



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Geofísica

Habilitación Profesional

**PRIORIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO BÍO-BÍO PARA
IDENTIFICAR ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA:
UN ENFOQUE INTEGRADO DE ANÁLISIS MORFOMÉTRICO,
MULTICRITERIO Y MACHINE LEARNING MEDIANTE
TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN, SIG, AHP Y RANDOM
FOREST**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de Geofísica

Por: Scarlett Moraga Orellana
Profesor Guía: Dr. Rodrigo Abarca del Río

Abril, 2024
Concepción, Chile

© Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Para Sergio y Lola

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a las personas que hicieron posible la culminación de esta investigación.

En primer lugar, agradezco a mi querida madre, Rosa, quien ha sido mi fuente de apoyo e inspiración. Su constante sacrificio ha sido fundamental en mi trayectoria académica y personal. Gracias por estar presente y apoyarme en mis decisiones.

También, agradecer a mi familia (MO,MJO,NO,CM,PA) por siempre tener una palabra de aliento, confiar en mis capacidades y motivarme a seguir adelante.

A mi novio, Sergio, quiero agradecer por tu paciencia y comprensión en los momentos más desafiantes de este proceso. Tu amor y apoyo incondicional han hecho esta experiencia más significativa. Gracias por vivir esta experiencia conmigo.

Por último, expreso mi sincero agradecimiento al Dr. Rodrigo Abarca, mi guía y mentor durante esta investigación. Su experiencia y sabiduría fueron fundamentales en la orientación de este trabajo.

Índice

1	Introducción	12
2	Capítulo 1	15
2.1	Objetivos e Hipótesis	15
2.1.1	Hipótesis	15
2.1.2	Objetivos.....	16
3	Capítulo 2	17
3.1	Marco Teórico	17
3.1.1	Análisis Morfométrico	17
3.1.2	Análisis Multicriterio y AHP	29
3.1.3	Machine Learning (Random Forest)	34
4	Capítulo 3.....	40
4.1	Zona de Estudio.....	40
4.1.1	Cuenca del Río Bío-Bío	40
4.1.2	Subcuencas (SW).....	50
4.2	Metodología.....	51
4.2.1	Base de datos	51
4.2.2	Red Hídrica y Análisis Morfométrico	53
4.2.3	Priorización de subcuencas	56
4.2.4	Análisis multicriterio: AHP.....	57
4.2.5	Machine Learning (Random Forest)	65
5	Capítulo 4.....	67
5.1	Resultados y Discusiones	68
5.1.1	Red Hídrica.....	68
5.1.2	Análisis Morfométrico	72
5.1.3	Análisis multicriterio.....	97
5.1.4	Machine Learning (Random Forest)	120

5.1.5	Comparación de resultados: AHP vs Machine Learning	128
6	Capítulo 5	130
6.1	Conclusiones	130
6.2	Limitaciones y Trabajo Propuesto	134

Índice de figuras

Figura 1: Algoritmo de Random Forest. Fuente: Adaptado de ‘Quality: Analítica Predictiva 2: Regresión Multivariable con Random Forest’	38
Figura 2: Ubicación cuenca del río Biobío, Chile. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 3: Red hidrográfica del río Biobío. En azul se muestra el río Biobío y en verde sus principales afluentes. Fuente: Valdovinos & Parra (2006).	44
Figura 4: Acuíferos definidos para la cuenca del río Biobío y captaciones subterráneas al año 2012. Fuente: Extraído de DGA (2012a).	47
Figura 5: Metodología aplicada para el cálculo de parámetros morfométricos. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 6: Metodología aplicada para la obtención de zonas potenciales para recarga hídrica mediante AHP. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 7: Metodología aplicada en el modelo de Random Forest. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 8: Red hidrográfica de primer orden de la cuenca del río Biobío. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 9: Red hidrográfica de segundo y tercer orden de la cuenca del río Biobío. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 10: Red hidrográfica de la cuenca del río Biobío con sus respectivos números de orden. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 11: Priorización de la cuenca del río Bío-Bío por subcuencas. Fuente: Elaboración propia.	95
Figura 12: Mapa geológico de la cuenca del río Bío-Bío. Recuperado y modificado de Schenk et al., (1999).	99

Figura 13: Mapa de la geomorfología de la cuenca del río Bío-Bío. Recuperado de Christoph Albers,2015.	101
Figura 14: Mapa de textura de suelo de la cuenca del río Bío-Bío. Recuperado y modificado de FAO y Unesco, 1961.	103
Figura 15: Mapa de pendiente de la cuenca del río Bío-Bío. Fuente: Elaboración propia.	105
Figura 16: Mapa de la densidad del drenaje de la cuenca del río Bío-Bío. Fuente: Elaboración propia.	107
Figura 17: Mapa de uso de suelo de la cuenca del río Bío-Bío. Recuperado y modificado de Karra, Kontgis, et al., (2021).	110
Figura 18: Mapa de precipitación acumulada desde el año 2000 a 2020. Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 19: Mapa de zonas potenciales para recarga hídrica para la cuenca del río Bío-Bío.....	119
Figura 20: Volumen de agua en las primeras 4 capas del suelo en la cuenca del río Biobío. Fuente: Elaboración propia.....	122
Figura 21: Zonas potenciales para la recarga hídrica en la cuenca del río Biobío considerando las precipitaciones, mediante la aplicación del modelo de Random Forest. Fuente: Elaboración propia.....	125
Figura 22: Zonas potenciales para la recarga hídrica en la cuenca del río Biobío sin considerar la precipitación, mediante la aplicación del modelo de Random Forest. Fuente: Elaboración propia.	127

Índice de tablas

Tabla 1: Escala fundamental de Saaty, 1980.	31
Tabla 2: Índice de consistencia aleatorio (RI). Extraído de Saaty (1980). ..	34
Tabla 3: Subcuencas río Biobío. Información extraída de “Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile”, MOP, 2014.	50
Tabla 4: Detalle de la base de datos utilizada en el estudio.....	51
Tabla 5: Interpretación asignada para cada clase. RH significa recarga hídrica.....	63
Tabla 6: Características lineales de la Cuenca del río Bío-Bío.....	81
Tabla 7: Parámetros de área de la Cuenca del río Bío-Bío.....	82

Tabla 8: Parámetros de relieve de la Cuenca del río Bío-Bío.....	82
Tabla 9: Características geométricas por subcuenca.	82
Tabla 10: Orden de las corrientes por subcuenca con su respectivo número de segmentos.	83
Tabla 11: Orden de las corrientes por subcuenca con su respectiva longitud de corriente.....	84
Tabla 12: Orden de las corrientes por subcuencas con su respectiva longitud media de corriente.	85
Tabla 13: Relación de longitud de corriente por subcuenca.	85
Tabla 14: Relación de bifurcación por subcuenca.	86
Tabla 15: Parámetros morfométricos de forma y área calculados para cada subcuenca.	87
Tabla 16: Aspectos de relieve calculados para cada subcuenca.	88
Tabla 17: Aspectos del gradiente de cada subcuenca.	89
Tabla 18: Priorización de la cuenca del río Bío-Bío por subcuenca basada en el cálculo de parámetros morfométricos.	92
Tabla 19: Matriz de comparación por pares para AHP.	114
Tabla 20: Matriz normalizada para AHP.	114
Tabla 21: Índice de consistencia, consistencia aleatoria y relación de consistencia obtenidos mediante AHP.....	115
Tabla 22: Clases asignadas para cada parámetro según su importancia en la recarga hídrica. La clasificación de 1 es la menos importante y la clasificación de 7 es la más importante.....	115
Tabla 23: Importancia relativa de los parámetros influyentes en el proceso de recarga hídrica obtenidos mediante la aplicación de Random Forest...	123

Resumen

La cuenca del río Bío-Bío enfrenta una crisis hídrica agravada por una prolongada mega sequía y desafíos en la gestión del recurso. Esta investigación se enfoca identificar y priorizar zonas potenciales para la recarga hídrica, empleando un enfoque integrado que combina técnicas avanzadas como el Análisis Morfométrico, el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP), y el Machine Learning mediante Random Forest (RF), respaldado por teledetección y Sistemas de Información Geográfica.

En este contexto, se ha delimitado y caracterizado la cuenca del río Biobío para identificar áreas potenciales para la recarga de agua subterránea. Mediante el cálculo de parámetros morfométricos, se ha logrado una comprensión detallada de la topografía y las características fisiográficas de la cuenca, lo que ha permitido priorizar la gestión del recurso hídrico.

La aplicación del AHP ha posibilitado la evaluación y ponderación de múltiples criterios, facilitando la identificación de áreas con alto y bajo potencial para la recarga hídrica. La inclusión de RF ha ofrecido una perspectiva más profunda al revelar patrones que no son evidentes mediante métodos convencionales.

Los resultados obtenidos subrayan el potencial de las metodologías avanzadas para mejorar significativamente la precisión en la identificación de zonas prioritarias. Esta combinación de análisis morfométrico, AHP y RF emerge como herramientas poderosas para la gestión avanzada de cuencas hidrográficas, proporcionando no solo una localización de áreas potenciales para recarga hídrica, sino también una base científica sólida para decisiones informadas y sostenibles en la gestión de recursos hídricos.

Palabras clave: Cuenca del río Bío-Bío, Recarga Hídrica, Análisis Morfométrico, Análisis Jerárquico de Procesos, Machine Learning, Random Forest, Teledetección, Sistemas de Información Geográfica, Gestión de Recursos Hídricos.

Abstract

The Bío-Bío River basin is facing a water crisis exacerbated by a prolonged mega-drought and challenges in resource management. This research focuses on identifying and prioritizing potential areas for water recharge, employing an integrated approach that combines advanced techniques such as Morphometric Analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP), and Machine Learning through Random Forest (RF), supported by remote sensing and Geographic Information Systems.

In this context, the Bío-Bío River basin has been delimited and characterized to identify potential areas for groundwater recharge. Through the calculation of morphometric parameters, a detailed understanding of the topography and physiographic characteristics of the basin has been achieved, enabling the prioritization of water resource management.

The application of AHP has allowed for the evaluation and weighting of multiple criteria, facilitating the identification of areas with high and low potential for water recharge. The inclusion of RF has provided a deeper perspective by revealing patterns that are not evident through conventional methods.

The results obtained highlight the potential of advanced methodologies to significantly improve accuracy in identifying priority areas. This combination of morphometric analysis, AHP, and RF emerges as powerful tools for advanced watershed management, providing not only a location of potential areas for water recharge but also a solid scientific basis for informed and sustainable decision-making in water resource management.

Keywords: Bío-Bío River Basin, Water Recharge, Morphometric Analysis, Analytic Hierarchy Process, Machine Learning, Random Forest, Remote Sensing, Geographic Information Systems, Water Resources Management.

1 Introducción

El agua dulce, un recurso esencial para la vida y el desarrollo sostenible, se encuentra en una situación crítica y amenazante. A pesar de que el agua cubre aproximadamente el 71% de la superficie terrestre, apenas el 2.5% es dulce, y de esta fracción, menos del 1% está disponible para el consumo humano y otros usos (Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988). Esta escasez se ve agravada por factores como el crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización, la expansión agrícola y el cambio climático (Kundzewicz, Z.W., Döll, P., 2009). En este escenario, las aguas subterráneas, almacenadas en acuíferos, emergen como una fuente crucial, representando aproximadamente el 30% de las extracciones totales de agua dulce a nivel mundial (Siebert, S et al., 2010; Famiglietti, J.S., 2014).

Sin embargo, estas reservas subterráneas enfrentan amenazas. La falta de comprensión sobre las áreas críticas de recarga y la carencia de metodologías efectivas para su identificación son preocupaciones primordiales. Las actividades humanas como la agricultura, la urbanización y la industria perturban estas áreas de recarga, erosionando, compactando, impermeabilizando y dejando el suelo expuesto, lo que reduce la recarga de los acuíferos y afecta su calidad (Gleeson, T, et al., 2012; Gorelick, S.M, et al., 2015; Richey, A.S, et al., 2015).

Para abordar estos desafíos de manera efectiva, es crucial comprender el potencial de recarga de los acuíferos e identificar las áreas prioritarias en las cuencas hidrográficas, que representan la base para una gestión integral de los recursos hídricos [Mario Aguirre, 2011; Escenarios Hídricos 2030, 2018]. En Chile, la crisis hídrica adquiere una gravedad particular debido a la prolongada mega sequía que ha persistido durante más de una década. Este problema se hace evidente de forma alarmante en cuencas de gran importancia como la del río Biobío, donde la sobreexplotación y la falta de estudios detallados han provocado una disminución drástica de los niveles de agua (Aguas Subterráneas: Sobreexplotación de un Recurso Hídrico Invisible - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile, s.f; Sanhueza, J.R, 2022).

La cuenca del río Biobío es una de las más grandes e importantes del país, abarcando una extensa área que incluye varias regiones y provincias. Esto la convierte en un recurso hídrico fundamental para el desarrollo económico, social y ambiental de una amplia zona geográfica. La cuenca alberga una diversidad de ecosistemas y comunidades, así como actividades económicas clave como la agricultura, la industria forestal, la generación de energía hidroeléctrica, entre otras. Esto la convierte en un área de gran valor e importancia nacional.

Sin embargo, la cuenca enfrenta una crisis hídrica agravada por una mega sequía que ha persistido por más de una década, que se ha cortado recientemente, pero que tiene muchas probabilidades de continuar. Esto ha provocado una disminución drástica de los niveles superficiales y freáticos de agua, afectando gravemente los diversos usos y la salud de los ecosistemas. La situación crítica de la disponibilidad y calidad del agua en la cuenca del Biobío pone en riesgo el desarrollo sostenible de la región y la seguridad hídrica de sus habitantes. Por lo tanto, abordar los desafíos de gestión de este recurso se vuelve apremiante.

También, hay una falta de estudios detallados sobre la dinámica de las aguas subterráneas en la cuenca. Si bien se reconoce la importancia de las aguas subterráneas como fuente crucial de abastecimiento, existen importantes vacíos en la comprensión de las áreas críticas de recarga y los factores que las controlan. Sin olvidarse que además hay una limitada información sobre la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación y a la sobreexplotación. El conocimiento actual sobre la calidad y cantidad de las aguas subterráneas es insuficiente para una gestión efectiva.

Finalmente hay una escasez de metodologías robustas y efectivas para la identificación de zonas prioritarias de recarga hídrica. Los enfoques convencionales han resultado insuficientes para abordar la complejidad de los procesos de recarga en esta cuenca. Por lo cual hay gran necesidad de herramientas integradas que combinen técnicas avanzadas que tomen en cuenta notablemente la teledetección, que en estas últimas décadas ha presentado avances notables, así como métodos que permitan una visualización clara y transparente de los procesos, mediante sistemas de

información geográfica. Además, cabe destacar que, en esta última década, con la mejora del tiempo computacional, hay procesos de tratamiento de datos que se han vuelto factibles. Hay que tomar en cuenta también los avances en metodologías de categorización, generalmente empleado mediante análisis multicriterio, y realizar una comparación junto con métodos de minería de datos, para abordar de manera integral la gestión de los recursos hídricos subterráneos.

Justamente, para este propósito, en diversas partes del mundo se han empleado técnicas avanzadas como el Análisis Morfométrico, el cual proporciona información valiosa sobre la topografía, geología y potencial de agua subterránea (Horton, 1932, 1945). El Análisis Morfométrico, por su naturaleza detallada, ofrece una visión profunda de las características físicas de la cuenca, permitiendo una evaluación precisa de su capacidad para soportar la recarga hídrica. Esta técnica, aplicada por primera vez en la cuenca del río Biobío, promete descubrimientos significativos sobre la dinámica del agua subterránea en la región.

Considerando los aspectos mencionados anteriormente, este trabajo tiene como objetivo principal delimitar y caracterizar la cuenca del río Biobío mediante un Modelo Digital de Elevación (DEM). A partir de este análisis, se empleará un enfoque de Análisis Multicriterio, centrado en el Análisis Jerárquico de Procesos, con el fin de identificar las zonas potenciales para la recarga hídrica.

Además, para enriquecer aún más el análisis y proporcionar una comparación con las demás metodologías aplicadas, se emplearán metodologías de Machine Learning en la cuenca con el mismo fin. Destacando la importancia de esta inclusión, el uso de técnicas como Random Forest en el estudio permite una exploración más profunda de los datos y una capacidad predictiva que puede complementar y mejorar los resultados obtenidos mediante técnicas tradicionales. Esta integración de metodologías avanzadas mediante el uso de Machine Learning (Random Forest) en el estudio no solo enriquece la investigación, sino que también abre nuevas perspectivas para la comprensión y gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Biobío y en otras regiones enfrentadas a desafíos similares.

El impacto esperado de este trabajo es doble. Por un lado, se espera que los resultados informen y mejoren las estrategias de gestión de los recursos hídricos en la cuenca, proporcionando una base científica sólida para la toma de decisiones. Además, el enfoque metodológico y los hallazgos podrían servir como referencia para futuras investigaciones en otras cuencas hidrográficas enfrentadas a desafíos similares de escasez de agua y gestión de recursos hídricos. De esta manera, el trabajo no solo contribuye al conocimiento científico específico de la cuenca del río Biobío, sino que también establece un precedente importante para la gestión y conservación del agua en regiones similares.

2 Capítulo 1

2.1 Objetivos e Hipótesis

2.1.1 Hipótesis

Basándonos en la premisa de que las características morfométricas y topográficas pueden influir significativamente en la dinámica de las aguas subterráneas, postulamos que una integración detallada de nuevas bases de datos corroboradas o provenientes de misiones satelitales, así como nuevas metodologías morfométricas, permitirá un mapeo preciso de zonas con alto potencial de recarga hídrica. Este enfoque se fundamenta en investigaciones a nivel mundial que demuestren la relación entre la morfometría de una cuenca y sus capacidades de recarga. Además, la implementación de métodos avanzados de categorización puede enriquecer nuestro entendimiento y ofrecer perspectivas más profundas sobre la gestión y conservación del recurso hídrico. Al adaptar estas metodologías al contexto único de la cuenca del río Biobío por primera vez, se abre la posibilidad de aplicar un enfoque más robusto y específico que puede ser crucial para las estrategias de sostenibilidad tanto regional, como a nivel chileno.

2.1.2 Objetivos

2.1.2.1 Objetivo General

Objetivo 1: Priorizar la cuenca del río Biobío mediante Análisis Morfométrico. Este objetivo se propone como un paso crítico para entender cómo las características físicas específicas de la cuenca influyen en la recarga de acuíferos, utilizando técnicas avanzadas para una evaluación comprensiva.

Objetivo 2: Mapeo de las zonas potenciales para la recarga hídrica utilizando AHP. El uso del AHP permitirá ponderar de manera efectiva los diversos criterios que afectan la recarga hídrica, desde aspectos geológicos hasta influencias humanas, garantizando una selección objetiva de áreas prioritarias.

Objetivo 3: Aplicar técnicas de Machine Learning (ML), específicamente aquella de Random Forest (RF) para mejorar la precisión en la identificación de zonas de recarga hídrica. La implementación de RF se justifica por su capacidad para analizar y extraer patrones completos de grandes conjuntos de datos, superando las limitaciones de los métodos analíticos tradicionales.

2.1.2.2 Objetivos Específicos

1. **Delimitar y caracterizar la cuenca y subcuencas del río Biobío** para obtener su red hídrica y calcular parámetros morfométricos. La delimitación precisa es fundamental para la aplicación correcta de las técnicas de análisis y asegura la relevancia de los resultados obtenidos.
2. **Priorizar las subcuencas del río Biobío** mediante la evaluación y puntuación de los parámetros morfométricos. Este enfoque proporcionará una clasificación objetiva basada en el potencial de recarga, enfocando los esfuerzos de conservación y gestión en las áreas más críticas.
3. **Identificar y generar mapas de los diversos criterios que influyen en la recarga hídrica**, seguido por la creación de una matriz de comparación por pares. Esta metodología asegura que todos los

factores relevantes sean considerados en el análisis, promoviendo una comprensión integral de las condiciones de recarga.

4. **Utilizar un Análisis Jerárquico de Procesos** para generar un mapa de clasificación de las zonas potenciales para la recarga hídrica en la cuenca del río Biobío. La integración de AHP subraya nuestro compromiso con un enfoque metodológico riguroso, facilitando la identificación de áreas prioritarias de manera justificada y transparente.
5. **Utilizar la humedad del suelo como variable objetivo y los criterios influyentes en la recarga hídrica como predictores mediante metodologías de RF** para generar un mapa de las zonas potenciales de recarga hídrica en la cuenca a modo de comparación y verificación con las demás metodologías aplicadas.

3 Capítulo 2

Este capítulo presenta el fundamento teórico necesario para comprender las metodologías y técnicas aplicadas en esta investigación. Se aborda desde el análisis morfométrico, pasando por los avances en teledetección y sistemas de información geográfica (SIG), hasta llegar al análisis multicriterio mediante un Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y luego mediante metodologías de Machine Learning, que utiliza una técnica reconocida y robusta el Random Forest. La selección de estos enfoques se justifica por su relevancia en la evaluación de los recursos hídricos subterráneos y su potencial para mejorar las estrategias de gestión en la cuenca del río Biobío.

3.1 Marco Teórico

3.1.1 Análisis Morfométrico

El análisis morfométrico es una herramienta crucial para evaluar los recursos de agua subterránea, la hidrología y la configuración fisiográfica de una cuenca mediante el estudio de las formas de la tierra y los sistemas de drenaje

(Rajasekhar, Raju & Raju, 2020). Corresponde a una descripción cuantitativa de la cuenca de drenaje mediante el cálculo de parámetros lineales, de forma y de relieve. Entre ellos se encuentra el orden de corriente (S_o), la relación de bifurcación (B), la relación de textura, el factor de forma (F), la textura del drenaje (T), etc. Estos parámetros son esenciales para identificar y determinar zonas con potencial de agua subterránea y áreas de alto riesgo de erosión, lo que es crucial para implementar prácticas de prevención y de gestión del suelo y priorizar cuencas para una gestión efectiva de los recursos hídricos (Choudhari, Gaurav, Sudhir & Sapana, 2018).

Los últimos avances en teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) han mejorado la precisión en la extracción de parámetros morfométricos mediante modelos de elevación digital (DEM) de alta resolución, que ofrecen una forma rápida, precisa, actualizada y rentable de realizar análisis de cuencas fluviales (Maathuis & Wang, 2006; Moore, Grayson, & Ladson, 1991).

Estas herramientas permiten un análisis rápido, actualizado y coste-efectivo de cuencas fluviales, mejorando significativamente la calidad y aplicabilidad de los datos recogidos.

3.1.1.1 Parámetros morfométricos

3.1.1.2 Parámetros lineales

- **Orden de corriente (S_o):** Este es el primer paso en el análisis de una cuenca de drenaje, que corresponde a la designación de órdenes (Strahler, 1957).

Strahler (1964) sostiene que el orden de las corrientes corresponde a una clasificación numérica que se asigna a los diferentes segmentos de un sistema de drenaje en una cuenca hidrográfica. Esta clasificación se utiliza para organizar y caracterizar la jerarquía de la red de drenaje en una cuenca.

Según el método de ordenación, las corrientes de primer orden no tienen afluentes. Cuando se unen dos corrientes de primer orden, se forma un segmento de orden 2; cuando dos corrientes de segundo

orden se unen, se forma un segmento de orden 3 y así sucesivamente hasta que todas las corrientes de la cuenca estén clasificadas (Strahler, 1958).

- **Número de corriente (Nu):** El número total de segmentos de corrientes en cada orden se denomina el número de corriente/arroyos. Nu corresponde al número de corrientes del orden u (Lama & Maiti, 2019). Horton en 1945 definió la ley de números de arroyos la cual indica que el número corrientes de diferentes órdenes en una cuenca tiende a aproximarse estrechamente como una serie geométrica inversa de la cual el primer término es la unidad y la razón es la relación de bifurcación.

El resto de los parámetros, como la Longitud de Corriente (Lu), la Relación de Longitud de Corriente (Rl), y la Densidad de Drenaje (Dd), además de los otros, que detallamos en lo que sigue, ofrecen perspectivas sobre la geomorfología de la cuenca, influenciando directamente en la gestión de los recursos hídricos y la identificación de áreas críticas para la conservación.

- **Longitud de corriente (Lu):** Horton (1945) sugiere que a medida que el orden de corriente disminuye, la longitud de la corriente aumenta. Lo que implica que la longitud de la corriente es máxima para las corrientes de primer orden.
- **Longitud media de la corriente (Lsm):** Según lo descrito por Strahler (1964), corresponde a una medida estadística referida al promedio de las longitudes de todos los segmentos de corriente de un orden específico en una red de drenaje. Matemáticamente, se expresa como:

$$Lsm = \frac{Lu}{Nu}$$

- **Relación de longitud de corriente (Rl):** La relación de longitud de corriente tiene una relación importante con el flujo superficial de descarga y la etapa erosiva de la cuenca (Rajasekhar et al., 2020). Se define como la relación entre la longitud media de las corrientes de un cierto orden y la longitud media de las corrientes del siguiente orden inferior. RL es constante para órdenes sucesivos de corrientes en una cuenca (Horton, 1945). Matemáticamente, se expresa como:

$$Rl = \frac{Lu}{L_{u-1}}$$

Donde:

Lu = longitud media de las corrientes de un cierto orden.

L_{u-1} = longitud media de las corrientes del siguiente orden inferior.

- **Relación de bifurcación (Rb):** La relación de bifurcación describe el patrón de ramificación de una red de drenaje y corresponde a la relación entre el número de segmentos de una corriente de un cierto orden y el del siguiente orden superior en una cuenca (Schumm, 1956). Matemáticamente se expresa como:

$$Rb = \frac{Nu}{N_{u+1}}$$

Schumm observó que, teóricamente, el valor de R debería ser 2 en un sistema perfectamente bifurcado, pero en la naturaleza, valores entre 3 y 5 son más comunes debido a variaciones geológicas y geomorfológicas.

- **Relación media de bifurcación (Rbm):** Corresponde a la media de las relaciones de bifurcación Rb de todos los órdenes (Strahler, 1957). Es una medida del grado de distribución de la red de corrientes de la cuenca (Mesa, L.M, 2006).
- **Densidad de drenaje (D_d):** Horton, en 1932, introdujo la densidad de drenaje (D_d), definiéndola como una medida que indica el grado de desarrollo del drenaje dentro de una cuenca. Matemáticamente se expresa como:

$$D_d = \frac{\sum Lu}{A}$$

Donde:

$\sum Lu$ = longitud total de los segmentos de las corrientes de todos los órdenes.

A = área de la cuenca (km^2).

La D_d refleja la cercanía de los espaciados de los canales y se utiliza para caracterizar el paisaje, el potencial de escorrentía, la tasa de infiltración, las condiciones climáticas y la cobertura vegetal (Choudhari et al., 2018).

En general, la densidad de drenaje se divide en cuatro clases, donde, <2 corresponde a una D_d baja, 2-4 moderada, 4-6 alta y >6 muy alta. Materiales impermeables, relieve montaña y vegetación dispersa conducen a una alta densidad de drenaje (Choudhari et al., 2018).

Por el contrario, una baja densidad de drenaje sugiere estratos permeables con vegetación densa y relieve bajo (Chow, V, 1964).

En cuanto al potencial de recarga hídrica, una baja densidad de drenaje es favorable, mientras que una alta densidad de drenaje conduce a una alta escorrentía superficial (Avinash, Deepika & Jayappa, 2014).

- **Longitud de flujo superficial (L0):** Según Horton (1945), la longitud de flujo superficial se utiliza para describir la distancia del flujo de agua sobre el suelo antes de concentrarse en canales de arroyos definidos. Es una de las variables independientes más importantes que afectan tanto al desarrollo hidrológico como fisiográfico de las cuencas hidrográficas (Horton, 1945). Matemáticamente se expresa como:

$$L0 = \frac{1}{2D_d}$$

Una L0 baja indica pendientes más suaves en los valles, y, por lo tanto, una escorrentía superficial baja y trayectorias de flujo más largas (Hajam RA, Hamid A & Bhat S, 2013).

Existe una correlación negativa moderada entre L0 y el relieve de la cuenca, lo que indica que cuanto menor es el relieve, mayor es L0, y por lo tanto, menor es la susceptibilidad a las inundaciones, lo que es

desfavorable para la recarga hídrica (Obeidat, Awawdeh & Al-Hantouli, 2021).

Los parámetros de área (en 3.1.1.3), como la Frecuencia de Arroyos (Fs) y la Textura de Drenaje (Ds), junto con los Parámetros de Relieve (en sección 3.1.1.4), tales como el Relieve de la Cuenca (Bh) y la Razón de Relieve (Rh), proporcionan una comprensión profunda de la dinámica hídrica y la erosión potencial, fundamentales para el diseño de estrategias de gestión eficaces.

3.1.1.3 Parámetros de área

- **Frecuencia de arroyos (Fs):** Horton en 1932 y 1945 definió el número de corrientes por unidad de área como la frecuencia de arroyos (Fs). Matemáticamente se expresa como:

$$F_s = \frac{\sum N_u}{A}$$

Fs depende principalmente de la litología de la cuenca y se relaciona con la permeabilidad, la capacidad de infiltración y el relieve de la subcuenca (Avinash et al., 2014).

Un drenaje con un Fs alto se caracteriza por una superficie empinada, vegetación escasa, alto escurrimiento superficial, sustrato impermeable y un relieve elevado (Rajasekhar et al., 2020). Valores bajos de Fs son una indicación de la presencia de pendientes del terreno moderadas asociadas con rocas permeables, escorrentía e infiltración moderada (Avinash et al., 2014).

- **Textura de drenaje (Ds):** La textura del drenaje Ds es una medida del ancho del espaciado del canal. Depende del clima, la lluvia, el tipo de roca y suelo, el relieve, la capacidad de infiltración y el estado de desarrollo del drenaje (Schumm, 1956; Smith, 1950; Horton, 1945). Según Horton 1945, Ds se expresa como:

$$Ds = D_d * Fs$$

Ds se clasifica en cuatro categorías: <4 por km como gruesa, 4-10 por km como intermedia, 10-15 por km como fina y >15 por km como ultrafina (Choudhari et al., 2018).

Rocas débiles y la vegetación escasa de un clima árido causan el desarrollo de una textura fina, lo que indica una menor infiltración y una mayor erosión del suelo (Rajasekhar et al., 2020).

- **Constante de mantenimiento del cauce (Ccm):** Según Schumm, 1956 la constante de mantenimiento del cauce Ccm es un parámetro que puede determinar el área requerida para mantener un flujo lineal de kilómetros de canal. Matemáticamente se expresa como:

$$Ccm = \frac{1}{D_d}$$

Ccm depende de la pendiente de la cuenca, la litología, la vegetación y la extensión de la erosión (Choudhari et al., 2018).

Los valores más altos de Ccm muestran una cuenca con rocas de mayor permeabilidad y viceversa (Chopra et al., 2005).

- **Relación de circularidad (Rc):** El índice o relación de circularidad Rc es una expresión cuantitativa de la forma de la cuenca. Corresponde a la relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo con el mismo perímetro que la cuenca (Miller, 1953). Matemáticamente se expresa como:

$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Donde:

P= perímetro de la cuenca [km].

Rc varía de 0 a 1 y está influenciado por estructuras geológicas, clima, relieve, cobertura terrestre, longitud y pendiente de las corrientes de la cuenca (Choudhari et al., 2018). Los valores bajos, medios y altos de Rc indican etapas jóvenes, maduras y antiguas respectivamente de los afluentes en la cuenca (Avinash et al., 2011).

- **Relación de elongación (Re):** La relación de alargamiento o elongación Re es la relación entre el diámetro de un círculo con la misma área que la cuenca y la longitud máxima de la cuenca (Schumm, 1956). Matemáticamente se expresa como:

$$Re = \frac{1.128\sqrt{A}}{L}$$

Donde:

$L = 1.312A^{0.568}$, corresponde a la longitud de la cuenca [km] (Nooka Ratnam et al., 2005).

Según Strahler, 1964, Re varía de 0.6 a 1 en una amplia variedad de formaciones climáticas y geológicas. Valores cercanos a 1 se encuentran en regiones típicas de relieve muy bajo, mientras que valores entre 0.6 a 0.8 están asociados con un relieve fuerte y pendientes pronunciadas (Pakhmode et al., 2003).

Si Re se acerca a 1, la forma de la cuenca se aproxima a un círculo (Abdel-Lattif & Sherief, 2012), y las cuencas circulares son más eficientes en el escurrimiento que las alargadas (Singh & Singh, 1997).

- **Factor de forma (Ff):** Indica la intensidad del flujo de una cuenca para un área definida y tiene una relación directa con el caudal máximo en una cuenca (Horton 1932, 1945). Matemáticamente se expresa como:

$$F_f = \frac{A}{L^2}$$

El valor de F_f siempre será mayor que 0.78 para una cuenca absolutamente circular (Rajasekhar et al., 2020). Cuanto menor sea el valor de F_f , más alargada es la forma de la cuenca.

- **Índice de forma (S_b):** El índice de forma S_b ayuda a analizar la irregularidad de la forma en una cuenca de drenaje (Horton, 1932). Matemáticamente se expresa como:

$$S_b = \frac{L^2}{A}$$

Valores bajos de S_b indican un relieve elevado y pendientes pronunciadas, lo que aumenta las inundaciones (Obeidat et al., 2021).

- **Coeficiente de compacidad (C_c):** Es la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del área circular, que es igual al área de la cuenca (Gravelius, 1914). Matemáticamente se expresa como:

$$C_c = 0.282 \left(\frac{P}{A^{0.5}} \right)$$

C_c es independiente del tamaño de la cuenca, y depende únicamente de la pendiente. $C_c=1$ indica que la cuenca se comporta completamente como una cuenca circular y $C_c>1$ indica una mayor desviación de la naturaleza circular de la cuenca (Ajaykumar K. Kadam, Tasadoq H. Jaweed, Sanjay S. Kale, Bhavana N. Umrikar & Rabindranath N. Sankhua, 2019).

Valores bajos de C_c indican una baja capacidad de infiltración y viceversa. (Kadam, A.K et al., 2019).

3.1.1.4 Parámetros de relieve

- **Relieve de la cuenca (Bh):** Definido como la diferencia de elevación entre los puntos más altos y bajos de la cuenca. Según Hadley & Schumm, 1961, el relieve de la cuenca Bh puede expresarse como:

$$B_h = H - h$$

Donde:

H = elevación máxima [m].

h = elevación mínima [m].

Bh ayuda a comprender las características de denudación de la cuenca, además controla el gradiente del arroyo e influye en la escorrentía superficial y el sedimento también (Choudhari et al., 2018).

También contiene información sobre la cantidad de energía potencial y cinética la cual es reflejada en la producción de escorrentía superficial, precipitación e inundaciones en la cuenca (Rajasekhar et al., 2020).

Valores altos de Bh indican condiciones de baja infiltración y alta escorrentía superficial (Obeidat et al., 2021).

- **Razón de relieve (Rh):** Según Schumm, 1956, el relieve se analiza mediante una relación de relieve Rh, el cual se define como la relación entre el relieve total de una cuenca y la dimensión más larga de la cuenca paralela a la línea de drenaje principal. Matemáticamente se expresa como:

$$R_h = \frac{B_h}{L_h}$$

Donde:

L_h = eje más largo del río principal [km].

Rh es un indicador del área de captación de la pendiente y también de la intensidad del proceso de erosión en la pendiente de trabajo (Schumm, 1956).

Si el valor de Rh es alto, indica un terreno montañoso, en cambio, un valor bajo de Rh representa un pediplano y un valle (Maathuis & Wang, 2006).

- **Número de rugosidad (Rn):** Indica la complejidad estructural del terreno, el relieve, la densidad de drenaje y el área susceptible a la erosión del suelo (Sameena et al., 2009). Rn se refiere al nivel de suavidad y rugosidad del terreno de la cuenca (Selvan, Ahmad & Rashid, 2011).

Según Schumm, 1965, Rn se expresa como:

$$R_n = B_h \cdot D_d$$

Un alto Rn indica pendientes pronunciadas, lo que resulta en inundaciones repentinas y erosión (Patton & Baker, 1976).

- **Razón de gradiente (Gr):** Es una indicación de la pendiente del canal a partir de la cual se podría evaluar el volumen de escorrentía (Avinash et al., 2014). Según Sreedevi et al., 2005, la razón de pendiente Gr, se puede expresar como:

$$G_r = \frac{(a - b)}{L_h}$$

Donde:

a = altitud en el origen.

b = altitud en la desembocadura.

Si Rh es alta, indica una pendiente pronunciada y una escorrentía alta, mientras que un bajo valor de Rh indica una pendiente suave, escorrentía superficial baja y una buena posibilidad de infiltración (Choudhari et al., 2018).

3.1.1.5 Parámetros adicionales

- **Coeficiente RHO:** Se define como la relación entre la razón de longitud de corriente y la relación de bifurcación. Según Horton, 1945, RHO se puede expresar como:

$$\rho = \frac{Lsm}{R_{bm}}$$

RHO desempeña un papel crucial en la comprensión entre la densidad de drenaje y el desarrollo fisiográfico de una región (Shekar et al., 2023). Esta relación afecta directamente la capacidad de almacenamiento de la red de drenaje y determina su etapa final de desarrollo (Horton, 1945).

Valores altos de RHO indican un mayor almacenamiento hidrológico durante las inundaciones (Soni S, 2017), como así también un aumento de la erosión durante las descargas elevadas.

- **Número de infiltración (If):** El número de infiltración If juega un papel importante en la observación de las características de inundación de la cuenca (Hajam RA, Hamid A & Bhat S, 2013). Según Zavoiance, 1985, If se puede expresar como:

$$I_f = D_d \cdot F_s$$

Valores altos de If están asociados con tasas de infiltración bajas y altos valores de escurrimiento superficial (Faniran, 1968).

- **Coeficiente de Lemniscata (K):** Según Chorley et al., 1957, el coeficiente de lemniscata K se utiliza para calcular el gradiente de la cuenca. Se puede expresar como:

$$K = \frac{L^2}{4A}$$

K indica hasta qué punto la forma de una cuenca se acerca a la de una lemniscata ideal y para un círculo, su valor es igual a la unidad.

3.1.2 Análisis Multicriterio y AHP

El análisis multicriterio (AMC) proporciona un marco para evaluar y comparar varias alternativas o soluciones en función de múltiples criterios o factores relevantes. Esta metodología se emplea en la toma de decisiones complejas que implican objetivos o perspectivas múltiples, permitiendo ponderar y considerar las diversas opiniones de los involucrados en el proceso de toma de decisiones (Moral, 2016). El AMC ha encontrado aplicación en diversos campos relacionados con la gestión de recursos hídricos, incluida la evaluación de políticas de agua (Hajkowicz & Collins, 2007). Además, se ha destacado por su precisión en el mapeo del potencial de aguas subterráneas, al reconocer eficientemente las áreas propicias para la recarga de acuíferos en comparación con otras técnicas convencionales (Kadam et al., 2020; Singh et al., 2018).

Todo problema de decisión tratado con AMC consta de tres componentes principales: tomadores de decisiones, alternativas y criterios. Es importante tener en cuenta que el propósito del AMC es servir como una herramienta para reflexionar y tomar decisiones, pero no para tomar la decisión final (Luque, 2019).

Existen varios enfoques o técnicas de AMC, y en este estudio se emplea la comparación por pares, la cual se utiliza para establecer la importancia relativa de los criterios y el rendimiento relativo de las opciones en la práctica (Government, Department for Communities and Local, 2009).

Uno de los métodos más conocidos en la comparación por pares es el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Saaty en 1980. Este enfoque cuantitativo facilita la toma de decisiones en situaciones con múltiples criterios al permitir la generación de escalas de prioridades basadas en juicios expertos expresados a través de comparaciones por pares utilizando una escala de preferencias.

El AHP se implementa en cinco pasos sistemáticos (Mendoza et al., 2019):

1. Desarrollo de la estructura jerárquica: Representación gráfica del problema con el objetivo en la cúspide, las alternativas en la base y los criterios en el nivel intermedio.
2. Representación de los juicios de valor asignados a cada criterio según la escala fundamental.
3. Construcción de la matriz de comparaciones por pares y matriz normalizada.
4. Cálculo de los vectores de prioridad y consistencia.
5. Análisis de resultados.

Es fundamental tener en cuenta que los tomadores de decisiones no siempre pueden ofrecer juicios completamente precisos, lo que puede generar ambigüedades en el AHP, especialmente debido a interpretaciones subjetivas de los criterios. Por lo tanto, es esencial utilizar una herramienta que permita los juicios subjetivos y, al mismo tiempo, minimice la incertidumbre inherente a las evaluaciones personales (Mendoza et al., 2019).

Por esta razón, Saaty definió la escala fundamental en 1980 con el objetivo de establecer los valores que pueden asignarse a los juicios formulados por los tomadores de decisiones (Mendoza et al., 2019).

Tabla 1: Escala fundamental de Saaty, 1980.

Intensidad de importancia en una escala absoluta.	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente al criterio.
3	Importancia moderada de uno sobre otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro
5	Importancia esencial o fuerte	El juicio y la experiencia favorecen fuertemente a un elemento frente al otro
7	Importancia muy fuerte	Un elemento domina fuertemente
9	Importancia extrema	Un elemento domina a otro con el mayor orden de magnitud posible
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	

Teniendo en cuenta los criterios seleccionados en una jerarquía específica, el AHP genera una matriz de comparación por pares, denotada como A , de tamaño $n \times n$, donde n representa el número de criterios. Esta matriz A refleja la evaluación del tomador de decisiones respecto a la importancia de cada criterio. En la matriz A , el elemento a_{ij} corresponde a la posición (i,j) , con

$i=1,2,3,n$ y $j=1,2,3,n$. En particular, a_{ij} representa la preferencia de la alternativa en la fila i en comparación con la alternativa en la columna j según la escala de Saaty. Por ejemplo, si el criterio A es moderadamente más importante que el criterio B, se le asigna un valor de 3. Recíprocamente, el criterio B tendrá un valor de $1/3$ en comparación con el criterio A.

Cuando $i=j$, el valor de a_{ij} es igual a 1, ya que se está comparando el criterio consigo mismo. La matriz A se representa de la siguiente manera (Achu et al., 2020).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

$$a_{ij} = \frac{\text{Peso del atributo } i}{\text{Peso del atributo } j}, \quad a_{ij} > 0$$

Se cumple que $a_{ij}a_{ji} = 1$, por lo que, la matriz A queda representada como

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Según Saaty & Hu (1998), después de construir la matriz A, se emplea el método de valor propio (eigenvalue) para derivar los vectores de prioridad. El procedimiento es el siguiente (Toskano, 2005):

1. Normalizar la matriz A dividiendo cada elemento de la matriz por la suma de su columna correspondiente.
2. Calcular el promedio de cada fila de la matriz normalizada. Estos promedios representan los pesos relativos iniciales de los elementos comparados, es decir, el vector propio.

Después de determinar los eigenvectores de la matriz, es necesario evaluar el grado de consistencia entre las comparaciones emparejadas proporcionadas por el tomador de decisiones debido a los juicios

subjetivos (Toskano, 2005). Saaty propuso un índice de consistencia (IC) y una razón de consistencia (RC) para medir la coherencia de las comparaciones. Se debe tener en cuenta que lograr una consistencia perfecta es muy difícil y se espera cierta inconsistencia en casi cualquier conjunto de comparaciones emparejadas, especialmente en problemas complejos con múltiples criterios (Toskano, 2005).

Según Saaty (1980), los pasos para calcular IC y RC son los siguientes:

1. Calcular el valor propio máximo (λ_{max}) de la matriz A,

$$\lambda_{max} = \frac{\sum(Aw)}{nw}$$

Donde,

A= matriz de comparación por pares,

w= vector propio o vector de pesos relativos,

n= número de criterios.

2. Calcular el índice de consistencia IC,

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$$

3. Calcular la razón de consistencia RC,

$$RC = \frac{IC}{RI}$$

Donde,

RI corresponde al índice de consistencia aleatorio, el cual depende del tamaño de la matriz o del número de criterios (n), el cual se obtiene de la siguiente tabla predefinida

Tabla 2: Índice de consistencia aleatorio (RI). Extraído de Saaty (1980).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Si $RC \leq 0,1$ (10%), se considera que las comparaciones por pares son suficientemente consistentes, en cambio si $RC > 0,1$, se recomienda revisar y ajustar las comparaciones para mejorar la consistencia.

Finalmente, el modelo para evaluar las zonas potenciales para recarga hídrica se muestra en la siguiente ecuación:

$$GWP = C1P1 + C2P2 + \dots + CnPn$$

Donde,

GWP = zonas potenciales para recarga hídrica,

Cn= criterios,

Pn= ponderación (vector propio) de cada criterio.

3.1.3 Machine Learning (Random Forest)

En la última década, el Machine Learning (ML) ha emergido como una técnica revolucionaria en el campo de la hidrología y la gestión de recursos hídricos. Estas metodologías ofrecen capacidades avanzadas para el análisis y modelado de grandes volúmenes de datos con una precisión y eficiencia sin precedentes. En este estudio, se aplicará Random Forest para analizar los datos de la cuenca del río Biobío, identificando patrones y correlaciones que pueden no ser evidentes mediante métodos tradicionales.

Random Forest, un algoritmo de ML, se utilizará para clasificar y predecir áreas potenciales de recarga hídrica con base en un conjunto de variables ambientales. Este enfoque permitirá una evaluación detallada de las características de la cuenca que favorecen la infiltración y el almacenamiento

de agua subterránea, contribuyendo así a una gestión más efectiva y sostenible de los recursos hídricos.

3.1.3.1 Fundamentos de Machine Learning

El aprendizaje automático (ML) es una rama de la inteligencia artificial que se centra en desarrollar sistemas y algoritmos capaces de permitir que las computadoras aprendan y mejoren de manera automática mediante la experiencia, sin necesidad de ser programadas explícitamente (Alpaydin, 2020). En lugar de codificarse con instrucciones rígidas, se utilizan datos para detectar patrones y relaciones, y luego ajustan su modelo interno en consecuencia (Goodfellow et al., 2016).

El ML es fundamental para manejar grandes cantidades de datos y descubrir patrones complejos debido a su capacidad de escalar, detectar patrones intrincados, adaptarse y automatizar tareas (Hastie et al., 2009). Según Fan et al. (2014), los conjuntos de datos masivos pueden contener relaciones no lineales y patrones difíciles de detectar mediante métodos convencionales, pero los algoritmos de ML tienen la capacidad de descubrir estas estructuras complejas. Además, se ha observado que cuanto más abundante es el conjunto de datos, mejores son los resultados (Manrique, E. 2020).

Las técnicas de regresión lineal y polinómica, árboles de decisión, redes neuronales, red bayesiana y cadenas de Markov, son herramientas empleadas en ML para reconocer patrones, extraer conocimientos, descubrir información y realizar predicciones (Manrique, E. 2020).

En el ámbito del ML, se distinguen varios tipos de aprendizaje, entre ellos el aprendizaje supervisado, no supervisado y por refuerzo.

El aprendizaje supervisado implica enseñar al algoritmo a llevar a cabo tareas específicas utilizando conjuntos de datos clasificados, donde se conocen tanto las entradas como las salidas deseadas. Este enfoque busca establecer un mapeo entre las entradas y las salidas para realizar predicciones precisas en nuevos datos. Ejemplos comunes de este tipo de aprendizaje incluyen la regresión, la clasificación y la predicción (Alpaydin, 2020). Entre los

algoritmos de aprendizaje supervisado, el bosque aleatorio (Random Forest, RF por sus siglas en inglés) es ampliamente utilizado.

El RF se compone de un conjunto de árboles de decisión que se construyen de manera aleatoria, donde cada árbol se entrena con un subconjunto aleatorio de los datos de entrenamiento. Las predicciones de todos los árboles se promedian o combinan mediante votación mayoritaria para obtener la predicción final (Hastie et al., 2009). Esta técnica permite manejar datos con alta dimensionalidad y relaciones complejas entre las características de manera efectiva, ya que cada árbol puede capturar patrones diferentes. Además, los bosques aleatorios son resistentes al sobreajuste debido a la aleatoriedad en su construcción (Kuhn & Johnson, 2019).

El aprendizaje no supervisado implica un modelo predictivo entrenado de manera similar al aprendizaje supervisado, pero con datos no clasificados o etiquetados. El objetivo principal es identificar patrones, estructuras o relaciones inherentes en los datos sin un objetivo de predicción específico (Goodfellow et al., 2016). Entre las técnicas de aprendizaje no supervisado se encuentran el agrupamiento (clustering), la reducción de dimensionalidad y la detección de anomalías, que permiten explorar y entender la estructura subyacente de los datos sin requerir etiquetas de salida (Bishop, C., 2007).

El aprendizaje reforzado se lleva a cabo en un entorno donde no hay información sobre la posible salida, y el sistema aprende a través de acciones y los resultados obtenidos (López, J., López, B., & Díaz, V., 2004; Mueller, J., & Massaron, L., 2016). En este proceso, el modelo se refuerza al resolver el problema de la mejor manera posible. En este tipo de aprendizaje, un agente aprende a tomar decisiones óptimas en un entorno específico mediante un proceso de prueba y error, guiado por una señal de recompensa (Sutton & Barto, 2018). Esta metodología es ampliamente utilizada en campos como la robótica, los juegos y los sistemas de control.

El ML proporciona una herramienta valiosa para el análisis de datos ambientales y geográficos. Utilizando datos clasificados de áreas conocidas de recarga hídrica y de diversas características como la topografía, tipo de suelo, vegetación, precipitación, entre otros, es posible entrenar modelos de aprendizaje supervisado. Estos modelos son capaces de aprender los patrones

y relaciones complejas entre las variables ambientales y la recarga hídrica, permitiendo así predecir y mapear áreas potenciales para la recarga (Naghibi et al., 2017). Además, el aprendizaje automático se emplea en la clasificación de cobertura terrestre mediante el análisis de imágenes satelitales. Esta técnica permite clasificar diferentes tipos de cobertura terrestre, así como geología, humedad del suelo, entre otros aspectos, siendo crucial para identificar las zonas potenciales de recarga. Esta integración de datos ambientales y geográficos con herramientas de ML proporciona una visión más completa y precisa del entorno, lo que permite tomar decisiones informadas en la gestión de recursos naturales y la conservación del medio ambiente.

3.1.3.2 Random Forest

El algoritmo Random Forest (RF) es una técnica de aprendizaje supervisado que forma parte de los métodos de ensamble. Se destaca por su capacidad para trabajar con una gran cantidad de datos y con múltiples variables, ofreciendo soluciones tanto para problemas de clasificación como de regresión (Medina & Ñique, 2017).

El proceso de entrenamiento de RF implica tomar múltiples muestras aleatorias del conjunto de datos de entrenamiento y construir árboles de decisión completos para cada muestra, introduciendo aleatoriedad adicional al considerar solo un subconjunto aleatorio de características en cada nodo de división (Breiman, 2001). Luego, las predicciones de todos los árboles individuales se combinan mediante el promedio o la votación mayoritaria, dependiendo del problema (regresión o clasificación) (Hastie et al., 2009). La introducción de aleatoriedad en la construcción de los árboles individuales tiene como objetivo reducir la varianza y evitar el sobreajuste del modelo. Además, la diversidad entre los árboles ayuda a capturar diferentes patrones y relaciones en los datos, lo que mejora el rendimiento general del modelo (Louppe, 2014).

En el siguiente diagrama se muestra el algoritmo de RF

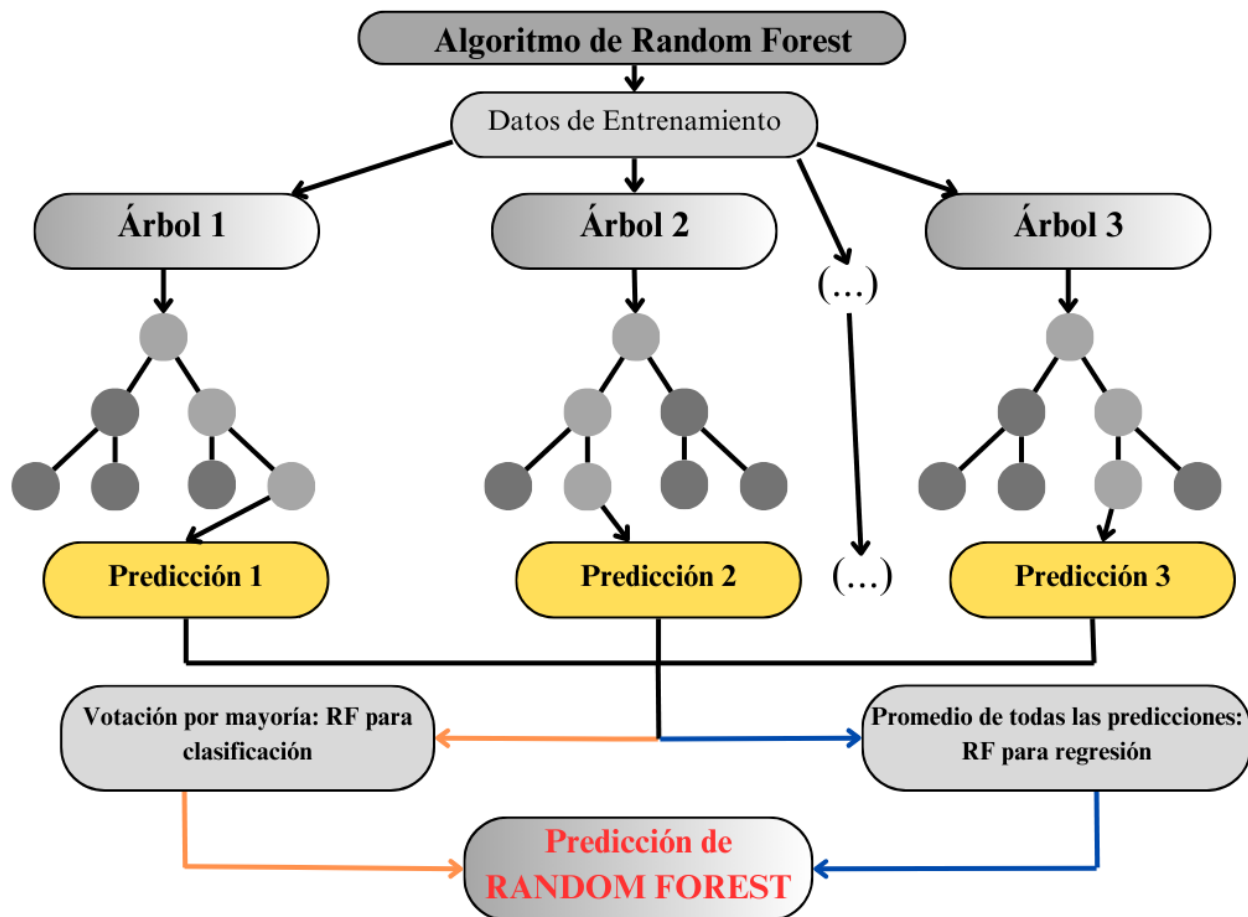


Figura 1: Algoritmo de Random Forest. Fuente: Adaptado de ‘Quality: Analítica Predictiva 2: Regresión Multivariable con Random Forest’.

3.1.3.3 Aplicación de ML en la gestión del recurso hídrico

El Machine Learning ha revolucionado diversos campos del conocimiento, incluyendo el estudio y la gestión de los recursos hídricos (Vargas-Crispin et al., 2021). Su capacidad para procesar grandes conjuntos de datos, identificar patrones y realizar predicciones precisas lo ha convertido en una herramienta invaluable para abordar desafíos relacionados con el recurso hídrico.

En las aplicaciones de ML en los recursos hídricos, destacan el monitoreo y la predicción de variables hidrológicas. Se han utilizado modelos de ML para

predecir el caudal de los ríos a partir de datos históricos y variables climáticas (Shortridge et al., 2016), lo que permite optimizar la gestión de reservas de agua y prevenir inundaciones. Asimismo, ML se ha aplicado en la detección de sequías, identificando estos fenómenos a partir de datos satelitales, índices climáticos y registros históricos (Rulinda et al., 2012). También se ha empleado ML en la calidad del agua, monitoreando la calidad en ríos, lagos y acuíferos, detectando contaminantes y parámetros como el pH, conductividad y nutrientes (Alizadeh et al., 2017). Además, ML ha sido útil en la gestión de la demanda del agua, lo que permite optimizar la distribución del agua y reducir su consumo innecesario (Candelieri, A. 2017).

Esto resalta la capacidad de ML como una herramienta poderosa para la priorización de cuencas hidrográficas en la gestión del recurso hídrico, permitiendo a los gestores identificar de manera eficiente las cuencas que requieren mayor atención y los recursos prioritarios en ellas.

Dadas las ventajas del ML en el estudio y gestión del recurso hídrico, el algoritmo de RF se ha destacado como una herramienta útil para la búsqueda de zonas potenciales para la recarga hídrica. RF ofrece alta precisión, superando a otros métodos como los modelos estadísticos tradicionales (Naghibi et al., 2016), y proporciona información sobre la importancia relativa de los predictores del modelo, lo que permite comprender mejor los factores que controlan la recarga hídrica en un área específica (Naghibi et al., 2017).

Sin embargo, existen desventajas a considerar en el uso de ML en la gestión del recurso hídrico. La interpretabilidad de los modelos puede ser un desafío, especialmente con redes neuronales profundas, dificultando la comprensión de las decisiones o predicciones (Lipton, Z.C., 2018). Además, los modelos de ML pueden verse afectados por sesgos en los datos de entrenamiento, lo que puede llevar a resultados erróneos (Mehrabi, N. et al., 2021). También se deben considerar los requisitos de mantenimiento, ya que los modelos de ML pueden necesitar actualizaciones periódicas a medida que cambian las condiciones ambientales y los patrones de uso del agua, lo que puede requerir recursos continuos para el mantenimiento y la supervisión (Hosseini et al., 2020).

En resumen, el uso de ML y específicamente de RF en la priorización de cuencas hidrográficas ofrece una solución robusta y precisa para abordar desafíos relacionados con la gestión del recurso hídrico, permitiendo una mejor toma de decisiones y una asignación eficiente de recursos.

Este capítulo ha establecido las bases teóricas para la comprensión de las metodologías clave utilizadas en este estudio. A través del análisis morfométrico, el aprovechamiento de los avances en teledetección y SIG, la implementación del análisis multicriterio (mediante AHP) y la aplicación de una metodología de aprendizaje automatizado (Machine Learning), en el cual se utiliza el algoritmo de Random Forest, se busca abordar los desafíos de la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Biobío.

Notablemente, la incorporación de Machine Learning representa un paso adelante en la aplicación de tecnologías avanzadas para la identificación de zonas críticas de recarga hídrica.

4 Capítulo 3

4.1 Zona de Estudio

4.1.1 Cuenca del Río Bío-Bío

La cuenca del río Biobío, crucial tanto por su diversidad ecológica como por su aporte económico, corresponde a una de las más grandes e importantes de Chile, forma parte de la VIII Región y abarca una extensión de 24,264 km², que se extiende entre los 36°42' y 38°49' de latitud sur y los 71° y 73°20' de longitud oeste. (MOP,2004). Abarca territorios de las provincias de Ñuble, Concepción, Biobío, Arauco, Malleco y Cautín en las regiones de Ñuble, Biobío y La Araucanía (MOP, 2004). Esta cuenca es hogar de un rico mosaico de ecosistemas y comunidades.

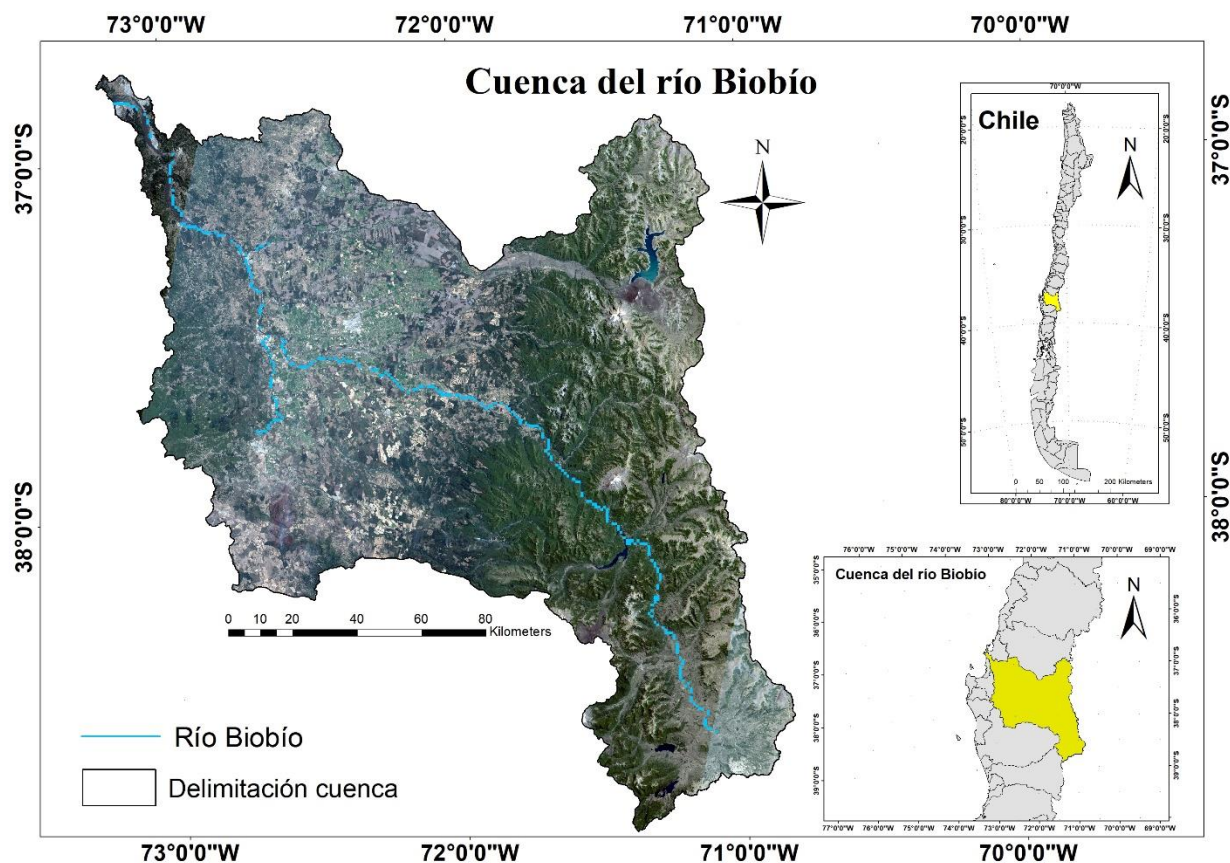


Figura 2: Ubicación cuenca del río Biobío, Chile. Fuente: Elaboración propia.

Constituye un centro económico relevante a nivel nacional, destacándose en los sectores forestal, agropecuario, industrial (industrias metalúrgicas, químicas, refinerías de petróleo, textiles, celulosa, etc.) e hidroeléctrico. La cuenca cuenta con más de 17 centrales hidroeléctricas, generando una producción superior a los 2,800 MW. La industria forestal de celulosa y papel es el principal motor industrial, con tres plantas de celulosa y una fábrica de papel ubicadas entre Negrete y la desembocadura del río. (Parra et al., 2009; 2013)

El clima de la cuenca presenta características de transición entre los climas Mediterráneo y Templado Húmedo en la costa, y frío de montaña en los Andes, configura el ciclo hidrológico y la biodiversidad de la zona. En la zona costera predomina un clima templado húmedo, con precipitaciones

anuales de 1.200 a 2.000 [mm]. En el interior, el clima es templado Mediterráneo, mientras que en la Cordillera de los Andes se presenta un clima frío de altura, con abundantes precipitaciones (más de 2.000 [mm/año]) y presencia de nieves permanentes (MOP, 2004). La escorrentía superficial alcanza valores de 1.409 a 2.021 [mm/año] (MOP,1987). Estas descripciones hidroclimáticas resaltan la importancia de gestionar de manera sostenible los recursos hídricos para balancear las necesidades humanas y ecológicas.

La cuenca alberga 326 localidades pobladas, incluyendo 17 ciudades, siendo Concepción la más destacada con 216,061 habitantes en 2002, junto con 271 localidades rurales (MOP, 2004). Los usos del suelo predominantes son el forestal (493.154 hectáreas), el agrícola (70.496 hectáreas) y el urbano (10.132 hectáreas) (MOP, 2004). Todo esto refleja la complejidad de gestionar sus recursos naturales.

4.1.1.1 Hidrografía

4.1.1.1.1 Red hídrica y recursos de aguas superficiales

La hidrografía de la cuenca del Biobío es compleja, con un origen en la laguna Galletué y un recorrido de 380 km hasta el océano. La variabilidad estacional de los caudales, con picos en invierno, es un desafío para la gestión de agua.

Cabe notar que toda la información presentada en esta sección se obtuvo del informe del Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, del año 2004, titulado como ‘Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad – Cuenca del Río Biobío’. La información ha sido modificada y adaptada para mejorar su claridad.

El río Biobío tiene su origen en la laguna Galletué, situada a una altitud de 1.160 m.s.n.m en la Cordillera de los Andes. Con una longitud de 380 kilómetros, se posiciona como el segundo río más extenso de Chile.

En la cuenca del Biobío se distinguen dos regímenes hidrológicos, pluvio nival y pluvial. El caudal del río muestra fuertes variaciones estacionales, con

mayores caudales durante invierno y menores durante verano (Cisternas, 1993). Los caudales promedios mensuales en la cuenca fluctúan entre 2004 y 257 [m^3/s] (Bertrán et al., 2001).

En su trayecto, el Biobío recibe diversos afluentes importantes:

- Por el norte: ríos Loquimay (el más importante por su caudal), Rehue, Ranquil, Queuco y Duqueco.
- Por el sur: ríos Lirquén, Bureo y Vergara el cual corresponde al afluente más importante por el sur, que recibe al Renaico y drena la Cordillera de Pemehue.
- Por el este: Río Laja, su afluente septentrional más relevante, que nace en el lago Laja y recibe al Polcura y Rucue.

Los ríos Malleco, Mininco (afluente del Renaico), Renaico, Mulchén y Bureo constituyen una importante red de drenaje paralela que desagua las cordilleras de Litrancura y Pemehue en los Andes occidentales. En su curso medio, el Biobío no presenta lagos importantes, lo que provoca un excesivo arrastre de sedimentos que embancan su lecho.

El Laja, que nace en el lago del mismo nombre, se sitúa a una altura de 1.360 m.s.n.m y es el mayor lago de la zona, con una hoya hidrográfica de 1000 [km^2] y almacena un volumen aproximado de 8.000 millones de [m^3].

En su curso inferior, frente a San Pedro, el cauce es muy ancho (más de 2 km) y embancado con arena gruesa, formando una barra que impide la navegación desde el océano en su desembocadura en el norte del Golfo de Arauco.



Figura 3: Red hidrográfica del río Biobío. En azul se muestra el río Biobío y en verde sus principales afluentes. Fuente: Valdovinos & Parra (2006).

En la cuenca, se manifiestan diversos tipos de usos de las aguas superficiales, que se detallan a continuación:

- Riego: Corresponde al uso más importante, con una demanda bruta estimada de $71.302 \text{ [m}^3/\text{s]}$ en 1993. Se concentra en el valle intermedio, principalmente para cultivos de cereales, praderas, chacras, hortalizas, vides y frutales, durante el período de octubre a marzo.
- Agua Potable: La demanda de agua potable se concentra en 19 localidades de la cuenca, destinada al abastecimiento residencial e industrial. Se han detectado bocatomas para este uso en la parte alta del río Laja y en el río Malacura.

- **Generación de Energía Eléctrica:** Existe un importante aprovechamiento hidroeléctrico, principalmente en el río Laja, con centrales como Abanico, El Toro, Antuco, Peuchén, Mampil y Rucue. También se destacan las centrales Pangué y Ralco en el río Biobío.
- **Actividad Industrial:** La cuenca cuenta con más de 50 empresas que demandan agua para sus procesos productivos. Las principales industrias son las forestales (celulosa y papel), metalúrgica y de petróleo.

En relación con las aguas servidas, las cantidades que son descargadas a la cuenca sin algún tipo de tratamiento corresponde a aproximadamente 870 [L/s], equivalente a 27 millones de metros cúbicos al año.

Con respecto a la contaminación de las aguas superficiales, el río Biobío es uno de los más contaminados debido a descargas industriales y efluentes municipales. Las principales fuentes puntuales son la industria de celulosa, petroquímica y azucarera. Las fuentes difusas provienen de la agricultura y actividad forestal, con sedimentos, nutrientes y pesticidas que afectan al 56% de la cuenca. Además, se destaca la erosión hídrica severa en el 50% del área. La contaminación puntual industrial y la contaminación difusa agrícola-forestal son los principales factores que impactan la calidad del agua y la salud de los ecosistemas.

4.1.1.1.2 Fuentes de agua subterránea

Los estudios identifican tres subacuíferos principales, con variaciones en su vulnerabilidad a la contaminación. Este conocimiento es vital para la protección y gestión sostenible de las aguas subterráneas.

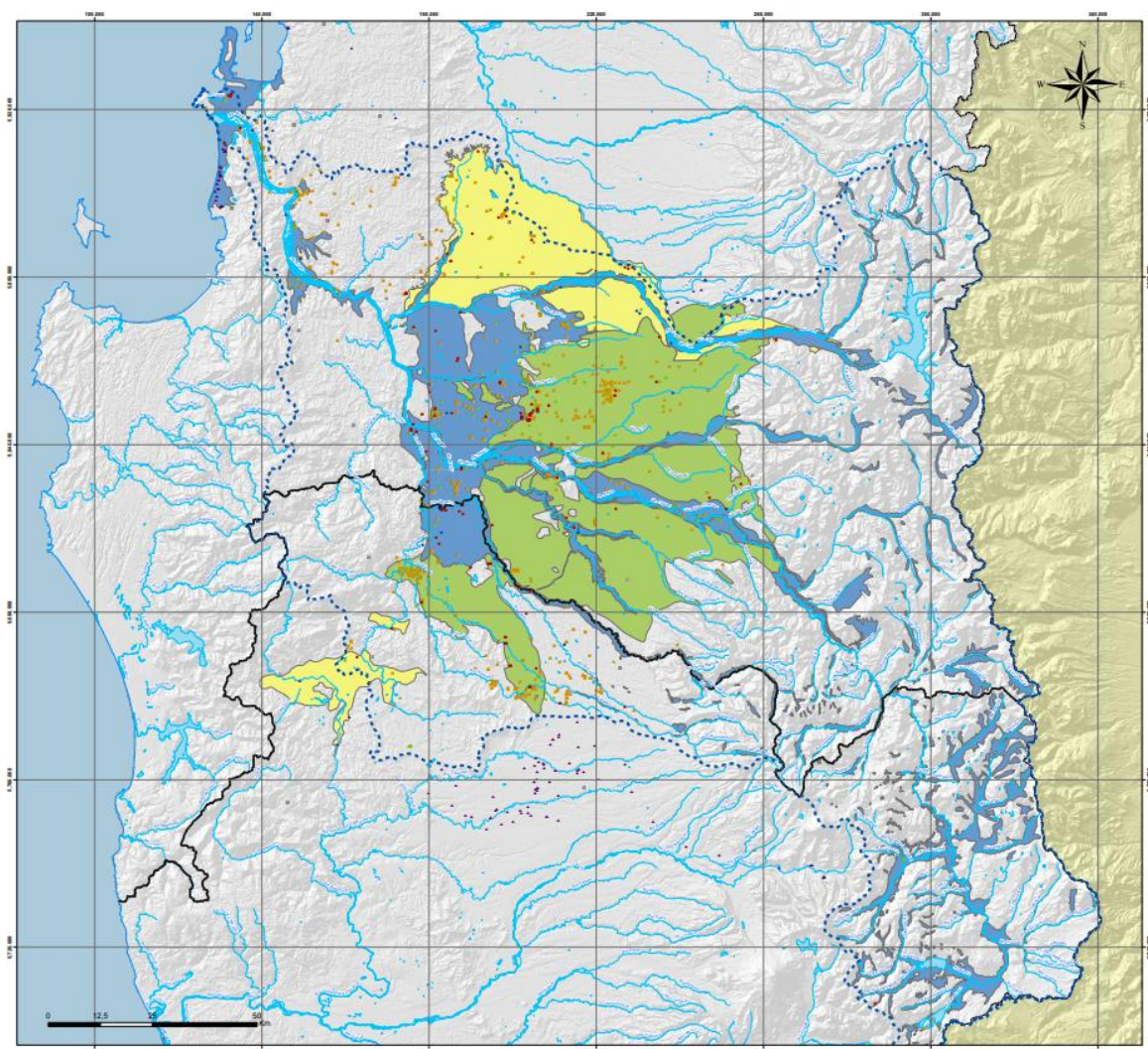
Cabe notar que toda la información presentada en esta sección se obtuvo del informe del Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, del año 2004, titulado como ‘Diagnóstico de la Calidad de las Aguas Subterráneas de las Regiones de Ñuble y del Biobío’. Se incluye el estudio realizado por Aquaterra Ingenieros Ltda. (DGA, 2012a) en la cuenca del Biobío, la información del mapa geológico de Chile del Servicio Nacional de

Geología y Minería. La información ha sido modificada y adaptada para mejorar su claridad.

Se definen 3 subacuíferos principales en la cuenca del río Biobío en base a las características geológicas y el tipo de relleno permeable:

- 1) Subacuífero 1: Compuesto por depósitos de avalancha volcánica (Q3av). Presenta vulnerabilidad alta en la mayor parte, y moderada en algunas zonas al este de Cabrero y cerca del río Laja.
- 2) Subacuífero 2: Formado por depósitos fluviales, aluviales y de terraza marina (Q1, Q1fa, Q1t, Hcrl, Q1m). Tiene vulnerabilidad muy alta a lo largo de los bancos de los ríos y hacia la desembocadura. En la zona centro, al oeste de Los Ángeles, presenta vulnerabilidad alta.
- 3) Subacuífero 3: Constituido por depósitos morrénicos, aluviales, arcillas y arenas (PIHlm, PIHca). Su vulnerabilidad varía en las siguientes franjas con orientación NE-SW:
 - Vulnerabilidad moderada en roca en los piedemontes precordilleranos.
 - Vulnerabilidad moderada-alta en la depresión intermedia oriental.
 - Vulnerabilidad alta en la zona central.
 - Vulnerabilidad moderada entre los ríos Duqueco y Guaqui, cerca de los Ángeles.

Figura 4: Acuíferos definidos para la cuenca del río Biobío y captaciones subterráneas al año 2012. Fuente: Extraído de DGA (2012a).



RESUMEN CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS			
	Captación	Derecho	Cantidad
Dentro de la Cuenca	Pozo	Aprobado	172
	Pozo	Sin Información	123
	Pozo	Núm. Expediente	25
	Otras Captaciones (1)	Aprobado	620
	Sub-Total		940
Fuera de la Cuenca	Pozo	Núm. Expediente	117
	Sub-Total		117
	Captaciones	Aprobado	200
Sin Coordenadas (2)	Sub-Total		200
	Total		1257

(1) Incluye captaciones sin identificación de tipo obra (pudiendo ser pozo, noria, dren o puntera)
(2) Captaciones asociadas al centroide de la Comuna a la que pertenecen.

Fuente: CPA, Estudio Hidrogeológico Cuenca Bio Bio e Itata

 REÚBLICA DE CHILE MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN			
CONSULTOR  INGENIEROS LIMITADA		PROYECTO ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCA BIO BIO	
DIRECTOR GENERAL DE AGUAS	JEFE DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN	INSPECCIÓN FISCAL	
Matías Desmadryl L.	Adrián Lillo	Miguel Ángel Caro	
ESCALA 1:450.000	PLANO 6 - 1	FECHA DICIEMBRE 2012	TÍTULO Acuífero Cuenca Río Bio-Bio y Captaciones Subterráneas

Datos Cartográficos y Geodésicos:
Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM)
Huso 19 Sur

Sistema de Referencia Geodésico: WGS-84

Nota: Trazado de límites aproximado.

Simbología	
Captaciones Subterráneas Bio Bio	
Captaciones dentro de la Cuenca	
	Pozos - Derecho Aprobado
	Pozos - Con Número de Expediente
	Pozos - Sin Información de Derecho
	Otras Captaciones - Derecho Aprobado
Captaciones fuera de la Cuenca	
	Pozos - Con Número de Expediente
Captaciones sin Coordenadas	
	Pozos - Con Número de Expediente
Acuífero Bio Bio	
	Subacuífero 1, Unid. Geológica Q3av
	Subacuífero 2, Unid. Geológica Q1, Q1fa, Q1m, Q1t, Hcrl
	Subacuífero 3, Unid. Geológica PIHca, PIHlm
	Cuenca Río Bio Bio
	Río
	Lagos, Lagunas, Embalses
Límites Administrativos	
	Límite Internacional
	Límite Regional
	Límite Costero

Para evaluar la extracción y la utilización de las aguas subterráneas en la cuenca del río Biobío, se recurre a la información sobre los derechos concedidos. Según el informe de la Dirección General de Aguas (DGA) de 2012, se han otorgado un total de 992 derechos de agua subterránea, con un caudal total otorgado de 6,263.54 litros por segundo (L/s). Principalmente, estos derechos se destinan al uso doméstico (55.65%), seguido por el uso industrial (15.32%), el abastecimiento de agua potable (10.08%), el riego (6.55%) y otros usos no especificados (12.4%).

4.1.1.2 Relieve y Erosión

La cuenca del río Biobío presenta las principales unidades morfológicas del relieve chileno: Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia, Cordillera de la Costa y Planicies Litorales. Esta diversidad impacta directamente en la disponibilidad y calidad del agua, con zonas de alta erosión que requieren atención especial.

- Cordillera de los Andes: Se presenta más baja que en el norte, con cordones montañosos de altura promedio de 2.000 a 2.500 msnm. Destacan algunos conos volcánicos como Antuco (2.985 m), Copahue (2.965 m) y Callaquén (3.164 m), además de la Sierra Velluda (3.585 m) y la Cordillera de Polcura. Es la principal fuente acumuladora de nieve que alimenta ríos como el Biobío, Laja y Polcura (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile BCN).
- Depresión Intermedia: Corresponde a valles longitudinales de topografía uniforme, desarrollándose desde el pie de la Precordillera hasta la Cordillera de la Costa. Se presenta como una llanura ondulada, alcanzando su mayor anchura de 60 km en el eje del río Laja. Está conformada por depósitos de tobas volcánicas, laháricos, aluviales y terrazas, con alta permeabilidad (BCN; MOP, 2004).
- Cordillera de la Costa: Adquiere gran relevancia la Cordillera de Nahuelbuta, un macizo imponente de más de 1.500 msnm que se extiende desde el Biobío hasta el Imperial. Algunas elevaciones son los cerros Altos de Nahuelbuta (1.533 m) y La Piedra del Águila (1.379 m). Genera diferencias climáticas entre el oriente y occidente (BCN).

- Planicies Litorales: Al norte del Biobío, se presentan acantilados con escasas zonas de planicies y presenta una elevada erosión. Al sur, destaca el aplanamiento Arauco-Cañete, con un ancho promedio de 25 km y yacimientos carboníferos. Existen lagos de contacto como Lanalhue y Lleulleu entre Nahuelbuta y la llanura arenosa (BCN; MOP 2004).

La cuenca se divide en tres sectores principales en relación con la erosión. En la sección superior, por sobre los 3.500 m.s.n.m, predominan suelos esqueléticos sobre afloramientos rocosos que sufren una gran alteración por procesos de remoción en masa y erosión (MOP,2004).

La sección media, entre los 3.500 y 800 msnm, presenta diferentes niveles de riesgo erosivo. En el sector norte, se encuentran suelos "trumaos" de alta fertilidad formados sobre cenizas volcánicas, con bajo riesgo de erosión. En el sector centro, cerca de Los Ángeles, existen suelos derivados de arenas y cenizas volcánicas del sistema Laja-Itata, con un riesgo de erosión que varía de medio a bajo. Por otro lado, en el sector sur, los suelos francos a muy arcillosos presentan un riesgo de erosión medio-alto debido a su baja permeabilidad y alta escorrentía (MOP,2004).

En la sección baja de la cuenca, la Cordillera de la Costa se caracteriza por suelos intensamente erosionados por la acción antrópica de cultivos, con texturas que van de arcillo arenosas a muy arcillosas, baja permeabilidad y alto riesgo de erosión. En las Planicies Costeras de Arauco, los suelos presentan una erosión leve, aunque se encuentran sometidos a la presión del sector forestal (MOP,2004).

Finalmente, en la desembocadura del río, los suelos de arena provenientes del sistema Antuco tienen una alta permeabilidad, escorrentía lenta y baja capacidad de erosión fluvial (MOP,2004).

4.1.2 Subcuencas (SW)

Según la información entregada por la Dirección General de Aguas, la cuenca del río Biobío se divide en 10 subcuencas

Tabla 3: Subcuencas río Biobío. Información extraída de ‘‘Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile’’, MOP, 2014.

	Código Subcuenca	Nombre Subcuenca
SW1	0839	Río Bío-Bío Bajo
SW2	0838	Laja Bajo
SW3	0837	Río Laja Alto (hasta bajo junta Río Rucue)
SW4	0836	Río Bío-Bío entre Río Vergara y Río Laja
SW5	0832	Río Duqueco
SW6	0833	Río Bío-Bío entre Río Duqueco y Río Vergara
SW7	0835	Ríos Malleco y Vergara
SW8	0831	Río Bío-Bío entre Río Ranquil y Río Duqueco
SW9	0834	Río Renaico
SW10	0830	Río Bío-Bío Alto (hasta después junta Río Lamin)

4.2 Metodología

4.2.1 Base de datos

Se recopiló información geográfica y ambiental utilizando fuentes confiables y actualizadas, asegurando una base sólida para el análisis. Esto incluye datos de SRTM para el DEM y diversas capas de información como geología, geomorfología, y uso de suelo.

Se utilizaron los datos de “Shuttle Radar Topography Mission (SRTM 30 m)” para derivar el Modelo Digital de Elevación (DEM). Los datos DEM de la cuenca del río Bío-Bío se encuentran disponibles de manera gratuita en la siguiente página; <https://earthexplorer.usgs.gov/>. El límite tanto de la cuenca del Bío-Bío como de las subcuencas fue recuperado del Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos de Chile de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas.

Los datos de 'Landsat 8 colección 2 nivel-1', proporcionados por el U.S. Geological Survey, fueron empleados para generar el mapa correspondiente a la zona de estudio. Se emplearon las bandas 1 a 7 para crear el compuesto de bandas, y el mapa resultante se visualiza en color real RGB. La resolución espacial utilizada fue de 30 metros.

Además, se obtuvieron y recuperaron los mapas que representan la geología, geomorfología, textura del suelo, uso del suelo, precipitación y volumen de agua en el suelo de la cuenca del río Bío-Bío. En la tabla siguiente se detalla la fuente de todos los conjuntos de datos utilizados en este estudio.

Tabla 4: Detalle de la base de datos utilizada en el estudio.

Tipo de Datos	Detalles	Fuentes
Geología	Mapa geológico de América del Sur	Schenk, C.J., Viger, R., Anderson, C.P., 1999, South America Geologic Map (geo6ag): U.S. Geological Survey data release, https://doi.org/10.5066/P9A3OJ9B

Geomorfología	Capa con las unidades geomorfológicas del territorio nacional. Tipo vector data.	Christoph Albers, Universidad de la Frontera, Temuco, 2015. https://ide-cigiden.hub.arcgis.com/datasets/f18aa2001ae04a51998abb952f337370_0/about
Textura de Suelo	Mapa digital de suelos del mundo. Escala 1:5000000	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco), 1961. https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/ru/
Uso de suelo	Sentinel-2, 10m, series temporales del uso y cobertura de la tierra a nivel mundial.	Karra, Kontgis, et al. "Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning." IGARSS 2021-2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2021.
Precipitación	Resolución horizontal de 0.1° x 0.1°. Resolución temporal mensual. Cobertura temporal de 01/01/2000 a 31/12/2020.	Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.68d2bb30
Volumen de agua en el suelo	Resolución horizontal de 0.1° x 0.1°. Resolución temporal mensual. Cobertura temporal de 01/01/2016 a 31/12/2019.	Descripción: La resolución vertical contiene 4 niveles del modelo de superficie ECMWF: Capa 1 de 0-7 cm, capa 2: 7-28 cm, capa 3: 28-100 cm, capa 4: 100-289 cm. Fuente: Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change

		Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.68d2bb30
--	--	--

4.2.2 Red Hídrica y Análisis Morfométrico

Se aplicó un análisis morfométrico detallado utilizando el DEM para caracterizar la red hídrica y la morfología de la cuenca. Este proceso incluyó la identificación de cursos de agua, determinación de su orden y cálculo de parámetros morfométricos, proporcionando una comprensión profunda de la dinámica hídrica.

Primero, se llevó a cabo un análisis morfométrico de la cuenca del río Bío-Bío mediante el Modelo Digital de Elevación. El análisis incluye todos los aspectos descritos en el capítulo 3.1.3.

Para obtener la red hídrica de la cuenca del río Bío-Bío se siguieron los procedimientos propuestos por Horton en 1945 y por Strahler en 1964. El estudio se georreferenció utilizando el datum WGS-84, proyección UTM zona 19S en el software ArcMap 10.5.

Para la extracción de la red hídrica y la obtención de los parámetros morfométricos de la cuenca del río Bío-Bío, se emplearon los siguientes procedimientos:

1. **Descarga de DEM:** Se seleccionaron 9 imágenes, las cuales abarcan toda la zona de estudio.
2. **Mosaico de la zona:** Se realizó un mosaico con las 9 imágenes obtenidas utilizando la herramienta ‘‘Mosaic to New Raster’’.
3. **Recorte de DEM:** Mediante las delimitaciones de la cuenca y de las subcuencas del río Bío-Bío se recorta el DEM mediante la herramienta ‘‘Clip’’.
4. **Relleno de sumideros:** Los sumideros y picos representan errores debido a la resolución de los datos o el redondeo de elevaciones al valor entero más cercano (Planchon & Darboux, 2002; Tarboton et al., 1991). La herramienta ‘‘Fill’’ itera hasta que se rellenan todos los

sumideros dentro del límite z especificado (Planchon et al., 2002; Tarboton et al., 1991). También se puede utilizar para eliminar valores atípicos.

5. **Dirección de flujo:** Utilizando la herramienta "Dirección de Flujo", se genera un mapa de dirección del flujo que indica la dirección desde cada celda hacia su vecina más baja en pendiente. Este método sigue el modelo de ocho direcciones (D8), donde la dirección de flujo se determina según la inclinación más pronunciada o la mayor caída desde cada celda. El método anterior se basa en lo propuesto por Jenson & Domingue, 1988.
6. **Acumulación de flujo:** Mediante el uso de la herramienta de "Acumulación de Flujo", se determina el flujo total acumulado como la suma ponderada de todas las celdas que dirigen su flujo hacia cada celda con pendiente descendente en el ráster de salida. En ausencia de especificaciones sobre los pesos, se asigna un peso unitario a cada celda, y el valor resultante en el ráster de salida corresponde al número de celdas que contribuyen al flujo en dirección a cada celda en particular. Las áreas con una alta acumulación de flujo indican zonas de concentración de flujo y pueden resultar útiles para la identificación de cauces de arroyos. El método anterior se basa en lo propuesto por Jenson & Domingue, 1998.
7. **Definición de corriente:** Se debe establecer un umbral en múltiples celdas con el fin de determinar dónde inicia un curso de agua sin respuesta directa de la función. Por lo general, se recomienda que dicho umbral sea alrededor del 1% del valor máximo de acumulación de flujo. Usando la herramienta "Raster Calculator", se establece el umbral para determinar el inicio del curso de agua en aquellos valores de acumulación de flujo que sean superiores a 100.
8. **Clasificación de los cursos de agua:** Es necesario asignar un orden numérico a los enlaces dentro de una red de cursos de agua. Esta secuencia constituye un método para identificar y clasificar los distintos tipos de cursos de agua en función de la cantidad de afluentes que poseen. La herramienta "Stream Order" se encarga de llevar a cabo esta asignación de ordenes siguiendo el método propuesto por Strahler en 1957. Según este método, se asigna una secuencia de orden

1 a todos los enlaces que carecen de afluentes, conocidos como enlaces de primer orden.

9. **Vectorización:** Se utiliza el algoritmo de la herramienta "Stream to Feature" el cual convierte redes de flujo, o cualquier otro ráster que represente una red lineal cuya dirección esté definida, en datos vectoriales. La metodología se lleva a cabo según lo propuesto por Tarboton et al., 1991.
10. **Continuidad en el número de corrientes:** Después del paso anterior, la representación de la longitud de los segmentos de cada orden en la red de drenaje no es precisa. Esto se debe a que, al convertir los datos a formato vectorial, se pierde la continuidad de la línea. Por lo tanto, es necesario unir los segmentos para garantizar que la longitud y el número de corrientes por cada orden sea correcta. Para realizar lo anterior, se emplea la herramienta "Merge", "Explode" y "Planarize Line". Estas herramientas son útiles para solucionar el problema y asegurar un recuento preciso de cada orden, como así también la longitud correcta de los segmentos.
11. **Cálculo de parámetros morfométricos:** Una vez obtenida la red de drenaje, se avanza con el cálculo de parámetros morfométricos. Estos abarcan un conjunto de 24 parámetros, los cuales se calculan individualmente tanto para la cuenca como para cada subcuenca dentro de la región de estudio.

El siguiente diagrama de flujo se muestra detalladamente la metodología aplicada:

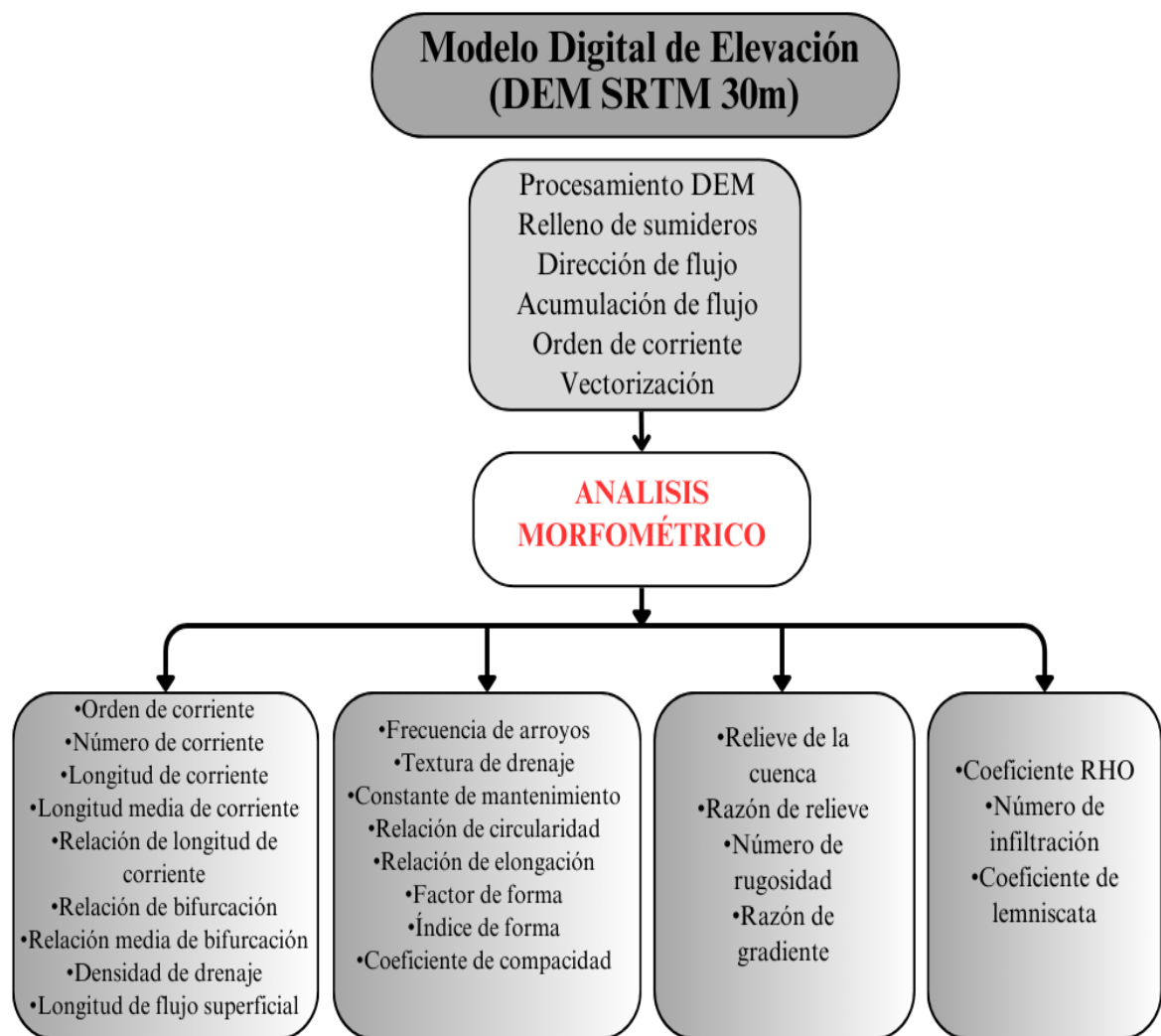


Figura 5: Metodología aplicada para el cálculo de parámetros morfométricos. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Priorización de subcuencas

Se evaluaron y calificaron los parámetros morfométricos de cada subcuenca, utilizando una escala que refleja su potencial para la recarga hídrica. Este enfoque permite identificar áreas prioritarias para acciones de conservación y manejo.

Es así como, luego de obtener los parámetros morfométricos, cada uno se evalúa en una escala del 1 al 10, donde 1 representa el menor potencial para la recarga hídrica y 10 el mayor. Esta escala se elige debido a las 10 subcuencas presentes en el estudio.

Se ha creado una tabla que muestra los valores de todos los parámetros morfométricos para cada subcuenca. Posteriormente, se genera otra tabla que asigna puntuaciones del 1 al 10 a estos valores.

Una vez completado esto, se calcula el promedio de todos los parámetros morfométricos para cada subcuenca, generando un total de 10 promedios. Estos promedios también se evalúan en una escala del 1 al 10 con el objetivo de identificar las zonas con potencial para la recarga hídrica. La subcuenca con el menor promedio recibe una puntuación de 1, mientras que la subcuenca con el mayor promedio recibe una puntuación de 10.

4.2.4 Análisis multicriterio: AHP

La integración de RS-GIS y AHP delineó zonas potenciales para recarga hídrica. La selección de criterios se basó en una revisión exhaustiva, considerando aspectos como la geología, geomorfología, y uso de suelo, subrayando la importancia de una metodología basada en evidencia.

Se emplearon técnicas integradas de RS-SIG y AHP para delinear las zonas potenciales de recarga hídrica en la cuenca del río Bío-Bío.

Para la selección de criterios es importante considerar que los elementos fisiográficos tienen una estrecha relación con la recarga de aguas subterráneas (Zolekar, 2018). El nivel de agua subterránea varía según elementos como la geología, la densidad del drenaje, las precipitaciones, el uso de suelo, etc., (Choudhari et al., 2018). Mediante una exhaustiva revisión bibliográfica, en la mayoría de los estudios científicos han utilizado con frecuencia criterios como litología, geomorfología, suelos, lineamientos, precipitaciones, entre otros, para la delimitación de la zona de aguas subterráneas (Prasad et al., 2008; Das et al., 2019; Maity y Mandal, 2019). El efecto combinado de estos criterios permite detectar las zonas potenciales para el agua subterránea (Yeh, et al., 2016).

Según la revisión bibliográfica realizada, se seleccionaron 7 criterios que son los más recurrentes en todos los estudios. Se detallan a continuación en orden cronológico de acuerdo con su relevancia en el potencial para recarga hídrica.

1) Geología:

La geología ejerce una influencia directa en la ocurrencia, movimiento, almacenamiento y recarga de las aguas subterráneas. Las características geológicas, como la litología y la estructura, desempeñan un papel fundamental en la dinámica de estos recursos hídricos subterráneos (I.P. Senanayake et al., 2016).

La litología, que se refiere a la descripción detallada de las rocas en términos de composición, textura y otras propiedades físicas, controla factores clave como la porosidad y permeabilidad de los acuíferos (Doke et al., 2021; A L Achu et al., 2020). Estas propiedades determinan el origen, condición y disponibilidad del agua subterránea (Melese & Belay, 2021).

La geología de las formaciones superficiales cercanas también influye en la recarga de los acuíferos. Los cambios laterales y verticales en la estratificación, así como las propiedades fisicoquímicas como porosidad y permeabilidad de estos depósitos, determinan el potencial de recarga (Oikonomidis et al., 2015).

2) Geomorfología:

La geomorfología, que estudia las formas del relieve terrestre y los procesos que las modelan, desempeña un papel esencial en la evaluación y caracterización de las aguas subterráneas.

En primer lugar, la geomorfología de una región es un parámetro clave para evaluar las perspectivas y zonas potenciales de agua subterránea, ya que controla el movimiento de estas aguas en el subsuelo (Andualem y Demeke, 2019).

Además, las características geomorfológicas, junto con las estructuras geológicas y la litología, regulan la ocurrencia, movimiento y calidad del agua subterránea (Senanayake, et al., 2016). La evolución de las formas

de relieve brinda información útil para comprender la presencia de zonas porosas y permeables, las cuales son cruciales para el almacenamiento y flujo de estas aguas.

Por lo tanto, el análisis geomorfológico del área de estudio es un componente esencial que debe considerarse para evaluar adecuadamente la recarga de los acuíferos (Senanayake, et al., 2016). En terrenos de roca dura, el estudio de las formas del relieve proporciona evidencia significativa sobre las condiciones regionales del agua subterránea (Donselaar et al., 2017).

3) Textura del suelo:

La textura del suelo, que se refiere a la proporción de partículas de arena, limo y arcilla que lo componen, tiene un papel principal en la variación espacial de la recarga de las aguas subterráneas (Mehra et al., 2016). Las propiedades texturales influyen en factores clave como la infiltración, la capacidad de retención de agua, la porosidad y la permeabilidad del suelo, los cuales determinan en gran medida las tasas de recarga.

El coeficiente de permeabilidad del suelo es un factor determinante para seleccionar sitios adecuados para estructuras de recarga artificial de acuíferos (Eid et al., 2006; Elbeih, 2007). En general, la permeabilidad es directamente proporcional a la porosidad efectiva del suelo y depende de factores como el tamaño de grano, la forma, el arreglo estructural, el grado de saturación, entre otros (Punmia et al., 2005). Por lo tanto, suelos compuestos de grano fino (arcillosos) tienen una capacidad de infiltración menor que los suelos de grano grueso (arenosos), debido a sus diferencias en porosidad y permeabilidad (Das et al., 2020).

4) Pendiente:

La pendiente del terreno influye directamente en varios procesos relacionados con la recarga de aguas subterráneas, como la infiltración, la escorrentía superficial y la percolación.

En general, regiones con pendientes pronunciadas o ángulos de elevación altos tienden a presentar un gran volumen de escorrentía y una menor

infiltración del agua (L. Singh & Katpatal, 2018). Esto se debe a que la pendiente se asocia negativamente con las tasas de percolación e infiltración del agua superficial, pero positivamente con la escorrentía (Das et al., 2020; Doke et al., 2021).

Por el contrario, áreas con pendientes suaves o terrenos planos facilitan una mayor infiltración y recarga de los acuíferos, ya que el agua puede permanecer por más tiempo en la superficie, permitiendo su percolación (Melese & Belay, 2021). En estas zonas, el escurrimiento superficial es lento, brindando más tiempo para que el agua se filtre en el suelo (Das et al., 2020; Senanayake et al., 2016).

En consecuencia, las pendientes pronunciadas tienden a asociarse con bajos niveles de recarga, debido a que el agua fluye rápidamente sin tener suficiente tiempo para infiltrarse. Por otro lado, las tierras planas y de poca pendiente favorecen una mayor recarga de las aguas subterráneas, al retener por más tiempo el agua de lluvia y permitir una extensa infiltración, con condiciones moderadas de evaporación (Senanayake et al., 2016).

El mapa de pendientes se generó empleando la herramienta 'Slope' en ArcGIS, utilizando el Modelo Digital de Elevación como conjunto de datos de entrada.

5) Densidad de drenaje:

La densidad de drenaje es un parámetro clave que indica la proximidad y densidad de los canales de corrientes y arroyos en una cuenca hidrográfica. Este factor tiene una relación inversa con el potencial de aguas subterráneas (Choudhari et al., 2018; Murmu et al., 2019).

Se define como la relación entre la longitud total de todos los cursos de agua en una cuenca y el área total de dicha cuenca (Avtar et al., 2011a). Una alta densidad de drenaje generalmente implica un bajo potencial de recarga de acuíferos, debido a la alta tasa de escorrentía superficial (Prasad et al., 2008; Thomas y Duraisamy, 2017; Anduallem y Demeke, 2019).

Por el contrario, áreas con menor densidad de drenaje tienden a presentar un mayor potencial de aguas subterráneas, ya que existe una mayor probabilidad de que el agua se infiltre y recargue los acuíferos en lugar de escurrir superficialmente (Prasad et al., 2008; Thomas y Duraisamy, 2017; Andualet y Demeke, 2019).

Adicionalmente, la presencia de un sistema de drenaje natural puede ser una indicación indirecta de alta permeabilidad y porosidad del terreno, debido a su relación con el escurrimiento superficial (Krishnamurthy et al., 2000).

El mapa de densidad de drenaje se creó utilizando la herramienta 'Line Density' en ArcGIS. Se empleó el orden de corriente como conjunto de datos de entrada, el cual se obtuvo a partir del Modelo Digital de Elevación.

6) Uso de suelo:

El uso de suelo y la cobertura vegetal son factores fundamentales que influyen directamente en la recarga de las aguas subterráneas, así como en su ocurrencia y disponibilidad (Selvam et al., 2016; B. Doke et al., 2021).

El uso de suelo, que incluye vegetación, cuerpos de agua, zonas residenciales, bosques, etc., influye en la tasa de escorrentía superficial, infiltración y utilización del agua subterránea (Senanayake et al., 2016). Por lo tanto, es considerado un indicador clave para la selección de sitios adecuados para la recarga artificial de acuíferos.

Los diferentes tipos de uso de suelo y cobertura actúan de manera distinta sobre las capacidades de escurrimiento e infiltración del agua. En general, las áreas con gran cubierta vegetal son favorables para la recarga de acuíferos, ya que la cobertura vegetal aumenta la tasa de infiltración (Das et al., 2020). Por el contrario, los terrenos en barbecho y las zonas urbanizadas tienden a incrementar el escurrimiento superficial, reduciendo la infiltración (Das et al., 2020).

7) Precipitación:

La precipitación, en forma de lluvia, es un parámetro importante el cual influye en el potencial y la recarga de las aguas subterráneas, ya que constituye la principal fuente hidrológica para el almacenamiento de estos recursos hídricos subterráneos (AGARWAL et al., 2013; Arulbalaji et al., 2019).

El agua subterránea es un recurso natural dinámico que se recarga directamente con la lluvia. Las precipitaciones controlan y determinan la infiltración del agua superficial hacia los acuíferos, aumentando así su recarga (Maity y Mandal, 2019). Numerosos estudios han reportado una fuerte relación positiva entre los niveles de precipitación y la disponibilidad de aguas subterráneas.

Es importante destacar que la precipitación por sí sola puede sobreestimar los resultados al evaluar zonas potenciales para la recarga hídrica. Esto se debe a que la precipitación es solo uno de los múltiples factores que influyen en la recarga de agua subterránea (Chenini et al., 2010; Shaban et al., 2006).

En primer lugar, no toda la precipitación se infiltra en el suelo, ya que parte se pierde por escorrentía superficial o evaporación (Sophocleous, 2004). Además, una fracción del agua infiltrada es utilizada por la vegetación o retenida en la zona no saturada del suelo, sin llegar a recargar los acuíferos (Scanlon et al., 2002).

Por otro lado, la precipitación presenta una alta variabilidad temporal y espacial, lo que implica que zonas con alta precipitación anual pueden tener una distribución irregular que no favorece la infiltración y recarga.

Adicionalmente, otros factores como el tipo de suelo, la pendiente, la cobertura vegetal, la geología y el uso del suelo pueden limitar la infiltración y recarga de agua subterránea, incluso en áreas con abundante precipitación (Aller et al., 1987; Shaban et al., 2006; Yeh et al., 2009).

La metodología empleada para generar el mapa de precipitaciones implicó la interpolación de datos mediante la herramienta de 'Ponderación Inversa de la Distancia (IDW)', utilizando como conjunto de datos los proporcionados por ERA5-Land.

IDW utiliza la técnica de distancia inversa ponderada. corresponde a un tipo de método determinístico para la interpolación multivariada con un conjunto disperso de puntos conocidos (Esri, 2024). IDW asume que los valores más cercanos están más relacionados que otros con su función.

Tras la identificación de criterios, se crea una matriz de comparación por pares que muestra los pesos asignados a cada uno. Estos pesos se determinaron utilizando la escala fundamental de Saaty, que va de 1 a 9, según la influencia de cada criterio en el potencial de recarga hídrica.

Luego, esta matriz se normaliza y se obtiene el vector de prioridad o vector propio. A continuación, se calculan los parámetros de índice de consistencia, índice de consistencia aleatoria y la relación de consistencia. Después de esto, se le asignan a las características o intervalos de cada criterio valores en una escala del 1 al 7 según su influencia en el potencial de recarga hídrica. En la siguiente tabla se muestra la interpretación de cada valor asignado

Tabla 5: Interpretación asignada para cada clase. RH significa recarga hídrica.

Clase	Interpretación
1	Muy bajo potencial para RH
2	Bajo potencial para RH
3	Moderadamente bajo potencial para RH
4	Moderado potencial para RH
5	Moderadamente alto potencial para RH
6	Alto potencial para RH
7	Muy alto potencial para RH

Finalmente, todos los criterios con sus características, intervalos, escalas y pesos se integran en el modelo de superposición ponderada (utilizando la herramienta "Weighted Overlay") en el software ArcGIS para delimitar las zonas potenciales para recarga hídrica.

En el siguiente diagrama de flujo, se muestra detalladamente la metodología aplicada

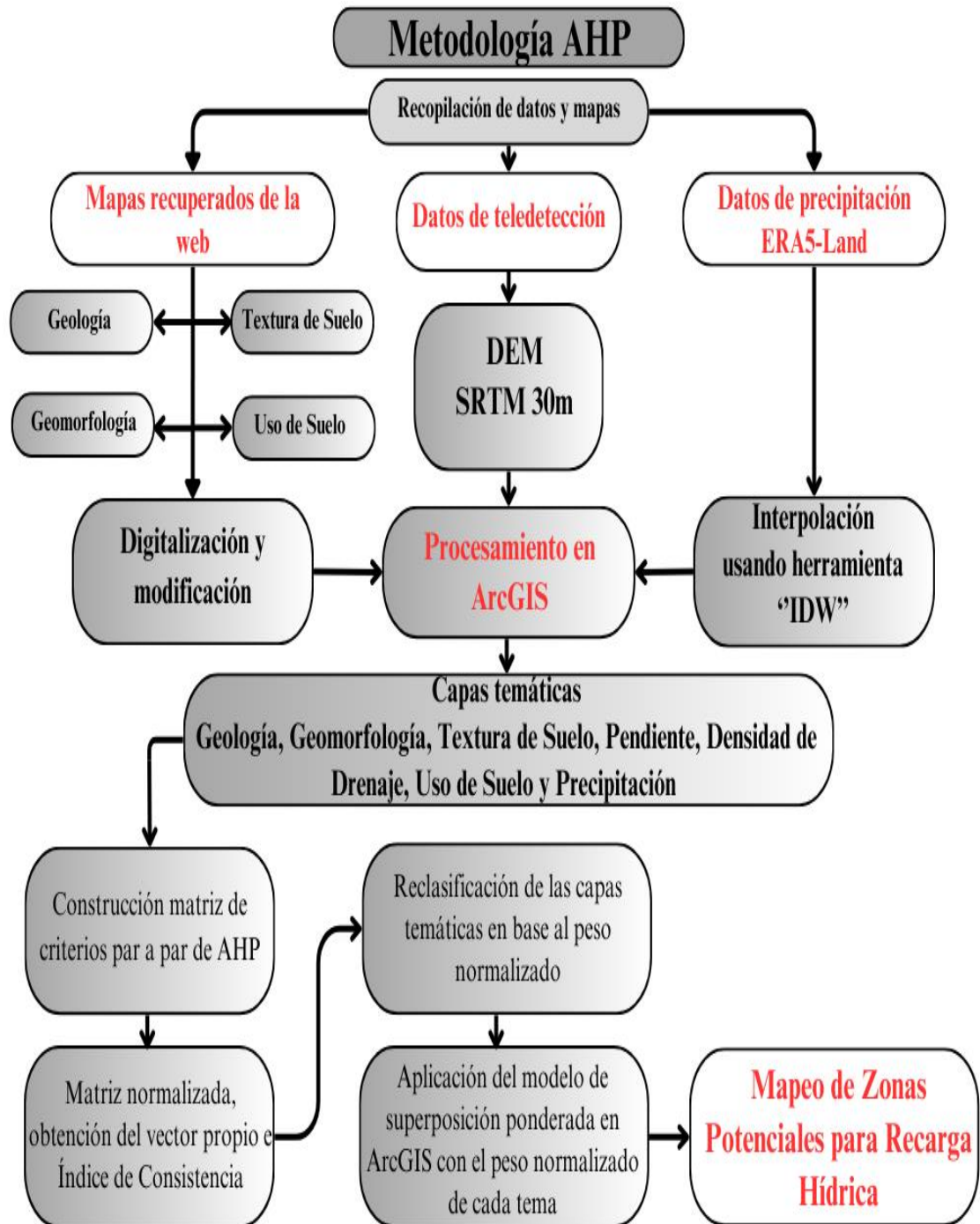


Figura 6: Metodología aplicada para la obtención de zonas potenciales para recarga hídrica mediante AHP. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Machine Learning (Random Forest)

La humedad del suelo juega un papel crucial en una variedad de procesos hidrológicos, siendo la recarga hídrica uno de los más importantes para este estudio. Para abordar este aspecto en la cuenca del río Biobío, se implementó un modelo de Random Forest. Este modelo se basó en datos proporcionados por ERA5-Land, que incluyen información sobre el volumen de agua en distintas capas del suelo basadas en aspectos como la textura del suelo, su clasificación, profundidad y el nivel de agua subterránea. La humedad del suelo fue utilizada como la variable principal en el proceso de entrenamiento del modelo, mientras que criterios como geología, geomorfología, uso del suelo, densidad de drenaje, pendiente y precipitación se emplearon como predictores. Además, se llevó a cabo un análisis para evaluar la importancia relativa de cada predictor, con el fin de comprender su influencia en la predicción de la humedad del suelo.

Para mapear la humedad del suelo correspondiente, se utiliza ArcMap 10.5. El procedimiento para obtener el mapa es análogo al utilizado para mapear las precipitaciones, con la diferencia de que, en el caso de la humedad del suelo, se integran las cuatro capas de información y se promedian los datos a lo largo de los años de estudio. Luego, se utiliza la herramienta 'IDW' para generar la distribución de humedad en la cuenca del río Biobío.

Antes de proceder con la implementación del modelo de RF, se llevó a cabo un preprocesamiento de los datos. Tanto los predictores como la variable objetivo estaban en formato tiff, por lo que, se extrajo la información de cada píxel de todos los parámetros. Sin embargo, debido a las distintas resoluciones de estos parámetros, surgieron inconsistencias al crear una matriz con todas las variables. Para abordar esta situación, se realizó una interpolación con el objetivo de reducir la resolución de los datos, garantizando así la consistencia de la matriz y asegurando que todas las variables tuvieran la misma cantidad de datos.

Posteriormente se llevó a cabo la aplicación del modelo de RF, el cual se explica en detalle en el siguiente diagrama de flujo:

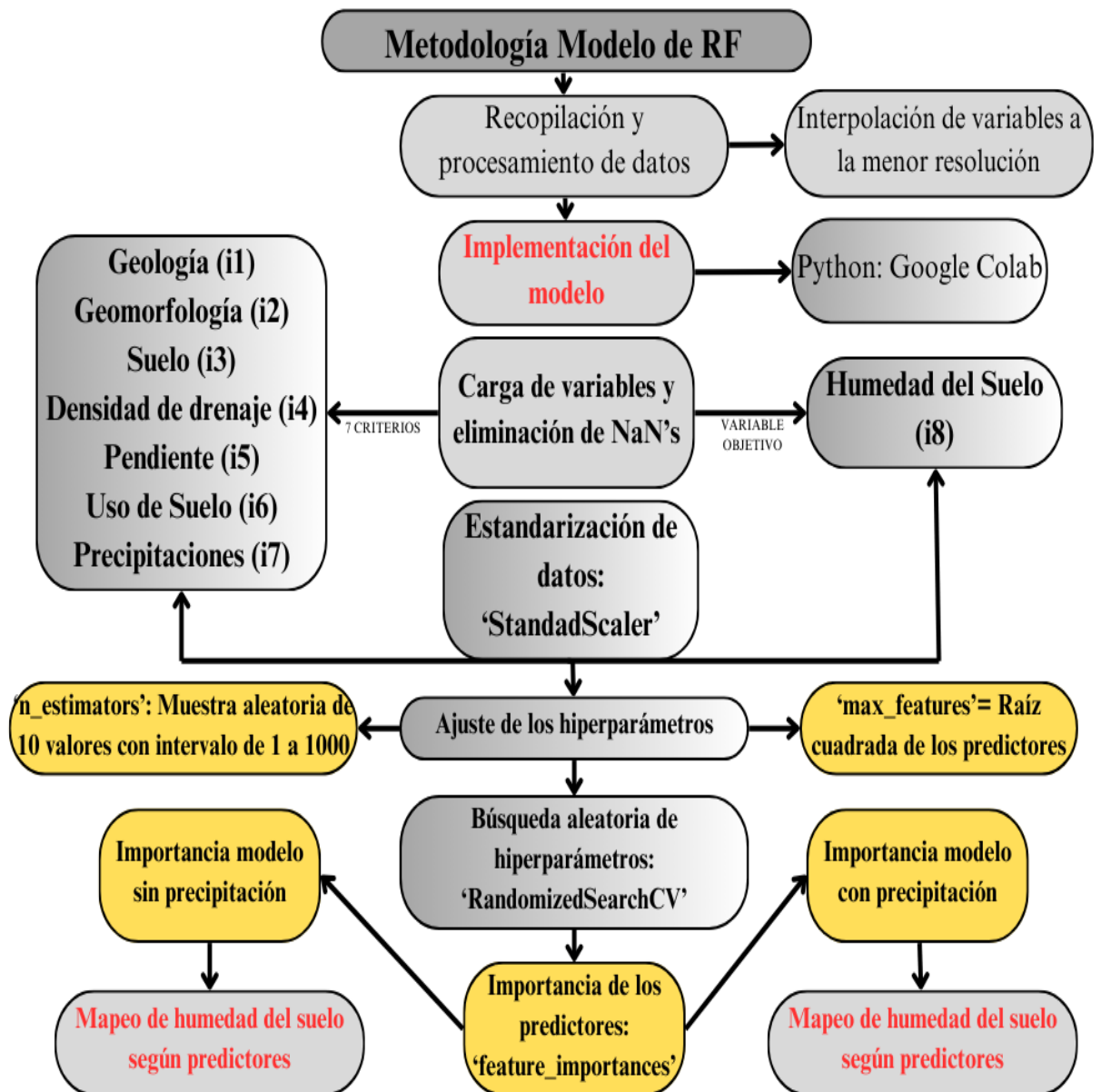


Figura 7: Metodología aplicada en el modelo de Random Forest. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior, muestra la metodología aplicada en el modelo de RF. Como se mencionó anteriormente, el primer paso consistió en el preprocesamiento de los datos y el ajuste a la resolución menor. Posteriormente el modelo se implementó utilizando Google Colab, el cual

permite programar y ejecutar Python en la nube. Para aplicar el algoritmo de RF, se eliminan los valores NaN's de las 8 variables de estudio y se proceden a estandarizar dichas variables; que corresponden a los criterios y a la variable objetivo, con el fin de que los datos se encuentren en un rango similar a modo de que el modelo contenga un menor error en los resultados. Posterior a la estandarización, se ajustan los hiperparámetros del modelo antes de su implementación. El modelo se entrenó utilizando 10 árboles y el resto de hiperparámetros con su valor por defecto. Ahora bien, no se puede saber el valor más adecuado de los hiperparámetros, por lo que, para identificarlos se utilizó la validación cruzada. Finalmente, el modelo realiza la búsqueda aleatoria de los hiperparámetros y posteriormente encuentra la importancia de los predictores, es decir de los 7 criterios para predecir la variable objetivo, obteniendo así la importancia del modelo bajo dos circunstancias distintas: en la primera, se incluyó la precipitación como predictor, mientras que en la segunda no se consideró.

Cabe destacar que el modelo de RF se implementó utilizando el método de regresión. Esta elección se debió a que algunas de las variables no estaban clasificadas, sino que eran continuas. Por ejemplo, variables como la pendiente, densidad de drenaje, precipitación y humedad del suelo son de naturaleza continua y no categórica.

5 Capítulo 4

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de la investigación llevada a cabo en la cuenca del río Biobío. Se establece una conexión clara entre estos hallazgos y los objetivos de investigación definidos previamente, demostrado cómo los resultados contribuyen al conocimiento y gestión de esta importante cuenca. La relevancia de estos descubrimientos es fundamental para la planificación y gestión eficaz de los recursos hídricos en la región, proporcionando información valiosa para autoridades, planificadores y la comunidad científica. En este contexto, los resultados no solo validan la metodología empleada, sino que también subrayan la urgencia de adoptar enfoques de gestión basados en evidencia para asegurar la sostenibilidad de la cuenca del río Biobío.

5.1 Resultados y Discusiones

5.1.1 Red Hídrica

Las figuras siguientes presentan la red hidrográfica de la cuenca del Biobío obtenida mediante el método de Strahler.

Se han incluido tres imágenes que detallan los números de orden de los diferentes cursos de agua en la cuenca. Esta disposición se ha elegido para optimizar tanto la claridad visual como la estética del mapa. Definiendo así, como los órdenes más relevantes y representativos de la cuenca los mayores a 4. Se muestra un patrón de drenaje dendrítico que indica materiales homogéneos en composición, lo que sugiere la falta de control tectónico estructural, como fallas o pliegues (Choudhari et al., 2018). En otras palabras, el paisaje puede ser relativamente uniforme en términos de composición geológica y no hay evidencia de procesos tectónicos que hayan afectado significativamente la formación del sistema de drenaje.

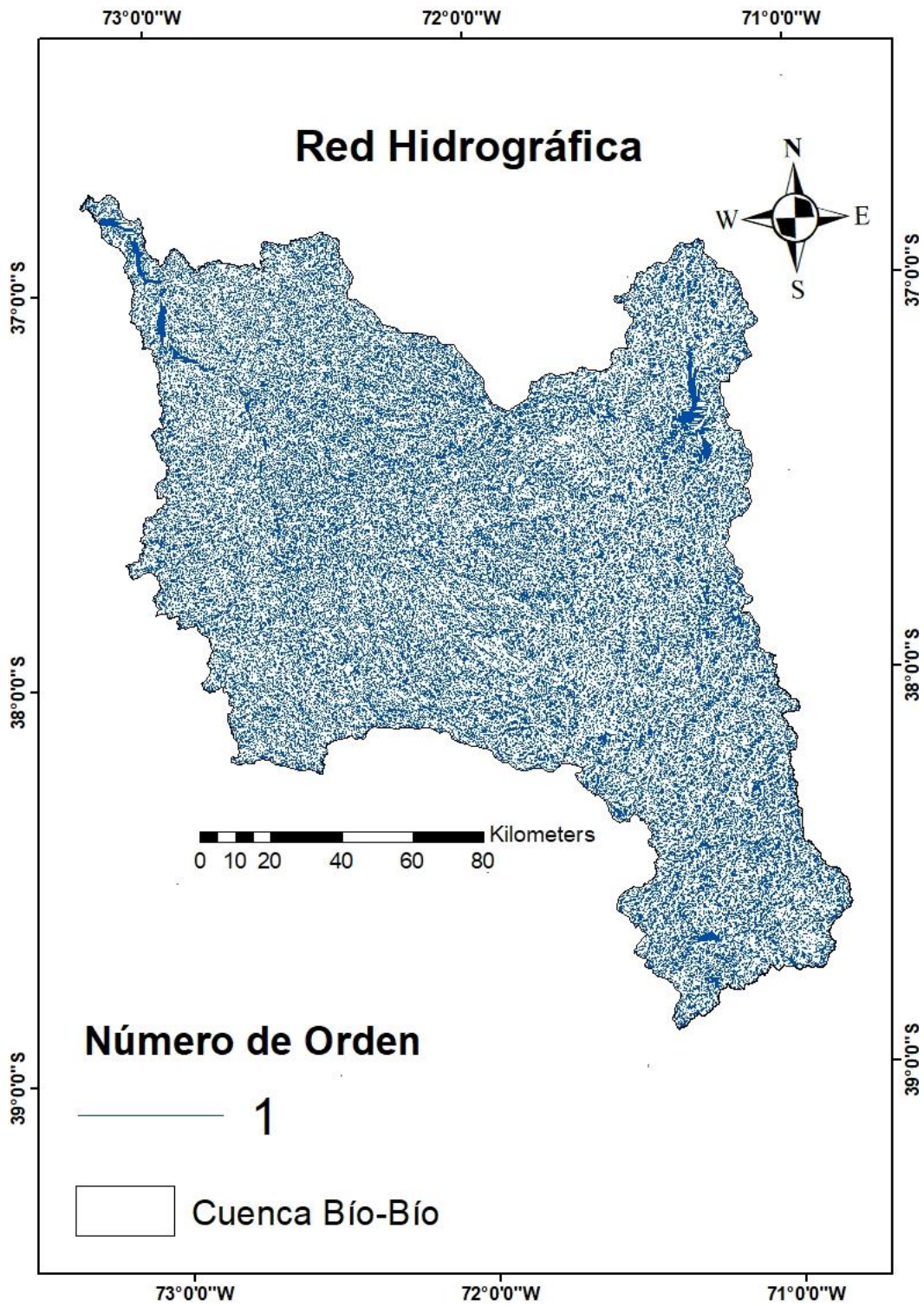


Figura 8: Red hidrográfica de primer orden de la cuenca del río Biobío. Fuente: Elaboración propia.

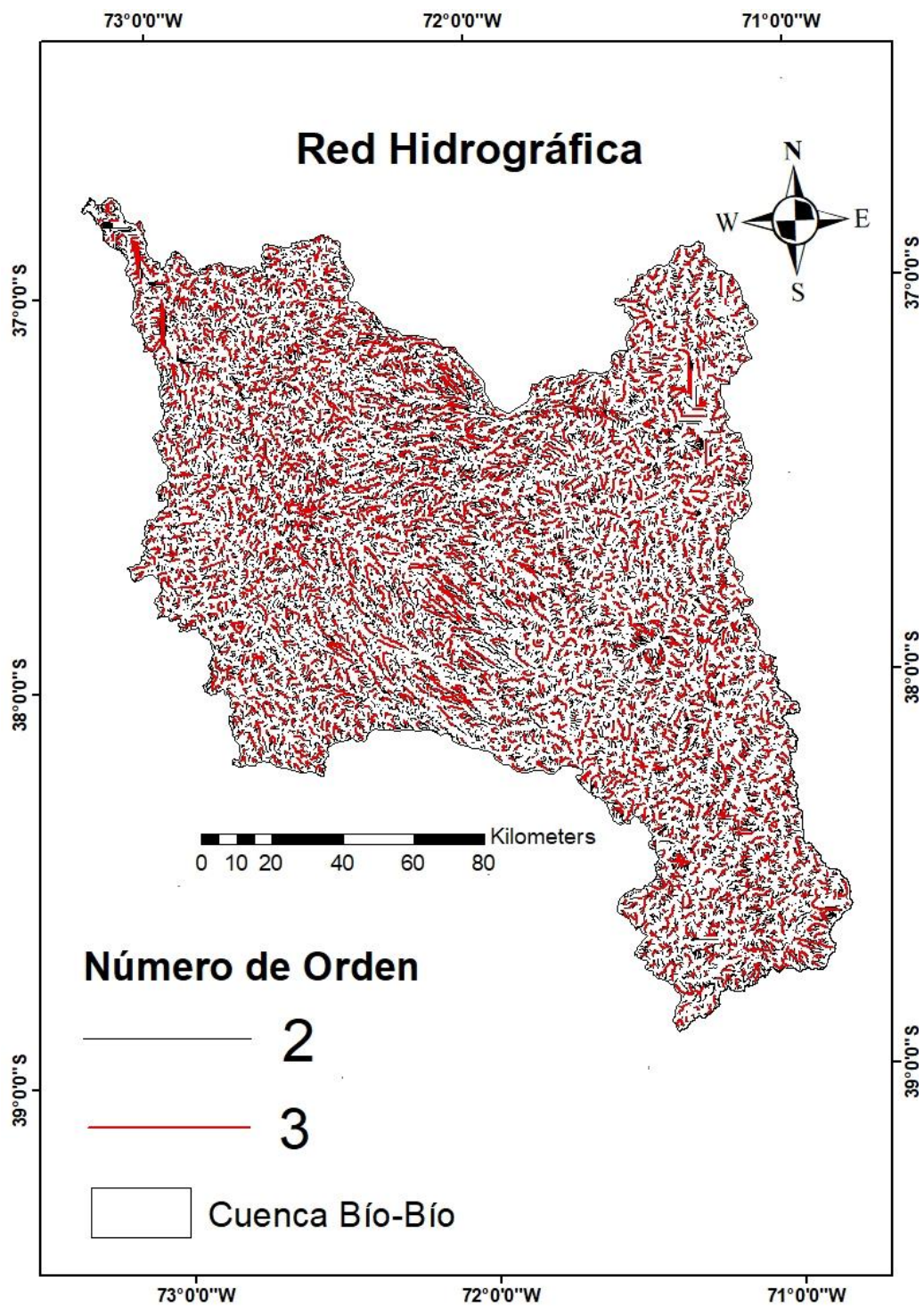


Figura 9: Red hidrográfica de segundo y tercer orden de la cuenca del río Biobío. Fuente: Elaboración propia.

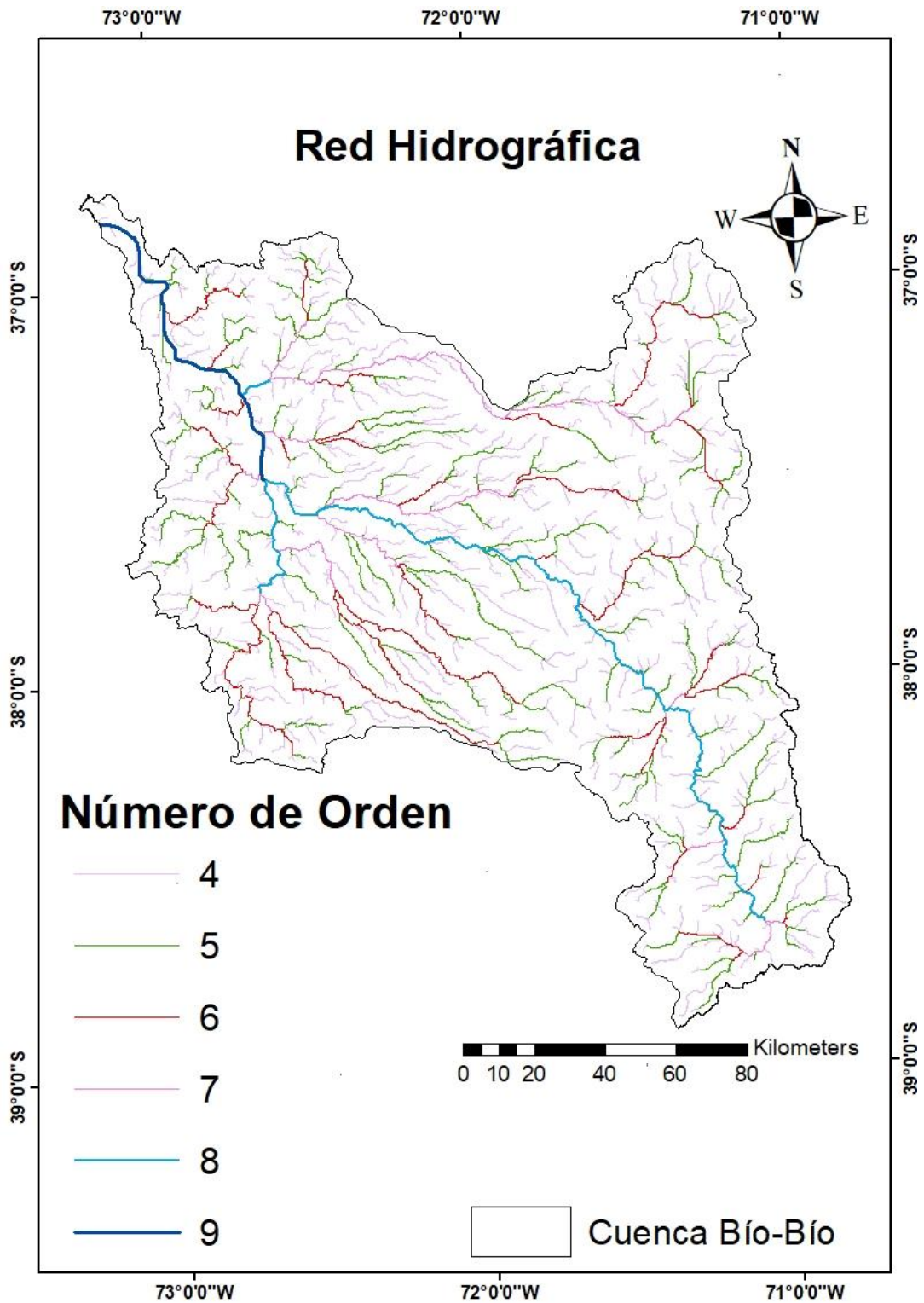


Figura 10: Red hidrográfica de la cuenca del río Biobío con sus respectivos números de orden.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Análisis Morfométrico

La evaluación exhaustiva de los parámetros morfométricos para la cuenca del río Biobío y sus subcuencas subraya la complejidad y diversidad hidrológica y geomorfológica de esta región. El análisis morfométrico proporciona una comprensión de los aspectos lineales, de área y relieve de las cuencas, lo que puede ser valioso en el proceso de toma de decisiones sobre el desarrollo de estas.

La erosión del suelo está directamente relacionada con las características lineales y de relieve (Shekar et al., 2023a). Se considera que el valor máximo de estas características en una cuenca indica el suelo más erosionable. Por otro lado, las características de área tienen una relación indirecta con la erosión del suelo; se ha observado que el suelo más erosionable en una cuenca corresponde al suelo con el valor mínimo de área característica (Shekar et al., 2023a).

A través de un análisis detallado, presentado en las Tablas 6 a 17, se establece una base cuantitativa para entender las dinámicas de agua superficial y subterránea en esta área crítica.

Se destacan en las Tablas 6 a 8 los parámetros generales para toda la cuenca del río Biobío, que tiene un número de orden 9, una superficie de 24.368,8 [km²], y una longitud de 407 [km], revelando la magnitud y complejidad de la cuenca.

Prosiguiendo con una mirada detallada a cada subcuenca, las Tablas 9 a 17 desglosan los parámetros morfométricos específicos para cada subcuenca.

Área y Longitud de las cuencas

Se observa que la subcuenca SW10 es la de mayor área, con 4.314,9 [km²], mientras que la SW1 es la de menor área, con 1.365,5 km². Esta variabilidad en tamaño se refleja en la longitud de las subcuencas, donde la longitud más corta se encuentra en la subcuenca SW1, con 79,1 [km], mientras que la más larga es la SW10, con 152,2 [km].

Una subcuenca más grande y larga, como SW10, posee un área de captación más amplia, lo cual puede resultar en un mayor volumen de escorrentía superficial y aguas subterráneas. Esto, a su vez, puede incrementar el potencial para la generación de energía hidroeléctrica, la agricultura y otros usos del agua, pero también puede presentar desafíos en términos de gestión del riesgo de inundaciones y control de la erosión. La extensión de SW10 sugiere que cualquier estrategia de manejo debe considerar un enfoque integrado que aborde tanto la conservación de los recursos naturales como las necesidades de desarrollo socioeconómico.

Por otro lado, una subcuenca más pequeña y con menor longitud, como SW1, podría presentar un sistema hidrológico más fácil de gestionar, con una menor variabilidad en el flujo de agua. Esto puede favorecer la implementación de proyectos de conservación más localizados, como la reforestación y la creación de pequeñas infraestructuras de retención de agua, que pueden tener un impacto significativo en la mejora de la calidad del agua y la recarga de los acuíferos. Sin embargo, la menor área también puede significar una mayor vulnerabilidad a cambios rápidos en las condiciones hidrológicas y un mayor impacto de actividades humanas concentradas.

El número total de corrientes/arroyos y sus longitudes

El número total de corrientes/arroyos y sus respectivas longitudes en las subcuencas del río Biobío es un reflejo de la densidad y la extensión de la red hidrográfica, elementos fundamentales para la comprensión de la dinámica hídrica y los procesos erosivos dentro de la cuenca.

El número total de corrientes/arroyos en las subcuencas, que varía entre 5.784 cursos de agua (SW1) y 18.803 cursos (SW10), con longitudes que van desde 461,3 [km] (SW1) hasta 1.501,2 [km] (SW10), destaca la heterogeneidad en la configuración geomorfológica y la capacidad de drenaje en las distintas subcuencas.

Una densidad más alta de corrientes/arroyos, como se observa en SW10, sugiere una red de drenaje más desarrollada que puede captar y transportar efectivamente el agua superficial. Esta capacidad es crucial durante eventos de precipitación intensa, donde una red eficiente puede reducir el riesgo de

inundaciones al facilitar un drenaje rápido. Además, una extensa red de cursos de agua puede favorecer la dispersión de sedimentos y nutrientes a lo largo de la cuenca, lo cual es importante para mantener la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, una menor densidad de corrientes/arroyos, como en SW1, puede indicar una capacidad de drenaje menos intensiva, lo que podría resultar en una mayor retención de agua en la superficie. Esto no solo incrementa el potencial de infiltración y recarga de acuíferos, sino que también reduce la velocidad de flujo, disminuyendo así la erosión del suelo. Sin embargo, también podría suponer un mayor riesgo de inundaciones locales si la capacidad de retención es superada durante periodos de lluvia prolongada o intensa.

Cabe destacar que los valores de densidad de drenaje para las subcuencas se caracterizan como bajos, pero aun así se deben asignar en una escala de priorización. Esto es importante debido a que puede causar una sobreestimación de los resultados tanto para la densidad de drenaje como para los demás parámetros calculados.

La relación de longitud de corriente y la relación de bifurcación

La relación de longitud de corriente y la relación de bifurcación son indicadores fundamentales para comprender la organización y el comportamiento fluvial dentro de la cuenca del río Biobío. Estos parámetros revelan la jerarquía y la complejidad de la red de drenaje, lo cual es esencial para evaluar la capacidad de la cuenca para manejar el flujo de agua, tanto en términos de volumen como de velocidad, y su impacto en la erosión y la recarga de los acuíferos.

Dentro de este análisis, la relación de longitud de corriente y relación de bifurcación proporcionan indicativos clave de la estructura fluvial, con promedios que oscilan entre 3,1 (SW5) y 4,8 (SW8) y de 3,5 (SW4) a 4,62 (SW3) respectivamente.

La relación de longitud de corriente, que varía entre 3,1 en SW5 y 4,8 en SW8, refleja la proporción entre las longitudes de los cursos de agua de diferentes órdenes. Un valor más alto implica una mayor longitud promedio

de los cursos de agua a medida que aumenta el orden, lo cual puede indicar una capacidad más eficiente de recoger y transportar el agua de lluvia hacia los ríos principales. Esto es particularmente relevante en áreas con alta precipitación, donde una red de drenaje bien desarrollada puede ayudar a prevenir inundaciones al facilitar un drenaje más rápido y eficiente.

Por otro lado, la relación de bifurcación varía según las irregularidades en el desarrollo geológico de una cuenca (Gabale & Pawar, 2015). En la cuenca la relación de bifurcación varía con promedios que oscilan de 3,5 en SW4 a 4,62 en SW3, describe cómo se distribuyen y conectan los afluentes dentro de la cuenca. Valores más altos indican una mayor tendencia de formación de afluentes, sugiriendo una red de drenaje más densa. Esto puede tener implicaciones significativas en la susceptibilidad de la cuenca a la erosión, ya que una mayor cantidad de afluentes puede incrementar la velocidad del agua, y, por tanto, su capacidad para arrastrar y depositar sedimentos. Por otro lado, una relación de bifurcación menor, indica terreno plano, rocas permeables y suaves donde se infiltra más agua.

Los parámetros de forma

Los parámetros de forma, tales como el factor de forma, la relación de elongación y la relación de circularidad, son cruciales para entender la respuesta hidrológica de la cuenca del río Biobío a eventos de precipitación y su capacidad para mitigar procesos de erosión. Estos desempeñan un papel crítico en la dinámica hídrica de la cuenca. La variación en estos parámetros indica la diversidad geométrica entre las subcuencas, afectando directamente cómo el agua es captada, almacenada y transportada a través del paisaje.

Los parámetros de forma, incluyendo el factor de forma varían de 0,186 (SW10) a 0,218 (SW1) con un promedio de 0,2, la relación de elongación de 0,487 (SW10) a 0,526 (SW1) con un promedio de 0,51, y la relación de circularidad, de 0,182 (SW7) a 0,359 (SW2) con un promedio de 0,28.

El factor de forma obtenido para la cuenca, indica una forma alargada. Este factor establece la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca. Además, se observa que la subcuenca más alargada, SW10, presenta

también una relación de alargamiento más baja, lo que demuestra su naturaleza alargada.

Las etapas de una cuenca se indican mediante la relación de circularidad, donde los valores bajo, medio y alto representan etapas jóvenes, maduras y antiguas en una cuenca. La relación de circularidad obtenida indica una etapa joven de los tributarios de la cuenca.

La densidad de drenaje, la frecuencia de arroyos, y la textura del drenaje.

La densidad de drenaje, la frecuencia de arroyos, y la textura del drenaje son indicadores esenciales que ofrecen una visión detallada de la capacidad de la cuenca del río Biobío para gestionar las aguas pluviales y su susceptibilidad a la erosión. La densidad de drenaje que varía de 0,311 (SW6) a 0,351 (SW2) con un promedio de 0,34, la frecuencia de arroyos variando entre 4,032 (SW6) a 4,378 (SW3) con un promedio de 4,23, junto con la textura del drenaje la cual varía de 1,255 (SW6) a 1,521 (SW2) con un promedio de 1,42, son parámetros que influyen en la recarga del agua y la erosión. Estos parámetros varían significativamente entre las subcuencas, reflejando la diversidad geográfica y la complejidad hidrológica inherente a la región.

Una densidad de drenaje mayor, como se observa en SW2, sugiere una red de drenaje más compacta y densa, lo que puede conducir a un escurrimiento superficial más rápido y reducir la oportunidad para la infiltración del agua hacia el subsuelo. Esto, a su vez, podría limitar la recarga natural de los acuíferos y aumentar el riesgo de erosión del suelo. Por el contrario, una menor densidad de drenaje, como en SW6, indica un espaciado más amplio entre los canales, lo cual puede favorecer la infiltración del agua y, potencialmente, reducir la erosión superficial.

De manera similar, la frecuencia de arroyos refleja la cantidad de canales de drenaje por unidad de área. Un valor más alto (como el caso de SW3) implica una mayor segmentación del paisaje por cuerpos de agua, lo que podría aumentar la capacidad de la cuenca para capturar y retener precipitaciones, promoviendo así la recarga de los acuíferos. Sin embargo, también puede

indicar una mayor susceptibilidad a la erosión si el suelo y la vegetación no son capaces de retener eficazmente el agua

La textura de drenaje, que mide el grado de finura o aspereza de la red de drenaje, también juega un papel crucial ya que ayuda a comprender la permeabilidad. Una textura más fina (valor más alto, como en el caso de SW2) sugiere una mayor densidad de canales pequeños, lo que puede indicar un potencial más alto para la dispersión del escurrimiento superficial y, por ende, una mayor erosión. Sin embargo, también puede significar una mayor eficiencia en la captación de agua de lluvia, mejorando la recarga de agua subterránea en áreas con suelos adecuados para la infiltración.

La longitud de flujo superficial

Se observan variaciones significativas de la longitud de flujo superficial la cual varía de 1,425 (SW2) a 1,607 (SW6) con un promedio de 1,49. Este parámetro indica la extensión de la superficie terrestre sobre la cual el agua fluye antes de unirse a un cauce principal, reflejando la eficiencia de la cuenca en la captación de precipitaciones y su potencial de recarga.

Valores más altos de la longitud de flujo superficial implica que el agua debe recorrer distancias más largas sobre el terreno antes de llegar a la corriente. Durante este recorrido, el agua adquiere mayor velocidad y energía, lo que le permite arrastrar y desprender partículas del suelo con más facilidad, causando erosión. Además, estas longitudes más largas (como en SW6) reducen la capacidad de infiltración del agua en el suelo, disminuyendo así la recarga de los acuíferos. Por otra parte, estos lugares también pueden asociarse con una mayor infiltración, siempre y cuando el suelo y las condiciones subyacentes sean propicias. En estas áreas, las estrategias de manejo y conservación del agua pueden enfocarse en maximizar la captura y retención de agua de lluvia, a través de la implementación de prácticas como la construcción de micro embalses, terrazas de infiltración, y la reforestación, las cuales pueden aumentar la infiltración y reducir la velocidad de escurrimiento. Por otro lado, longitudes superficiales más propensas a la erosión, la gestión efectiva de las aguas pluviales puede requerir enfoques diferentes, como la construcción de barreras para el control de la erosión y

sistemas de drenaje que dirijan el agua de manera eficaz hacia áreas donde pueda ser capturada y utilizada de manera sostenible.

El coeficiente de compacidad y la constante de mantenimiento del cauce.

El coeficiente de compacidad y la constante de mantenimiento del cauce ofrecen información muy importante sobre la dinámica hidrológica y la vulnerabilidad a la erosión dentro de las subcuencas del río Biobío. El coeficiente de compacidad, que varía de 1,673 (SW3) a 2,361 (SW7) con un promedio de 1,94 y la constante de mantenimiento del cauce varía de 2,850 (SW2) a 3,214 (SW6) con un promedio de 2,98, son indicativos de la forma general de la cuenca y su susceptibilidad a la erosión. Estos coeficientes reflejan cómo la forma y estructura de la cuenca afectan el flujo del agua y, por tanto, su potencial hidrológico y de erosión.

Según Schumm (1956), los accidentes geográficos se clasifican según la constante de mantenimiento del cauce. Valores bajos de esta constante indican una menor permeabilidad de las rocas y viceversa (Choudhari et al., 2018). Según lo obtenido, existe una naturaleza de erosionabilidad baja en la cuenca. Ahora bien, una constante de mantenimiento del cauce más alta (como en SW6) sugiere que se requiere un área más grande para mantener un flujo lineal de kilómetros de canal, lo cual puede ser indicativo de una menor densidad de la red de drenaje y, potencialmente, de una mayor capacidad para la infiltración del agua. Sin embargo, esto también puede significar que la cuenca tiene una menor capacidad para canalizar rápidamente el agua hacia los ríos principales, lo que podría incrementar el riesgo de inundaciones locales tras eventos de lluvia intensa.

Por otro lado, un coeficiente de compacidad más bajo (como en SW3) indica una menor capacidad de infiltración. Esto es especialmente crítico en áreas con suelos menos permeables o en regiones con prácticas de uso de suelo que reducen la cobertura vegetal, ya que la falta de vegetación no solo disminuye la capacidad del suelo para absorber el agua, sino que también incrementa la velocidad de la escorrentía, potenciando la erosión.

El número de infiltración, y el coeficiente de Lemniscata.

El número de infiltración, que varía de 1,255 (SW6) a 1,521 (SW2) con un promedio de 1,42, junto con el coeficiente de Lemniscata, de 1,149 (SW1) a 1,343 (SW10) con un promedio de 1,23, proporcionan un panorama o perspectiva sobre la capacidad de la cuenca para filtrar y retener agua subterránea. Estos parámetros destacan las zonas de la cuenca con mayor potencial de recarga de acuíferos, vital para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Valores más altos del número de infiltración, especialmente en subcuencas como SW2, están asociados con una mayor susceptibilidad a la erosión del suelo. El número de infiltración depende de las características del suelo, la cobertura vegetal y las condiciones de humedad. Valores altos de infiltración pueden indicar una alta capacidad de infiltración, sin embargo, esto también implica que el agua que no se infiltra tendrá una mayor velocidad y energía cinética, lo que aumenta su poder erosivo.

De acuerdo con Avila et al., (2021), los valores obtenidos para la cuenca se consideran como bajos, lo que sugiere que la cuenca presenta material subsuperficial permeable con una buena cobertura vegetal y bajo relieve, lo que resultaría en una mayor capacidad de infiltración. Esto implica que tales subcuencas podrían ser áreas clave para enfocar esfuerzos de conservación del suelo y agua, implementando prácticas de manejo que mejoren aún más la infiltración, como la reforestación, la conservación de humedales, y la construcción de infraestructuras de recarga artificial.

Análogo a lo obtenido en la densidad de drenaje, también podría ocurrir una sobreestimación de los resultados al realizar la priorización correspondiente.

Por otro lado, el coeficiente de Lemniscata, al variar entre subcuencas, indica la influencia de la forma y configuración de la cuenca en la eficiencia de captación y retención del agua. Así al mostrar números de infiltración y coeficientes de Lemniscata menores, podrían indicar condiciones menos propicias para la infiltración y, por tanto, para la recarga de acuíferos. Al contrario, subcuencas con valores más altos, como SW10, demuestran una forma más eficiente en términos de recoger precipitaciones y dirigir las hacia la recarga subterránea, identificándose, así como zonas críticas para la sostenibilidad hídrica de la región.

La morfología de la cuenca.

En cuanto a la morfología de la cuenca, el coeficiente RHO varía de 0,714 (SW3) a 1,147 (SW8) con un promedio de 0,93, ilustra la relación entre la estructura del drenaje y la eficacia con que la red de drenaje maneja el flujo de agua.

Este coeficiente no solo proporciona una medida de cómo las características físicas de la cuenca afectan la dirección y velocidad del flujo de agua, sino que también tiene implicaciones significativas para la vulnerabilidad de la cuenca ante la erosión y la sedimentación.

Una variación en el coeficiente RHO, como se observa entre SW3 y SW8, sugiere diferencias en la capacidad de las subcuencas para canalizar el agua hacia los cuerpos principales, lo que puede influir en la eficiencia de los procesos de recarga de agua subterránea y en la mitigación de inundaciones.

Valores más altos en el coeficiente RHO (como en SW8), indican que la cuenca tiene una forma más alargada y estrecha, lo que puede significar que la cuenca sea más propensa a la erosión y que tenga una menor capacidad de infiltración debido a factores como tiempos de concentración más largos, pendientes más pronunciadas y mayores longitudes del flujo superficial. Por otro lado, valores más bajos del coeficiente RHO (como en SW3) indican que la cuenca tiene una forma más redondeada o compacta, permitiendo que la cuenca sea menos propensa a la erosión y tengan una mayor capacidad de infiltración.

El rol del relieve.

Este análisis es complementado por la observación del relieve de la cuenca, donde el mínimo se encuentra en SW2, con 552 [m], mientras que el máximo relieve está en SW5, ascendiendo a de 3.447 [m].

Finalmente, la variación en la relación de relieve, de 0,01 (SW1) a 0,07 (SW6), y en el número de rugosidad que varía de 0,19 (SW2) a 1,12 [km] (SW5), junto con la razón de gradiente que varía de 0,0003 (SW4) a 0,0058 (SW3), resalta la diversidad topográfica de la cuenca y su impacto en la dinámica del agua y la erosión del suelo.

La variación en la relación de relieve y el número de rugosidad no solo destaca la heterogeneidad topográfica de la cuenca del río Biobío, sino que también subraya cómo estas características geomorfológicas influyen de manera significativa el comportamiento hidrológico y los procesos erosivos en diferentes partes de la cuenca. Por ejemplo, un número de rugosidad elevado indica áreas con terrenos más accidentados, lo que puede aumentar la velocidad de escorrentía superficial y, por ende, potenciar la erosión del suelo. En contraste, áreas con un número de rugosidad más bajo tienden a tener un terreno más suave, lo que favorece la infiltración del agua y reduce el riesgo de erosión.

Además, la razón de gradiente proporciona una medida de la pendiente del canal, lo cual es esencial para comprender la velocidad del agua que fluye a través de la cuenca. Una razón de gradiente más alta, como la observada en SW3, sugiere una pendiente pronunciada, lo que puede conducir a un aumento en la velocidad de flujo y a un mayor potencial de erosión. En cambio, una razón de gradiente más baja indica una pendiente más suave, resultando en un flujo más lento y, potencialmente, una mejor oportunidad para la infiltración y la recarga del agua subterránea.

Tabla 6: Características lineales de la Cuenca del río Bío-Bío.

Orden de corriente	Número de corriente	Relación de bifurcación	Longitud total de la corriente [km]	Longitud media de la corriente	Relación de longitud de corriente
1	80778		4865,671	0,060	
2	17456	4,628	743,496	0,043	0,707
3	3644	4,790	2387,203	0,655	15,381
4	782	4,660	140,436	0,180	0,274
5	186	4,204	25,501	0,137	0,763
6	43	4,326	3,453	0,080	0,586
7	14	3,071	3,995	0,285	3,553
8	3	4,667	0,965	0,322	1,127

9	1	3,000	0,262	0,262	0,814
Promedio		4,168	907,887		
Total	102.907	33,346	8170,983	2,024	23,205

Tabla 7: Parámetros de área de la Cuenca del río Bío-Bío.

Cuenca del río Bío-Bío	
Área [km^2]	24368,802
Perímetro [km]	1127,976
Longitud [km]	407,057
Factor de forma	0,147
Relación de elongación	0,433
Relación de circularidad	0,241
Densidad de drenaje	0,335
Frecuencia de arroyos	4,223
Textura del drenaje	1,416
Coeficiente de compacidad	2,038
Constante de mantenimiento del cauce	2,982

Tabla 8: Parámetros de relieve de la Cuenca del río Bío-Bío.

Elevación máxima	Elevación mínima	Relieve de la cuenca [m]	Relación de relieve [km]
3532	0	3532	0,009

Tabla 9: Características geométricas por subcuenca.

Subcuenca (SW)	Área [km^2]	Perímetro [km]	Longitud [km]
SW1	1365,55	244,40	79,21

SW2	1917,91	259,04	96,07
SW3	2749,67	308,82	117,88
SW4	2661,79	371,55	115,73
SW5	1710,75	268,66	90,03
SW6	1679,45	268,48	89,09
SW7	2835,78	442,61	119,96
SW8	3625,14	470,13	137,92
SW9	1507,77	281,70	83,80
SW10	4314,99	402,14	152,27

Tabla 10: Orden de las corrientes por subcuenca con su respectivo número de segmentos.

	Número de orden									
SW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Número total de segmentos
SW1	4504	973	211	45	11	2	0	1	1	5748
SW2	6485	1428	316	62	16	4	2	1	0	8314
SW3	9542	1983	397	88	23	5	1	0	0	12039
SW4	8801	1950	437	102	24	6	2	3	1	11326
SW5	5618	1177	237	60	14	5	1	0	0	7112
SW6	5363	1130	214	49	12	2	1	1	0	6772
SW7	9200	2003	423	88	20	4	3	1	0	11742
SW8	12008	2634	561	117	25	4	3	1	0	15353
SW9	4982	1085	205	36	10	2	1	1	0	6322
SW10	14701	3225	679	147	36	10	4	1	0	18803

Tabla 11: Orden de las corrientes por subcuenca con su respectiva longitud de corriente.

SW	Longitud de corriente									Longitud total
	Número de orden									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
SW1	271,30	41,44	138,23	8,08	1,51	0,16	0,00	0,32	0,26	461,30
SW2	390,62	60,82	207,01	11,13	2,19	0,32	0,57	0,32	0,00	673,00
SW3	574,76	84,46	260,08	15,80	3,15	0,40	0,29	0,00	0,00	938,95
SW4	530,13	83,06	286,28	18,32	3,29	0,48	0,57	0,96	0,26	923,35
SW5	338,40	50,13	155,26	10,78	1,92	0,40	0,29	0,00	0,00	557,17
SW6	323,04	48,13	140,19	8,80	1,65	0,16	0,29	0,32	0,00	522,58
SW7	554,16	85,31	277,11	15,80	2,74	0,32	0,86	0,32	0,00	936,63
SW8	723,30	112,19	367,51	21,01	3,43	0,32	0,86	0,32	0,00	1228,94
SW9	300,09	46,21	134,30	6,47	1,37	0,16	0,29	0,32	0,00	489,20
SW10	885,52	137,36	444,82	26,40	4,94	0,80	1,14	0,32	0,00	1501,29

Tabla 12: Orden de las corrientes por subcuencas con su respectiva longitud media de corriente.

SW	Longitud media de corriente								
	Número de orden								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SW1	0,20	0,01	0,14	0,04	0,03	0,01			0,26
SW2	0,20	0,01	0,14	0,04	0,04	0,02	0,14	0,16	
SW3	0,21	0,01	0,13	0,04	0,04	0,02	0,06		
SW4	0,20	0,01	0,15	0,04	0,03	0,02	0,10	0,48	0,09
SW5	0,20	0,01	0,13	0,05	0,03	0,03	0,06		
SW6	0,19	0,01	0,12	0,04	0,03	0,01	0,14	0,32	
SW7	0,20	0,01	0,14	0,04	0,03	0,02	0,21	0,11	
SW8	0,20	0,01	0,14	0,04	0,03	0,01	0,21	0,11	
SW9	0,20	0,01	0,12	0,03	0,04	0,02	0,14	0,32	
SW10	0,21	0,01	0,14	0,04	0,03	0,02	0,11	0,08	

Tabla 13: Relación de longitud de corriente por subcuenca.

SW	Relación de longitud de corriente								
	Número de orden								

	2/1	3/2	4/3	5/4	6/5	7/6	8/7	9/8	Promedio (Rlm)
SW1	0,05	15,44	0,27	0,88	0,44				3,413
SW2	0,05	15,46	0,24	1,00	0,57	7,11	1,13		3,65
SW3	0,04	14,82	0,30	0,90	0,49	3,27			3,30
SW4	0,05	15,56	0,29	0,77	0,62	4,74	5,07	0,18	3,409
SW5	0,05	14,78	0,34	0,70	0,90	1,99			3,13
SW6	0,05	13,82	0,33	0,82	0,40	10,66	2,25		4,05
SW7	0,05	14,92	0,27	0,83	0,52	13,32	0,50		4,34
SW8	0,05	14,93	0,27	0,78	0,44	16,66	0,50		4,80
SW9	0,05	13,34	0,25	1,21	0,42	8,88	2,25		3,77
SW10	0,05	14,76	0,28	0,86	0,66	5,12	0,70		3,21

Tabla 14: Relación de bifurcación por subcuenca.

SW	Relación de bifurcación								
	<i>Número de orden</i>								
	2/1	3/2	4/3	5/4	6/5	7/6	8/7	9/8	Promedio (Rbm)
SW1	4,63	4,61	4,69	4,09	5,50			1,00	4,09
SW2	4,54	4,52	5,10	3,88	4,00	2,00	2,00		3,72

SW3	4,81	4,99	4,51	3,83	4,60	5,00			4,62
SW4	4,51	4,46	4,28	4,25	4,00	3,00	0,67	3,00	3,52
SW5	4,77	4,97	3,95	4,29	2,80	5,00			4,30
SW6	4,75	5,28	4,37	4,08	6,00	2,00	1,00		3,93
SW7	4,59	4,74	4,81	4,40	5,00	1,33	3,00		3,98
SW8	4,56	4,70	4,79	4,68	6,25	1,33	3,00		4,19
SW9	4,59	5,29	5,69	3,60	5,00	2,00	1,00		3,88
SW10	4,56	4,75	4,62	4,08	3,60	2,50	4,00		4,02

Tabla 15: Parámetros morfométricos de forma y área calculados para cada subcuenca.

	SW 1	SW 2	SW 3	SW 4	SW 5	SW 6	SW 7	SW 8	SW 9	SW 10	Promedio
Ff	0,21 8	0,20 8	0,1 98	0,1 99	0,21 1	0,21 2	0,19 7	0,19 1	0,21 5	0,18 6	0,20
Re	0,52 6	0,51 4	0,5 02	0,5 03	0,51 8	0,51 9	0,50 1	0,49 2	0,52 3	0,48 7	0,51
Rc	0,28 7	0,35 9	0,3 62	0,2 42	0,29 8	0,29 3	0,18 2	0,20 6	0,23 9	0,33 5	0,28
Sb	4,59 5	4,81 2	5,0 54	5,0 31	4,73 8	4,72 6	5,07 5	5,24 7	4,65 7	5,37 3	4,93
Dd	0,33 8	0,35 1	0,3 41	0,3 47	0,32 6	0,31 1	0,33 0	0,33 9	0,32 4	0,34 8	0,34

Fs	4,20 9	4,33 5	4,3 78	4,2 55	4,15 7	4,03 2	4,14 1	4,23 5	4,19 3	4,35 8	4,23
Ds	1,42 2	1,52 1	1,4 95	1,4 76	1,35 4	1,25 5	1,36 8	1,43 6	1,36 0	1,51 6	1,42
L0	1,48 0	1,42 5	1,4 64	1,4 41	1,53 5	1,60 7	1,51 4	1,47 5	1,54 1	1,43 7	1,49
Cc	1,87 9	1,68 0	1,6 73	2,0 46	1,84 5	1,86 1	2,36 1	2,21 8	2,06 1	1,73 9	1,94
Ccm	2,96 0	2,85 0	2,9 28	2,8 83	3,07 0	3,21 4	3,02 8	2,95 0	3,08 2	2,87 4	2,98
If	1,42 2	1,52 1	1,4 95	1,4 76	1,35 4	1,25 5	1,36 8	1,43 6	1,36 0	1,51 6	1,42
K	1,14 9	1,20 3	1,2 63	1,2 58	1,18 4	1,18 1	1,26 9	1,31 2	1,16 4	1,34 3	1,23
RHO	0,83 5	0,98 2	0,7 14	0,9 68	0,72 8	1,03 1	1,09 1	1,14 7	0,97 2	0,79 8	0,93

Tabla 16: Aspectos de relieve calculados para cada subcuenca.

SW	Elevación [m]		Relieve (Bh)	L_h [km]	Relación de relieve (rh)	N° de rugosidad (Rn) [km]
	<i>Max (H)</i>	<i>Min (h)</i>	<i>(H-h)</i>			
SW1	647,00	0,00	647,00	78,06	0,01	0,22
SW2	595,00	43,00	552,00	9,71	0,06	0,19
SW3	3491,00	354,00	3137,00	65,64	0,05	1,07
SW4	1386,00	42,00	1344,00	27,72	0,05	0,47
SW5	3532,00	85,00	3447,00	63,01	0,05	1,12
SW6	1748,00	51,00	1697,00	25,43	0,07	0,53
SW7	1966,00	52,00	1914,00	42,44	0,05	0,63
SW8	3099,00	79,00	3020,00	148,07	0,02	1,02
SW9	1925,00	63,00	1862,00	30,59	0,06	0,60

SW10	2988,00	657,00	2331,00	90,52	0,03	0,81
-------------	---------	--------	---------	-------	------	------

Tabla 17: Aspectos del gradiente de cada subcuenca.

SW	Elevación [m]		(a-b)	L_h [km]	Razón de gradiente (Gr)
	<i>Origen (a)</i>	<i>Desembocadura (b)</i>			
SW1	42	5	37	78,0622	0,0005
SW2	62	43	19	9,7077	0,0020
SW3	950	568	382	65,6363	0,0058
SW4	50	42	8	27,7174	0,0003
SW5	373	159	214	63,0088	0,0034
SW6	74	53	21	25,4257	0,0008
SW7	69	52	17	42,4403	0,0004
SW8	650	90	560	148,0741	0,0038
SW9	106	79	27	30,5870	0,0009
SW10	1016	661	355	90,5170	0,0039

Resumen sobre análisis morfométrico

El análisis morfométrico de la cuenca del río Biobío revela detalles cruciales sobre sus características geomorfológicas y sus implicaciones en la dinámica hídrica y la gestión de los recursos.

La densidad de drenaje varía de 0.311 en SW6 a 0.351 en SW2, indicando que subcuencas con densidades más altas pueden tener un escurrimiento superficial más rápido, esencial para prevenir inundaciones pero que podría limitar la recarga de los acuíferos. La frecuencia de arroyos oscila entre 4.032 en SW6 y 4.378 en SW3, lo que sugiere una red hidrográfica densa que puede mejorar la retención y captura de precipitaciones, favoreciendo la recarga de agua subterránea.

La textura del drenaje varía de 1.255 en SW6 a 1.521 en SW2, mostrando una red de canales finos que facilita el transporte de sedimentos y nutrientes, pero que podría aumentar la erosión superficial. La longitud de flujo superficial oscila entre 1.425 en SW2 y 1.607 en SW6, indicando que el agua recorre mayores distancias antes de unirse a ríos principales, lo que podría afectar tanto la erosión como la recarga de los acuíferos, dependiendo de las características del suelo.

El coeficiente de compacidad muestra una variación de 1.673 en SW3 a 2.361 en SW7, sugiriendo que cuencas más compactas pueden experimentar una escorrentía más intensa y menor infiltración, aumentando su susceptibilidad a la erosión. La constante de mantenimiento del cauce varía de 2.850 en SW2 a 3.212 en SW6, indicando que subcuencas con valores más altos podrían facilitar una mayor infiltración del agua y reducir el riesgo de inundaciones locales.

Todos los sectores presentan un número de infiltración de 1.42, reflejando una alta capacidad generalizada de infiltración en la cuenca, favorable para la recarga de acuíferos. El coeficiente de Lemniscata oscila de 1.149 en SW1 a 1.343 en SW10, destacando una capacidad eficaz de la cuenca para capturar y retener precipitaciones. Finalmente, el coeficiente RHO varía de 0.714 en SW3 a 1.147 en SW8, mostrando cómo las diferencias en la estructura del drenaje pueden influir en la eficiencia del manejo del agua, con valores más altos indicando una mayor susceptibilidad a la erosión y menor capacidad de infiltración.

En resumen, si atendiéramos únicamente al análisis morfométrico, independientemente de toda la información que vamos a desarrollar en la subsiguiente sección, las subcuencas del río Biobío presentan variabilidad en su capacidad de recarga hídrica, influenciada por parámetros morfométricos clave como la densidad de drenaje, la frecuencia de arroyos, la textura del drenaje, el número de infiltración y el coeficiente de Lemniscata.

Es así como, con la mayor densidad de drenaje (0,351) indica normalmente una menor capacidad de infiltración; sin embargo, su textura de drenaje extremadamente fina (1.521) sugiere una red de canales menos densa, que podría mejorar la infiltración y la dispersión del agua de lluvia. Por otro lado,

SW3 destaca por su alta frecuencia de arroyos (4,378), lo que puede impedir significativamente la retención y captura de agua, disminuyendo la recarga acuífera. Además, SW10 se muestra prometedor con el coeficiente de Lemniscata más alto (1,343), indicando una forma óptima de la cuenca para retener eficazmente el agua de lluvia. Estos análisis resaltan a SW2, SW3 y SW10 como subcuencas críticas donde las estrategias de gestión y conservación del agua deberían priorizarse para la optimización de la recarga de los acuíferos en la región del Biobío.

Por lo que, se procede a priorizar de mejor manera la cuenca del río Biobío.

5.1.2.1 Priorización de la cuenca del río Bío-Bío

De acuerdo con lo descrito en el capítulo 4, mediante el uso de los parámetros morfométricos se realiza la priorización de la cuenca, los resultados se muestran en la siguiente tabla. La primera prioridad, valorada con un 1, señala áreas con menores perspectivas para aguas subterráneas, mientras que la última prioridad, valorada con un 10, indica un alto potencial de aguas subterráneas. Las características morfométricas se utilizan para priorizar las subcuencas más susceptibles, ya que tienen una relación directa o indirecta con el flujo máximo, la escorrentía y el riesgo de erosión del suelo (Shekar, PR & Mathew, A. 2022).

La Tabla 18, que sintetiza esta priorización, integra un conjunto de parámetros clave, como la relación de bifurcación (Rbm), la frecuencia de arroyos (Fs), la densidad (Dd) y textura del drenaje (Ds), entre otros, que tienen una correlación directa o indirecta con el comportamiento hidrológico de la cuenca. Por ejemplo, subcuencas con alta densidad de drenaje (como SW2) y relación de bifurcación (como SW5) podrían indicar áreas con una rápida escorrentía superficial y, por tanto, menor infiltración y recarga de aguas subterráneas. En contraste, subcuencas con baja densidad de drenaje (como SW6) y relación de bifurcación (como SW4) sugieren un mayor potencial para la infiltración y la retención de agua, contribuyendo así a una mayor disponibilidad de recursos hídricos subterráneos.

Tabla 18: Priorización de la cuenca del río Bío-Bío por subcuenca basada en el cálculo de parámetros morfométricos.

	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7	SW8	SW9	SW10
Relación de bifurcación media (Rbm)	4	9	1	10	2	7	6	3	8	5
Relación media de longitud de corriente (Rlm)	7	5	8	6	10	3	2	1	4	9
Frecuencia de arroyos (Fs)	6	3	1	4	8	10	9	5	7	2
Densidad de drenaje (Dd)	6	1	4	3	8	10	7	5	9	2
Textura del drenaje (Ds)	6	1	3	4	9	10	7	5	8	2
Longitud de flujo superficial (L0)	5	10	7	8	3	1	2	6	4	9
Coeficiente RHO	7	4	10	6	9	3	2	1	5	8
Número de infiltración (If)	6	1	3	4	9	10	7	5	8	2
Constante de mantenimiento del cauce (Ccm)	6	1	4	3	8	10	7	5	9	2

Relieve (Bh)	9	10	2	8	1	7	5	3	6	4
Razón de relieve (Rh)	10	3	6	5	4	1	7	9	2	8
Número de rugosidad (Rn)	9	10	2	8	1	7	5	3	6	4
Relación de circularidad (Rc)	5	9	10	4	7	6	1	2	3	8
Relación de elongación (Re)	10	6	4	5	7	8	3	2	9	1
Factor de forma (Ff)	10	6	4	5	7	8	3	2	9	1
Coefficiente de Lemniscata (K)	1	5	7	6	4	3	8	9	2	10
Índice de forma (Sb)	1	5	7	6	4	3	8	9	2	10
Coefficiente de compacidad (Cc)	6	2	1	7	4	5	10	9	8	3
Razón de gradiente (Gr)	3	6	10	1	7	4	2	8	5	9
Promedio	6,16	5,11	4,95	5,42	5,89	6,11	5,32	4,84	6,00	5,21
Ranking	10	3	2	6	7	9	5	1	8	4
Interpretación	VL	H	H	M	L	L	M	VH	L	H

Donde:

- VH: priorización muy alta.
- H: priorización alta.
- M: priorización media.
- L: priorización baja.
- VL: priorización muy baja.

En el extremo opuesto, la SW1 presenta la priorización más baja. A través de este análisis, se destaca que la SW8 requiere la priorización más alta, con un promedio de 4,8, lo que sugiere una erosión del suelo más alta y la zona más deficitaria para la recarga de acuíferos, por lo que, surge la necesidad de implementar prácticas de gestión y conservación específicas. En el extremo opuesto, la SW1, necesita la priorización más baja en la cuenca, con un promedio de 6,1, indicando áreas con mayores perspectivas para la recarga de aguas subterráneas y posiblemente menores desafíos en términos de escorrentía y erosión.

Con base en lo anterior, se genera el siguiente mapa, el cual ilustra visualmente las zonas de la cuenca que requieren de diferentes niveles de intervención y gestión.

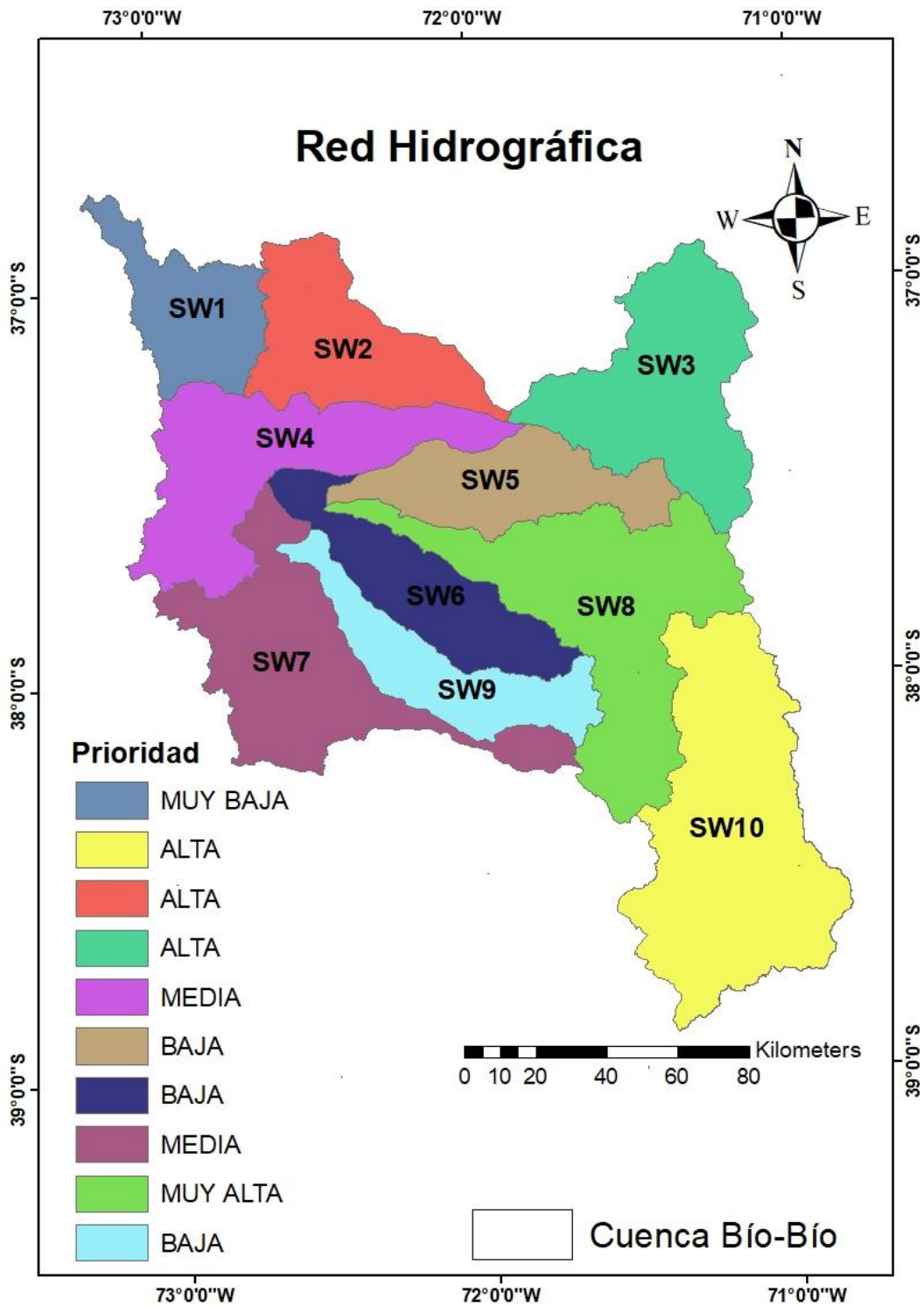


Figura 11: Priorización de la cuenca del río Bío-Bío por subcuencas. Fuente: Elaboración propia.

El análisis detallado de priorización subraya la importancia de dirigir los esfuerzos de conservación y gestión de recursos hídricos hacia zonas críticas de la cuenca del río Biobío.

Las subcuencas SW10 y SW8, destacadas por su ubicación estratégica en regiones de alto valor ecológico y recursos hídricos significativos, como Santa Bárbara, Alto Biobío, Lonquimay, y el área del nacimiento del Río Biobío, incluyendo las lagunas Galletué e Icalma, son esenciales para la conservación del paisaje natural y la sostenibilidad de los recursos acuíferos. Estas áreas, al ser identificadas con una alta prioridad, resaltan la necesidad de implementar medidas de gestión y estrategias de manejo sostenible del agua que aseguren la protección de su biodiversidad y la continuidad de los servicios ecosistémicos.

Por otro lado, las subcuencas SW1, SW5, SW6 y SW9, localizadas en áreas como la Desembocadura del Río Biobío, Quilleco, Mulchén y Mininco, demandan una priorización baja. Esto indica áreas donde las perspectivas para aguas subterráneas son mayores y, aunque aún requieren gestión y estrategias de conservación, la urgencia de intervención es menor en comparación con las áreas de alta prioridad.

En cuanto a las subcuencas SW7 y SW4 localizadas en la zona intermedia entre Nacimiento y Angol, fueron catalogadas con una priorización de nivel medio. Esta clasificación sugiere que, aunque estas áreas poseen un potencial moderado para la recarga de aguas subterráneas y enfrentan riesgos de erosión intermedios, también requieren una gestión equilibrada que promueva la conservación del agua y del suelo, junto con el desarrollo sostenible.

Debido a lo anterior, es concluyente que el análisis morfométrico desempeña un papel fundamental en el análisis de las cuencas hidrográficas, ya que no solo permite comprender su forma, función hidrológica y geomorfología, sino que también resulta crucial para la gestión integral de los recursos hídricos. Esta importancia radica en su capacidad para ofrecer una evaluación detallada del paisaje de la cuenca, identificando áreas críticas para la gestión del agua, como puntos de concentración de escorrentía, áreas vulnerables a la erosión del suelo y zonas de riesgo de inundación. Estos hallazgos facilitan la implementación de medidas de conservación en la cuenca promoviendo

un uso sostenible de los recursos hídricos. Finalmente, gracias al análisis morfométrico, obtenemos una visión integral de la cuenca del Biobío, así como una guía para la toma de acciones para proteger, conservar y utilizar eficientemente los recursos hídricos en ella, lo que contribuye significativamente a la mitigación de la escasez de agua.

5.1.3 Análisis multicriterio

Se llevó a cabo un análisis multicriterio mediante la metodología del Análisis Jerárquico de Procesos, con el objetivo de delinear las zonas potenciales para la recarga de acuíferos en la cuenca del río Biobío. Esta técnica permite integrar y ponderar múltiples criterios de forma sistemática para obtener una evaluación global del potencial de recarga.

Este modelo permitió identificar y mapear las áreas con mayor potencial para la recarga de agua subterránea dentro de la cuenca, considerando la combinación óptima de los criterios evaluados. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos en la región.

5.1.3.1 Recuperación de mapas

1. Geología:

La geología de una cuenca hidrográfica desempeña un papel crucial en la identificación de las áreas potenciales para la recarga hídrica. La permeabilidad y porosidad de las rocas, controladas por sus características geológicas, determinan la capacidad de infiltración y el flujo del agua hacia los acuíferos (Freeze, R.A. & Cherry, J.A, 1979). Además, las estructuras geológicas como las fallas y pliegues pueden facilitar o bloquear el movimiento del agua subterránea, influyendo así en los patrones de recarga y flujo subterráneo (Singhal, B.B.S. & Gupta, R.P, 2010).

Por tanto, la geología se considera el factor primordial al construir la matriz de combinación por pares para delinear las áreas potenciales de

recarga hídrica, dado su papel central en la determinación de las propiedades hidrogeológicas, estructuras y distribución de materiales permeables e impermeables en el subsuelo.

El análisis de la configuración geológica muestra la distribución de rocas y depósitos no consolidados en la cuenca. Entre las formaciones presentes se encuentran rocas del precámbrico, cretácico, jurásico, mesozoico, paleozoico, cuaternario, volcánico cuaternario, terciario, triásico y precámbrico.

Las unidades predominantes en la cuenca según lo obtenido en la figura 12, corresponden principalmente a formaciones del Cuaternario, Cretácico y Paleozoico, con algunas presencias menores de formaciones del Volcanismo Cuaternario, Terciario y Mesozoico. Entre estas, las unidades del Cuaternario, como gravas, arenas y limos, suelen tener una alta permeabilidad y porosidad, facilitando la infiltración y recarga de acuíferos.

En términos de permeabilidad, las formaciones del volcanismo cuaternario también son relevantes, consistiendo en rocas volcánicas como basaltos y andesitas, cuya permeabilidad varía según su grado de fracturación y alteración. En general, las rocas fracturadas son más permeables, permitiendo una mayor infiltración de agua.

Por el contrario, las formaciones menos influyentes son las rocas paleozoicas, como calizas, pizarras y areniscas, caracterizadas por su baja permeabilidad. Por lo tanto, los lugares con rocas cuaternarias y volcánicas cuaternarias son los más propicios para la recarga hídrica, mientras que aquellos con rocas paleozoicas tienen una menor potencialidad indicando que los suelos más consolidados podrían ser menos permeables y viceversa.

Es crucial considerar que el mapa geológico obtenido proporciona una visión general y no exhaustiva de las formaciones rocosas. Se sugiere llevar a cabo estudios más detallados para analizar en profundidad el tipo de roca y sus características, como así también considerar otros parámetros en cuanto a la geología, como por ejemplo las fallas y

pliegues. Este enfoque permitirá mejorar la precisión de los resultados en términos de permeabilidad y porosidad, lo que a su vez conducirá a una mejor identificación de las zonas propicias para la recarga hídrica.

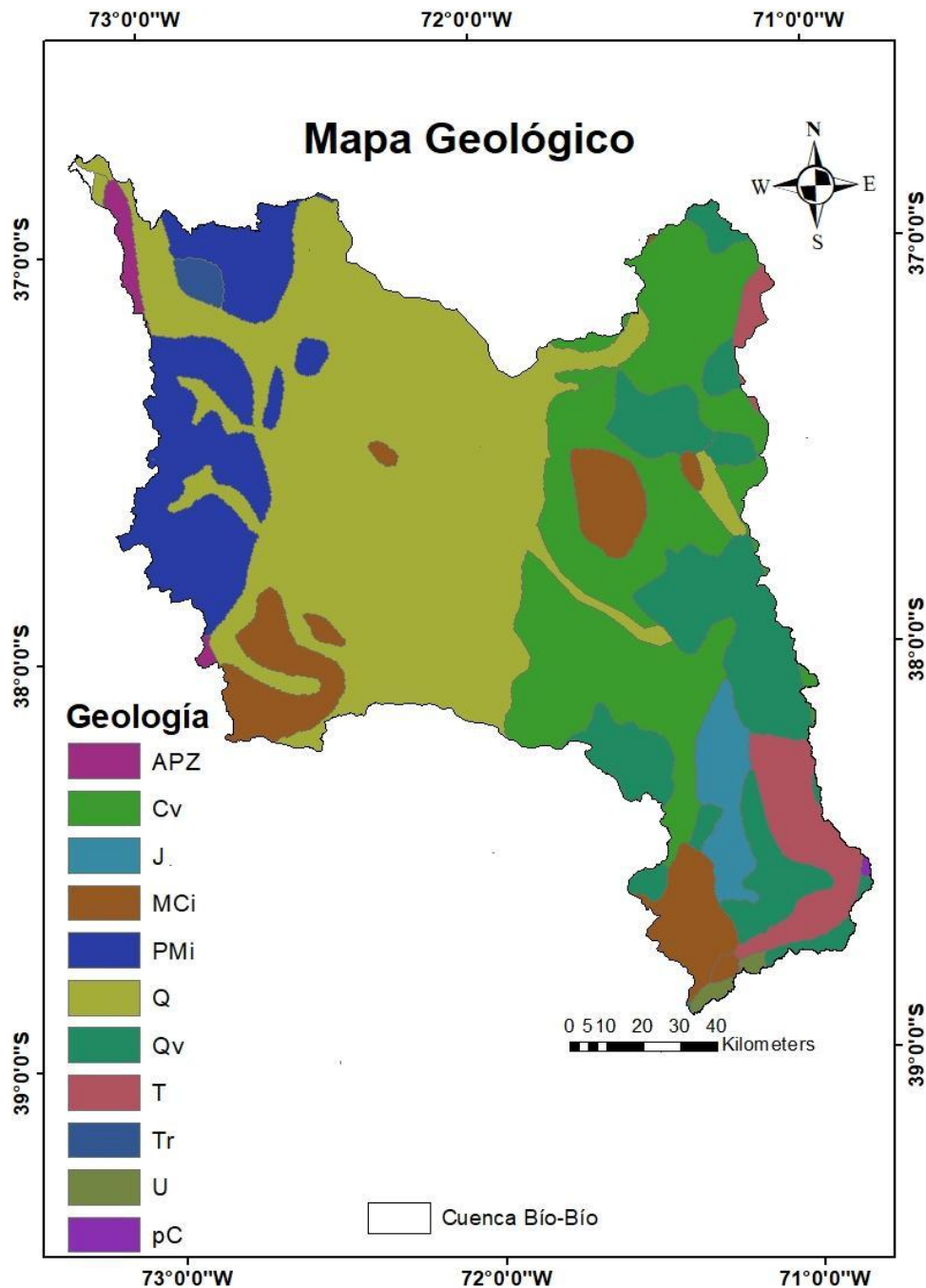


Figura 12: Mapa geológico de la cuenca del río Bío-Bío. Recuperado y modificado de Schenk et al., (1999).

2. Geomorfología:

La Figura 13 proporciona una visión de las unidades geomorfológicas presentes en la cuenca del río Biobío, que incluyen las características tradicionales del relieve chileno. Estas unidades se identifican como la Cordillera de los Andes, la depresión intermedia, la Cordillera de la Costa y las planicies litorales, dispuestas de derecha a izquierda según la orientación del mapa.

En particular, se destaca la presencia de la precordillera, también conocida como 'La Montaña', aunque su importancia relativa disminuye en esta área debido a su angostamiento. En la Cordillera de los Andes, existen varios conos volcánicos, como el Antuco, Copahue y Callaqui. Esta cordillera desempeña un papel crucial como fuente de acumulación de nieve, que alimenta los cursos fluviales del Biobío, Laja, Polcura, entre otros (BCN,2024).

Los llanos centrales se extienden desde el lado oeste de la precordillera hasta alcanzar la cordillera de la costa, alcanzando su mayor amplitud en la zona cercana al río Laja. Por otro lado, en la Cordillera de la Costa se destaca la presencia de la cordillera de Nahuelbuta, que se extiende desde el río Biobío hasta el río Imperial.

En cuanto a la planicie marina, su desarrollo es limitado desde el norte de la cuenca hasta la desembocadura del río Andalién (BCN,2024).

En la cordillera volcánica activa se presenta el Volcán Tolhuaca.

Se destaca la particularidad de que en la dirección este-oeste las formaciones se van volviendo menos permeables, encontrándose zonas más permeables en la cordillera y menos permeables cercano a la costa. Cabe destacar que esto corresponde a un análisis general de las formaciones geomorfológicas de la cuenca, se sugiere llevar un análisis más detallado en la cuenca que capture información local para obtener

resultados más precisos, ya que la geomorfología podría estar alterada localmente por fallas o pliegues.

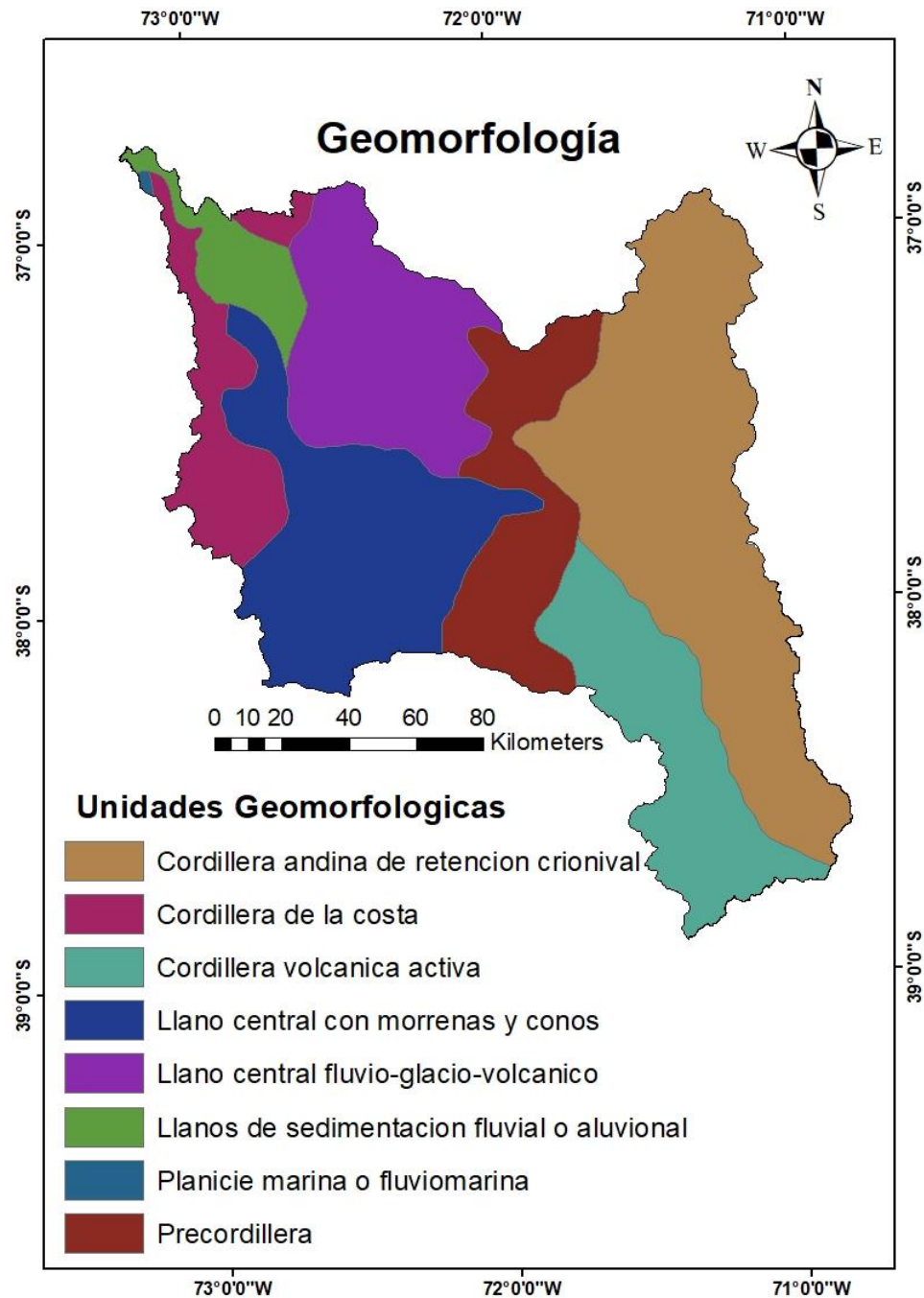


Figura 13: Mapa de la geomorfología de la cuenca del río Bío-Bío. Recuperado de Christoph Albers, 2015.

3. Textura de suelo:

La Figura 14 muestra el mapa obtenido de la textura de suelo en la cuenca del río Biobío. Mayoritariamente, los suelos encontrados en esta cuenca son francos, seguidos por suelos arcillosos y, en menor medida, suelos arenosos.

Es notable que, para una misma textura de suelo, se observan distintas tonalidades. Por ejemplo, el suelo franco se muestra en 7 tonos diferentes, reflejando variaciones en la composición del suelo. Estas diferencias se traducen en diversas propiedades del suelo, como el pH, las concentraciones minerales y las propiedades generales.

Además, las texturas varían desde pesadas o gruesas hasta medianas. La distribución de los diferentes tipos de suelo también está influenciada por la topografía. Por ejemplo, el suelo franco, representado en verde oscuro y ubicado en la Cordillera de los Andes, se encuentra en un 85% en áreas montañosas y un 15% en pendientes planas. En contraste, el suelo franco en la zona norte de la cuenca, mostrado en verde claro, se divide en un 50% de topografía de pendientes planas y un 50% de topografía montañosa. Esta variación en la textura del suelo está estrechamente relacionada con la topografía circundante, la cual se corresponde con las unidades geomorfológicas y sus características particulares.

Los datos sobre los porcentajes de cada tipo de suelo se obtuvieron de un archivo de Excel proporcionado por el autor del mapa.

Ahora bien, de acuerdo con su permeabilidad y capacidad de infiltración, los suelos francos y arenosos son considerados como los más favorables para encontrar zonas potenciales para la recarga hídrica. Según el mapa obtenido, mostrado en la Figura 14, la distribución de suelos francos predomina en gran medida en la cuenca, especialmente en el centro, extendiéndose hacia el este.

Por otro lado, los suelos arcillosos, dificultan el movimiento del agua a través del perfil del suelo. Por lo tanto, se consideran los menos favorables para encontrar zonas potenciales para la recarga hídrica. Se puede observar una variación de suelos arcillosos que predominan en el sector

suroeste de la cuenca, presentando una mezcla entre suelos arcillosos y francos. En estas áreas, la presencia de un suelo favorable para la recarga hídrica dependerá de otros factores o criterios, por lo que no es suficiente analizar solo las propiedades del suelo, sino que también se deben considerar los demás parámetros del estudio.

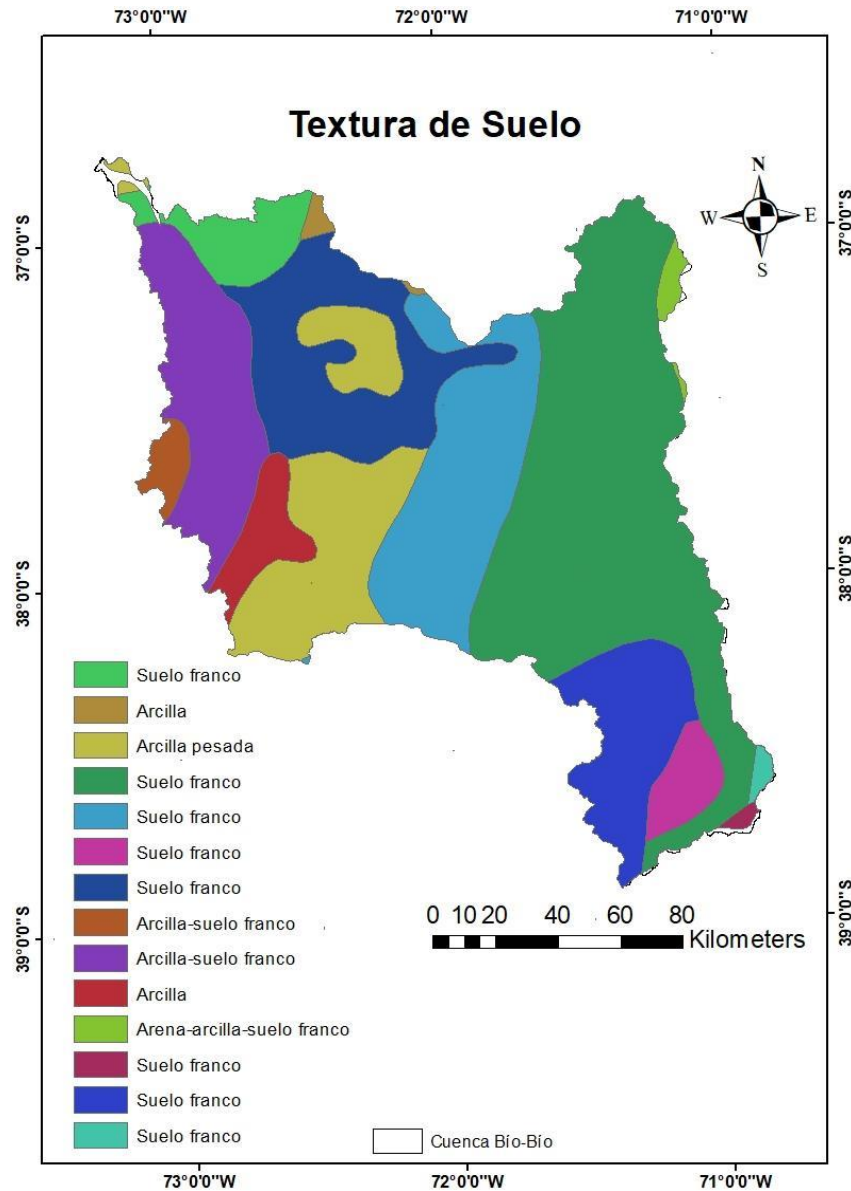


Figura 14: Mapa de textura de suelo de la cuenca del río Bío-Bío. Recuperado y modificado de FAO y Unesco, 1961.

4. Pendiente:

La Figura 15 muestra el mapa de pendientes de la cuenca del río Biobío. Se destaca una predominancia de pendientes suaves en la mayor parte de la cuenca, especialmente entre los 72°W y 73°W , esto podría ser un indicativo de que en esa zona las condiciones son favorables para el proceso de recarga hídrica. En esta área se encuentran los ríos Malleco, Renaico, Río Vergara y Río Laja, abarcando comunidades como Los Ángeles, Mulchén, Angol, Nacimiento, Yumbel, Cabrero y la desembocadura del río Biobío. Las pendientes predominantes en estos sectores varían entre 0 y $4,5^{\circ}$, aunque en las zonas de la Cordillera de la Costa se encuentran pendientes más pronunciadas, oscilando entre $17,54$ y $24,48^{\circ}$.

Por otro lado, en la parte Este de la cuenca, donde se sitúa la Cordillera de los Andes, se presentan las pendientes más pronunciadas, destacando una pendiente máxima en áreas que abarcan los ríos Duqueco, Queuco y el río Biobío. En esta región, se observa una pendiente máxima que varía entre $40,51$ y $77,06^{\circ}$, localizada en el centro de la subcuenca 0831. Lo anterior podría implicar una zona desfavorable para el proceso de recarga debido al terreno inclinado que se presenta, lo que favorece el escurrimiento y disminuye la infiltración.

Además, se evidencia que en el origen del río Biobío, se concentran pendientes relativamente bajas, oscilando entre $4,54$ y $17,53^{\circ}$. Estas áreas incluyen las lagunas Gualletué e Icalma, donde se registran elevaciones máximas de la superficie de hasta 1.150 metros.

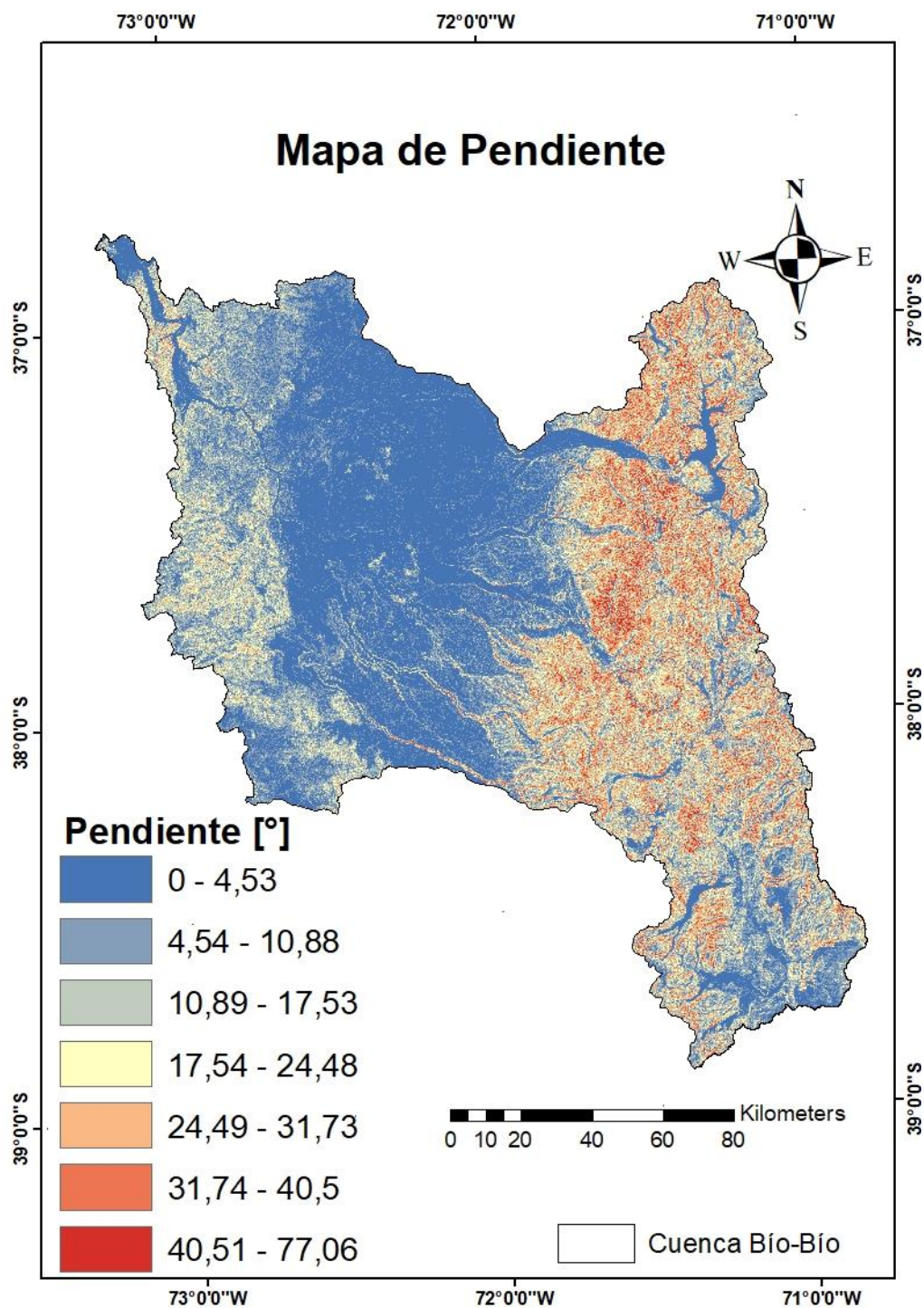


Figura 15: Mapa de pendiente de la cuenca del río Bío-Bío. Fuente: Elaboración propia.

5. Densidad de drenaje:

En la figura 16 se muestra el mapa de densidad de drenaje de la cuenca del río Biobío, destacando áreas de mayor y menor concentración. En el noroeste de la cuenca, se registra la densidad de drenaje más alta, fluctuando entre 9,02 y 10,38 $[\frac{km}{km^2}]$ centrada en la Laguna del Laja, lo que podría ser un indicativo de que en esa zona el lugar no cumple con las condiciones favorables para el proceso de recarga, ya que, el terreno podría ser propenso a producir escurrimiento y no infiltración de las aguas pluviales. Hacia el noreste, en el curso del río Biobío, se observa una densidad que varía entre 7,66 y 9,01 $[\frac{km}{km^2}]$. En el suroeste, alrededor del Lago Galletué, la densidad oscila entre 6,3 y 7,65 $[\frac{km}{km^2}]$. Lo que también sería un indicativo desfavorable para el proceso de recarga, ya que, si bien no se presentan las mayores densidades, los sectores presentan densidades bastante elevadas para el caso de estudio.

En el centro de la cuenca, prevalece una densidad de drenaje que oscila entre 4,94 y 6,29 $[\frac{km}{km^2}]$, caracterizada por la red hídrica principal de la cuenca del río Biobío, notablemente concentrada en la confluencia de varios ríos, como el Biobío, Laja, Claro y Vergara, y se extiende hacia el sur hasta el origen del río Biobío. En este sector, se encuentra la densidad media de la cuenca, lo que podría indicar que el terreno podría o no ser apto para una eventual recarga, siempre y cuando las condiciones del terreno lo permitan.

Por otro lado, las áreas con menor densidad de drenaje se ubican en regiones con menor presencia de redes fluviales, siendo la más baja detectada en el contorno de la cuenca, variando entre 0,85 y 3,57 $[\frac{km}{km^2}]$. Lo que correspondería a un sector favorable para la recarga hídrica debido a su baja densidad de drenaje y su alta capacidad de infiltración.

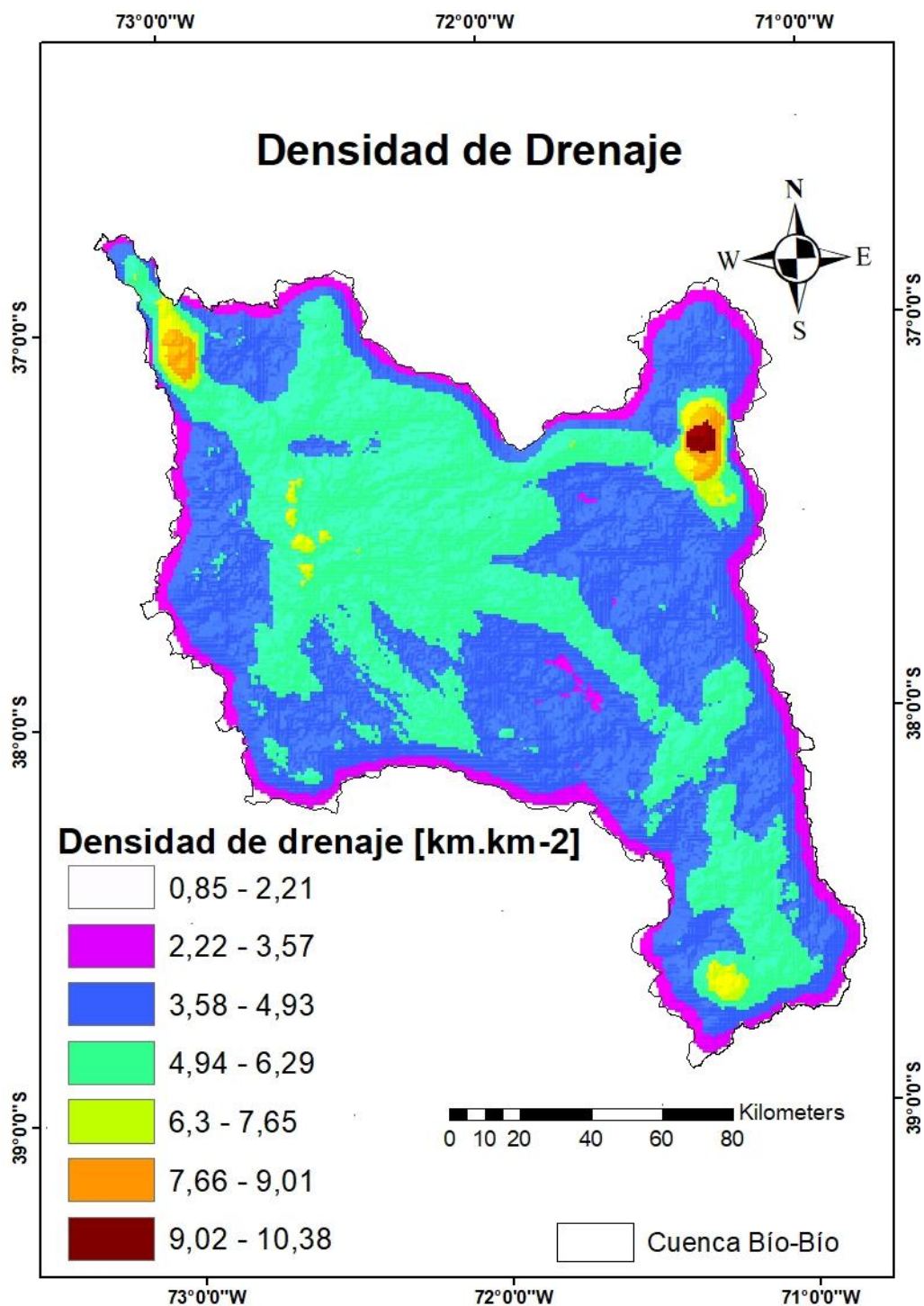


Figura 16: Mapa de la densidad del drenaje de la cuenca del río Bío-Bío. Fuente: Elaboración propia.

6. Uso de suelo:

La Figura 17 muestra el mapa de uso de suelo de la cuenca del río Biobío, donde se aprecia una predominancia de la clasificación de árboles en dos regiones distintas. En el lado derecho de la cuenca, se observa una extensión considerable de árboles que abarca las localidades de Antuco, Santa Bárbara y Lonquimay. Del mismo modo, a la izquierda de la cuenca, se destaca otra concentración de árboles, cubriendo áreas como Angol, Renaico, Nacimiento, San Rosendo, Santa Juana, Chiguayante, Hualqui y Laja. Esta clasificación de árboles hace referencia a agrupaciones significativas de vegetación alta, de alrededor de 15 metros o más, usualmente con un dosel denso. Por lo tanto, estas zonas donde se observa predominancia de cobertura vegetal serían favorables para la recarga de los acuíferos, ya que en estas zonas se produce un aumento de la infiltración.

En el centro de la cuenca, sobresale una predominancia de cultivos mayormente, seguida de áreas urbanizadas, incluyendo localidades como Los Ángeles, Yumbel, Cabrero, Negrete, Mulchén, Angol, Collipulli, Ercilla y Los Sauces. La clasificación de cultivos abarca cereales, pastos y cultivos plantados o sembrados por el hombre, que no alcanzan la altura de los árboles. Lo que también correspondería a zonas favorables para la recarga, siempre y cuando las condiciones del suelo, es decir, el tipo de cultivo que exista sea favorable para la infiltración, lo que requeriría un estudio más en detalle del uso de suelo específico en cada área, lo que podría realizarse con una clasificación supervisada de los distintos tipos de cultivos presentes en la región. Es importante señalar que en esta área se observa una gran concentración de plantaciones forestales.

Por otro lado, la clasificación de áreas construidas se refiere a estructuras creadas por humanos, como carreteras, ferrocarriles y superficies impermeables, que incluyen estacionamientos, edificios de oficinas y viviendas residenciales. Destacable es la presencia de la ciudad de Los Ángeles como la segunda más poblada de la cuenca, con una gran extensión de área construida, así como la ciudad de Concepción, la capital regional, que también muestra una gran predominancia de esta clasificación. En estas zonas, al existir una presencia de zonas urbanizadas, el escurrimiento

superficial tiende a aumentar, reduciendo la capacidad de infiltración en el terreno.

Los cuerpos de agua identificados en el mapa incluyen la Laguna de La Laja, el curso del río Biobío, el Embalse Ralco y las Lagunas Galletué e Icalma. Para clasificarse como cuerpos de agua, deben corresponder a áreas donde el agua está predominantemente presente durante todo el año, con poca o ninguna vegetación dispersa, sin afloramientos rocosos ni características construidas como muelles.

Por último, en el lado Este de la cuenca, en la Cordillera de los Andes, se observan áreas con nieve o hielo permanente, típicamente presentes en zonas montañosas o en latitudes más altas. Se destaca la presencia del Volcán Antuco, ubicado cerca de la Laguna de La Laja, así como el Volcán Callaqui más al sur. Además, en la Cordillera de los Andes, se extienden pastizales y áreas de suelo desnudo, caracterizadas por vegetación dispersa o nula durante todo el año.

La clasificación de cada tipo de suelo está establecida por el autor del mapa.

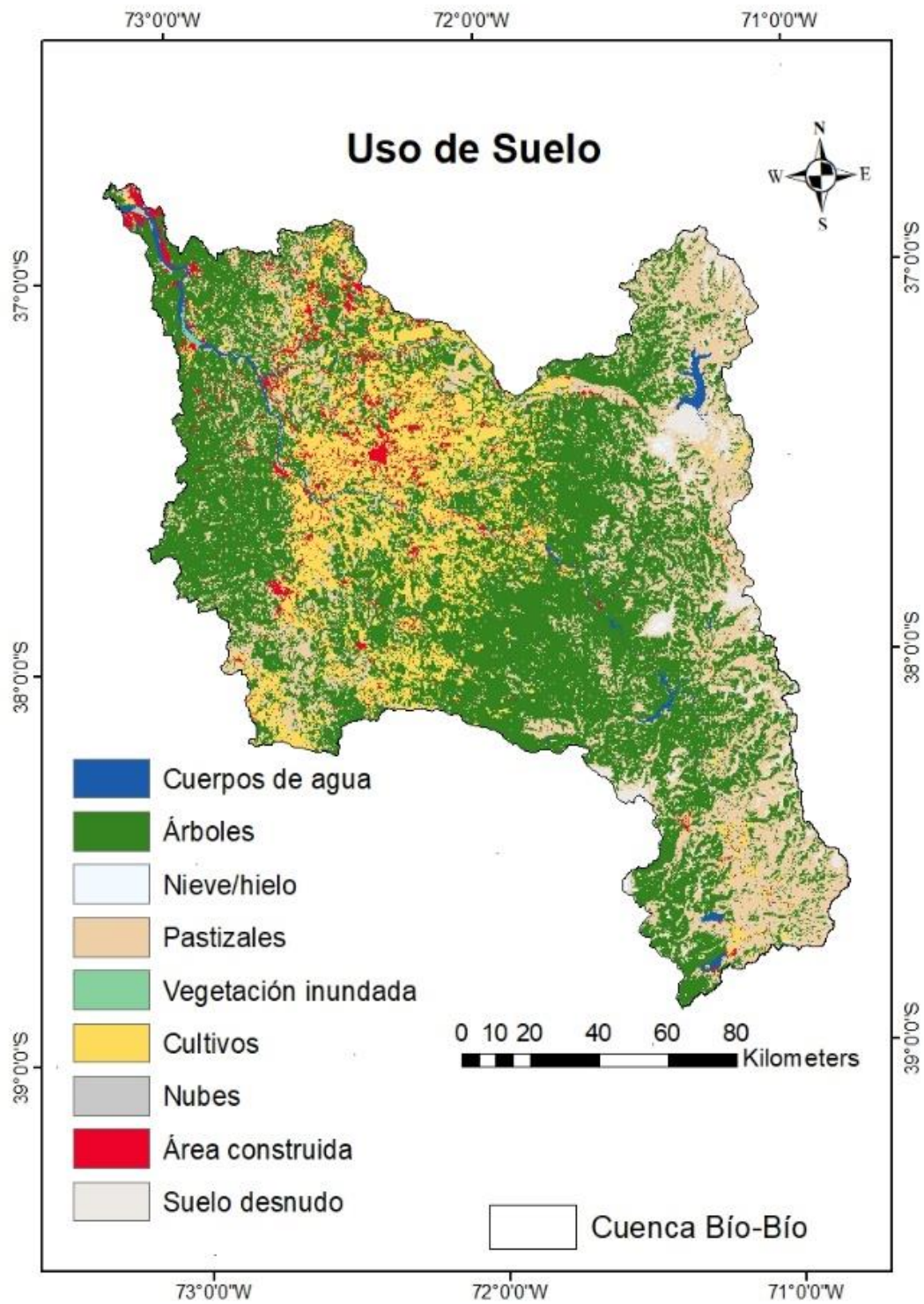


Figura 17: Mapa de uso de suelo de la cuenca del río Bío-Bío. Recuperado y modificado de Karra, Kontgis, et al., (2021).

7. Precipitación:

La Figura 18 presenta el mapa de precipitación acumulada para la cuenca del río Biobío, abarcando el período desde enero de 2000 hasta diciembre de 2020. Este mapa muestra la precipitación media acumulada durante los 20 años correspondientes.

Las áreas con precipitaciones más bajas se concentran en la parte oeste de la cuenca, con valores predominantes que oscilan entre 658 y 869 mm/año. Por otro lado, las áreas con precipitaciones más altas se encuentran en la zona precordillerana, destacándose localidades como Alto Biobío, Santa Bárbara, Quillaco, Quilleco, Antuco, Tucapel y Mulchén, donde se registran valores máximos de precipitación que varían entre 1.673 y 1.930 mm/año. Lo anterior correspondería a un terreno favorable para la recarga hídrica debido a que las condiciones atmosféricas del lugar son favorables para la recarga, pero se deben considerar la influencia de los demás parámetros del estudio, ya que, si el terreno no es apto para la infiltración del agua, toda el agua pluvial será escurrida. Las precipitaciones medias se observan en la zona del origen de la cuenca y en las planicies litorales.

Es importante señalar que el mapa fue generado mediante interpolación utilizando el método IDW. Por lo tanto, los resultados pueden variar dependiendo de la distribución espacial de los puntos de muestreo, la configuración de los parámetros de interpolación y la naturaleza del fenómeno de precipitación en la cuenca. Aunque, los datos proporcionados por ERA5-Land son bastante buenos en cuanto a su resolución y distribución espacial.

En general, los mapas creados con IDW tienden a suavizar las variaciones espaciales en los datos originales. Esto significa que las áreas con valores similares de precipitación tienden a ser agrupadas en regiones más grandes y uniformes en el mapa interpolado, como se observa en el mapa generado. Por lo tanto, el mapa representa un patrón general de precipitación en la cuenca, pero puede no capturar detalles finos y variaciones locales. Por esto, se recomienda un estudio más detallado de las precipitaciones en la zona, considerando un análisis de las estaciones pluviométricas y también

considerando factores como la escorrentía superficial y la evapotranspiración.

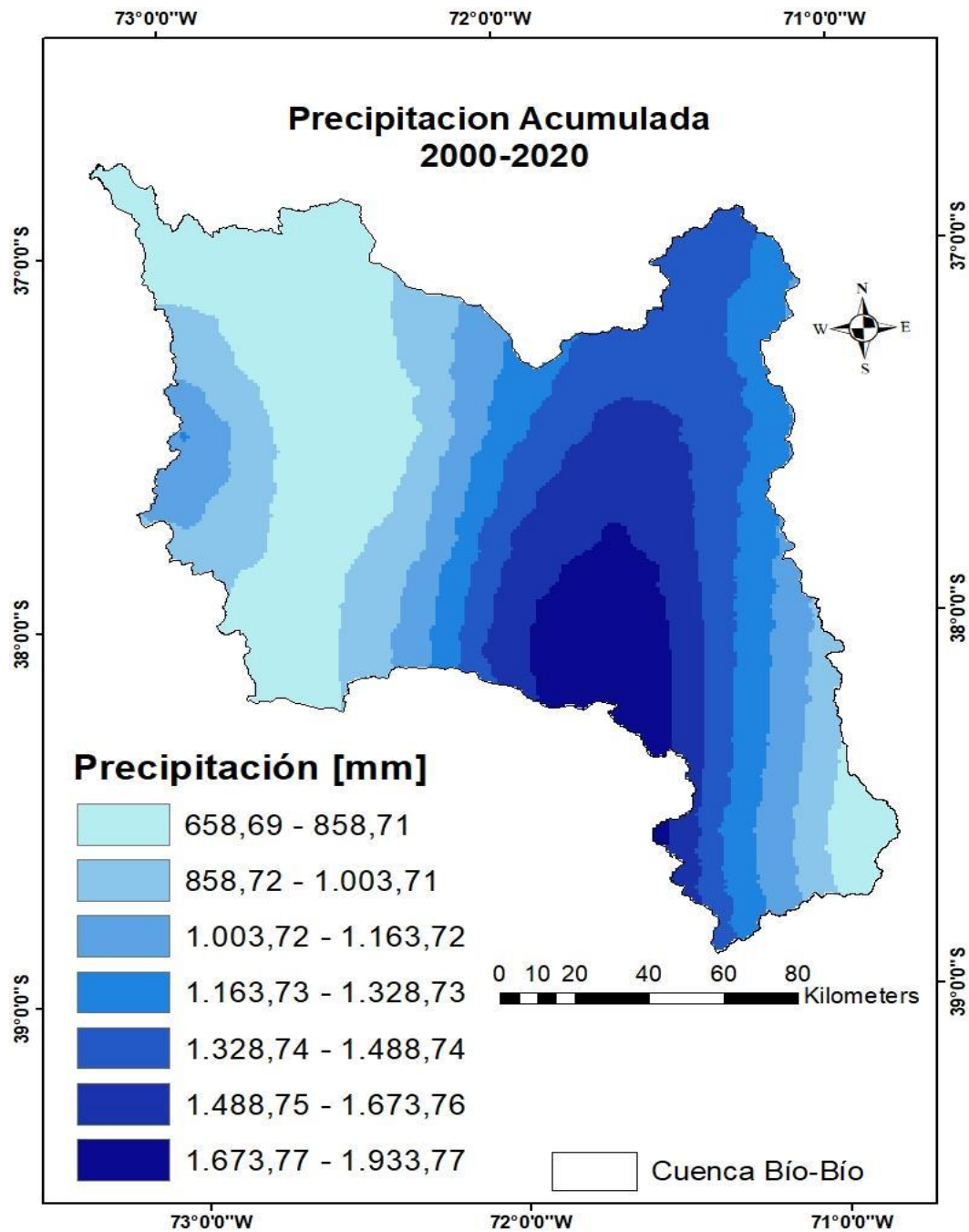


Figura 18: Mapa de precipitación acumulada desde el año 2000 a 2020. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.2 Análisis Jerárquico de Procesos

En el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP), se utiliza una matriz de comparación por pares para evaluar la importancia relativa de distintos criterios que influyen en la recarga de aguas subterráneas.

En la tabla 19, se presenta la matriz de comparación por pares. Los criterios están organizados en orden descendente, considerando que la geología es el parámetro más importante, dada su influencia directa en la porosidad y permeabilidad de los acuíferos, seguido por la geomorfología, la textura de suelo, y otros, mientras que la precipitación es el menos importante debido a su variabilidad temporal y espacial. El total corresponde a la suma de cada columna.

En la tabla 20, se muestra la matriz normalizada y el vector ponderado P, donde el vector ponderado representa el peso específico de cada factor basado en su contribución a la dinámica de recarga. Para la geología, se obtuvo un peso del 32,13%; para la geomorfología, un 21,8%; para la textura del suelo, un 20,2%; para la pendiente, un 11,8%; para la cobertura del suelo, un 3,3%; y para la precipitación, un 4,8%.

La tabla 21 presenta los valores de consistencia para la metodología aplicada, mostrando un porcentaje del 6,3% en la relación de consistencia. Este resultado se encuentra dentro de los límites de la tasa de cumplimiento, que corresponde a menos del 10%. Por lo tanto, la inconsistencia de la matriz realizada es considerada aceptable, es decir, garantizado que el proceso de decisión no está significativamente afectado por inconsistencias o arbitrariedades. Aunque, es importante considerar que el nivel de inconsistencia en la matriz es un factor crucial el cual puede afectar la confiabilidad y validez de los resultados obtenidos, ya que si se presenta un alto nivel de inconsistencia puede influir en la transitividad de la matriz y en la distorsión de las prioridades.

Finalmente, se clasifica cada característica dentro de los criterios según su impacto en la recarga hídrica. En la tabla 22, se asigna una clase a cada característica de cada criterio. Se asignó el valor 1 a la característica menos

influyente o impacto más bajo y el valor 7 a la más influyente o el impacto más alto.

Tabla 19: Matriz de comparación por pares para AHP.

A[]	Geología	Geomorfología	Textura de Suelo	Pendiente	Densidad de Drenaje	Cobertura de Suelo	Precipitación
Geología	1,00	2,00	2,00	3,00	5,00	6,00	9,00
Geomorfología	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	3,00
Textura de Suelo	0,50	0,50	1,00	3,00	3,00	8,00	6,00
Pendiente	0,33	0,33	0,33	1,00	4,00	3,00	4,00
Densidad de Drenaje	0,20	0,25	0,33	0,25	1,00	2,00	2,00
Cobertura de Suelo	0,17	0,20	0,13	0,33	0,50	1,00	0,33
Precipitación	0,11	0,33	0,17	0,25	0,50	3,00	1,00
Total	2,81	4,62	5,96	10,83	18,00	28,00	25,33

Tabla 20: Matriz normalizada para AHP.

	Geología	Geomorfología	Textura de Suelo	Pendiente	Densidad de Drenaje	Cobertura de Suelo	Precipitación	Vector Ponderado [P]
Geología	0,36	0,43	0,34	0,28	0,28	0,21	0,36	0,32
Geomorfología	0,18	0,22	0,34	0,28	0,22	0,18	0,12	0,22
Textura de Suelo	0,18	0,11	0,17	0,28	0,17	0,29	0,24	0,20
Pendiente	0,12	0,07	0,06	0,09	0,22	0,11	0,16	0,12
Densidad de Drenaje	0,07	0,05	0,06	0,02	0,06	0,07	0,08	0,06

Cobertura de Suelo	0,06	0,04	0,02	0,03	0,03	0,04	0,01	0,03
Precipitación	0,04	0,07	0,03	0,02	0,03	0,11	0,04	0,05

Tabla 21: Índice de consistencia, consistencia aleatoria y relación de consistencia obtenidos mediante AHP.

	AxP (λ)	$\frac{AxP}{P}$
Geología	2,44	7,60
Geomorfología	1,68	7,72
Textura de Suelo	1,56	7,67
Pendiente	0,89	7,55
Densidad de Drenaje	0,44	7,45
Cobertura de Suelo	0,24	7,28
Precipitación	0,35	7,23
IC= 0,08 RI= 1,32 CR= 0,063 = 6,3%		$\lambda_{(max)} = 7,5$

Tabla 22: Clases asignadas para cada parámetro según su importancia en la recarga hídrica. La clasificación de 1 es la menos importante y la clasificación de 7 es la más importante.

Tema	Descripción/intervalo	Clase
Geología	APZ: Precámbrico	1
	Cv: Cretácico	2

	J: Jurásico	1
	MCi: Mesozoica	4
	PMi: Paleozoico	2
	Q: Cuaternario	7
	Qv: Volcánica cuaternaria	6
	T: Terciario	3
	Tr: Triásico	1
	U: Área no mapeada	1
	pC: Precámbrico	1
Geomorfología	Cordillera andina de retención Crio-Nival	7
	Cordillera de la costa	6
	Cordillera volcánica activa	1
	Llano central con morrenas y conos	5
	Llano central Fluvio- Glacio-Volcánico	2
	Llanos de sedimentación fluvial o aluvional	4
	Planicie marina o fluviomarina	3
	Precordillera	5
Textura de suelo	Arena-arcilla-suelo franco	7
	Suelo franco	5
	Arcilla-suelo franco	3
	Arcilla	2
	Arcilla dura	1
Pendiente	0 - 4,53	7
	4,54 – 10,88	6
	10,89 – 17,53	5

	17,54 – 24,48	4
	24,49 – 31,73	3
	31,74 – 40,5	2
	40,51 – 77,06	1
Densidad de drenaje	0,85 – 2,21	7
	2,22 – 3,57	6
	3,58 – 4,93	5
	4,94 – 6,29	4
	6,3 - 7,65	3
	7,66 – 9,01	2
	9,02 – 10,38	1
Uso de suelo	Cuerpos de agua	7
	Árboles	5
	Nieve/hielo	6
	Pastizales	4
	Vegetación inundada	7
	Cultivos	6
	Nubes	1
	Área construida	1
	Suelo desnudo	2
Precipitación	658,69 – 858,71	1
	858,72 – 1.003,71	2
	1.003,72 – 1.163,72	3
	1.163,73 – 1.328,73	4
	1.328,74 – 1.488,74	5
	1.488,75 – 1.673,76	6
	1673,77 – 1.933,77	7

En la Figura 19 se muestra la distribución de las áreas potenciales para la recarga de aguas subterráneas. Se observa que las zonas con mayor potencial coinciden con la ubicación de los pozos, lo que sugiere áreas propicias para la gestión del agua subterránea. Aunque el estudio proporciona una indicación de estas zonas potenciales, no confirma la presencia real de agua

subterránea. La información sobre las ubicaciones de los pozos valida la idoneidad del terreno y la presencia efectiva de agua subterránea.

El área con mayor potencial se encuentra principalmente en el centro de la cuenca y se extiende hacia el este. Estas zonas se caracterizan por formaciones rocosas del cuaternario, ubicadas en la precordillera. Presentan suelos francos, pendientes moderadas, densidades de drenaje de bajas a medias, una alta cobertura arbórea y altos niveles de precipitación. Estas condiciones, en su mayoría favorables, favorecen una mayor infiltración del agua.

Por el contrario, las zonas con menor potencial se distribuyen al sur de la cuenca y cerca de la desembocadura. Aquí, nos encontramos con rocas del paleozoico y jurásico, así como con la presencia de la cordillera de la costa y la cordillera volcánica activa. Los suelos varían entre franco y arcilloso, con pendientes moderadas a altas, predominantemente altas en el sur. Las densidades de drenaje son más altas en esta área, especialmente cerca de la desembocadura. Además, se observa una cobertura vegetal significativa y una mayor urbanización en los sectores de Los Ángeles y Concepción. Las precipitaciones muestran una variabilidad moderada. Estas condiciones, en su mayoría desfavorables, resultan en un potencial de recarga de moderado a bajo.

Aunque el estudio ofrece una aproximación aceptable, se sugiere llevar a cabo investigaciones más exhaustivas que consideren criterios más específicos para obtener resultados más precisos, como por ejemplo, la evapotranspiración, escorrentía superficial, litología, pliegues, hidrogeología, zonas de descarga, entre otros.

Ahora bien, el uso del Proceso de Jerarquía Analítica demuestra ser efectivo en la identificación de zonas potenciales de recarga, sin embargo, sigue siendo un método subjetivo basado en las opiniones de expertos al construir la matriz de comparación por pares. Modificar los parámetros influyentes

según su relevancia podría alterar los resultados, lo que afectaría el análisis de la región de estudio.

Además, cabe mencionar que las zonas que presentan un bajo potencial se acoplan con las regiones que poseen una alta a muy alta priorización obtenidas en la metodología de análisis morfométrico, por lo que los modelos se validan entre sí. Análogamente, las regiones que poseen un alto potencial para la recarga hídrica se acoplan con los lugares que requieren una priorización media a baja.

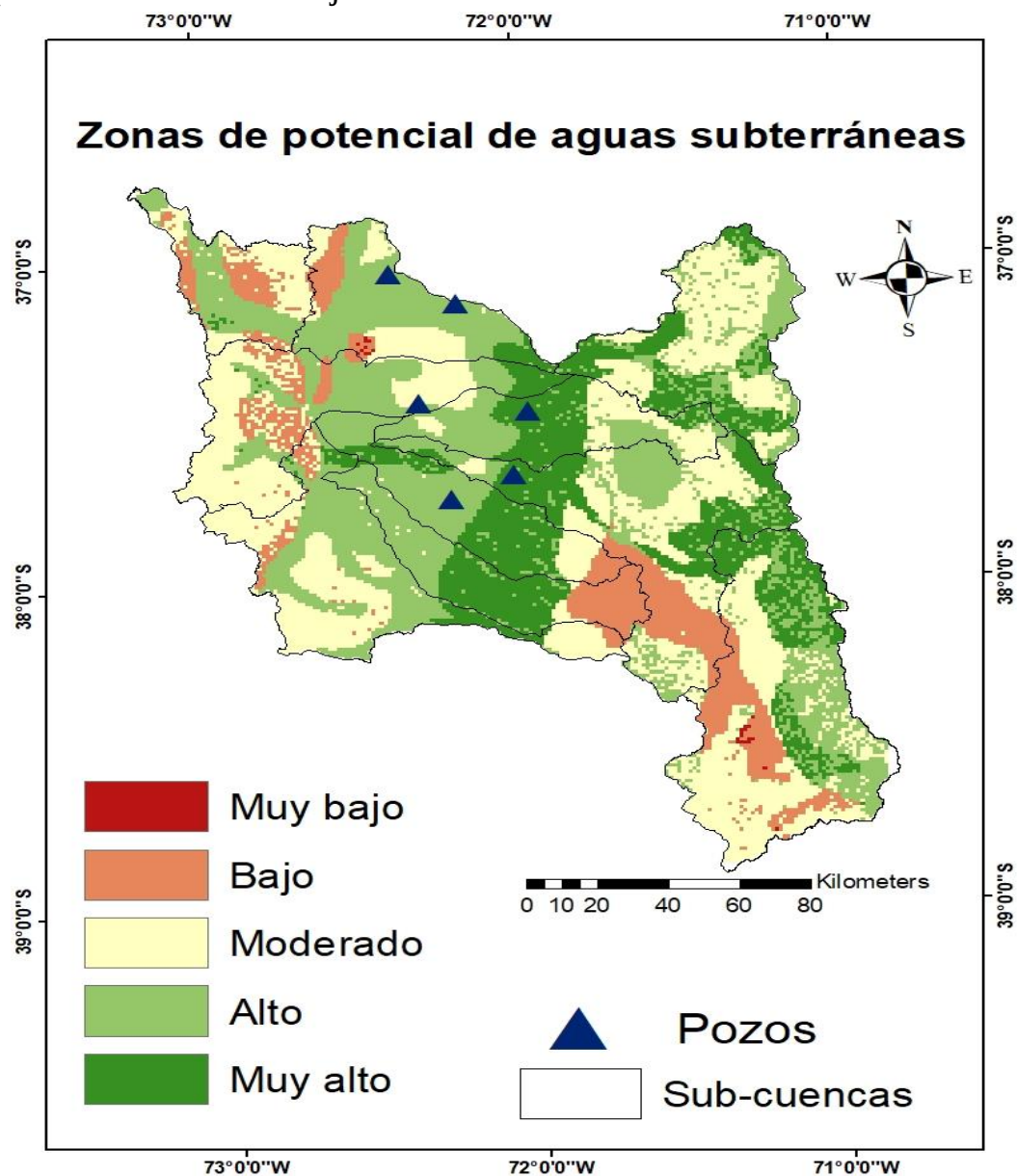


Figura 19: Mapa de zonas potenciales para recarga hídrica para la cuenca del río Bío-Bío.

5.1.4 Machine Learning (Random Forest)

Se llevó a cabo la implementación de un modelo de aprendizaje supervisado mediante Random Forest para la obtención de zonas potenciales para la recarga hídrica, considerando variables como el contenido de humedad del suelo, precipitaciones, densidad de drenaje, geología, entre otros. Los resultados de este estudio podrían tener un impacto en el manejo tanto de las cuencas hidrográficas como de la gestión hídrica debido a la tecnología avanzada de análisis para la identificación de zonas propicias para la recarga hídrica.

Diversos estudios aplicados a la identificación de zonas potenciales como Baghel, S. et al., 2023; Huajie, D. et al., 2016; Sarkar, D.K. et al., 2022; Hamid, R. et al., 2020; Al-Kindi, K.M. et al., 2022, entre otros, han utilizado modelos de Machine Learning tales como ‘‘Residual Sum of Squares (RSS)’’, ‘‘Support Vector Machine (SVM)’’, ‘‘Multivariate Adaptive Regression Spline (MARS)’’, ‘‘Random Forest (RF)’’, entre otros. En estos estudios han utilizado una gran cantidad de factores para generar mapas correspondientes a zonas potenciales para la recarga, demostrando siempre un mejor desempeño al utilizar el algoritmo de Random Forest, ofreciendo simplicidad, eficacia y robustez en sus resultados.

En todos los estudios realizados con el algoritmo de Random Forest, las variables de entrenamiento corresponden a indicadores de zonas potenciales para la recarga hídrica, por lo que, las variables están directamente relacionadas con los procesos de agua subterránea, como los rendimientos de los pozos, la capacidad de recarga del acuífero, el nivel de agua subterránea, ocurrencia de manantiales, inclusive permeabilidad. (Díaz-Alcaide & Martínez-Santos, 2019; Kaewdum & Chotpantararat, 2021; Rajaei et al., 2019; Tien Bui et al., 2019; Víctor et al., 2021).

Por lo anterior, y dada la información disponible, se decidió utilizar como variable de entrenamiento el contenido de humedad del suelo. La humedad del suelo se define como la cantidad total de agua que hay en los poros del suelo o en su superficie. Se relaciona indirectamente con la infiltración del suelo, debido a que la velocidad de infiltración disminuye a medida que el contenido de agua en el suelo aumenta. Por lo que, es un buen indicativo para

el presente estudio, debido a que zonas más secas deberían concordar con zonas más favorables para la recarga hídrica debido a que la capacidad de infiltración aumenta en el terreno, y viceversa.

La figura 20 muestra el contenido de humedad promedio en las primeras 4 capas del suelo en la cuenca del río Biobío entre los años 2016 y 2019. Se puede observar que las zonas menos húmedas se encuentran en la zona central de la cuenca variando desde 0,52 a 0,78 [$\frac{m^3}{m^3}$], y se corresponden con las ubicaciones de los pozos presentes. Por otro lado, las zonas más húmedas se encuentran en los extremos este y oeste de la cuenca, variando desde 1,01 a 1,16 [$\frac{m^3}{m^3}$].

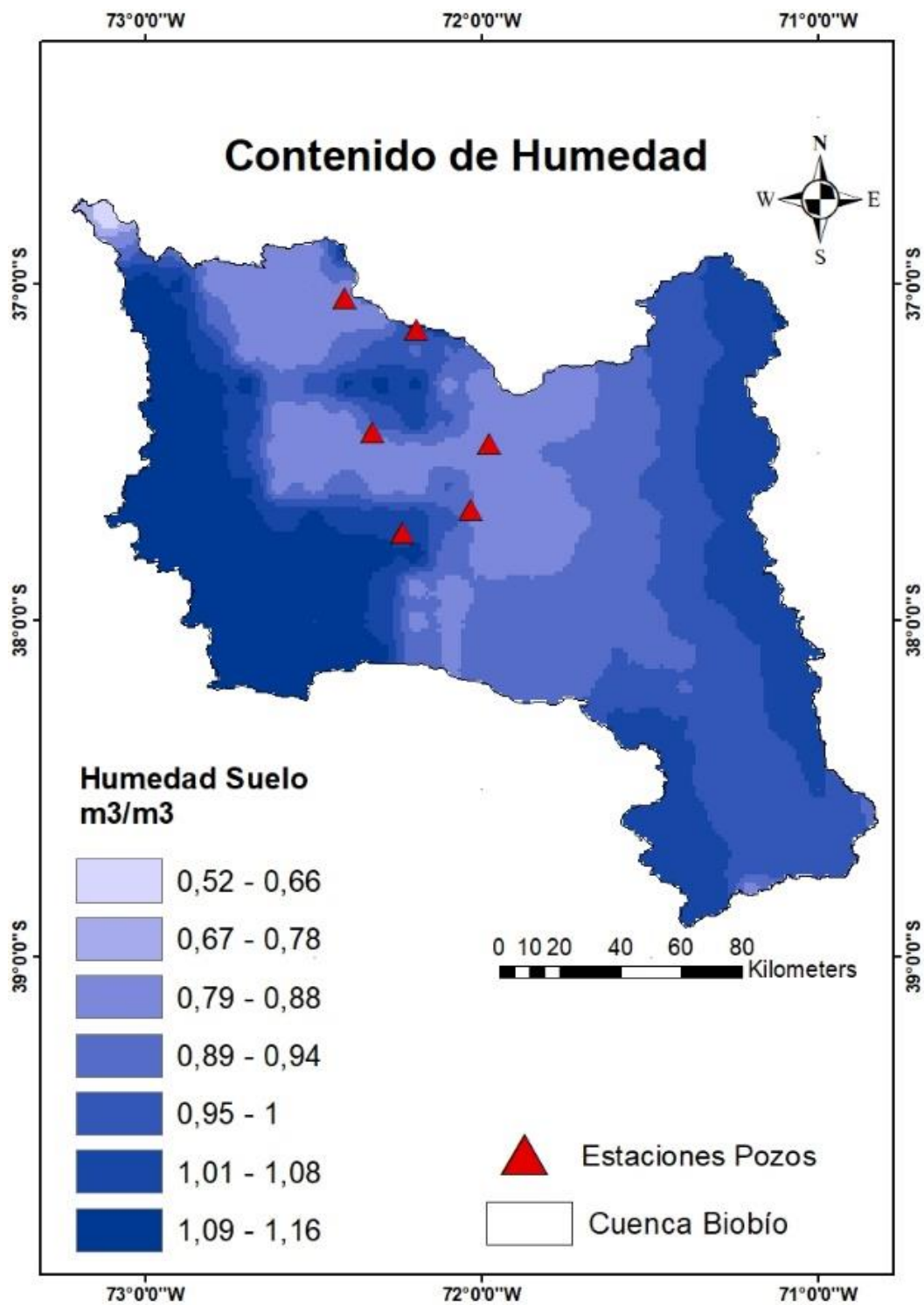


Figura 20: Volumen de agua en las primeras 4 capas del suelo en la cuenca del río Biobío.
Fuente: Elaboración propia.

Posterior al mapeo de la variable de entrenamiento, se decidió implementar el algoritmo de Random Forest considerando dos casos, el primer caso considera la precipitación como criterio para la identificación de zonas potenciales para la recarga hídrica y el segundo caso no lo considera. Esto debido a la sobreestimación que puede ocurrir en el modelo ya que el contenido de humedad está estrechamente relacionado con la cantidad de precipitaciones, por lo que, se podría introducir un sesgo, ya que el modelo podría depender de la precipitación para predecir la variable de respuesta, lo que llevaría a una posible sobreestimación. Los resultados obtenidos mediante la aplicación de Random Forest se muestran en la siguiente tabla, que corresponden a la importancia relativa de cada parámetro en el proceso de recarga hídrica.

Tabla 23: Importancia relativa de los parámetros influyentes en el proceso de recarga hídrica obtenidos mediante la aplicación de Random Forest.

Random Forest	Importancia de los parámetros						
	Geología	Geomorfología	Uso de Suelo	Densidad de drenaje	Textura de suelo	Pendiente	Precipitación
Modelo CON precipitación	7,5%	9,6%	10,5%	5,47%	12,03%	14,14%	40,65%
Modelo SIN precipitación	13%	13,8%	16,8%	9,4%	21,8%	25%	No aplica

Para el modelo considerando la precipitación como parámetro, reveló que este factor tiene un peso significativo del 40.65% en la predicción del contenido de humedad del suelo. Le siguen en importancia la pendiente,

textura de suelo, uso de suelo, geomorfología, geología y densidad de drenaje. En la figura 21 se muestra el mapa resultante del modelo, el cual tiene una distribución peculiar: las zonas con bajo potencial de recarga hídrica se concentran al oeste de la cuenca, mientras que las de alto potencial se sitúan al este, generando una clara separación entre regiones con distintos niveles de potencial. Sin embargo, esta representación no refleja con precisión la realidad, ya que al compararla con el mapa de precipitaciones se observa una notable similitud. Las áreas con bajo potencial coinciden con las de menor precipitación, mientras que las de alto potencial se corresponden con las zonas más lluviosas de la cuenca. Estos hallazgos sugieren que el modelo no predice con exactitud el contenido de humedad del suelo al considerar la precipitación como variable influyente. Esta discrepancia se debe a la alta correlación entre la humedad y la precipitación, lo que condujo a una sobreestimación de los resultados.

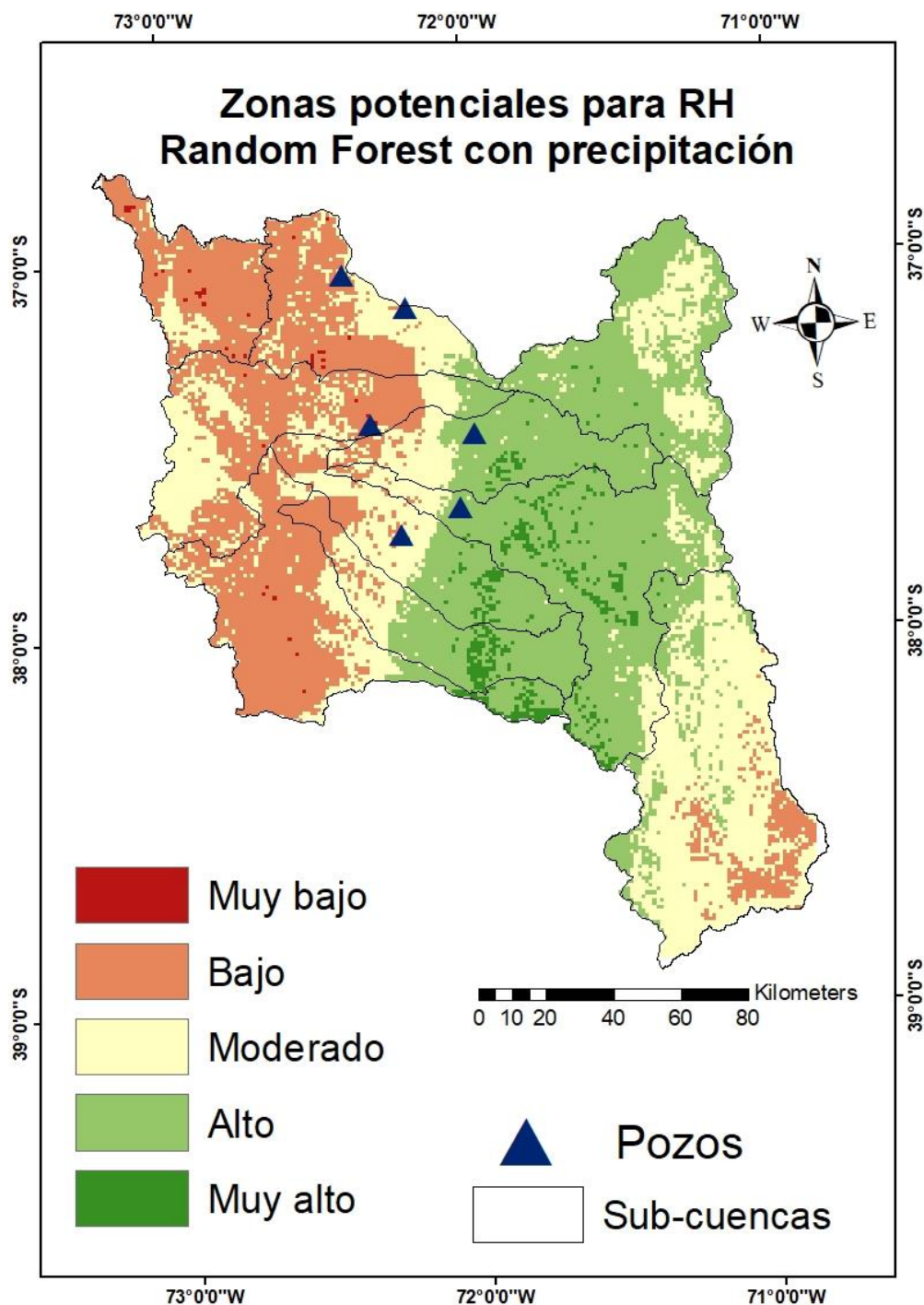


Figura 21: Zonas potenciales para la recarga hídrica en la cuenca del río Biobío considerando las precipitaciones, mediante la aplicación del modelo de Random Forest. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 22 muestra el resultado de las zonas potenciales para la recarga hídrica utilizando el modelo que excluye la precipitación como parámetro influyente. Se aprecia una distribución más clara en comparación con el modelo anterior, identificando zonas de bajo, alto y muy alto potencial para la recarga hídrica.

Los resultados del modelo señalan que el factor más influyente corresponde a la pendiente, con una importancia del 25%, seguido por la textura de suelo, uso de suelo, geomorfología, geología y densidad de drenaje. Es importante destacar que el orden de importancia de los parámetros es el mismo al del modelo sin considerar precipitación, aunque con importancias relativas distintas.

Se observa que las áreas con menor potencial coinciden con las más húmedas en la cuenca, mientras que aquellas con mayor potencial se relacionan con las menos húmedas, resaltando un mayor potencial en el sector central de la cuenca, lo que indica una zona más apta para la infiltración del agua. Este hallazgo concuerda con los resultados obtenidos mediante el método de AHP. De hecho, las zonas con muy alto y muy bajo potencial se superponen con las identificadas mediante AHP, aunque este último método muestra una mayor variabilidad entre las zonas potenciales. Esta consistencia valida ambas metodologías, sugiriendo que la experiencia humana desempeña un papel efectivo en este tipo de análisis.

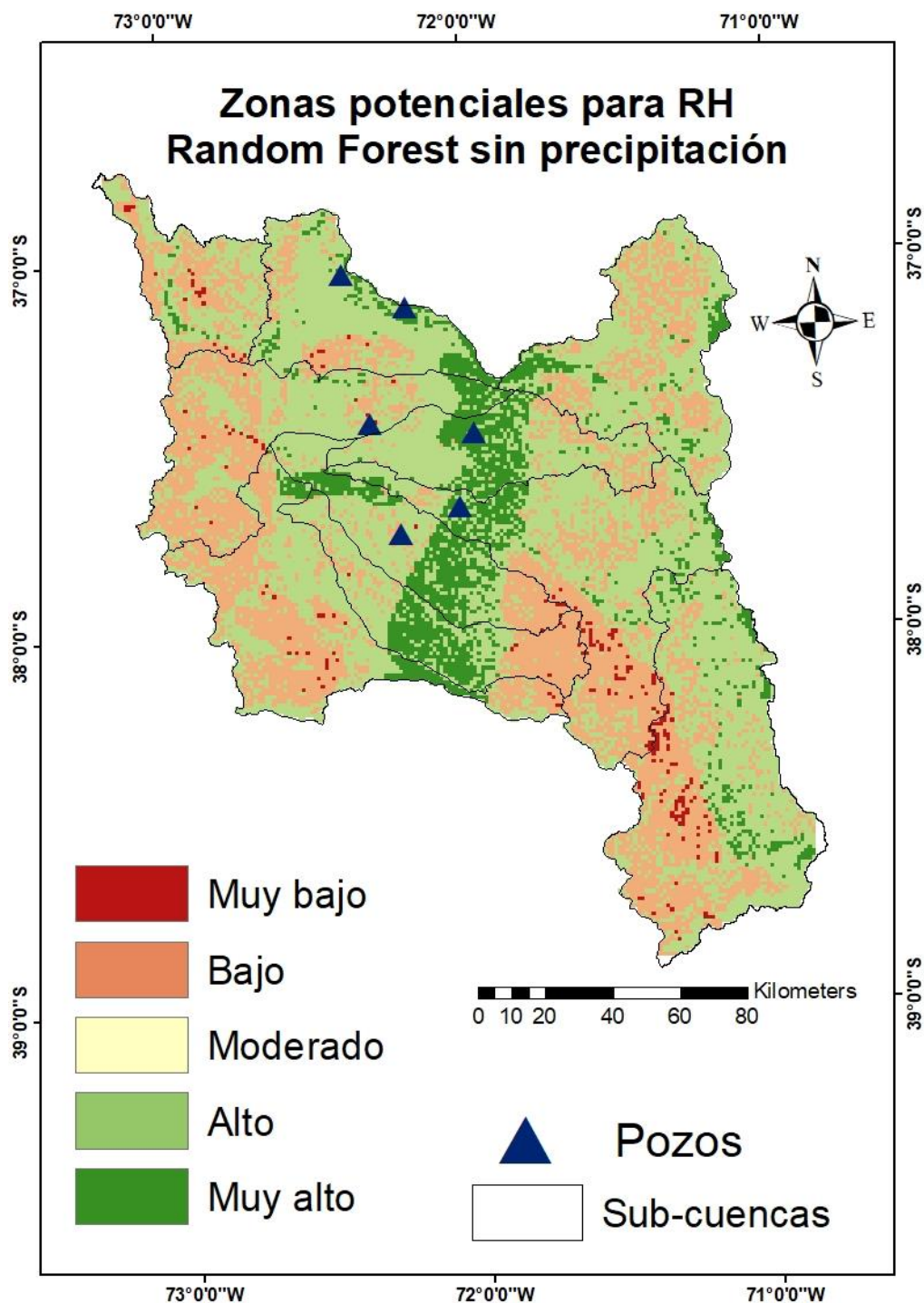


Figura 22: Zonas potenciales para la recarga hídrica en la cuenca del río Biobío sin considerar la precipitación, mediante la aplicación del modelo de Random Forest. Fuente: Elaboración propia.

5.1.5 Comparación de resultados: AHP vs Machine Learning

En esta sección se realiza una comparación y análisis integrado de los resultados obtenidos a través de la aplicación del Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) y el modelo de Machine Learning basado en Random Forest (RF) para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la cuenca del río Biobío.

Integración de los mapas de zonas potenciales: Los mapas generados mediante el enfoque AHP y el modelo de RF fueron superpuestos y analizados en conjunto para evaluar la concordancia y divergencia en la delimitación de las áreas con distinto potencial de recarga.

Análisis de similitudes y diferencias: Al superponer los mapas de AHP y RF, se observó una concordancia general en la ubicación de las zonas catalogadas con un muy alto o muy bajo potencial de recarga. Las áreas de alto potencial, que son aquellas de nuestro interés, se concentraron principalmente, en la región central y oriental de la cuenca. Sin embargo, también se detectaron algunas diferencias en la delimitación de las áreas clasificadas con un potencial de recarga medio. Mientras que el enfoque AHP tendió a identificar transiciones más graduales entre las categorías de potencial, el modelo de RF generó patrones más contrastados en la distribución de estas zonas. Estas discrepancias pueden deberse a las diferentes formas en que cada método procesa y pondera la influencia de los factores determinantes en la recarga hídrica.

Fortalezas y limitaciones de cada enfoque: El AHP, al integrar la experticia y juicios de los tomadores de decisión, ofrece una evaluación holística y transparente de los criterios relevantes. Sin embargo, a su vez, la subjetividad inherente a la asignación de pesos por parte de los expertos podría ser percibida como una limitación metodológica del método AHP, ya que diferentes grupos de expertos podrían llegar a priorizar los criterios de manera distinta. Por su parte, el modelo de RF demostró una mayor capacidad para capturar patrones complejos en los datos, pero su interpretabilidad, en este momento, puede verse limitada. Se requerirá un análisis más profundo y

la aplicación de otros métodos de minería de datos para conceptualizar mejor los hallazgos.

Por otro lado, el modelo de aprendizaje automático con RF demostró un alto desempeño en el análisis y detección de patrones complejos dentro de los datos multivariados, logrando predecir el potencial de recarga con una precisión notable. No obstante, la naturaleza de “caja negra” del algoritmo de RF, en comparación con la mayor transparencia del enfoque AHP, puede dificultar la interpretación detallada de la influencia individual de cada variable predictora en los resultados finales.

Consistencia y complementariedad de los resultados: A pesar de las diferencias metodológicas inherentes al AHP y al modelo de RF, se observó una notable coherencia en la identificación general de las zonas con mayor y menor potencial de recarga hídrica en la cuenca. Esta consistencia en los hallazgos de ambos enfoques respalda la validez y robustez de sus resultados, sugiriendo que sus fortalezas son complementarias y pueden ser utilizadas de manera conjunta para obtener una caracterización más integral del potencial de recarga en la región. Mientras que el AHP ofrece una visión holística basada en el conocimiento experto, el modelo de RF aporta una perspectiva basada en el análisis automatizado de patrones en los datos, enriqueciendo así la comprensión de los factores que controlan la recarga de los acuíferos.

Áreas de concordancia y discrepancia: Las zonas donde ambos métodos coinciden en clasificar como de “alto potencial” se consideran como las más propicias para la recarga de acuíferos, requiriendo una atención prioritaria en la gestión de los recursos hídricos. Estas áreas de concordancia se ubican principalmente en la región central de la cuenca, caracterizada por la presencia de formaciones geológicas permeables, pendientes moderadas y una cobertura vegetal favorable a la infiltración.

Por otro lado, las áreas con discrepancias en la clasificación de “potencial medio” podrían requerir un análisis más detallado y potencialmente estudios de campo adicionales para resolver las diferencias en la delimitación y determinar con mayor certeza su verdadero potencial de recarga. Estas áreas con cierto grado de incertidumbre deben ser priorizadas para una evaluación

complementaria que permita consolidar la identificación de las zonas prioritarias.

Aportes del enfoque integrado: La combinación de los resultados de AHP y ML, como el modelo de RF, ofrecen una caracterización integral del potencial de recarga hídrica en la cuenca del río Biobío. La consistencia observada entre los hallazgos de AHP y RF respalda la validez y confiabilidad de las zonas identificadas como de alto potencial, las cuales deben ser el foco principal de los esfuerzos de manejo y protección de las aguas subterráneas. Este abordaje multifacético permite identificar con mayor precisión las zonas clave para la conservación y gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos en la región.

6 Capítulo 5

6.1 Conclusiones

En este estudio, se han logrado los objetivos establecidos, lo que ha brindado una comprensión más profunda de los factores que influyen en la recarga de acuíferos en la cuenca del río Biobío, así como una mejora en la identificación de zonas potenciales para este propósito.

Primero, este estudio representa la primera implementación de un análisis morfométrico en la cuenca del río Biobío.

El Objetivo 1 permitió priorizar la cuenca del río Biobío a través de un análisis morfométrico exhaustivo. Este enfoque ha proporcionado una visión más clara de cómo las características físicas específicas de la cuenca impactan en la recarga de acuíferos. Además, al priorizar la cuenca, se estableció una base sólida para la prevención de la erosión del suelo y para la implementación de prácticas de manejo de tierras y recursos hídricos más efectivas. Las técnicas de teledetección y SIG demostraron ser herramientas valiosas en este proceso, proporcionando una visión inicial del potencial de agua subterránea y ayudando en la evaluación preliminar de la cuenca.

Los resultados del estudio identificaron las subcuencas SW10 y SW8 como áreas de alta prioridad, lo que sugiere una escasez significativa de agua subterránea y la necesidad urgente de medidas de gestión y protección. Por otro lado, las subcuencas SW1, SW5, SW6 y SW9 se catalogaron como áreas de baja priorización, lo que indica un mayor potencial para la recarga de acuíferos y una menor intervención de gestión, aunque aún requieren medidas de conservación. Mientras tanto, las subcuencas SW7 y SW4 fueron clasificadas como áreas de priorización media, lo que señala un potencial moderado para la recarga de acuíferos y riesgos de erosión intermedios, subrayando la necesidad de una gestión equilibrada que promueva la conservación del recurso hídrico.

En conclusión, las técnicas morfométricas empleadas en este estudio pueden aplicarse a otras cuencas hidrográficas en todo el mundo. Su importancia radica en la priorización y gestión efectiva de las cuencas, así como en la evaluación del potencial de agua subterránea y la reducción del riesgo de inundaciones. Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para la planificación y gestión del agua en la cuenca del río Biobío, y pueden servir como una guía valiosa para la conservación y el uso sostenible de los recursos hídricos tanto en la región como en otras partes del mundo.

El cumplimiento del objetivo 2 permitió mapear las zonas potenciales para la recarga hídrica mediante la aplicación del método AHP, empleando enfoques integrados de teledetección y SIG. Este enfoque permitió una ponderación efectiva de los diversos criterios que afectan la recarga hídrica, considerando una gama variada de factores geo ambientales e influencias humanas. Este enfoque garantiza una selección objetiva de áreas prioritarias para la gestión del recurso hídrico.

Los diversos factores considerados, como la geología, geomorfología, suelo, pendiente, densidad de drenaje, uso de suelo y precipitación, fueron fundamentales en delimitación de las zonas potenciales para la recarga hídrica. A través de la técnica AHP, se generaron pesos que permitieron realizar un análisis de decisión multicriterio. Dentro de los parámetros considerados, la geología, geomorfología y el suelo demostraron tener roles significativos en la dinámica del agua subterránea en la cuenca del río Biobío.

La evaluación del potencial de agua subterránea de la cuenca se clasificó en cinco categorías, desde muy bajo hasta muy alto. Se destaca que aproximadamente el 53% del área total de la cuenca exhibe un potencial de agua subterránea de alto a muy alto, mientras que solo el 12% presenta un potencial bajo a muy bajo. Por otro lado, un 34% del área total de la cuenca se caracteriza por un potencial intermedio.

Las áreas caracterizadas con un alto potencial se corresponden con formaciones rocosas del cuaternario, ubicadas en la precordillera, con suelos francos, pendientes moderadas, densidades de drenaje de bajas a medias, una alta cobertura vegetal y niveles elevados de precipitación. Estas condiciones favorecen una mayor infiltración del agua.

Este enfoque resalta la efectividad de la integración de teledetección y SIG con AHP como herramientas eficaces para identificar zonas propicias para la recarga hídrica, lo que conlleva a una herramienta eficaz para la gestión regional del recurso hídrico en condiciones donde los datos en campo son limitados.

Finalmente, el cumplimiento del objetivo 3 permitió la aplicación de técnicas de Machine Learning mediante el modelo de Random Forest para mejorar la precisión en la identificación de zonas de recarga hídrica. La implementación de ML demostró ser altamente efectiva al analizar y extraer patrones complejos de grandes conjuntos de datos, superando las limitaciones de los métodos analíticos tradicionales.

Los resultados obtenidos mediante el modelo de Random Forest mostraron que el modelo funciona de manera óptima cuando la precipitación no se considera como parámetro influyente en la predicción de la humedad del suelo. Se encontró que los parámetros más influyentes corresponden a la pendiente, suelo y uso de suelo. Esto demuestra que los métodos AHP y RF produjeron clasificaciones similares para los factores de mayor influencia, mostrando mapas de distribución similares en las zonas de alto y bajo potencial.

Los modelos utilizados en este estudio presentan diferentes mecanismos para ponderar los factores influyentes, ya que pertenecen a distintos enfoques. El

análisis morfométrico permitió la priorización de la cuenca del río Biobío con el objetivo de mejorar la gestión del recurso hídrico y del suelo. Por otro lado, el modelo de AHP utilizó un enfoque basado en el sistema de decisión, asignando ponderaciones a los factores relevantes según las opiniones de expertos y conocimiento del dominio, mientras que en el modelo de RF las ponderaciones asignadas se basaron en el análisis de datos, utilizando algoritmos de optimización más sofisticados para el cálculo del peso de cada factor influyente. Este estudio resalta la utilidad del conjunto de modelos de diferentes enfoques en el mapeo de zonas potenciales para la recarga hídrica.

La cuantificación de la importancia de estos factores en los procesos del agua subterránea ayudará a mejorar las políticas de planificación de los recursos hídricos. En conjunto, los objetivos cumplidos representan un avance significativo en la comprensión de la recarga de acuíferos en la cuenca del río Biobío. Los hallazgos no solo tienen implicaciones teóricas para la hidrología y la gestión del recurso hídrico, sino que también pueden informar decisiones prácticas en la conservación y el uso sostenible de los recursos hídricos en esta importante región.

En resumen:

Análisis Morfométrico Exhaustivo: El estudio realiza un análisis morfométrico detallado de la cuenca del río Biobío, lo que proporciona una comprensión profunda de las características físicas de la cuenca y su influencia en la dinámica hídrica. El cálculo de una amplia gama de parámetros morfométricos permite priorizar las diferentes subcuencas según su potencial de recarga.

Enfoque integrado de RS-SIG y AHP: La integración de técnicas de teledetección, sistemas de información geográfica y el Análisis Jerárquico de Procesos demuestra ser una metodología robusta y efectiva para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica. La ponderación sistemática de múltiples criterios geoambientales asegura una evaluación integral del potencial de recarga.

Implementación de Machine Learning: La aplicación del algoritmo de RF para predecir la humedad del suelo y mapear las zonas potenciales de recarga

es un aporte valioso. El análisis de la importancia relativa de los diferentes factores contribuye a una mejor comprensión de los procesos de recarga.

Validación Cruzada de Resultados: La comparación y validación de los resultados obtenidos a través de los diferentes enfoques metodológicos (análisis morfométrico, AHP y RF) fortalece la solidez de las conclusiones y aumenta la confianza en la identificación de las áreas prioritarias para la gestión de los recursos hídricos.

6.2 Limitaciones y Trabajo Propuesto

Aunque el estudio ha seguido un análisis científico sistemático y exhaustivo de múltiples factores geoambientales, es importante reconocer las limitaciones que deben abordarse.

En primer lugar, en cuanto al análisis morfométrico, si bien es una técnica que proporciona valiosa información respecto a la gestión y manejo de las cuencas hidrográficas al analizar la erosión del suelo, la infiltración y la permeabilidad, presenta limitaciones al realizar una priorización a nivel de subcuenca, lo que puede no ser lo suficientemente preciso a una escala muy local. Para futuros estudios, se realizar un análisis a nivel de subsubcuencas para capturar información más detallada y obtener resultados más precisos con una mejor distribución.

Incorporación de Datos de Campo: Por otro lado, en relación con las metodologías empleadas en AHP, la mayoría de los datos utilizados provienen de mapas publicados proporcionados por diferentes autoridades, es decir de fuentes secundarias lo que implica que estos mapas son de una naturaleza muy generalizada. Sería ideal complementar el estudio con datos de campo, como mediciones de permeabilidad de suelos, niveles de agua subterránea, ubicación de manantiales, entre otros, para mejorar la validez de los resultados. Se sugiere realizar un análisis mediante AHP que capture información local para obtener un mapa de potencial de aguas subterráneas más preciso. Además, es importante considerar que el método de AHP se basa en la clasificación de los criterios en función de la experiencia humana, lo que sugiere que, a pesar de que el estudio mostró una buena precisión,

podrían obtenerse resultados diferentes al reorganizar las clasificaciones de los mismos parámetros.

Análisis de Incertidumbre y Sensibilidad: Sería beneficioso realizar un análisis de sensibilidad de los modelos empleados, evaluando cómo los cambios en los parámetros de entrada o en las ponderaciones asignadas afectan los resultados finales. Esto permitirá comprender mejor la robustez de las metodologías y la confiabilidad de las zonas prioritarias identificadas.

Consideración de Factores Adicionales: Si bien el estudio abarca un conjunto amplio de criterios, podrían incluirse otros factores relevantes, como la evapotranspiración, la escorrentía superficial, la geología detallada (incluyendo estructuras y fallamiento), la hidrogeología y las zonas de descarga, con el fin de obtener una visión más completa de los procesos de recarga hídrica.

Por último, las técnicas de Machine Learning han demostrado ser efectivas en la predicción de variables hidrológicas, se sugiere considerar distintas variables como entrenamiento para predecir el potencial de recarga hídrica, incluyendo la ubicación de los pozos. Además, para una evaluación más precisa, se recomienda incorporar métodos geofísicos basados en el campo.

Los resultados de este pueden utilizarse para predecir el comportamiento del agua subterránea, teniendo en cuenta factores relevantes como la contaminación del agua, la descarga, la calidad y cantidad, entre otros. Esto permitirá tener un estudio completo tanto de los factores que afectan la recarga hídrica, como de la existencia real de agua en los lugares identificados.

Referencias

- Abdel-Lattif, A. and Sherief, Y. (2012) Morphometric Analysis of Flash Floods of Wadi Sudr and Wadi Wardan, Gulf of Suez, Egypt: Using Digital Elevation Model. Arab Journal of Geosciences, 5, 181-195.
<https://doi.org/10.1007/s12517-010-0156-8>
- AGARWAL, E., AGARWAL, R., GARG, R.D. et al. Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach. J Earth Syst Sci 122, 887–898 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0309-8>
- Aguas subterráneas: Sobreexplotación de un recurso hídrico invisible – Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile. (s. f.). <https://ingenieria.uchile.cl/>
- Aguirre Núñez, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. REDESMA, Vol. 5 [1].
<https://aquabook.irrigacion.gov.ar>
- Aju, G.K., Thomas, J., Das, S., Rao, B.V. (2019). Multi-criteria decision analysis for delineating potential groundwater zones in a tropical river basin using remote sensing, GIS and analytic hierarchy process (AHP). Hydrological Sciences Journal, 64(13), 1541-1563.
- Alizadeh, M.J., Kavianpour, M.R., Kisi, O. y Nourani, V. (2017).
Una revisión de las aplicaciones de aprendizaje automático e inteligencia computacional en la modelización y predicción de la calidad del agua. Journal of Hydro-Environment Research, 16, 122-139.

- Al-Kindi, K.M.; Janizadeh, S. Machine Learning and Hyperparameters Algorithms for Identifying Groundwater Aflaj Potential Mapping in Semi-Arid Ecosystems Using LiDAR, Sentinel-2, GIS Data, and Analysis. *Remote Sens.* 2022, 14, 5425.
<https://doi.org/10.3390/rs14215425>
- Aller, L., Lehr, J.H., Petty, R. and Bennett, T. (1987) DRASTIC—A Standardized System to Evaluate Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting. *Journal of the Geological Society of India*, 29, 23-37.
- Alpaydin, E. (2020) *Introduction to Machine Learning*. 4th Edition, MIT Press Academic, Cambridge.
- Andualem, T. G., & Demeke, G. G. (2019). Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 24, 100610.
- Arjun B. Doke, Rajendra B. Zolekar, Hemlata Patel, Sumit Das, Geospatial mapping of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making AHP approach in a hardrock basaltic terrain in India, *Ecological Indicators*, Volume 127, 2021, 107685, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107685>.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D. & Sreelash, K. GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Sci Rep* 9, 2082 (2019).
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>

- Avila, Laura & Soler-Méndez, Manuel & Bautista-Capetillo, Carlos & González-Trinidad, Julián & Júnez, Hugo & Robles, Octavio & Molina Martínez, José. (2021). A Compact Weighing Lysimeter to Estimate the Water Infiltration Rate in Agricultural Soils. *Agronomy*. 11. 180. 10.3390/agronomy11010180.
- Avinash, K., Deepika, B., Jayappa, K. S., 2014. Basin Geomorphology and Drainage Morphometry Parameters Used as Indicators for Groundwater Prospect: Insight from Geographical Information System (GIS) Technique. *Journal of Earth Science*, 25(6): 1018–1032. doi:10.1007/s12583-014-0505-8
- Avinash, K., Jayappa, K. S., Deepika, B., 2011. Prioritisation of Sub-Basins Based on Geomorphology and Morphometric Analysis Using Remote Sensing and Geographical Information System (GIS) Techniques. *Geocarto International*, 26(7): 569–592
- Avtar R, Singh CK, Shashtri S, Mukherjee S (2011a) Identification of erosional and inundation hazard zones in Ken-Betwa river linking area, India, using remote sensing and GIS. *Environ Monit Assess* 182(1–4):341–360
- Baghel, S., Tripathi, M.P., Khalkho, D. et al. Delineation of suitable sites for groundwater recharge based on groundwater potential with RS, GIS, and AHP approach for Mand catchment of Mahanadi Basin. *Sci Rep* 13, 9860 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36897-5>
- Bertrán, C., Arenas, J., & Parra, O. 2001. Macrofauna del curso inferior y estuario del río Biobío (Chile): cambios asociados a ocasionales del

- caudal hídrico. *Revista chilena de historia natural* ,74 (2), 331-340.
- Bishop, C. (2007) *Pattern Recognition and Machine Learning* (Information Science and Statistics). Springer, New York.
- Breiman, L. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5–32 (2001).
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Candelieri, A. (2017). Clustering and support vector regression for water demand forecasting and anomaly detection. *Water*, 9(3), 224.
- Chenini, Ismail & Ben Mammou, Abdallah & el may, Moufida. (2010). Groundwater Recharge Zone Mapping Using GIS-Based Multi-criteria Analysis: A Case Study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water Resources Management*. 24. 921-939. 10.1007/s11269-009-9479-1.
- Chopra, R., Dhiman, R.D., Sharma, P.K., 2005. Morphometric analysis of sub-watersheds in Gurdaspur district, Punjab using remote sensing and GIS techniques. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 33 (4), 531.
- Chorley RJ, Donald Malm EG, Pogorzelski HA (1957) A new standard for estimating drainage basin shape. *Am J Sci* 255:138–141
- Chow, V. (1964) *Applied Hydrology*. McGraw Hill, New York.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Congreso Nacional de Chile, BCN. (s. f.). Relieve región del Bio Bío.
<https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region8/relieve.htm>
- Das, B., Pal, S.C. Assessment of groundwater recharge and its potential zone identification in groundwater-stressed Goghat-I block of Hugli District, West Bengal, India. *Environ Dev Sustain* 22, 5905–5923

- (2020). <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00457-7>
- Das, Biswajit & Pal, Subodh & Malik, Sadhan & Chakraborty, Rabin. (2018). Modeling groundwater potential zones of Puruliya district, West Bengal, India using remote sensing and GIS techniques. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 3. 1-15. 10.1080/24749508.2018.1555740.
- DGA, Dirección General de Aguas. 2014. Inventario de Cuencas, Subcuencas y Subsubcuencas de Chile D.S. N°364 de 2014. Gobierno de Chile. 22-23 pp.
- DGA, Dirección General de Aguas. 2019. Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de las regiones de Ñuble y del Biobío. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. 197 pp.
- DGA. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Biobío. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. 185pp.
- DGA. 2012. Estudio hidrogeológico cuenca Bío Bío (S.I.T. N° 297). DGA. <https://snia.mop.gob.cl/sad/SUB5433v1.pdf>
- Doke, Arjun & Zolekar, Rajendra & Patel, Hemlata & Das, Sumit. (2021). Geospatial mapping of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making AHP approach in a hardrock basaltic terrain in India. *Ecological Indicators*. 127. 107685. 10.1016/j.ecolind.2021.107685.
- Donselaar, M.E., Bhatt, A.G., Ghosh, A.K., 2017. On the relation between fluvio-deltaic flood basin geomorphology and the wide-spread occurrence of arsenic pollution in shallow aquifers. *Sci. Total Environ.*

- 574, 901–913. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.074>.
- Eid, M. M., Abdel Rahman, M. T., Zaghloul, E. A., & Elbeih, S. F. (2006). Integrated remote sensing and GIS for proposing groundwater recharge locations: case study at West El-Nubariya Canal, Egypt. *Egypt J Remote Sens Space Sci*, 9(11), 113-134.
- Elbeih, S. F. (2007). Impact of groundwater recharge on the surrounding environment (Doctoral dissertation, PhD Thesis).
- Escenarios Hídricos 2030. (2018). Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile. Fundación Chile, Santiago, Chile.
- Famiglietti, J.S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4(11), 945-948.
- Fan J, Han F, Liu H (2014) Challenges of Big Data analysis. *Natl Sci Rev* 1:293–314. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwt032>
- Faniran, A. (1968) The Index of Drainage Intensity—A Provisional New Drainage Factor. *Australian Journal of Science*, 31, 328-330.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.
- Gabale, Shrikant & Pawar, Nikhil. (2015). Quantitative Morphometric Analysis of Ambil Odha (Rivulet) In Pune, Maharashtra, India. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)*. 9. 2319-2399. 10.9790/2402-097XXXXX.
- Gleeson, T., VanDerSteen, J., Sophocleous, M.A., Taniguchi, M., Alley, W.M., Allen, D.M., Zhou, Y. (2012). Towards sustainable groundwater use: Setting long-term goals, back-casting, and managing salt water

- intrusion. *Ground Water*, 50(1), 19-26.
- Gómez-Escalonilla, V., Vogt, M. L., Destro, E., Isseini, M., Origgi, G., Djoret, D., ... & Holecz, F. (2022). Delineation of groundwater potential zones by means of ensemble tree supervised classification methods in the Eastern Lake Chad basin. *Geocarto International*, 37(25), 8924-8951.
- Goodfellow, I., et al. (2016) *Deep Learning*. MIT Press, Cambridge, MA.
<http://www.deeplearningbook.org>
- Gorelick, S.M., Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*, 51(5), 3031-3051.
- Government, Department for Communities and Local. (2009). *Multi-criteria analysis: a manual*. London: Communities and Local Government Publications.
- Gravelius, H. (1914) *Morphometry of Drainage Bassins*. Elsevier, Amsterdam.
- Hadley, R. and Schumm, S. (1961) *Sediment Sources and Drainage Basin Characteristics in Upper Cheyenne River Basin*. US Geological Survey Water-Supply Paper 1531-B, Washington DC, 198.
- Hajam RA, Hamid A, Bhat S (2013) Application of Morphometric Analysis for Geo-Hydrological Studies Using Geo-Spatial Technology –A Case Study of Vishav Drainage Basin. *Hydrol Current Res* 4: 157.
doi:10.4172/2157-7587.1000157
- Hamid Reza Pourghasemi, Nitheshnirmal Sadhasivam, Saleh Yousefi, Shahla Tavangar, Hamid Ghaffari Nazarlou, M. Santosh, Using

- machine learning algorithms to map the groundwater recharge potential zones, *Journal of Environmental Management*, Volume 265, 2020, 110525, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110525>.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. H. (2009). *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. 2nd ed. New York, Springer.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. (2009). Random Forests. In: *The Elements of Statistical Learning*. Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7_15
- Horton, R. (1932) Drainage Basin Characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13, 350-361. <http://dx.doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. (1945) Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Horton, R.E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350-361.
- Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370.
- Hosseini, Parsa & Hosseini, Amin & Ahi, Kiarash. (2020). A Review on Machine Learning for EEG Signal Processing in Bioengineering. *IEEE*

Reviews in Biomedical Engineering. PP. 1-1.

10.1109/RBME.2020.2969915.

Hsin-Fu Yeh, Youg-Sin Cheng, Hung-I. Lin, Cheng-Haw Lee,

Hurtado, G.B. (2005). El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Monografía, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de ciencias matemáticas, Lima, Perú.

Huajie Duan, Zhengdong Deng, Feifan Deng, Daqing Wang, "Assessment of Groundwater Potential Based on Multicriteria Decision Making Model and Decision Tree Algorithms", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2016, Article ID 2064575, 11 pages, 2016.

<https://doi.org/10.1155/2016/2064575>

IDW (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro | Documentación. (s. f.).

<https://pro.arcgis.com/es>

Jagannathan, Krishnamurthy & Mani, Arul & V, Jayaraman & Manivel, M. (2000). Groundwater resources development in hard rock terrain - An approach using remote sensing and GIS techniques. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2000. 204-215. 10.1016/S0303-2434(00)85015-1.

Jenson, S. K. y J. O. Domingue. 1988. "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11): 1593–1600.

Jha, M.K., Chowdary, V.M., Chowdhury, A. (2010). Groundwater

- assessment in Srilanka using groundwater potential zone simulation model. *International Journal of Remote Sensing*, 31(1), 187-201.
- Kadam, A. K., Jaweed, T. H., Kale, S. S., Umrikar, B. N., & Sankhua, R. N. (2019). Identification of erosion-prone areas using modified morphometric prioritization method and sediment production rate: a remote sensing and GIS approach. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 986–1006.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1555189>
- Kadam, A.K., Umrikar, B.N., Sankhua, R.N., 2020. Assessment of recharge potential zones for groundwater development and management using geospatial and MCDA technologies in semiarid region of Western India. *SN Appl. Sci.* 2. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2079-7>
- Kaewdum, N., & Chotpantararat, S. (2021). Mapping potential zones for groundwater recharge using a GIS technique in the lower Khwae Hanuman Sub-Basin Area, Prachin Buri Province, Thailand. *Frontiers in Earth Science*, 9, 717313.
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2019). *Feature Engineering and Selection: A Practical Approach for Predictive Models* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315108230>
- Kundzewicz, Z.W., Döll, P. (2009). Will groundwater ease freshwater constraints under climate change? *Hydrological Sciences Journal*, 54(4), 665-675.
- L., Achu & Thomas, Jobin & Reghunath, Rajesh. (2020). Multi-criteria decision analysis for delineation of groundwater potential zones in a

- tropical river basin using remote sensing, GIS and analytical hierarchy process (AHP). *Groundwater for Sustainable Development*. 10. 100365. [10.1016/j.gsd.2020.100365](https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100365).
- Lama, Sonam and Maiti, Ramkrishna (2019) Morphometric analysis of Chel river basin, West Bengal, India, using Geographic Information System. *e-Journal Earth Science India*, v. 12, pp. 1-23.
<https://doi.org/10.31870/ESI.12.1.2019.01>
- Lipton, Z. C. (2018). The Mythos of Model Interpretability. *ACM Queue*, 16(3), 31-57. <https://doi.org/10.1145/3236386.3241340>
- López, J., López, B., & Díaz, V. (2004). Algoritmo de aprendizaje por refuerzo continuo para el control de un sistema de suspensión semi-activa. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 9(2), 77-91.
- Louppe, Gilles. (2014). Understanding Random Forests: From Theory to Practice. [10.13140/2.1.1570.5928](https://doi.org/10.13140/2.1.1570.5928).
- Luque, H.S. (2019). Revisión del análisis de decisión multicriterio para la gestión de los recursos hídricos. Máster universitario en hidrología y gestión de recursos hídricos, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.
- M. Rajasekhar, G. Sudarsana Raju, R. Siddi Raju, Morphometric analysis of the Jilledubanderu River Basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India, using geospatial technologies, *Groundwater for Sustainable Development*, Volume 11, 2020, 100434, ISSN 2352-801X,
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100434>.
- Maathuis, B. H. P., & Wang, L. (2006). Digital Elevation Model Based Hydro-processing. *Geocarto International*, 21(1), 21–26.

<https://doi.org/10.1080/10106040608542370>

Maity, Deb & Mandal, Sujit. (2019). Identification of groundwater potential zones of the Kumari river basin, India: an RS & GIS based semi-quantitative approach. *Environment, Development and Sustainability*. 21. 10.1007/s10668-017-0072-0.

Maity, Deb & Mandal, Sujit. (2019). Identification of groundwater potential zones of the Kumari river basin, India: an RS & GIS based semi-quantitative approach. *Environment, Development and Sustainability*. 21. 10.1007/s10668-017-0072-0.

Manrique, E. 2020. Machine Learning: análisis de lenguajes de programación y herramientas para desarrollo. *Rev Iber Sist Tecnol Inf* E28: 586-599. <http://www.risti.xyz/issues/ristie28.pdf>

Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan, *Sustainable Environment Research*, Volume 26, Issue 1, 2016, Pages 33-43, ISSN 2468-2039, <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005>.

Mapping groundwater-dependent ecosystems by means of multi-layer supervised classification, *Journal of Hydrology*, Volume 603, Part A, 2021, 126873, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126873>.

Medina-Merino, R. F., & Ñique-Chacón, C. I. (2017). Bosques aleatorios como extensión de los árboles de clasificación con los programas R y Python. *Interfases*, 10(010), 165-189.

<https://doi.org/10.26439/interfases2017.n10.1775>

- Mehra, Mamta & Oinam, Bakimchandra & Singh, Chander. (2016).
Integrated Assessment of Groundwater for Agricultural Use in Mewat
District of Haryana, India Using Geographical Information System
(GIS). Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 44.
10.1007/s12524-015-0541-6.
- Mehrabi, Ninareh & Morstatter, Fred & Saxena, Nripsuta & Lerman,
Kristina & Galstyan, Aram. (2021). A Survey on Bias and Fairness in
Machine Learning. ACM Computing Surveys. 54. 1-35.
10.1145/3457607.
- Melese, T., & Belay, T. (2021). Groundwater Potential Zone Mapping
Using Analytical Hierarchy Process and GIS in Muga Watershed, Abay
Basin, Ethiopia. Global Challenges, 6, Article ID: 2100068.
<https://doi.org/10.1002/gch2.202100068>
- Mendoza, Adel, Solano, Cristian, Palencia, Daniel, & Garcia, David.
(2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la
toma de decisión con juicios de expertos. Ingeniare. Revista chilena de
ingeniería, 27(3), 348-360. <https://www.scielo.cl/>
- Mesa, L.M. (2006) Morphometric Analysis of a Subtropical Andean Basin
(Tucuman, Argentina). Environmental Geology, 50, 1235-1242.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00254-006-0297-y>
- Miller, V.C., 1953. Technical report. Quantitative Geomorphic Study of
Drainage Basin Characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia
and Tennessee, vol. 3. Columbia University. Department of Geology.
- Moore, I.D., Grayson, R.B. and Ladson, A.R. (1991) Digital Terrain

Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5, 3-30.

<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.3360050103>

MOP, Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. Balance Hídrico de Chile. 1987.

Moral, M.d (2016). Análisis multicriterio: una herramienta innovadora en la gestión sustentable de los recursos hídricos.

Mueller, J. P., & Massaron, L. (2016). *Machine learning for dummies*. John Wiley & Sons.

Naghibi, Amir & Davoudi Moghaddam, Davoud & Kalantar, Bahareh & Pradhan, Biswajeet & Kisi, Ozgur. (2017). A Comparative Assessment of GIS-Based Data Mining Models and a Novel Ensemble Model in Groundwater Well Potential Mapping. *Journal of Hydrology*. 548. 10.1016/j.jhydrol.2017.03.020.

Naghibi, S. A., Moghaddam, D. D., Kalantar, B., Pradhan, B., & Khodaei, K. (2017). A comparative study of groundwater potential mapping using three machine learning and three data-driven techniques. *Groundwater for Sustainable Development*, 5, 107-116.

Nooka Ratnam, K., Srivastava, Y.K., Venkateswara Rao, V. et al. Check dam positioning by prioritization of micro-watersheds using SYI model and morphometric analysis — Remote sensing and GIS perspective. *J Indian Soc Remote Sens* 33, 25–38 (2005).

<https://doi.org/10.1007/BF02989988>

Obeidat, Mutewekil & Awawdeh, Muheeb & Al-Hantouli, Farah. (2021).

Morphometric analysis and prioritisation of watersheds for flood risk management in Wadi Easal Basin (WEB), Jordan, using geospatial technologies. *Journal of Flood Risk Management*. 14. 10.1111/jfr3.12711.

Oikonomidis, Dimitrios & S., Dimogianni & Kazakis, Nerantzis. (2015). A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology*. 525. 197-208. 10.1016/j.hydrol.2015.03.056.

P. Martínez-Santos, S. Díaz-Alcaide, A. De la Hera-Portillo, Víctor Gómez-Escalonilla, P. P. Choudhari, Gaurav K. Nigam, Sudhir Kumar Singh & Sapana cThakur (2018) Morphometric based prioritization of watershed for groundwater potential of Mula river basin, Maharashtra, India, *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2:4, 256-267, DOI: 10.1080/24749508.2018.1452482

Padala Raja Shekar, Aneesh Mathew, Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques, *Watershed Ecology and the Environment*, Volume 6, 2024, Pages 13-25, ISSN 2589-4714, <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>.

Pakhmode, V., Kulkarni, H. & Deolankar, S.B. Hydrological-drainage analysis in watershed-programme planning: a case from the Deccan basalt, India. *Hydrogeology Journal* 11, 595–604 (2003). <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0279-z>

Parra, O., Figueroa, R., Valdovinos, C., Habit, E., Díaz, M.E. (2013).

Programa de monitoreo de calidad del agua del sistema río Biobío
1994-2012: Aplicación del anteproyecto de norma de la calidad del
agua del río Biobío. Editorial Universidad de Concepción.

Parra, O., Muñoz, M., Perez, L. (2009). Gestión integrada de cuencas como
base del ordenamiento territorial descentralizado. En: Von Baer, H.
(Ed.). Pensando en Chile desde sus regiones. Editorial Universidad de
la Frontera: Serie AU-Sinergia Regional (Temuco, Chile), 819 pp.

Patton, P. C., and V. R. Baker (1976), Morphometry and floods in small
drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls, *Water
Resour. Res.*, 12(5), 941–952, doi:10.1029/WR012i005p00941.

Planchon, Olivier & Darboux, Frédéric. (2002). A fast, simple and versatile
algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena*. 46.
159-176. 10.1016/S0341-8162(01)00164-3.

Prasad, R K & Mondal, Nepal & Banerjee, Pallavi & NANDAKUMAR,
MV & Singh, V.. (2008). Deciphering potential groundwater zone in
hard rock through the application of GIS. *ENVIRONMENTAL
GEOLOGY*. 55. 467-475. 10.1007/s00254-007-0992-3.

Punmia, B., & Jain, A. K. (2005). Soil mechanics and foundations. Firewall
Media.

Richey, A.S., Thomas, B.F., Lo, M.H., Reager, J.T., Famiglietti, J.S., Voss,
K., Swenson, S., Rodell, M. (2015). Quantifying renewable
groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, 51(7),
5217-5238.

Rulinda, C.M., Moses, G., Ouarda, T.B.M.J. y Ntegeka, V. (2012). Drought

Monitoring Using Machine Learning Techniques over Uganda. En
International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication
364: Remote Sensing and Hydrology.

S, Selvam & Senapathi, Venkatramanan & Chung, Sang Yong & Singaraja,
Chelladurai. (2016). Identification of groundwater contamination
sources in Dindugal district of Tamil Nadu, India using GIS and
multivariate statistical analyses. Arabian Journal of Geosciences. 9.
407. 10.1007/s12517-016-2417-7.

Saaty, T.L. (1980) The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New
York.

Sameena, M., Krishnamurthy.J., Jayaraman.V. and Ranganna, G. (2009):
Evaluation of drainage networks developed in hard rock terrain:
Geocarto International pp1-24.

Sanhueza, J. R. (2022, 15 noviembre). Con estudios científicos, evaluarán
cuánta agua subterránea hay en cuatro comunas de Biobío. La Tribuna.
<https://www.latribuna.cl/>

Sarkar, S.K., Talukdar, S., Rahman, A., Shahfahad and Roy, S.K. (2022),
"Groundwater potentiality mapping using ensemble machine learning
algorithms for sustainable groundwater management", Frontiers in
Engineering and Built Environment, Vol. 2 No. 1, pp. 43-54.
<https://doi.org/10.1108/FEBE-09-2021-0044>

Scanlon, Bridget & Healy, Richard & Cook, Peter. (2002). Choosing
Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge.

- Hydrogeology Journal. 10. 18-39. 10.1007/s10040-001-0176-2.
- Schumm, S. A. (1965), The contribution to hydrology, Eos Trans. AGU, 46(4), 649–649, doi:10.1029/TR046i004p00649.
- Schumm, S.A. (1956) Evolution of Drainage Systems & Slopes in Badlands at Perth, New Jersey. Bulletin of the Geological Society of America, 67, 597-646.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Selvan, M. Tamil & Ahmad, Sarfaraz & Rashid, S. (2011). Analysis of the Geomorphometric Parameters in High Altitude Glacierised Terrain using SRTM DEM data in Central Himalaya, India. 1.
- Senanayake, Indishe & Dissanayake, D.M.D.O.K & Mayadunna, Bhanuka & Weerasekera, Wayangi. (2015). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. Geoscience Frontiers. 7. 115-124.
 10.1016/j.gsf.2015.03.002.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago.
- Shaban, Amin & Khawlie, Mohamad & Abdallah, Chadi. (2006). Use of Remote Sensing and GIS to Determine Recharge Potential Zones: The Case of Occidental Lebanon. Hydrogeology Journal. 14. 433-443.
 10.1007/s10040-005-0437-6.
- Shekar PR, Mathew A (2023a) Erosion susceptibility mapping based on hypsometric analysis using remote sensing and geographical

information system techniques. River dynamics and flood hazards.

Springer, Singapore, pp 365–382.

https://doi.org/10.1007/978-981-19-7100-6_26

Shekar, P.R., Mathew, A., Abdo, H.G. et al. Prioritizing sub-watersheds for soil erosion using geospatial techniques based on morphometric and hypsometric analysis: a case study of the Indian Wyra River basin. Appl Water Sci 13, 160 (2023).

<https://doi.org/10.1007/s13201-023-01963-w>

Shortridge, J., et al. (2016). Journal of Hydrology, 538, 319-330.

Siebert, S., Burke, J., Faures, J.M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., Portmann, F.T. (2010). Groundwater use for irrigation - a global inventory. Hydrology and Earth System Sciences, 14(10), 1863-1880.

Singh, J., Abraham, T., Kumar, M., Choudhary, A., 2018. Influence of different cultural method and potassium levels for improvement of growth & yield of wheat under Eastern U.P. Green farming 9, 8.

Singh, Leelambar & Katpatal, Yashwant. (2018). Wetland change analysis and their impact on dense vegetation by spatial approach. Journal of Urban and Environmental Engineering. 12. 70 - 76.
10.4090/juee.2018.v12n1.070076.

Singh, S. and Singh, M.C. (1997) Morphometric Analysis of Kanhar River Basin. National Geographical Journal of India, 43, 31-43.

Singhal, B.B.S. and Gupta, R.P. (2010) Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. 2nd Edition, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London.

<https://doi.org/10.1007/978-90-481-8799-7>

Smith, K. (1950) Standards for Grading Textures of Erosional Topography. American Journal of Science, 248, 655-668.

<http://dx.doi.org/10.2475/ajs.248.9.655>

Soni, S. Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique. Appl Water Sci 7, 2089–2102 (2017). <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0395-2>

Sophocleous, M. (2004). Groundwater Recharge and the Water Budgets of the Kansas High Plains and Related Aquifers. Kansas Geological Survey Bulletin, 249, 102 p.

Sreedevi, Pd & Subrahmanyam, K. & Ahmed, Shakeel. (2005). The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain. Environmental Geology. 47. 412-420. 10.1007/s00254-004-1166-1.

Stefan Hajkowicz & Kerry Collins, 2007. "A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management," Water Resources Management: An International Journal, Published for the European Water Resources Association (EWRA), Springer;European Water Resources Association (EWRA), vol. 21(9), pages 1553-1566, September.

Strahler, A. (1957) Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. Transactions, American Geophysical Union, 38, 913-920.

<http://dx.doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

Strahler, A. (1964) Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and

- Channel Networks. In: Chow, V., Ed., Handbook of Applied Hydrology, McGraw Hill, New York, 439-476.
- Strahler, A.N. (1958) Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In: Chow, V.T., Ed., Handbook of Applied Hydrology, McGraw Hill, New York, 439-476.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). Reinforcement learning: An introduction (2nd ed.). The MIT Press.
- T.L. Saaty and G. Hu (1998), Ranking by eigenvector versus other methods in the analytic hierarchy process, Applied mathematical letters, 11(4), pp 121-125.
- Tarboton, David. (2003). Terrain Analysis Using Digital Elevation Models in Hydrology.
- Tesfa Gebrie Andualem, Girum Getachew Demeke, Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia, Journal of Hydrology: Regional Studies, Volume 24, 2019, 100610, ISSN 2214-5818, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100610>.
- Thomas, R., & Duraisamy, V. (2018). Hydrogeological delineation of groundwater vulnerability to droughts in semi-arid areas of western Ahmednagar district. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 21(2), 121-137.
- Tien Bui, D., Shirzadi, A., Chapi, K., Shahabi, H., Pradhan, B., Pham, B. T., & Lee, S. (2019). A hybrid computational intelligence approach to groundwater spring potential mapping. Water, 11(10), 2013.

- Valdovinos, C., Parra, O., (2006). La Cuenca del Río Biobío Historia Natural de un Ecosistema de uso Múltiple. Publicaciones Cent. EULA | 1–25.
- Vargas-Crispin, Wilber Samuel, Edwin Montes-Raymundo, Manuel Castrejón-Valdez, and René Antonio Hinojosa-Benavides. 2021. Machine Learning Como Herramienta Para Determinar La Variación de Los Recursos Hídricos. Scientific Research Journal CIDI 1(1):56–69.
- Yeh, HF, Lee CH, Hsu KC, Chang PH (2009) GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. Environ Geol 58:185–195
- Zavoianc I (1985) Morphometry of drainage basins (Developments in water science), Elsevier Science, New York, USA.