, ya que la ladera norte sobrepasa los 3.600 m.s.n.m. y la ladera sur a los 3.250 m.s.n.m.

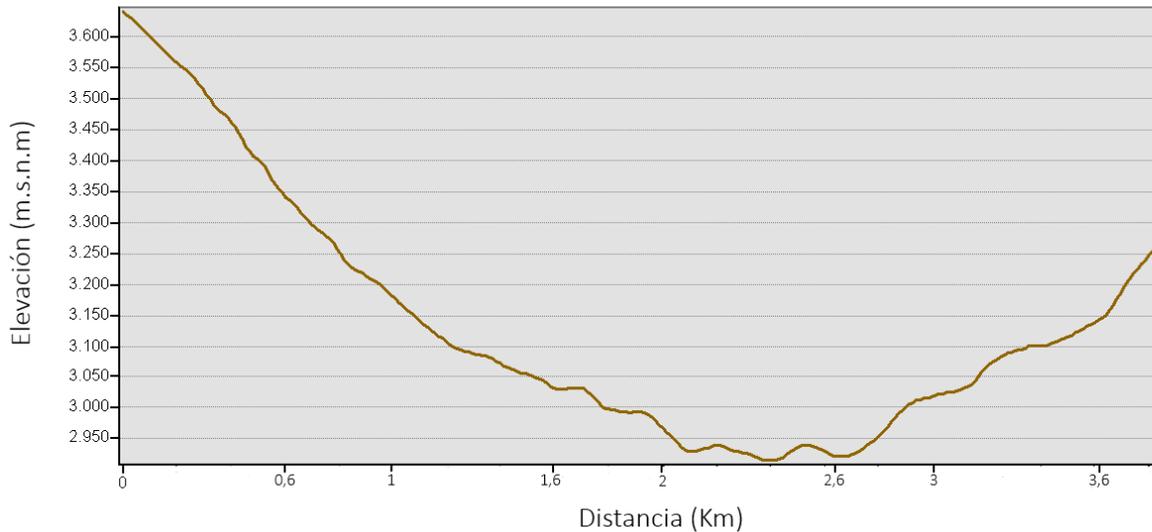


Figura 15. Perfil 3 de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022.

Por último, el perfil 4 (Figura 16) es el que se encuentra en la zona más alta de la cuenca, la cual supera los 4.000 m.s.n.m. Esta área se caracteriza por poseer gran parte de los circos glaciares, las vertientes hog-back y los circos. Sin embargo, este perfil si presenta características diferentes a los anteriores, ya que la ladera sur supera los 3.950 m.s.n.m. y no sigue el mismo patrón que los casos anteriores, sino que se asemeja a las características de la ladera norte.



Figura 16. Perfil 4 de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022.

A modo de síntesis, lo que caracteriza a los cuatro perfiles es que las laderas norte presentan una mayor altitud que la sur. Y que a medida que van llegando a lo alto de la cuenca, tienen una mayor variación en su elevación. Sin embargo, se presenta una diferencia en el último perfil, en el cual la ladera norte es solo unos 100 metros más alta que la sur.

3.1.4. Unidades identificadas en la cartografía

Tal como se describe anteriormente, el análisis geomorfológico se tomará en base a lo propuesto por Araya-Vergara (1985), el cual usa las vertientes como sistemas las cuales se encuentran conectadas hacia un canal principal. Considerando los objetivos que tiene esta memoria, las unidades geomorfológicas son de gran importancia para ver los procesos geomorfológicos que ocurren en la cuenca, por lo que ver la amplitud espacial que tienen los sistemas de vertientes, las formas de contacto, las formas fluviales son fundamentales para un buen análisis.

Siguiendo este análisis y según lo observado en la cartografía (Figura 17). En el área de estudio predomina el sistema de vertientes, las formas de base de vertiente, formas fluviales y las formas y procesos glaciales y nivales. Para tener una mayor claridad de estas unidades, se realizó una tabla resumen de las unidades identificadas, con el fin de conocer qué unidad es la que mayor área tiene dentro de la cuenca (Tabla 4).

	Área (m2)	Área (km2)	%
Vertiente cara libre rugosa	5738901	5,73	14,6%
Vertiente conforme simple	1877057	1,87	4,8%
Vertiente simple con escamas	10726660	10,72	27,2%
Vertiente inversa	3652288	3,65	9,3%
Vertiente hog-back	737884	0,73	1,9%
Conos	740639	0,74	1,9%
Talud	10588813	10,58	26,9%
Conos de deyección caóticos	1194698	1,19	3,0%
Laguna	494179	0,49	1,3%
Lecho	669922	0,66	1,7%
Bancos de arena	23551	0,02	0,1%
Morrena	2074450	2,07	5,3%
Glaciar rocoso	654345	0,65	1,7%
Remanente morrena	248096	0,24	0,6%
Total	39421483	39,34	100%

Tabla 4. Área (m2 y km2) total de las unidades geomorfológicas, elaboración propia, 2022.

De manera general, se puede señalar que la unidad que presenta una mayor superficie es vertiente simple con escamas con un 27,2% del total de la cuenca, y la que tiene un menor porcentaje dentro de las vertientes corresponde a la vertiente hog-back con un 1,9% del total de la cuenca. Estas estarán explicadas más detalladamente en la siguiente página, donde se hace un análisis de las unidades identificadas en la cuenca.

Por lo que de acuerdo con la tabla resumen (Tabla 4) y la figura de la carta geomorfológica (Figura 17) se describe a continuación sus características principales y los procesos en los cuales se ven sometidos.

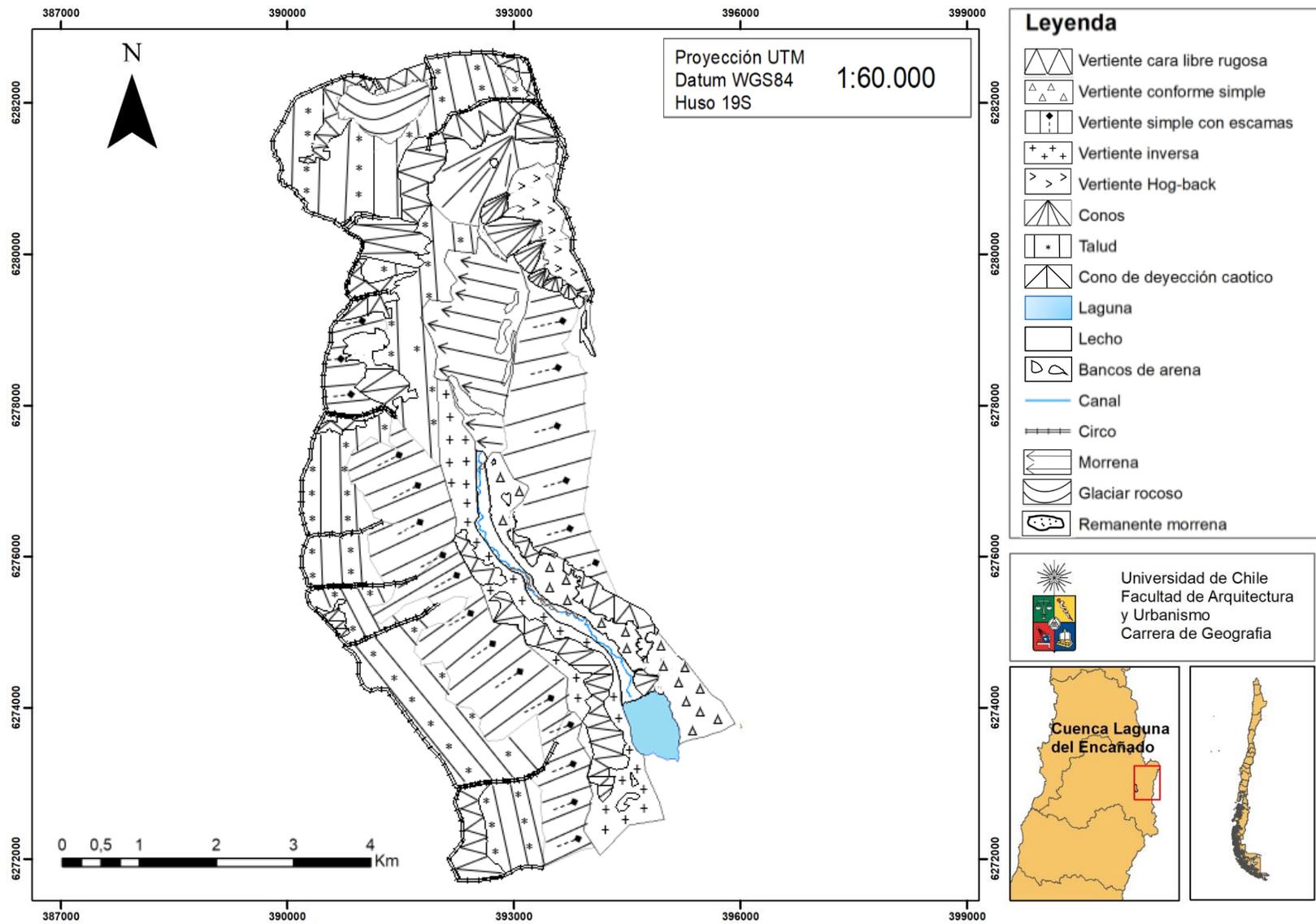


Figura 17. Carta geomorfológica de Laguna lo Encañado, elaboración propia, 2022.

Vertiente de hog-back

Esta vertiente se caracteriza por tener pendientes muy agudas en que el buzamiento de los estrados es mayor a los 60°, lo que le proporciona situaciones favorecedoras para tener aporte de detritos desde las vertientes (Soto, 2003). En el caso de la Cuenca lo Encañado, este tipo de vertiente se encuentra en el área más alta de la cuenca, cercana a los circos glaciares (Figura 17). Según la tabla resumen, cuenta con una menor proporción de área, la cual corresponde a una superficie de 0,73 km², que representa el 1,9% de la superficie de la cuenca (Tabla 4).

Vertiente conforme simple

Este tipo de vertiente se caracteriza por tener la misma dirección del buzamiento de las capas, lo que produce que tenga poca rugosidad. También se caracteriza por presentar poca disponibilidad de materiales para ser evacuados (Delgado, 2007). Para el caso del área de estudio, este tipo de vertientes se encuentra en la parte baja de la cuenca, cercana a la laguna, principalmente en la ladera sur de la cuenca (Figura 17). Ocupa una superficie de 1.87 km² que corresponde al 4,8% del total de la superficie de la cuenca (Tabla 4).

Vertiente simple con escamas

Estas vertientes por lo general presentan una rugosidad relativamente menor debido a que se desarrollan en la misma dirección de los estratos rocosos, lo que forma una vertiente consecuente (Delgado, 2007). Para la cuenca de la Laguna lo Encañado, es la que presenta mayor superficie, ya que se presenta a lo largo de esta. Se encuentra presente en la parte norte de la cuenca, cercana con los circos glaciares y los taludes (Figura 17). De acuerdo con la carta geomorfológica y el detalle en la tabla, esta vertiente cuenta con 10,72 km², que equivale al 27,2% de la superficie total (Tabla 4).

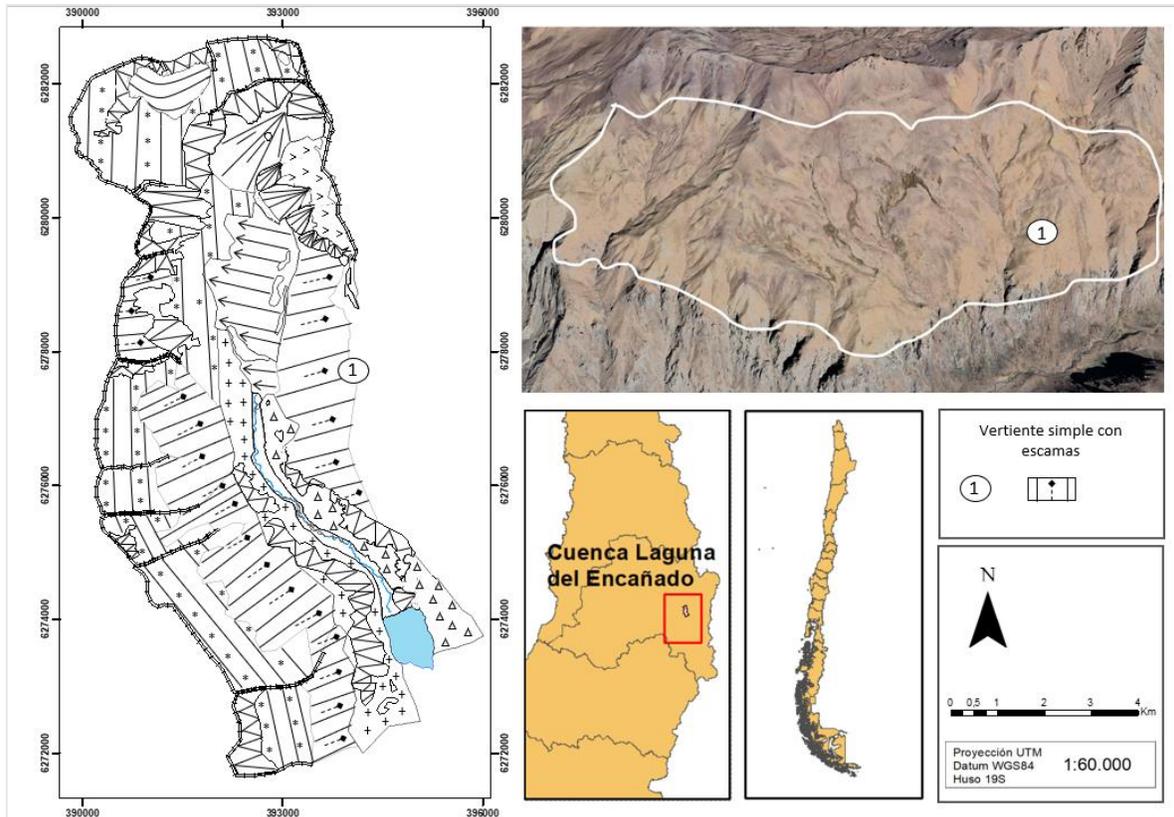


Figura 18. Imagen satelital de vertientes simple con escamas, elaboración propia con información obtenido en Google Earth Pro, 2022.

Vertientes caras libre rugosa

Estas se destacan por exponer sus estratos en una pendiente inversa a la inclinación que están. Principalmente son vertientes rugosas con peldaños y depósitos basales de talud. Este tipo de vertientes es el segundo más importante, ya que ocupa una superficie de 5,73 km², lo que equivale al 14,6% de la superficie total de la cuenca. Según lo observado, se encuentra presente en la parte norte de la cuenca, donde se ubican los circos glaciares (Figura 19). Lo que da como característica que en cada circo glaciar se presenta este tipo de unidad (Tabla 4).

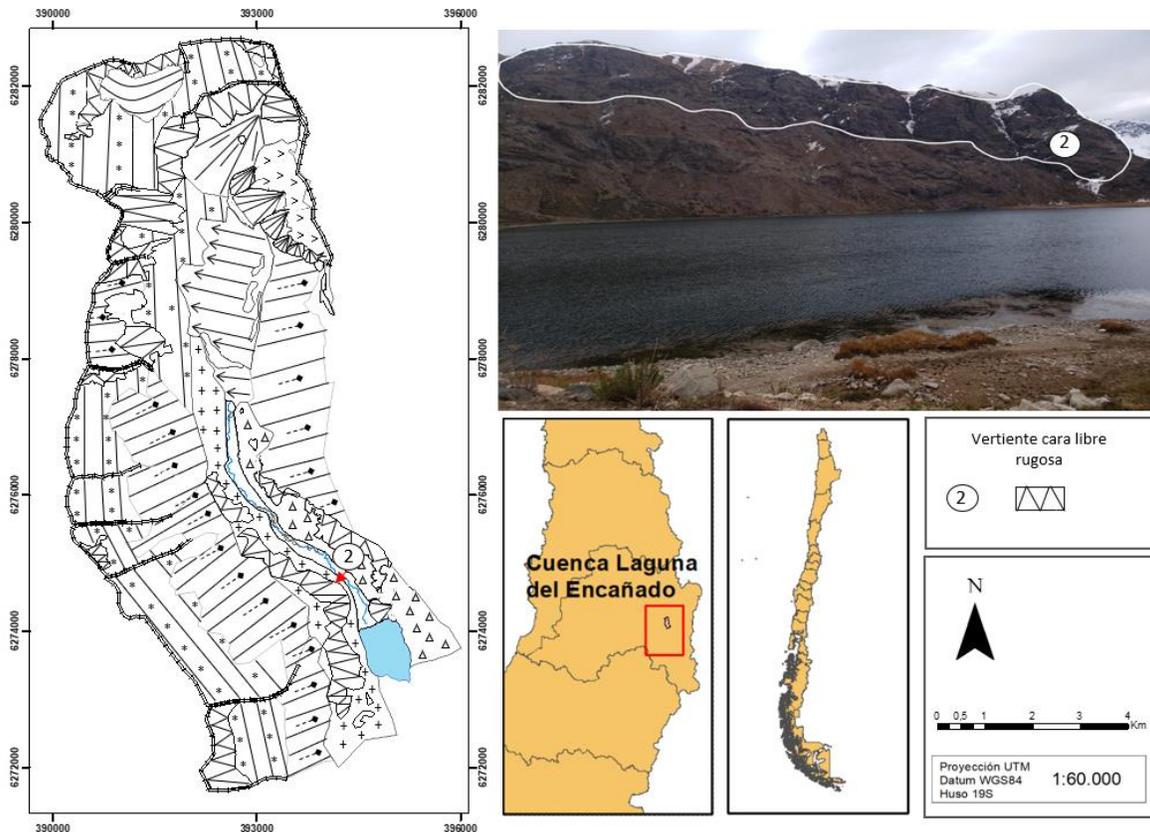


Figura 19. Imagen satelital de vertientes con cara libre rugosa, elaboración propia con información obtenido en Google Earth Pro, 2022.

Depósitos basales

Este tipo de unidad se caracteriza por ser depósitos correlativos de los sistemas de vertientes, los cuales se dan tanto por características gravitacionales, como por los conos asociados. Estos depósitos se caracterizan por mostrar la dinámica actual del paisaje de montaña, ya que son los que pueden mostrar más la forma que está evolucionando la tierra. Hablamos de los conos coluviales. Los cuales, según lo observado en la carta geomorfológica, se ubican en gran parte de la cuenca (Soto, 2003).

Según Soto (2003), estos depósitos son definidos como “modernos de laderas, con geometría de conos, los cuales se distinguen de los conos aluviales porque han sido formados por procesos de avalancha, esto quiere decir, que, por un rápido movimiento gravitacional de detritos rocos húmedos o secos, de nieve o la mezcla de estos en ambientes de fuerte pendiente”.

De acuerdo con la cartografía y siguiendo la taxonomía de Araya-Vergara (1985), los sistemas de conos, glaciares y conos aluviales torrenciales son consideradas como un indicador de la geodinámica que fue heredada del Cuaternario en los sistemas de

vertientes. Dentro de la cartografía, estos se pueden identificar en casi toda su superficie, pero en la zona alta de la cuenca es donde más se pueden encontrar (Figura 17). Estos representan el 1,9% de la superficie total de la cuenca (Tabla 4).

Lo mismo ocurre con los taludes. Estos también se desarrollan en gran parte de la cuenca, y se pueden identificar por estar en casi todos los sistemas de vertientes. En la cartografía se ve cómo están unidos con los circos y las vertientes simple con escamas (Figura 17).

Lechos y canales

Con respecto a lechos y canales. La cuenca cuenta con su canal principal, que viene cercano a los grandes circos y se va desplazando aguas abajo, hasta llegar a la laguna. Con respecto a los canales, estos se encuentran a lo largo de la cuenca y son de gran aporte a la cuenca, ya que algunos de ellos permiten la permanencia de vegas en zonas donde no se ven fuentes de agua.

Formas glaciales y nivales

Circo

En la cabecera de un valle glaciar hay estructuras denominadas circo, la cual son depresiones en forma de tazón que tienen paredes escarpadas en tres lados, pero están abiertas por el lado que desciende al valle. Esta estructura es el punto focal de crecimiento del glaciar, porque es la zona de acumulación de nieve y de formación de hielo (Tarbuck et al, 2005).

Los circos tienen una pendiente muy escarpada en la cual hay una correlación por depósitos de génesis postglacial. En el caso de la cuenca, estos están en la cabecera y en la ladera norte. Se puede observar que es una secuencia de circos, lo que da cuenta de la importancia de ver temas relacionados a la glaciación.

Una característica de estos circos glaciares es que están ubicados en la ladera norte de la cuenca, y cada uno de estos tiene paredes que están muy verticales, lo que produce un gran aporte de materiales hacia la zona más baja de la cuenca (Figura 20). Estos circos podrían ser la consecuencia de un glaciar principal que fue retrocediendo y dejando glaciares colgantes.

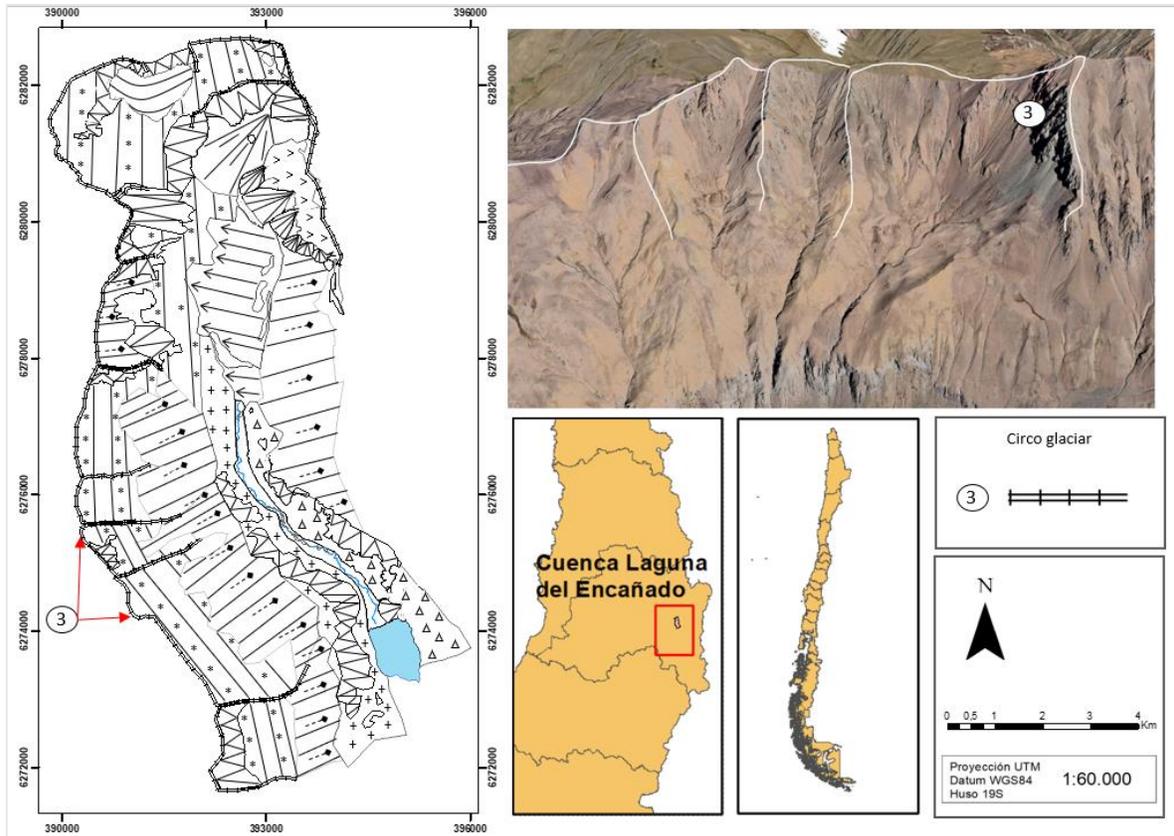


Figura 20. Imagen satelital de circos glaciares de la cuenca de la Laguna lo Encañado, elaboración propia con información obtenida de Google Earth Pro, 2022.

Glaciar rocoso

Estos glaciares son conocidos por ser la expresión geomorfológica de la reptación de permafrost de montaña con alto contenido de hielo (Barsch, 1996; Burger et al, 1999; Haeberli, 2000 en Brenning, 2010). Por lo general, tienen una morfología en forma de lengua o lóbulo, y un escarpe frontal y lateral como resultado de su desplazamiento (Brenning et al, 2010). Este tipo de glaciares se constituye por una mezcla de hielo (entre 40% y 60%) y material detrítico (Burger et al., 1999; Roer et al., 2005 en Brenning et al, 2010) o cúmulos de bloques angulosos de medidas heterométricas que tienen en su interior abundante clastos menudos y arenas gruesas, además finos (Palade, 2013).

La cuenca presenta este tipo de glaciares, estos se pudieron identificar por imágenes satelitales, las cuales se confirmaron con el Catastro de glaciares del año 2022 del IDE. Como se puede observar con la carta geomorfológica, se presentan en la cabecera de la cuenca (Figura 21). Tienen una superficie de 0,65 km², lo cual corresponde al 1,7% total de la cuenca (Tabla 4).

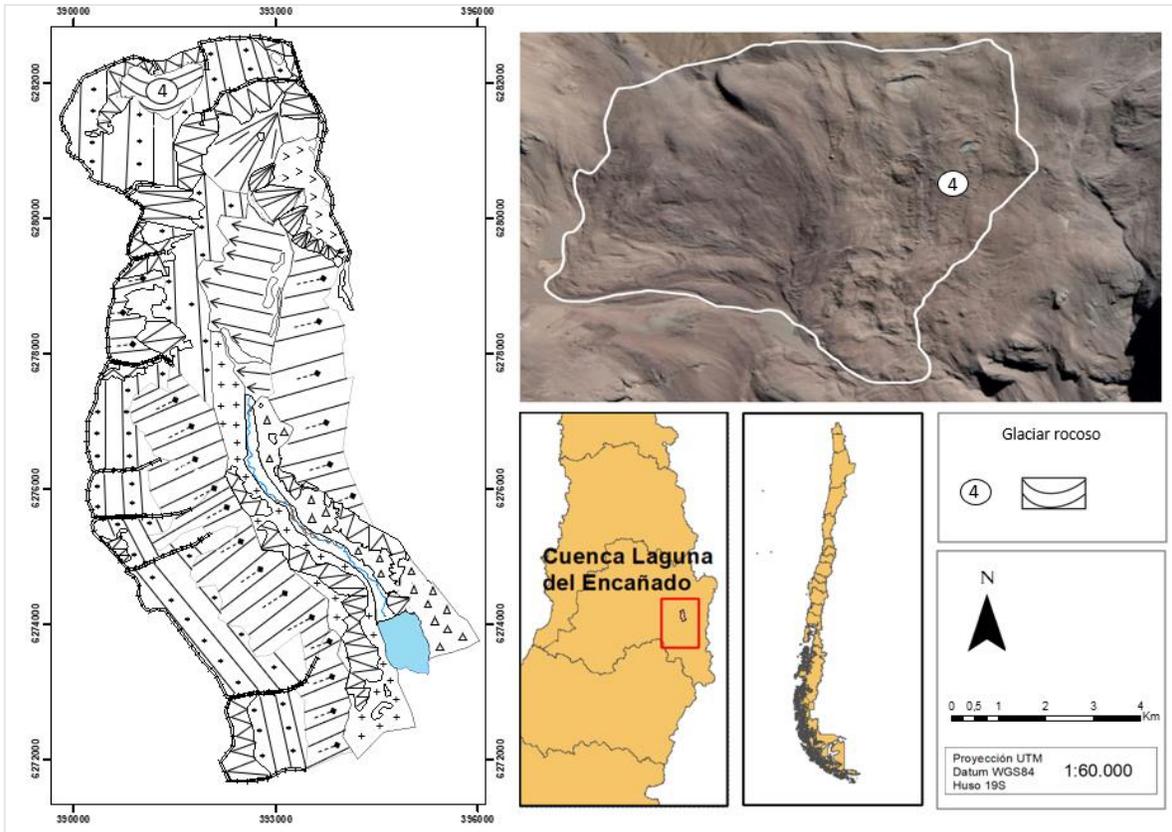


Figura 21. Imagen satelital de glaciar rocoso ubicado en la cuenca de la laguna lo Encañado, elaboración propia con información obtenida de Google Earth Pro, 2022.

Morrenas y remanentes morrénicos

Las morrenas se caracterizan por ser formas depositadas por los glaciares. Pueden ser identificadas como morrenas laterales, que se forman a lo largo de los laterales del valle. Morrenas centrales, que se caracterizan por estar formadas entre dos glaciares de valle que se juntan. Y morrenas de fondo que son capas ondulantes de till depositadas a medidas que el frente de hielo retrocede (Tarbuck et al, 2005).

Este tipo de depósitos es difícil de distinguir, ya que se encontraron en pocas partes de la cuenca, principalmente en la parte alta (Figura 22). Su identificación fue compleja por lo que se tuvo que realizar a través de una fotointerpretación. Según lo identificado, presentan un 0,24 km² de superficie, que equivale al 0,6% del área total (Tabla 4).

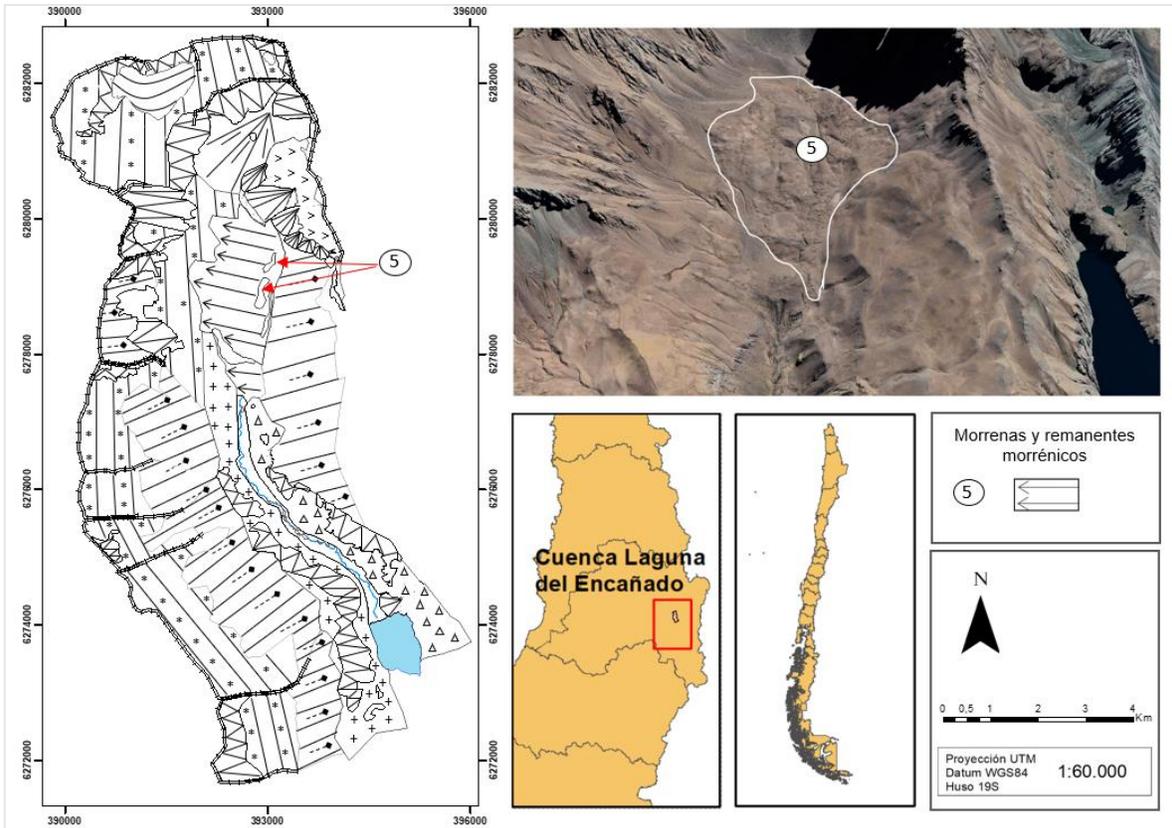


Figura 22. Imagen satelital de morrenas y remanentes morrénicos de la cuenca de la Laguna lo Encañado. elaboración propia con información obtenida de Google Earth Pro, 2022.

3.2 Analizar los testigos sedimentarios de la secuencia de Laguna lo Encañado

Se analizaron los testigos sedimentarios, y se tomó información de los proyectos Medlant y Holochill 2012 y 2013 respectivamente.

Se graficó la variable Carbono Orgánico Total (TOC), ya que el almacenamiento de carbono en lagos es un sumidero que compensa las emisiones de CO₂ antropogénicas. Su aumento está relacionado con cambios en los usos del suelo y el uso de nutrientes (Novo, 2020).

Se tomaron los testigos MAUEN-LLE12-6A-1G, MAUEN-LLE12-5A-1G, MAUEN-LLE12-4A-1G, MAUEN-LLE12-2A-1G, MAUEN-LLE12-1B-1G y MAUEN-LLE12-1A-1G. Con ello se visualizan las oscilaciones de concentración de TOC lo cual es relevante para conocer la productividad del lago, y se compararon los testigos en profundidad (Figura 23). Aquí se reconocieron 3 niveles:

1. La primera unidad se puede identificar solo en los testigos LLE12-4A-1G, LLE12-2A-1G, LLE12-1B-1G y LLE12-1A-1G, ya que los otros testigos no presentan una oscilación similar para realizar la correlación.
2. La segunda unidad se identificó en todos los testigos, pero a diferentes profundidades, ya que los primeros 5 testigos tuvieron oscilaciones similares, pero los dos últimos se presentan más superficialmente.
3. Por otro lado, en la última unidad se identificaron oscilaciones similares en los testigos LLE12-6A-1G, LLE12-5A-1G, LLE12-1B-1G y LLE12-1A-1G, pero no se puede identificar estas oscilaciones en los testigos MAUEN-LLE12-4A-1G y MAUEN-LLE12-2A-1G, ya que estas no muestran un comportamiento similar como las otras unidades correlacionadas.

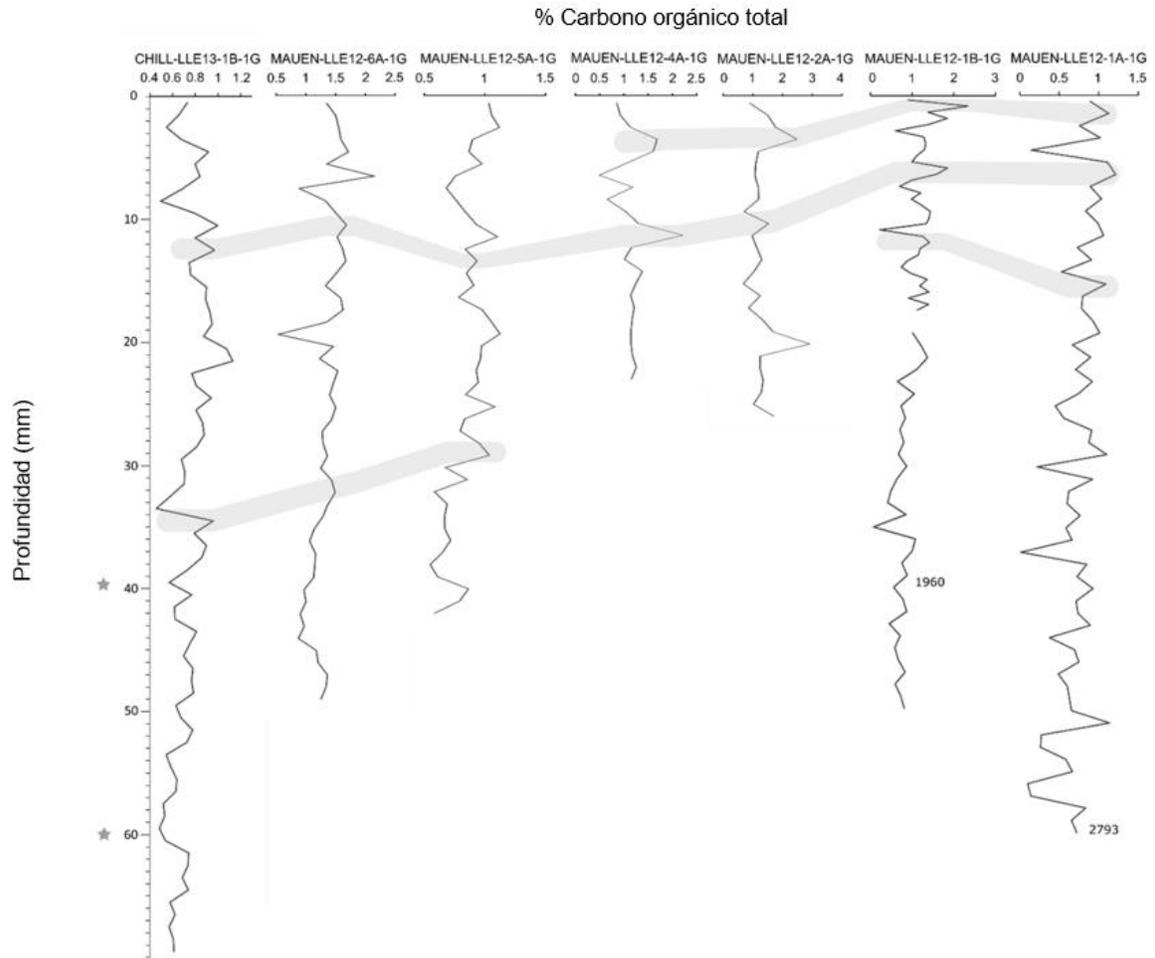


Figura 23. Contenido de Carbono Orgánico Total de los testigos CHILL-LLE13-1B-1G, MAUEN-LLE12-6A-1G, MAUEN-LLE12-5A-1G, MAUEN-LLE12-4A-1G, MAUEN-LLE12-2A-1G, MAUEN-LLE12-1B-1G y MAUEN-LLE12-1A-1G en profundidad. En la figura se observa los niveles (achurado gris) que muestran una fluctuación similar, y las edades presentes en esos dos testigos 1960 para MAUEN-LEE12-1B-1G y 2793 para MAUEN-LLE12-1A-1G

De igual manera, en la Figura 23 se observa que el testigo que presenta un mayor porcentaje de Carbono Orgánico Total (TOC), corresponde al testigo MAUEN-LLE12-2A-1G, el cual tiene valores que oscilan entre 0,66% y 2,91% de Carbono Orgánico Total, con un promedio de 1,31%. Esto da indicios que el testigo tiene un mayor porcentaje de materia orgánica (Tabla 5). Es importante señalar que la cantidad de materia que se acumula en un depósito sedimentarios lacustre no refleja necesariamente y de forma directa las tasas de producción o de aporte de materia orgánica al ecosistema, ya que, en su conservación, juegan un papel importante las tasas de producción y acumulación de otros sedimentos, la subsidencia de la cuenca, el tipo de materia orgánica inicial y la evolución diagenética que está presente (Van Daele, 2019).

Por el contrario, los testigos que presentan un menor contenido de Carbono Orgánico Total corresponden a los testigos MAUEN-LLE12-1B-1G y MAUEN-LLE12-1A-1G. Estos oscilan en torno a 0,73% y 0,74% de Carbono Orgánico Total. Lo cual podría dar cuenta de una menor concentración de materia orgánica (Tabla 5).

	TOC%		
	Mín	Máx	Promedio
CHILL-LLE13-1B-1G	0,46	1,13	0,74
MAUEN-LLE12-6A-1G	0,03	1,65	0,83
MAUEN-LLE12-5A-1G	0,55	1,12	0,85
MAUEN-LLE12-4A-1G	0,49	2,22	1,18
MAUEN-LLE12-2A-1G	0,66	2,91	1,31
MAUEN-LLE12-1B-1G	0,07	2,34	0,87
MAUEN-LLE12-1A-1G	0,01	1,21	0,73

Tabla 5. Valores mínimos y máximos, y promedio de los testigos cortos, elaboración propia, 2022.

Al tener las dataciones de los testigos MAUEN-LLE12-1A-1G y MAUEN-LLE12-6A-1G, y la correlación de los testigos cortos. Se pudo determinar las profundidades en las cuales se encuentran estas dataciones, lo que se pudo identificar en la Figura 24.

La Figura 24 presenta una imagen del testigo CHILL-LLE13-1C-1G y el TOC del testigo MAUEN-LLE2-1B-1G. Que se usó para identificar las dataciones que se obtuvieron a través de las correlaciones del TOC. Como se puede ver en la figura, a los 40 cm se encuentra la datación ^{136}Cs y a los 48,3 cm la datación carbono 14. La poca diferencia de centímetros de ^{136}Cs y Carbono 14 podría explicarse debido a la compactación de los sedimentos lacustres. Según Van Daele (2019), la laguna presenta tres categorías de turbaditas (C1, C2a Y C2b), las cuales pueden ser por procesos de derrumbe como de inundación. Sin

embargo, también señala que pueden ser el resultado de contribuciones postsísmicas de sedimentos procedentes de desprendimientos de rocas. Esto podría ser una de las explicaciones por la cual se evidencia una mínima diferencia entre las dataciones. Sin embargo, falta indagar más para corroborar esta información.

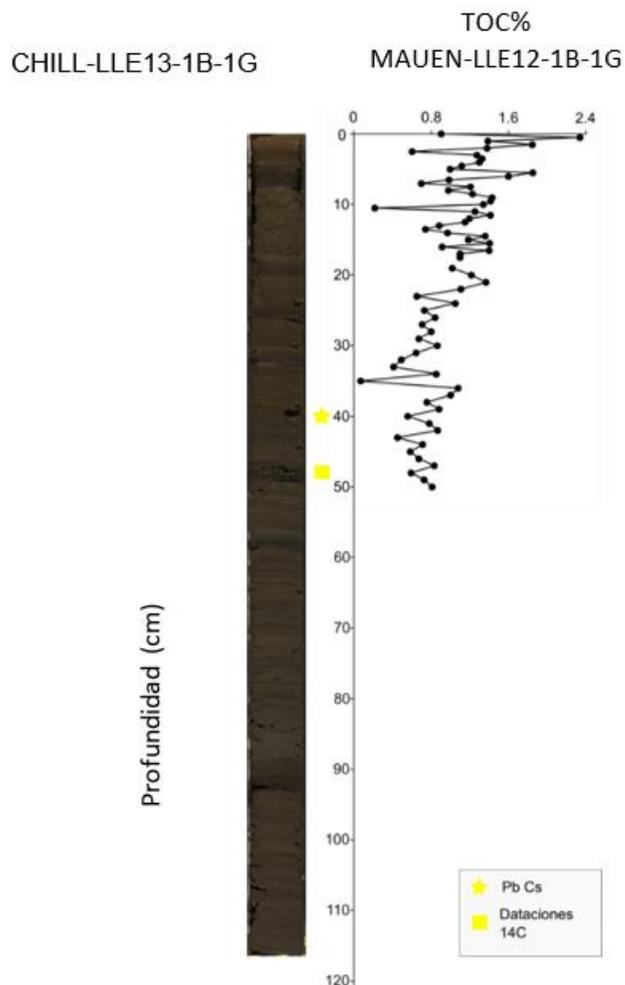


Figura 24. Identificación de datación en el testigo MAUEN-LLE12-1B-1G, elaboración propia con información obtenida de los proyectos Medlant y Holochill, 2022.

A pesar de realizar los pasos metodológicos para construir el modelo de edad. Este ha tenido dificultades en su elaboración, ya que como se puede reconocer con la información presentada anteriormente. Faltan datos que permitan presentar un modelo de edad adecuado, ya que no todos los testigos tienen dataciones, no todos tienen estimaciones de la materia orgánica y tampoco se presentan imágenes de los testigos cortos para realizar una correcta correlación de estos, a excepción del testigo CHILL-LLE13-1C-1G.

Es por esto por lo que, debido a las limitaciones metodológicas, se procederá a llevar todas las dataciones de los testigos largos (Tabla 3) al testigo CHILL-LLE13-1C-1G. Con el fin de usar una variable geoquímica de este testigo y correlacionar con otra variable de un testigo corto que tenga el mismo elemento. La finalidad de esto es poder llevar las dataciones a un solo testigo y así poder realizar el modelo de edad.

Para esto se utilizó el elemento Cloro (Cl). Sin embargo, se pretende realizar el análisis de otras variables geoquímicas. Para llevar a cabo la comparación, se tomaron los testigos MAUEN-LLE12-1A-1G y MAUEN-LLE12-6A-1G donde se realizó una comparación del Cloro (Cl). Posteriormente, se tomó el testigo MAUEN-LLE12-6A-1G y se comparó con el testigo CHILL-LLE13-1C-1G.

La comparación de los testigos MAUEN-LLE12-6A-1G y MAUEN-LLE12-1A-1G señala que ambos presentan similares fluctuaciones, lo cual se puede identificar entre los 0 mm y 300 mm. Lo mismo ocurre con las oscilaciones en las cuentas por segundo (cps), ya que se encuentran en los mismos parámetros (Figura 25).

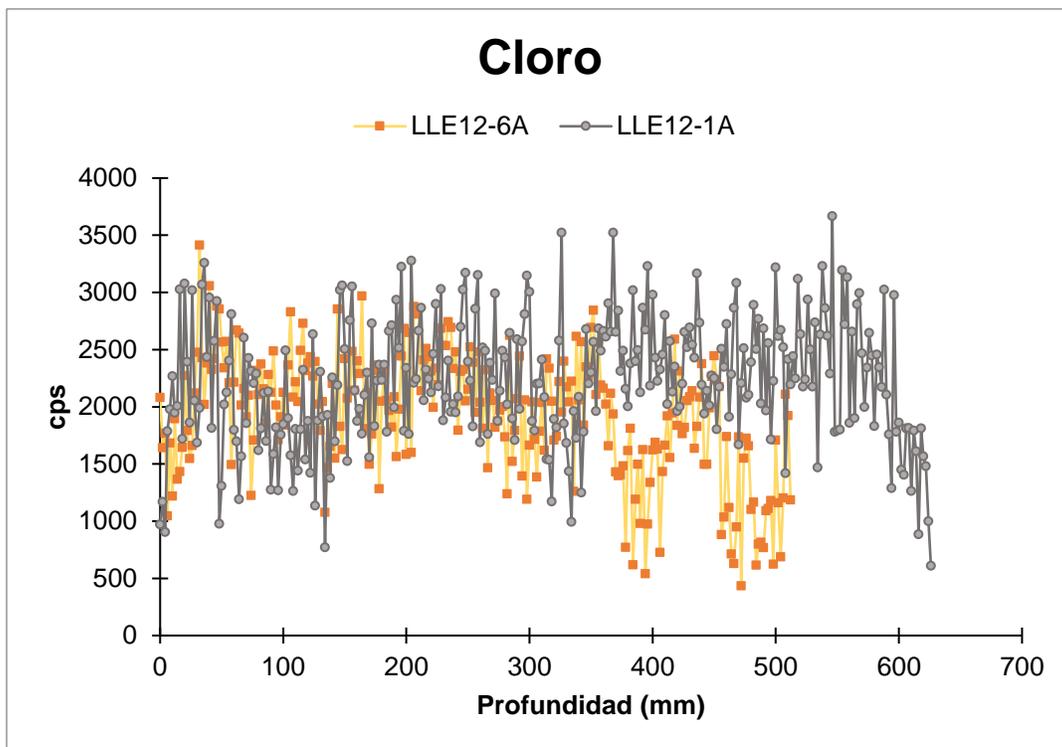


Figura 25. Comparación de Cloro (Cl) de los testigos MAUEN-LLE12-6A-1G y MAUEN-LLE12-1A-1G.

Por otro lado, los testigos MAUEN-LLE12-6A-1G y MAUEN-LLE13-1C-1G presentan la misma tendencia entre los 10 cm y los 55-58cm. Sin embargo, estas oscilaciones no están presentes en las mismas cuentas por segundo, si no que el testigo MAUEN-LLE12-6A-1G

cuenta con valores menores a los 3000 cps, y el testigo CHILL-LLE13-1C-1G presenta valores que oscilan entre los 3000 cps y 5000 cps.

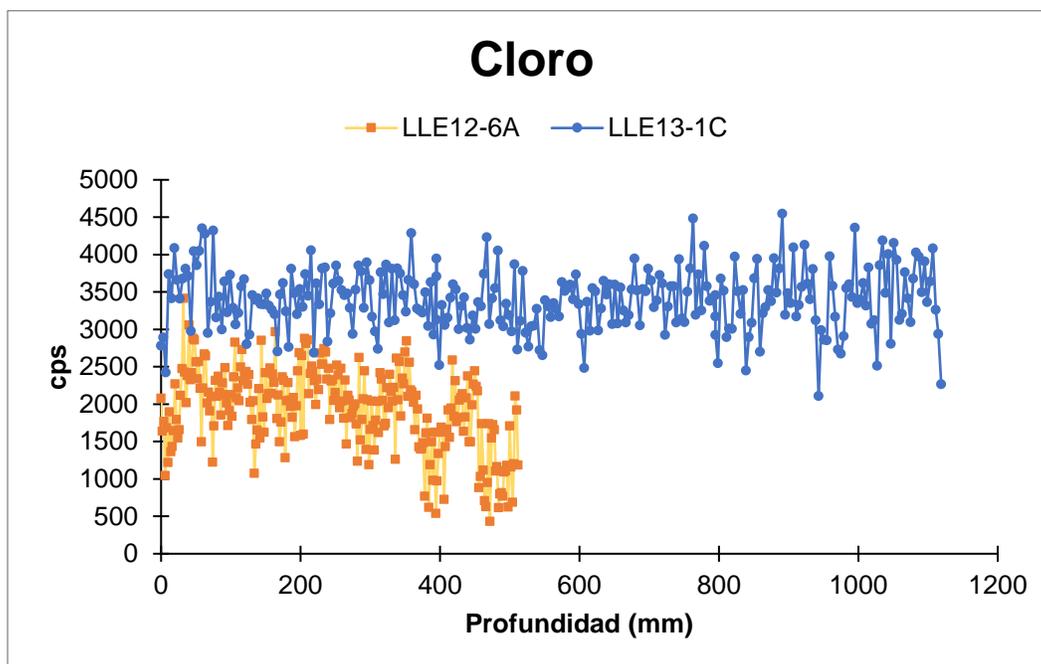


Figura 26. Comparación de Cloro (Cl) de los testigos MAUEN-LLE12-6A-1G Y CHILL-LLE13-1C-1G.

Con la comparación de los testigos se puede llevar las dataciones al testigo CHILL-LLE13-1C-1G. Logrando identificar que a los 48,3 cm se ubica las dataciones de carbono 14, lo que determina que a los 40 cm está ubicada a la datación PbCs. Estas dataciones están presentes en el gráfico de Cloro (Cl) los 80 cm aproximadamente (Figura 27).

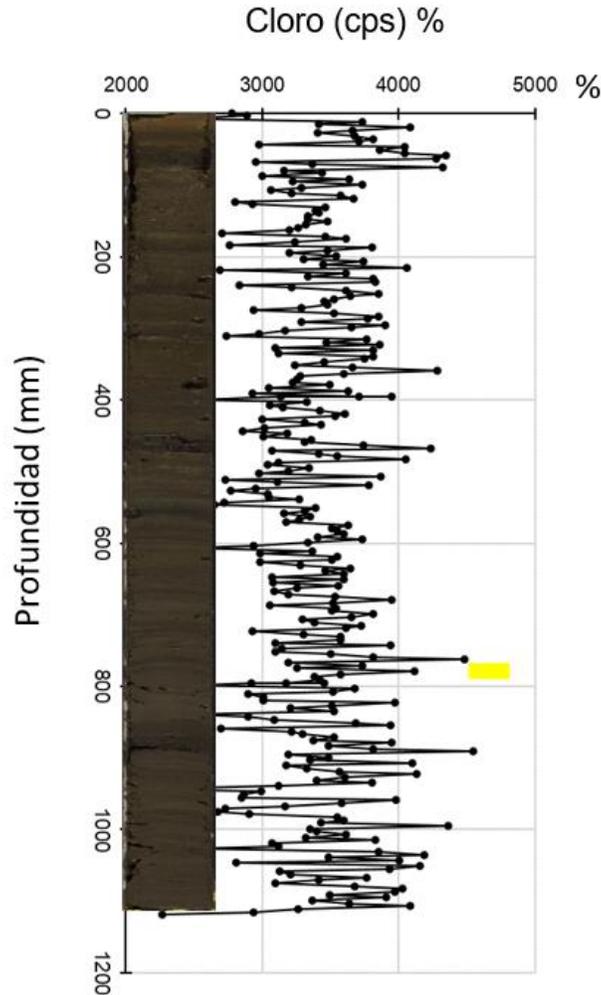


Figura 27. Correlación de Cloro (Cl) e imagen del testigo CHILL-LLE13-1C-1G, elaboración propia, 2022.

En función del análisis presentado anteriormente, y del posible modelo de edad. Se escogió el testigo MAUEN-LLE12-1A-1G para detallar específicamente las relaciones y procesos que se pueden identificar en él. En particular, este testigo se analizará para ver el input de material terrígeno que presenta la cuenca.

Se tomará en consideración el aporte de material terrígeno, ya que son productos de la denudación de rocas que son llevados a la cuenca por diversos agentes de transporte (Rodríguez, 1999). Entre sus indicadores se escogieron elementos como el Ti, Si, K y la relación Zr/Rb. Estos fueron seleccionados de acuerdo con:

- Ti: El Titanio es un elemento que se caracteriza por conservar su naturaleza durante el transporte y la meteorización (Kylander et al 2010).

- Si: El Silicio se seleccionó ya que se encuentra en abundancia en minerales de aluminosilicatos, principalmente en los feldespatos alcalinos. Aunque, también está asociado a la productividad de las diatomeas como componentes de sus frustulas (Kylander et al 2010).
- Zr/Rb: Esta relación se utiliza para obtener información sobre el tamaño del grano y la composición de los sedimentos (Wang et al, 2010).
- Fe: Este es tomado por ser indicador de las condiciones redox del lago o por los aportes detríticos y/o de los cambios en el origen de los sedimentos (Turnet et al 2015).
- K: De igual forma que los otros elementos, el Potasio es un buen indicador para ver la productividad lacustre (Kylander et al 2010).

Ti, el Rb y el K suelen estar asociados a conjuntos de minerales de arcilla. Mientras que el Zr y el Si están vinculados a fracciones de tamaño de limo y arena más gruesas (Kylander et al, 2008). Por otro lado, el Silicio (Si) es el único entre este grupo que está asociado a un origen biológico (Kylander et al, 2008).

Es importante destacar que el Rubidio (Rb) está presente en varios minerales como la mica y minerales de arcilla. Muestra una baja movilidad en el medio ambiente, ya que tiene una fuerte absorción en los minerales de arcilla, especialmente a un pH elevado. Se encuentra en los minerales de grano fino (Kylander et al, 2008). Durante el proceso de meteorización, el Rubidio (Rb) tiende a enriquecerse en los minerales de arcilla. El cual se distribuye mayormente en todo tipo de minerales formadores de rocas, y rara vez forma minerales independientes.

Por otro lado, el Circonio (Zr) se encuentra principalmente en los minerales de grano grueso. Enriquece en los limos medios y gruesos, y se asocia a minerales más pesados como el zircón (Kylander et al, 2008).

Al realizar una relación entre el Circonio y el Rubidio (Zr/Rb) se puede determinar el tamaño de granos. Esto afirma que al tener una menor cantidad de esta relación el tamaño del grano es más fino. Por el contrario, si se presentan una mayor cantidad es porque el grano es más grueso. Por lo tanto, las relaciones Zr/Rb reflejan realmente el contenido de minerales grueso en relación con los minerales de arcilla (Wang et al 2010). Estudio demuestran que a través de esta relación se pueden identificar inundaciones. Wang (2010) señala que a través de los picos de Zr/Rb pudieron identificar los registros de inundación del río Yangtz (Wang et al 2010).

Por lo que, al hacer una relación entre ellos, mientras más altos sean los picos de Zr/Rb mayor será el número de partículas gruesas depositadas por procesos de saltación. Cabe destacar que la saltación es el proceso por el cual las partículas son movilizadas y transportadas. Este proceso se caracteriza por movilizar las partículas de mayor tamaño (De Ferreri, 2017).

Esta información ayuda a determinar el grano de productividad de la laguna, ya que un grano más grueso se puede asociar a un proceso de transporte más rápido, donde no se tuvo el suficiente tiempo para pasar por los procesos de erosión y meteorización, y llegó a la laguna en ese estado. Por lo que los indicadores ambientales son claves para ver la magnitud y el momento de los cambios ambientales en la secuencia.

En la Figura 28 se observan las correlaciones del testigo MAUEN-LLE12-1A-1G con los elementos señalados anteriormente. Según esta correlación, se pudieron identificar las oscilaciones de cada uno de ellos, el en cual se reconocieron 4 niveles:

1. La primera unidad se identificó tanto en el K, Ti, Si y la relación Zr/Rb a la misma profundidad. Se puede observar cómo hay una abrupta disminución desde la superficie hasta los 40 mm de profundidad. Esto podría dar indicios de nuevas características para el estado de la laguna.
2. La segunda unidad se identificó entre los 20 mm y los 40 mm. Se caracteriza por presentar un elevado porcentaje de Zr/Rb que superó los 3%. Por el contrario, los otros elementos tienen el efecto contrario ya que presentan una menor cantidad.
3. Este nivel es similar al anterior, el Zr/Rb se caracteriza por presentar un valor alto, mientras los otros tienen una disminución en sus valores. Se encuentra alrededor de los 200 mm y los 220 mm.
4. Se identificaron oscilaciones similares en los 4 casos, pero el Titanio, el Silicio y el Potasio alcanzaron valores muy bajos. Lo cual podría dar muestra de un nuevo proceso en la laguna.
5. Por último, se identificaron oscilaciones similares, pero en este caso, la relación Zr/Rb tiene valores bajos comparados a los más superficiales. Para los otros elementos, se presentan valores bajos en todos, pero el Titanio alcanza un porcentaje menor que el Potasio y el Silicio.

El patrón general que se puede ver en la correlación es que a medida que aumenta la relación Zr/Rb, el Titanio, el Silicio y el Potasio presentan una disminución.

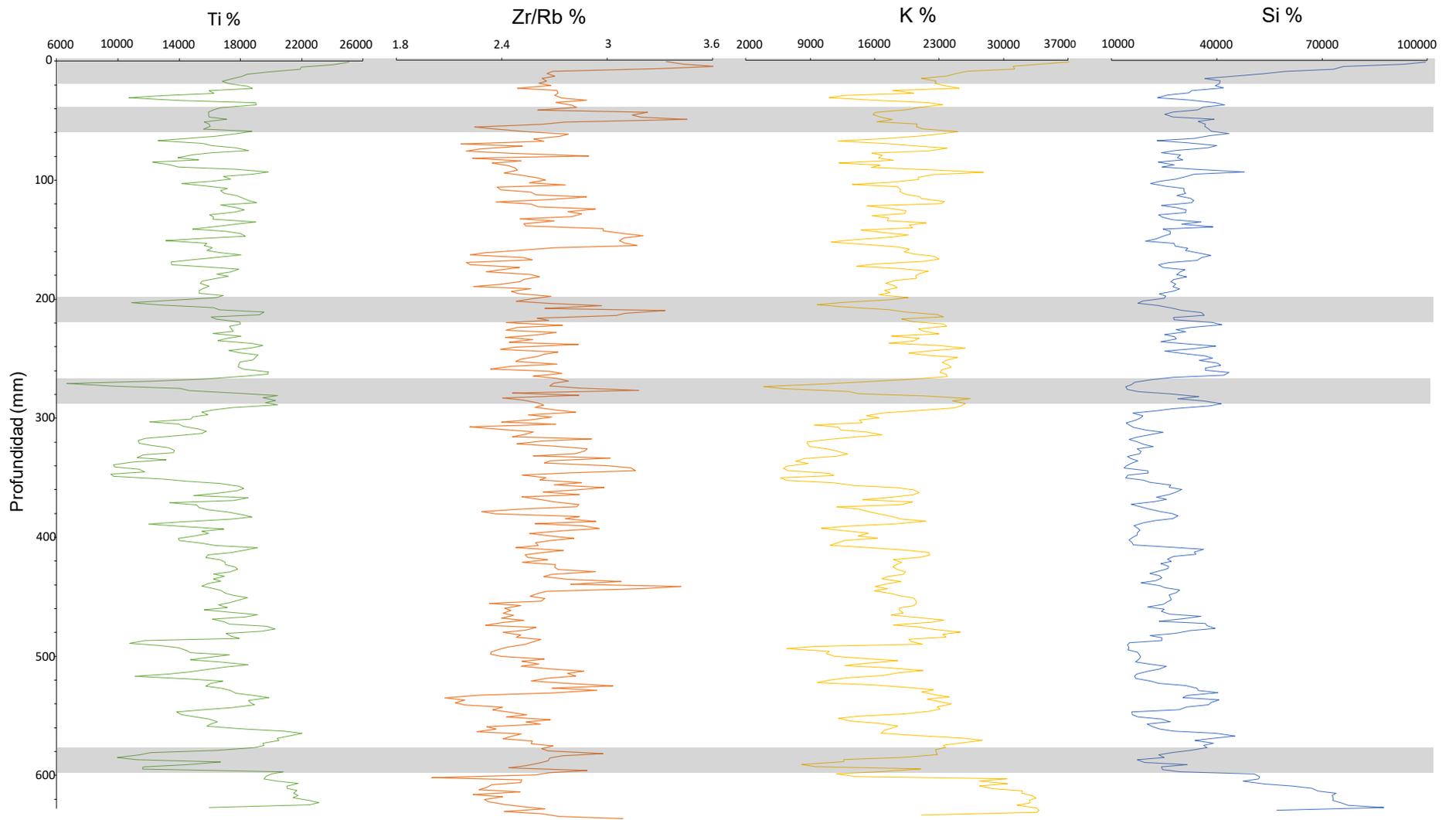


Figura 28. Unidades identificadas para el input terrestre del testigo MAUEN-LLE12-1A-1G, elaboración propia, 2022.

Para obtener un mayor detalle de los procesos que ocurren en la laguna, se construyó un gráfico donde se observan las oscilaciones entre el Titanio y la relación Zr/Rb. Como se aprecia en la Figura 29, existen varios instantes en el cual se pueden ver características que ayudan a comprender la evolución de la laguna.

Al analizar el primer nivel, se observa cómo entre los 40 mm y 60 mm hay un aumento de la relación Zr/Rb, pero una disminución del Titanio. Más detalladamente, esto se ve en gran parte de las oscilaciones, ya que cuando el Titanio disminuye, la relación Zr/Rb aumenta considerablemente. Por lo que cuando hay un mayor porcentaje de Zr/Rb y alto de Titanio quiere decir que hay una menor productividad lacustre, pues el tamaño de los granos sería más grande, lo que podría producir un depósito caótico que tiene un menor tiempo de transporte.

Siguiendo investigación como las de Wang (2008) y Kylander (2011), esta comparación ayuda a ver las productividades que tiene el lago. Aunque faltarían datos más detallados del tamaño de los granos para saber con certeza si esto corresponde en su totalidad.

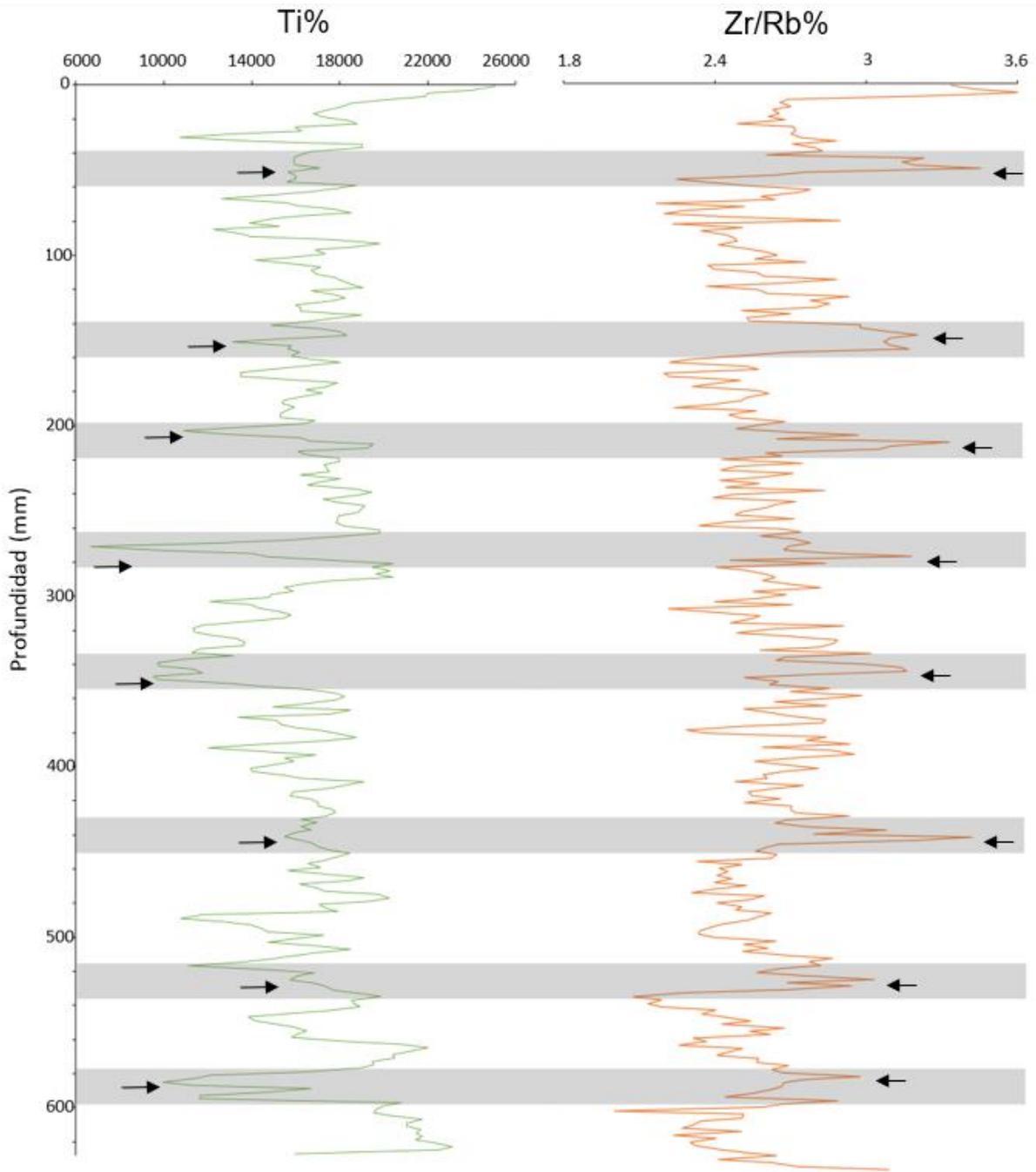


Figura 29. Relación entre oscilaciones de Titanio y relaciones Zr/Rb del testigo MAUES-LLE12-1A-1G en base a su profundidad, elaboración propia, 2022.

3.3 Relaciones entre la carta geomorfológica y los aportes sedimentarios del lago

La relación entre la carta geomorfológica y los aportes sedimentarios del lago ayuda a comprender la evolución de la cuenca con el cambio climático. Con la carta geomorfológica se identifican varias unidades como son las vertientes y procesos de remoción en masa (Basile, 2018). De acuerdo con el proceso geomorfológico, los sedimentos que están en pendientes muy elevadas se transportan hacia lugares con una menor pendiente. Produciendo que estos sedimentos se junten con otras unidades geomorfológicas.

En el caso de la cuenca de la Laguna lo Encañado estas se identificaron con los objetivos anteriores. Las zonas que tienen una mayor pendiente son donde se producen más procesos de talud y remoción en masa, y procesos de transporte en general. Estos registros se observan en los sedimentos lacustres, principalmente en su registro químicos.

El registro químico de los sedimentos lacustres es el resultado de una serie de factores y procesos que incluyen la composición de la roca madre, la meteorización de la cuenca, la deposición atmosférica, las eficiencias de transporte, la sedimentación y los procesos postdeposicionales (Boyle, 2002 en Kylander, 2008). Se conoce que los cambios climáticos pasados afectaron estos procesos, como también el estado general del lago en cuanto a su régimen hidrológico, procesos internos, productividad, etc. Estos se manifiestan espacialmente en el registro sedimentarios de varias maneras y depende en parte de la duración del evento en relación con las tasas de sedimentación (Boyle, 2002, en Kylander, 2008).

Al realizar una relación entre la carta geomorfológica (Figura 17) y los elementos que se asocian al input terrestre (Figura 28), se puede determinar, en primer lugar, que elementos como el K, el Rb, el Zr y el Si son indicadores de la aportación minerogénica al lago (Boyle, 2002, en Kylander, 2008). En estos, la química de los sedimentos está fuertemente controlada por el tamaño de grano del mineral dominante y la posterior clasificación por tamaño de partícula.

Al encontrar los elementos mencionados anteriormente en la laguna, se podría inferir que los procesos que suceden en la cuenca si están siendo transportados. Lo cual se podría deducir con si hay un menor aporte de Ti, pero se presenta un mayor porcentaje de Zr/Rb (grano grueso) hubo una menor productividad lacustre, lo que se sería un depósito inestable. Por el contrario, si hay un tamaño de grano mayor se asociaría a un mayor aporte de procesos de vertiente por más energía en la cabecera de la cuenca.

También que los cambios de Fe pueden ser indicadores de las condiciones redox del lago o de los aportes detríticos y/o de los cambios en el origen de los sedimentos (Davison, 1993, Kylander, 2008).

3.3.1 Relación de unidades geomorfológicas con la carta geológica

Al realizar una comparación entre la carta geomorfológica y la geológica, se puede determinar que las unidades geomorfológicas se relacionan con las unidades geológicas. Esta información ayuda a complementar la relación que se encontró entre las unidades geomorfológicas y los sedimentos lacustres.

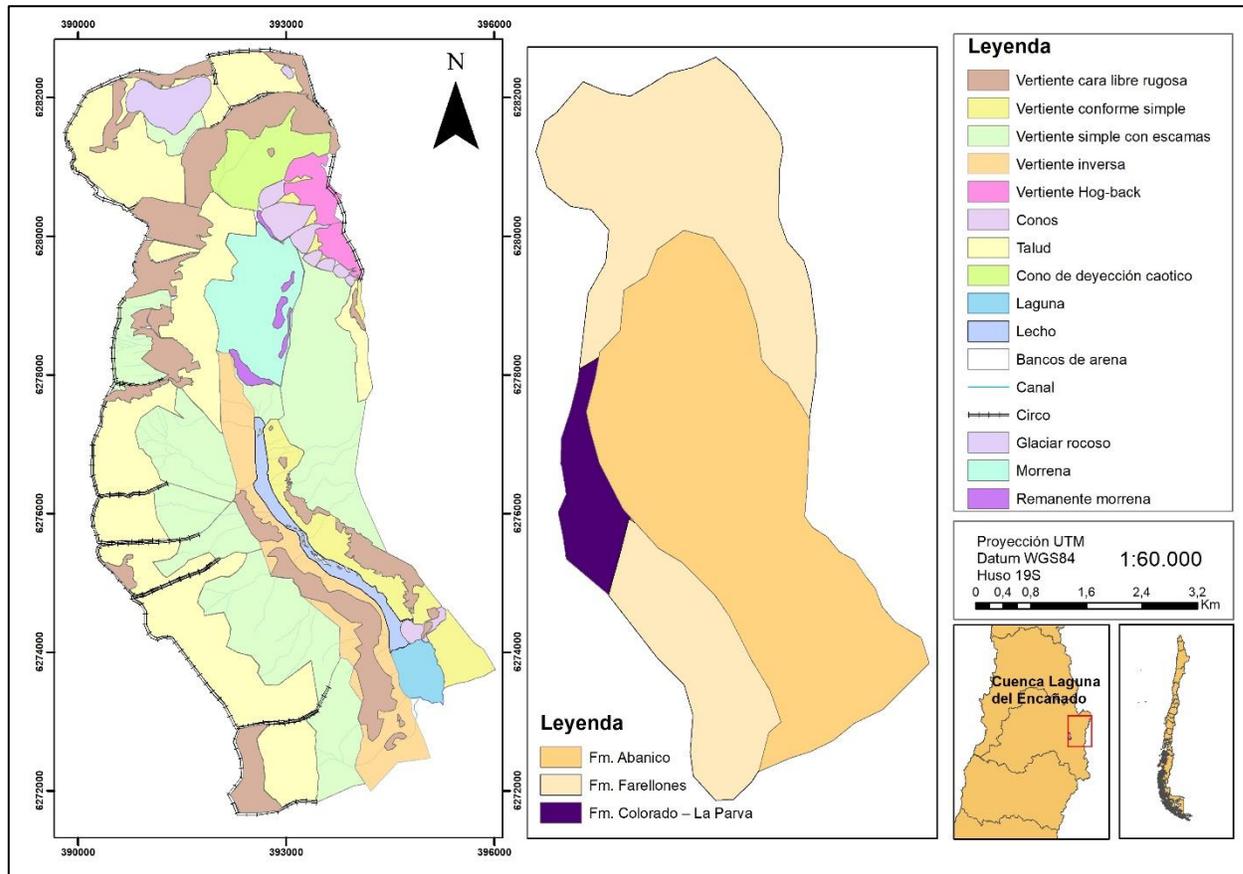


Figura 30. Relación de unidades geomorfológicas con la carta geológica, elaboración propia, 2022.

Como se mencionó anteriormente, gran parte de la cuenca corresponde a la Formación Abanico, la cual se caracteriza por ser secuencias volcánicas de margen continental asociadas a subducción (SERNAGEOMIN, 2022). Esta formación presenta una variabilidad en el contenido de sílice desde basaltos como riolitas. Por otro lado, la Formación Farellones, contiene unidades constituida por sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas, toleíticas y basálticas y rocas piroclásticas que alteran con sedimentos derivados de la descomposición de rocas efusivas (SERNAGEOMIN, 2022).

En primer lugar, las vertientes conforme simples se ubican mayormente en la Formación Abanico, la cual corresponde a una formación que está presente en gran parte de la cuenca. Con respecto a las vertientes con escamas. Se pueden ver en la cara norte de la cuenca, y se pueden relacionar con la Formación Abanico. Sin embargo, la parte que está en la zona alta de la cuenca se ubica en la formación La Parva – Colorado y en la formación Farellones.

La vertiente hog-back se caracteriza por tener poca superficie en la cuenca, la cual se encuentra ubicada en la Formación Farellones, como se muestra en la Figura 30. Este tipo de vertiente está en la parte con más altitud de la cuenca.

Al igual que la unidad anterior, las vertientes de cara libre rugosa están presentes en las tres formaciones. Hay una zona que se encuentra en la formación Abanico, la cual corresponde a la zona más baja de la cuenca. Y la parte alta de la cuenca cuenta con caras libres rugosas en zonas donde está la formación Farellones y Colorado – La Parva.

Con respecto a las otras formas encontradas en el área, como son los conos, taludes y morrenas, se encuentran en su mayoría en la formación Abanico y Farellones (Figura 30). Es importante destacar que, al ver el perfil de la carta geológica, la cuenca se encuentra en zona donde hay depósitos morrénicos, lo cual se puede demostrar con los remanentes de morrenas que se encontraron en la carta geomorfológica (Figura 17).

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

4.1 Discusión

Chile ha presentado un cambio en las precipitaciones a lo largo de su territorio, lo que se ha visto acentuado por un déficit pluvial ininterrumpido, trayendo sequías ya sea en la hidrología superficial como en las aguas subterráneas. La zona central no se ha visto aislada, ya que la disminución de las precipitaciones ha causado un descenso en los caudales de los ríos, lo que ha afectado en la disponibilidad de agua dulce que tiene la población. La cuenca de la Laguna lo Encañado es un área sumamente importante para la población de la Región Metropolitana, por lo que su estudio es fundamental para la población que se encuentra viviendo en torno a ella, pues ante cualquier evento negativo se podrían producir cambios en la disponibilidad de agua. Es importante entender la evolución o la dinámica que tiene la cuenca para ver el impacto que puede tener en un futuro.

De acuerdo con el análisis geomorfológico, se puede señalar que la cuenca presenta importantes procesos que permiten el transporte de sedimentos a la laguna, los cuales producen una evolución tanto en la cuenca como en la laguna, ya que a medida que se van produciendo remociones y flujos de detritos estos van cambiando la distribución y composición de la laguna. Los procesos que pueden tener un mayor aporte son las vertientes del tipo cara libre rugosa, vertiente inversa y talud.

Los flujos que se desarrollan con procesos de vertientes de hog-back y vertientes conformes con escamas pueden no producir depósitos mayores a los ya existentes, y se podrían caracterizar por ser más consolidados. Esta información se complementa con la vegetación en estas zonas, ya que con las imágenes satelitales se puede apreciar que es una zona donde se producen vegas.

Con respecto al análisis y correlación de los testigos sedimentarios se mostró en primer lugar que las muestras presentan diferentes variaciones en sus valores, ya que al comparar el TOC entre ellos se ve como estos tienen diferentes oscilaciones dependiendo de la posición que se encuentren en la laguna. Entre ellos, el testigo MAUEN-LLE12-2A-1G presenta una menor proporción de TOC, lo cual se podría suponer que es por la lejanía que tiene esta muestra de la zona donde llega el flujo de agua. Se podría considerar esta información, pero también se debe tener presente que la cantidad de materia orgánica que se acumule en los sedimentos lacustres no es necesariamente por las tasas de producción o de aporte de materia orgánica del ecosistema, ya que la conservación es importante en la tasa de producción y acumulación de otros sedimentos (Van Daele, 2019).

El caso de la correlación del Titanio y la relación Zr/Rb es un punto importante que ayuda a ver la evolución de la laguna. Como se mencionó anteriormente, la relación Zr/Rb detalla el tamaño del grano (menores valores grano más fino, mayores valores grano más grueso). Por lo cual, cuando hay valores altos está indicando que el tamaño del grano es más grande, lo que se pudo dar por una sedimentación más rápida y menos inestable. A pesar

de conocer esta información, faltan datos para saber con exactitud la evolución que tiene la laguna. Sin embargo, ayuda a comprender mejor su dinámica.

Por último, las relaciones entre la carta geomorfológica, los sedimentos y la carta geológica determinan que por procesos que se desarrollan en la cuenca, la laguna se ve alterada y está pasando constantemente por cambios. Lo que demostraría una evolución por procesos de la cuenca. Sin embargo, es difícil señalar con exactitud qué zona de la cuenca es la que está contribuyendo más sedimentos a la laguna. Anteriormente se trató de detallar este caso, pero falta información para comprobarlo con exactitud.

Con respecto a las limitaciones de la memoria, se presentó una dificultad el no realizar una visita a terreno, ya que las veces que se consiguió permiso con Aguas Andinas, después se tuvieron que cancelar por temas de pandemia y factores climáticos, lo que dificultó la elaboración de la carta geomorfológica. Por lo que se tuvo que realizar una fotointerpretación con imágenes satelitales y pendiente.

Otro limitante tiene relación con el acceso a la información, pues a pesar de realizar la metodología propuesta, no se pudo concretar un modelo de edad, ya que la mayoría de los testigos cortos no tienen datación. Se podría haber realizado un modelo de edad en base a los testigos que tienen dataciones y que fueron correlaciones. Sin embargo, no se alcanzó a realizar ya que se invirtió mucho tiempo en la correlación de los testigos. Lo que deriva a que el acercamiento a la construcción del modelo de edad se tuviera que realizar a través de la correlación y comparación de elementos como el Cloro (Cl).

Sin embargo, a pesar de estas limitaciones se obtuvieron los objetivos que se plantearon al inicio del estudio. Se señala que fue posible realizar cada uno de ellos. La carta geomorfológica de la cuenca, la correlación y el análisis de los testigos lacustres, y la relación entre la carta geomorfológica y los sedimentos lacustres. Por lo que se valora la información proporcionada por los proyectos Medlant y Holochill realizados el 2012 y 2013 respectivamente. De esta manera, es importante señalar que a través del análisis de los sedimentos lacustres quedó en evidencia la dinámica de la Laguna lo Encañado.

4.2 Conclusión

De acuerdo con los resultados, es posible afirmar que la cuenca de la Laguna lo Encañado presenta un proceso de sedimentación que está evolucionando constantemente, el cual puede seguir cambiando con las condiciones actuales que está viviendo el planeta.

En primer lugar, la carta geomorfológica ayudó a comprender mejor los procesos que presenta la cuenca, los cuales están siendo influenciados constantemente por los cambios ambientales que se están produciendo. Como se mencionó anteriormente, hay tipos de vertientes que están presentando más sedimentos y procesos a la laguna. Como son las de cara libre rugosa y talud, ya que otros como las vertientes conformes simples tienden a una mayor pasividad, relacionada al menor aporte detrítico debido a que los estratos rocosos no están tan expuestos a la meteorización (Soto, 2003).

También se puede señalar que el proceso de sedimentación es complicado, considerando que esta área se conoce como una zona de acción aluvial y de acción glacial y criogénica (SERNAGEOMIN, 2019). Esto se pudo evidenciar con el análisis de las variables geoquímicas, ya que se obtuvo un panorama general de cómo funciona la laguna de acuerdo con sus niveles de Carbono Orgánico Total presentes en los sedimentos. Como por los elementos y relaciones que se pudieron identificar de acuerdo con los indicadores de material terrígeno que se aporta desde la cuenca hacia la laguna.

Con respecto a las relaciones entre el Titanio y la relación Zr/Rb, la tendencia indica que mientras más altos son los picos de Zr/Rb, más partículas gruesas y componentes de salto se observan en los sedimentos. Información que se puede complementar con los resultados obtenidos con el análisis geoquímica, ya que se puede decir que a los 440 mm se alcanzó el porcentaje más alto de Zr/Rb y uno menos de Titanio, lo cual pudo haber producido un proceso más inestable en la laguna.

Finalmente, se puede determinar que se está produciendo una constante evolución de la laguna, la cual se trató de mostrar con todos los cambios mencionados anteriormente. Es importante señalar que va a seguir cambiando y evolucionando a lo largo de los años.

A pesar de no realizar una reconstrucción de los efectos del clima en la dinámica cuenca-lago, los cuales permiten plantear la respuesta que tendrán los ecosistemas lacustres ante escenario futuros de cambios climáticos. Se debe seguir trabajando en futuras investigaciones, ya que constituyen un valioso archivo de información para la reconstrucción de los procesos, ya sea naturales como inducidos por el hombre en periodos en que no existe registro instrumental. Es importante seguir estudiando la cuenca de la Laguna lo Encañado, ya que los ecosistemas de agua dulce son recursos escasos de gran importancia ecológica para las poblaciones.

CAPÍTULO 5: BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, M. (2017). *Propuesta para mejorar la legislación y normativa sanitaria en Chile bajo el Análisis de la empresa Aguas Andinas*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial.

Albornoz, C. (2015). *Análisis del origen del depósito de Mesón Alto en el Río Yeso, Chile central (33°40S): Cartografía y Modelación Analógica*. Memoria para optar al Título de Geóloga.

Araya, J. (1985). *Análisis de la carta geomorfológica de la Cuenca del Mapocho*. Obtenido de <https://investigacionesgeograficas.uchile.cl/index.php/IG/article/view/27693/29376>

Basile, P. (2018). Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales. Obtenido de <http://rephip.unr.edu.ar/handle/2133/10738>

Brenning, A., Azócar, G. (2010). Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34022010000300008&script=sci_arttext

Buglio, F. (2017). Reanálisis de las series de mediciones del balance de masa del Glaciar Echaurren Norte, Región Metropolitana, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo.

Consejo superior de investigaciones científicas. (2006). *Cambio Global, impacto de la actividad humana sobre el Sistema Tierra*. Obtenido de http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/01/Cambio_global.pdf

Consejo superior de investigaciones científicas. (2010). Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria.

Contreras, J., Charrier, R. (2003). Modelamiento de la deformación de la formación abanico, en la carretera el cobre, VI Región. Obtenido de https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/ContrerasJ_y_CharrierR.pdf

Corella, J., Benito, G., Wilhelm, B., Montoya, E., Rull, V., Vega-Vilarrúbia, T., & Valero-Garcés, B.I. (2019). *A millennium-long perspective of flood-related seasonal sediment yield in Mediterranean watersheds*.

De Ferrari, D. (2017). Emisión de PM10 de suelos agrícolas de la región semiárida central Argentina: relación entre el material movilizado por saltación y suspensión. Obtenido de <https://repo.unlpam.edu.ar/handle/unlpam/2124>

Delgado, E. (2007). Geodinámica y valoración del nivel potencial de riesgo natural en alta montaña: cuenca del río Las Leñas, vertiente occidental de los Andes Centrales. Memoria para optar al título de Geógrafo.

Dirección Meteorológica de Chile (2018). *Situación climática, Monitoreo ciclo El Niño/La Niña y Pronostico Estacional*. Obtenido de

[http://archivos.meteochile.gob.cl/portaldmc/meteochile/prediccionestacional/DocumentosPDF/BoletinesPDF/Monitoreo/monitoreo_Septiembre-2018\(Ed_Octubre-2018\).pdf](http://archivos.meteochile.gob.cl/portaldmc/meteochile/prediccionestacional/DocumentosPDF/BoletinesPDF/Monitoreo/monitoreo_Septiembre-2018(Ed_Octubre-2018).pdf)

Dionizis, D. (2018). *Análisis de las proyecciones de recursos hídricos aportantes a los sistemas embalse El Yeso y Laguna Negra bajo el escenario de cambio climático RCP8.5*. Obtenido de Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil.

Ecosistemas. (2021). Usos y abusos – Humanidad en las cuencas – Río Maipo, es una publicación de Ecosistemas con el auspicio de las Fundaciones Lush Charity Pot, Marisla, Patagonia Inc. y Weeden. Obtenido de <https://www.ecosistemas.cl/wp-content/uploads/2021/02/Usos-y-abusos-Humanidad-en-las-cuencas-Rio-Maipo-web.pdf>

Garreaud, R., Boisier, j., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., Veloso-Aguila, D. (2019). *The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective*. Obtenido de http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/MD_dynamics.pdf

Giguet, C., Arnaud, F., & Poulénard, J. (2011). *Changes in erosion patterns during the Holocene in a currently treeless subalpine catchment inferred from lake sediment geochemistry (Lake Anterne, 2063 m a.s.l., NW French Alps): The role of climate and human activities*

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2020). *El cambio climático y la tierra*. Obtenido de IPCC: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2019). *Calentamiento global de 1,5°C*. Obtenido de IPCC: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). *Cambio Climático 2014, Informe de síntesis*. Obtenido de IPCC: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

González, C. (2005). Estudio áreas de riesgos geomorfológico de la zona urbana y de expansión de la comuna de San Antonio, V Región. Memoria para optar al título de Geógrafo.

González-Reyes, A. (2016). *Ocurrencia de eventos de sequías en la ciudad de Santiago de Chile desde mediados del siglo XIX*. Obtenido de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-34022016000200003&script=sci_arttext

Hasbún, R. (2020). Estrategias de tolerancia a estrés abiótico en formaciones xerofíticas para el desarrollo de herramientas biotecnológicas aplicables en viveros. Obtenido de <https://investigacion.conaf.cl/documentos/documento.php?idDocumento=1119564>

Hauser, A. (1993). Remociones en masa en Chile. Obtenido de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2000-09.pdf

Ilustre Municipalidad de San José de Maipo. (2018). *Actualización plan de desarrollo comunal (PLADECO) San José de Maipo – Región metropolitana de Santiago*.

Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE). (2019). Zonas climáticas de Chile según Köppen-Geiger escala 1:1.500.000. Obtenido de <https://www.ide.cl/index.php/clima-y-atmosfera/item/1556-zonas-climaticas-de-chile-segun-koepfen-geiger-escala-1-1-500-000>

Instituto Geográfico Nacional (2022). Carta Geológica de Chile. Escala 1:250.000: Geología de la Hoja Santiago. Región metropolitana. Obtenido de <https://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/resources/html/035179.html>

Instituto Nacional de Estadística. (2017). *Resultados definitivos Censo 2017*. Obtenido de https://www.censo2017.cl/wp-content/uploads/2017/12/Presentacion_Resultados_Definitivos_Censo2017.pdf

Kylander, M & Veres, D. (2008). High Resolution ITRAX Analysis of Les Echets (France) Sedimentary Sequence: Linking Geochemical, Biological and Physical Proxies.

Meza, L., Corso, S., Soza, S. (2010). *Gestión del riego de sequías y otros eventos climáticos extremos en Chile*. Obtenido de https://www.unisdr.org/files/13992_climachl.pdf

Novo, C. (2020). El carbono almacenado en lagos se ha triplicado debido a la alteración de los ciclos de nutrientes. Obtenido de <https://www.iagua.es/noticias/redaccion-iagua/carbono-almacenado-lagos-se-ha-triplicado-debido-alteracion-ciclos>

Palade, B. (2013). Los glaciares rocosos de Sierra Nevada y su significado paleo climático: Una primera aproximación. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/277944896_Los_glaciares_rocosos_de_Sierra_Nevada_y_su_significado_paleoclimatico_Una_primera_aproximacion

Palma, V. (2018). Geodinámica de las laderas en la sección distal de la cuenca de Vodudahue, X Región de Los Lagos. Memoria para optar al título de Geógrafo. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/153010/geodinamica%20de-laderas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Peñuelas, j., Sabaté, S., Flella, I., Gracia, C. (2005). Efectos del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres: observación, experimentación y simulación. https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/cap15_-_efectos_del_cambio_climatico_sobre_los_ecosistemas_terrestres_observacion_experimencion_y_simulacion.pdf

Pincetti, G. (2016). *Hidrogeoquímica e hidrodinámica de las fuentes termales del río Yeso y río Volcán, Cordillera de Los Andes, Región Metropolitana*. Memoria para optar al título de Geólogo.

Pontificia Universidad Católica de Chile. (2022). Agentes y procesos, sistemas morfogénicos. Obtenido de https://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/1_2.html

Pontificia Universidad Católica de Chile. (2022). Impactos y Adaptación al cambio climático en Chile. Obtenido de <https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/impactos-y-adaptacion-al-cambio-climatico-en-chile>

Rodríguez, G. (1999). Elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales de la laguna de la paz, B. C. S., México. Obtenido de <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/14866/1/rodriguezme1.pdf>

Servicio agrícola y ganadero (2011). Pauta para estudio de suelos. Obtenido de <https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/pauta-para-estudio-de-suelos--mod-2016.pdf>

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) (2019). Evaluación de peligro por procesos de ladera en la ruta G-455, comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana. Obtenida de <https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/datafiles/15687.pdf>

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) (2022). Portal GEOMIN: Catálogo Nacional de Información Geológica y Minera. Obtenido de <https://portalgeominbeta.sernageomin.cl/>

Soto, M & Castro, C. (2003). Dinámica de los sistemas de vertientes de alta montaña, cuenca del río Cachapoal, Chile. Obtenido de https://biblioserver.sernageomin.cl/opac/datafiles/SotoM_y_CastroC.pdf

Tapia, C. (2020). *El Antropoceno observado a través de la influencia de los cambios de uso de cobertura del suelo en los ecosistemas de Chile central entre 1975 y 2020*. Memoria para optar al título de Geógrafo. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180753>

Tarback, E. & Lutgens, F. (2005). Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física.

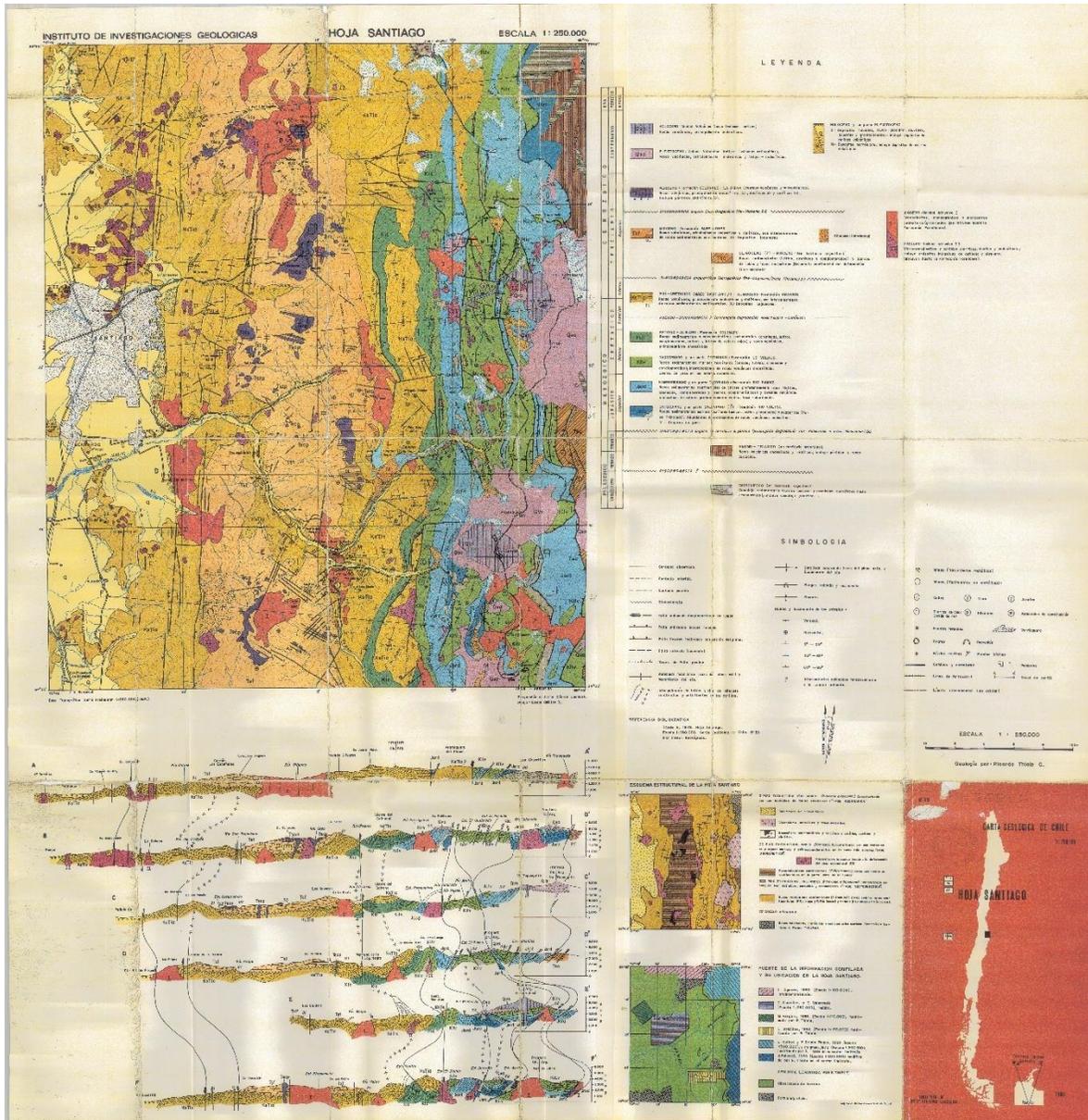
Turner, j., Holmes, N., Davis, s., Leng, M., Langdon, C., Scaide, R. (2015). A multiproxy (micro-XRF, pollen, chironomid, and stable isotope) lake sediment record for the Lateglacial to Holocene transition from Thomastown Bog, Ireland. *Journal of Quaternary*.

Van Daele, M. (2019). *Distinguishing intraplate from megathrust earthquakes using lacustrine turbidites*. The Geological Society of America.

Wang, M., Zheng, H., Xie X., Fan, d., Yang, S., Zhao, Q., Wang k. (2010). A 600-year flood history in the Yangtze River Drainage: Comparison between a subaqueous delta and historical records. *Chinese science Bulletin*.

Anexos

Anexo N°1: Carta Geológica de Chile. Escala 1:250.000: Geología de la Hoja Santiago. Región Metropolitana



Obtenido de Instituto Geográfico Nacional, 2022.