



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



HIDROGEOLOGÍA Y BALANCE HÍDRICO DE LA LAGUNA DE LA LAJA, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.

Memoria para optar al título de Geóloga

Carolina Soledad Catalán Tapia

Profesora patrocinante: MSc. Liubow Nikolaiвна González Martínez

Profesores comisión: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado

MSc. Abraham Elías González Martínez

Concepción, 2023.

A mi familia...

RESUMEN

La mayor parte del agua que existe en la naturaleza es agua salada, mientras que sólo el 2.5 % restante es el agua dulce, así, es que los ambientes lacustres son sensibles a modificaciones climáticas y antrópicas. La Laguna de la Laja es parte de la cuenca del río Laja, siendo afluente del río Biobío, así como también fuente de riego y generación de energía por medio de las hidroeléctricas Abanico, Antuco y el Toro. Actualmente existe una disminución sostenida en las precipitaciones, lo que trae consigo un descenso en el nivel espejo de la laguna. El objetivo de esta investigación es caracterizar hidrogeológicamente la cuenca de la Laguna de la Laja y su evolución en el tiempo, a partir de datos históricos de precipitaciones y temperaturas mensuales desde el año 1979 a 2019, mediante la realización de un balance hídrico, basado en el Método de Número de Curvas. Los datos se dividieron en cuatro periodos con igual cantidad de años. Los resultados muestran un descenso de escorrentía superficial, infiltración y recarga de la cuenca, concordante con la disminución en los niveles de pluviosidad y el aumento de temperaturas promedio. En el periodo 1, las precipitaciones llegan a un promedio de 2055 mm/año, en el periodo 2 este valor desciende a 1810 mm/año, el periodo 3 muestra un alza con 2025 mm/año, para finalmente encontrar otra disminución en periodo 4 con un promedio de 1599 mm/año. Estas variaciones no son las únicas que afectan el nivel espejo de la laguna. La operación de la central hidroeléctrica El Toro, tiene influencia directa sobre el nivel espejo de la laguna de la Laja producto de las filtraciones desde el cuerpo de agua. En épocas con mayores precipitaciones la extracción aumenta, superando los 50 m³/s, mientras que cuando las precipitaciones bajan, las filtraciones pueden ser de hasta 20 m³/s, valores que son superiores al nivel de recarga de la laguna. Se concluyó que el régimen natural de la Laguna de la Laja está afectado por cambio climático y por actividades antrópicas.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Ubicación y accesos	3
1.4 Clima y vegetación	4
1.5 Trabajos anteriores	4
1.6 Agradecimientos	5
2. MARCO GEOLÓGICO	7
2.1 Generalidades	7
2.2 Geomorfología local	8
2.3 Geología Local	9
2.3.1 Formación Curamallín	9
2.3.2 Formación Trapa-Trapa	10
2.3.3 Formación Cola de Zorro	11
2.3.4 Intrusiones Miocenas	11
2.3.5 Volcanes y Flujos Lávicos	12
2.3.6 Depósitos no Consolidados	13
3. HIDROGEOLOGÍA	14
3.1 Cuencas y red de drenaje	14
3.2 Caracterización de unidades hidrogeológicas	16
3.2.1 Unidades tipo A	17
3.2.2 Unidades tipo B	18
3.2.3 Unidades tipo C	18
3.3 Usos de Suelo	20

4. METODOLOGÍA	23
4.1 Generalidades	23
4.2 Hidrogeología	23
4.2.1 Conceptos.....	25
4.2.2 Método Número de Curvas.....	25
4.3 Parámetros fisicoquímicos	30
5. RESULTADOS	32
5.1 Precipitaciones y temperatura	32
5.2 Balance hídrico	34
5.2.1. Escorrentía e infiltración.....	34
5.3 Parámetros fisicoquímicos	38
6. DISCUSIÓN	39
6.1 Hidrología	39
6.2 Parámetros fisicoquímicos	44
7. CONCLUSIÓN	46
8. REFERENCIAS	48
9. ANEXOS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos.....	3
2. 1. Regiones y zonas geomorfológicas Región del Biobío.....	8
2. 2. Mapa geológico sector Laguna del Laja.....	10
3. 1. Cuenca del río Laja.....	15
3. 2. Tramo Superior Cuenca Laguna de la Laja.....	16
3. 3. Diagrama de unidades hidrogeológicas.....	17
3. 4. Distribución de unidades hidrogeológicas.....	19
3. 5. Usos de suelo Laguna de la Laja.....	20
4. 1. Concentración de datos de precipitaciones.....	24
4. 2. Variables en el método de abstracciones de precipitación del SCS.....	27
4. 3. Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS.....	28
4. 4. Distribución de mediciones parámetros fisicoquímicos.....	31
6. 1. Manejo hidrológico Laguna de la Laja y afluentes.....	41

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
5. 1. Precipitaciones por periodo.....	32
5. 2. Variaciones mensuales de precipitaciones por periodo.....	33
5. 3. Precipitaciones y temperatura.....	33
6. 1. Variaciones de precipitaciones y nivel espejo de la Laguna de la Laja.....	40
6. 2. Nivel espejo de la Laguna de la Laja y filtraciones de central El Toro.....	42
6. 3. Diferencias de volumen en la descarga de la Laguna de la Laja.....	43
6. 4. Variaciones de volumen en la Laguna de la Laja.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3. 1. Área de usos de suelo en sector Laguna de la Laja.....	22
4. 1. Ejemplo cálculo NC ponderado.....	28
4. 2. Ejemplo cálculo Infiltración.....	30
5. 1. Valores de escorrentía por unidad hidrogeológica P1.....	35
5. 2. Valores de escorrentía por unidad hidrogeológica P2.....	35
5. 3. Valores de escorrentía por unidad hidrogeológica P3.....	35
5. 4. Valores de escorrentía por unidad hidrogeológica P4.....	36
5. 5. Valores de escorrentía superficial máxima y actual.....	36
5. 6. Valores de escorrentía actual e infiltración por periodo.....	37
5. 7. Recarga y descarga natural de Laguna de la Laja por periodo.....	37
5. 8. Mediciones de pH, conductividad eléctrica y temperatura.....	38

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
I Tabla 1. Valores de método de Número de Curvas.....	52
II Tabla 2. Datos precipitaciones.....	53
II Tabla 3. Datos temperaturas máximas y mínimas.....	57
III Tabla 4. Nivel espejo Laguna de la Laja, 1942-2019.....	63

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La mayor parte del agua que existe en la naturaleza es agua salada (97.5 %), mientras que sólo el 2.5 % restante es agua dulce (Martínez *et al.*, 2006). Desde 2010, nuestro país atraviesa una megasequía, alcanzando un déficit pluviométrico de aproximadamente 40% (Garreaud *et al.*, 2020), donde un cuarto de este se atribuye al cambio climático (CR2, 2015). Por otra parte, se proyecta que para el 2035, las temperaturas en Chile centro-sur incrementarán en promedio 2°C, mientras que a finales de siglo aumentarán de 2 a 6°C (Araya-Osses *et al.*, 2020). Esta situación potenciaría la escasez de agua, trayendo consigo problemas asociados al ambiente y población.

Este descenso en la cantidad de agua precipitada afecta los niveles espejo de aguas superficiales, lo que inicia la extracción de aguas subterránea, aunque esta misma acción puede inducir la disminución del nivel espejo. El uso de estas aguas para satisfacer las necesidades aumenta año a año evidenciado por el aumento de concesiones para derechos de agua solicitadas a la Dirección General de Aguas (DGA, 2016) sobre los distintos cuerpos de agua.

El código de aguas de la Constitución de 1980, artículo 19, menciona que “Son derechos de ejercicio continuo los que permiten usar el agua en forma ininterrumpida durante las veinticuatro horas del día.”, mientras que el artículo 20 señala que “El derecho de aprovechamiento se constituye originariamente por acto de autoridad. La posesión de los derechos así constituidos se adquiere por la competente inscripción en el Conservador de Bienes Raíces correspondiente.”, lo anterior otorga un carácter privado al aprovechamiento y uso del agua. En 2019, el código de aguas fue reformado, limitando el derecho sobre el agua a 30 años, pero, para aquellos que iniciaron funciones antes de la reforma, no aplica el cambio.

En la zona sur de Chile, la cuenca de la Laguna del Laja presenta importantes recursos hídricos, siendo el principal la laguna homónima, con una superficie de 80,5 km², la cual se clasifica como un embalse de origen geológico, con una capacidad de 5.582 mm³ (DGA,

2016). Investigar la cuenca de la Laguna de la Laja se enmarca en la sistemática reducción del espejo de agua. Esta situación ha sido explicada como una respuesta frente al cambio climático, es decir, asociada a la reducción de precipitaciones y glaciares (Araya-Osses *et al.*, 2020). Sin embargo, la disminución de la cota de agua se desarrolla con mayor tendencia desde la década del 70, momento en que la central hidroeléctrica el Toro inicia sus operaciones. Estos cambios afectan directamente el caudal de filtraciones naturales, las que afloran en vertientes, la principal llamada “Ojos de Agua”, donde nace el río Laja, que constituye el principal afluente del río Biobío.

El nivel espejo de la laguna continúa descendiendo, a la vez que las temperaturas globales y sequías van en aumento, por esto, es importante comprender los factores que controlan la disminución de la cota y volumen de la Laguna de la Laja, considerando también la actividad antrópica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Caracterizar el comportamiento hidrogeológico la Laguna de la Laja y su evolución en el tiempo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las unidades hidrogeológicas de la Laguna de la Laja en base a la litología.
- Realizar un balance hídrico para determinar escorrentía superficial e infiltración o recarga.
- Reconocer variaciones estacionales en la disponibilidad de agua.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos de agua de la laguna.
- Analizar factores externos y determinar su influencia en los cambios de la hidrogeología local.

1.3 Ubicación y accesos

El área de estudio se encuentra ubicada en el tramo superior de la Cuenca del río Laja, Comuna de Antuco, Región del Biobío (Figura 1.1), zona comprendida entre los $37^{\circ}12' - 37^{\circ}27'S$ y $71^{\circ}8' - 71^{\circ}2'W$. El camino comienza desde Concepción tomando la ruta 146 en dirección al este. Llegando a la Ruta 5 Sur, se continúa al sur hasta la ciudad de Los Ángeles, en donde se debe seguir la ruta Q-45 por 90 km, hasta llegar al Parque Nacional Laguna del Laja.

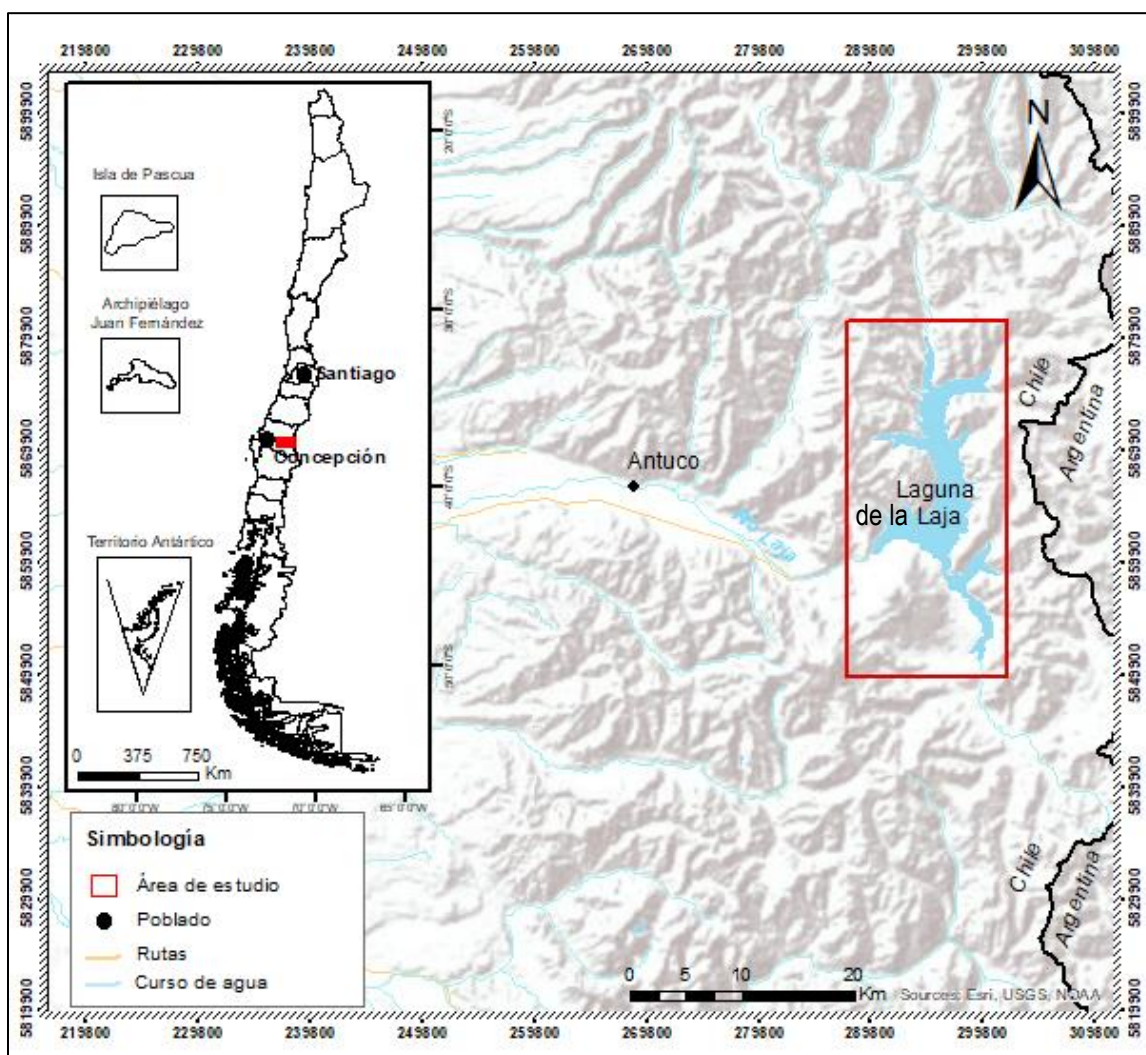


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos.

1.4 Clima y vegetación

La región se caracteriza por presentar dos tipos de clima según la clasificación de Köppen (1936). Bajo los 1.700 m s.n.m. el clima corresponde al tipo templado cálido, con menos de cuatro meses secos, mientras que, las regiones más altas, se caracterizan por un clima de hielo por efecto de altura. Se considera un área de transición ecológica, ya que se encuentra entre dos ecosistemas: el Matorral Mediterráneo de Chile Central y el Bosque Lluvioso Valdiviano, adicionalmente esta área incorpora ambientes que son parte del límite norte de la ecoregión patagónica (BirdLife, 2023).

La zona cordillerana se caracteriza por densa cubierta vegetal, constituida por ejemplares típicos de selva austral. En las partes más bajas se reconocen coigües, lengas, olivillos y, en las partes altas, ñirres. Al sur de los 37,6°S predominan los bosques de araucarias ocupando los cordones de cerros más altos, mientras que entre los arbustos destacan la murtilla, el maqui y el parrille (CONAF, 1993).

1.5 Trabajos anteriores

González *et al.* (2003), donde se evaluó la vulnerabilidad del acuífero del río Laja.

Mardones *et al.* (2005), llevaron a cabo un estudio sobre la influencia de las cuatro hidroeléctricas de la zona y la actividad agrícola en la Laguna de la Laja, donde se establece un déficit hídrico, desvío de cauces y disminución del nivel espejo de la laguna, afectando directamente el balance hídrico de la cuenca del río Laja.

Ayala (2011) estima los cambios que una variación climática puede tener sobre el sistema hídrico de la laguna de la Laja, estudiando el alza en las temperaturas y disminución en las precipitaciones a finales del siglo XX.

Posterior, González *et al.* 2012, usando como base el trabajo de Mardones *et al.* (2005), realizaron un estudio sobre la regulación del sistema hídrico de la Laguna de la Laja, donde en su régimen natural, existe una recuperación, pero, producto de la actividad hidroeléctrica,

existe una disminución notoria en el nivel de agua de la laguna, esto, desde el inicio de operación de la central el Toro, producto de la extracción directa de agua del sistema lacustre. Una consecuencia del descenso sostenido de la cota de la laguna llevaría a que las infiltraciones naturales tenderían a desaparecer, esto a una cota igual o inferior a 1300 m s.n.m., afectando directamente el cauce del río Laja.

Díaz 2015, realiza un análisis en los cambios de la cuenca de la Laguna de la Laja, haciendo hincapié en el nivel espejo de la laguna. Los resultados arrojan variaciones en la superficie inundada, en las últimas cuatro décadas, de un máximo de 9.994,63 Ha.

En 2016, la Dirección General de Aguas (DGA), propone una relación en la variación del régimen hídrico producto de cambios en patrones meteorológicos, aplicando el estudio a la totalidad del territorio nacional. Para la región del Biobío, se establece que las precipitaciones totales tienden a la disminución, lo que se evidenció en un descenso en el caudal del río Biobío. En paralelo, la temperatura media aumenta. De esta forma, se establece una relación entre el descenso de la cantidad de agua con el aumento notorio de la temperatura promedio. Luego en 2018, la misma organización, busca sectorizar y determinar la oferta hídrica del acuífero del río Laja, específicamente en la parte baja de la cuenca, ubicada en la Depresión Central. Se realizó un estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico, aportando datos actualizados de precipitaciones y caudal en el río.

Fernández 2019, en su memoria de título (Universidad de Concepción) determina variaciones superficiales y volumétricas de la Laguna de la Laja en el periodo 2007-2018, mediante teledetección, arrojando una disminución en la última década, lo cual, sumado a los datos de caudal del río Laja, establece que esta tendencia se hace mayor en invierno.

1.6 Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi querida profesora Liubow González, por creer en mí, darme su confianza para estar a cargo de sus ayudantías y apoyarme en la realización de este trabajo, con información, entrega de equipos de medición, su guía y paciencia.

A Don Luis Vásquez, por su siempre buena disposición y amabilidad para la entrega de datos y material para elaborar los mapas del presente estudio.

Agradezco a Sra. Carolina Rojas, secretaria de la carrera de geología por su simpatía y entrega al momento de realizar trámites.

Al personal del Departamento de Ciencias de la Tierra, por propiciar un ambiente grato de estudio y aprendizaje. En particular quiero agradecer al profesor Oscar Figueroa, profesora Fernanda Álvarez y profesor Abraham González, quienes me brindaron una palabra de apoyo en momentos difíciles.

Agradezco a mis amigos, Gabriela y Eduardo, quienes con mucha generosidad se ofrecieron a llevarme a terreno, corriendo con los gastos de transporte, a la vez que mostraban su apoyo e interés en el tema con preguntas de la geología del lugar. También a mi hermano Fabián, que me ayudó con la toma de datos y carga de material.

A mi amiga Camila Navarrete, quien me ayudó incontables veces, con su apoyo y compañía incondicional. A mis hermanos Carlos y Fabián, que, con su cercanía, permitieron que llegara a este punto de la carrera. Por último, a mis padres, Carlos y Patricia, quienes se han esforzado estos últimos 25 años por darme lo mejor que estaba a su alcance. Gracias infinitas.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 Generalidades

El margen andino es el mejor ejemplo de orógeno activo, con variaciones en el volcanismo, tectónica, historia geológica y topografía. En base a esto, junto a análisis flexurales entre relieve y gravedad, Tassara *et al.*, (2003), dividen el orógeno en cuatro segmentos, Andes del Norte (5°N – 15°S), Andes Centrales (15° – $33,5^{\circ}\text{S}$), Andes del Sur ($33,5^{\circ}$ – 47°S) y Andes Australes (47° – 56°S).

En Chile ($\sim 27^{\circ}\text{S}$ y $\sim 34^{\circ}\text{S}$) las máximas elevaciones de la cordillera son similares (~ 4.8 - 5 km), mientras que, al sur, decrecen a < 2.2 km m s.n.m. (Farias *et al.* 2008). Esto sumado a la amplia gama de condiciones meteorológicas a lo largo del país, dan como resultado una variedad significativa de geomorfologías. En este contexto, el arco volcánico del margen andino a los 37°S forma parte de la Zona Volcánica Sur Central de Chile (27° - 38°S) (Stern, 2004).

Así, el país se divide en cinco regiones geomorfológicas, que a su vez se separan en zonas de dirección N-S (Börgel, 1983). Esta división se dio agrupando regiones geográficas colindantes que comparten características similares, como topografía, clima y condiciones ambientales (Figura 2.1).

El área de estudio se encuentra en la región III definida por Börgel (1983), denominada como Cordillera Andina de Retención Crionival, la cual atañe a la Cordillera de los Andes, donde la acción de nieve y hielo dan origen a geoformas características. Este sector alcanza alturas de 2000 m, con cumbres más altas correspondientes a volcanes.

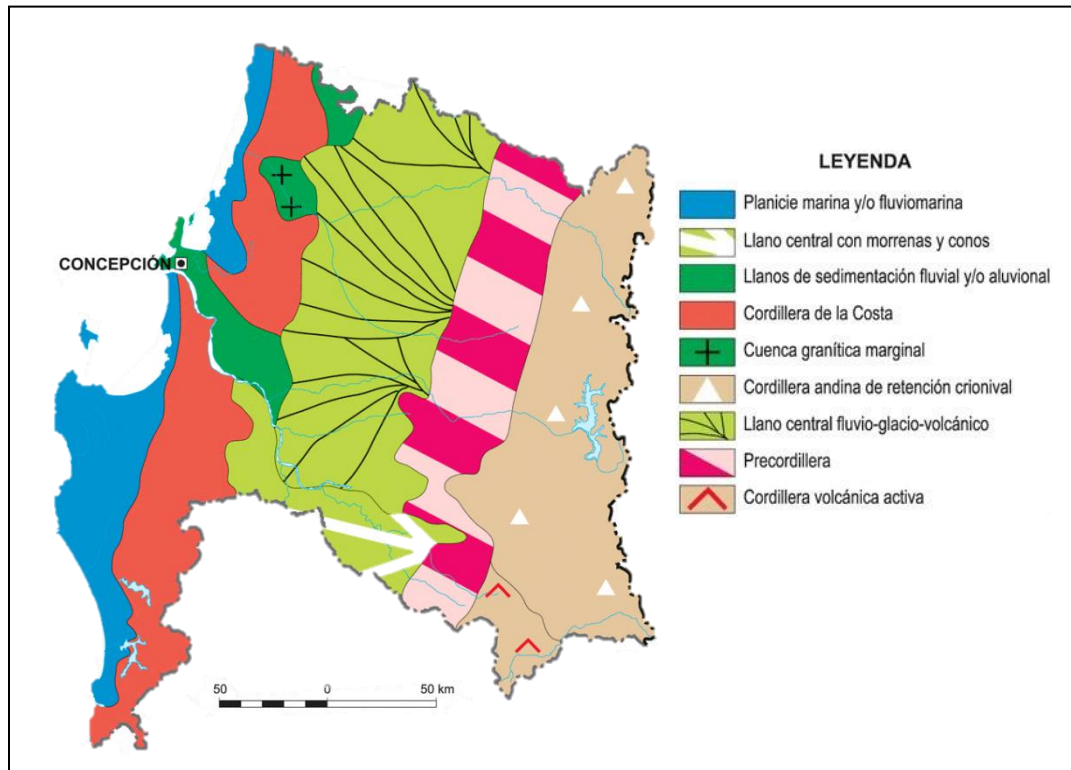


Figura 2.1: Zonas geomorfológicas de la Región del Biobío. Extraído del Instituto Geográfico Militar, modificado de Börgel, 1983.

2.2 Geomorfología local

El área de estudio corresponde a un relieve montañoso con cumbres principales en el Volcán Antuco (2987 m) y Sierra Velluda (3385 m) (Moreno *et al.*, 1986, en Thiele *et al.*, 1998)

El Volcán Antuco corresponde a un estratovolcán mixto y compuesto, cuya actividad inicia hace aproximadamente 150.000 años (Holoceno Inferior- Holoceno Medio), por datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Martínez *et al.*, 2017). Posee dos unidades de primer orden, el primer edificio volcánico, Antuco I, con forma de caldera, y un cono en el interior de la caldera, Antuco II. Este último es contemporáneo al final de la glaciación Würm (9700 a.c.) (Martínez *et al.*, 2017).

Debido al clima, existe un fuerte control erosivo del hielo, nieve y precipitaciones, marcado por la gran cantidad de redes de drenaje. Esto origina dos hoyas hidrográficas principales, la argentina denominada Hoya del río Agrio, y la chilena, Hoya hidrográfica del curso Superior

del río Biobío, a la cual pertenece la Laguna de la Laja, el río homónimo y río Polcura. El río Laja nace en la laguna, situada a una cota de 1300 m s.n.m., confinado por erupciones de los volcanes Antuco I y II (Niemeyer, 1980). Por esto, se clasifica como un embalse de origen geológico, con una capacidad de 5.582 Mm³ (DGA, 2016).

Además, la acción del hielo y las aguas dan origen a los depósitos no consolidados del Cuaternario, con geoformas como morrenas, terrazas fluviales, glacio-fluviales y deslizamientos de suelo y rocas (Thiele *et al.*, 1998).

2.3 Geología Local

Dentro del área de estudio afloran unidades sedimentarias, volcánicas e intrusivas, representadas en la Figura 2.2. Se observa los plutones del Mioceno (23 Ma – 5 Ma), seguido de rocas estratificadas miocenas a pleistocenas, infrayaciendo a unidades volcánicas del Pleistoceno a Holoceno, dentro de estas se encuentran depósitos recientes fluviales y lacustres (Niemeyer y Muñoz, 1983).

De base a techo se encuentran:

2.3.1 Formación Curamallín (Oligoceno Superior-Mioceno Medio): Definida por González y Vergara (1962) y redefinida por Niemeyer y Muñoz (1983). Se encuentran entre los 36° y 37°S. Corresponde a la unidad más antigua del sector, su base no aflora, mientras que el techo es concordante con la Formación Trapa-Trapa. Se encuentra dividida en dos miembros, el inferior, Miembro Río Queuco, de potencia entre 520-900 m, corresponde a lavas andesíticas y cuerpos hipoabisales, junto con depósitos de caída y flujo de piroclastos, mientras que el Miembro Malla-Malla (superior) de potencia entre 520-900 m, es

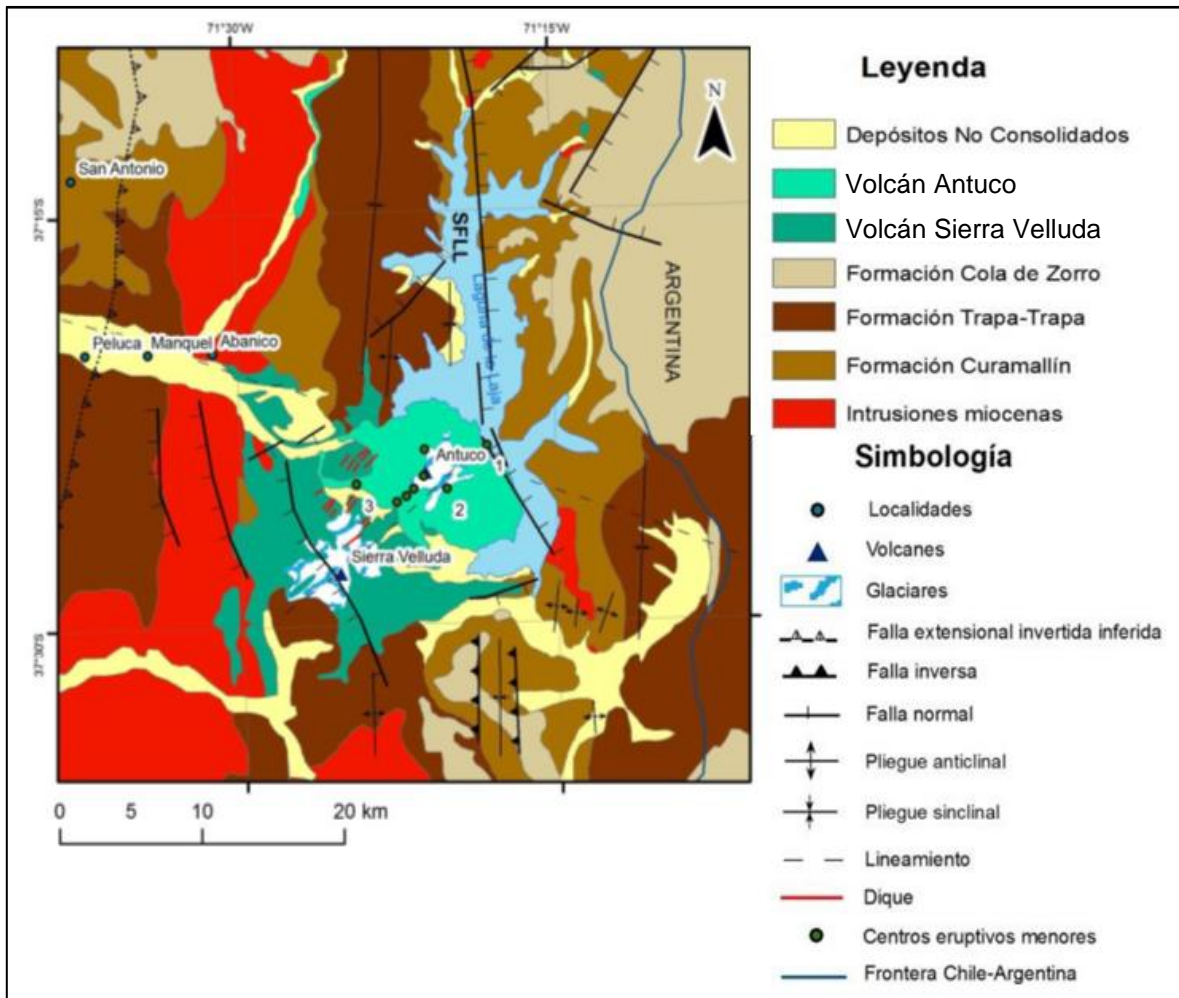


Figura 2.2: Mapa geológico sector Laguna del Laja. Modificado de Albornoz, 2019.

sedimentario, compuesto por areniscas, areniscas conglomerádicas, conglomerados de ambiente aluvio-fluvial y deltáico, con horizontes carbonosos e intercalaciones de calizas de régimen lacustre.

Los estratos de la Formación Curamallín fueron depositadas en llanuras aluviales facies menores indicativas de fases lacustres de corta duración, en un contexto de volcanismo activo (Niemeyer y Muñoz, 1983).

2.3.2 Formación Trapa-Trapa (Mioceno Medio a Superior): Definida por Niemeyer y Muñoz (1983), aflora entre los 36° y 37°S. Estos autores estiman que el espesor de esta formación puede superar los 1.500 m. Se encuentra sobreyaciendo concordante al Miembro

Malla-Malla. Su techo está marcado por una discordancia angular, separándola de la Formación Cola de Zorro. Se compone de lavas, aglomerados y brechas volcánicas. Las lavas (andesitas y andesitas basálticas) son de color rojizo morado, con textura porfídica, amigdaloidal, con abundantes cristales de plagioclasa, megacristales de piroxeno, y minerales máficos. También se registran coladas dacíticas (Niemeyer y Muñoz, 1983).

En cuanto su disposición estructural, tanto Formación Curamallín como Formación Trapa-Trapa están encontradas afectadas por pliegues de dirección NS de gran envergadura. La mayor plasticidad y menor competencia de las rocas de la Formación Curamallín (Niemeyer y Muñoz, 1983), son causantes de que éstas hayan sido más afectadas por el plegamiento que las de la Formación Trapa-Trapa.

2.3.3 Formación Cola de Zorro (Plioceno-Pleistoceno): Definida por González y Vergara (1962), en el cajón del mismo nombre. Sobreyace en discordancia a la Formación Trapa-Trapa, y mediante una superficie de erosión a los stocks del río Polcura. Infrayace a lavas de los volcanes Antuco y Copahue. Se compone de andesitas y basaltos de colores gris a pardo oscuro, con presencia importante de aglomerados volcánicos.

2.3.4 Intrusiones Miocenas: Definida por Niemeyer y Muñoz 1983, corresponden a stocks de granodiorita-diorita que intruyen a la Formación Curamallín y Trapa-Trapa, cubiertos por volcanitas de la Formación Cola de Zorro, por lo que su edad es Mioceno Superior. Se encuentran dioritas y granodioritas con índice de color del 40%, también se observan rocas corneas y epidotización, así como zonas de brecha. Paralelo a esto, se determina otro stock, pero de composición riodacítica, de color blanco amarillento, con fenocristales de cuarzo, piroxeno y anfíbol; en algunos sectores posee una marcada textura fluidal. Por último, se observan stocks y filones andesíticos-basálticos, que intruyen a las Formaciones Curamallín, Trapa-Trapa y Cola de Zorro, por lo que se estima una edad Plioceno-Pleistoceno. Son de

escasa potencia (4 a 15 m) y afloran con estrecha relación a los centros efusivos de la Formación Cola de Zorro. (Niemeyer y Muñoz, 1983)

2.3.5 Volcanes y Flujos Lávicos (Pleistoceno-Holoceno): Definidos por Niemeyer y Muñoz (1983) como volcanes y flujos de lava que se disponen, mediante discordancia de erosión o contacto pseudo-concordante, sobre la Formación Cola de Zorro. Algunas de estas coladas también alcanzan a la Formación Curamallín y Trapa-Trapa. Formado principalmente por coladas basálticas, andesíticas, de colores gris a pardo rojizo, intercaladas con brechas de espesores máximos de 1000 m. Esta unidad se correlaciona con otros aparatos volcánicos de la zona, lo que entrega información sobre la fuerte actividad volcánica cuaternaria del área.

El Volcán Sierra Velluda es la unidad volcánica más antigua del Grupo Volcánico Antuco-Sierra Velluda. Es un estratovolcán fuertemente erosionado, formado por flujos de lava y depósitos laháricos y piroclásticos (Moreno *et al.*, 1984). Se diferencian dos unidades, Volcán Sierra Velluda I y II. La Unidad Sierra Velluda I es la más antigua formada por flujos de lahares y piroclastos y escasas coladas lávicas andesíticas intercaladas. Por otro lado, la Unidad Sierra Velluda II está constituida fundamentalmente por flujos de lava (Moreno *et al.*, 1984).

El Volcán Antuco es de composición basáltica y andesítico-basáltica. Consta de dos unidades de primer orden, un primer edificio volcánico llamado Antuco I y la segunda unidad desarrolló un cono en el interior de la caldera llamado Antuco II (Thiele *et al.*, 1998). Asociado a esta segunda unidad, existen asociados eventos eruptivos, coladas de lava, flujos de detritos, lahares y depósitos de flujos piroclásticos, que datan del Holoceno, sin antecedentes de su frecuencia (Thiele *et al.*, 1998).

2.3.6 Depósitos no Consolidados (Pleistoceno-Reciente): Corresponden a depósitos morrénicos, retrabajados por la acción del agua y viento. Se encuentran en las laderas del Volcán Sierra Velluda y Copahue, presentándose como arcos morrénicos, frontales y laterales de más de 20 m de altura (Niemeyer y Muñoz, 1983). En algunos sectores, se han

desarrollado lagos, asociado al último avance del hielo, durante el post glacial. También se encuentran terrazas fluviales, compuestas por gravas, arena y limo, depositados en los valles del río La Polcura y Queuco (Niemeyer y Muñoz, 1983). Los depósitos están compuestos de arenas negras basálticas y gravas muy finas angulosas, ceniza y un porcentaje menor de fragmentos escoráceos y pomáceos, junto con líticos variados. Los de origen aluvial están conformados por bloques, clastos angulosos y fragmentos menores de rocas trituradas dentro de una matriz de molienda, que presenta una consolidación moderada a baja intercaladas con niveles de gravas. Ocasionalmente pueden encontrarse bloques mayores inmersos (Niemeyer y Muñoz, 1983).

3. HIDROGEOLOGÍA

La hidrogeología abarca la interrelación entre los procesos geológicos, hidrología y topografía de una cuenca, junto con los distintos elementos que se encuentren sobre el suelo, relacionándolo con las precipitaciones de la cuenca. La creación y la distribución de las precipitaciones en una cuenca están fuertemente influenciadas por la presencia de cadenas montañosas entre otros rasgos fisiográficos (Martínez *et al.*, 2006). La hidrogeología es una ciencia descriptiva y analítica, y el desarrollo y manejo de los recursos hídricos son una parte muy importante de ella.

3.1 Cuencas y red de drenaje

La Dirección General de Aguas (DGA), divide cada región del país en cuencas hidrográficas, que a su vez son separadas en subcuencas y subsubcuencas. En la Figura 3.1 se observa la subcuenca del río Laja, en donde es posible notar los principales cursos de agua y como las redes de drenaje tienen mayor densidad hacia el este, en la zona cordillerana. Desde ese punto, se puede notar que distintas redes dendríticas terminan en el río Polcura y río Laja, este último, principal afluente del río Biobío.

La hoya hidrográfica del río Laja abarca una superficie aproximada de 4.635 km². La longitud del cauce es de 140 Km, el cual nace en la Laguna de la Laja (1.300 m s.n.m.) y desemboca en el río Biobío, en la localidad de San Rosendo (DGA, 2016). Esta cuenca natural está conformada por 77 subcuencas, albergado actualmente 2500 millones de m³ de agua, con una capacidad máxima de 5582 millones de m³, estimados por la DGA en informes semanales de disponibilidad de agua. Los afluentes a la laguna aportan cerca 61 m³/s, proporcionados por varios esteros y cajones cordilleranos aledaños (DGA, 2016) y además se desvía agua desde la parte alta del río Polcura, a un volumen de 10 m³/s, que varía según la cantidad de agua disponible (CONAF, 1993).

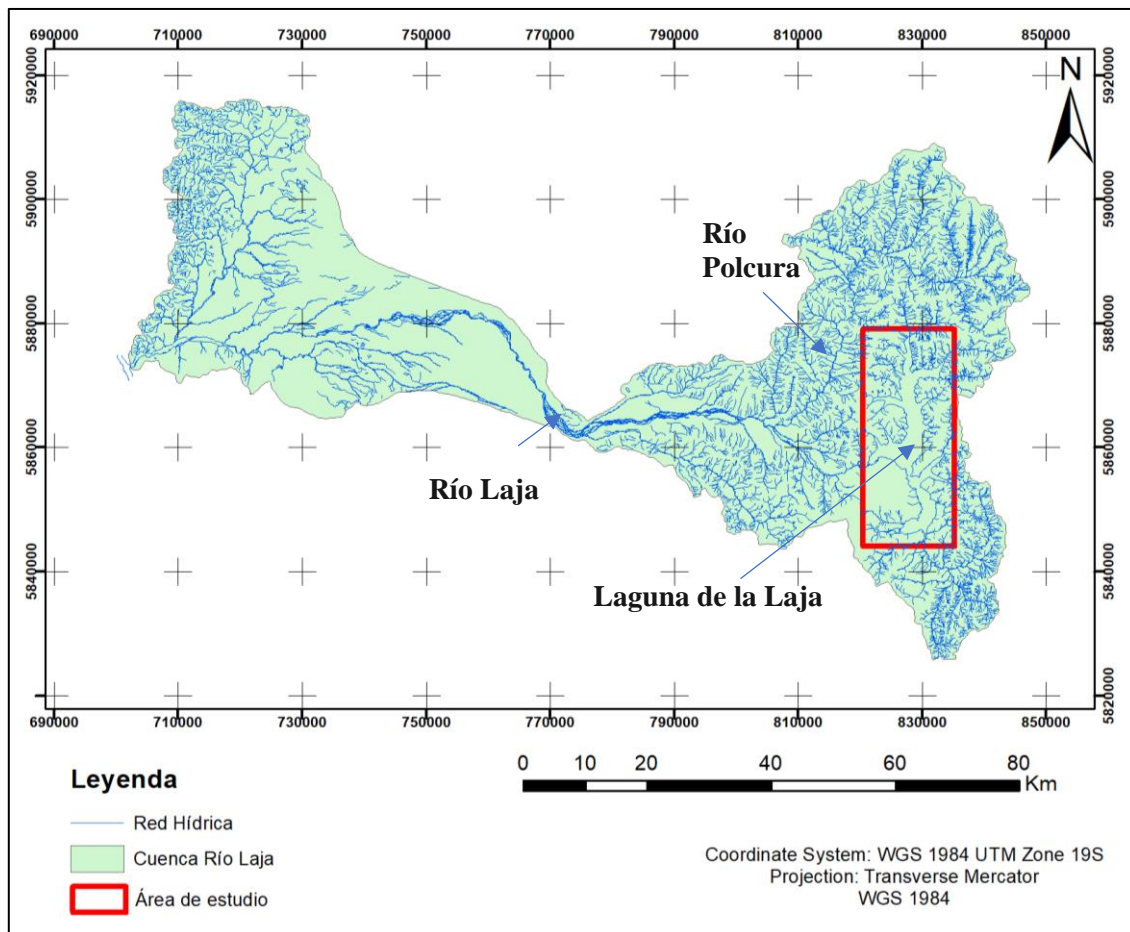


Figura 3.1: Cuenca del río Laja. Se observan redes de drenaje y ríos principales. Elaboración propia

Existe una descarga constante de agua desde la laguna, llamada “Ojos de agua”, con un caudal de $27 \text{ m}^3/\text{s}$ promedio (Díaz, 2015) siendo un efluente subterráneo, originado a partir de la filtración de agua a través de las rocas volcánicas de la barrera de la Laguna del Laja en forma de saltos El Torbellino y Las Chilcas.

En una vista más cercana (Figura 3.2), es posible notar como la Laguna de la Laja recibe gran parte de los cursos de agua formados de nieves eternas y precipitaciones. Sin embargo, también existen otros afluentes de influencia considerable en la zona, lo que indica todo como un gran sistema hídrico.

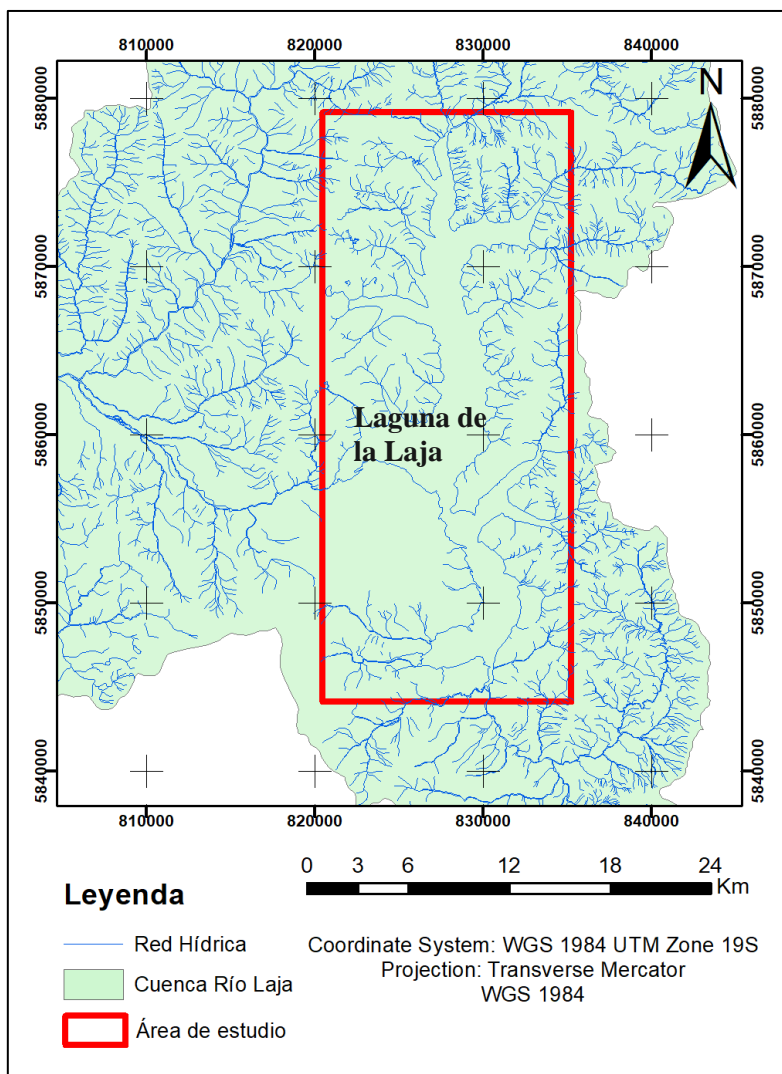


Figura 3.2: Cuenca Laguna de la Laja. Elaboración propia.

3.2 Caracterización de unidades hidrogeológicas

Se realiza una clasificación de unidades hidrogeológicas, usando la metodología de Struckmeier & Margat (1995), la cual, las cataloga de acuerdo con la permeabilidad (granular o fisurada) e importancia hidrogeológica, según su potencial de almacenar y transmitir agua (Figura 3.3). Para esto es necesario conocer la geología del sector, teniendo en cuenta las propiedades de las rocas y su grado de meteorización y fracturamiento.

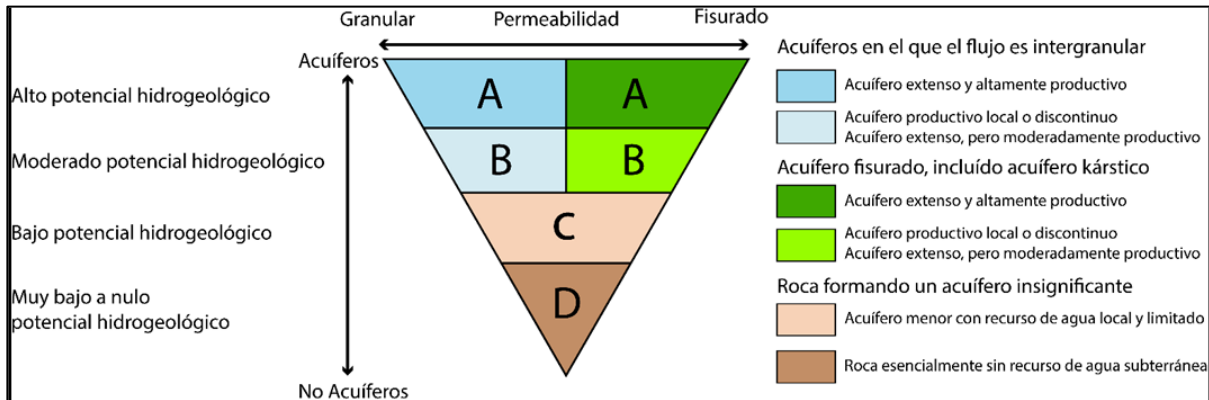


Figura 3.3: Diagrama de unidades hidrogeológicas. Struckmeier & Margat, 1995.

Así, las unidades con alta permeabilidad y capacidad de transmitir agua son de alto potencial hidrogeológico, denominadas unidad tipo A, asociadas a depósitos no consolidados de arena o kársticos muy fisurados. Por otro lado, las unidades tipo B se relacionan con areniscas y rocas carbonatadas, en donde el potencial pasa a ser moderado. Las unidades tipo C corresponden a rocas competentes, como intrusivas o lavas, en que la capacidad de almacenar y transmitir agua está relacionado a la meteorización y al fracturamiento en la roca. Para las unidades tipo D, la roca competente se encuentra casi intacta o tiene una fracción de arcilla casi total, lo que conlleva a un potencial hidrogeológico muy bajo o nulo.

3.2.1 Unidad tipo A

Unidad litológica con alta permeabilidad y capacidad de transmitir agua, es decir, con alto potencial hidrogeológico. Dentro del área de estudio, cumplen con estas características los depósitos no consolidados y flujos lávicos, debido a su alta porosidad, otorgando permeabilidad. Está compuesto principalmente por arenas basálticas no consolidadas, gravas arenosas y gruesas, junto con basaltos escoráceos. La fracción de limo es baja o nula, favoreciendo la transmisión de agua.

La porosidad efectiva presenta valores promedio para esta unidad de 32 – 36 %. Los valores promedio para conductividad hidráulica varían entre 2900 – 16500 m/día (Sanders, 1998).

Los basaltos escoráceos cuaternarios presentan una conductividad hidráulica entre $0,1 - 10^6$ m/día y la escoria basáltica entre 0,001 y 1000 m/día (Sanders, 1998).

3.2.2 Unidades tipo B

Unidad litológica con potencial hidrológico moderado, con permeabilidad media y capacidad de transmitir agua, usualmente atribuido rocas compactas, pero permeables, como areniscas, que, producto de su fracción reducida de limo, permite la transmisión de agua. Se asocia a esta unidad el miembro basal sedimentario de Formación Curamallín (Miembro Malla-Malla), el cual, corresponde a areniscas y areniscas conglomerádicas.

Se estima una porosidad efectiva media de los conglomerados 38 – 45% (4.1) y de las areniscas entre 0,5 – 10% (Sanders, 1998). La conductividad hidráulica para los conglomerados se estima entre 50.000 – 250.000 m/día y para las areniscas valores promedios entre 10^{-5} - 1 m/día (Freeze & Cherry, 1979).

Para esta unidad se estima una porosidad efectiva entre 10 – 45% y una conductividad hidráulica entre 10^{-9} – 10^4 m/día.

3.2.3 Unidades tipo C

Unidad litológica de bajo potencial hidrogeológico. Se aplica a rocas fracturadas, con porosidad menor de las unidades tipo B, en donde la capacidad de almacenar y transmitir agua es baja, pero, posible. El miembro volcánico de Formación Curamallín, Formación Trapa-Trapa y Formación Cola de Zorro se relacionan a esta unidad. Corresponden a litologías basálticas, andesíticas y volcanoclásticas, con vesículas menores y con fracturamiento notorio producto de la erosión física. Por otra parte, las intrusiones que inician en el Mioceno también sufren este fracturamiento, por lo que cumplen con las características de este tipo de unidad.

La porosidad efectiva promedio de las tobas varía entre 11 - 14% y la conductividad hidráulica entre 10^{-9} - 10^2 m/día. (Back *et al.*, 1988). Para las lavas basálticas la porosidad

efectiva es mayor que 5% (Back *et al.*, 1988). Los valores para la conductividad hidráulica varían entre 10^{-6} – 10^{-3} m/día (Sanders 1998)

La conductividad hidráulica de las rocas cristalinas varía entre 10^{-9} - 10^{-5} m/día y su porosidad eficaz es baja (Sanders, 1998).

La distribución de las unidades se presenta en la figura 3.4, en donde se asocia cada Formación a una unidad hidrogeológica.

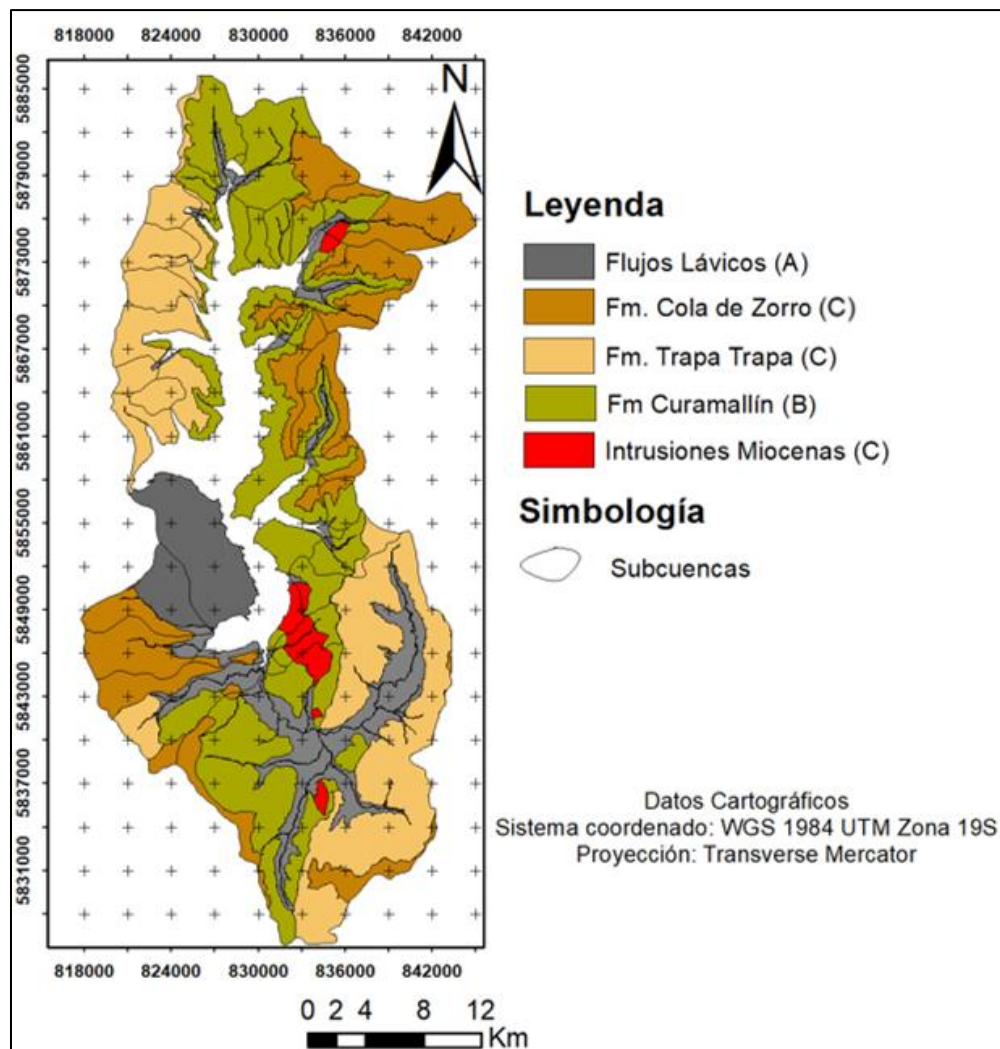


Figura 3.4: Distribución de unidades hidrogeológicas. Elaboración propia

3.3 Usos de suelo

La Corporación Nacional Forestal (CONAF), en su Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales de Chile (CERVCH) (1999), divide lo que es a la presente fecha la región del Biobío y Ñuble en usos de suelo. En el sector de Laguna de la Laja, gran parte está ocupado por zonas desprovistas de vegetación, producto del material volcánico aportado por erupciones recientes, seguido de estepa andina y en menor medida bosques nativos (Figura 3.5).

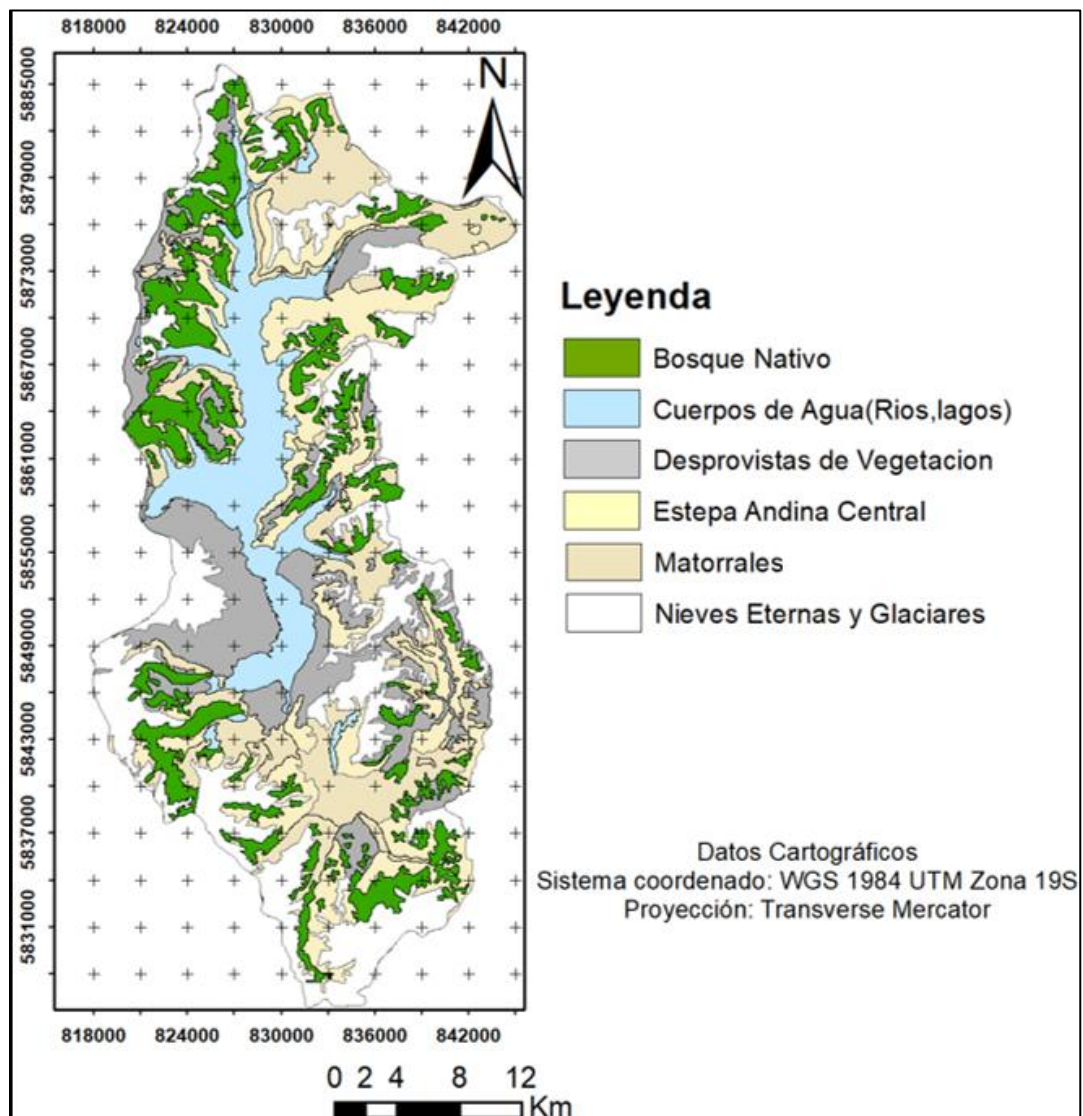


Figura 3.5: Usos de suelo Laguna de la Laja. Modificado de CERVCh, 1999.

A continuación, se definen los conceptos utilizados en el estudio antes mencionado, desde donde se extrajeron los usos de suelo para presente trabajo:

- **Áreas desprovistas de vegetación:** Sector donde la cubierta vegetal no alcanza 25%. Puede ser playas, dunas, afloramientos rocosos, terrenos sobre el límite altitudinal de la vegetación, coladas de lavas, escoráceas, derrumbes aún no colonizados por la vegetación, etc.
- **Bosque nativo:** Ecosistema en el cual el estrato arbóreo, está constituido por especies nativas de generación natural o reforestado, con posibilidad de presencia escasa de algunas especies exóticas. Los árboles deben tener altura superior a 2 metros y una cobertura de copas mayor al 25%.
- **Cuerpos de agua:** Acumulación de agua, que se extiende por un área determinada. Para el área de estudio, corresponde al nivel espejo de la Laguna de la Laja y lagunas menores.
- **Estepa andina:** Tipo de planicie, donde se encuentran especies herbáceas de climas fríos extremos, que se encuentra en zonas montañosas, cubriendo las cumbres de los Andes.
- **Matorral:** Asociación vegetal donde el tipo biológico árbol es menor al 10% el de arbustos puede ser entre 10 a más del 75% y las herbáceas pueden estar entre 0-100%. Se encuentra en zonas de climas áridos con lluvias escasas.
- **Nieves eternas:** Hace referencia a aquellas nieves que se encuentran a grandes alturas y bajas temperaturas, por lo que no se derriten completamente.

Las áreas de extensión de los usos de suelo mencionados se presentan en la Tabla 3.1., basado en los datos de CERVCh, 1999.

Tabla 3.1: Área de usos de suelo en Subcuenca Laguna de la Laja.

Uso	Área km ²
Bosque Nativo	172.0
Cuerpos de agua	110.0
Desprovisto de vegetación	153.7
Estepa Andina	182.8
Praderas y Matorrales	154.0
Nieves Eternas	198.7
Total	971.2

El total de área de la cuenca alcanza 971 km², siendo el uso de mayor extensión las nieves eternas, seguido de bosque nativo y estepa andina.

4. METODOLOGÍA

4.1 Generalidades

Para caracterizar hidrogeológicamente la subcuenca de Laguna de la Laja es necesario recopilar datos de precipitaciones y temperaturas de estaciones cercanas, de esta manera se puede realizar el balance hídrico. A partir de esta información, se procede a usar el Método de Número de Curvas creado por SCS (Soil Conservation Service, 1972), mediante el cual, se obtiene la esorrentía superficial máxima y actual de una cuenca.

Luego, se realizan mediciones de parámetros fisicoquímicos con el fin de determinar calidad del agua.

4.2 Hidrogeología

Se obtienen datos de precipitaciones mensuales desde la página de Center for Climate and Resilience Research (CR²). Debido a que las estaciones de monitoreo climático de la zona se encuentran inactivas y las alledañas no están lo suficientemente cerca, se recurre al uso de productos grillados compilados por CR2MET, la cual, contiene información meteorológica (precipitación, temperaturas medias y extremas) en una grilla rectangular de 0.05° latitud-longitud para el territorio de Chile continental y el periodo 1979-2019 (Figura 4.1).

La técnica utilizada para la construcción del producto de precipitación se basa en una regionalización estadística de datos. Utiliza modelos estadísticos como funciones de transferencia para traducir precipitación, flujos de humedad y otras variables de gran escala. Los modelos estadísticos consideran la topografía local y se definen mediante un conjunto de parámetros calibrados con observaciones locales de precipitación.

Los productos de temperatura y temperaturas extremas se construyeron con información local (topografía y observaciones de temperatura) junto con datos de temperatura superficial estimada mediante imágenes satelitales (MODIS LST).

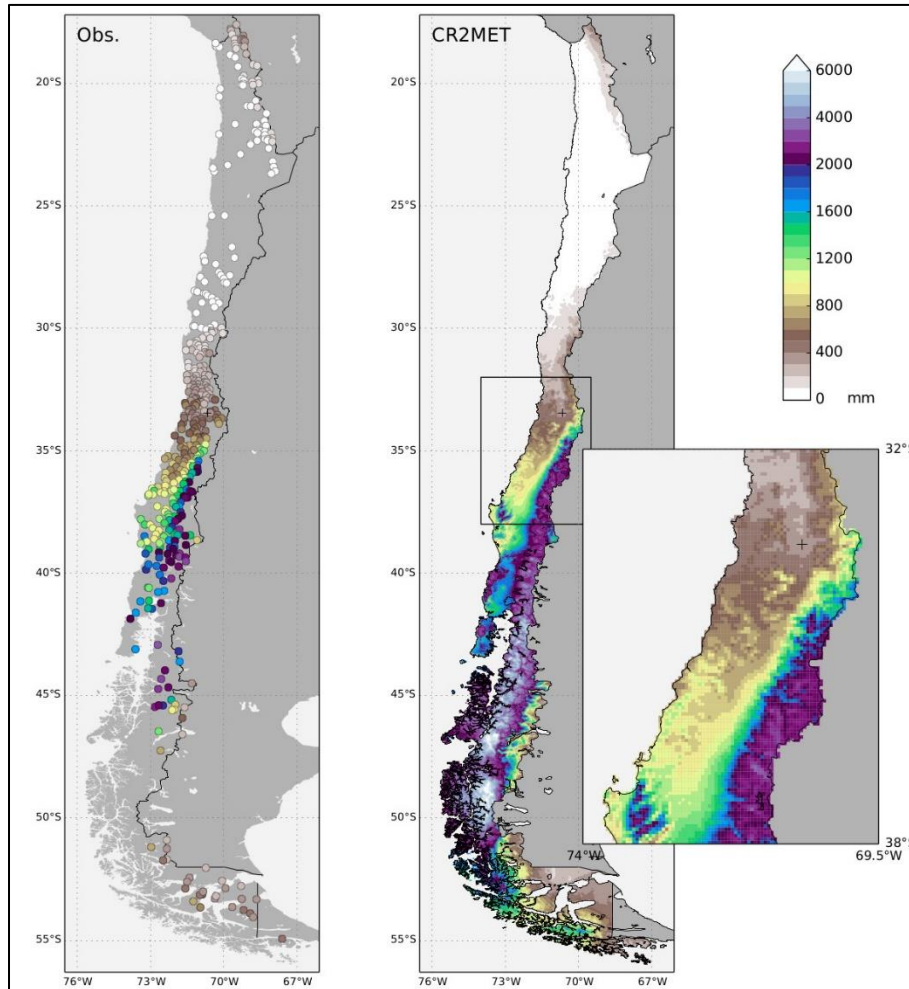


Figura 4.1: Concentración de datos de precipitaciones. Extraído de Center for Climate and Resilience Research (CR²).

Los datos fueron filtrados mediante el uso de Python, donde se cambió el formato de los datos entregados por CR², de NetCDF a CSV, usando el siguiente código de programación:

```
ds = xr.open_dataset("nombre archivo.nc", decode_times=False)           (abrir archivo nc)

units, reference_date = ds.time.attrs['units'].split('since')           (establecer parámetro inicial)

ds['time'] = pd.date_range(start=reference_date, periods=ds.sizes['time'], freq='MS')

ds.to_dataframe().to_csv("nombre archivo.csv")
```

Con Excel, se filtran los datos obtenidos, acotando la selección a las coordenadas -37.275000, -71.275000, lo que arroja un total de 1500 datos útiles.

El análisis se llevó a cabo con valores mensuales promedio de temperaturas y precipitaciones, desde el año 1979 hasta 2019, separado en periodos. Periodo 1 (P1): 1979-1989; Periodo 2 (P2): 1990-1999; Periodo 3 (P3): 2000-2009; Periodo 4 (P4): 2010-2019.

4.2.1 Conceptos

Dentro del balance hídrico, se usan algunos conceptos que es necesario esclarecer:

- **Escorrentía superficial:** Parte de las precipitaciones que llega a la red hidrográfica de una cuenca y que escurre por ella dando lugar a los caudales líquidos (Sánchez, 2023).
- **Evapotranspiración:** Fenómeno físico en que el agua pasa de líquido a vapor, o la nieve pasa de sólido a vapor desde la superficie del suelo (Sánchez, 2023). El valor de evapotranspiración puede ser potencial o real.
- **Infiltración:** Parte del agua de precipitaciones que atraviesa la superficie del suelo, la cual puede humedecer el suelo o convertirse en escorrentía subterránea (Sánchez, 2023).
- **Retención:** Volumen de agua retenida por el suelo después de liberación de agua por gravedad, es la diferencia entre porosidad total y eficaz en relación con el volumen total (Sánchez, 2023).

4.2.2 Método Número de Curvas

Para cada segmento de tiempo, el balance hídrico se realizó con el Método de Número de Curvas (SCS, 1972), considerando los usos de suelo y la unidad hidrogeológica asociada respectivamente. Este método se usa para obtener una estimación directa de la escorrentía

superficial de una lluvia aislada, a partir de las características del suelo, su uso y de su cubierta vegetal, suponiendo que cada complejo suelo-vegetación se comporta de una misma forma frente a la infiltración. Así, en un complejo totalmente impermeable, toda la precipitación se convierte en escorrentía superficial, mientras que, en uno permeable, el agua sería infiltrada.

Entre estos dos casos extremos pueden existir infinitas respuestas de escorrentía superficial frente a una precipitación, dependiendo el tipo de asociación suelo-vegetación. Estas curvas intermedias constan de dos partes diferenciadas: un valor umbral de precipitación (I_a), por debajo del cual toda precipitación es interceptada por el complejo suelo-vegetación y, por tanto, la escorrentía es nula.

Por sobre el valor (I_a) se entra en la segunda parte de la curva, en la cual el valor de la escorrentía en relación con la precipitación va aumentando. Llegando a valores muy altos, la curva tiende asintóticamente a una inclinación de tangente igual a la unidad, lo cual significa que, para valores muy altos de precipitación, el suelo está tan saturado de agua la escorrentía superficial crece proporcional al agua precipitada.

Para una tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (P_e) es siempre menor o igual a profundidad de precipitación (P); de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca (F_a) es menor o igual a alguna retención potencial máxima (S).

En la Figura 4.2, se expresa el funcionamiento de este mecanismo. En primera instancia, durante el inicio de las precipitaciones, el agua es absorbida por el suelo (I_a). Luego que la tasa de precipitación iguala o excede la curva de infiltración, inicia la escorrentía superficial. En paralelo, el suelo continúa absorbiendo agua, disminuyendo su tasa en la medida que avanza el tiempo (Chow *et al.*, 1994).

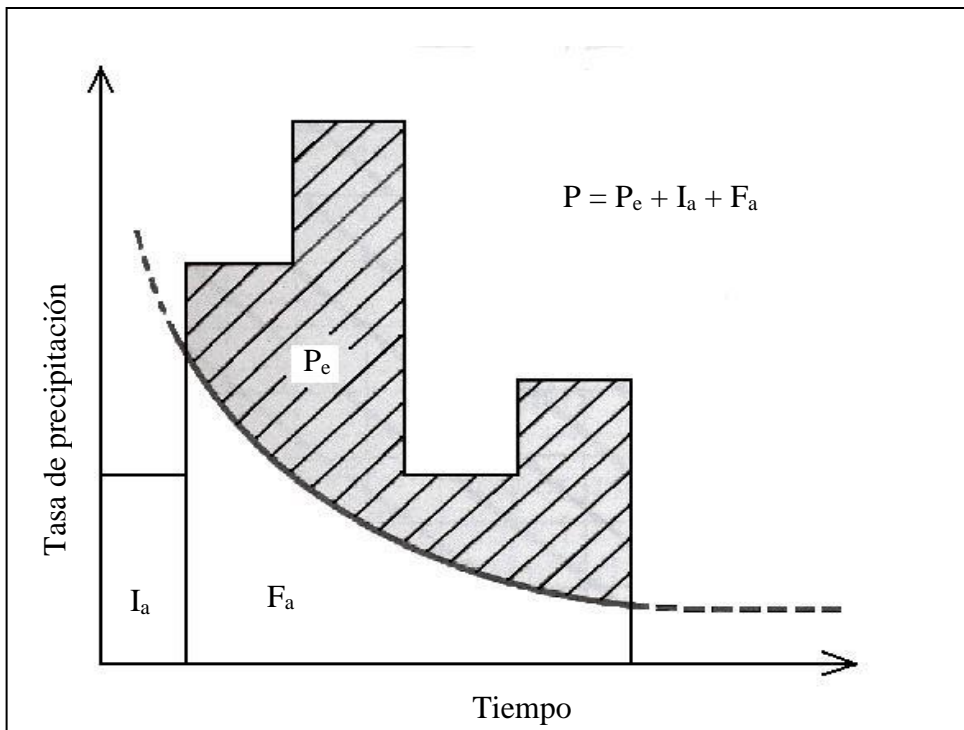


Figura 4.2: Variables en el método de abstracciones de precipitación del SCS. I_a = abstracción inicial; P_e = exceso de precipitación; F_a = abstracción acumulada; P = precipitación total. Modificado de Chow *et al.*, 1994.

Al representar en gráficas la información de P y P_e para muchas cuencas, el SCS encontró curvas como las que se muestran en la Figura 4.3.

Para estandarizar estas curvas, se define un número adimensional de curva NC , tal que $0 \leq NC \leq 100$. En superficies impermeables y superficies de agua $NC=100$.

El valor NC dependerá de los previamente estimados para distintos usos de suelo asociados a distintos grupos hidrológicos (Anexo I, Tabla 1).

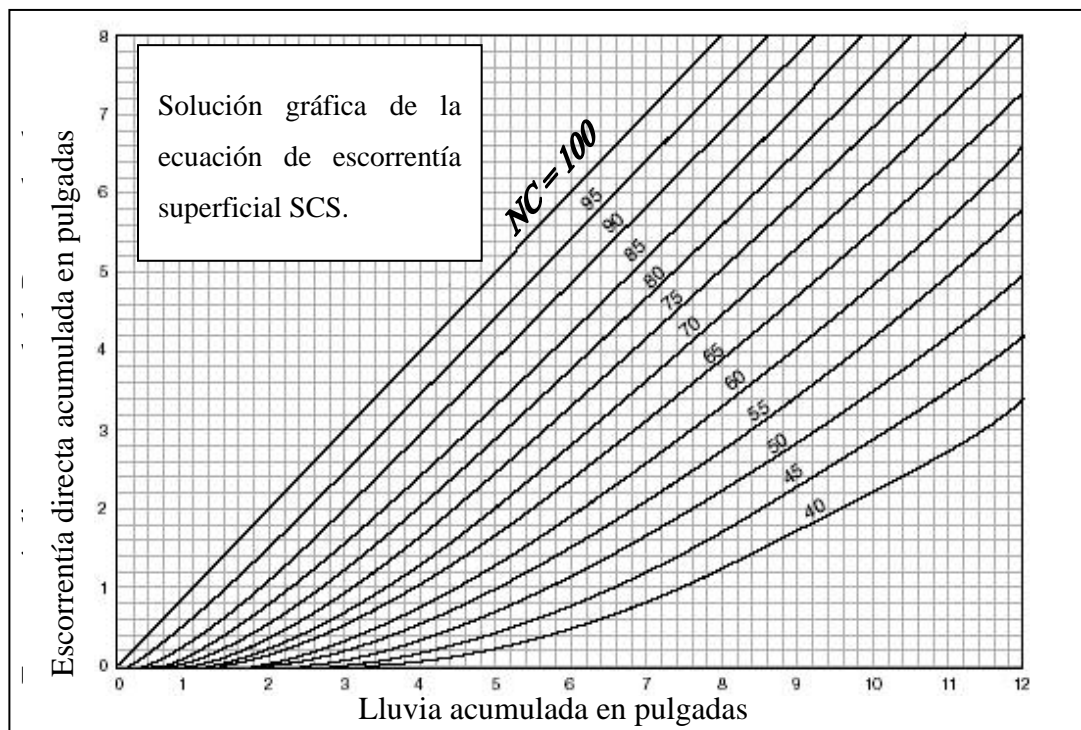


Figura 4.3: Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS. Modificado de SCS, 1972.

En base a lo anterior, se estima la cantidad de agua correspondiente a retención máxima, escorrentía máxima y actual siguiendo el procedimiento a continuación.

Cada valor de número de curva (NC) (Tabla 4.1) debe multiplicarse por el valor de área correspondiente a su uso en la unidad hidrogeológica, para luego dividirse en 100, obteniendo el NC ponderado de cada uso, mientras que, para el total de la unidad, basta con sumar los valores obtenidos de cada uso. El NC ponderado de la cuenca se obtiene de la suma de todos los valores de la unidad hidrológica.

Tabla 4.1: Ejemplo cálculo NC ponderado.

Unidad hidrogeológica	Grupo hidrológico	Uso de suelo	% Área en la cuenca	NC	NC ponderado
Fm. Trapa-Trapa	C	Desprovistas de vegetación	3.799	77	2.925556
		Nieves eternas	7.784	100	7.7841845
		Bosque nativo	9.535	73	6.9602554
		Estepa andina	2.440	77	1.8790157
		Matorrales	2.224	65	1.4456343
			25.783		20.994646

Con estos valores es posible calcular la retención máxima (S), que está dada por:

$$S = \frac{25400}{NC \text{ ponderado total}} - 254 \quad (1)$$

La retención máxima de la cuenca se calcula con la suma de los NC ponderados.

Para la esorrentía superficial máxima, es necesario tener la retención máxima, donde se aplica la siguiente fórmula:

$$EsMax = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{(P + 0.8 * S)^2} \quad (2)$$

Donde P corresponde a las precipitaciones totales del periodo.

Para obtener la esorrentía superficial máxima de la cuenca, se procede igual, pero usando el S obtenido a partir de la suma de todos los NC ponderados.

La esorrentía actual para cada serie se calcula según la fórmula 3:

$$EsAct = \frac{EsMax * \%Serie \text{ en la cuenca}}{100} \quad (3)$$

La suma de esorrentías actuales de cada unidad, dan por resultado la esorrentía actual de la cuenca.

Posterior, se trabaja en la planilla cálculo de evapotranspiración potencial, Universidad de Salamanca, (Sánchez, 2022), usando los datos de precipitaciones, temperaturas promedio mensuales y horas teóricas de luz, se estima evapotranspiración real, para luego obtener la infiltración a partir de la fórmula del método Thornthwaite (1957):

$$P: Es + ETR + I \quad (4)$$

Donde P: precipitaciones, Es: escorrentía superficial, ETR: evapotranspiración real, I: infiltración. Se despeja I , obteniendo el resultado de la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Ejemplo cálculo Infiltración.

Periodo	Precipitaciones [mm/a]	Escorrentía actual [mm/a]	ETR	Infiltración [mm/a]
x	2055	1006.24	485	563.3

4.3 Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros medidos son pH, conductividad eléctrica (mS/cm) y temperatura (°C). Las mediciones realizadas se distribuyen en el sector sur de la laguna, siendo equidistantes en lugares donde las condiciones del parque permitieron acercarse al cuerpo de agua (Figura 4.2). Se utiliza el medidor Groline HI98131, el cual mide los tres parámetros (pH, conductividad eléctrica y temperatura), calibrando entre lecturas con agua destilada.

El pH (actividad del ión Hidrógeno) se refiere a la concentración de H^+ en miligramos por litro, pero esto al ser tan bajo, se expresa en logaritmo (Hem, 1985).

La Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (1964) definió la conductividad eléctrica del agua como “el recíproco de la resistencia en ohmios medida entre las caras opuestas de un centímetro cúbico de una solución acuosa a una temperatura específica”, determinando que la unidad de medida está en microhmios por centímetro, aunque ahora también se usa el siemens (S), con una equivalencia de 1:1.



Figura 4.4: Distribución de mediciones parámetros fisicoquímicos. Sector sur Laguna de la Laja. Modificado de Google Earth.

5. RESULTADOS

5.1 Precipitaciones y temperatura

A continuación, se presentan los resultados de precipitaciones anuales por cada periodo, desde 1980 hasta 2019 (Gráfico 5.1).

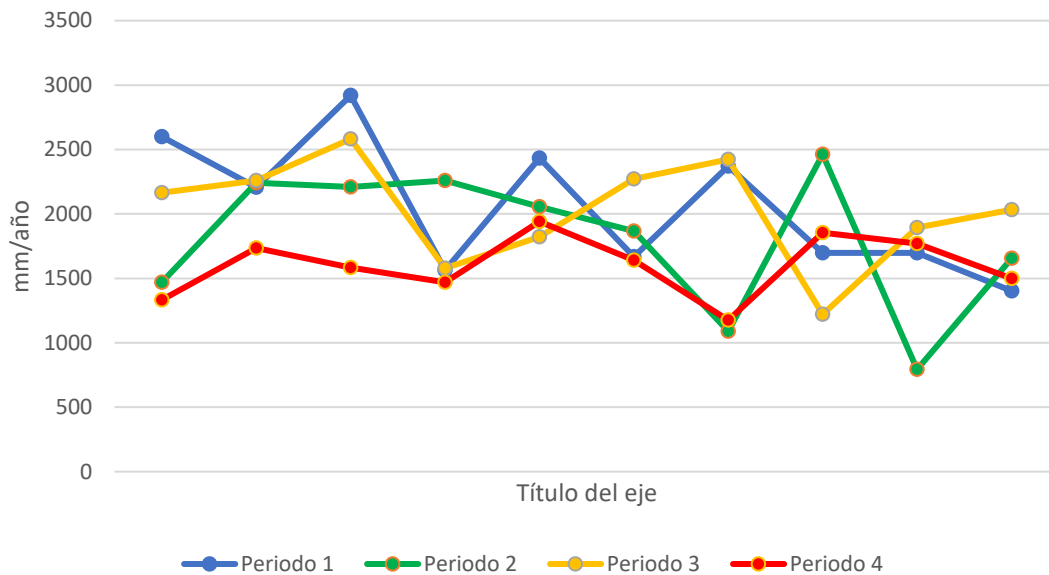


Gráfico 5.1: Precipitaciones por periodo. Periodo 1 (1980-1989), Periodo 2 (1990-1999), Periodo 3 (2000-2009), Periodo 4 (2010-2019). Datos: Productos grillados, CR².

También, se establece una relación entre los meses del año con valores mayores en pluviosidad, por lo que se calcula el promedio mensual de precipitaciones por cada periodo (Gráfico 5.2).

En el Gráfico 5.3 se compara la relación de temperatura y precipitaciones en la subcuenca por año, desde 1980 a 2019.

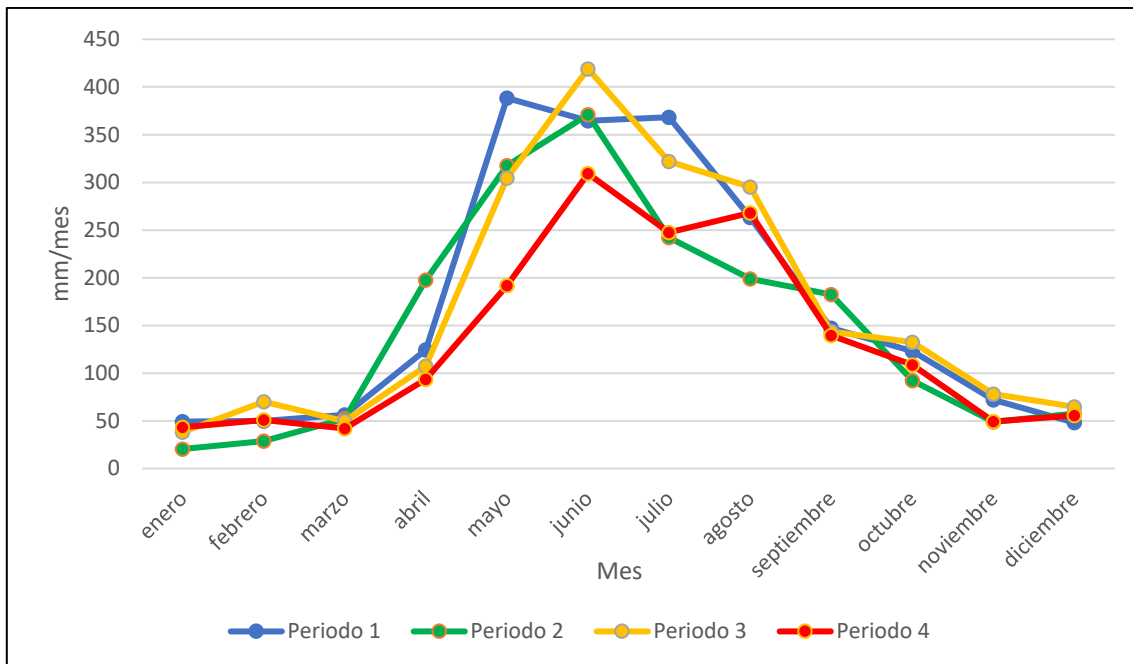


Gráfico 5.2: Variaciones mensuales de precipitaciones por periodo. Periodo 1 (1980-1989), Periodo 2 (1990-1999), Periodo 3 (2000-2009), Periodo 4 (2010-2019). Datos: Productos grillados, CR².

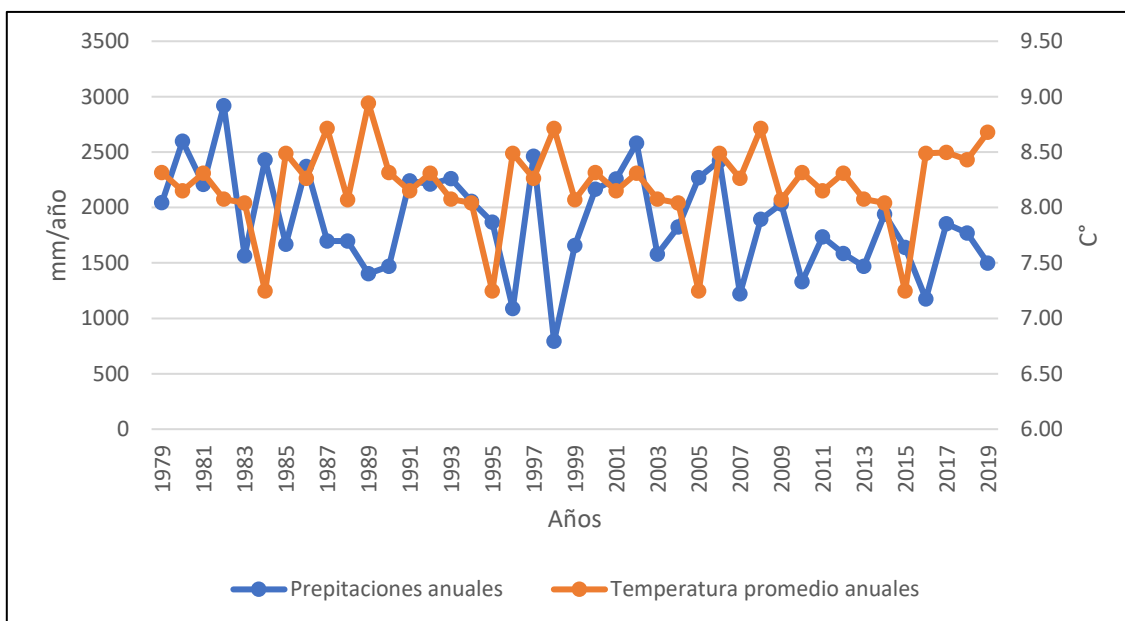


Gráfico 5.3: Precipitaciones y temperatura. Datos: Productos grillados, CR².

A partir del Gráfico 5.1, se evidencia la disminución en las precipitaciones dada en los distintos periodos, ejemplo de esto es el peak de lluvia en el periodo 1, que alcanza los 3000 mm/año, mientras que en los demás, el máximo llega a 2500 mm/año. Entre 2010 y 2019, el descenso en las precipitaciones es aún más notorio, con un máximo de 2000 mm/año, sin embargo, para todos los periodos se mantiene la tendencia de sequía a finales de la década.

Respecto a variaciones mensuales (Gráfico 5.2), entre mayo y julio, hay un aumento en la cantidad de precipitaciones para todos los periodos, producto de las estaciones otoño e invierno. Para el periodo 4, esta tendencia se mantiene, con cifras de lluvia similares para las estaciones cálidas, sin embargo, existe una diferencia de 100 mm en los meses de otoño-invierno respecto a los años anteriores.

En el Gráfico 5.3, se observa una preferencia a la baja en las precipitaciones anuales, mientras que las temperaturas tienden levemente alza. Se observan máximos históricos en 1989, 1999, 2009 y 2019 de temperatura, entre tanto, los mínimos se dan en 1885, 1995, 2005 y 2015. Observando la relación entre estos parámetros, es posible advertir que, cuando las temperaturas aumentan, las precipitaciones disminuyen, siendo especialmente claro entre 1987 y 1991, y 2007 a 2015.

5.2 Balance hídrico

Los resultados obtenidos a partir de la asignación de las unidades hidrogeológicas al Método de Número de Curvas y planilla de cálculo de evapotranspiración potencial arrojan lo siguiente:

5.2.1. Escorrentía superficial máxima

Periodo 1 (19780-1989)

Tabla 5.1: Valores de escorrentía por unidad hidrogeológica P1.

Unidad litológica	Precipitación [mm/a]	% Área cuenca	Escorrentía Máxima [mm/a]
Fm. Cola de Zorro	2054.5373	26.627	1989.526169
Fm. Trapa-Trapa	2054.5373	25.783	583.0399816
Flujos Lávicos	2054.5373	12.026	1369.285104
Fm. Curamallín	2054.5373	16.855	899.9290932
Intrusiones Miocenas	2054.5373	1.998	505.8966627

Periodo 2 (1990-1999)

Tabla 5.2: Valores de escorrentía por serie y cuenca P2.

Unidad litológica	Precipitación [mm/a]	% Área cuenca	Escorrentía Máxima [mm/a]
Fm. Cola de Zorro	1810.2480	26.627	1745.429476
Fm. Trapa-Trapa	1810.2480	25.783	665.1317471
Flujos Lávicos	1810.2480	12.026	1470.429478
Fm. Curamallín	1810.2480	16.855	716.5801833
Intrusiones Miocenas	1810.2480	1.998	584.7330483

Periodo 3 (2000-2009)

Tabla 5.3: Valores de escorrentía por serie y cuenca P3.

Unidad litológica	Precipitación [mm/a]	% Área cuenca	Escorrentía Máxima [mm/a]
Fm. Cola de Zorro	2024.7960	26.627	1959.805911
Fm. Trapa-Trapa	2024.7960	25.783	592.7032729
Flujos Lávicos	2024.7960	12.026	1381.372181
Fm. Curamallín	2024.7960	16.855	877.1260545
Intrusiones Miocenas	2024.7960	1.998	515.1468773

P4 (2010-2019)**Tabla 5.4: Valores de escorrentía por serie y cuenca P4.**

Unidad litológica	Precipitación [mm/a]	% Área cuenca	Escorrentía Máxima [mm/a]
Fm. Cola de Zorro	1599.5760	26.627	1534.969518
Fm. Trapa-Trapa	1599.5760	25.783	740.9830303
Flujos Lávicos	1599.5760	12.026	1561.099584
Fm. Curamallín	1599.5760	16.855	566.7530718
Intrusiones Miocenas	1599.5760	1.998	658.0381709

De lo anterior, se calculan los valores de retención máxima, escorrentía superficial máxima y actual de la cuenca para cada periodo (Tabla 5.5), con la metodología previamente descrita.

Tabla 5.5: Valores de escorrentía superficial máxima y actual

Periodo	Escorrentía máxima [mm/a]	Escorrentía actual [mm/a]
1980-1989	1919.247417	1006.538
1990-1999	1675.791282	945.543
2000-2009	1889.597308	998.911
2010-2019	1466.030724	896.175

Con los resultados de escorrentía superficial, además de los valores obtenidos de evapotranspiración real, se estima la infiltración de la cuenca por periodo, usando la fórmula de Thornthwaite (Tabla 5.6), donde se aplica el valor de la escorrentía superficial actual, ya que es la que se aproxima mejor a la escorrentía superficial real de la cuenca.

Tabla 5.6: Valores de escorrentía actual e infiltración por periodo.

Periodo	Escorrentía actual [mm/a]	Infiltración [mm/a]
1980-1989	1006.538269	562.9990
1990-1999	945.5428461	430.7051539
2000-2009	998.9110002	521.8849998
2010-2019	896.1749565	239.4010435

Los resultados del balance hídrico permiten establecer una relación entre la recarga y descarga natural de agua en la cuenca (Tabla 5.7). La recarga de la laguna corresponde a la suma de precipitaciones, escorrentía superficial e infiltración o escorrentía subterránea, sin embargo, también se considera el agua filtrada desde la parte alta del río Polcura, con un caudal de 10 m³/s. En paralelo, la descarga se calcula a partir de la evapotranspiración real del suelo y de la laguna, junto con las filtraciones de Ojos de agua, Las Chilas y El Torbellino, con 27 m³/s promedio de descarga.

Tabla 5.7: Recarga y descarga natural de Laguna de la Laja por periodo.

	Recarga [m ³ /s]	Descarga [m ³ /s]
1980-1989	57.225	44.070
1990-1999	51.439	42.590
2000-2009	55.877	44.621
2010-2019	44.562	43.461

Los datos obtenidos muestran una diferencia positiva en el volumen de agua en un régimen natural, pero con tendencia a la baja en el último periodo.

5.3 Parámetros fisicoquímicos

Es necesario aclarar que las mediciones de los puntos 1 a 10 se realizaron en agosto, en época en la que aún había nieve, mientras que los puntos 11 a 14, se tomaron en diciembre, donde la temperatura ambiente era de 32°C.

A partir de las mediciones realizadas, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5.8: Mediciones de pH, conductividad eléctrica y temperatura.

Punto	pH	Conductividad eléctrica (mS/cm)	T° (C°)	Punto	pH	Conductividad eléctrica (mS/cm)	T° (C°)
1	8.5	0.06	9	8	8.27	0.05	8.4
2	8.41	0.06	8.8	9	8.44	0.44	10.1
3	8.37	0.07	8.9	10	8.24	0.1	8
4	8.25	0.1	8.8	11	9.5	0.06	20
5	8.25	0.06	9.1	12	8.4	0.06	20.2
6	8.16	0.08	7.7	13	8.37	0.06	19
7	8.21	0.06	8.4	14	8.3	0.06	19.6

Los resultados muestran alcalinidad del agua en todos los puntos medidos, además de una conductividad eléctrica baja.

6. DISCUSIÓN

6.1 Hidrología

Para cada uso de suelo las diferencias de escorrentía se hacen notorias. Ejemplo de esto son los Flujos Láxicos escoráceos unidad tipo A de alto potencial hidrogeológico, con escorrentía menor que las otras unidades del área, por su capacidad de infiltración mayor a causa una porosidad efectiva alta, Por el contrario, Intrusiones Miocenas, al ser una unidad hidrogeológica de tipo C, tiene una menor capacidad de infiltración, como consecuencia de la competencia de la roca, que impide el paso del agua, a excepción de zonas con fracturas, favoreciendo la escorrentía superficial.

A partir de los períodos analizados es posible notar una disminución general en la infiltración y escorrentía superficial, relacionado directamente con la cantidad de precipitaciones, mostrando que son directamente proporcionales. En el periodo 3 (2000-2009), existe un aumento sutil en los parámetros del balance hídrico, asociado a un alza en la pluviosidad. Esto escapa de la tendencia, sin embargo, se puede atribuir a un periodo húmedo.

Las temperaturas promedio anuales tienden al alza, concordantes con la disminución en la pluviosidad, siendo inversamente proporcionales. Esta propensión a la baja en los niveles de precipitaciones, han sido denominadas como una megasequía, con descensos de hasta un 40% en la pluviosidad, lo cual, se atribuye a la Oscilación del Pacífico Norte (PDO) junto al calentamiento global, causado y potenciado por las altas emisiones de gases de efecto invernadero que conllevan a la destrucción de la capa de ozono (Garreaud *et al.* 2018).

Las alternancias en las precipitaciones tienen un efecto directo sobre el nivel espejo de la laguna de la Laja (Gráfico 6.1). Entre los años 1989 y 2000, existen fluctuaciones abruptas del nivel espejo de la laguna, que se condicen con las variaciones en la pluviosidad. Sin embargo, la variación en la cota del lago, se reflejan dos años después, producto que la escorrentía subterránea es más lenta.

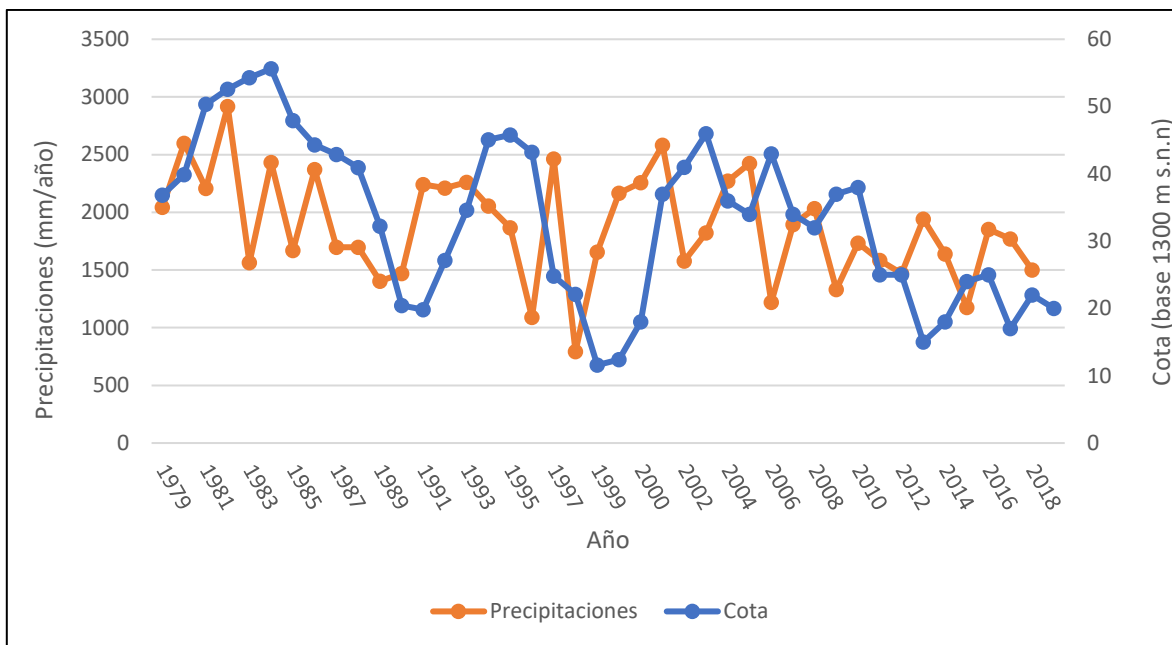


Gráfico 6.1: Variaciones de precipitaciones promedio anual y nivel espejo de la Laguna de la Laja.

A pesar de lo anterior, del Gráfico 6.1, se desprende una anomalía a la tendencia, específicamente en 1997, donde un alza en las precipitaciones trajo consigo un descenso en el nivel espejo de la laguna. Este evento muestra la existencia de un agente externo, alterando el balance.

En la zona, existen tres centrales hidroeléctricas operativas, Abanico, Antuco y El Toro (Figura 6.1). Esta última extrae agua directamente desde la laguna y del estero Polcura. Los recursos hídricos para su operación son captados del lago mediante una bocatoma profunda situada a 60 m bajo su nivel máximo, un túnel de 9 km de longitud, 5.6 m de diámetro y 97 m³/s de capacidad conduce las aguas hasta la zona de caída. Dos túneles blindados de 1450 m de longitud cada uno, permiten utilizar una altura de caída de 540 m, llevando los caudales disponibles hasta la caverna de máquinas (ENDESA, 1995).

La filtración de agua se reduce cuando la cota de la laguna descende, considerando la detención de actividades de la central cuando el nivel espejo de la laguna esté bajo los 1300 m s.n.m.

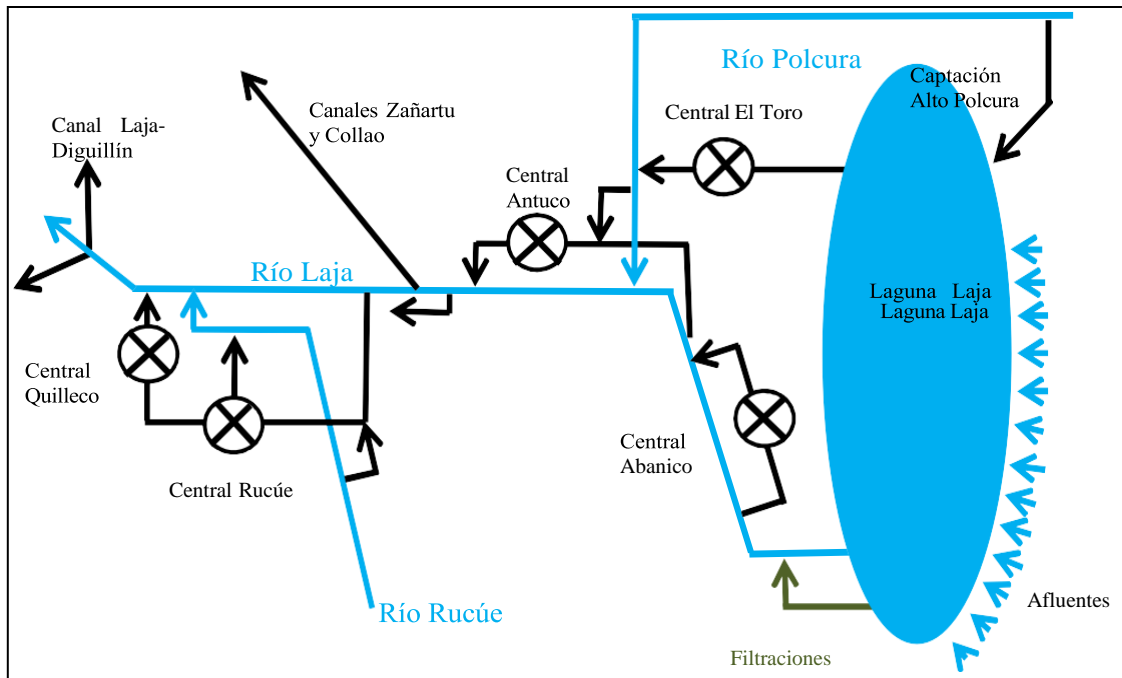


Figura 6.1: Manejo hidrológico Laguna de la Laja y afluentes. Extraído Ayala, 2011.

Las variaciones abruptas en la cota inician en 1958, con el inicio de construcción de túneles de vaciado, con los cuales, posteriormente, operará esta central (ENDESA, 1995). Para esto, fue necesario desviar el agua de la laguna, mostrando un descenso marcado en este año (Gráfico 6.2), con una recuperación que no tuvo frutos.

El nivel máximo de la laguna en la década de 1960 fue de 1363 m s.n.m. (González *et al.*, 2012), pero tras el desvío de agua en 1970, el tope de recuperación alcanzó la cota de 1355 m s.n.m. en 1985. Tras esto, el nivel espejo continua con una tendencia a la baja.

Las filtraciones desde la central El Toro están estrechamente relacionadas con la cota de la laguna. A partir del Gráfico 6.2, se entiende que la cantidad de agua extraída depende de fluctuaciones del nivel espejo de la laguna.

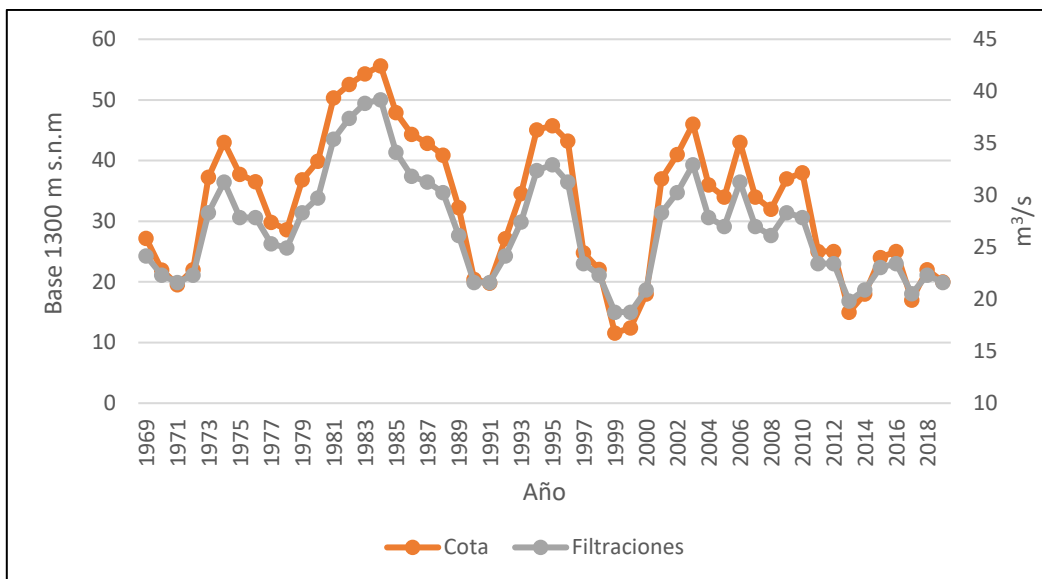


Gráfico 6.2: Nivel espejo de la Laguna de la Laja y filtraciones de la central El Toro. Datos: ENDESA, 2006 y DGA, 2020.

Entre el año 1983 y 1985, la extracción alcanza los $55 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que, en esa década, el caudal promedio de recarga al lago alcanza los $57 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabla 5.7). Considerando que existe una descarga natural del lago, las filtraciones de la central producen un déficit, conllevando una pérdida de $220 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

El Gráfico 6.3 muestra las diferencias de recarga y descarga en la laguna. Existe una tendencia al descenso en el volumen de recarga, con una descarga natural que rodea los $40 \text{ m}^3/\text{s}$ casi sin variación a lo largo del tiempo. Con el régimen natural, existe una recuperación en la cantidad de agua que se almacenaría en la laguna, sin embargo, producto de las filtraciones hacia la central hidroeléctrica, la descarga real de la laguna llega a $65 \text{ m}^3/\text{s}$ promedio, con un peak en 1984, extrayendo $81 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto contribuye a la baja en el nivel espejo de la laguna.

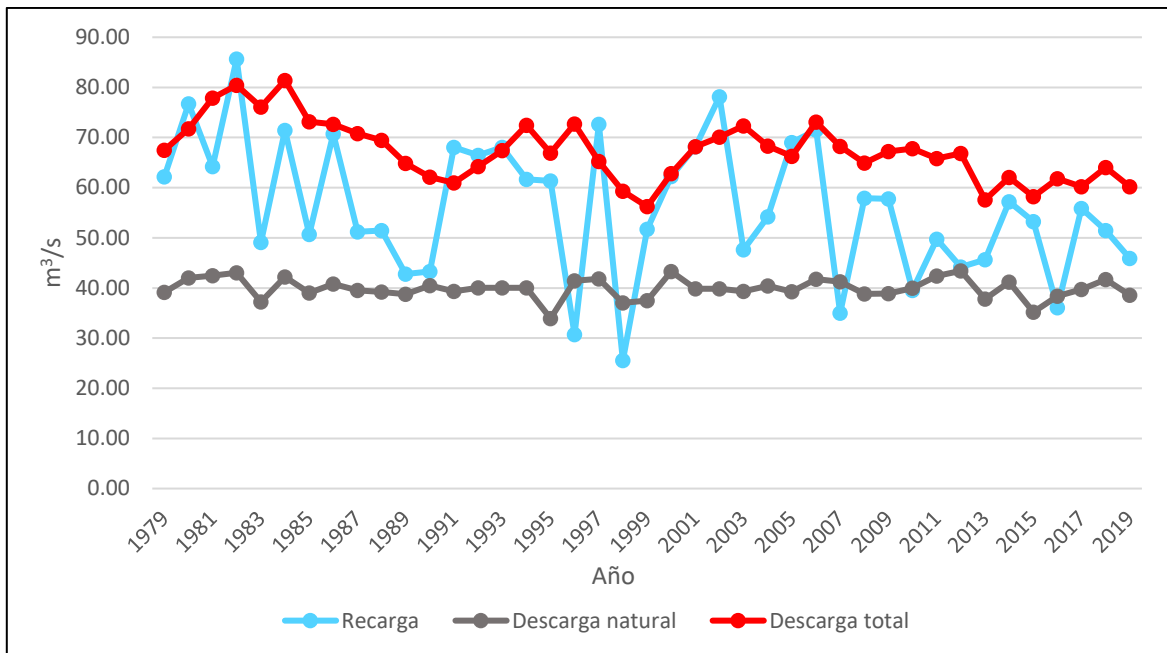


Gráfico 6.3: Diferencias de volumen de descarga en la Laguna de la Laja. Elaboración propia.

Teniendo en consideración lo anterior, es fácil notar que el descenso en el nivel espejo de la Laguna de la Laja no es producto solo de la baja en las precipitaciones, sino que también de las filtraciones para la central hidroeléctrica.

En el periodo 3 y 4, el descenso en el volumen de la laguna se sostiene. En el Gráfico 6.4 se observan las diferencias que la pérdida de volumen conlleva a la disminución en el área de la laguna. Según los datos expuestos en el Gráfico 6.1, existe un aumento en las precipitaciones en 2013 respecto a 2012 de 500 mm/año y en 2016 respecto a 2015 de 1000 mm/año, en donde el alza en el volumen está reflejado dos años después para cada periodo, sin embargo, el nivel a finales de 2018, respecto a el alza ocurrida en 2015, fue de $-0,4 \text{ km}^2$, lo que significasignifica pérdida para la recuperación de la laguna.

Actualmente, se filtra agua desde el embalse de Alto Polcura hacia la Laguna de la Laja, con una tasa de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que se suma a la recarga natural. Sin embargo, las filtraciones desde la central continúan con un promedio actual de $20 \text{ m}^3/\text{s}$, un valor bajo, con el fin de salvaguardar el espejo de agua, que oscila en los 1320 m s.n.m, es decir, 44 metros bajo lo natural.

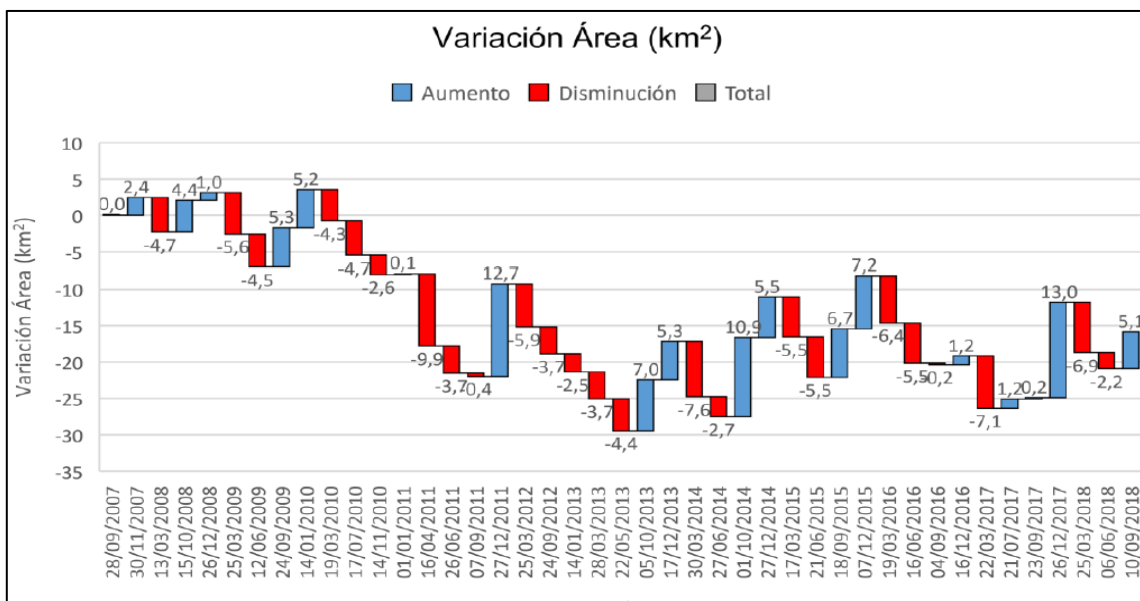


Gráfico 6.4: Variaciones de volumen en la Laguna de la Laja. Extraído de Fernández, 2019

6.2 Parámetros fisicoquímicos

Un lago representa una cuenca mezcladora de distintos caudales, permitiendo que reacciones lentas ocurran con mayor probabilidad que en un río. Sin embargo, la composición de un mismo lago puede variar entre un lugar y otro. (Hem, 1985). Las variaciones de estaciones son importantes en zonas de climas cálidos, producto de la estratificación térmica, pero, al estar en zona montañosa de clima templado, con temperaturas promedio de 8°C, la estratificación térmica no es tan marcada. Sin embargo, la temperatura de la laguna indica un aporte no solo de las precipitaciones, sino que también de nieve, como lo demuestra el punto 6, que fue medido a pocos metros de un bloque de nieve.

El pH, en un sistema acuoso, se encuentra controlado por las reacciones químicas que producen ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) o consumen ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}^+$) hidrógeno. Este, en un sistema en equilibrio, 25°C y aire ordinario, tendría un valor de 7 (Garrels y Christ, 1964 en Hem, 1985). Se han reportado casos en que el pH es mayor, llegando a valores de 9 o incluso 12 (Barnes y O'Neil, 1969 en Hem, 1985), específicamente en vertientes. Caso similar se da en el área de estudio, donde, según los resultados (Tabla 5.6), el pH medido en la laguna oscila entre

8.1 y 9.5, incluso aquellas realizadas en pequeñas vertientes con algas, demostrando así la poca presencia de iones de hidrógeno, dando por resultado un fluido alcalino.

Para que un fluido aumente su valor de conductividad eléctrica, es necesaria la presencia de especies iónicas en la solución. Los valores son variados, para aguas superficiales pueden encontrarse bajo los 50 μmho (Hem, 1985).

Según los valores obtenidos de las mediciones, es posible notar que la conductividad eléctrica es baja, ya que al convertir el valor moda (0,006 mS/cm) a mho, arroja un valor del orden de los micrómetros. Así, se entiende que la cantidad de iones disueltos en la Laguna de la Laja es baja, indicando calidad en la misma. Los valores bajos de conductividad eléctrica y alcalinidad del agua muestran una recarga rápida en el régimen hídrico, con un recambio y flujo de agua constante, que impide la concentración de iones provenientes de la meteorización de las rocas (González, comunicación verbal, 2023).

7. CONCLUSIÓN

La disminución en las precipitaciones se acentúa entre los periodos 1980-1989 y 2010-2019, con un aumento entre 1990-1999. Estas variaciones traen consigo que la Laguna del Laja haya sufrido modificaciones notorias en el nivel del espejo. Esta baja en la pluviosidad tiene como factor primordial, el comportamiento anormal de las corrientes circumpacíficas, que es causado por el calentamiento global, el cual aumenta la temperatura de manera generalizada producto de la mayor concentración de gases de efecto invernadero.

Las disminuciones en las precipitaciones traen consigo una disminución proporcional de escorrentía superficial e infiltración. Este fenómeno provoca una disminución del volumen y nivel espejo del cuerpo de agua. Sumado a esto, la construcción del túnel de vaciado entre 1958 y 1972 de la central El Toro, perpetuó el descenso del espejo de agua.

La operación de la central El Toro, continua en la actualidad, filtrando agua directamente desde la laguna hacia la hidroeléctrica, con un caudal promedio de $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Estas filtraciones se ajustan al espejo de agua de la laguna, reduciendo el volumen extraído cuando este alcanza niveles críticos, deteniendo las operaciones cuando la cota está bajo los 1310 m s.n.m.

En base a lo anterior se determina que el descenso del espejo de agua no es solo influencia de la disminución en las precipitaciones, sino que también del factor antrópico directo, las filtraciones desde la laguna. El decrecimiento en las precipitaciones influye en la baja de la cota, pero, en un régimen natural, existe la posibilidad de detener el descenso del nivel espejo.

La extracción de agua no regularizada resulta en un problema, que afecta el balance hídrico, lo que conlleva a errores en los cálculos.

Es importante destacar que el monitoreo regular de los ojos de agua y de la calidad del agua en la Laguna de la Laja es fundamental para entender la dinámica de los recursos hídricos en la región y tomar decisiones informadas sobre la gestión sostenible del agua en la cuenca. Los estudios científicos y la recolección de datos hidrológicos pueden ayudar a proporcionar información más precisa sobre la cantidad y calidad de agua que fluye a través de los ojos de agua en la Laguna de la Laja.

Es innegable la necesidad de producción de energía para el ritmo de vida actual, sin embargo, es necesario buscar el desarrollo de manera sustentable.

8. REFERENCIAS

ALBORNOZ, A. 2019. Estructura del basamento y su posible relación con la actividad holocena del Volcán Antuco, región del Biobío. Memoria para optar al título de Geólogo, Departamento Ciencias de la Tierra: 61 pp. Universidad de Concepción, Chile.

ARAGUÁS, L. & PLATA, A. 2000. Trazadores naturales en la identificación y caracterización del origen y dinámica de los flujos de agua en el entorno de presas y embalses. *Revista Ingeniería Civil CEDEX*, N°119, artículo 4, Madrid, España.

ARAYA-OSSES, D.; CASANUEVA, A.; ROMÁN-FIGUEROA, C.; URIBE, J. & PANEQUE, M. Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Clim Dyn* 54, 4309–4330 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>

AYALA, A. 2011. Impactos del cambio climático sobre la operación del sistema hídrico de la Laguna Laja. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil: pp 124. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

BACK, W.; ROSENSHEIN, J. & SEABER, P. 1988. Hidrogeology, The geology of North America, v. O-2: Boulder, Colorado: *Geological Society of America*. 524 pp.

BÖRGEL, J. 1983. Geomorfología y Geografía de Chile. Instituto Geográfico Militar (IGM): 373 pp. Santiago.

BIRDLIFE INTERNATIONAL 2023. Important Bird Areas factsheet: Corredor Biológico Nevados de Chillán-Laguna del Laja. <http://www.birdlife.org> Consultado en 10/03/2023.

CHOW, V.; MAIDMENT, D. & MAYS, L. 1993. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, 580 pp.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales de Chile. En www.conaf.gob.cl/html/estadisticas/nacional.pdf Consultado el 17/09/2022.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF) 1993. Plan de Manejo Parque Nacional Laguna del Laja.

CENTER FOR CLIMATE AND RESILIENCE RESEARCH, CR2, 2015. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Universidad de Chile, Santiago.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS 2016. Análisis efecto en el régimen hídrico por cambio en patrones meteorológicos. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile. 343 pp.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS 2016. Atlas del agua. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile. 24 pp.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS 2018. Sectorización hidrogeológica del acuífero del río Laja, región del Biobío. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile. 156 pp.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA) 2022. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile. 44 pp.

DÍAZ, P. 2015. Análisis de cambio en la cuenca del Lago Laja (1986-2014). Aportes para una comprensión integrada del conflicto del agua en la provincia de Biobío. Tesis para optar al grado de Magister en Análisis Geográfico. Universidad de Concepción, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Departamento de Geografía: 97pp., Concepción, Chile.

EMPRESA NACIONAL DE ELECTRICIDAD (ENDESA) 1995. El Toro. Central hidroeléctrica y central de transmisión. Biblioteca Nacional de Chile. En <http://www.memoriachilena.gob.cl/archivos2/pdfs/MC0037324.pdf> Consultado 05/12/2022.

FEKETE, B.; VÖROSMARTY, C.; ROADS, J. & YWILLMOTT, C. 2004. Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates. *Journal of Climate* 17:294-304.

FARIÁS, M.; CHARRIER, R.; CARRETIER, S.; MARTINOD, J.; FOCK, A.; CAMPBELL, D.; CÁCERES, J. & COMTE, D. 2008. Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33°-35°S). In *Tectonics* (Vol. 27, Issue 1, p. n/a-n/a). *American Geophysical Union* (AGU). <https://doi.org/10.1029/2006tc002046>

FERNÁNDEZ, E. 2019. Determinación de las variaciones superficiales y volumétricas de la Laguna del Laja en el periodo septiembre 2007- septiembre 2018. Proyecto de Título, Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática Universidad de Concepción: 50p. Campus Los Ángeles, Chile.

FREEZE, A. & CHERRY, J. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.

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. *IntJClimatol*, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

GONZÁLEZ, L.; GONZÁLEZ, A.; & MARDONES M. 2003. Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 30, N° 1, pp. 3-22.

GONZÁLEZ, L.; GONZÁLEZ, A.; & MARDONES M. 2012. Estudio de la interacción y regulación del sistema hídrico en la cuenca lacustre de laguna de la Laja, Región del Biobío, Chile. SERNAGEOMIN, Chile.

GONZÁLEZ FERRÁN, O. & VERGARA MARTÍNEZ, M. 1962. Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35 y 38 sur. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, 19(19), Pág. 19-121.

HEM, J. D. 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *United States Geological Survey Water-Supply*. 263pp. Alexandria.

KÖPPEN, W. & GEIGER, R. 1936. *Das geographische System der Klimate*, Berlin.

MARDONES, M.; GONZÁLEZ, L. & GONZÁLEZ, A. 2003. Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. *Andean geology*, 30(1), 3–22.

MARDONES, M. & VARGAS, J. 2005. Efectos hidrológicos de los usos eléctrico y agrícola en la cuenca del río Laja (Chile centro-sur). *Revista De Geografía Norte Grande*. (33), 89–102.

MARTINEZ ALFARO, P.; MARTINEZ SANTOS, P. & CASTAÑO CASTAÑO, S. 2006. *Fundamentos de Hidrogeología*. 284 pp. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España.

MARTÍNEZ, P.; SINGER B.S.; MORENO, H. & JICHA, B.R. 2017. Volcanologic and petrologic evolution of Antuco-Sierra Velluda, Southern Andes, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 46: 392-406.

MORENO, H.; VARELA, J.; LAHSEN, A. & VERGARA, M. 1984. Estudio Geológico del Grupo Volcánico Antuco-Sierra Velluda. Departamento de Geología y Geofísica. Universidad de Chile. Contrato OICB-03. ENDESA. Informe inédito, 164.

MISHRA, S. & SINGH V. 2003. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN). Springer Dordrecht. Methodology <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>

NIEMEYER, H. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, 1980. Hoyas Hidrográficas de Chile, Octava región. Chile (DGA). <https://snia.mop.gob.cl/repositorioidga/>

NIEMEYER, H. & MUÑOZ, J. 1983. Hoja Laguna de la Laja, región del Biobío, Carta Geológica de Chile, Escala 1:250.000, 57, SERNAGEOMIN.

SÁNCHEZ, J. Evapotranspiración. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España. <https://hidrologia.usal.es/> Consultado 03/01/2023.

SANDERS, L. 1998 *A manual of Field Hydrogeology*. Prentice-Hall, 381 pp.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) 1972. *National Engineering Handbook*, section 4. Hydrology, U. S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.

STERN, C. 2004. Active andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile* N°24. Vol. 31: 161-206. Santiago.

STRUCKMEIER, W. & MARGAT, J. 1995. *Hydrogeological maps. A guide and a standard legend*. International Association of Hydrogeologists. International contributions to hydrogeology. Vol. 17) ISBN 3-922705-98-7 Series Editorial Board

TASSARA, A. & YÁÑEZ, G. 2003. Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47°S). *Andean geology*.

THIELE, R; MORENO, H.; ELQUETA, S.; LAHSEN, A.; REBOLLEDO, S. & PETITBREUILH, M.E. 1998. Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 25, N° 2, 229-255 pp. Chile.

THORNTHWAITE & MATHER 1957. Instructions and tables for computing potencial evapotranspiration and the water balance, 5th printing. N°3, Vol 10, CW Thomthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Elmer, NJ, USA.

9. ANEXOS

Anexo I. Tabla 1. Valores de método de Número de Curvas. Asociado a uso de suelo y unidad hidrogeológica. Usos de suelo extraídos de CERVCh. Modificado de Chow *et al.*, 1994.

CERVCh (Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales de Chile)	Condiciones hidrológicas para la infiltración	Número de Curvas			
		A	B	C	D
Áreas desprovistas de vegetación	Pobres	45	66	77	83
Áreas urbanas e industriales	-	59	74	82	86
Bosque Mixto	Media	36	60	73	79
Bosque Nativo	Buena	30	55	70	77
Cuerpos de Agua		100	100	100	100
Estepa Andina Central	Pobres	45	66	77	83
Humedal	Óptima	30	58	71	78
Matorral	Buena	30	48	65	73
Matorral Arborescente	Buena	32	58	72	79
Nieves Eternas y Glaciares		100	100	100	100
Plantaciones Forestales	Buena	26	52	63	69
Praderas Naturales	Media	49	69	79	84

Anexo II. Tabla 2. Datos precipitaciones. Pp: precipitaciones (mm/mes)

Fecha	pp	Fecha	pp	Fecha	pp
01-01-1979	19.74	01-06-1982	599.9	01-11-1985	89.54
01-02-1979	21.63	01-07-1982	602.51	01-12-1985	0
01-03-1979	10.7	01-08-1982	322.44	01-01-1986	21.3
01-04-1979	29.4	01-09-1982	326.11	01-02-1986	42.04
01-05-1979	279.16	01-10-1982	323.64	01-03-1986	95.09
01-06-1979	60.96	01-11-1982	99.67	01-04-1986	248.34
01-07-1979	539.28	01-12-1982	0	01-05-1986	510.39
01-08-1979	486.11	01-01-1983	108.75	01-06-1986	601.18
01-09-1979	228.02	01-02-1983	3.06	01-07-1986	200.85
01-10-1979	72.01	01-03-1983	0	01-08-1986	267.33
01-11-1979	142.26	01-04-1983	101.44	01-09-1986	60.33
01-12-1979	154.41	01-05-1983	149.96	01-10-1986	67.77
01-01-1980	0	01-06-1983	459.56	01-11-1986	224.84
01-02-1980	274.88	01-07-1983	337.71	01-12-1986	30.67
01-03-1980	27.9	01-08-1983	200.63	01-01-1987	0
01-04-1980	485.11	01-09-1983	134.18	01-02-1987	19.15
01-05-1980	610.43	01-10-1983	51.56	01-03-1987	100.9
01-06-1980	451.19	01-11-1983	2.5	01-04-1987	50.4
01-07-1980	313.75	01-12-1983	13.84	01-05-1987	139.24
01-08-1980	195.57	01-01-1984	96.9	01-06-1987	191.7
01-09-1980	82.72	01-02-1984	69.47	01-07-1987	504.5
01-10-1980	1.71	01-03-1984	63.56	01-08-1987	306.53
01-11-1980	82.93	01-04-1984	52.18	01-09-1987	154.8
01-12-1980	72.85	01-05-1984	597.25	01-10-1987	131.81
01-01-1981	103.46	01-06-1984	354.71	01-11-1987	51.59
01-02-1981	29.19	01-07-1984	515.23	01-12-1987	47.57
01-03-1981	69.11	01-08-1984	125.96	01-01-1988	60.64
01-04-1981	101.31	01-09-1984	253.08	01-02-1988	4.42
01-05-1981	903.22	01-10-1984	250.91	01-03-1988	100.01
01-06-1981	228.41	01-11-1984	31.49	01-04-1988	71.68
01-07-1981	296.17	01-12-1984	21.26	01-05-1988	141.6
01-08-1981	188.64	01-01-1985	36.52	01-06-1988	460.97
01-09-1981	120.13	01-02-1985	5.8	01-07-1988	235.71
01-10-1981	95.04	01-03-1985	56.82	01-08-1988	403.12
01-11-1981	35.27	01-04-1985	178.64	01-09-1988	51.51
01-12-1981	37.35	01-05-1985	471.23	01-10-1988	110.86
01-01-1982	61.75	01-06-1985	173.19	01-11-1988	13.98
01-02-1982	65.7	01-07-1985	223.28	01-12-1988	42.48
01-03-1982	72.66	01-08-1985	87.92	01-01-1989	31.92
01-04-1982	43.85	01-09-1985	171.45	01-02-1989	14.94
01-05-1982	400.57	01-10-1985	173.88	01-03-1989	23.71

01-04-1989	4.33	01-11-1992	37.17	01-08-1996	197.27
01-05-1989	68.54	01-12-1992	70.17	01-09-1996	46.81
01-06-1989	430.05	01-01-1993	35.35	01-10-1996	55.76
01-07-1989	282.01	01-02-1993	0	01-11-1996	83.94
01-08-1989	310.35	01-03-1993	63.54	01-12-1996	38.74
01-09-1989	35.54	01-04-1993	155.81	01-01-1997	46.56
01-10-1989	74.65	01-05-1993	479.67	01-02-1997	59.66
01-11-1989	17.74	01-06-1993	634.33	01-03-1997	30.89
01-12-1989	108.55	01-07-1993	262.26	01-04-1997	515.97
01-01-1990	21.05	01-08-1993	312.66	01-05-1997	158.32
01-02-1990	32	01-09-1993	46.84	01-06-1997	575.5
01-03-1990	139.35	01-10-1993	150.5	01-07-1997	270.23
01-04-1990	141.61	01-11-1993	56.01	01-08-1997	206.05
01-05-1990	188.31	01-12-1993	63.07	01-09-1997	241.68
01-06-1990	153.98	01-01-1994	15.77	01-10-1997	208.41
01-07-1990	150	01-02-1994	38.54	01-11-1997	94.57
01-08-1990	193.01	01-03-1994	27.16	01-12-1997	53.71
01-09-1990	300.17	01-04-1994	280.96	01-01-1998	10.12
01-10-1990	45.83	01-05-1994	155.26	01-02-1998	27.05
01-11-1990	80.08	01-06-1994	389.66	01-03-1998	24.81
01-12-1990	25.03	01-07-1994	482.34	01-04-1998	83.77
01-01-1991	30.87	01-08-1994	53.71	01-05-1998	125.19
01-02-1991	10.61	01-09-1994	371.15	01-06-1998	100.73
01-03-1991	3.32	01-10-1994	117.35	01-07-1998	130.19
01-04-1991	230.13	01-11-1994	39.85	01-08-1998	113.59
01-05-1991	816.48	01-12-1994	82.64	01-09-1998	100.56
01-06-1991	214.51	01-01-1995	2.49	01-10-1998	3.67
01-07-1991	330.22	01-02-1995	5.42	01-11-1998	26.02
01-08-1991	83.98	01-03-1995	25.61	01-12-1998	47.5
01-09-1991	180.61	01-04-1995	224.94	01-01-1999	24.35
01-10-1991	113.33	01-05-1995	91.27	01-02-1999	43.87
01-11-1991	44.78	01-06-1995	516.18	01-03-1999	24.97
01-12-1991	182.68	01-07-1995	489.03	01-04-1999	41.81
01-01-1992	0	01-08-1995	337.64	01-05-1999	246.13
01-02-1992	40.71	01-09-1995	78.82	01-06-1999	452.3
01-03-1992	74.16	01-10-1995	80.22	01-07-1999	105.06
01-04-1992	200.5	01-11-1995	13.32	01-08-1999	344.12
01-04-1992	200.5	01-12-1995	1.56	01-09-1999	311.35
01-05-1992	774.73	01-01-1996	18.36	01-10-1999	37.48
01-06-1992	458.15	01-02-1996	31.46	01-11-1999	12.04
01-07-1992	149.23	01-03-1996	109.95	01-12-1999	12.95
01-08-1992	147.87	01-04-1996	98.72	01-01-2000	35.73
01-09-1992	146.61	01-05-1996	140.58	01-02-2000	225.65
01-10-1992	110.67	01-07-1996	53.26		

01-03-2000	19.61	01-11-2003	88.22	01-06-2007	186.31
01-04-2000	77.02	01-12-2003	79.21	01-07-2007	313.26
01-05-2000	71.77	01-01-2004	1.57	01-08-2007	173.93
01-06-2000	816.24	01-02-2004	21.29	01-09-2007	75.92
01-07-2000	167.65	01-03-2004	85.09	01-10-2007	50.18
01-08-2000	243.46	01-04-2004	287.48	01-11-2007	16.24
01-09-2000	321.89	01-05-2004	36.12	01-12-2007	71.79
01-10-2000	53.07	01-06-2004	399.98	01-01-2008	34.5
01-11-2000	63.65	01-07-2004	339.52	01-02-2008	48.17
01-12-2000	69.84	01-08-2004	84	01-03-2008	23.11
01-01-2001	120.09	01-09-2004	208.15	01-04-2008	100.56
01-02-2001	13.04	01-10-2004	165.6	01-05-2008	645.35
01-03-2001	12.54	01-11-2004	135.15	01-06-2008	197.46
01-04-2001	80.74	01-12-2004	59.1	01-07-2008	280.27
01-05-2001	560.6	01-01-2005	26.08	01-08-2008	374.17
01-06-2001	327.89	01-02-2005	0	01-09-2008	85.35
01-07-2001	724.87	01-03-2005	35.45	01-10-2008	43.44
01-08-2001	298.47	01-04-2005	26.65	01-11-2008	15.41
01-09-2001	26.85	01-05-2005	609.13	01-12-2008	46.64
01-10-2001	31.96	01-06-2005	490.22	01-01-2009	16.8
01-11-2001	61.46	01-07-2005	333.06	01-02-2009	42.28
01-12-2001	0	01-08-2005	474.51	01-03-2009	15.99
01-01-2002	25.2	01-09-2005	42.11	01-04-2009	88.76
01-02-2002	205.42	01-10-2005	28.79	01-05-2009	455.71
01-03-2002	218.34	01-11-2005	111.51	01-06-2009	307.87
01-04-2002	110.01	01-12-2005	92.79	01-07-2009	168.05
01-05-2002	298.87	01-01-2006	48.17	01-08-2009	355.06
01-06-2002	315.75	01-02-2006	31.51	01-09-2009	152.39
01-07-2002	184	01-03-2006	32.81	01-10-2009	224.83
01-08-2002	502.01	01-04-2006	156.1	01-11-2009	159.35
01-09-2002	163.97	01-05-2006	225.21	01-12-2009	45.42
01-10-2002	415.65	01-06-2006	579.44	01-01-2010	19.41
01-11-2002	101.56	01-07-2006	491.86	01-02-2010	65.84
01-12-2002	40.81	01-08-2006	346.07	01-03-2010	23.74
01-01-2003	43.91	01-09-2006	159.77	01-04-2010	19.28
01-02-2003	3.3	01-10-2006	181.19	01-05-2010	96.79
01-03-2003	12.27	01-11-2006	28.14	01-06-2010	362.49
01-04-2003	25.58	01-12-2006	142.64	01-07-2010	271.73
01-05-2003	111.43	01-01-2007	30.6	01-08-2010	226.86
01-06-2003	569.12	01-02-2007	110.94	01-09-2010	10.58
01-07-2003	218.81	01-03-2007	41.25	01-10-2010	66.88
01-08-2003	99.75	01-04-2007	120.26	01-11-2010	48.88
01-09-2003	198.12	01-05-2007	30.19	01-12-2010	119.24

01-01-2011	122.9	01-09-2014	242.89	01-05-2018	186.92
01-02-2011	37.13	01-10-2014	62.01	01-06-2018	285.57
01-03-2011	84	01-11-2014	25.38	01-07-2018	128.93
01-04-2011	177.61	01-12-2014	53.93	01-08-2018	176.88
01-05-2011	69.71	01-01-2015	0	01-09-2018	341.04
01-06-2011	320.81	01-02-2015	9.43	01-10-2018	159.45
01-07-2011	259.21	01-03-2015	0	01-11-2018	104.64
01-08-2011	422.2	01-04-2015	44.1	01-12-2018	46.1
01-09-2011	132.32	01-05-2015	136.87	01-01-2019	80.52
01-10-2011	36.87	01-06-2015	336.86	01-02-2019	18.11
01-11-2011	71.57	01-07-2015	409.16	01-03-2019	24.95
01-12-2011	0	01-08-2015	414.04	01-04-2019	22.2
01-01-2012	49.01	01-09-2015	138.49	01-05-2019	300.74
01-02-2012	196.42	01-10-2015	110.45	01-06-2019	394.11
01-03-2012	20.15	01-11-2015	22.21	01-07-2019	241.9
01-04-2012	27.45	01-12-2015	17.93	01-08-2019	161.25
01-05-2012	324.49	01-01-2016	20.68	01-09-2019	113.29
01-06-2012	379.42	01-02-2016	12.31	01-10-2019	83.98
01-07-2012	77.09	01-03-2016	8.73	01-11-2019	39.08
01-08-2012	127.87	01-04-2016	225.35	01-12-2019	18.91
01-09-2012	38.94	01-05-2016	79.35		
01-10-2012	72.66	01-06-2016	22.83		
01-11-2012	46.59	01-07-2016	277.53		
01-12-2012	223.57	01-08-2016	223.28		
01-01-2013	19.27	01-09-2016	44.31		
01-02-2013	59.59	01-10-2016	170.8		
01-03-2013	10.62	01-11-2016	28.77		
01-04-2013	54.82	01-12-2016	61.19		
01-05-2013	322.82	01-01-2017	28.85		
01-06-2013	204.11	01-02-2017	50.14		
01-07-2013	226.8	01-03-2017	60.43		
01-08-2013	254.42	01-04-2017	91.36		
01-09-2013	194.65	01-05-2017	166.43		
01-10-2013	80.08	01-06-2017	397.93		
01-11-2013	40.74	01-07-2017	193.9		
01-12-2013	1.09	01-08-2017	403.03		
01-01-2014	38.09	01-09-2017	138.73		
01-02-2014	35.3	01-10-2017	242.93		
01-03-2014	97.42	01-11-2017	65.96		
01-04-2014	103.81	01-12-2017	14.17		
01-05-2014	233.89	01-01-2018	53.88		
01-06-2014	387.14	01-02-2018	25.82		
01-07-2014	390.18	01-03-2018	89.24		
01-08-2014	270.85	01-04-2018	170.11		

Tabla 2 Datos temperaturas máximas y mínimas. T°C: temperatura.

Fecha	T° C máxima	T° C mínima	Fecha	T° C máxima	T° C mínima
01-01-1979	22.716505	8.058602	01-05-1982	11.532742	0.7627419
01-02-1979	21.295834	7.7486906	01-06-1982	5.8308334	-2.7120554
01-03-1979	19.991451	6.8253765	01-07-1982	6.8130107	-0.87655914
01-04-1979	18.152779	2.4353333	01-08-1982	8.913763	-1.668172
01-05-1979	10.634032	-0.5799462	01-09-1982	11.222722	0.03738889
01-06-1979	8.540778	-4.258222	01-10-1982	11.588871	0.15317205
01-07-1979	9.901936	-0.31172043	01-11-1982	12.687667	2.1166666
01-08-1979	8.976721	-0.5330108	01-12-1982	18.049139	4.8812366
01-09-1979	8.630722	-2.7443888	01-01-1983	20.611881	8.54285
01-10-1979	12.408656	0.0888172	01-02-1983	21.939583	7.816012
01-11-1979	13.833222	3.3963332	01-03-1983	19.975698	6.6588173
01-12-1979	17.858494	6.517097	01-04-1983	15.490778	2.593611
01-01-1980	22.814247	8.637312	01-05-1983	9.707097	-1.6703225
01-02-1980	18.82431	9.002414	01-06-1983	5.5069447	-4.2767777
01-03-1980	21.2207	7.8475804	01-07-1983	5.2576346	-4.392097
01-04-1980	10.884222	0.9281667	01-08-1983	7.822903	-2.7498386
01-05-1980	9.606398	0.20295699	01-09-1983	9.448389	-2.976889
01-06-1980	7.760889	-1.2501111	01-10-1983	14.814086	1.3165054
01-07-1980	7.1716666	-2.2681184	01-11-1983	17.93111	4.1326666
01-08-1980	9.248441	-1.5469892	01-12-1983	21.278818	8.23586
01-09-1980	12.171	-1.3869444	01-01-1984	20.526773	7.9377956
01-10-1980	13.762634	0.09306452	01-02-1984	19.671896	6.937184
01-11-1980	14.301833	2.4625556	01-03-1984	19.192581	7.180968
01-12-1980	18.466398	6.62914	01-04-1984	15.529889	1.9638889
01-01-1981	18.7407	7.624946	01-05-1984	7.0694084	-2.073172
01-02-1981	22.488035	8.425834	01-06-1984	4.765278	-4.5555
01-03-1981	19.817741	7.7121506	01-07-1984	6.25414	-2.6578496
01-04-1981	15.814	3.5337777	01-08-1984	7.2966127	-3.96957
01-05-1981	9.237258	0.41682795	01-09-1984	11.043612	-0.75894445
01-06-1981	8.109167	-1.9142222	01-10-1984	11.751828	0.44333333
01-07-1981	8.4995165	-0.6464516	01-11-1984	13.832778	2.7150555
01-08-1981	9.025	-1.6643548	01-12-1984	17.936237	5.874462
01-09-1981	9.803166	-2.5712779	01-01-1985	19.984516	7.6862903
01-10-1981	12.68043	0.0966129	01-02-1985	21.290714	7.4156547
01-11-1981	15.781278	3.4899445	01-03-1985	19.076775	6.448011
01-12-1981	18.990591	5.9187098	01-04-1985	13.189055	1.2102778
01-01-1982	21.322258	8.052634	01-05-1985	11.481022	0.49037635
01-02-1982	19.614761	7.426607	01-06-1985	10.197	0.37905556
01-03-1982	19.404785	6.944032	01-07-1985	7.900699	-1.5133871
01-04-1982	17.971222	3.7761111	01-08-1985	8.345	-2.789785

01-09-1985	11.800889	-1.2267222	01-03-1989	19.333387	6.509086
01-10-1985	11.731505	0.43978494	01-04-1989	17.355	2.3292778
01-11-1985	17.613945	5.348611	01-05-1989	13.318925	0.1160752
01-12-1985	19.918386	7.334462	01-06-1989	10.086389	0.1705
01-01-1986	20.317472	7.236613	01-07-1989	7.516882	-2.313382
01-02-1986	21.389524	8.288988	01-08-1989	7.31	-2.687473
01-03-1986	18.305645	5.9884944	01-09-1989	11.141055	-2.375278
01-04-1986	13.472667	2.4274445	01-10-1989	14.655968	0.6768279
01-05-1986	10.202957	0.39521506	01-11-1989	18.429056	5.1560555
01-06-1986	7.821889	-1.094	01-12-1989	17.621721	6.37457
01-07-1986	9.733764	-0.7392473	01-01-1990	21.661505	7.314462
01-08-1986	8.414947	-1.4659678	01-02-1990	21.844166	9.469345
01-09-1986	10.327056	-2.0472221	01-03-1990	18.52102	5.802957
01-10-1986	14.572097	1.6907527	01-04-1990	13.372611	2.1035
01-11-1986	12.902667	2.6846666	01-05-1990	10.203011	-1.439785
01-12-1986	20.156343	7.3075805	01-06-1990	9.080722	-1.571055
01-01-1987	23.084139	8.306344	01-07-1990	7.2841935	-2.429086
01-02-1987	23.605297	9.916131	01-08-1990	10.74414	-0.812968
01-03-1987	20.71414	7.879301	01-09-1990	11.084722	-1.305889
01-04-1987	16.168388	2.8016112	01-10-1990	14.731882	0.6869355
01-05-1987	8.63129	-2.3379033	01-11-1990	17.00311	3.8578334
01-06-1987	9.668889	-0.9382778	01-12-1990	18.290699	6.6689787
01-07-1987	7.6428494	-0.90338707	01-01-1991	19.9457	7.04
01-08-1987	7.148871	-2.92	01-02-1991	22.00625	8.505834
01-09-1987	9.9105	-2.4632223	01-03-1991	20.502258	7.4060216
01-10-1987	13.395054	1.1365591	01-04-1991	14.917444	3.2791111
01-11-1987	18.679667	5.5225554	01-05-1991	11.831989	1.0054301
01-12-1987	18.417904	6.066129	01-06-1991	8.791555	-1.464277
01-01-1988	20.035107	7.048602	01-07-1991	6.0487633	-2.239273
01-02-1988	23.564022	9.630919	01-08-1991	8.19129	-2.998808
01-03-1988	18.486021	6.8946238	01-09-1991	11.246222	-0.790222
01-04-1988	15.361667	2.804389	01-10-1991	12.879517	0.0330107
01-05-1988	12.111613	-0.46043012	01-11-1991	16.023333	4.153278
01-06-1988	8.331667	-1.6875	01-12-1991	14.399893	5.549032
01-07-1988	5.7774196	-4.3758063	01-01-1992	22.372473	9.169731
01-08-1988	6.539086	-3.2446773	01-02-1992	19.989252	7.285
01-09-1988	10.094444	-2.616111	01-03-1992	20.066236	8.202205
01-10-1988	12.479624	-0.40086022	01-04-1992	12.674556	1.4438334
01-11-1988	17.747	3.8544445	01-05-1992	7.2603765	-0.845175
01-12-1988	19.172796	6.545699	01-06-1992	6.343278	-2.124
01-01-1989	22.019194	8.6883335	01-07-1992	4.4612904	-4.913658
01-02-1989	23.859108	9.5293455	01-08-1992	9.449247	-2.032105

01-09-1992	11.524944	-1.5325556	01-03-1996	19.731667	7.465215
01-10-1992	12.461344	-0.04290323	01-04-1996	13.658667	1.5596666
01-11-1992	16.000723	3.949	01-05-1996	12.314408	-1.018621
01-12-1992	16.972635	5.9444623	01-06-1996	8.331388	-3.080555
01-01-1993	20.649248	8.422634	01-07-1996	9.285377	-0.957204
01-02-1993	23.426607	9.302143	01-08-1996	9.127151	-1.493796
01-03-1993	20.461935	7.5331182	01-09-1996	11.953278	-1.3935
01-04-1993	14.282833	2.7691112	01-10-1996	14.726989	1.0126882
01-05-1993	7.2197847	-2.1831183	01-11-1996	17.528444	4.559278
01-06-1993	7.337167	-0.7979444	01-12-1996	17.902689	6.3569355
01-07-1993	5.5984945	-3.8198388	01-01-1997	20.225914	7.987043
01-08-1993	9.5948925	-2.2473118	01-02-1997	21.275595	7.357976
01-09-1993	10.832889	-2.0372777	01-03-1997	21.57871	8.615161
01-10-1993	13.399247	0.46833333	01-04-1997	17.376389	4.413778
01-11-1993	14.867666	3.0414445	01-05-1997	13.553763	1.0236559
01-12-1993	18.599892	6.2477417	01-06-1997	6.595278	-1.386833
01-01-1994	22.057688	8.705538	01-07-1997	7.939301	-1.074677
01-02-1994	20.606012	7.923988	01-08-1997	9.7227955	-1.380058
01-03-1994	21.450483	7.646129	01-09-1997	10.505111	-1.265388
01-04-1994	14.950889	2.764889	01-10-1997	10.494409	0.2231720
01-05-1994	12.060268	0.39892474	01-11-1997	13.81	3.333111
01-06-1994	8.232111	-0.41144446	01-12-1997	17.903978	6.32629
01-07-1994	6.1674194	-2.5434947	01-01-1998	21.79586	7.8801074
01-08-1994	8.134409	-3.0820968	01-02-1998	20.87506	8.463511
01-09-1994	11.119389	-0.5619444	01-03-1998	19.049248	6.2553225
01-10-1994	12.209248	0.47930107	01-04-1998	14.794611	2.376889
01-11-1994	16.606112	4.2885	01-05-1998	13.461667	0.9777419
01-12-1994	18.955431	6.93914	01-06-1998	9.187	-2.123779
01-01-1995	20.451397	7.2021503	01-07-1998	9.014355	-1.048387
01-02-1995	21.539345	7.5488095	01-08-1998	8.280807	-3.441294
01-03-1995	19.601343	6.447742	01-09-1998	10.203389	-2.2355
01-04-1995	15.061389	3.0127223	01-10-1998	17.8693	2.0185485
01-05-1995	14.649624	0.9505914	01-11-1998	17.922667	4.177889
01-06-1995	8.013166	-0.95505553	01-12-1998	20.458979	7.3247313
01-07-1995	3.3636558	-5.0340323	01-01-1999	22.271559	8.764301
01-08-1995	5.572258	-4.5986557	01-02-1999	22.241428	8.954583
01-09-1995	11.976444	-1.5567222	01-03-1999	17.686829	5.79828
01-10-1995	12.665483	-0.03951613	01-04-1999	15.912222	2.3749444
01-11-1995	17.619556	4.9335	01-05-1999	12.630322	1.2187097
01-12-1995	23.22828	9.053441	01-06-1999	8.317722	0.8716666
01-01-1996	19.882689	7.222742	01-07-1999	6.6923656	-3.427312
01-02-1996	20.645346	7.3640804	01-08-1999	8.209623	-1.436235

01-09-1999	10.384666	-1.0990555	01-01-2003	21.10742	7.686398
01-10-1999	14.893764	1.4329569	01-02-2003	21.18768	6.5967264
01-11-1999	17.224056	4.3698335	01-03-2003	22.141935	8.425968
01-12-1999	19.167473	6.3958063	01-04-2003	16.453611	2.4887223
01-01-2000	19.995699	7.577527	01-05-2003	12.998602	-0.5591398
01-02-2000	18.20885	7.129138	01-06-2003	8.952556	0.27955556
01-03-2000	17.695	5.8187633	01-07-2003	6.648387	-2.9977956
01-04-2000	16.366833	3.3022223	01-08-2003	8.56629	-3.0564516
01-05-2000	10.767796	-0.30258065	01-09-2003	11.348111	-1.2453889
01-06-2000	6.522222	-1.3307778	01-10-2003	14.704516	0.85306454
01-07-2000	6.274409	-3.610484	01-11-2003	16.745667	4.6145
01-08-2000	7.2000537	-2.5832257	01-12-2003	16.29871	4.8125267
01-09-2000	9.596444	-1.9045556	01-01-2004	22.61199	9.223333
01-10-2000	14.209623	0.9679032	01-02-2004	22.196838	8.725115
01-11-2000	15.259945	3.0731666	01-03-2004	20.257204	7.720699
01-12-2000	19.088226	6.3378496	01-04-2004	13.501389	2.5671666
01-01-2001	19.494732	7.1542473	01-05-2004	12.803119	0.16209677
01-02-2001	22.922739	8.969464	01-06-2004	8.640555	-0.9976111
01-03-2001	20.254463	6.956559	01-07-2004	6.7914515	-2.0559678
01-04-2001	14.714833	1.3595556	01-08-2004	8.982043	-1.8049462
01-05-2001	9.266828	-0.51854837	01-09-2004	11.731277	-1.3823333
01-06-2001	7.8729444	-2.0833888	01-10-2004	11.828495	0.6160215
01-07-2001	6.785914	-1.2438172	01-11-2004	14.4465	3.6058888
01-08-2001	9.328333	-1.2866129	01-12-2004	18.060215	6.2401075
01-09-2001	11.037056	-1.7736111	01-01-2005	20.888279	7.2885485
01-10-2001	15.98586	1.9227419	01-02-2005	23.97381	9.528393
01-11-2001	15.180944	2.9627223	01-03-2005	18.723871	6.282581
01-12-2001	22.700592	8.377419	01-04-2005	15.566055	1.2694445
01-01-2002	21.02387	8.213441	01-05-2005	7.6467743	-2.0176883
01-02-2002	21.78625	8.982678	01-06-2005	7.3485	-1.0722222
01-03-2002	16.384731	6.321344	01-07-2005	7.4334946	-2.0476344
01-04-2002	13.305445	1.6525556	01-08-2005	7.528925	-1.8859677
01-05-2002	11.184677	-0.47268817	01-09-2005	10.367444	-2.161611
01-06-2002	6.3540554	-3.9042222	01-10-2005	13.622634	0.12876344
01-07-2002	7.684086	-2.360215	01-11-2005	16.3155	4.7295
01-08-2002	8.357796	-1.3294086	01-12-2005	18.583979	6.3830647
01-09-2002	9.851556	-1.9268334	01-01-2006	21.674623	8.124731
01-10-2002	11.333226	0.78408605	01-02-2006	22.363512	9.854048
01-11-2002	13.805056	3.1292222	01-03-2006	18.346075	5.653333
01-12-2002	17.700592	6.4566665	01-04-2006	16.6155	2.8656666

01-05-2006	13.351666	-0.32758063	01-11-2009	10.600611	1.5511111
01-06-2006	8.366222	0.03766667	01-12-2009	17.17199	5.569516
01-07-2006	7.1467743	-0.9441398	01-01-2010	21.969194	7.9817204
01-08-2006	8.625053	-1.9520968	01-02-2010	20.133274	7.3784523
01-09-2006	11.147333	-1.7689445	01-03-2010	20.635323	7.649409
01-10-2006	12.348978	0.12306452	01-04-2010	16.179	1.8245
01-11-2006	16.491556	3.8727777	01-05-2010	12.481774	0.17268817
01-12-2006	17.23156	5.9817204	01-06-2010	8.1495	-1.3232223
01-01-2007	21.281506	8.8253765	01-07-2010	3.5289247	-5.480054
01-02-2007	19.039524	6.7038097	01-08-2010	5.8407526	-4.697957
01-03-2007	19.160913	7.028387	01-09-2010	10.129	-2.2647777
01-04-2007	14.495833	1.8898889	01-10-2010	13.245699	0.5711828
01-05-2007	11.152849	-0.93672043	01-11-2010	16.106556	3.6483333
01-06-2007	6.766722	-3.9975555	01-12-2010	16.996828	5.569516
01-07-2007	5.0012364	-3.431344	01-01-2011	19.979193	8.347258
01-08-2007	4.661613	-6.3028493	01-02-2011	21.741726	8.866964
01-09-2007	10.511056	-1.6882222	01-03-2011	18.036882	5.814301
01-10-2007	12.2986555	0.16817205	01-04-2011	14.801945	1.5621111
01-11-2007	16.35111	3.6044445	01-05-2011	13.705	0.095
01-12-2007	19.013548	6.4487095	01-06-2011	7.581222	-2.2449443
01-01-2008	21.745108	8.791076	01-07-2011	6.0737634	-3.1869893
01-02-2008	22.44293	10.132471	01-08-2011	5.8876343	-3.2908602
01-03-2008	19.611183	7.355699	01-09-2011	11.447333	-1.4788889
01-04-2008	15.148945	1.7251667	01-10-2011	12.739892	0.14139785
01-05-2008	11.595645	-0.16951613	01-11-2011	16.089556	4.018778
01-06-2008	7.928	-2.0837777	01-12-2011	21.80758	7.9254837
01-07-2008	7.730699	-0.6303226	01-01-2012	22.20371	9.842795
01-08-2008	6.411075	-2.8125806	01-02-2012	20.136724	8.620402
01-09-2008	11.776944	-1.540389	01-03-2012	20.853388	7.996075
01-10-2008	13.989194	0.2483871	01-04-2012	15.8785	2.9447222
01-11-2008	19.43461	5.8662224	01-05-2012	12.381828	0.79139787
01-12-2008	20.749355	8.440806	01-06-2012	9.102222	0.18238889
01-01-2009	22.926666	8.973118	01-07-2012	6.858763	-3.4460216
01-02-2009	21.639345	8.664227	01-08-2012	7.7108603	-2.786613
01-03-2009	21.722097	8.155054	01-09-2012	12.156777	-0.6065
01-04-2009	19.964056	4.8723335	01-10-2012	13.639839	0.5498387
01-05-2009	12.288602	1.1953764	01-11-2012	18.000055	4.8722224
01-06-2009	9.662444	-1.5167222	01-12-2012	14.776613	4.8578496
01-07-2009	6.357473	-3.5236022	01-01-2013	23.291075	10.480323
01-08-2009	7.8526344	-1.973871	01-02-2013	20.674345	9.057976
01-09-2009	9.819111	-2.7242222	01-03-2013	18.489086	5.9781184
01-10-2009	11.86758	0.37650537	01-04-2013	17.085222	3.3282223

01-05-2013	11.757043	0.32295698	01-10-2016	14.765484	1.7059678
01-06-2013	9.240167	-0.8032778	01-11-2016	18.485056	5.195
01-07-2013	7.7729034	-1.4967204	01-12-2016	18.883333	6.9769354
01-08-2013	7.6446238	-3.2335484	01-01-2017	23.151613	8.819408
01-09-2013	8.577444	-2.6731668	01-02-2017	22.513155	9.799822
01-10-2013	13.938548	0.58591396	01-03-2017	19.329462	6.9413977
01-11-2013	16.833	3.8811111	01-04-2017	14.721889	2.485278
01-12-2013	21.597473	7.9544086	01-05-2017	10.269893	-1.0516666
01-01-2014	22.00801	8.6495695	01-06-2017	7.6222224	-2.0881112
01-02-2014	19.404345	7.1928573	01-07-2017	7.351129	-2.6338172
01-03-2014	17.932043	5.87129	01-08-2017	6.6662903	-3.2021506
01-04-2014	15.185223	2.1561666	01-09-2017	10.979222	-2.0398889
01-05-2014	10.798388	0.2646774	01-10-2017	11.546667	0.13150537
01-06-2014	7.642389	-1.8726667	01-11-2017	14.671833	2.8636112
01-07-2014	7.234785	-2.3490322	01-12-2017	19.553226	7.2156453
01-08-2014	10.670914	-0.8614516	01-01-2018	21.74715	9.106505
01-09-2014	10.013166	-0.94155556	01-02-2018	23.198809	9.619822
01-10-2014	14.212581	0.91290325	01-03-2018	18.839193	6.077097
01-11-2014	15.1964445	2.9570556	01-04-2018	16.308445	3.1943889
01-12-2014	18.301882	6.29086	01-05-2018	11.610806	0.3397312
01-01-2015	23.095915	8.311452	01-06-2018	6.8982224	-2.932
01-02-2015	22.456072	8.568988	01-07-2018	6.612634	-2.88957
01-03-2015	22.193172	8.134032	01-08-2018	8.629409	-2.7309678
01-04-2015	18.220333	3.7626112	01-09-2018	11.551167	-0.3716667
01-05-2015	12.280753	-0.04591398	01-10-2018	12.082957	0.37064517
01-06-2015	8.663111	-1.4593333	01-11-2018	15.660167	4.080278
01-07-2015	6.737419	-1.8830645	01-12-2018	18.807365	6.620054
01-08-2015	8.122688	-1.2755376	01-01-2019	20.97984	8.271022
01-09-2015	10.105667	-1.5081111	01-02-2019	22.849583	9.671667
01-10-2015	11.219731	-0.24951613	01-03-2019	19.47801	6.2233872
01-11-2015	14.333889	2.8772779	01-04-2019	18.589611	3.7922778
01-12-2015	19.10027	6.583656	01-05-2019	11.938548	0.30365592
01-01-2016	21.53871	9.200591	01-06-2019	7.017389	-1.9361666
01-02-2016	22.421839	9.033851	01-07-2019	6.9087095	-2.4025807
01-03-2016	22.51258	7.9662366	01-08-2019	9.006344	-2.292258
01-04-2016	12.832222	2.3363888	01-09-2019	10.865167	-2.2036667
01-05-2016	12.13957	1.6216667	01-10-2019	12.008871	0.01887097
01-06-2016	9.666778	-1.702	01-11-2019	17.6815	4.4934444
01-07-2016	7.879946	-1.3265592	01-12-2019	20.127205	7.015914
01-08-2016	9.669517	-0.92037636			
01-09-2016	13.804778	-0.42694443			

Anexo III. Tabla 4. Nivel espejo Laguna de la Laja. Periodo 1942-2019. Datos DGA y ENDESA.

Año	Cota (m s.n.m)	Año	Cota (m s.n.m)	Año	Cota (m s.n.m)
1942	1365.00	1969	1327.20	1995	1345.77
1943	1364.12	1970	1321.99	1996	1343.22
1944	1362.74	1971	1319.55	1997	1324.82
1945	1363.49	1972	1322.01	1998	1322.09
1946	1365.43	1973	1337.28	1999	1311.58
1947	1363.07	1974	1342.99	2000	1312.40
1948	1361.25	1975	1337.75	2000	1318.00
1949	1362.39	1976	1336.53	2001	1337.00
1950	1364.48	1977	1329.80	2002	1341.00
1951	1364.64	1978	1328.60	2003	1346.00
1952	1364.79	1979	1336.83	2004	1336.00
1953	1362.25	1980	1339.90	2005	1334.00
1954	1363.73	1981	1350.34	2006	1343.00
1955	1364.42	1982	1352.58	2007	1334.00
1956	1363.27	1983	1354.30	2008	1332.00
1957	1363.70	1984	1355.62	2009	1337.00
1958	1363.21	1985	1347.92	2010	1338.00
1959	1365.00	1986	1344.31	2011	1325.00
1960	1367.16	1987	1342.88	2012	1325.00
1961	1364.20	1988	1340.93	2013	1315.00
1962	1362.28	1989	1332.23	2014	1318.00
1963	1356.72	1990	1320.43	2015	1324.00
1964	1349.66	1991	1319.82	2016	1325.00
1965	1347.13	1992	1327.16	2017	1317.00
1966	1349.96	1993	1334.59	2018	1322.00
1967	1349.72	1994	1345.07	2019	1320.00
1968	1342.06				