



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**GEOLOGÍA**

**Hidrogeología y Balance Hídrico de la Cuenca Lacustre de  
Laguna Rayenantú, Ubicada en Comuna de Santa Juana,  
Región del Biobío**

**Memoria para optar al Título de Geólogo**

**Vicente Joaquín Vega Alvarez**

**Profesora Guía:** MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez

**Profesores Comisión:** MSc. Abraham Elías González Martínez

Dr. Juan Ricardo Figueroa Jara

**Concepción, 2024**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a la profesora Liubow González, por la oportunidad de trabajar con ella y todo el apoyo entregado, junto al Departamento de Ciencias de la Tierra por ayudar en el financiamiento de este trabajo.

También quisiera agradecer a todo el personal del Departamento Ciencias de la Tierra, quienes me ayudaron en este proceso, mostrando su preocupación y brindando palabras de apoyo, Don Luis Vásquez quien siempre tuvo sus puertas abiertas a todas las consultas que podía tener siempre con una buena disposición y paciencia, a Don Pedro Bravo, quien me apoyo en primera salida a terreno dándome tranquilidad y buena compañía, además de su preocupación y disponibilidad para ayudar y a María Esperanza Aravena, quien siempre se mostró dispuesta y paciente a responder todas las consultas y tramites que se presentaron en este trabajo.

Agradecer a todos mis amigos, tanto los que han estado siempre ahí como los que he ido acumulando a través de los años de carrera, quienes siempre me han extendido una mano a ayudarme, sobre todo a despejarme en los momentos de mayor dificultad, sin juzgar ni criticar, sólo mostrando que estando ahí, son compañía suficiente.

Y, por último y los más importante, agradecer a mi familia todo su apoyo incondicional, amor y valores entregados. A mi padre, Francisco Vega, quien ha sido mi mayor referente para seguir y que siempre me ha mostrado su apoyo con todas mis decisiones a largo de este camino y quien me ha enseñado que la perseverancia y ser un buen ser humano son aptitudes para llegar a ser una persona integra y respetada. A mi madre, Yasna Alvarez, quien sin importar las dificultades que nos ha tocado vivir que, y a pesar de todas las dificultades que nos puede mostrar la vida, siempre me ha amado y me ha regalado la sonrisa y el abrazo necesario, para sobrellavar los momentos complejos. Y a mi hermano, Matías Vega, quien siempre ha sido y será el mayor obsequio que me ha dado la vida y por quien siempre intento dar lo mejor de mí y ser la mejor versión de mí mismo. A todos siempre los llevo en corazón. *Grazie mille...*

# Índice

## RESUMEN

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Generalidades .....	1
1.2	Problema e Hipótesis .....	1
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Objetivo General.....	2
1.3.2	Objetivos Específicos .....	2
1.4	Ubicación y Accesos .....	2
1.5	Clima .....	3
2.	MARCO GEOLÓGICO .....	4
2.1	Geomorfología Regional .....	4
2.2	Geomorfología Local.....	6
2.3	Geología Local .....	7
3	ANTECEDENTES .....	18
3.1	Cambio Climático.....	18
3.2	Eutrofización de Sistemas Lacustres .....	19
3.3	Cuenca y Redes de Drenaje .....	20
3.3	Unidades Hidrogeológicas.....	21

3.4 Series de Suelo .....	23
3.5 Usos de Suelo .....	26
3.6 Grupos Hidrológicos .....	30
4. METODOLOGÍA Y MATERIALES .....	32
4.1 Precipitaciones y Temperatura .....	33
4.2 Balance Hídrico .....	33
4.2.1 Método Número de Curva .....	33
4.2.2 Método Easy-Balance.....	36
4.3 Nivel Piezométrico .....	38
4.4 Parámetros Fisicoquímicos.....	38
5. RESULTADOS .....	40
5.1 Precipitaciones y Temperaturas.....	40
5.2 Balance Hídrico .....	43
5.2.1 Evapotranspiración Real (ETR) .....	44
5.2.2 Recarga .....	45
5.2.3 Escorrentía Superficial .....	45
5.3 Modelo Conceptual .....	47
5.4 Parámetros Fisicoquímicos.....	48
6. DISCUSIÓN.....	49

7. CONCLUSIÓN .....	52
REFERENCIAS .....	53
ANEXOS .....	1

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Mapa de Ubicación y Accesos.....	3
<b>Figura 2:</b> Mapa de geomorfología regional del Biobío.....	4
<b>Figura 3:</b> Mapa de Geomorfología Local.....	6
<b>Figura 4:</b> Mapa geológico sector de Santa Juana.....	8
<b>Figura 5:</b> Mapa de Ubicación de Columnas.....	9
<b>Figura 6:</b> Columna Estratigráfica del sector By Pass Santa Juana.....	12
<b>Figura 7:</b> Columna Estratigráfica Sector Parque Central Parte A.....	16
<b>Figura 8:</b> Columna Estratigráfica Sector Parque Central Parte B.....	17
<b>Figura 9:</b> Modelo conceptual del proceso de eutrofización..	19
<b>Figura 10:</b> Mapa Cuenca del río Biobío, Subcuenca del Río Biobío bajo y Red Hídrica.....	20
<b>Figura 11:</b> Mapa de Mini Cuenca Lacustre de Laguna Rayenantú y Red Hídrica Urbana.....	21
<b>Figura 12:</b> Clasificación de Unidades Hidrogeológicas.....	22
<b>Figura 13:</b> Mapa de Distribución de Unidades Hidrogeológicas.....	23
<b>Figura 14:</b> Mapa Distribución de las Series de Suelo del Área de Estudio.....	25
<b>Figura 15:</b> Calculadora de características hidráulicas.....	26
<b>Figura 16:</b> Mapa Distribución de los Usos de Suelo del Área entre 1989-2004.....	27
<b>Figura 17:</b> Mapa Distribución de los Usos de Suelo del Área de Estudio entre 2005-2019.....	28
<b>Figura 18:</b> Triangulo de Clasificación de Grupos Hidrológicos.....	30

<b>Figura 19:</b> Mapa de Ubicación Puntos en Terreno.....	32
<b>Figura 20:</b> Variables que Intervienen en el Método de Abstracción de la SCS .....	35
<b>Figura 21:</b> Ejemplo Ingreso de Datos de Características de Suelo .....	37
<b>Figura 22:</b> Ejemplo Datos de la Planilla Excel EASY-BALANCE.....	37
<b>Gráfico 1:</b> Contraste de Precipitaciones Anuales entre Períodos. P1 (1989-2004) y P2 (2005-2019).....	40
<b>Gráfico 2:</b> Contraste Promedio Mensual de Precipitaciones entre Periodos. ....	41
<b>Gráfico 3:</b> Contraste entre Precipitaciones y Temperaturas Anual. ....	42
<b>Gráfico 4:</b> Contraste de Temperaturas Anuales entre Períodos. P1 (1989-2004) y P2 (2005-2019).....	42
<b>Figura 23:</b> Modelo Hidrogeológico Conceptual. ....	47

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Series de Suelo y su Representatividad en el Área de Estudio .....	25
<b>Tabla 2:</b> Usos de Suelo del Área de Estudio y su Representatividad .....	29
<b>Tabla 3:</b> Ejemplo de Cálculo de Número de Curva Ponderado. ....	36
<b>Tabla 4:</b> Valores de Retención Máxima por Serie de Suelo para P1.....	43
<b>Tabla 5:</b> Valores de Retención Máxima por Serie de Suelo para P2.....	43
<b>Tabla 6:</b> Valores de ETR para cada Serie P1 (1989-2004).....	44
<b>Tabla 7:</b> Valores de ETR para cada Serie P2 (2005-2019).....	44
<b>Tabla 8:</b> Valores de Recarga para cada Serie P1 (1989-2004).....	45
<b>Tabla 9:</b> Valores de Recarga para cada Serie P2 (2004-2019).....	45
<b>Tabla 10:</b> Valores de Escorrentía Superficial para cada Serie P1 (1989-2004) .....	45
<b>Tabla 11:</b> Valores de Escorrentía Superficial para cada serie P2 (2004-2019).....	45
<b>Tabla 12:</b> Valores de Precipitaciones, ETR, Recarga y Escorrentía Superficial de la Mini Cuenca Lacustre de Laguna Rayenantú.....	46
<b>Tabla 11:</b> Datos Fisicoquímicos Obtenidos en Terreno. ....	48

## Índice de Anexos

<b>Anexo 1:</b> Imágenes tamizado y equipo de tamizaje.....	1
<b>Anexo 2:</b> Tablas de análisis granulométrico de muestras P12P9M1 y P13M2. ....	3
<b>Anexo 3:</b> Granulometría de las series de suelo del área de Santa Juana. ....	4
<b>Anexo 4:</b> Características Hidráulicas de las series de suelo del sector de Santa Juana. ....	5
<b>Anexo 5:</b> Imágenes de Terreno 09 de noviembre de 2023.....	6
<b>Anexo 6:</b> Tabla de puntos de terrenos realizados el día 12/09 y 09/11 del 2023.....	6
<b>Anexo 7:</b> Tabla de datos de precipitaciones y temperaturas máxima mensuales. ....	7
<b>Anexo 8:</b> Numero de Curvas para los usos de suelo con respecto a los grupos hidrológicos. ....	10

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en el sector de la Laguna Rayenantú, ubicada en la comuna de Santa Juana, región del Biobío, Chile, específicamente en la cuenca del Río Biobío y que presenta serios problemas de eutrofización. Este trabajo se ejecuta en el marco de los requisitos para obtener el título de Geólogo de la Universidad de Concepción.

Su objeto fue realizar un modelo hidrogeológico de la cuenca lacustre de Laguna Rayenantú, para ello se realizaron 2 salidas a terreno, donde se visitaron un total de 14 puntos en la zona. Con ello, se realizaron mediciones de nivel freático y parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas, además se recogió antecedentes disponibles tanto en servicios públicos como privados, con revisión de bibliografía y otros documentos que aportaron información de los últimos 30 años.

Con la información recopilada se procedió a realizar los cálculos de balance hídrico y elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio, con lo cual se buscó confirmar la hipótesis de trabajo planteada que dice que el cambio de uso de suelo, específicamente por urbanización, constituye un factor predominante en combinación con el cambio climático en la variación del funcionamiento y calidad de agua de la Laguna Rayenantú. Se utilizó el método de número de curva y planilla EASY BALANCE. Se consideraron 2 periodos de datos primer periodo (P1) que abarca desde los años 1989 hasta 2004 y un segundo (P2) desde 2005 hasta 2019.

Con los datos obtenidos se confeccionaron gráficos y tablas de precipitaciones, escorrentía e infiltración, que arrojaron como resultado un aumento de escorrentía superficial la cual aumento de 709,7 [mm/a] a 777,80 [mm/a] que representa un 8,21% de incremento. Con respecto a la infiltración, se detectó una disminución de 476,30 [mm/a] a 318,20 [mm/a] que equivale a un 48,27%, siendo esto concordante con la disminución de precipitaciones y aumento de temperaturas que afecta el área de estudio. Mas estas variaciones que se atribuyen a un cambio climático, no son lo único que afectaría a la laguna, ya que también se debe tener presente la expansión urbana continua que ha experimentado la zona de la comuna de Santa Juana la cual desde el año 1989 ha presentado un aumento del 85,7% de urbanización. A partir de esto, es posible concluir que el balance hídrico de la Laguna Rayenantú se ve afectado no sólo por el cambio climático, sino que también por la ocupación y acción antrópica del sector.

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Generalidades**

El planeta tierra está compuesto por un 71% de agua, lo que corresponde a 1386 millones de kilómetros cúbicos de agua distribuidos por la superficie terrestre y de la cual sólo el 2,5% corresponde a agua dulce. De este total, el 68.7% se encuentra en estado sólido (los polos y las cumbres de montañas). En estado líquido, las reservas subterráneas corresponden al segundo depósito más importante de agua dulce con un porcentaje equivalente al 30% de ese total. Las aguas superficiales (lagos, lagunas, ríos, etc.) por su parte representan un 0,3% (Fundación Aquae, 2022). Específicamente, un sistema lacustre que corresponde a depresiones de la superficie terrestre que almacenan grandes volúmenes de agua contienen el 90% de esta agua dulce disponible en superficie (ILEC, 2007) y representan un espacio único y de especial interés que describe determinados valores culturales, históricos, paisajísticos.

La presente investigación se realizó en laguna Rayenantú que corresponde a un sistema lacustre de poca profundidad, ubicada en la comuna de Santa Juana, región del Biobío, Chile, que tiene una superficie de 3.76 Ha (BCN, 2018). Esta laguna en su historia reciente ha presentado diversos problemas en su ecosistema, como lo es la eutrofización de sus aguas (Araya, F., 2019).

El presente trabajo contempla realizar una descripción de las unidades hidrogeológicas según sus características para almacenar y transmitir agua y además confeccionar el balance hídrico. Para ello se establecieron 2 periodos de tiempo P1 (1989-2004) y P2 (2005-2019) para estimar la variación de la recarga de la cuenca lacustre de la Laguna Rayenantú.

Se pretende, entonces de esta manera, identificar factores que afectan al ciclo hídrico de la Laguna Rayenantu.

## **1.2 Problema e Hipótesis**

El balance hídrico de la laguna Rayenantú, ha sido afectado en los últimos 30 años. Lo cual se evidencia en la eutrofización de esta, provocando un aumento significativo en la cubierta vegetal

en la laguna, lo que a su vez a afectado su ecosistema, llegando incluso a la muerte de gran parte la fauna lacustre.

Se postula, el cambio de uso de suelo, específicamente por urbanización, constituye un factor predominante en combinación con el cambio climático en la variación del funcionamiento y calidad la Laguna Rayenantú.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Realizar modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca lacustre de Laguna Rayenantú.

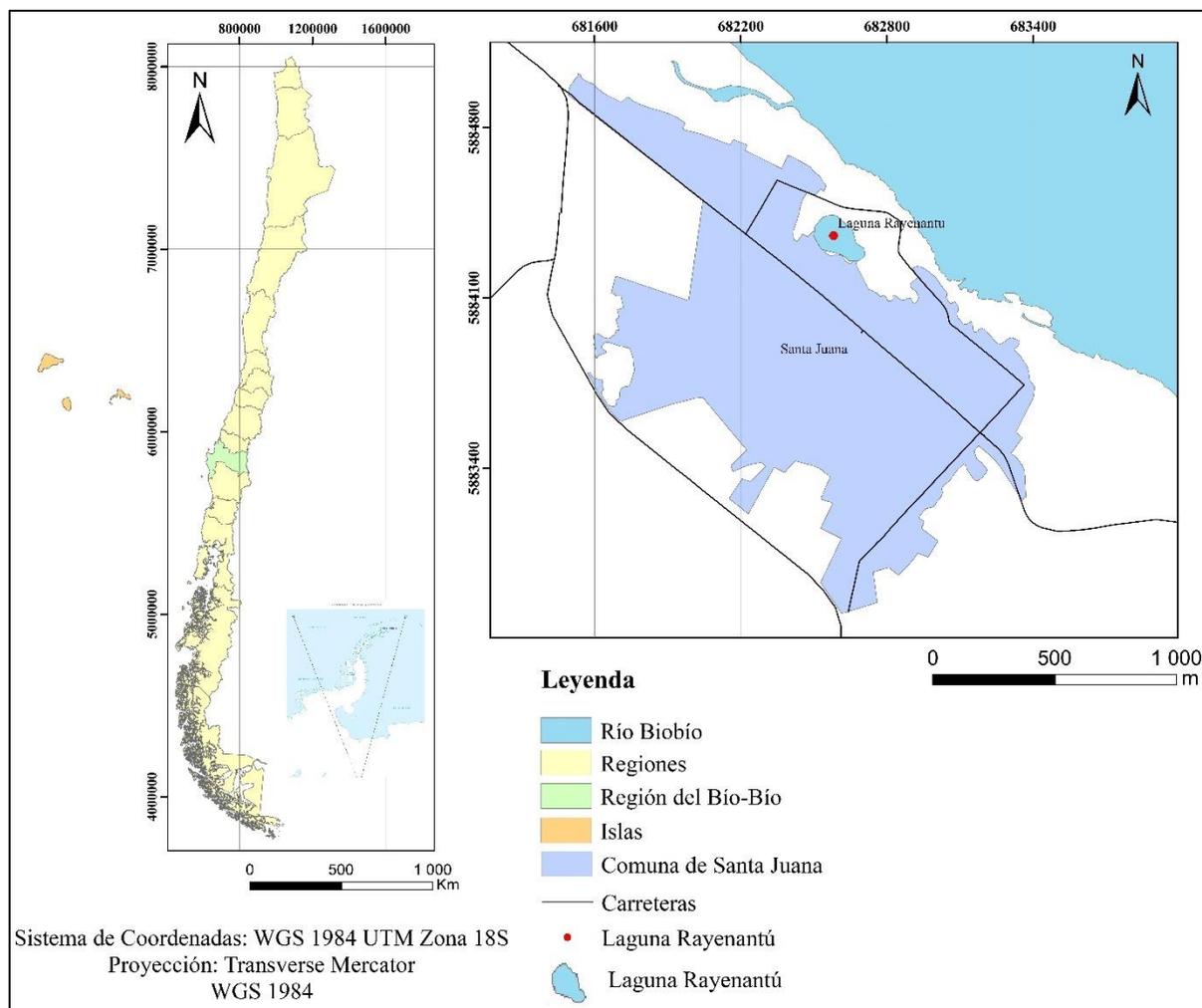
#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar caracterización de las unidades hidrogeológicas de la cuenca lacustre de Laguna Rayenantú.
- Calcular balance hídrico para estimar la recarga de la Laguna Rayenantú.
- Analizar los efectos de los cambios climáticos y de uso de suelo sobre la hidrogeología de laguna Rayenantú.

### **1.4 Ubicación y Accesos**

La zona de estudio corresponde al sector laguna Rayenantú, ubicada en la localidad de Santa Juana, región del Biobío, Chile; se encuentra emplazada entre las coordenadas UTM 681138-684027 E y 5885150-5882674 N. Esta comuna se ubica a 52,8 km al sureste de la ciudad de Concepción, conectada por la ruta de la madera, limitando hacia el norte con el río Biobío, principal afluente de la zona de estudio, abarcando un total de 555,76 hectáreas. (Figura 1).

De acuerdo con los catálogos de cuencas y subcuencas del año del 2022 de la Dirección General de Aguas (DGA), la zona de estudio se encuentra emplazada en la cuenca hidrográficas del río Biobío en el sector de la subcuena del río Biobío bajo.



**Figura 1:** Mapa de Ubicación y Accesos. Elaboración propia.

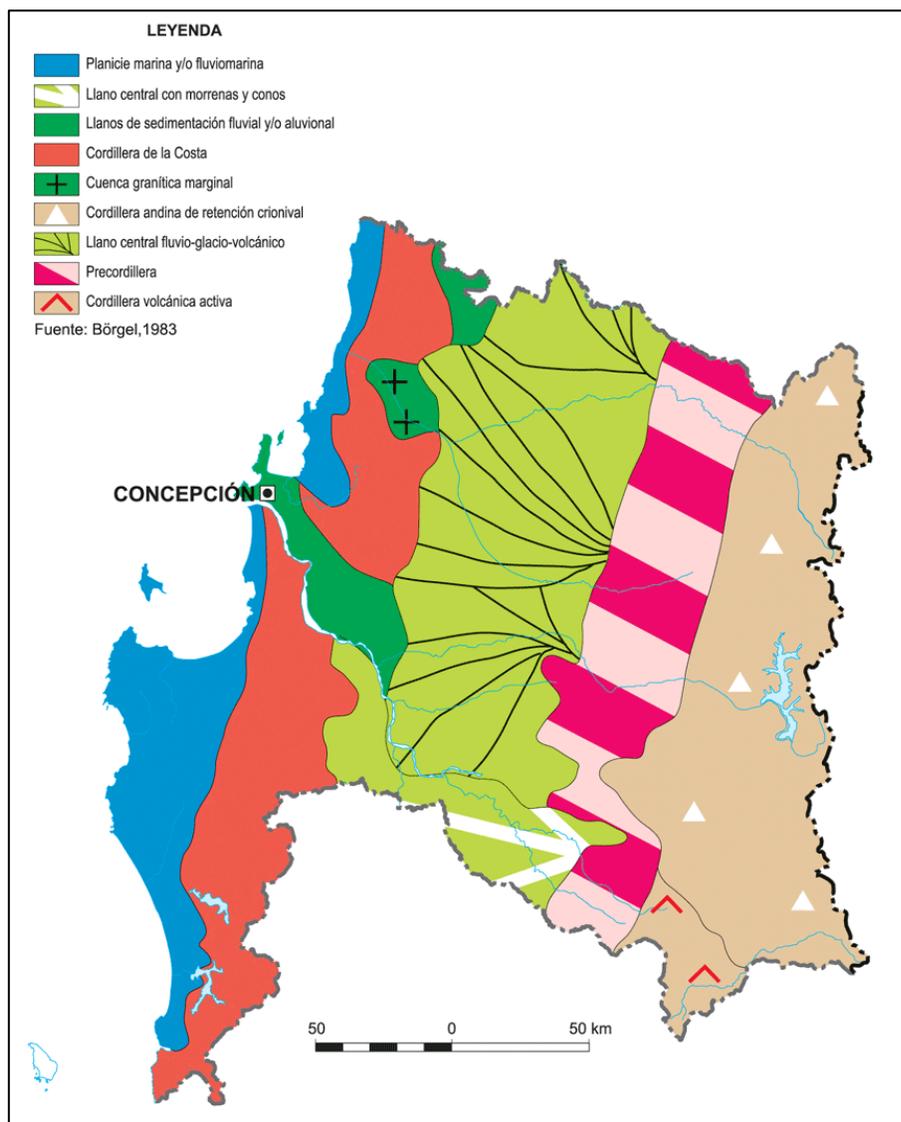
## 1.5 Clima

La comuna de Santa Juana, según la clasificación de Köppen modificada, está bajo el predominio de dos tipos de clima. El primero correspondiente a un clima templado cálido con lluvias invernales hacia el este y el segundo hacia el sector oeste, corresponde a un clima templado lluvioso con influencia mediterránea (CIREN, 2021) con precipitaciones anuales promedio de 1479 [mm/a] y temperaturas promedio anuales de 17,4°C en el año 2019.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 Geomorfología Regional

En la región del Biobío hacia su sector oeste se pueden identificar las morfologías típicas de Chile correspondientes a la Cordillera Andina, Precordillera y la Depresión Central (Figura 2). A su vez en el sector este se pueden encontrar la Cordillera de la Costa y la Planicie Litoral. (Börguel, 1983 en Figueroa, 2020).



**Figura 2:** Mapa de geomorfología regional del Biobío; extraído del instituto Geográfico Militar, Modificado de Börguel, 1983.

- Cordillera Andina:

Se despliega como cordones montañosos de 2000 m s.n.m. en promedio y sus cimas más elevadas superan los 2500 m s.n.m. perdiendo altura hacia el sur (puntos que se identifican como cimas de volcanes). Diversos cursos de agua la cortan constituyendo una gran cantidad de valles.

- Precordillera:

Es la unión de la Cordillera de los Andes y la Depresión Intermedia. Sus alturas pueden variar entre los 400 y los 600 m s.n.m. perdiendo altura hacia el sur.

- Depresión Intermedia:

Se caracteriza por tener una topografía uniforme que se extiende desde los pies de la precordillera hasta la Cordillera de la Costa con una altitud media de unos 150 m s.n.m.

- Cordillera de la Costa:

En la zona de la región del Biobío se pueden encontrar dos sectores cordilleranos, uno al norte y otro al sur del río Biobío. El sector norte se observan alturas de 400 m s.n.m., mientras que en el sector sur se encuentran mayores alturas alrededor de los 1500 m s.n.m. esta zona es denominada Cordillera de Nahuelbuta y está compuesta por un macizo rocoso. Esta diferencia de altura representa una variación climatológica entre el sector oriente y occidente de este macizo rocoso.

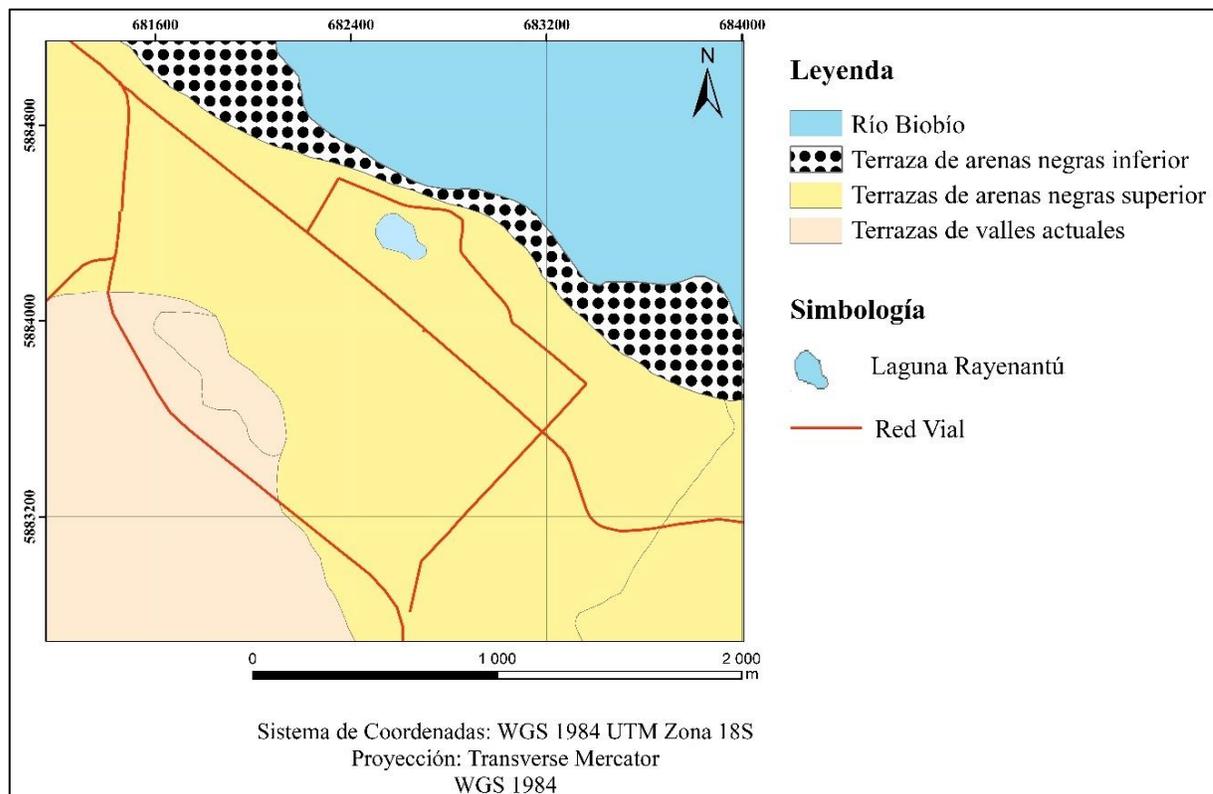
- Planicie Litoral:

El norte de la región tiene formas de acantilados alternando con algunas playas, hacia el sur del río Biobío y adquiere un amplio desarrollo en forma de terrazas marinas, las cuales, en la desembocadura de este, constituyen una llanura de inundación.

La zona de estudio se encuentra en la zona geomorfológica de la Cordillera de Costa, según lo establecido por Börgel 1983.

## 2.2 Geomorfología Local

La zona de estudio se encuentra ubicada en un conjunto de terrazas fluviales dentro de la Cordillera de la Costa (Figura 3), las cuales se pueden dividir en terrazas fluviales de arena negras inferior, superior y terrazas de valles actuales; formados por la erosión, transporte y depositación de los sedimentos provenientes del sector andino y que se diferencian por sus características sedimentológicas, su extensión y su altitud. (Peña, F., 1995).



**Figura 3:** Mapa de Geomorfología Local, Elaboración propia.

### 2.3 Geología Local

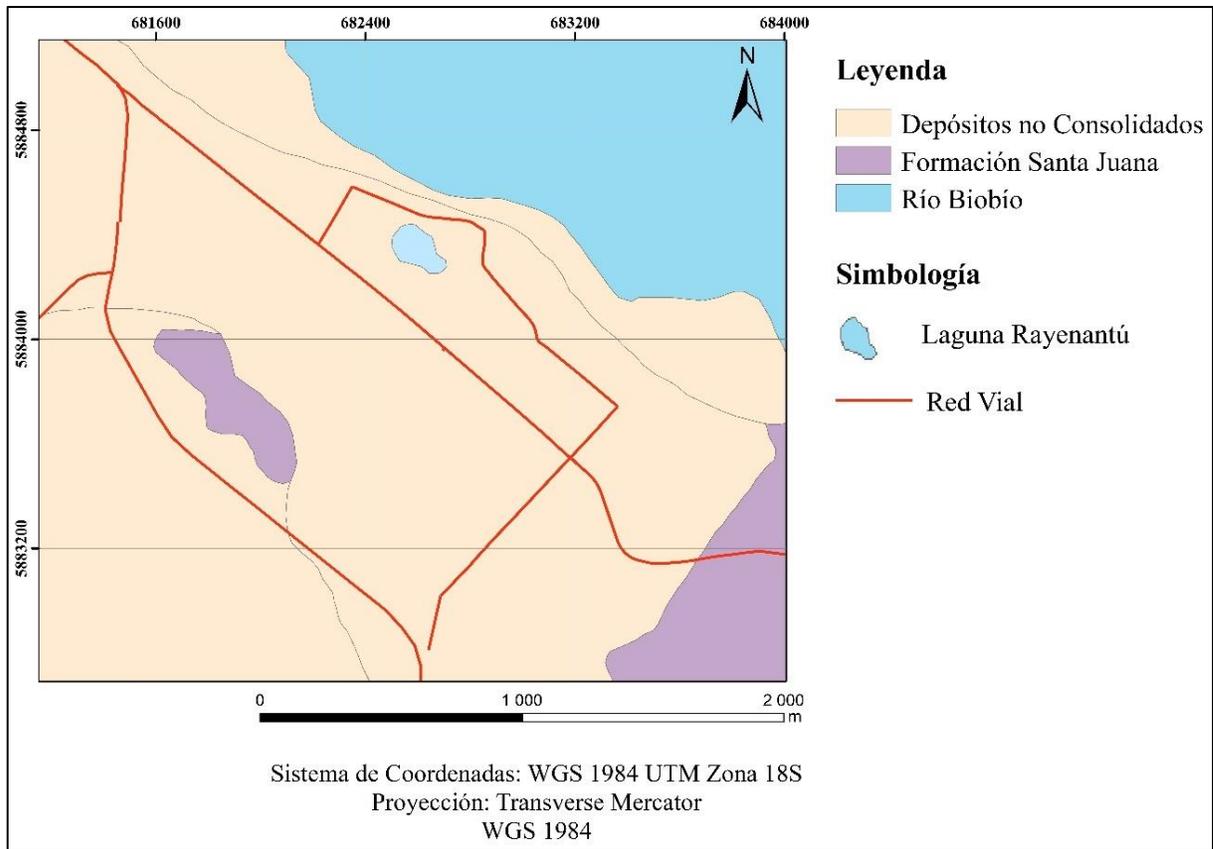
El sector se encuentra emplazado, según la carta geológica de Santa Juana en la formación Santa Juana.

Formación Santa Juana (Triásico superior): Corresponde a aquellas sedimentitas fosilíferas triásicas, ubicadas en el curso inferior del río Biobío, la cual en una primera descripción fue dividida en 3 secciones según su contenido fosilífero por Tavera (1960). Para luego ser subdivididas por Cucurella (1978) en cuatro miembros de un sistema triásico:

- Miembro 1: correspondiente a un ambiente continental, constituido por ruditas y arcosas.
- Miembro 2: Ambiente continental, integrado por arenitas y lutitas.
- Miembro 3: Ambiente marino conformado por ruditas, arenitas y lutitas.
- Miembro 4: Ambiente de transición integrado, por arenitas, lutitas y ruditas.

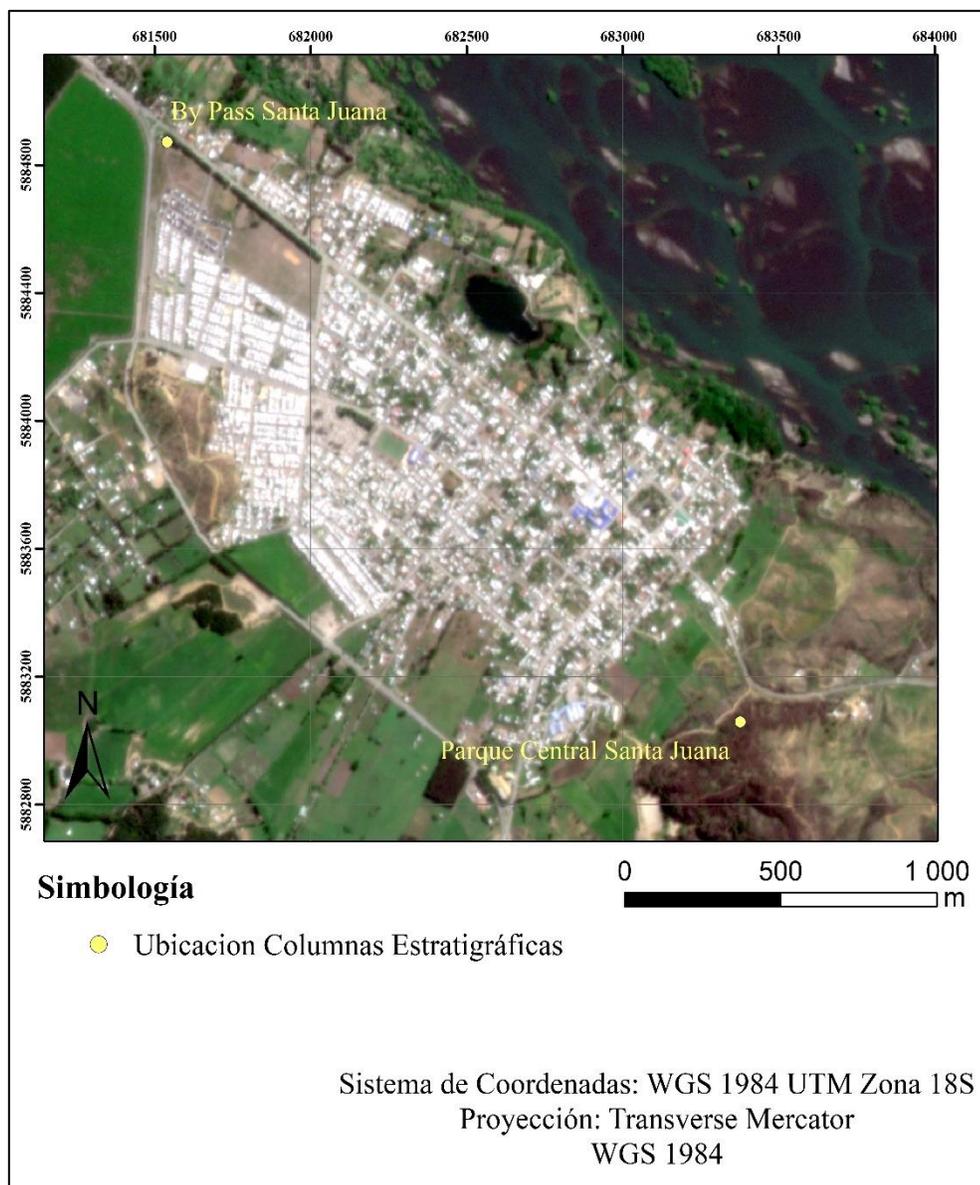
La zona de estudio se encuentra en el miembro 3, que se describe como terrazas de arenas negras superiores y que a su vez se superponen a terrazas de arenas negras inferiores, que cubren a una secuencia arenítico limosa de la secuencia triásica de Santa Juana, con presencia principalmente de areniscas arcosas medias y finas con intercalaciones de lutitas fosilíferas del sector sur sudeste de Santa Juana (Figura 4) (Lepez L. 2002).

Depósitos No Consolidados (Holoceno): Se localizan fundamentalmente en el fondo del valle del río Biobío, se pueden dividir en dos niveles, uno superior y otro inferior los cuales presentan una composición similar, el nivel superior tiene mayor desarrollo, ubicado a unos 50 m s.n.m. y corresponde a arenas negras de tipo laja (Lepez, L., 2002). Sedimentológicamente de grano medio y grueso, de composición basáltico de tipo piroclastos.



**Figura 4:** Mapa geológico sector de Santa Juana, Elaboración propia

A la vez en el sector, se identificaron 2 columnas (Figura 5) que representan estas secuencias (Cari *et al.* 2004):



**Figura 5:** Mapa de Ubicación de Columnas, Elaboración propia

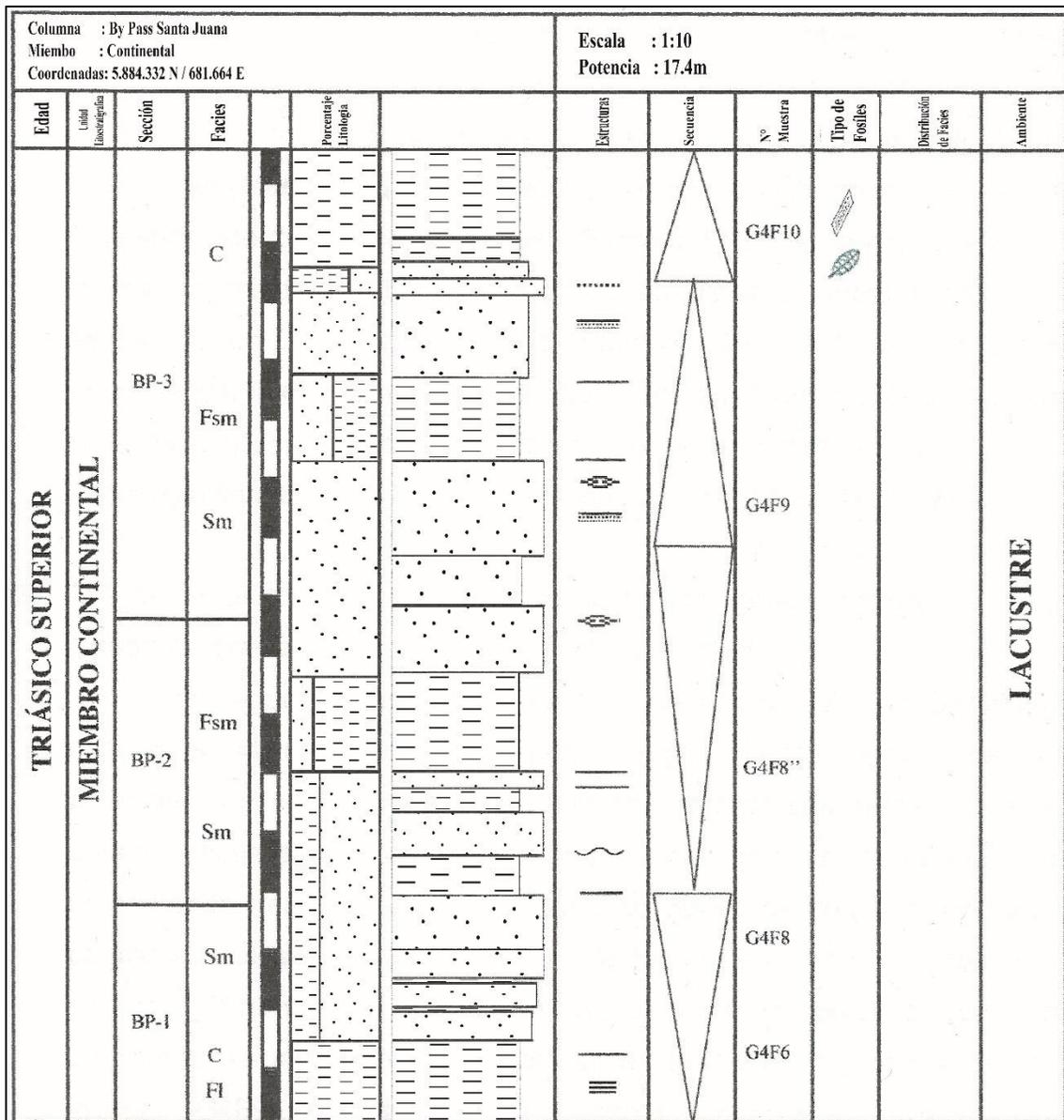
- 1) Columna By pass Santa Juana: Ubicada en las coordenadas UTM 18H 5884332 N/681664E, a la cota 25 m s.n.m., presenta una potencia de 17,4 m y está constituida de intercalaciones entre areniscas medias a finas y lutitas grises oscuras con o sin laminación

en contactos netos y actitud estratigráfica N85°W/17SW. Dividida en 3 secciones: BP-1; BP-2; BP-3, que dan cuenta de una relación que establece este sector como un paleoambiente asociado a un sistema lacustre (Figura 6) (Cari *et al.* 2004).

- BP-1: 3,7 m de potencia de una secuencia grano-creciente constituida de lutitas, areniscas con intercalaciones de ambas litologías (Figura 6). Las lutitas grises oscuras poseen laminación plano-paralela. Sobre ellas, areniscas medias a finas matrices soportadas, pardas amarillentas a grises oscuras con color de alteración rojizo, de mala selección, anguloso a sub-anguloso y esfericidad, de diámetro modal 0,1 mm. Esporádicamente se reconoce la presencia de materia orgánica, intercalada con lutitas grises oscuras de potencia no superior a 10 cm. Sobre la intercalación anterior se encuentra un estrato de 40 cm de espesor de arenisca fina matriz soportada de color pardo amarillento, limitada por 10 cm de lutita gris oscura. Ambos contactos son de tipo plano paralelo. Sobre la lutita se observa arenisca media matriz soportada de baja esfericidad, angulosa a sub-angulosa, de mala selección, con presencia de materia orgánica cuya característica distintiva es la gradación lateral en el color de alteración, posiblemente debido al aumento de feldespato (composición arcósica) y clastos de cuarzo de hasta 0,9 cm. Ésta secuencia finaliza con un estrato de arenisca gris oscura de 20 cm.
- BP-2: 2,5 m de potencia de una secuencia rítmica de lutitas grises oscuras y areniscas grises de grano medio a gruesa clasto soportado (Figura 6). Esta secuencia inicia con un estrato de 1 m de potencia de lutitas grises oscuras en contacto neto con areniscas medias, clasto soportado, de 70 cm de potencia en cuyo techo presenta contacto ondulado con lutitas de las mismas características antes descritas. Ésta secuencia que se repite en la vertical, presentando tres ciclos de las mismas relaciones de contacto, características composicionales y texturales, diferenciándose solamente por el aumento en la potencia. El tercer ciclo, a diferencia de los anteriores, presenta aumento tanto en granulometría como en potencia, hasta llegar a 1,8 m y presentar gradación inversa. La lutita no se presenta como estrato masivo, sino con pequeñas intercalaciones de arenisca media, clasto soportado, de iguales características a las anteriormente descritas en proporción 80%-20% y potencia total de 1,15 m.

- BP-3: 8 m de potencia de una secuencia areniscas medias a gruesas y lutitas con lentes de arenisca (Figura 6).

Las areniscas medias que gradan a gruesas, color gris oscuro, grano soportado, de 90 cm con lentes de lutitas de 20 cm de alto y 60 cm de largo con estructuras sinsedimentarias. Sobre ella y en contacto irregular encontramos lutitas grises oscuras de 1,7 m de potencia con lentes de arenisca media que gradan a fina y disminuyen de potencia en la vertical. En la parte superior de la secuencia antes descrita se encuentra una intercalación fina de 1,5 m compuesta por lutitas oscuras y areniscas medias a finas, cuya potencia es inferior a 5 cm en cada capa y en porcentaje de 55%-45% contenido de color pardo grisáceo oscura. Hacia el límite superior y en contacto neto con la intercalación se observa un estrato de 1,5 m de arenisca media gris muy oscura, en cuyo techo y en contacto neto, nuevamente aparece la intercalación de lutitas y areniscas medias cuya potencia es de 10 m y cada estrato crece desde 2 cm hasta 30 cm en proporción 55%-45%. En su parte superior encontramos una capa de lutitas de 40 cm de potencia que presenta registro de paleoflora indeterminada, sobre esta capa se registra una capa arcillosa de 40 cm de potencia, posiblemente asociada a una estructura. Finalmente, y con un espesor de 1,5 m estrato de lutita.



Leyenda

-  Areniscas
-  Lutita

**Figura 6:** Columna Estratigráfica del sector By Pass Santa Juana, extraído de Cari *et al* 2004.

2) Columna Parque Central Santa Juana: Ubicada en las coordenadas 5883059 N/ 683377 E en el sector homónimo que representa una secuencia alternante de lutitas, areniscas muy finas a gruesas tanto en lentes como estratos en partes fosilíferas. Con una actitud N25°-55°E/21°-40°SE y una potencia de 112.5 m. (Cari *et al.* 2004)  
Dividida en Parte A: PC-1; PC-2; PC-3; PC-4 (Figura 7) y Parte B: PC-5; PC-6; PC-7 (Figura 8):

- PC-1 Secuencia granodecreciente de areniscas grano medio y lutitas de potencia contacto neto plano paralelo 4,7 m. (Figura 7). Las areniscas clastos soportados, grano medio, color pardo amarillento, clasto soportadas, subangulares y de baja esfericidad, mala selección, clasificadas como litarenitas feldespáticas (Folk, 1968), con intercalaciones de arenisca gruesa (80%) y lutitas (20%) fosilíferas (3cm) con paleoflora mal conservada, localmente en lentes de hasta 10 cm.
- PC-2 Secuencia granodecreciente, de areniscas medias intercaladas con areniscas finas (Figura 7). Areniscas pardas, clasto soportado de grano medio a fino, buena selección, sectorialmente evidencian meteorización esferoidal, de similar composición a las anteriores, con restos vegetales mal conservados: El espesor de los estratos no sobrepasa los 20 cm., y la proporción entre éstas, varía de 50%/50% a 80%/20%, con predominancia de areniscas medias.
- PC-3 Sección granodecreciente de areniscas medias intercaladas con lutitas negras (Figura 7).  
Con el mismo tipo de arenisca, con potencias inferiores a 1m, se intercalan lutitas negras masivas, en paquetes de hasta 1.80 m., que localmente se presentan lenticulares o acuñadas y en proporciones que varían de en la base a 80%/20% 55%/45% en el techo, con dominio de areniscas.
- PC-4 Secuencia cíclica granodecreciente compuesta por areniscas gradación tanto normal inversa en contacto plano paralelo con lutitas negras sin estructuras internas (Figura 7).

Arcosas feldespáticas (70%) de grano medio a fino, color pardo amarillento, matriz soportada, selección media, de esfericidad y redondez regular, cuyos espesores varían entre 30 cm y 1,20 m. Presencia de paleofauna en lutitas (30%) de la sección media (*Estheria sp.*).

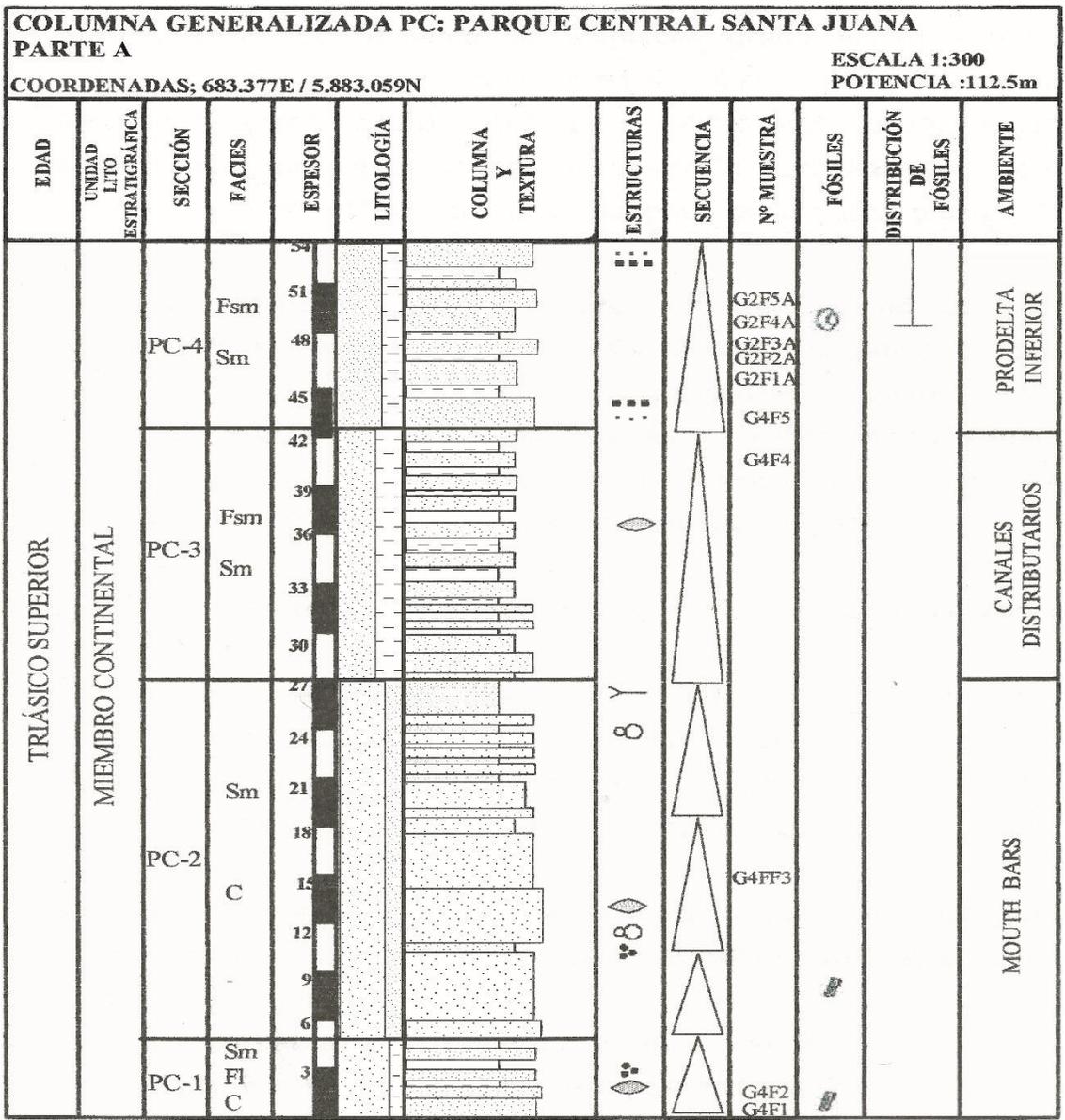
- PC-5 Secuencia cíclica granodecreciente compuesta principalmente de areniscas pardas anaranjadas medias a muy finas y lutitas grises oscuras, ambas con abundante materia orgánica en planos de laminación (Figura 8). Caracterizada por areniscas de color pardo anaranjado, clasto soportadas, buena selección, grano medio en la base y finas en el techo, que representan en total un 80% de esta sección, en paquetes de tamaño variable de 20cm a 1m, clasificadas como arcosas (Folk, 1968). Intercaladas se encuentran lutitas negras fisibles (20%), de espesor más constante entre 10 y 20cm, con restos de paleofauna, *Estheria sp.*, y paleoflora mal conservada. Principalmente asociadas a las areniscas se encuentran pequeñas intercalaciones de arcillolitas pardas, con laminación milimétrica.
- PC-6 Secuencia cíclica de areniscas grano medio y/o fino, sin estructuras internas y de contactos netos plano-parallelas e intercalaciones centimétricas de areniscas finas con lutitas negras y escasa fauna fósil (Figura 8). Esta sección tiene una potencia de 22,5m.

La sección está constituida por tres paquetes de arcosas y arcosas liticas de grano medio, pardo anaranjadas, grano soportado, buena selección, clastos subredondeados y subesféricos, cuyos espesores aproximados son 3,5m, 1m y 3,5m respectivamente, el último de ellos presenta estratos lenticulares de areniscas finas de 90 cm de longitud y 30 cm de espesor.

En contacto neto, se encuentran intercalaciones de areniscas, de iguales características a las antes descritas, en paquetes de 30cm a 70 cm y lutitas negras, fisibles (20cm a 50cm), con materia orgánica y paleoflora mal conservada en los planos de laminación. Destacable es la presencia de *Estheria sp.* en los niveles superiores de lutitas.

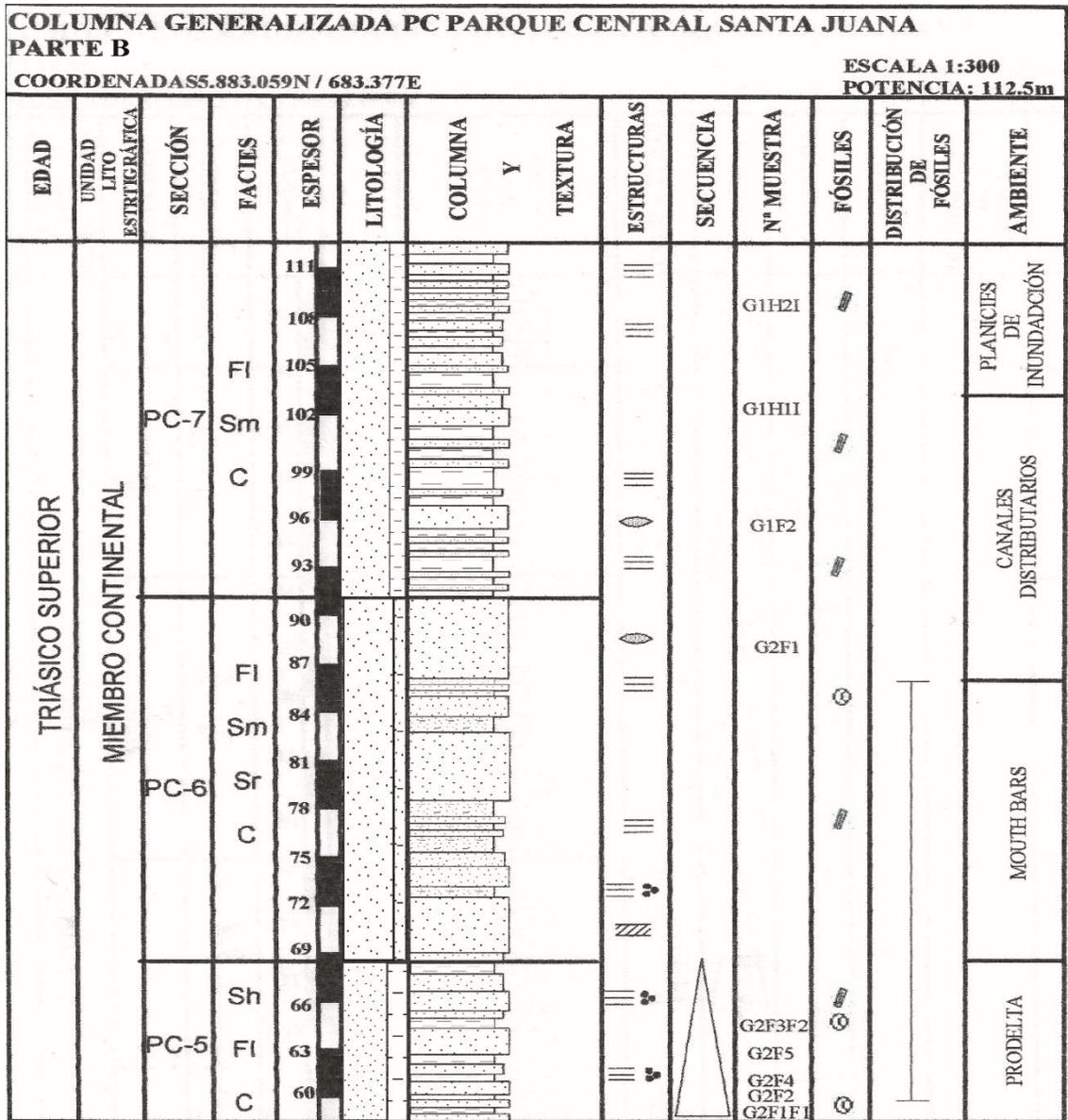
- PC-7 Secuencia cíclica de areniscas masivas de grano medio a fino y lutitas laminadas, ocasionalmente lenticulares, en contacto plano paralelo, cuya potencia es de 21 m. (Figura 8).

Arenisca pardo grisáceo y color de alteración parda amarillenta, grano soportado de selección media, esfericidad media y subangulares, las que se clasifican como Arcosas Líticas (Folk, 1968). La potencia observada va desde 25cm a 1m, en la cual y en forma aislada, se encuentra paleoflora mal conservada. Lutitas grises oscuro, muy fisible con restos flora fósil indiferenciables y espesores centimétricos (10cm a 50cm).



- Leyenda
- Areniscas
  - Lutita
  - Areniscas finas con lutitas

**Figura 7:** Columna Estratigráfica Sector Parque Central Parte A, extraído de Cari *et al* 2004.



**Figura 8:** Columna Estratigráfica Sector Parque Central Parte B, extraído de Cari *et al* 2004.

El análisis de estas columnas realizada por Cari *et al.* 2004 establecen una asociación de facies que representan un ambiente de tipo Delta.

### **3 ANTECEDENTES**

La interacción entre la geología, hidrología y topografía de un lugar y el cómo estas a su vez interactúan con las precipitaciones, el tipo y uso de suelo de una localidad, permiten determinar los potenciales impactos en los recursos hídricos.

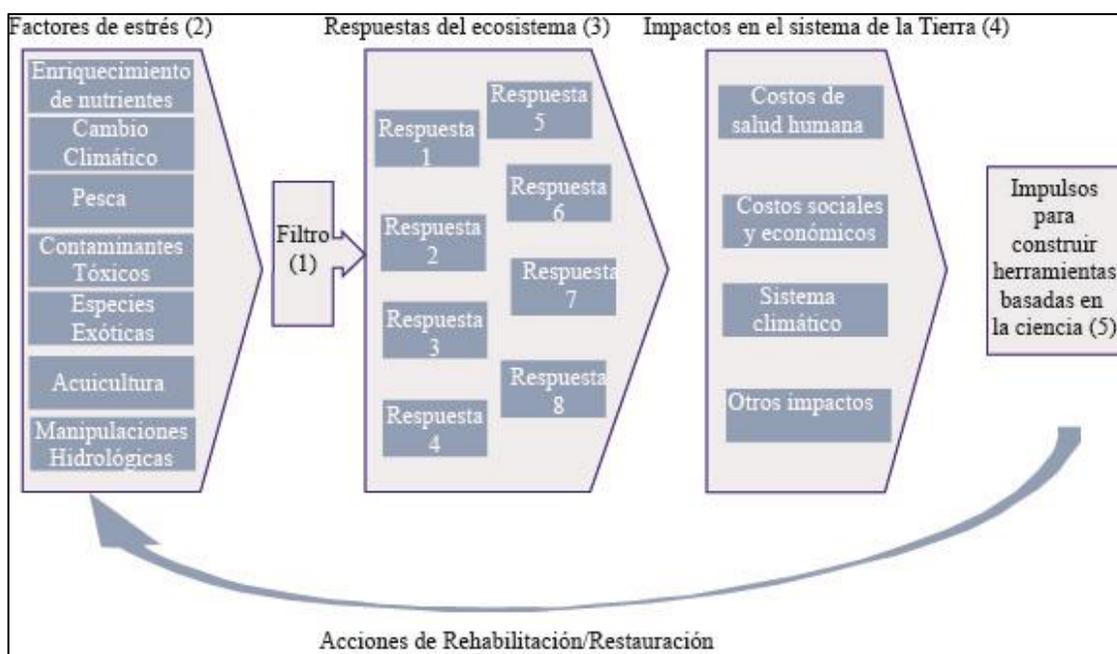
#### **3.1 Cambio Climático**

El cambio climático es uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad, con proyecciones climáticas que muestran alzas en las temperaturas y disminución de las precipitaciones del planeta. En el caso de Chile las temperaturas máximas han mostrado un aumento del orden de 0,20°C por década entre el periodo de 1981 a 2019. Las precipitaciones por su lado han presentado un déficit promedio de 34% en el año 2019, siendo el tercer año más seco después de 1998 y 2021. Más del 83% de las estaciones meteorológicas del país, reportan déficit, y 50% está dentro de los 10 años más secos (DGAC, 2023).

Adicionalmente si se incorpora lo estudiado por Garreud *et al*, 2017, se tiene que desde 2010 existe una secuencia ininterrumpida de años secos en Chile, con déficits anuales de lluvia que oscilan entre el 25% y el 45 %. Ha prevalecido en Chile central el carácter extraordinario de la llamada mega sequía de Chile central (MD). El déficit de precipitaciones disminuyó la capa de nieve andina y dio lugar a disminuciones amplificadas (hasta un 90 %) del caudal de ríos, volúmenes de reservorios y niveles de agua subterránea a lo largo del centro de Chile y la Argentina más occidental, lo cual da cuenta de que estas condiciones son parte de una falta precipitaciones que no estarían afectando solamente a la zona, si no que provienen de un cambio a nivel de Chile central.

### 3.2 Eutrofización de Sistemas Lacustres

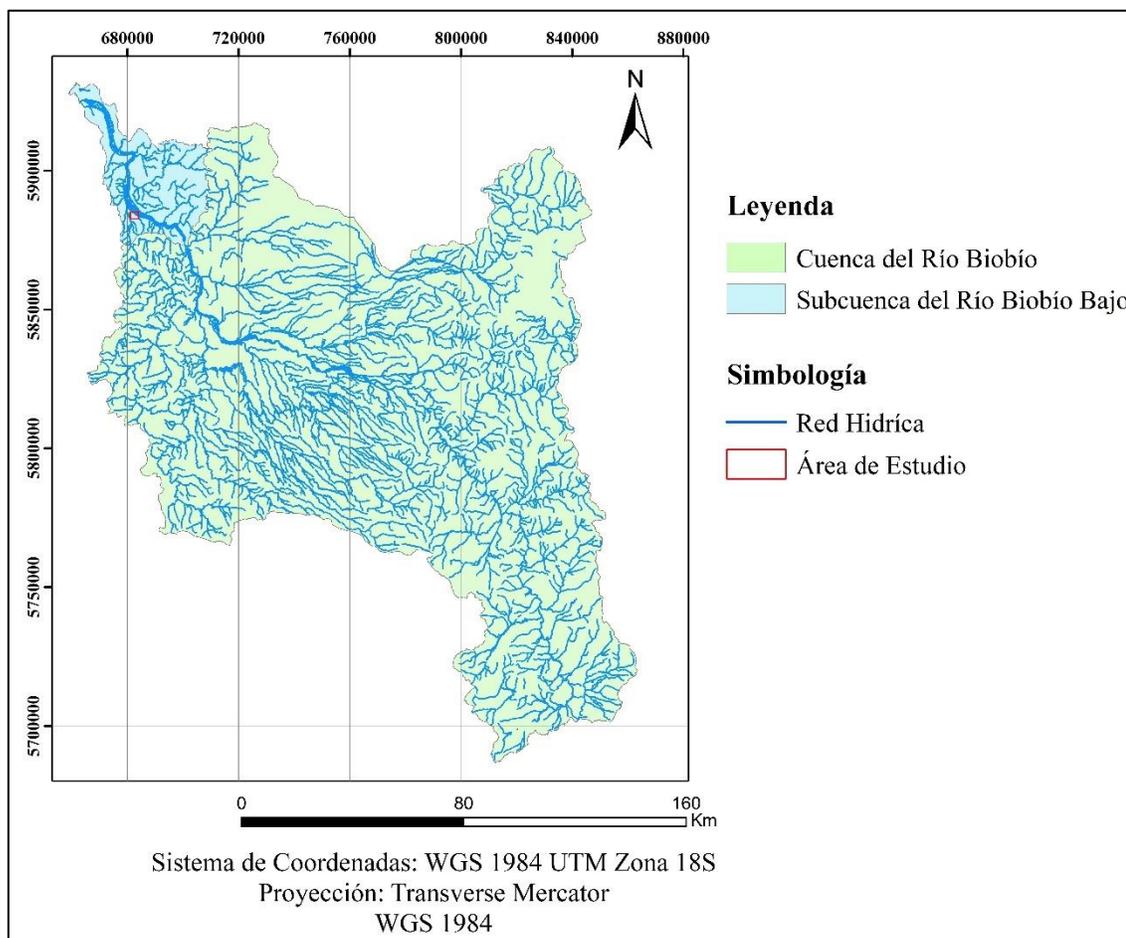
La eutrofización en sistemas acuáticos en general y en lagunas en particular, es una de las amenazas más importantes, alteran el funcionamiento natural y los servicios que los ecosistemas acuáticos proveen (Carpenter 2009). Este concepto se puede describir como el proceso en el cual las aguas de los sistemas acuáticos generan mayor acumulación de nitrógeno, fósforo, y materia orgánica. Esto se debe, según Cloern (2001), por el aumento de la carga de nutrientes en el ecosistema que produce efectos complejos en él y que, a su vez, estarían condicionados por la mismas características biológicas y físicas propias del sistema. Como se puede observar en la figura 9 donde se observa un modelo conceptual del proceso de eutrofización.



**Figura 9:** Modelo conceptual del proceso de eutrofización. Se establecen 5 etapas: (1) corresponden a los atributos del sistema que actúan como filtro ante las respuestas al aumento de nutrientes; (2) los factores estresantes que interactúan con el sistema acuático; (3) relaciones complejas entre las respuestas de los ecosistemas frente a los factores de estrés; (4) impactos que tiene los cambios de los ecosistemas frente al sistema Tierra, los cuales influyen en la sostenibilidad de la sociedad; (5) la comprensión científica para generar estrategias y planes de acción para la rehabilitación o restauración del ecosistema, modificado de Araya (2019).

### 3.3 Cuenca y Redes de Drenaje

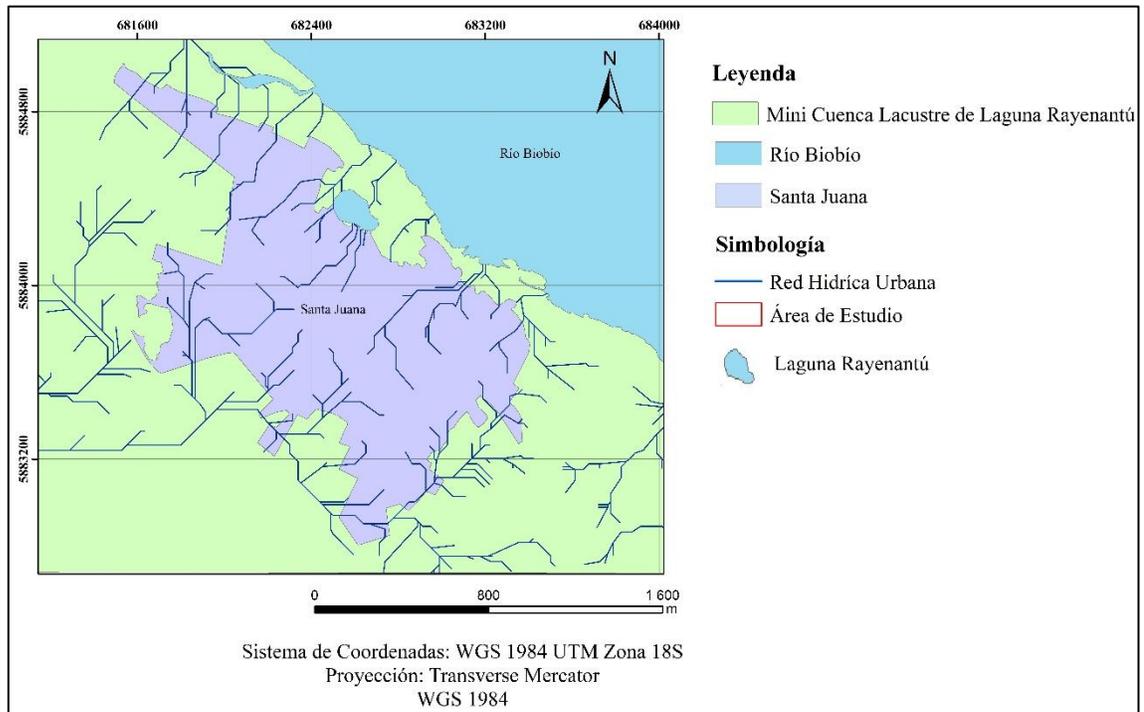
Chile se divide en cuencas, subcuencas y subsubcuencas (DGA, 2022). La comuna de Santa Juana se encuentra emplazada en cuenca del río Biobío y la subcuenca del río Biobío bajo (Figura 10), que corresponde a una cuenca exorreica, es decir, es una cuenca que sus afluentes confluyen y desembocan al mar.



**Figura 10:** Mapa Cuenca del río Biobío, Subcuenca del Río Biobío bajo y Red Hídrica. Elaboración propia

Para los cálculos de balance hídrico se consideró como zona de estudio una fracción de la subcuenca del río Biobío bajo, correspondiente a una mini cuenca lacustre de laguna Rayennatú, que contempla una superficie total de 555,76 Ha. (Figura 11).

En el caso de su red hidrográfica, el curso principal que abastece a la cuenca es el río Biobío. Para el caso específico de la comuna, unos de los principales afluentes es el río Lía con cursos de aguas menores como el río Chacay, Catirai y San Jorge (Caripán, 2003 en EQUIS CULTURA, 2023)

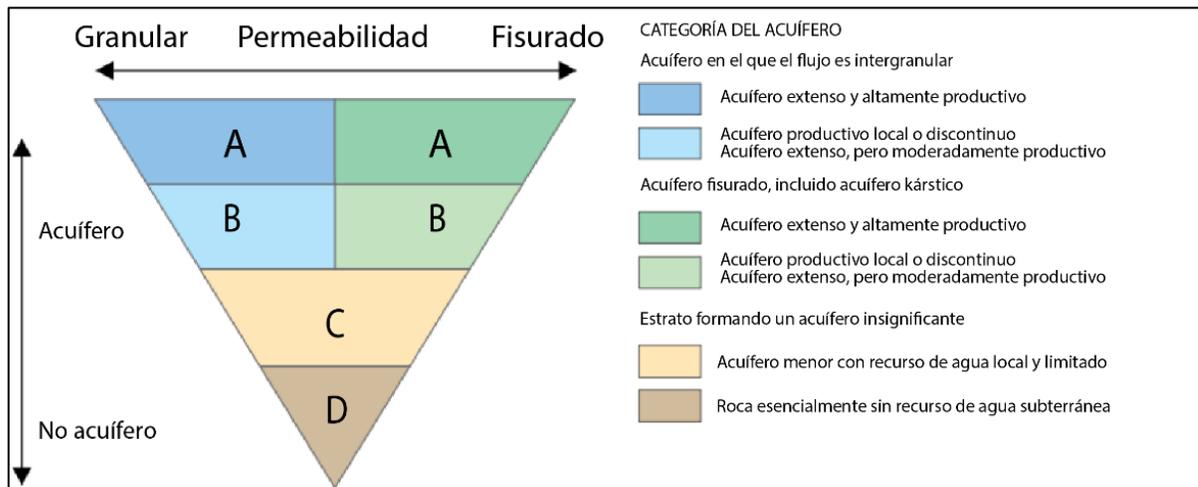


**Figura 11:** Mapa de Mini Cuenca Lacustre de Laguna Rayenantú y Red Hídrica Urbana. Elaboración propia.

### 3.3 Unidades Hidrogeológicas

Se realizó la caracterización de las unidades hidrogeológicas de la zona, utilizando la metodología de Struckmeier y Margat (1995) (Figura 12), la cual clasifica las rocas de acuerdo con el tipo de permeabilidad:

- Granular: Se puede encontrar en ambientes con sedimentos detríticos (gravas, conglomerados, arenas y areniscas), que presentan buenas condiciones de almacenamiento y transmisión de agua.
- Fisurado: Se pueden encontrar en ambientes con fisura que se localizan en las fracturas de las rocas plutónicas y metamórficas (granitoide, andesitas, basaltos, pizarras, esquistos, cuarcitas, etc.).

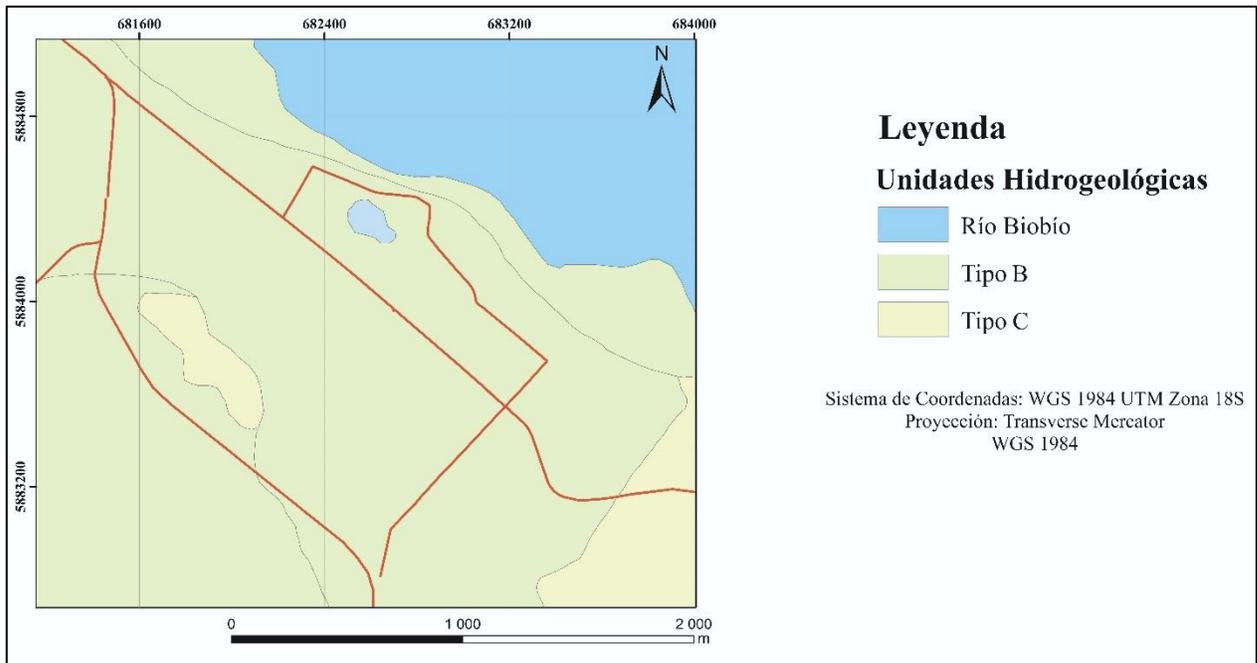


**Figura 12:** Clasificación de Unidades Hidrogeológicas, según metodología de Struckmeier y Margat, 1995.

A su vez estas unidades se dividen en 4 clases según su potencial, considerando su capacidad productiva y la extensión lateral de estas. Para efectos de este trabajo, considerando la geología de la zona, sólo se describieron 2 unidades hidrogeológicas (Figura 13).

- Unidad B: Unidad litológica de alta permeabilidad granular y capacidad de almacenar y transmitir agua por lo que presenta acuíferos de productividad local. Estas características en la zona de estudio son cumplidas por los depósitos no consolidados que están compuestos principalmente por arenas que presentan una elevada efectividad del drenaje.
- Unidad C: Unidad litológica con bajo potencial hidrogeológico, donde la capacidad de transmitir agua es baja, atribuido a rocas con baja permeabilidad. En la zona de estudio esta

descripción se puede aplicar a la formación Santa Juana, debido a la alta cantidad de lutitas en intercalación con arenas.



**Figura 13:** Mapa de Distribución de Unidades Hidrogeológicas. Elaboración propia.

### 3.4 Series de Suelo

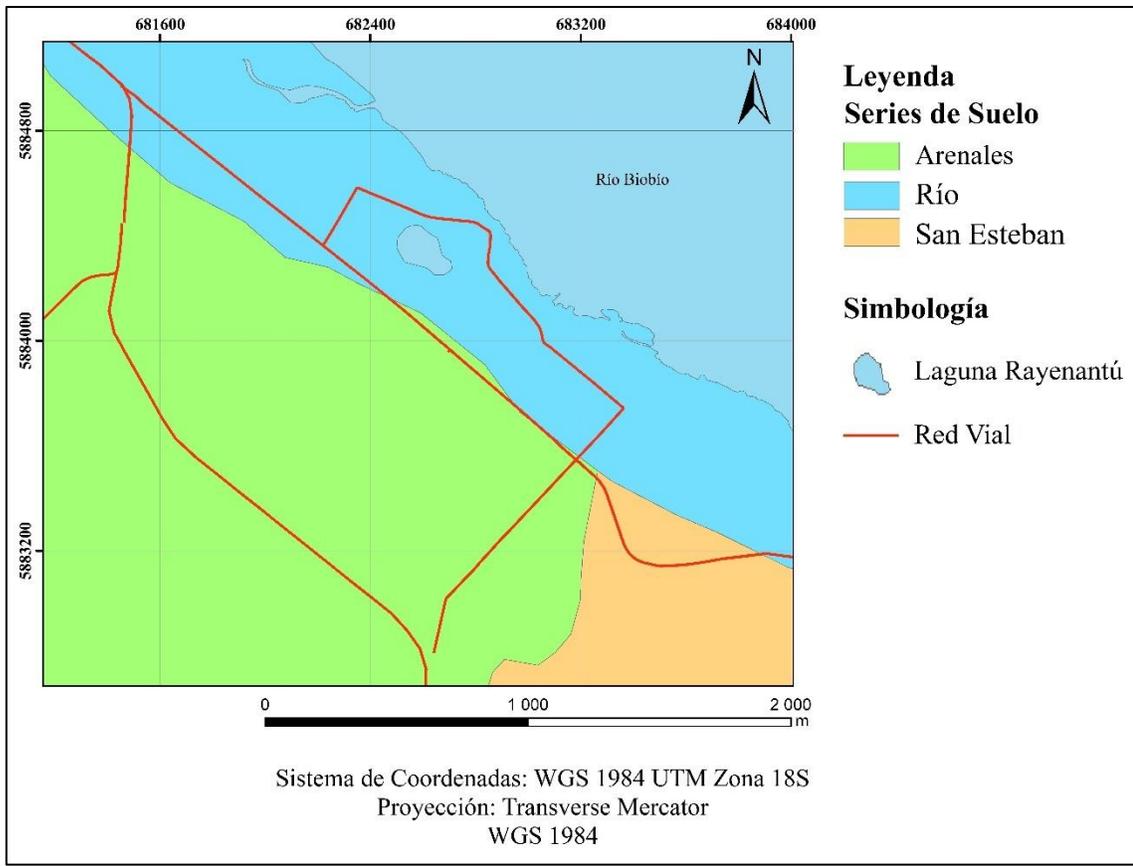
Las series de suelo corresponden a agrupaciones homogéneas que comparten las mismas características físicas, químicas y mineralógicas. Estas características se derivan de la combinación de factores que controlan el desarrollo del suelo, como el clima, la topografía, la geología y la vegetación.

En la zona de estudio se presentan 3 series de suelo (Figura 14):

- Serie Arenales: Corresponde a suelo aluvial, reciente, de escaso desarrollo, derivado de arenas volcánicas de color negro, de origen andesítico y basáltico, posee texturas

moderadamente gruesas a gruesas y ocupa una topografía plana a casi plana. El drenaje es predominantemente bueno a excesivo, siendo la permeabilidad rápida a muy rápida, presenta un escurrimiento superficial lento, alrededor de un 50% de los suelos de esta serie presentan un nivel freático temporal, desde fines de otoño hasta mediados de primavera. (CIREN, 1999). En el área de estudio esta representa un 59,80% del total.

- Serie Río: No se tiene suficiente información por medio de bibliografía de esta serie de suelo. Sin embargo, en el terreno realizado el día 09 de noviembre del 2023 se logró tomar muestras de sedimentos (P12; P9M1 y P13M2) las cuales fueron llevadas al laboratorio de sedimentología del DCT (Anexo 1 y 2) a partir de esto se obtuvo que esta serie presenta principalmente una granulometría de tamaño arena, por lo cual se puede definir como una serie de buen drenaje y alta permeabilidad. Esta serie representa un 30,03% total del área de estudio.
- Serie San Esteban: Corresponden a suelos evolucionados “in situ” a partir de materiales graníticos ricos en cuarzo, moderadamente profundos, bien drenados, que ocupan una posición de cerros y lomajes altos dominando el paisaje, con pendientes complejas superiores a 10%. La textura superficial es franco arcillo arenosa, de color parto en matriz; bien estructurado, con suelos con horizontes B bien desarrollados. El suelo presenta un buen drenaje, con una permeabilidad lenta, especialmente cuando los suelos están erosionados y el escurrimiento superficial es rápido. Esta serie representa un 10,18% del total del área de estudio.



**Figura 14:** Mapa Distribución de las Series de Suelo del Área de Estudio. Elaboración propia.

**Tabla 1:** Series de Suelo y su Representatividad en el Área de Estudio en hectáreas [Ha] y porcentaje [%]

Series	Áreas [Ha]	Porcentaje
San Esteban	56,56	10,18
Arenales	332,32	59,80
Ríos	166,88	30,03
Total	555,76	100,00

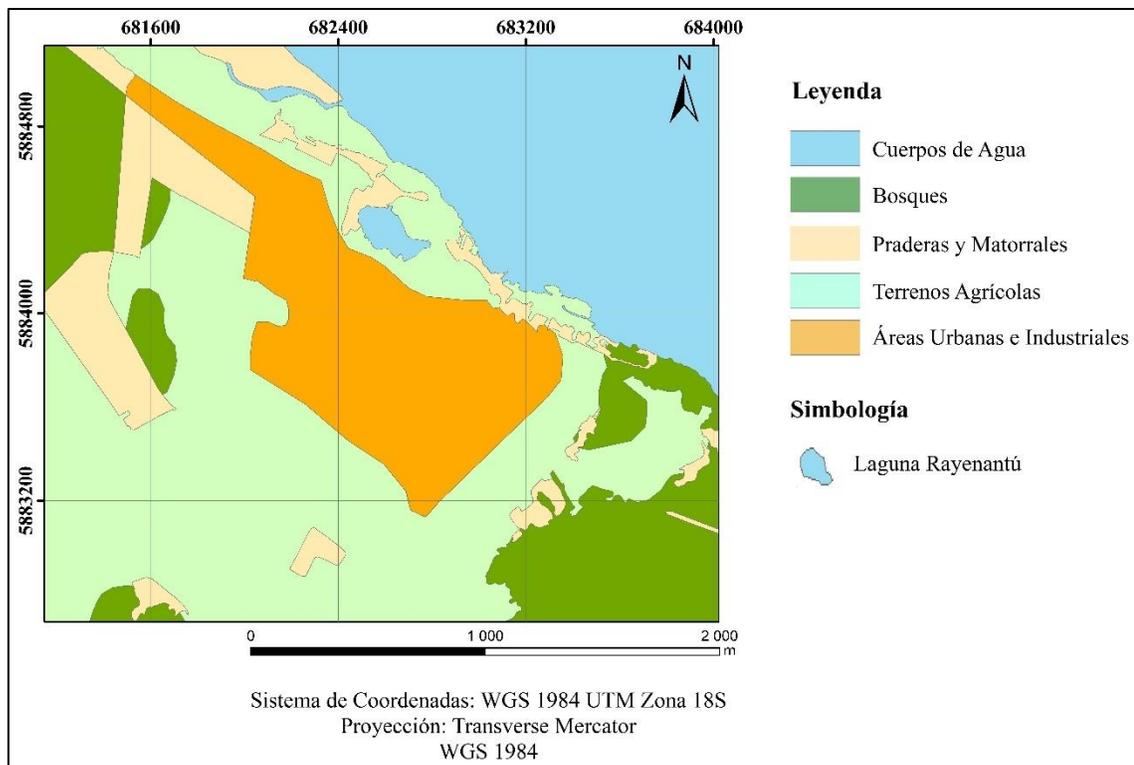
A estas series de suelo se les asocia una granulometría en específico, la cual se utiliza para calcular las características hidráulicas de cada una mediante la utilización de la calculadora de propiedades hidráulicas de la figura 15 (Anexo 3 y 4).

% Arena	<input type="text" value="0"/>
% Arcilla	<input type="text" value="0"/>
<input type="button" value="Calculo"/>	
<a href="#">Punto de marchitez permanente</a> ( $cm^3$ agua/ $cm^3$ suelo)	<input type="text"/>
<a href="#">Capacidad de campo</a> ( $cm^3$ agua/ $cm^3$ suelo)	<input type="text"/>
<a href="#">Densidad aparente</a> ( $g/cm^3$ )	<input type="text"/>
Saturación ( $cm^3$ agua/ $cm^3$ suelo)	<input type="text"/>
Conductividad hidráulica saturada ( $cm/hr$ )	<input type="text"/>
<a href="#">Agua disponible</a> ( $cm^3$ agua/ $cm^3$ suelo)	<input type="text"/>

**Figura 15:** Calculadora de características hidráulicas, utilizada para determinar los valores del punto de marchitez permanente (P.M.P), Capacidad de campo, Densidad aparente, Saturación, Conductividad hidráulica y el agua disponible a partir de los porcentajes de arena y arcilla de la serie. Saxton *et al.*, 1986.

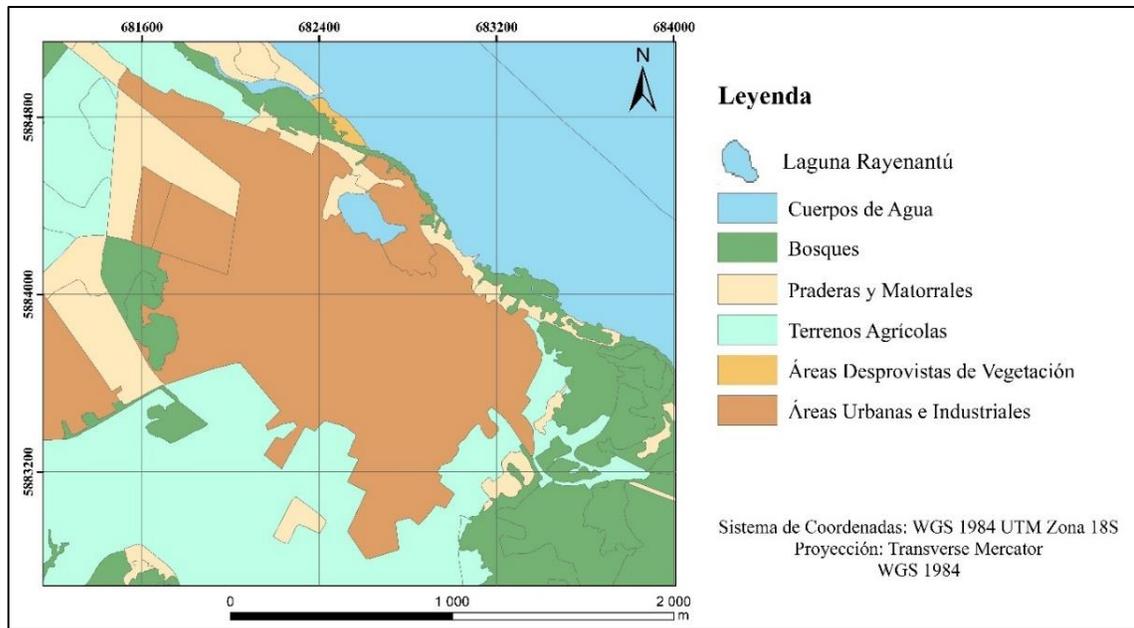
### 3.5 Usos de Suelo

Para efecto de este estudio, se confeccionó un mapa de usos de suelo para un periodo P1 (1989-2004) a partir de una imagen satelital extraída de Google Earth de 1985 en conjunto con la Cartografía temática de Cambio de Uso de la Tierra de la Región del Biobío para el periodo 2001-2021. (Figura 16). Se define la zona de estudio con una predominancia de terreno agrícola, seguido por cuerpos de agua, praderas y matorrales, bosques y área urbana.



**Figura 16:** Mapa Distribución de los Usos de Suelo del Área entre 1989-2004 (P1). Elaboración propia.

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) inicio un monitoreo a los cambios de uso de suelo al año 2015 en la región del Biobío para actualizar el proyecto Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile (CERVNCH), con ello se divide a la región en 8 usos de suelo. De los cuales, a la zona de estudio aplica un total de 6 (Figura 17), donde predomina en su mayoría el área urbana, seguido por los terrenos agrícolas, los cuerpos de agua, bosques, praderas y matorrales y áreas desprovistas de vegetación. Para efectos de este estudio este será definido como P2 (2005-2019).



**Figura 17:** Mapa Distribución de los Usos de Suelo del Área de Estudio entre 2005-2019 (P2). Elaboración propia.

En la actualidad, se definen los usos de suelo en orden de su porcentaje ocupado en la zona:

- **Área urbana e industrial:** Corresponde al área ocupada principalmente por ciudades, pueblos o zonas industriales. En el caso de la zona de estudio esto está constituido principalmente por el pueblo de Santa Juana, que ocupa un total de terreno de 202,00 hectáreas que representa un 36,35% del total del área de estudio.
- **Terrenos agrícolas:** Este sector corresponde a los terrenos ocupados principalmente por usos agrícolas y la rotación de cultivos-praderas. En el caso de la zona de estudio este uso ocupa un total de 173,79 hectáreas, que representa un 31,27% total del área de estudio.
- **Bosques:** Este uso de tierra esta caracterizado por bosques tantos adulta, joven o recién explotados, junto con especies exóticas asilvestradas y los bosques nativos que ocupan en el área de estudio un total de 108,35 hectáreas que representan un 19,50% del área total.

- Praderas y Matorrales: Uso de suelo que está compuesto por los usos de tierra de matorral-pradera semidenso, matorral semidenso, matorral denso, Matorral abierto, Matorral arborescente denso y praderas perennes, que ocupan 66,21 hectáreas del área de estudio que corresponden a un 11,91% del área de estudio total.
- Cuerpos de agua: Esta área corresponde a lo utilizado por todos los cursos de agua, lagos, laguna, embalses o tranques. En el área de estudio estos corresponderían a la Laguna Rayenantú, la cual ocupa un total de 3,76 hectáreas del sector y que corresponden a un 0,68% del área total del área de estudio.
- Áreas desprovistas de vegetación: Este uso de suelo está compuesto por los usos de playas y dunas que en el área de estudio corresponden a 1,65 hectáreas que representan un 0,30% del total de área de estudio.

Estos porcentajes fueron calculados a partir de los mapas de uso de suelo de cada período. En Arcmap (Tabla 2).

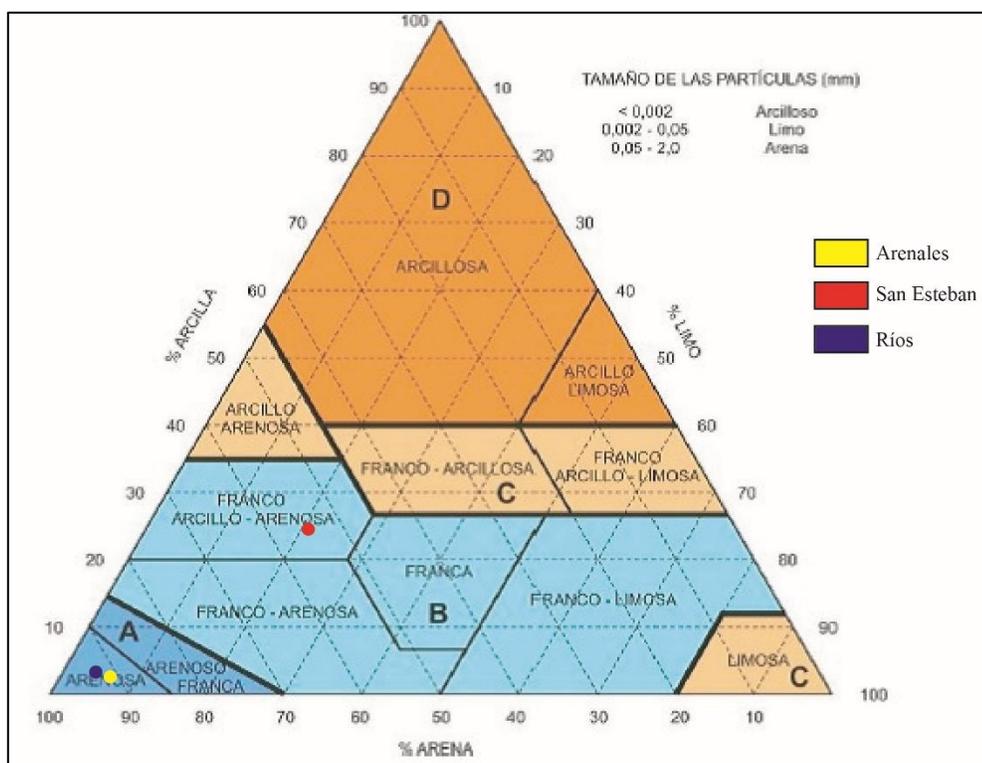
**Tabla 2:** Usos de Suelo del Área de Estudio y su Representatividad en Hectáreas [Ha] y porcentaje [%].

P1 (1989 – 2004)			P2 (2005 – 2019)		
Uso	Área en Ha	%	Uso	Área en Ha	%
Bosques	101,08	18,19	Bosques	108,35	19,50
Praderas y Matorrales	66,21	11,91	Praderas y Matorrales	66,21	11,91
Terrenos Agrícolas	275,94	49,65	Terrenos agrícolas	173,79	31,27
Área Urbana	108,77	19,57	Área Urbana	202	36,35
Cuerpos de Agua	3,76	0,68	Cuerpos de agua	3,76	0,68
Áreas desprovistas de vegetación	0	0	Áreas desprovistas de vegetación	1,65	0,30
Área Total	555,76	100	Área Total	555,76	100

### 3.6 Grupos Hidrológicos

Los grupos hidrológicos corresponden a una clasificación de los suelos que se utiliza para estimar la escorrentía superficial y fue desarrollada por el servicio de conservación de recursos naturales de los Estados Unidos en 1970.

Se pueden determinar estos grupos al plotear las fracciones de arena, limo y arcilla de las diversas series de suelo presentes en el área en el triángulo de texturas (Figura 18).



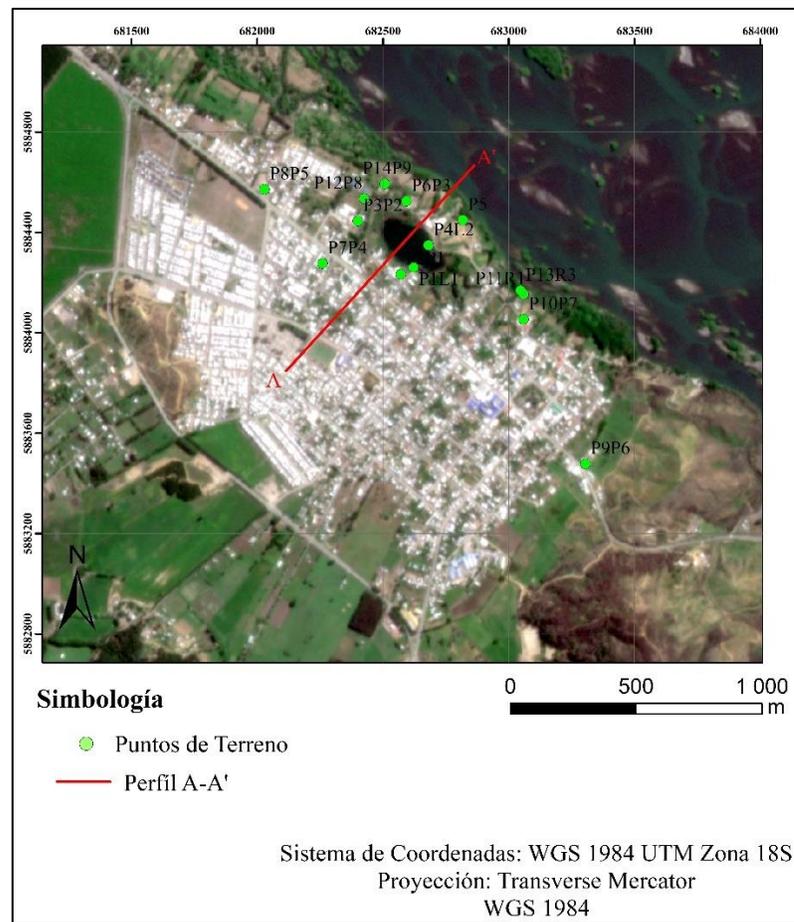
**Figura 18:** Triángulo de Clasificación de Grupos Hidrológicos, en Función de las Fracciones de Arena, Limo y Arcilla. Elaboración propia.

En este triángulo se describen los diversos grupos hidrológicos:

- Grupo A: Corresponden a arenas profundas, suelos profundos depositados por el viento y limos agregados, presentan una infiltración rápida con una gran potencia y un drenaje perfecto. A este grupo se puede asociar la serie Arenales y Río dentro del área de estudio.
- Grupo B: Corresponden a suelos poco profundos depositados por el viento y marga arenosa. Presentan una infiltración moderada con una potencia media a grande y un drenaje bueno a moderado. En el área de estudio se lo puede asociar a la serie San Esteban.
- Grupo C: Este grupo está constituido por margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con alto contenido de arcilla. Estas a su vez presentan una lenta infiltración con una potencia media a pequeña y un drenaje imperfecto.
- Grupo D: Corresponden a suelos expansivos y arcillas altamente plásticas, con una infiltración muy lenta, una potencia pequeña o siendo sólo un horizonte de suelo y presentando un drenaje pobre o muy pobre.

#### 4. METODOLOGÍA Y MATERIALES

Para la caracterización hidrogeológica de la laguna Rayenantú se realizó una división de etapas conformada por: una etapa pre-terreno la cual consistió en una recopilación de material bibliográfico, junto con datos de precipitaciones y temperaturas de la zona, luego se realiza una etapa de terreno, llevada a cabo los días 12 de septiembre y 09 de noviembre del 2023, en ella se recopilaron datos de pozos y mediciones de parámetros fisicoquímicos de agua, mediciones de niveles piezométricos (Figura 19) y tomas de muestras de suelos (Anexos 5 y 6), esto con el objeto de obtener datos de diversos puntos del área de estudio para su posterior procesamiento e interpretación en una etapa post-terreno en la cual se realiza el balance hídrico a través del método de número de curva para el cálculo absorción máxima y la metodología EASY-BALANCE para la escorrentía y recarga de la zona de estudio considerando para ello, dos periodos (P1 y P2), además de la realización de un modelo conceptual hidrológico del área en el perfil A-A'.



**Figura 19:** Mapa de Ubicación Puntos en Terreno. Elaboración propia.

## **4.1 Precipitaciones y Temperatura**

Se realizó una recopilación de datos meteorológicos, específicamente de precipitaciones y temperaturas a lo largo de los últimos 30 años en la zona, esto se obtuvo del material histórico extraído de CAMELS-CL, la cual entrega la información de las precipitaciones y temperaturas diarias y mensuales de la cuenca de Río Biobío en desembocadura. Es un recopilatorio en formato Excel de los datos de CR2MET. Cabe señalar que estos datos se encuentran disponibles sólo hasta el año 2019, puesto que las estaciones de las cuales fueron obtenidos ya no se encuentran en actividad desde ese año. Al igual que los anteriores, estos datos, para efectos del estudio, fueron divididos en 2 periodos (Anexo 7).

## **4.2 Balance Hídrico**

Para efectos metodológicos es importante definir ciertos conceptos:

- **Escorrentía superficial:** es el aporte de precipitaciones que se mueven por la superficie del suelo sin presentar infiltración (Chow, 1964).
- **Infiltración o Recarga:** es el flujo de agua que se infiltra en el suelo llegando a recargar los acuíferos. (Chow, 1964).
- **Evapotranspiración:** Es el proceso por el cual el agua es evaporada, es decir, pasa de estado líquido a gas en los suelos húmedos y es absorbido por las plantas. (Chow, 1964).

### **4.2.1 Método Número de Curva**

Para el cálculo del balance hídrico se utilizó el método de número de curva (NC) (SCS, 1972) el que permite determinar la absorción máxima de un área menor o igual a 250 km<sup>2</sup>; teniendo en

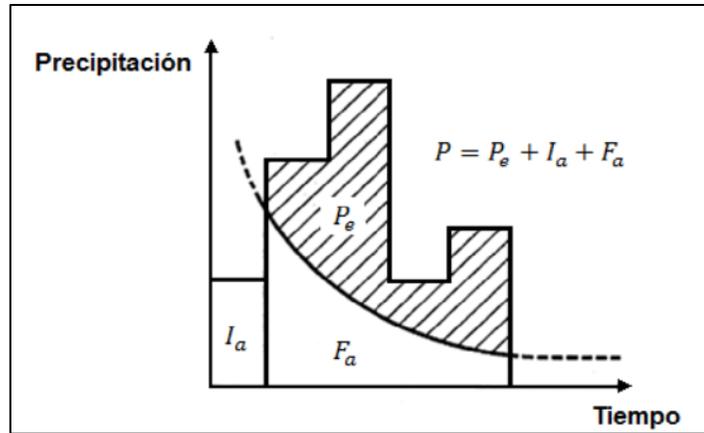
consideración el uso de suelo, los grupos hidrogeológicos y las condiciones de humedad en los periodos P1 (1989 – 2004) y P2 (2005 – 2019) y que se asocian a esta área, las cuales van a establecer cuanto de las precipitaciones se pueden transformar en escorrentía superficial en función del nivel de saturación e impermeabilidad de la zona. Es decir, mientras mayor impermeabilidad presente un sector mayor será la cantidad total de precipitaciones que se convertirán en escorrentía superficial. De esta manera a través de este método se calcula la escorrentía superficial de manera directa en función de la profundidad de precipitación y de un parámetro de abstracción. Mientras más alto sea el NC, mayor tendencia tendrá el suelo a la escorrentía superficial y viceversa.

El uso de suelo como se mencionó, también tendrá un efecto en este cálculo, puesto que los suelos, por ejemplo, con una cobertura vegetal más densa tienden a presentar una mayor infiltración, mientras que los suelos con una cobertura vegetal escasa son más propensos a la escorrentía superficial. Estas características representarían eventualmente variación en los resultados, teniendo en cuenta los cambios en el uso de suelo realizados en la zona desde 1989 hasta 2019.

Esta relación entre parámetros se refleja en la figura 20, en donde es posible observar el comportamiento de la curva. Los fundamentos establecen que la precipitación efectiva ( $Pe$ ) debe ser siempre menor o igual a la precipitación total ( $P$ ), a su vez la retención acumulada ( $Fa$ ) es menor o igual a la retención potencial máxima ( $S$ ), de manera que la escorrentía potencial, es  $P-Ia$ . De tal manera se obtiene la siguiente relación de igualdad:

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{P - Ia} \quad (1)$$

Por lo que por continuidad se tiene que  $P = Pe + Ia + Fa$



**Figura 20:** Variables que Intervienen en el Método de Abstracción de la SCS. Ia = abstracción inicial; Pe = exceso de precipitación; Fa = abstracción acumulada; P = precipitación total. Tomado de Chow et al., 1994.

Al combinar ambas ecuaciones se obtiene que:

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (2)$$

A su vez, a través del análisis de una gran variedad de cuencas la SCS pudo determinar el valor de la abstracción inicial en  $Ia = 0,2 S$ , por lo que:

$$Pe = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta estos antecedentes, es posible calcular la retención máxima (S) en función del número de curva (NC) a través de la ecuación:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \text{ [mm]} \quad (4)$$

El número de curva dependerá de las relaciones realizadas anteriormente, asociando los usos de suelo con los grupos hidrológicos (Anexo 8).

Luego, cada valor de número de curva se debe ponderar con respecto al porcentaje que ocupa cada uso de suelo dentro de la cuenca. Así, a través de una regla de 3 simple se calcula el NC ponderado

de cada uso, obteniendo como resultado final un NC ponderado total para cada serie de suelo, como se ejemplifica en la tabla 3.

**Tabla 3:** Ejemplo de Cálculo de Número de Curva Ponderado.

Serie de suelo	Grupo hidrológico	Uso de suelo	% área En la cuenca	NC	NC ponderado	NC ponderado Total
San Esteban	B	Bosques	77.94	73	56.89	73.29
		Praderas y matorrales	4.77	48	2.29	
		Terreno Agrícola	14.87	81	12.04	
		Área desprovista de vegetación	0.00	66	0.00	
		Área urbana	2.42	85	2.06	

De tal manera que la retención máxima (S) de la cuenca completa será:

$$S = \frac{25400}{NC \text{ ponderado Total}} - 254 \text{ [mm]} \quad (5)$$

#### 4.2.2 Método Easy-Balance

Una vez obtenido la absorción máxima de cada serie, es posible obtener la ETR y recarga de cada una de las series en los periodos P1 y P2 a través de la planilla EASY BALANCE versión 3.0 de Vásquez-Suñen y Castro 2004. Utilizando los datos recopilados de precipitaciones y temperatura, junto a los datos obtenidos de las características de suelo de cada serie, podemos obtener estos valores. Como se ejemplifica en la figura 21 con el ingreso de los datos de la serie Arenales y sus resultados de ETR y recarga (Figura 22).

EASY_BAL		P1	EASY_BAL		P2
Ver. 3.0			Ver. 3.0		
By: Enric Vázquez-Suñé Adolfo Castro			By: Enric Vázquez-Suñé Adolfo Castro		
<b>CARACTERÍSTICAS DEL SUELO</b>		<b>Arenales</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DEL SUELO</b>		<b>Arenales</b>
Cap. Campo (en volumen)		0.08	Cap. Campo (en volumen)		0.08
Humedad Inicial (en volumen)		0.13	Humedad Inicial (en volumen)		0.13
Espesor suelo (m)		0.36	Espesor suelo (m)		0.36
P.M.P.		0.02	P.M.P.		0.02
VALOR LAMINACIÓN (mm)		153.79	VALOR LAMINACIÓN (mm)		113.27
Reserva Útil (mm)	21.60		Reserva Útil (mm)	21.60	
Reserva Inicial (mm)	39.60		Reserva Inicial (mm)	39.60	

Figura 21: Ejemplo Ingreso de Datos de Características de Suelo para Serie Arenales para cada Periodo.

RECARGA ANUAL				P1	RECARGA ANUAL				P2
	RECARGA	LLUVIA	ETR			RECARGA	LLUVIA	ETR	
AÑO	mm/a	mm/a	mm/a		AÑO	mm/a	mm/a	mm/a	
1989	324.2	1343.9	517		2005	242.7	2033.8	551	
1990	495.2	1484.3	625		2006	298.2	2202.6	600	
1991	503.6	1943.3	556		2007	244.4	1218.0	521	
1992	551.1	2015.4	574		2008	251.9	1749.1	449	
1993	467.2	2071.2	566		2009	326.2	1873.4	495	
1994	470.7	1844.1	571		2010	206.3	1402.1	569	
1995	395.4	1789.4	422		2011	258.8	1503.0	567	
1996	288.3	1121.2	611		2012	203.1	1538.3	640	
1997	570.1	2261.5	588		2013	258.5	1343.3	485	
1998	292.4	820.1	420		2014	260.5	1852.0	598	
1999	420.3	1525.9	404		2015	294.0	1666.7	381	
2000	409.7	1984.5	653		2016	150.1	1153.9	524	
2001	365.3	2053.4	557		2017	298.9	1664.9	539	
2002	642.7	2225.5	666		2018	339.8	1710.6	620	
2003	374.0	1540.9	516		2019	239.6	1479.0	450	
2004	480.6	1721.3	570						
<b>MEDIA</b>	<b>440.7</b>	<b>1734</b>	<b>551</b>		<b>MEDIA</b>	<b>258.2</b>	<b>1626</b>	<b>533</b>	

Figura 22: Ejemplo Datos de la Planilla Excel EASY-BALANCE, para la Serie Arenales de cada Periodo (P1y P2).

Finalmente, una vez obtenidos los valores de ETR y recarga de cada serie se puede calcular el valor de la escorrentía superficial de cada serie mediante la fórmula de balance hídrico (7):

$$P = ETR + V + I \quad (7)$$

Donde P son las precipitaciones, ETR la evapotranspiración real, V la escorrentía superficial e I la infiltración. Se debe despejar la variable ya mencionada.

### **4.3 Nivel Piezométrico**

Durante la etapa de terreno se realizaron mediciones de niveles piezométricos que corresponden a la altura de la columna de agua respecto al nivel del mar. Se hicieron en distintos puntos de la comuna de Santa Juana, con el objetivo de establecer una relación entre estos y la topografía del área de estudio y con ello confeccionar un modelo conceptual de esta. Se trazo un perfil A-A' (Figura 19) donde los puntos lejanos con niveles piezométricos fueron trasladados con razones que pertenecen a la misma unidad, con esto se estimó el nivel piezométrico en el área de estudio, el cual se proyectó a un modelo conceptual 3D donde se observó las interacciones entre el nivel piezométrico, la Laguna Rayenantú y el río Biobío.

### **4.4 Parámetros Físicoquímicos**

Durante la etapa de terreno se midieron valores de pH, conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) y Concentración de Ox ( $\% \text{Ox}$ ), estas mediciones tomaron de manera equitativa entorno a la laguna Rayenantú, realizando un perímetro circundante a esta, siendo tomadas tanto en la laguna misma, como en diversas punteras distribuidas en la comuna de Santa Juana. Estos datos fueron medidos con el equipo multiparámetro portátil Hach modelo HQ40D, el cual es un multiparámetro que permitió medir estos 4 parámetros con mayor eficiencia, siempre asegurando limpiar con abundante agua destilada entre toma de muestra.

La conductividad eléctrica corresponde a la capacidad de un material o sustancia de transmitir la corriente eléctrica a través de él. Se mide en siemens por metro o como es caso del dispositivo

utilizado que lo recogió en siemens por cm, este valor permite determinar la cantidad de sales disueltas que se pueden encontrar en el agua.

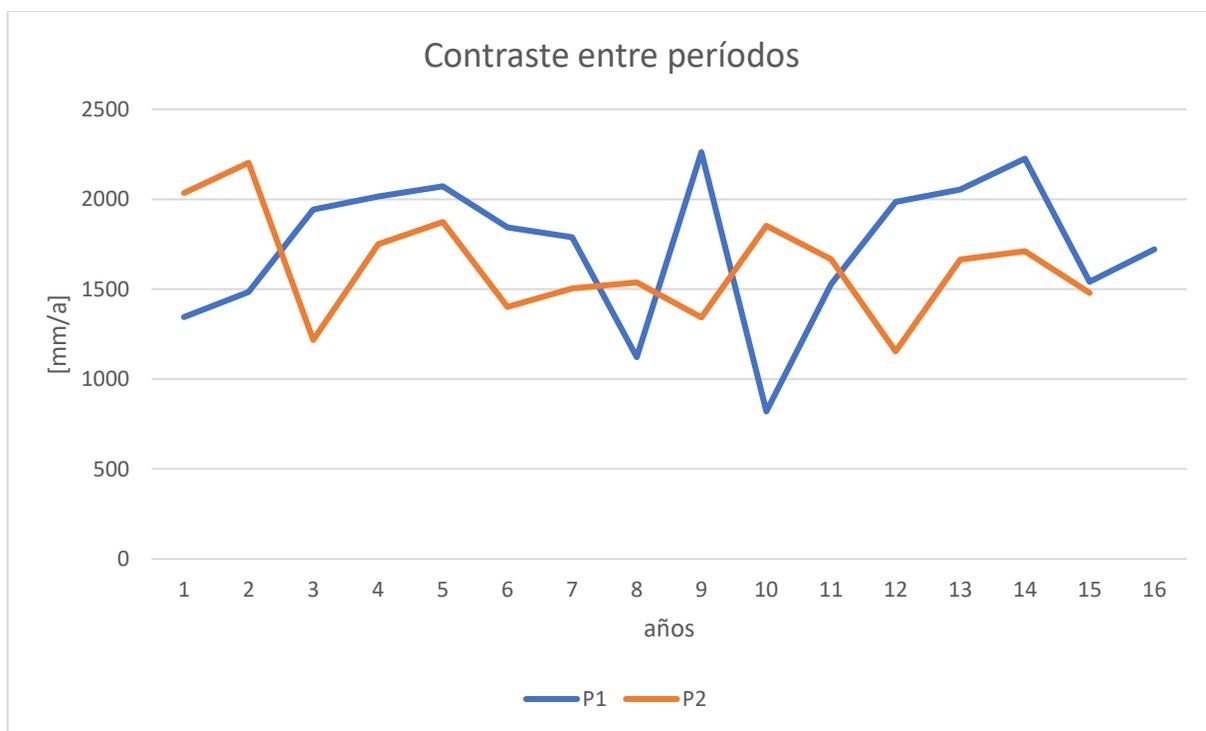
El pH se refiere a la concentración de iones de hidrogeno presente en determinado material o sustancia, en este caso el agua. Se mide en miligramos por litro, sin embargo, al ser sus valores tan pequeños, este se expresa como un valor logarítmico.

## 5. RESULTADOS

A partir de los datos recopilados para los 2 períodos (P1 y P2) se realizó un balance hídrico para el área de estudio de la Laguna Rayenantú.

### 5.1 Precipitaciones y Temperaturas

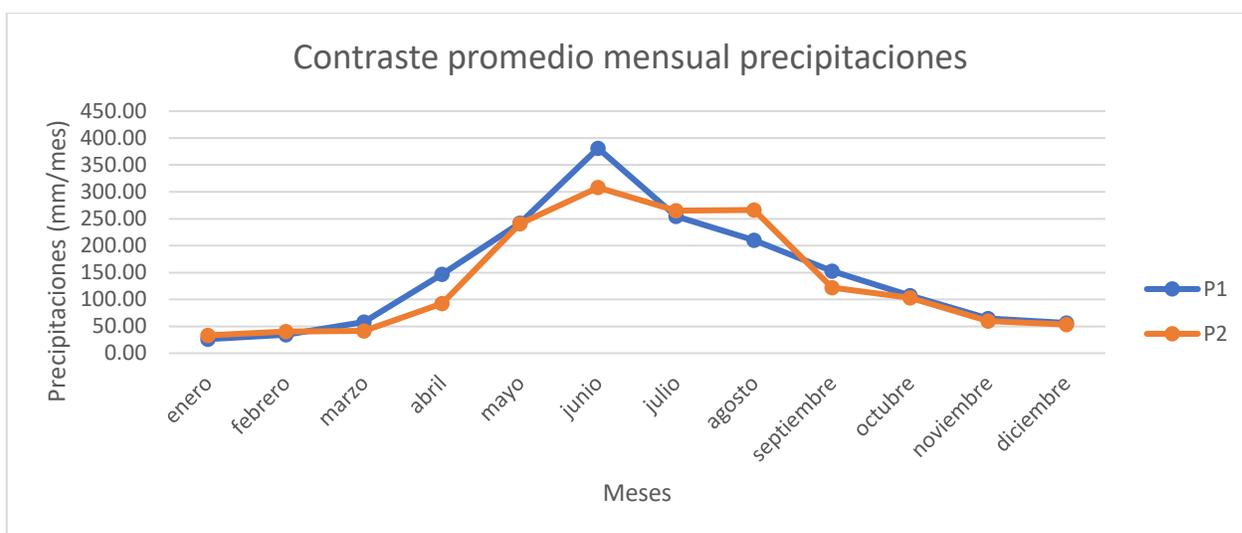
Los datos de precipitaciones obtenidos de los 2 periodos, P1 desde 1989 hasta 2004 y P2 de 2005 a 2019 (Gráfico 1) permiten observar claramente una disminución promedio de las precipitaciones anuales entre P1 y P2, con ciertos peaks anómalos en el caso de P1 como lo son los años 8, 9 y 10. Siendo los años 8 y 10 peaks inferiores con valores de 1121,21 y 820,08 [mm/a] respectivamente y el año 9 un peak positivo para P1 con un valor de 2261,51 [mm/a]. Mientras que el peak de mayor valor para P2 se encuentra en el año 2 con un valor de 2202.60 [mm/a] y un peak inferior en el año 12 con un valor promedio de 1217,97 [mm/a]. Con esto se puede observar la clara disminución de las precipitaciones, lo cual está directamente relacionado a la importante sequía que viene afectando a Chile en los últimos 13 años.



**Gráfico 1:** Contraste de Precipitaciones Anuales entre Períodos. P1 (1989-2004) y P2 (2005-2019). Elaboración propia.

Al comparar ambos periodos, en relación con los promedios mensuales de las precipitaciones (gráfico 2), es posible observar una disminución general en las precipitaciones en el área de estudio, con ciertos puntos fuera de la tendencia como lo son abril de P2, con un valor de 92,41 [mm/mes], el cual presenta una mayor disminución en comparación al resto de los meses del periodo y siendo menor en comparación al valor de este mismo mes en P1 (146,91 [mm/mes]). El mes de junio, por su parte, presenta un mayor promedio de precipitaciones en P1 con un valor de 381,04 [mm/mes] en comparación a P2, que en este mismo mes presentó un valor de 307,99 [mm/mes]. Agosto de P2 presentó un valor promedio de 266,40 [mm/mes], siendo mayor al promedio registrado para P1 209,94 [mm/mes] en el mismo mes.

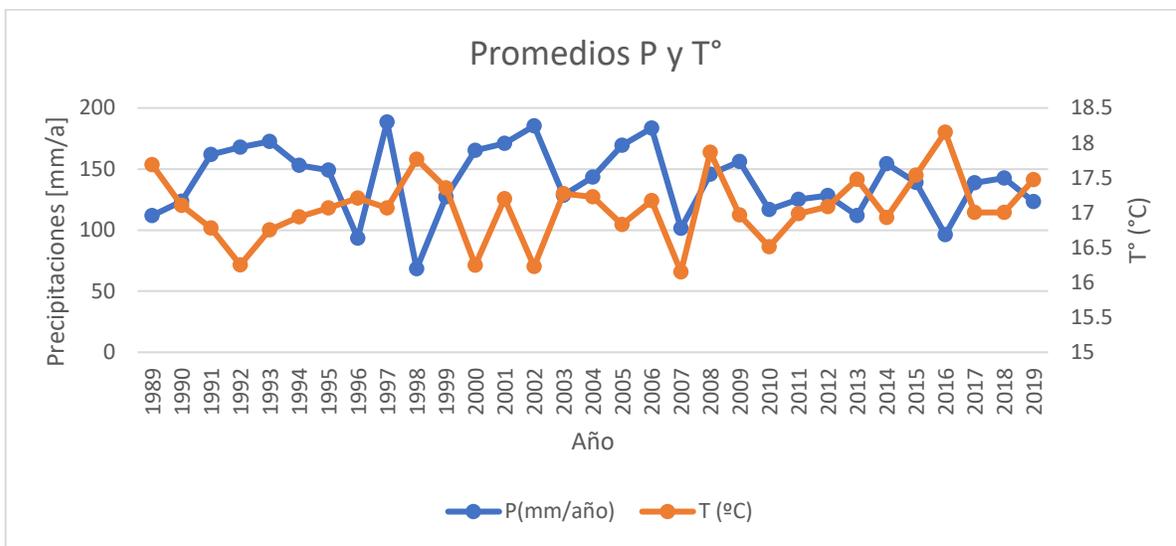
Si bien es posible observar que las precipitaciones entre los meses de octubre y febrero son similares, son los meses en los cuales se deberían presentarse las mayores precipitaciones (mayo-agosto), se observa el mayor déficit de agua en P2.



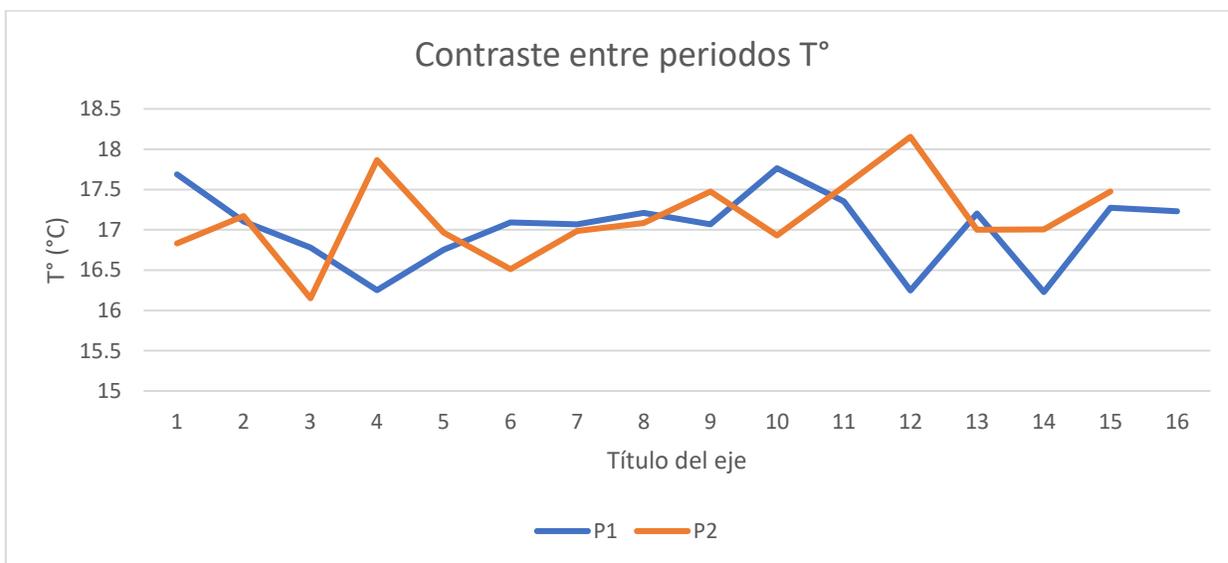
**Gráfico 2:** Contraste Promedio Mensual de Precipitaciones entre Periodos. Elaboración propia.

Por último, en el gráfico 3 se establece una relación entre las precipitaciones y la temperatura anual de cada periodo, donde se observan peaks históricos de precipitaciones en el año 1997, 2002 y 2006, siendo coincidentes con los años de menor temperatura (la cual tuvo un promedio de 16.2°C).

Es posible señalar además que se observa un aumento en el promedio de la temperatura anual de la zona a partir del año 2010 (P2) (Gráfico 4).



**Gráfico 3:** Contraste entre Precipitaciones y Temperaturas Anual. Elaboración propia.



**Gráfico 4:** Contraste de Temperaturas Anuales entre Periodos. P1 (1989-2004) y P2 (2005-2019). Elaboración propia.

## 5.2 Balance Hídrico

A continuación, se muestran los resultados de retención máxima para cada período, a partir del método de número de curva, y que fue señalado en la metodología.

**Tabla 4:** Valores de Retención Máxima (S) por Serie de Suelo para P1.

Serie de suelo	Grupo Hidrológico	Uso de suelo	% área de la cuenca	Número de Curvas (NC)	NC ponderado	NC ponderado Total	S serie
San Esteban	B	Bosques	77,02	73	56,22	73,27	92,65
		Praderas y Matorrales	4,76	48	2,28		
		Terreno Agrícola	18,23	81	14,77		
		Área urbana	0,00	68	0,00		
Arenales	A	Bosques	10,73	57	6,12	62,29	153,79
		Praderas y Matorrales	9,19	30	2,76		
		Terreno Agrícola	59,87	72	43,11		
		Área urbana	20,21	51	10,31		
Ríos	A	Bosques	13,10	57	7,47	57,13	190,61
		Praderas y Matorrales	19,77	30	5,93		
		Terreno Agrícola	39,95	72	28,76		
		Área urbana	24,93	51	12,71		
		Cuerpos de agua	2,25	100	2,25		
NC Cuenca						61,86	
S Cuenca						156,63	

**Tabla 5:** Valores de Retención Máxima (S) por Serie de Suelo para P2.

Serie de suelo	Grupo Hidrológico	Uso de suelo	% área de la cuenca	Número de Curvas (NC)	NC ponderado	NC ponderado Total	S series
San Esteban	B	Bosques	77,94	73	56,89	73,29	92,57
		Praderas y matorrales	4,77	48	2,29		
		Terreno Agrícola	14,87	81	12,04		
		Área desprovista de vegetación	0,00	66	0,00		
		Área urbana	2,42	85	2,06		

Arenales	A	Bosques	6,78	57	3,87	69,16	113,27
		Praderas y matorrales	9,19	30	2,76		
		Terreno Agrícola	43,29	72	31,17		
		Área desprovista de vegetación	0,00	45	0,00		
		Área urbana	40,74	77	31,37		
Ríos	A	Bosques	25,01	57	14,25	62,27	153,89
		Praderas y matorrales	19,76	30	5,93		
		Terreno Agrícola	12,90	72	9,29		
		Área desprovista de vegetación	0,99	45	0,44		
		Área urbana	39,09	77	30,10		
		Cuerpos de agua	2,25	100	2,25		
					NC Cuenca	67,51	
					S Cuenca	122,23	

### 5.2.1 Evapotranspiración Real (ETR)

Mediante la metodología EASY-BALANCE obtuvieron los siguientes valores

**Tabla 6:** Valores de ETR para cada Serie P1 (1989-2004). Elaboración propia.

Serie de suelo	Precipitación [mm/a]	ETR [mm/a]
San Esteban	1734	600
Arenales	1734	551
Ríos	1734	553

**Tabla 7:** Valores de ETR para cada Serie P2 (2005-2019). Elaboración propia.

Serie de suelo	Precipitación [mm/a]	ETR [mm/a]
San Esteban	1626	583
Arenales	1626	533
Ríos	1626	536

### 5.2.2 Recarga

Junto con lo anterior también se obtuvieron los valores de recarga anual para cada serie en cada periodo.

**Tabla 8:** Valores de Recarga para cada Serie P1 (1989-2004). Elaboración propia.

Serie de suelo	Precipitación [mm/a]	Recarga [mm/a]
San Esteban	1734	208.9
Arenales	1734	440.7
Ríos	1734	580

**Tabla 9:** Valores de Recarga para cada Serie P2 (2004-2019). Elaboración propia.

Serie de suelo	Precipitación [mm/a]	Recarga [mm/a]
San Esteban	1626	204.9
Arenales	1626	258.2
Ríos	1626	447,2

### 5.2.3 Escorrentía Superficial

Como se mencionó en la metodología, a partir de la formula (7) se puede calcular la escorrentía superficial de cada serie de suelo en cada periodo.

**Tabla 10:** Valores de Escorrentía Superficial para cada Serie P1 (1989-2004). Elaboración propia.

Serie de suelo	Precipitación [mm/a]	Escorrentía superficial [mm/a]
San Esteban	1734	925.1
Arenales	1734	742.3
Ríos	1734	601

**Tabla 11:** Valores de Escorrentía Superficial para cada serie P2 (2004-2019). Elaboración propia.

Serie de suelo	Precipitación [mm/a]	Escorrentía superficial [mm/a]
San Esteban	1626	838.1
Arenales	1626	834.8
Ríos	1626	642,8

Finalmente se calculó el número de curva (NC) ponderado para la mini cuenca y el valor de absorción máxima para esta y utilizando EASY BALANCE se obtuvieron valores de ETR, Recarga y Escorrentía superficial para la mini cuenca lacustre en cada periodo (Tabla 12).

**Tabla 12:** Valores de Precipitaciones, ETR, Recarga y Escorrentía Superficial de la Mini Cuenca Lacustre de Laguna Rayenantú. Elaboración propia.

Período	Precipitaciones [mm/a]	ETR [mm/a]	Recarga [mm/a]	Escorrentía superficial [mm/a]
P1 (1989-2004)	1734	548	476.3	709,70
P2 (2005-2019)	1626	530	318.2	777,80

### 5.3 Modelo Conceptual

Como se mencionó anteriormente se confeccionó un modelo conceptual a partir de los datos obtenidos en terreno (Anexo 5). Donde se observa la dirección del flujo de las aguas subterráneas, el nivel piezométrico estimado del área de estudio y su interacción con los distintos cuerpos de agua presentes en la zona (Figura 23).

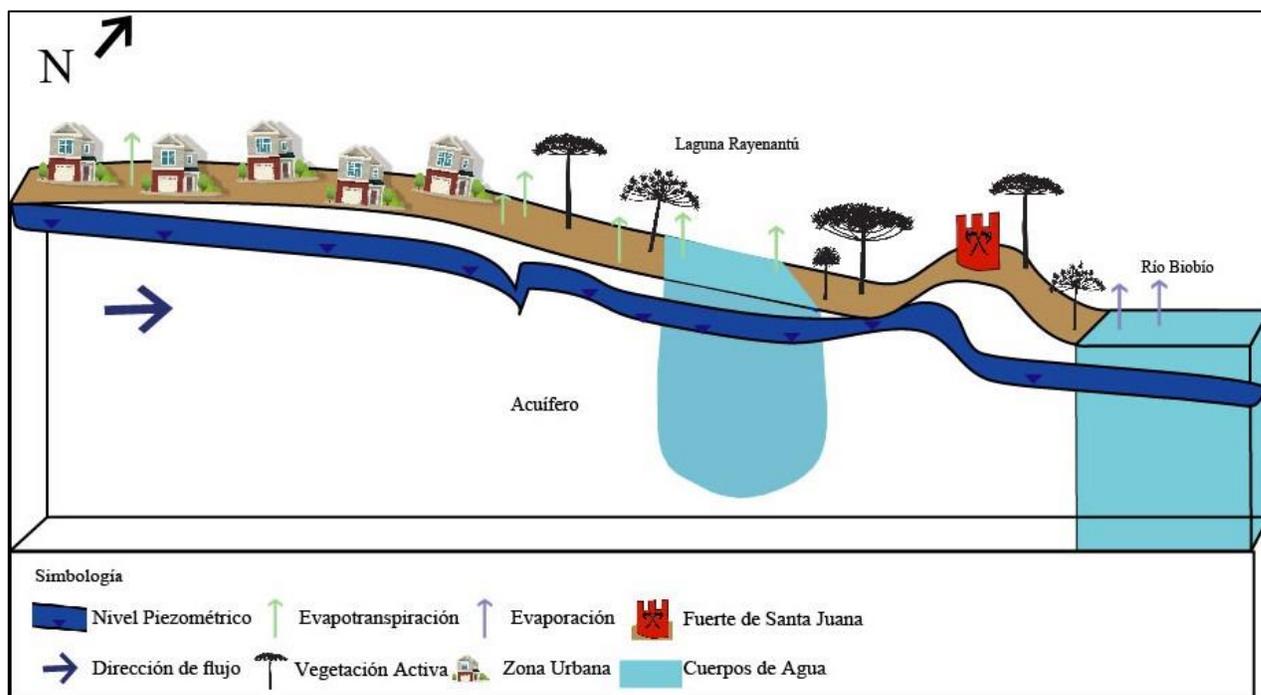


Figura 23: Modelo Hidrogeológico Conceptual. Elaboración propia.

## 5.4 Parámetros Físicoquímicos

A continuación, se muestran los valores obtenidos en las distintas mediciones realizadas en la temporada de primavera del 2023:

**Tabla 13:** Datos Físicoquímicos Obtenidos en Terreno.

Punto	Profundidad puntera [m]	Temperatura [°C]	CE [ $\mu$ S/cm]	pH	%Ox
P1L1	-	12.8	258	6.66	81.1
P2P1	14	11.4	365	6.59	75.8
P3P2	-	11.8	80.7	6.97	87.8
P4L2	-	12.8	254	6.59	78.9
P5	-	-	-	-	-
P6P3	17	13.7	80.4	6.7	90.3
P7P4	14	16	232	6.75	94.3
P8P5	22	13.5	275	6.72	76.5
P9P6	20	17.5	568	6.5	50.2
P10P7	-	15.4	288	6.39	29.1
P11R1	-	12.3	62.7	6.93	91.2

## 6. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar cada serie de suelo del área de estudio, observándose como el tipo de unidad hidrogeológica, uso de suelo, topografía, evapotranspiración, precipitaciones y temperaturas, afecta al comportamiento de la dinámica de aguas superficiales y subterráneas.

Relacionado con lo anterior, en base a la metodología de Struckmeier y Margat (1995) y la distribución que poseen las series y unidades hidrogeológicas. Las series Arenales y Ríos, se asocian a la unidad B, presentando una mayor efectividad al momento de transmitir y almacenar agua en comparación a la serie San Esteban la cual se asocia a la unidad C, que presenta una mayor impermeabilidad, esto se ve reflejado en la mayor escorrentía superficial que presenta esta serie ya sea en P1 como en P2, con un valor de 925,1 y 838,1 [mm/a], respectivamente.

Por otro lado, la escorrentía superficial de las series está relacionada con los tipos de uso de suelo que predominan en cada una. San Esteban presentó, en ambos periodos, un mayor porcentaje de usos de bosques y terrenos agrícolas, los que por su número de curva (73 y 81) son más propensos a generar esta escorrentía superficial. En paralelo, las series Arenales y Ríos si bien no presentan porcentajes similares en uso de bosques y terreno agrícola; si presentan, en ambos periodos, un mayor porcentaje de uso de suelo urbano, especialmente en P2 donde tienen un porcentaje de uso de 40,74% y 39,09% respectivamente. Este uso de suelo presenta un número de curva elevado (NC-72), por lo que debiera generar una escorrentía superficial similar a la de San Esteban; sin embargo, debido a cada tipo de litología presente en cada serie, como es el caso de las series Arenales y Ríos que están asociadas a las areniscas de los depósitos no consolidados, las cuales permiten una mayor transmisibilidad y almacenamiento de agua, provocando que la escorrentía superficial sea menor, mientras que la serie San Esteban está asociado principalmente a la formación Santa Juana, la cual presenta mayores niveles de lutitas, lo que resulta menos permeable de la zona, favoreciendo la escorrentía superficial.

Como se ha señalado, la escorrentía superficial se ve afectada por las características litológicas, uso de suelo y la unidad hidrogeológica a la cual pertenece cada serie. Pero, en el caso de la serie San Esteban, la cual presenta, en ambos periodos, la mayor escorrentía superficial de la zona, esta se ve disminuida en casi 100 [mm/a] entre P1 y P2, lo que se explica por la disminución de las

precipitaciones en la zona la cual paso de un promedio anual de 1734 [mm/a] a 1626 [mm/a] variación causada por el cambio climático que afecta al país en general (DGAC, 2023). En el caso de las series Arenales y Ríos se observa un aumento en la escorrentía superficial, teniendo las mismas condiciones climatológicas de la serie San Esteban, en el periodo P2. Esta diferencia se asocia al cambio en el uso de suelo que presentan las series Arenales y Ríos, donde el aumento del uso de suelo urbano paso, en el caso de Arsenales de 67,17 Ha a 135,39 Ha y de 41,60 Ha a 65,24 Ha en la serie Ríos, lo que refleja como el cambio del uso de suelo (aumento de la urbanización) afectan al balance hídrico del área de estudio.

Por otro lado, la recarga de la zona se calculó dando como resultado una recarga anual de 476,30 [mm/a] en P1 y 318,2 [mm/a] en P2, esta disminución general de la recarga en la cuenca es producida por los mismos factores que afectan a la escorrentía superficial, pero lo hacen de diferente forma. En el caso de la serie Arenales, la cual en P1 presentó una recarga anual de 440,7 [mm/a] en comparación a P2 donde tuvo un valor de 258,2 [mm/a]. Esta diferencia, como ya se mencionó, la serie Arenales está asociada a arenas de depósitos no consolidados del sector, por lo que esta disminución se puede asociar al cambio climático y la disminución de las precipitaciones. Sin embargo, en el caso de esta serie, otro factor importante a destacar es el cambio en el uso de suelo entre P1 y P2, la zona de uso urbano en la serie aumento significativamente pasando de ocupar 67,17 Ha equivalentes a un 20,21% del total a 135,39 Ha equivalente a un 40,74% de la superficie de esta, lo cual representó un cambio significativo en la recarga de la serie y del área de estudio.

En resumen, se realizaron diversas mediciones del nivel piezométrico a lo largo del área de estudio, las cuales se utilizaron para realizar un modelo hidrológico conceptual, tal como se puede observar en la figura 23. Este modelo, que está orientado en dirección SO-NE, da cuenta de la interacción de las aguas subterráneas con la laguna Rayenantú y el principal afluente que es el río Biobío, así se pudo identificar que el flujo de las aguas subterráneas es desde las zonas de mayor altura en dirección al río, a su vez se observó que las aguas subterráneas de la mini cuenca están alimentando a la laguna Rayenantú, puesto que se tiene registro que la profundidad de esta seria de aproximadamente de 14 metros y como se observó en el modelo conceptual el nivel piezométrico del área es de baja profundidad, por lo que estas entran en contacto con la laguna para finalmente desembocar en el río Biobío.

Por otra parte, los datos fisicoquímicos medidos en terreno muestran que las aguas subterráneas no presentan problemas de oxigenación y con material particulado dentro del estándar de agua dulce, a excepción del punto P10P7, el cual presenta un 29.1% de Ox. esto se podría explicar dado que el punto de medición se ubicó en un sector de plantación de flores, lo cual da cuenta de un sistema hídrico de buena calidad.

## 7. CONCLUSIÓN

A partir del estudio y análisis de los datos recopilados (precipitaciones y temperatura, niveles piezométricos, litologías y columnas estratigráficas) se pudo establecer el cómo ha variado el comportamiento hídrico de la zona de estudio. Los datos meteorológicos demuestran una disminución en las precipitaciones entre los años 1989 y 2019, con diversos peaks favorables a un periodo húmedo, lo que no implica que haya un descenso medio de las precipitaciones, lo cual, a su vez, provoca un comportamiento anormal en los ciclos hídricos de la zona, afectando a la Laguna Rayenantú.

Como ya se estableció, esta disminución en las precipitaciones se puede atribuir al cambio climático y al aumento de las temperaturas a nivel global, generado importantes sequías que han afectado a Chile en los últimos años. Este fenómeno ha contribuido de manera proporcional a un aumento de la escorrentía superficial, pasado de tener 709,7 [mm/a] en P1 a presentar 777,80 [mm/a] en P2 y una disminución de la infiltración pasando de una recarga anual entre P1 y P2 de 476,30 [mm/a] a 318,20 [mm/a]. Cambios en el balance hídrico también atribuibles a la expansión territorial que ha presentado, en los últimos 30 años, la zona urbana de Santa Juana, pasando de 108,77 Ha a 202 Ha.

Lo anterior demuestra como el cambio en el uso de suelo es una variable importante que considerar al momento de establecer el balance hídrico de una zona de estudio, lo cual se ve evidenciado de manera notoria en la mini cuenca Lacustre de Laguna Rayenantú y su eutrofización. Agregar que se pudo establecer una disminución de la recarga hacia la laguna, como se observó en el modelo hidrogeológico conceptual, donde las aguas subterráneas de la mini cuenca lacustre alimentan a la Laguna Rayenantú, por lo que, esta disminución general de la recarga en la zona también estaría disminuyendo la recarga hacia la laguna.

Finalmente, este trabajo permitió aplicar diversas herramientas y conocimientos para el estudio de las variaciones en los sistemas hídricos, teniendo en cuenta el cómo se correlacionan las diversas variables consideradas (los niveles piezométricos, la litología, los usos de suelo, entre otros), confirmado de esta manera la hipótesis de trabajo propuesta ya que fue posible establecer, el cómo el cambio de uso de suelo es un factor que afecta al balance hídrico en esta caso en particular de la mini cuenca lacustre de la laguna Rayenantú,

## REFERENCIAS

- ARAYA, F. (2019). Propuesta de un modelo de gestión integrada de cuencas de lagos (ILBM) para la Laguna Rayenantú, Santa Juana, Chile. Universidad de Concepción.
- BÖRGEL, J. (1983). Geomorfología y Geografía de Chile. Instituto Geográfico Militar (IGM): 373 pp. Santiago.
- CARI, L., GONZALEZ, R., OSORIO, K., PIZARRO, A., ROA, J., SUAZO, J., TAPIA, A., WEIBEL, L. (2002). Geología de los cuadrángulos Coronel y Santa Juana entre los 37° 15' y 37° 00' latitud sur, y los 73° 15' y 72° 45' longitud oeste. Universidad de Concepción. (Inédito).
- CLOERN J.E. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series* 210: 223-253.
- CARPENTER, S., MOONEY, A., CAPISTRANO, D., DEFRIES, R., DIAZ, S., DIETZ, T., DURAIAPPAH, A., OTENG-YEBOAH, A., PEREIRA, H., PERRINGS, C., REID, W., SARUKHAN, J., SCHOLES, R., WHYTE, A. (2009). Science for managing ecosystem services: beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *106*:1305-1312.
- CATALÁN, C. (2023). Hidrogeología y Balance Hídrico de la Laguna de Laja, región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción.
- CHOW, V.; MAIDMENT, D. & MAYS, L. 1993. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, 580 pp.
- CIREN. (1999). Descripción de suelos materiales y símbolos, Estudio Agrologico VIII Región. Gobierno de Chile.
- CIREN, (2021). Recursos Naturales Comuna de Santa Juana. Gobierno de Chile.
- Dirección General de Aeronáutica Civil, (2023). Reporte Anual de la Evolución del Clima en Chile. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/05/reporteEvolucionClima2022.pdf>
- EQUIS CULTURA. (2023). Actualización Plan Municipalidad de Cultura Santa Juana PMC 2022-2027.
- FIGEROA, G. (2020). CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DE TALCAHUANO ENTRE LOS 36°44' - 36°49' S Y 73°00' - 73°08' W, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE. Universidad de Concepción.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307-6327.
- ILEC, International Lake Environment Committee. 2007. Integrated Lake Basin Management: An introduction. International Lake Environment Committee Foundation: Kusatsu, Japan. 85pp.
- INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES (IDE). (2015). Catastro y Actualización de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra de la Región del Biobío (VIII).

LÉPEZ, L. (2002). Análisis Estructural del Triásico de Santa Juana al sur y occidente del Río Bío-Bío, VIII Región, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito).

PEÑA, F. (2021). Geomorfología de la ribera norte del río Biobío en su curso inferior. Limitaciones y potencialidades del área. Revista De Geografía Norte Grande, (22), 27–33. Recuperado a partir de <https://www.cuadernos.info/index.php/RGNG/article/view/41755>

Saxton *et al.*, (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Amer. J. 50(4):1031-1036

Sanders, L. L. (1998). A manual of field hydrogeology. Prentice-Hall, Inc., 113 Sylvan Ave. Englewood Cliffs NJ 07632 USA. 381, 1998.

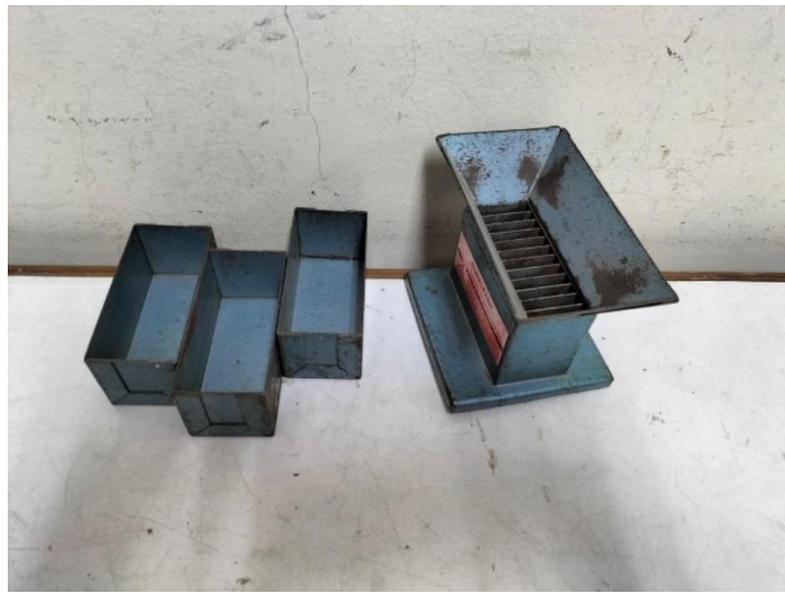
SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) 1972. National Engineering Handbook, section 4. Hydrology, U. S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.

ORREGO, R., (2021). Análisis De Las Respuestas De Distintas Coberturas Arbóreas (Nativas Y Forestales) A Episodios De Sequía En La Zona Centro sur De Chile (34°S - 39°S) Durante Los Años 2000–2018.

## ANEXOS

**Anexo 1:** Imágenes tamizado y equipo de tamizaje utilizada en el laboratorio de sedimentología del DCT.







Anexo 2: Tablas de análisis granulométrico de muestras P12P9M1 y P13M2.

P12P9M1

**Laboratorio de Sedimentología  
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Muestra	
Fecha	
Procedencia	
Peso inicial	75,56
Factor de Cuarteo	
Metodología	Tamizado en seco

Milímetros	PHI	Malla	Peso g	%	% Acumulado
64	-6,0				
16	-4,0				
4,00	-2,0	5			
2,83	-1,5	7			
2,00	-1,0	10			
1,41	-0,5	14	0,15	0,20	
1,00	0,0	18	0,41	0,55	
0,71	0,5	25	0,93	1,28	
0,500	1,00	35	2,91	3,91	
0,350	1,50	45	6,50	8,73	
0,250	2,00	60	10,44	14,08	
0,177	2,50	80	12,14	16,30	
0,125	3,00	120	13,21	17,74	
0,088	3,50	170	10,20	12,80	
0,063	4,00	230	9,12	12,25	
< 0,063	>4,0	Fango	8,32	11,17	
			74,48		

**Tabla de resumen**

	Peso gr.	% Porcentaje	Porcentaje acumulado
Grava	—		
Arena	66,16	88,83	
Fango	8,32	11,17	

P13M2 Tiene grava

Arena 596,92 / 73,96  
 Arena tamizada 594,94

Departamento Ciencias de la Tierra  
 Laboratorio de Sedimentología  
 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Muestra	
Fecha	
Procedencia	
Peso inicial	130,47
Factor de Cuarteo	8,07
Metodología	

Malla	Milímetros	PHI	Peso gr.	Peso real	%	% Acumulado
	64	-6,0				
	16	-4,0				
5	4,00	-2,0	94,67	43,82	13,05	
7	2,83	-1,5	17,82	8,04	2,46	
10	2,00	-1,0	21,06	9,54	2,90	
14	1,41	-0,5	5,43	2,51	0,77	
18	1,00	0,0	10,55	4,81	1,48	
25	0,71	0,5	12,03	5,53	1,68	
35	0,500	1,0	16,17	7,35	2,26	
45	0,35	1,5	9,02	4,11	1,25	
60	0,250	2,0	5,59	2,54	0,78	
80	0,177	2,5	4,21	1,91	0,58	
120	0,125	3,0	3,64	1,66	0,51	
170	0,088	3,5	2,82	1,28	0,39	
230	0,063	4	2,13	0,97	0,30	
>230	0,0039	8	3,36	1,52	0,46	
				72,49		

Tabla de resumen

	Peso gr.	% Porcentaje	Porcentaje acumulado
Grava	155,55	18,41	
Arena	564,82	77,85	
Fango	27,12	3,74	

Anexo 3: Granulometría de las series de suelo del área de Santa Juana.

Serie	Profundidad cm	Granulometría			% grano arena	% grano limo	% grano arcilla
		Arena	Limo	Arcilla			
Arenales	0-17	95.6	4.4	0.1	97.92	2.08	0.10
	17-36	100	0	0.1			
San Esteban	0-26	57.1	23.8	19.1	54.08	20.37	25.55
	26-62	51.9	17.9	30.2			
Ríos	0-30	88.83	5.9	5.9	92.13	3.94	3.94
	0-30	95.42	2.29	2.29			

**Anexo 4:** Características Hidráulicas de las series de suelo del sector de Santa Juana.

Características Hidráulicas	Series de suelo		
	Arenales	San Esteban	Ríos
Punto de Marchitez (cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup> suelo)	0.02	0.15	0.05
Capacidad de campo (cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup> suelo)	0.08	0.26	0.12
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.3	1.4	1.75
Saturación (cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup> suelo)	0.13	0.47	0.34
Conductividad hidráulica saturada (cm/hr)	9.82	0.42	10.16
Agua disponible (cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup> suelo)	0.06	0.11	0.07

Anexo 5: Imágenes de Terreno 09 de noviembre de 2023.



**Anexo 6:** Tabla de puntos de terrenos realizados el día 12/09 y 09/11 del 2023.

Punto	Coordenada E	Coordenada N	Elevación [m s.n.t.]	Profundidad puntera [m]	Nivel piezometrico [m]	Descripción
P1L1	682622.76	5884261.32	68.7	-	-	Punto lado sur de la laguna, se observa la abundante eutroficación
P2P1	682571.13	5884234.75	74.5	14	-	Puntera cercana al lado sur de la laguna
P3P2	682400.48	5884446.76	75.7	-	-	Puntera Hospital de Santa Juana
P4L2	682681.61	5884349.07	68	-	-	Punto lado norte de la laguna se observa menor cantidad de algas
P5	682817.25	5884450.64	71.1	-	-	Afloramiento de roca altamente meteorizada con presencia de estratificación, color negro oscuro en superficie fresca de grano muy fino con una actitud de 28/060 se identifica como posible lutita
P6P3	682593.43	5884525.45	66.3	17	-	-
P7P4	682260.64	5884277.86	79.2	14	-	-
P8P5	682029.36	5884572.8	78.8	22	9.46	-
P9P6	683305.66	5883478.18	82	20	2	-
P10P7	683059.87	5884054.85	76.4	-	-	-
P11R1	683045.08	5884154.63	74.4	-	-	-
P12P8	682426.07	5884535.33	65.86		3.96	Punto detrás del hospital llegando al límite de la calle, se extrae muestra de calicata M1 para tamizaje, se observa principalmente 30 cm de arenas negras homogénea con una buena selección, cubiertas por 5 cm de cubierta vegetal. Calicata se profundiza hasta 50 cm con solo arena
P13R3	683047.08	5884169.09	56.03			Rivera izquierda río Biobío, nivel del río cambio 5 m desde agosto, a aproximadamente 10 m del punto se extrae la muestra M2 que corresponde a una zona de inundación, excavación de 14 cm deja ver una cubierta vegetal de 5 cm y sedimentos con clastos angulosos con granulometría mixta con clastos de roca de 4 cm entre 5 a 10 cm de profundidad capa de color café rojizo duro y compacto difícil de romper probablemente tosca
P14 P9	682507.09	5884594.9	70.15		1.4	Punto de las piscinas de Santa Juana, donde por el sector derecho mirando hacia el río se encontraba un estero subterráneo. Hacia el sector del río ESSBIO realizo 8 punteras para poder dar agua a la comuna.
P14P10	682507.09	5884594.9	70.15		3.43	

**Anexo 7:** Tabla de datos de precipitaciones y temperaturas máxima mensuales entre 1989 y 2019.

<b>FECHA</b>	<b>P(mm/mes)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Fecha</b>	<b>P (mm/mes)</b>	<b>T (°C)</b>
01-01-1989	26.656288	25.1206753	01-04-1992	173.793092	15.2468485
01-02-1989	11.6648655	26.2351141	01-05-1992	642.863026	10.6057265
01-03-1989	31.598245	21.599331	01-06-1992	405.536539	8.65507405
01-04-1989	13.3341491	18.2407263	01-07-1992	147.156463	7.92083493
01-05-1989	80.9094897	14.4793473	01-08-1992	148.045998	12.0696638
01-06-1989	387.132575	11.6784237	01-09-1992	151.818094	13.880531
01-07-1989	262.765246	10.0659153	01-10-1992	114.750952	15.1314142
01-08-1989	246.181628	10.4907875	01-11-1992	32.6435227	19.801878
01-09-1989	55.0277317	14.3650309	01-12-1992	83.1496787	20.5365308
01-10-1989	64.1010473	17.818515	01-01-1993	31.8865664	23.6057947
01-11-1989	21.7329564	21.1220333	01-02-1993	0.9514882	25.8056025
01-12-1989	142.803231	21.0509269	01-03-1993	53.809406	22.8810388
01-01-1990	20.2950997	24.9408826	01-04-1993	182.342697	16.2565228
01-02-1990	42.9265714	25.0634747	01-05-1993	456.551777	10.4117587
01-03-1990	120.828011	21.1024021	01-06-1993	501.096577	10.1730731
01-04-1990	133.279429	15.8099679	01-07-1993	293.26036	8.81977829
01-05-1990	207.948649	12.454628	01-08-1993	244.005817	12.0881135
01-06-1990	189.61484	10.75678	01-09-1993	57.7232896	14.0201295
01-07-1990	153.790161	9.97100922	01-10-1993	111.344517	16.9234545
01-08-1990	207.241202	12.7856775	01-11-1993	61.1737547	18.3573748
01-09-1990	266.693581	13.9593615	01-12-1993	77.0476043	21.6852691
01-10-1990	59.712917	16.9897189	01-01-1994	21.3258402	25.0791277
01-11-1990	62.1490637	19.5940618	01-02-1994	14.9575155	23.8287995
01-12-1990	19.8512988	21.8271262	01-03-1994	39.3592871	23.520777
01-01-1991	26.8632511	23.4096444	01-04-1994	230.934922	16.4457645
01-02-1991	8.5690449	24.8346055	01-05-1994	171.661106	13.5472148
01-03-1991	34.2109615	22.3076804	01-06-1994	378.500999	10.7108294
01-04-1991	213.105922	16.8691335	01-07-1994	377.778805	9.76189253
01-05-1991	589.2228	13.5399832	01-08-1994	63.3426303	11.0184321
01-06-1991	209.721176	10.7958776	01-09-1994	252.984998	14.0692398
01-07-1991	306.830621	9.17929568	01-10-1994	137.884264	15.6232864
01-08-1991	108.417238	11.1796708	01-11-1994	67.2257974	19.3966945
01-09-1991	161.090472	13.8459639	01-12-1994	88.1639389	22.1069428
01-10-1991	85.342684	16.8192646	01-01-1995	14.2448619	23.2546659
01-11-1991	48.4501555	19.7979812	01-02-1995	1.48719738	24.5008238
01-12-1991	151.495021	18.8007422	01-03-1995	44.0526438	21.5511755
01-01-1992	0.79413086	25.7193762	01-04-1995	204.257421	17.243458
01-02-1992	37.0285039	23.0596933	01-05-1995	89.8060894	15.0804747
01-03-1992	77.8371301	22.3802758	01-06-1995	482.847043	9.89879127

<b>FECHA</b>	<b>P(mm/mes)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>FECHA</b>	<b>P(mm/mes)</b>	<b>T (°C)</b>
01-07-1995	414.21755	7.02097841	01-11-1998	30.0277671	20.579222
01-08-1995	363.897511	9.32216915	01-12-1998	35.0461578	23.2123869
01-09-1995	61.3271709	14.597385	01-01-1999	17.1363419	25.8181704
01-10-1995	100.461246	15.8786015	01-02-1999	29.2936221	24.9979699
01-11-1995	12.5707724	20.362412	01-03-1999	32.2347749	20.6320093
01-12-1995	0.20209997	26.1009604	01-04-1999	44.5076587	17.9200291
01-01-1996	17.4694731	23.3120437	01-05-1999	216.447012	13.6699627
01-02-1996	41.9567638	23.221599	01-06-1999	422.04797	10.0171519
01-03-1996	86.1338088	22.0727574	01-07-1999	119.722286	9.42862886
01-04-1996	106.174235	15.9412845	01-08-1999	309.075894	11.2889791
01-05-1996	143.40566	13.9467918	01-09-1999	261.544711	13.1569961
01-06-1996	198.653889	10.3551881	01-10-1999	32.9862868	17.9588174
01-07-1996	68.1951291	11.6622854	01-11-1999	23.8270987	20.5853404
01-08-1996	244.496852	11.711416	01-12-1999	17.1204908	22.7743757
01-09-1996	59.6999961	14.9041218	01-01-2000	25.3001942	23.3958385
01-10-1996	58.2471133	17.2537862	01-02-2000	167.019172	21.7708299
01-11-1996	70.2668866	20.2492787	01-03-2000	35.7732764	20.0976861
01-12-1996	26.5068037	21.880538	01-04-2000	90.5095461	17.4622895
01-01-1997	49.37026	23.6247344	01-05-2000	91.261425	13.1230993
01-02-1997	40.7289265	23.6543283	01-06-2000	726.488486	9.44630252
01-03-1997	9.76491226	23.991774	01-07-2000	151.225914	9.01955633
01-04-1997	403.246263	18.9129368	01-08-2000	236.795604	10.4442137
01-05-1997	186.454523	14.877084	01-09-2000	277.06613	12.3049244
01-06-1997	535.086829	9.47725158	01-10-2000	60.967784	17.0805236
01-07-1997	296.187682	10.4359092	01-11-2000	62.9488229	18.7250618
01-08-1997	172.075991	12.615886	01-12-2000	59.1350646	22.0962098
01-09-1997	205.782289	13.6219306	01-01-2001	103.424262	22.9888319
01-10-1997	207.868926	14.3730399	01-02-2001	15.1828518	24.8333658
01-11-1997	107.732148	17.7795088	01-03-2001	62.8570065	21.685063
01-12-1997	47.2063288	21.4600914	01-04-2001	67.2348908	16.7470217
01-01-1998	8.36706697	24.0708803	01-05-2001	469.279131	12.1701157
01-02-1998	17.4742786	24.7149487	01-06-2001	323.00618	10.3559829
01-03-1998	21.9240639	21.7165125	01-07-2001	633.119289	9.5053395
01-04-1998	79.1250966	17.1689798	01-08-2001	233.913688	11.9759651
01-05-1998	131.639741	15.2580896	01-09-2001	42.3094589	13.7973467
01-06-1998	131.814888	11.2739653	01-10-2001	32.7114823	18.3335869
01-07-1998	131.439576	10.7458912	01-11-2001	70.3178182	18.4083022
01-08-1998	145.696769	11.2558888	01-12-2001	0.02617368	25.6146169
01-09-1998	83.406768	13.5523141	01-01-2002	20.2853514	24.8827381
01-10-1998	4.1205012	19.6223613	01-02-2002	101.97697	25.5327283

<b>FECHA</b>	<b>P(mm/mes)</b>	<b>T (°C)</b>
01-03-2002	170.516904	19.3053375
01-04-2002	121.360382	15.3594416
01-05-2002	269.257566	12.8730506
01-06-2002	244.055842	8.73497828
01-07-2002	189.32071	10.2041042
01-08-2002	403.242089	11.3270972
01-09-2002	162.976132	12.9617703
01-10-2002	359.396804	14.4988314
01-11-2002	133.827683	17.3899789
01-12-2002	49.2639785	21.6565837
01-01-2003	32.5772419	24.0781644
01-02-2003	3.81052712	24.1331969
01-03-2003	19.8547137	24.1677471
01-04-2003	34.6089858	17.8775033
01-05-2003	99.0578424	13.862869
01-06-2003	559.773221	11.2224554
01-07-2003	198.256388	9.4655155
01-08-2003	110.13606	11.9067005
01-09-2003	194.181719	13.8609573
01-10-2003	120.478742	17.2725273
01-11-2003	105.064121	19.6119341
01-12-2003	63.125816	19.826047
01-01-2004	3.05750421	25.9914459
01-02-2004	20.1590333	25.6753168
01-03-2004	86.9262825	22.6199582
01-04-2004	252.683233	15.876305
01-05-2004	31.2060177	14.3134901
01-06-2004	401.283516	10.4968433
01-07-2004	326.267226	9.74935486
01-08-2004	122.533869	12.1361319
01-09-2004	149.837811	14.3239879
01-10-2004	163.121275	15.1471698
01-11-2004	125.701845	18.763096
01-12-2004	38.5179914	21.6447599

**Anexo 8:** Numero de Curvas para los usos de suelo con respecto a los grupos hidrológicos.

Uso de suelo	Condiciones hidrológicas para la infiltración	Número de Curvas			
		Grupo Hidrológico del Suelo			
		A	B	C	D
Bosques	Media	57	73	82	86
Praderas y matorrales	Buena	30	48	65	73
Terreno Agrícola		72	81	88	91
Área desprovista de vegetación	Pobres	45	66	77	83
Área urbana	20%	51	68	79	84
	65%	77	85	90	92
Cuerpos de agua	-	100	100	100	100