



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



SIMULACIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS COSTERAS DEL CENTRO-SUR DE CHILE

POR

Pablo Alonso Villegas Salgado

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesora Guía
Alejandra Stehr Gesche

Profesional Supervisor
Maricarmen Guerra París

Diciembre 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Pablo Alonso Villegas Salgado

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

DEDICATORIA

*A la memoria de Juan Carlos Castro Rehbein (1971 – 2023),
ingeniero civil de la Universidad de Concepción, quien me
recibió con los brazos abiertos y su corazón generoso
en un momento clave de mi formación. Q.E.P.D.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por el financiamiento otorgado para los trabajos en terreno mediante el Proyecto Anillo ACT210060 FIRING.

A mi profesora guía, Alejandra Stehr Gesche, por su orientación, paciencia y apoyo en cada etapa de esta memoria. De igual manera, agradezco a mi profesora supervisora, Maricarmen Guerra Paris, por su gentileza, disposición y valiosos aportes. También extendo mi gratitud al Departamento de Ingeniería Civil, por facilitar sus dependencias y el Laboratorio de Hidráulica, proporcionando un espacio óptimo y propicio para el desarrollo de este trabajo.

Al equipo de campañas de monitoreo; Don René Iribarren Catalán, quien me enseñó e introdujo al trabajo de terreno; a Nicole Vyhmeister Vargas y Gabriel Espinoza Agurto, cuyo apoyo y colaboración hicieron de cada salida una experiencia enriquecedora; y, especialmente, a Vicente Saenger Derache, cuyo consejo, confianza y amistad han sido un apoyo realmente importante no solo durante este proyecto, sino a lo largo de toda la carrera.

Finalmente, agradezco profundamente a mi madre, a mi padre y a mis hermanos, quienes, con su amor incondicional, han sido el pilar fundamental y motor emocional de mi vida, viéndome crecer y acompañándome en cada paso. A mi compañera Ana María y a la familia Escalona Moraga, cuyo respaldo, cariño e infinita generosidad fueron esenciales para alcanzar este logro. Sin todos ellos, no habría sido posible llegar hasta aquí.

A todos ellos, y a quienes formaron parte de este recorrido —compañeros, profesores y, especialmente, mis amigos—, sean estas líneas reflejo de mi más sincera gratitud.

RESUMEN

El agua como recurso indispensable de la vida y la sociedad, no solo determina la subsistencia de la población sino también el funcionamiento de su economía y productividad. Por ello es vital conocer el estado de este recurso. Esto parte por contar con información fluviométrica, es decir, datos sobre el nivel histórico y actual de los ríos. Estos datos juegan un papel crucial en la gestión de recursos hídricos, obras de infraestructura, predicción de desastres y toma de decisiones. Sin embargo, en Chile, al igual que en muchas partes del mundo, la mayor parte de las cuencas no cuentan con dicha información. El objetivo de este trabajo es simular caudales medios diarios en cuencas del centro sur del país, específicamente en dos cuencas en monitoreo situadas en la zona costera de la región del Biobío, que carecen de información fluviométrica histórica.

Se recopiló información hidrometeorológica y fisiográfica de cuencas cercanas a las cuencas en estudio con registros disponibles, y se monitorearon las cuencas sin registros históricos durante el período reciente. Con esta información, se desarrollaron modelos empíricos, utilizando métodos de escala y regresiones, aplicando un enfoque de regionalización basado en la información fluviométrica de una cuenca donante. Los modelos se calibraron y luego validaron en distintos escenarios, con datos de la cuenca con registro y con datos de la cuenca monitoreada, realizando pruebas de bondad de ajuste. El método de transposición de caudales produce buenos resultados, pero en general, los modelos de regresión mostraron un mejor ajuste. El modelo de regresión lineal logarítmica múltiple presentó un desempeño deficiente, mientras que el modelo de mejor desempeño fue el de regresión lineal múltiple (salvo pequeñas discrepancias en los caudales *altos* y de recesión). Este último se utilizó para reconstruir la serie histórica de caudales medios diarios de una de las cuencas desde enero de 1983 hasta diciembre de 2020.

ABSTRACT

Water, as an essential resource for life and society, not only ensures the survival of the population but also but also sustains its economy and productivity. Therefore, it is vital to understand the status of this resource. This begins with runoff data, i.e., information on the historical and current discharge of rivers. Such data is crucial for water resource management, infrastructure planning, disaster prediction, and decision-making processes. However, in Chile, as in many parts of the world, most river basins lack such information. The aim of this study is to simulate daily average streamflow in river basins located in the central-southern region of the country, specifically in two ungauged basins located in the coastal area of the Biobío Region, which lack historical streamflow data.

Hydrometeorological and physiographic data from basins near the study basins with available information were gathered, while streamflow was monitored in the ungauged basins over the recent period. Using this information, empirical models were developed through scaling methods and regression techniques, applying a regionalization approach based on flow data from a donor basin. The models were calibrated and subsequently validated under different scenarios, using data from the basin with historical streamflow records and from the monitored basin, conducting goodness-of-fit tests. The streamflow transposition method yielded good results, but in general, regression models provided a better fit. The multiple logarithmic linear regression model performed poorly, while the best-performing model was the multiple linear regression model (with minor discrepancies in peak flows and recession flows). The latter was used to reconstruct the historical time series of daily average streamflow for one of the basins from 1983 to 2020.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Pregunta de Investigación.....	2
1.4. Metodología general.....	2
1.5. Principales resultados y conclusiones	3
1.6. Organización del documento	3
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Introducción.....	3
2.2. Predicción de caudales en cuencas sin registro	4
2.3. Modelos hidrológicos.....	5
2.4. Regionalización	6
2.5. Ejemplos de métodos	8
2.5.1. Transposición	8
2.5.2. Regresión	8
2.5.3. Machine Learning	9
2.5.3.1. KNN.....	9
2.5.3.2. Random Forest	10
2.6. Caso local	10
2.7. Desafíos	11
2.8. Conclusión	12
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1. Introducción.....	12
3.2. Puntos de aforo	13
3.2.1. Río Carampangue en Bajo Cifuentes	14
3.2.2. Río Lía en punto de monitoreo	14
3.3. Fuentes de información	14
3.3.1. Información hidrometeorológica.....	14
3.3.1.1. Series de caudales en cuencas sin registros	14

3.3.1.2.	Series de caudales en cuencas con registros	17
3.3.1.3.	Series de precipitación y temperatura.....	20
3.3.2.	Información fisiográfica	21
3.3.2.1.	Morfometría y relieve.....	21
3.3.2.2.	Uso de suelo	24
3.3.3.	Derechos de aprovechamiento de agua	25
3.4.	Métodos de regionalización.....	27
3.5.	Calibración.....	28
3.6.	Validación.....	30
3.6.1.	Coeficiente de determinación (R^2)	32
3.6.2.	Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE).....	33
3.6.3.	Percent Bias (PBIAS).....	34
3.7.	Aplicación del modelo	34
3.8.	Conclusión	34
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....		34
4.1.	Introducción.....	35
4.2.	Características hidrometeorológicas	35
4.2.1.	Climatología de cuencas con registros	35
4.2.2.	Series de caudales en cuenca monitoreada	39
4.3.	Características fisiográficas.....	40
4.3.1.	Morfometría y relieve.....	40
4.3.2.	Uso de suelo	41
4.4.	Derechos de aprovechamiento de agua	43
4.5.	Calibración.....	44
4.6.	Validación.....	45
4.7.	Aplicación: serie de caudales.....	48
4.8.	Conclusión	50
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....		51
REFERENCIAS		54
ANEXOS		56
ANEXO 1.1	Contribución a los ODS.....	56
ANEXO 4.1	Usos de suelo por cuenca.....	57

ANEXO 4.2	Caudal observado versus simulado calibración	60
ANEXO 4.3	Caudal observado versus simulado primera validación.....	65
ANEXO 4.4	Caudal observado versus simulado segunda validación.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Localización puntos de aforo.....	14
Tabla 3.2	Datos de registros en sensores de presión	15
Tabla 3.3	Estaciones fluviométricas seleccionadas.....	18
Tabla 3.4	Parámetros de área y forma	23
Tabla 3.5	Parámetros lineales y de relieve	23
Tabla 3.6	Métodos de regionalización utilizados.....	28
Tabla 3.7	Pares de cuencas calibración	29
Tabla 3.8	Pares de cuencas primera validación	30
Tabla 3.9	Pares de cuencas segunda validación.....	31
Tabla 4.1	Precipitación media anual en todas las cuencas estudiadas	37
Tabla 4.2	Temperaturas extremas anuales promedio en cuencas con registros.....	39
Tabla 4.3	Parámetros de área y forma cuencas estudiadas	40
Tabla 4.4	Parámetros lineales y de relieve cuencas estudiadas	41
Tabla 4.5	Porcentajes de uso de suelos en cuencas estudiadas (%)	42
Tabla 4.6	Modelos calibrados	44
Tabla 4.7	Resultado pruebas de bondad de ajuste calibración.....	45
Tabla 4.8	Resultado pruebas de bondad de ajuste primera validación.....	46
Tabla 4.9	Resultado pruebas de bondad de ajuste segunda validación	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Número de publicaciones de PUB en revistas especializadas, según región del estudio ...	4
Figura 2.2	Clasificación y tipología interrelacionada.....	5
Figura 2.3	Técnicas usadas para modelación hidrológica en cuencas no aforadas.....	6
Figura 2.4	Dos principales clases y subdivisiones de métodos de regionalización	7
Figura 3.1	Localización cuencas monitoreadas	13
Figura 3.2	Caudales aforados en puntos de aforo	15

Figura 3.3 Aforo de caudal usando correntómetro (a) y ADCP (b). Instalación de sensor de presión atmosférica (c).....	16
Figura 3.4 Datos de sensores de presión HOB0® para ambas cuencas durante los aforos.....	16
Figura 3.5 Curva de descarga Río Carampangue en Bajo Cifuentes	17
Figura 3.6 Localización estaciones fluviométricas seleccionadas DGA	19
Figura 3.7 Disponibilidad de datos de caudal medio diario en estaciones seleccionadas.	19
Figura 3.8 Grilla CR2MET	21
Figura 3.9 Modelo de elevación digital zona de estudio.	22
Figura 3.10 Usos de suelo en la zona de estudio.....	25
Figura 3.11 Derechos de aprovechamiento de agua zona de estudio	26
Figura 3.12 Esquema de calibración, validación y aplicación métodos de regionalización.....	27
Figura 3.13 Localización geográfica cuencas objetivo – donante calibración	29
Figura 3.14 Localización geográfica cuencas objetivo – donante primera validación.....	31
Figura 3.15 Localización geográfica cuencas objetivo – donante segunda validación.....	32
Figura 4.1 Caudales medios diarios específicos promedio cuencas con registros	35
Figura 4.2 Precipitaciones diarias promedio en cuencas con registros	36
Figura 4.3 Variabilidad diaria promedio de las precipitaciones en cuencas con registros	37
Figura 4.4 Serie de temperaturas máximas diarias promedio en cuencas con registros.....	38
Figura 4.5 Serie de temperaturas mínimas diarias promedio en cuencas con registros	38
Figura 4.6 Serie de caudales medios diarios monitoreados Río Carampangue en Bajo Cifuentes...	39
Figura 4.7 Uso de suelos Río Carampangue en Bajo Cifuentes	42
Figura 4.8 Caudal observado y simulado en Río Carampangue en Bajo Cifuentes por modelo con mejor ajuste	48
Figura 4.9 Serie de caudales históricos con la cuenca donante Río Caramávida en Caramávida	49
Figura 4.10 Serie de caudales históricos con la cuenca donante Río Nicodahue en Pichún	49
Figura 4.11 Serie completa de caudales medios diarios históricos simulados para Río Carampangue en Bajo Cifuentes	50

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El agua es un recurso indispensable para la vida y la sociedad. Particularmente en Chile el estado de los recursos hídricos no solo es información valiosa para la subsistencia de la población sino también para toda su economía y productividad (Valdés-Pineda *et al.*, 2014). Aquí, la información fluviométrica (aquella asociada al nivel y caudal de los ríos) asoma como uno de los conjuntos de datos hidrológicos principales, pues juega un papel crucial en la gestión eficiente de recursos hídricos, la planificación y ejecución de proyectos de infraestructura hidráulica, la predicción de riesgos, anticipación de situaciones críticas y toma de decisiones.

La Dirección General de Aguas (DGA) cuenta con estaciones distribuidas a lo largo y ancho de todo el territorio, pero principalmente en cuencas del Valle Central y la costa. Hay una densidad mucho menor de estaciones en las zonas montañosas como en los Andes o en la cordillera de la Costa (Muñoz *et al.*, 2018), por lo que es más usual encontrar cuencas sin registros en estos lugares.

La predicción de caudales en cuencas sin registros es uno de los problemas sin resolver en hidrología. En Chile, la DGA desarrolló en 1995 el “Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” para el diseño de obras hidráulicas en cuencas del país con nula o escasa información, siendo usado hasta el día de hoy. Sin embargo, no existe un método aplicable en el país para predecir caudales medios diarios, información útil para un gran abanico de contextos.

En el marco del Proyecto Anillo ACT210060 “FiRING: Efectos multiescala de los incendios forestales extremos sobre la erosión, el agua y los ciclos biogeoquímicos en suelos forestales naturales y gestionados” se tienen bajo monitoreo dos cuencas sin registro previo de caudal en la zona montañosa de la costa centro sur de Chile. Esta memoria pretende desarrollar modelos para simular los caudales medios diarios en dichas cuencas.

El ANEXO 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Simular una serie de caudales medios diarios en dos cuencas costeras del centro sur de Chile que no cuentan con información fluviométrica histórica, basándose en la información hidrometeorológica y fisiográfica disponible de cuencas cercanas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la hidrometeorología, morfometría y uso de suelo de dos cuencas con datos recientes y otras cuencas costeras similares con información histórica disponible.
- Formular modelos empíricos para estimar caudales medios diarios en cuencas costeras.
- Generar series de caudales medios diarios en las cuencas actualmente en monitoreo a partir de los modelos.

1.3. Pregunta de Investigación

¿Es posible usar modelos empíricos para simular caudales medios diarios en cuencas costeras del centro sur de Chile?

1.4. Metodología general

Se monitorearon los caudales de dos cuencas costeras en terreno bajo el marco del proyecto Anillo FiRING. En paralelo, se recogieron atributos hidrometeorológicos, fisiográficos y de uso de suelo de un conjunto de cuencas costeras cercanas a la zona de estudio. A partir de los atributos, se calibraron cinco modelos empíricos de simulación de caudales medios diarios usando técnicas de regionalización, los que fueron validados usando tanto la información histórica de las cuencas cercanas como los datos de monitoreo de las cuencas en monitoreo. Usando las cuencas cercanas y el modelo de mejor desempeño, se simuló la serie histórica de una de las cuencas en monitoreo para un rango temporal de 38 años.

1.5. Principales resultados y conclusiones

Se caracterizaron 18 cuencas de la red fluviométrica de la DGA y dos cuencas costeras del proyecto Anillo. Todas presentaron regímenes pluviales, precipitaciones medias anuales entre 1000 y 2000 mm y densidades de drenaje bajas, así como uso predominante de tipo bosques. De los modelos formulados, el modelo regresión lineal múltiple presentó mejor desempeño, pese a que tiende a subestimar los *peak* de caudales y sobrestimar los caudales de recesión. Las variables morfométricas predictoras seleccionadas para los modelos de regresión múltiple fueron el área, perímetro y la densidad de drenaje. El desempeño de los modelos depende fuertemente de la cuenca donante escogida. Es posible simular caudales medios diarios en cuencas costeras del centro sur de Chile usando modelos empíricos. Se refuerza la necesidad de adaptar y estructurar el modelo según la zona geográfica, y se destaca la importancia del levantamiento de información para validar las simulaciones.

1.6. Organización del documento

Este documento consta de cinco capítulos. El primero presenta la motivación, objetivos y la metodología general, así como los principales resultados y conclusiones. En el segundo capítulo se revisan los antecedentes teóricos de la predicción y simulación de caudales en cuencas sin registros, mencionando categorizaciones de técnicas, ejemplos de métodos, casos de estudio globales y locales. El tercer capítulo detalla la metodología aplicada, incluyendo el levantamiento de información en terreno. En el cuarto capítulo se muestran y comentan los resultados obtenidos, y en el quinto capítulo se presentan las conclusiones del estudio y posibles líneas de investigación a futuro.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introducción

En el presente capítulo se revisó el estado del arte de los últimos años respecto a la predicción de caudales en cuencas sin registro, se define el concepto de modelo hidrológico y sus distintas categorizaciones, se define la regionalización como método de transferencia de información hidrológica, ejemplos de métodos y casos reales de sus aplicaciones, un caso local como precedente a este trabajo y los desafíos tanto en la actualidad como a futuro en torno a esta problemática.

2.2. Predicción de caudales en cuencas sin registro

Las estaciones hidrológicas y meteorológicas, cruciales para la recopilación de información fluviométrica presentan límites en su despliegue, ya sea por falta de recursos financieros, desarrollo tecnológico de los territorios, o por localización geográfica. Más aún, estas no necesariamente garantizan la medición de componentes del ciclo hidrológico como la evaporación, infiltración, y flujo subterráneo. Debido a esto, Guo *et al.* (2021) catalogan a la predicción de caudales en cuencas sin registro como “una de las problemáticas más importantes y desafiantes a las que se enfrentan los hidrólogos”, y ha recibido interés creciente en las últimas décadas. En 2003 se lanza la iniciativa “Predictions in Ungauged Basins” (PUB) por la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS) que recopiló y revisó críticamente el estado del arte respecto a esta temática durante una década completa. Sivapalan (2003) menciona la necesidad de cambiar el paradigma en el acercamiento predictivo, en este caso mejorando la construcción de modelos hidrológicos físicamente distribuidos. Esta iniciativa fomentó el interés en el mundo y desde entonces, el número de investigaciones en torno al tema ha ido en aumento, tal como se observa en la Figura 2.1.

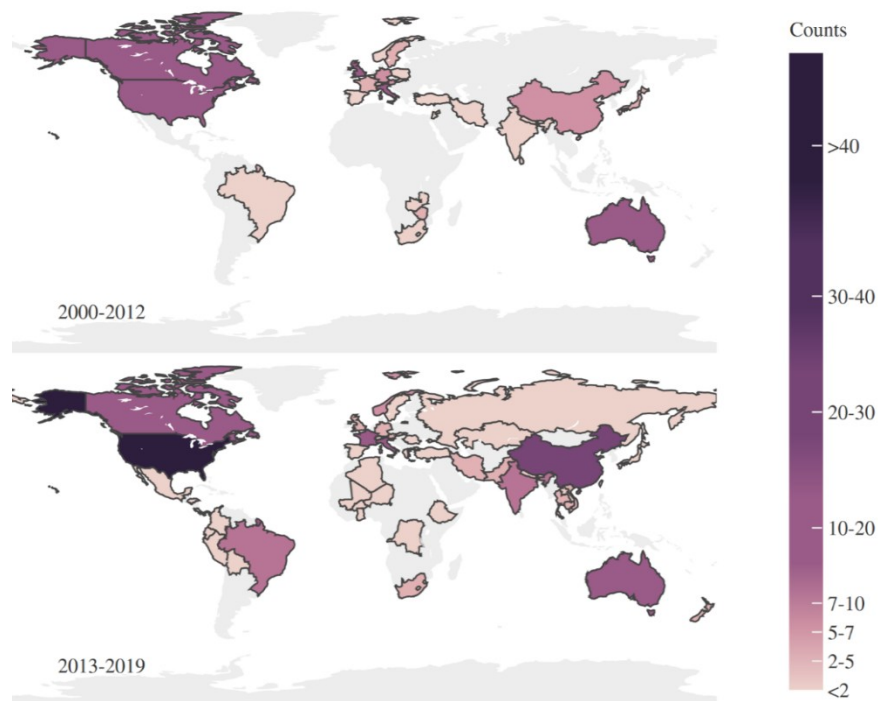


Figura 2.1 Número de publicaciones de PUB en revistas especializadas, según región del estudio (Guo *et al.*, 2021)

2.3. Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos llevan más de un siglo de desarrollo y ampliación de sus aplicaciones y postulados, por lo que han ido creando un cuerpo propio de términos, clasificaciones y conceptos. En simple, son representaciones simplificadas del ciclo del agua usando conceptos y aproximaciones reales del sistema hidrológico, aplicados a la escala espacial de una cuenca hidrográfica. Son condicionados por información climática, topográfica y de características y uso del suelo (Abbott *et al.*, 1986, Abbott y Refsgaard. 1996, Gassman *et al.*, 2014, citados en Dasgupta *et al.*, 2023).

Se pueden clasificar de diversas maneras, teniendo en cuenta distintos criterios, como lo ilustran Singh (1998) y Xu (2002) en la Figura 2.2 (originalmente para modelos de escorrentía). Típicamente las estimaciones de los procesos son realizadas de manera agregada o distribuida (Devia *et al.*, 2015) y en un rango de tiempo particular, y gobernadas por aproximaciones empíricas (e.g. hidrograma unitario), conceptuales (e.g. TOPMODEL), y físicas (e.g. SWAT) (Dasgupta *et al.*, 2023). Para el caso de cuencas sin monitoreo, se han sintetizado varias estrategias de modelación (Figura 2.3), siendo la regionalización uno de los métodos más utilizados (Zhang y Chiew, 2009; Guo *et al.*, 2021).

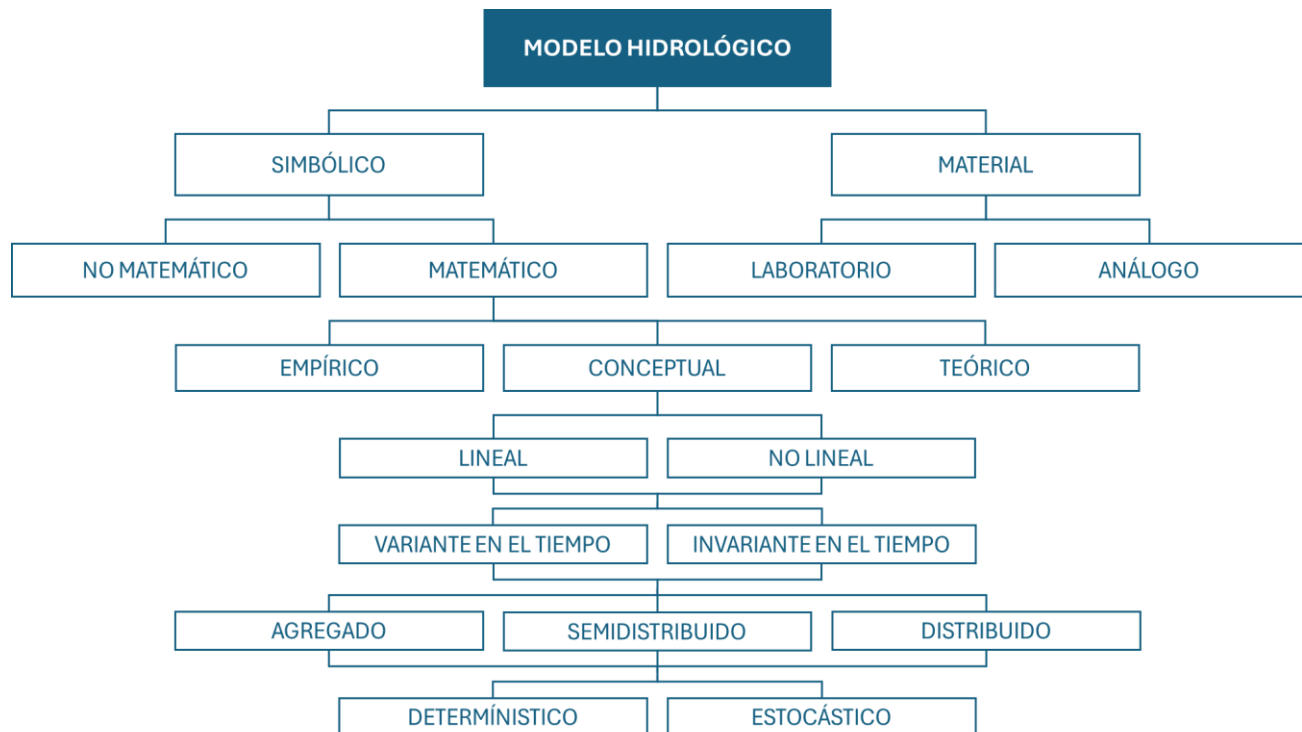


Figura 2.2 Clasificación y tipología interrelacionada (adaptado de Singh, 1988; Xu, 2002)

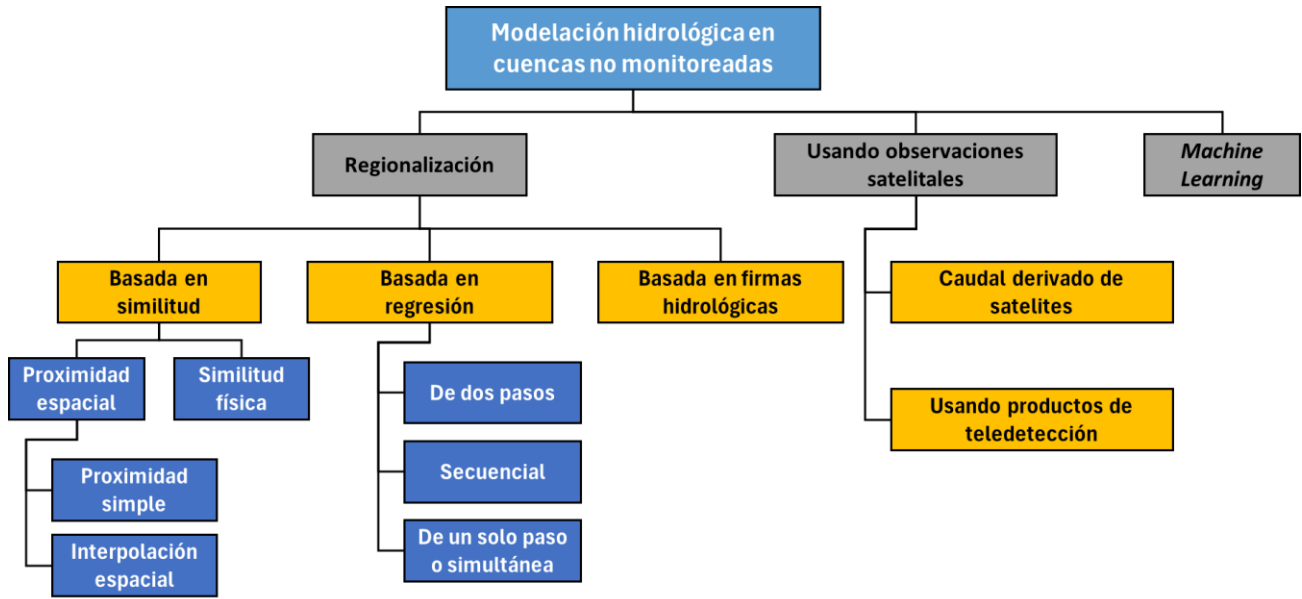


Figura 2.3 Técnicas usadas para modelación hidrológica en cuencas no aforadas (Dasgupta *et al.*, 2023)

2.4. Regionalización

Oudin *et al.*, (2010) definen este tipo de métodos como aquellos que permiten transferir información hidrológica desde lugares aforados a no aforados. En la práctica, consiste en usar información de una cuenca “donante” para generar información de una cuenca “objetivo”. Esta información es manipulada con base científica para generar relaciones hidrológicas con cuencas objetivo, y dicha manipulación debe ser validada en otra cuenca antes de ser aplicada a un escenario sin aforo (Buytaert and Beven, 2009; Karki *et al.*, 2023). La estructura del método de regionalización es definida por Wagener y Wheeler (2006) según la ecuación (2.1):

$$\hat{\theta}_L = H_R(\theta_R|\Phi) + v_R \quad (2.1)$$

Donde:

$\hat{\theta}_L$: Parámetro estimado por el modelo en la cuenca objetivo.

$H_R()$: Función que relaciona características fisiográficas y meteorológicas (Φ) de la cuenca.

θ_R : Conjunto de parámetros del modelo regional.

v_R : Término error.

El desarrollo de este método se ha ido expandiendo y ha mostrado una tendencia creciente (Guo *et al.*, 2021). Como se desprende de la ecuación (2.1), se requiere información de atributos de la cuenca y una función que relacione los predictores con el predictando. Razavi y Coulibaly (2013) definen cinco pasos principales en una estrategia de regionalización. El primero es recolectar y administrar

los atributos meteorológicos (e.g. precipitación media anual, temperatura) e información fisiográfica (e.g. puntos de aforo, centroide de la cuenca, uso de suelo, permeabilidad). El segundo es determinar las variables hidrológicas de interés. En el caso de caudales continuos, se utilizan los datos de caudales de cuencas aforadas cercanas o similares para generar parámetros de modelos hidrológicos o relaciones con atributos de la cuenca. El tercer paso es desarrollar una relación entre caudal, escurrimiento, o los parámetros del modelo hidrológico y los atributos de la cuenca seleccionando el método de regionalización. En la Figura 2.4 se ilustran los principales métodos, clasificados en hidrológicamente dependientes (basados en ecuaciones físicas de los procesos involucrados en el ciclo hidrológico), e hidrológicamente independientes (empíricos, basados en análisis de datos). El cuarto paso es evaluar el desempeño del modelo usando cuencas con registro antes de aplicarlo a las cuencas sin registro usando técnicas de validación y pruebas estadísticas. Finalmente, el quinto paso incluye análisis de incertidumbre.

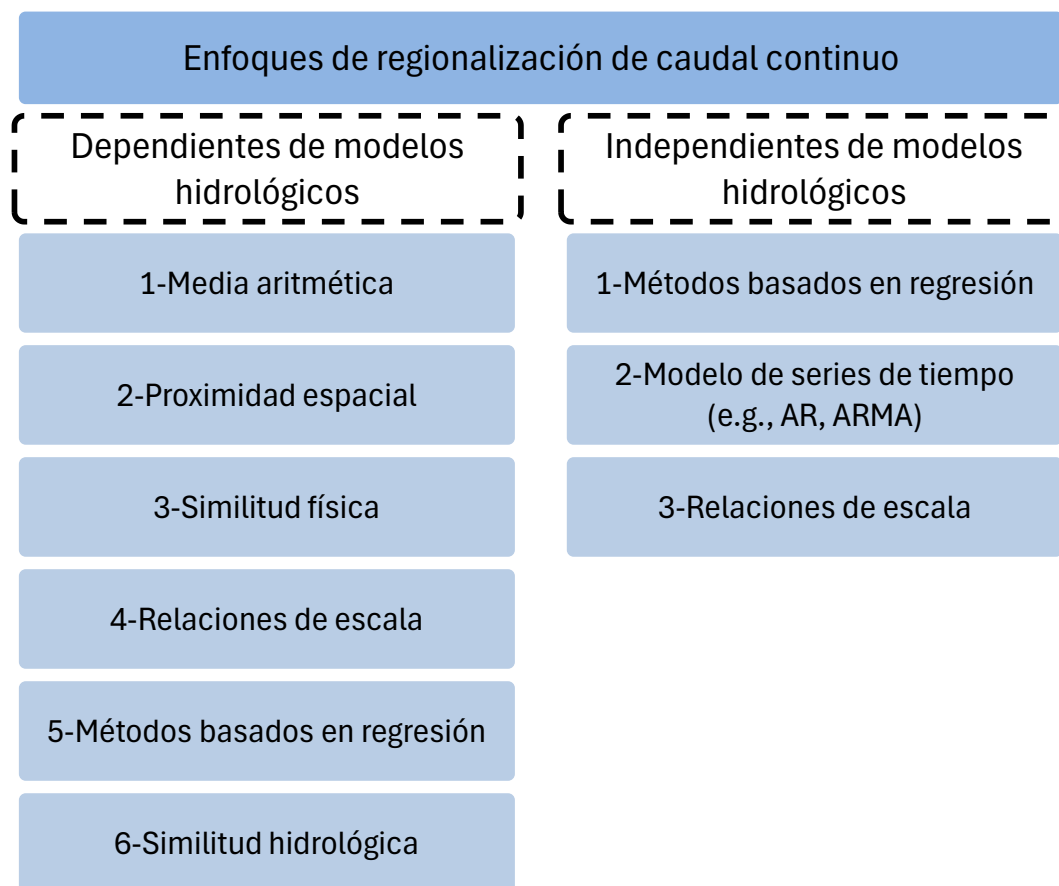


Figura 2.4 Dos principales clases y subdivisiones de métodos de regionalización (Razavi y Coulibaly, 2013)

La Figura 2.4 muestra seis métodos para los modelos hidrológicamente dependientes: media aritmética, proximidad espacial, proximidad física, relación de escala, regresión y similitud

hidrológica. Asimismo, muestra tres métodos para los modelos hidrológicamente independientes: regresión, modelo de series de tiempo y relación de escala.

2.5. Ejemplos de métodos

A continuación, se presentan algunos métodos y casos de estudio en modelación de cuencas no aforadas, revisando principalmente métodos de regionalización.

2.5.1. Transposición

El método de transposición (o *watershed area ratio*) es un método de relación de escala, hidrológicamente independiente. Es probablemente el método más común y antiguo para estimar caudales diarios en cuencas sin aforar, y es descrito según la ecuación (2.2):

$$Q_1 = Q_2 \cdot \frac{A_1}{A_2} \quad (2.2)$$

Donde:

Q_1 : Caudal de la cuenca objetivo.

Q_2 : Caudal de la cuenca donante.

A_1 : Área de la cuenca objetivo.

A_2 : Área de la cuenca donante.

Este método es aplicable a cuencas del orden de hasta 10 km² y relaciones de área de hasta 0.02. Es un método simple, requiere pocos datos, y puede ser usado para calcular otras variables hidrológicas. Johnson *et al.* (2015) demostraron que este método predice con precisión caudales diarios en cuencas anidadas en las montañas de Catskill, Nueva York.

2.5.2. Regresión

El método de regresión lineal múltiple corresponde a los basados en regresión, hidrológicamente independiente, y es muy utilizado en predicción de caudales. Es descrito por la ecuación (2.3). En caso de evaluar solo una variable, es decir, describir una regresión lineal simple, $n = 1$.

$$Q = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.3)$$

Donde:

- Q : Caudal.
 β_0 : Término constante o de intersección.
 x_i : Valor de la variable predictora i .
 β_i : Coeficiente de regresión asociado a la variable predictora i .
 n : Número de variables predictoras.
 ε : Término de error asociado al modelo.

Otro método de regresión que se utiliza en predicción de caudales es la regresión logarítmica, que consiste en transformar logarítmicamente las variables dependientes e independientes para reducir el peso de los valores extremos en las variables. Se describe según la ecuación (2.4):

$$\log(Q) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \log(x_i) + \varepsilon \quad (2.4)$$

Harvey *et al.* (2012) compararon 15 métodos para rellenar datos de caudales medios diarios en ríos del Reino Unido, usando métodos de regresión y métodos de escala entre otros, incluyendo regresiones lineales simples, múltiples y logarítmicas. Se aplicaron estos métodos basándose en transferencia de datos de cuencas donantes hidrológicamente similares para estimar caudales de 26 cuencas. Se encontró que los métodos de regresión en general fueron superiores a los métodos de escala, resaltando la importancia de la elección de la cuenca donante en el desempeño de la técnica.

2.5.3. Machine Learning

Como se menciona en la Figura 2.3, otra estrategia de modelación en cuencas sin registros es la de *machine learning* (aprendizaje automático), principalmente para agrupar en *clusters* (grupos).

2.5.3.1. KNN

El algoritmo K-vecinos más cercanos o KNN es un método de similitud física, no paramétrico e hidrológicamente dependiente. Es un método de clasificación supervisado no paramétrico que clasifica un punto de datos desconocido haciendo referencia a los “K” vecinos más cercanos de categorías en función de la distancia. Consiste básicamente en agrupar un cierto número de cuencas con comportamiento hidrológico similar, y usar una medida de distancia como función de diferencia entre dichas cuencas (e.g. distancia Euclidiana), y un valor K para elegir las cuencas con menor

distancia (mayor similitud física), el cual debe ser cuidadosamente elegido, calibrado y validado (Wu *et al.*, 2024).

2.5.3.2. Random Forest

También conocido como *random decision forests* (o bosques de decisión aleatorios), es un método de aprendizaje automático por conjuntos desarrollado por Breiman (2001) para realizar clasificaciones, regresiones y otras operaciones, construyendo multitudes de “árboles de decisión”. Utiliza el metaalgoritmo de embolsado (o agregación de *bootstrap*) para elaborar una posible matriz de árboles de solución con varianza uniforme y así predecir con precisión una variable dependiente. Este método ha sido usado en hidrología, por ejemplo, en materia de cuencas no aforadas (Booker y Woods, 2014) por demostrar flexibilidad, generalización y estabilidad (Were *et al.*, 2015).

Golian *et al.* (2021) Regionalizaron dos modelos hidrológicos para simular caudales y comparar desempeño en condiciones de caudal alto, medio y bajo en 44 cuencas de Irlanda. Para esto, compararon diferentes métodos de regionalización (regresión lineal múltiple, regresión no lineal), Random Forest, KNN y aproximaciones estadísticas. En este contexto, abordaron el método de K-vecinos más cercanos como un “método de regionalización por similitud física” tomando la mínima distancia euclidiana como la mayor similitud hidrológica (características fisiográficas y climáticas) entre las cuencas para simular caudales. Asimismo, aplicaron Random Forest para regionalizar modelos hidrológicos conceptuales optimizando sus parámetros. Todos los enfoques por regionalización se desempeñaron bien para caudales medios. Los modelos regionalizados por Random Forest se desempeñaron mejor en caudales altos en ciertos casos, y en caudales bajos en otros casos. Los enfoques KNN y estadísticos proporcionaron rendimientos medios comparables en todas las cuencas, sin embargo, las dispersiones y errores relativos fueron menores en los modelos regionalizados.

2.6. Caso local

Saenger (2023) desarrolló modelos empíricos usando un enfoque de regionalización con métodos de escala (transposición de caudales) y métodos de regresión (regresión lineal, regresión lineal múltiple) en cuencas andinas del centro-sur de Chile. Sus resultados demostraron que es posible simular

caudales medios diarios en dicha zona del país de manera correcta, salvo ciertas subestimaciones en ciertos casos para los caudales *peak*. Con el modelo de mejor ajuste generó caudales medios diarios en cuencas sin registro histórico para el período 2011 – 2012.

2.7. Desafíos

Los antecedentes revisados constituyen solo una muestra de un extenso campo investigación que se sigue desarrollando. A pesar de los avances, pocos estudios han concluido sobre la adaptabilidad estructural de diferentes modelos hidrológicos en distintas regiones (Guo *et al.*, 2021). Especialmente en el período post-PUB, se ha comenzado a utilizar técnicas de *multi-model averaging* (promediado multimodelo) para mejorar la simulación hidrológica en cuencas no aforadas. No obstante, si bien algunos estudios han demostrado que este enfoque puede otorgar mayor robustez y eficiencia que en modelos individuales (Razavi y Coulibaly, 2016) otros han obtenido resultados contradictorios (Arsenault y Brissette, 2016).

Por otra parte, el ciclo hidrológico es afectado por condiciones climáticas y subyacentes. Más aún, la actividad humana como la explotación forestal, la reforestación y las medidas de conservación del agua subterránea generan un impacto en las condiciones de la superficie de las cuencas. Esto ha sumado un nuevo desafío en la simulación y predicción de caudales, tanto en los métodos de regionalización como fuera de ellos. Se ha comenzado a debatir y estudiar la aplicabilidad de diversas técnicas de modelación a entornos cambiantes, y cómo mejorar las simulaciones en cuencas no aforadas que están siendo afectadas por actividad humana o incendios forestales, y cuya clasificación hidrológica puede variar con el tiempo (Guo *et al.*, 2021).

Finalmente, aunque muchos productos de reanálisis a escala global proporcionan una nueva forma de superar la falta de registros de caudales en cuencas no aforadas, la estimación de caudales mediante modelos hidrológicos sigue siendo un gran reto debido principalmente a los inevitables sesgos (Liu *et al.*, 2023). En un escenario de crisis hídrica y cambio climático, es esencial que los futuros modelos tengan un rendimiento confiable también para los caudales esperados. Esta tarea se vuelve aún más compleja debido a la considerable disminución del número de estaciones de aforo activo en los últimos

años producto de la reducción de fondos públicos destinados a las redes de monitoreo, lo que ha limitado cada vez más la disponibilidad de datos (Du *et al*, 2020).

En este contexto, los métodos de *machine learning* y redes neuronales han emergido como una vía prometedora para manejar enormes cantidades de datos de gran dimensión (Perera *et al*, 2024), sujetos al panorama mencionado, sentando las bases de los posibles procedimientos estándar para el futuro. Se ha destacado el uso de redes LSTM (*Long Short-Term Memory*), que han mostrado mejoras frente a algunos modelos tradicionales. Sin embargo, su desempeño varía según las condiciones climáticas, siendo inferior en cuencas áridas debido a su naturaleza basada en datos sin considerar procesos físicos asociados. Aunque algunos estudios han intentado integrar principios físicos en estos modelos, aún falta mucha investigación para evaluar su superioridad y, por el momento, su aplicación global está restringida a unos pocos países desarrollados (Dasgupta *et al.*, 2023).

2.8. Conclusión

La predicción de caudales en cuencas sin registro es un campo de investigación de interés creciente, ampliamente estudiado mediante modelaciones hidrológicas haciendo uso de datos principalmente fisiográficos y meteorológicos de las cuencas en estudio. Los modelos pueden ser categorizados según muchos criterios. Uno de los muchos enfoques para la estimación es el método de regionalización, que comprende a su vez diversas técnicas para el caso de caudales continuos, tanto hidrológicamente dependientes como hidrológicamente independientes. Estos últimos son empíricos, basados en análisis de datos, más simples y requieren menos datos, pero al no representar ecuaciones físicas de los procesos, su uso está circunscrito a una zona específica. Siguiendo el ejemplo de Saenger (2023), este estudio probará las técnicas empleadas para cuencas de la zona costera del centro sur de Chile.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Introducción

En este capítulo se caracteriza la zona de estudio y las cuencas estudiadas. Luego, se detallan las fuentes de información, y finalmente los métodos usados para elaborar los modelos de estimación de caudales. Cabe mencionar que, desde este capítulo en adelante, los nombres de las estaciones fluviométricas o puntos de monitoreo hacen alusión tanto a ellas mismas como a sus cuencas asociadas, dado a que pertenecen a la misma unidad hidrológica de estudio. Los procesos

computacionales de manejo y análisis de datos, las representaciones gráficas y la elaboración de mapas se realizaron tanto en R versión 4.4.1 *Patched* (2024-08-12 r87000 *ucrt*) usando RStudio versión 2024.09.0 *Build 375*, como en QGIS versión 3.34.10 *Prizren*.

3.2. Puntos de aforo

Desde 2023 hasta octubre del 2024, en el marco del proyecto Anillo ACT210060 FiRING, hubo un total de seis cuencas bajo monitoreo en las regiones del Biobío y Araucanía, de las cuales dos se encuentran en la zona costera de la región del Biobío, en la cuenca del Río Carampangue: Río Carampangue en Bajo Cifuentes, y Río Lía en punto de monitoreo.

Ambos puntos se encuentran en la cordillera de la costa dentro de la provincia de Arauco. La Tabla 3.1 muestra la altitud de cada punto de aforo y su localización geográfica, las cuales se ven representadas también en la Figura 3.1.

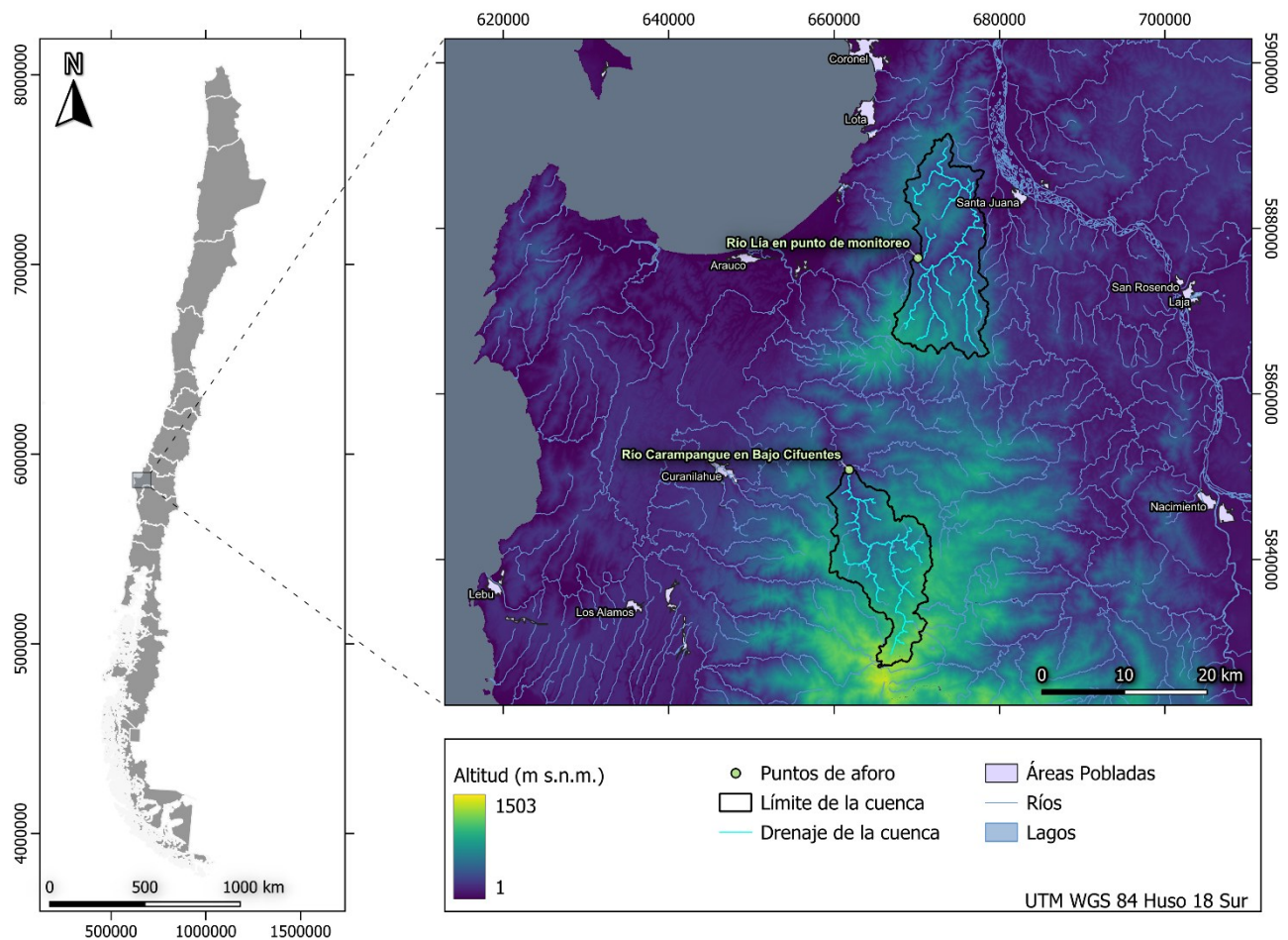


Figura 3.1 Localización cuencas monitoreadas

Tabla 3.1 Localización puntos de aforo

Punto de aforo	Abreviación propia	Altitud (m s.n.m.)	Latitud S	Longitud O
Río Lía en punto de monitoreo	RLIA	88	37° 14' 35.30"	73° 04' 53.84"
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	BCIF	128	37° 28' 30.19"	73° 10' 10.97"

3.2.1. Río Carampangue en Bajo Cifuentes

Se ubica en la subcuenca “Río Carampangue hasta bajo junta Estero Animas”, en el sector de Bajo Cifuentes (o Cifuentes Bajo), aguas arriba de la confluencia con el Estero Animas, 13 km al este de Curanilahue.

3.2.2. Río Lía en punto de monitoreo

Se ubica en la subcuenca del Río Lía, aguas arriba de la confluencia con el Estero el Molino, 13 km al este de Carampangue.

3.3. Fuentes de información

Para obtener la información necesaria para el estudio, se recurrió a fuentes de acceso público de corporaciones (i.e., CONAF), organismos públicos (i.e., DGA, IDE Chile) y centros de investigación científica (i.e., CR2), así como a los datos recolectados bajo el marco del proyecto Anillo ACT210060 FiRING y del proyecto Anillo ATE220021.

3.3.1. Información hidrometeorológica

3.3.1.1. Series de caudales en cuencas sin registros

Río Carampangue en Bajo Cifuentes

La cuenca que drena hacia este punto de aforo tiene una superficie de 164.2 km², una elevación de entre 127 y 1323 m s.n.m. Se extiende entre los paralelos 37°28' y 37°41' latitud sur, y entre los meridianos 73°03' y 73°12' longitud oeste. Su cauce principal tiene una longitud de 35.1 km. Su precipitación media anual es de 2332 mm y sus temperaturas extremas anuales oscilan en promedio entre -2°C y 30°C.

Río Lía en punto de monitoreo

La cuenca que drena hacia este punto de aforo tiene una superficie de 203.4 km², una elevación de entre 84 y 930 m s.n.m. Se extiende entre los paralelos 37°06' y 37°21' latitud sur, y entre los meridianos 72°59' y 73°07' longitud oeste. Su cauce principal tiene una longitud de 31.5 km. Su precipitación media anual es de 1845 mm y sus temperaturas extremas anuales oscilan en promedio entre -2°C y 32°C.

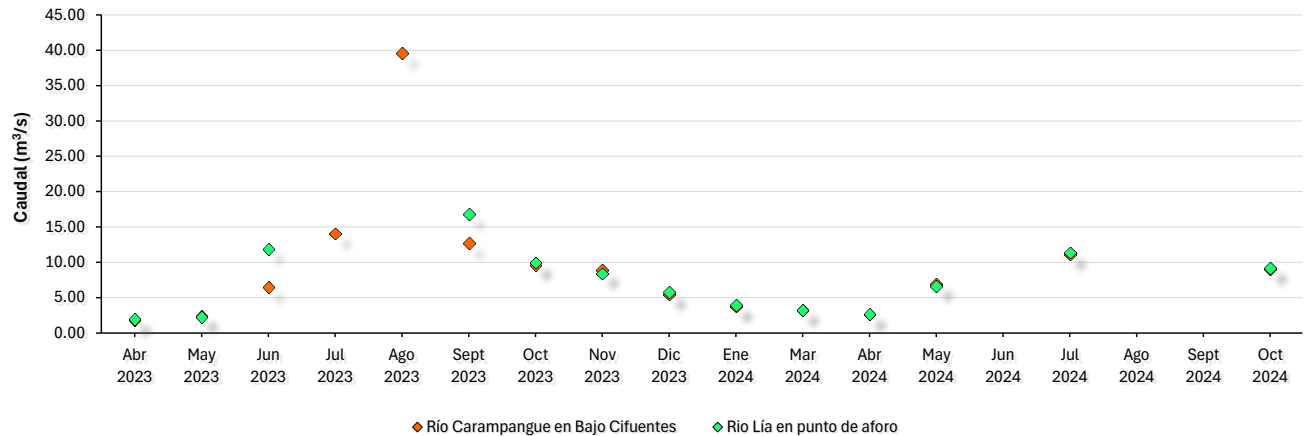


Figura 3.2 Caudales aforados en puntos de aforo

Desde abril de 2023 hasta octubre de 2024 se monitorearon las cuencas Río Lía en punto de monitoreo y Río Carampangue en Bajo Cifuentes. A lo largo de dicho período, se efectuaron 13 y 15 aforos de caudales respectivamente, cuyas mediciones se muestran en la Figura 3.2. Adicionalmente, en dichos puntos de aforo, se instalaron sensores de presión HOB0[®] tanto dentro como fuera del agua con el objetivo de registrar la presión y temperatura del agua, así como la presión atmosférica cada 15 minutos. Con ello se pudo obtener la altura del agua de manera continua. La Tabla 3.2 muestra el inicio y el fin del registro, así como la cantidad de datos disponibles en los sensores para cada punto de monitoreo. La Figura 3.5 muestra los datos recogidos de los sensores de presión para el momento de los aforos.

Tabla 3.2 Datos de registros en sensores de presión

Punto de aforo	Inicio del registro	Fin del registro	Datos disponibles
Río Lía en punto de monitoreo	11-04-2023	06-05-2024	120 días
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	11-04-2023	23-10-2024	561 días

La Figura 3.3 ilustra los procedimientos de medición en terreno. En circunstancias de terreno propicias (baja altura del caudal, baja velocidad de la corriente), se midió el caudal del río usando un correntómetro de tipo molinete hidráulico. En caso contrario, para períodos de alta corriente se usó un perfilador de corriente Doppler acústico (*ADCP* por sus siglas en inglés).



Figura 3.3 Aforo de caudal usando correntómetro (a) y ADCP (b). Instalación de sensor de presión atmosférica (c)

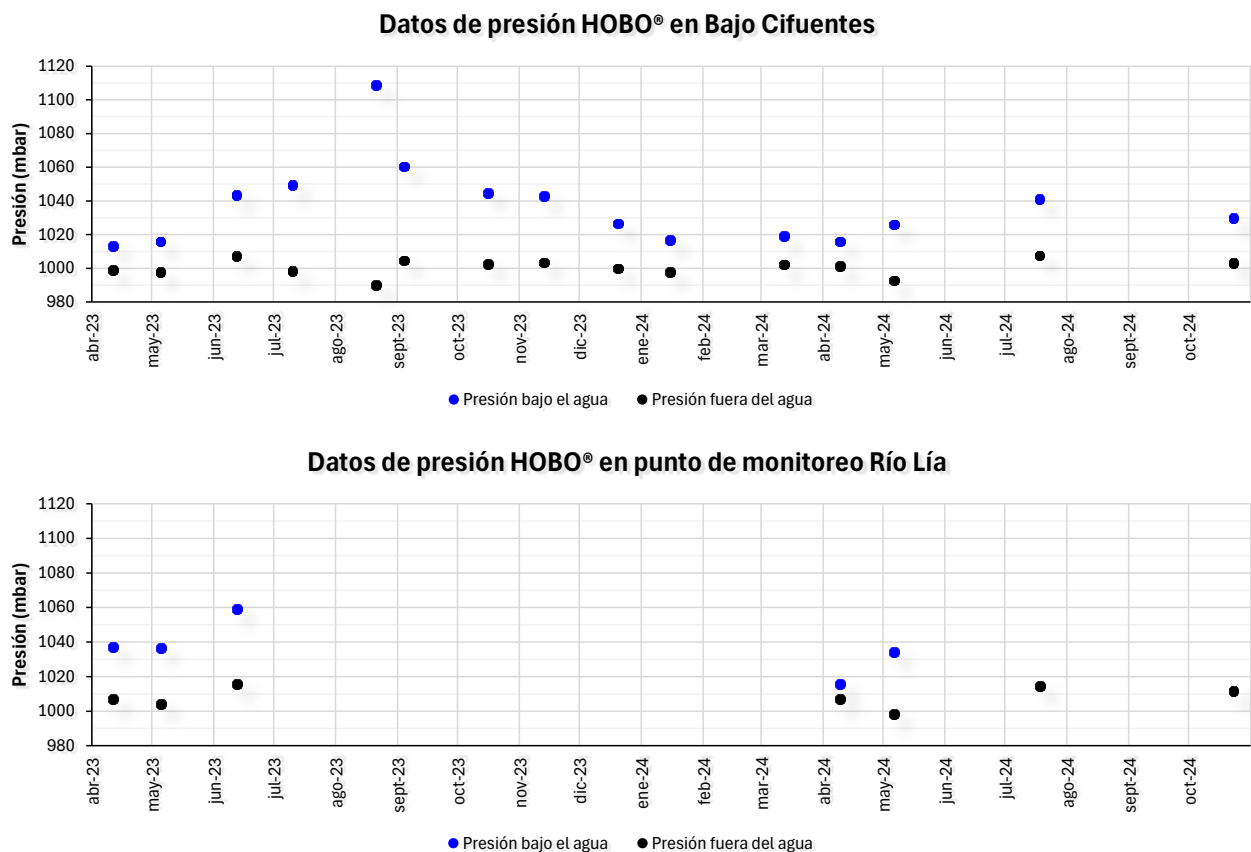


Figura 3.4 Datos de sensores de presión HOBO® para ambas cuencas durante los aforos

En el punto de monitoreo del Río Lía se suscitó una serie de dificultades en el registro de datos, principalmente la pérdida de sensores. Al ser una zona de explotación forestal, en ocasiones el camino se vio bloqueado por caídas de árboles de gran envergadura, o en otras, las lluvias no permitieron

acceder al lugar de aforo. Como se muestra tanto en la Tabla 3.2 como en la Figura 3.4, los registros de datos de sensores HOBO® recuperados en esta cuenca fueron muy escasos y no permitieron avanzar con la reconstrucción de datos para esta cuenca, razón por la cual se decidió acotar el estudio exclusivamente a la cuenca de Río Carampangue en Bajo Cifuentes.

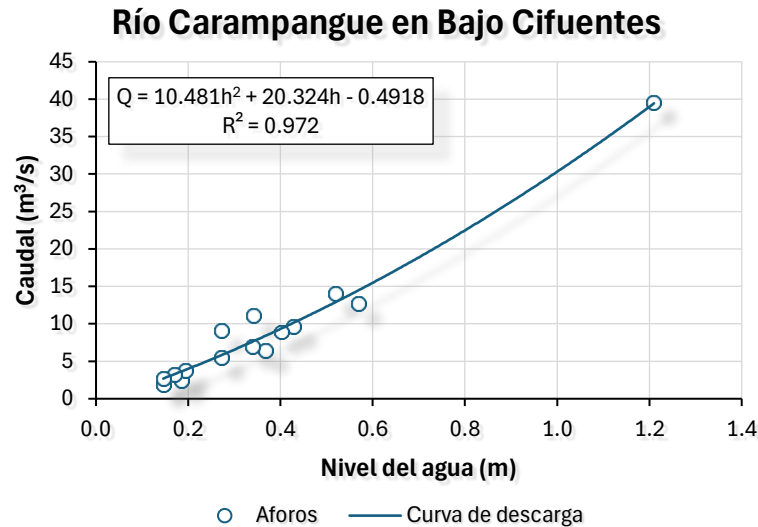


Figura 3.5 Curva de descarga Río Carampangue en Bajo Cifuentes

Usando los caudales aforados y la altura de agua calculada, se construyó entonces la curva de descarga del Río Carampangue en Bajo Cifuentes (Figura 3.5). Esta describe una forma polinómica de grado 2 con ajuste R^2 superior a 0.97, por lo que a partir de ella se obtuvo la serie de caudales medios diarios para dicha cuenca.

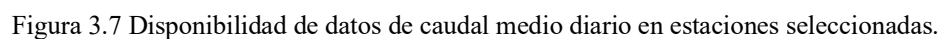
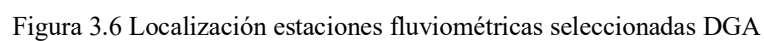
3.3.1.2. Series de caudales en cuencas con registros

La Dirección General de Aguas (DGA) cuenta con una red de estaciones fluviométricas en todo el país, de las cuales reporta periódicamente los caudales medios diarios. Se seleccionaron aquellas estaciones cercanas geográficamente a las cuencas monitoreadas, que estuvieran vigentes y cuyas cuencas asociadas nacieran en la Cordillera de la Costa. Esto con el objetivo de considerar cuencas con un comportamiento hidrológico similar. La Tabla 3.3 muestra las características de cada estación. La localización de las estaciones escogidas y sus cuencas asociadas se ilustra en la Figura 3.6.

Tabla 3.3 Estaciones fluviométricas seleccionadas

Nombre estación	Abreviación propia	Altitud (m s.n.m.)	Latitud S	Longitud O
Río Pingueral en Dichato	PED	17	36° 31' 34"	72° 55' 13"
Estero Bellavista en Tomé	BET	13	36° 38' 22"	72° 56' 57"
Río Andalién camino a Penco	ACP	13	36° 48' 06"	73° 01' 40"
Río Andalién antes de ex peaje Chaimávida	AXP	30	36° 48' 07"	72° 58' 01"
Estero Nonguén frente a U. del Biobío	NUBB	20	36° 49' 12"	73° 00' 58"
Estero Hualqui en desembocadura	EHD	30	36° 58' 57"	72° 56' 28"
Río Carampangue aguas abajo bocatoma Planta Arauco	CAPA	12	37° 15' 19"	73° 15' 22"
Río Carampangue en Ramadilla (CA)	CRCA	17	37° 18' 38"	73° 15' 39"
Río Nicodahue en Pichún	NEP	62	37° 27' 54"	72° 44' 59"
Río Curanilahue en Curanilahue	CUC	137	37° 28' 50"	73° 20' 13"
Estero Plegarias antes de junta Río Curanilahue	PAJC	139	37° 29' 16"	73° 20' 38"
Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)	LELC	20	37° 36' 07"	73° 29' 16"
Río Caramávida en Caramávida	CRMV	72	37° 41' 30"	73° 21' 37"
Río Leiva en puente camino a Contulmo	LPCC	32	37° 48' 46"	73° 23' 32"
Río Reputo en Reputo	RPT	61	37° 50' 38"	73° 20' 07"
Río Butamalal en Butamalal	BML	53	37° 49' 10"	73° 14' 51"
Río Cayucupil en Cayucupil	CYC	51	37° 48' 49"	73° 15' 05"
Río Elicura en puente Elicura	EPE	69	37° 56' 14"	73° 13' 09"

Se recogieron los reportes de caudales medios diarios de la DGA para las 18 estaciones fluviométricas seleccionadas de la zona costera de la región del Biobío desde el año 1970 hasta el año 2022. La Figura 3.7 muestra el porcentaje de datos disponibles por año para cada estación.



3.3.1.3. Series de precipitación y temperatura

El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2 desarrolla desde 2013 el conjunto de datos CR2MET, que incluye productos distribuidos espacialmente con valores diarios de precipitación y temperatura para Chile continental, en una cuadrícula regular de 0.05 grados decimales de latitud–longitud. Su producto más reciente, versión 2.5, lanzado en 2023 abarca el período de 1960 a 2021 y contiene archivos en formato NetCDF con las variables:

- Precipitación diaria.
- Desviación estándar de la precipitación diaria.
- Temperatura mínima diaria.
- Temperatura máxima diaria.

Para el uso de estos datos, se redujo espacialmente la grilla a la zona de estudio que comprende las cuencas estudiadas, para usar cada celda de información en intersección con ellas, calculando así un ponderado de los valores por celda según el porcentaje de área que cubren para cada cuenca asociada a un punto de monitoreo o estación fluviométrica. La Figura 3.8 muestra la grilla del CR2MET sobre el área de estudio.

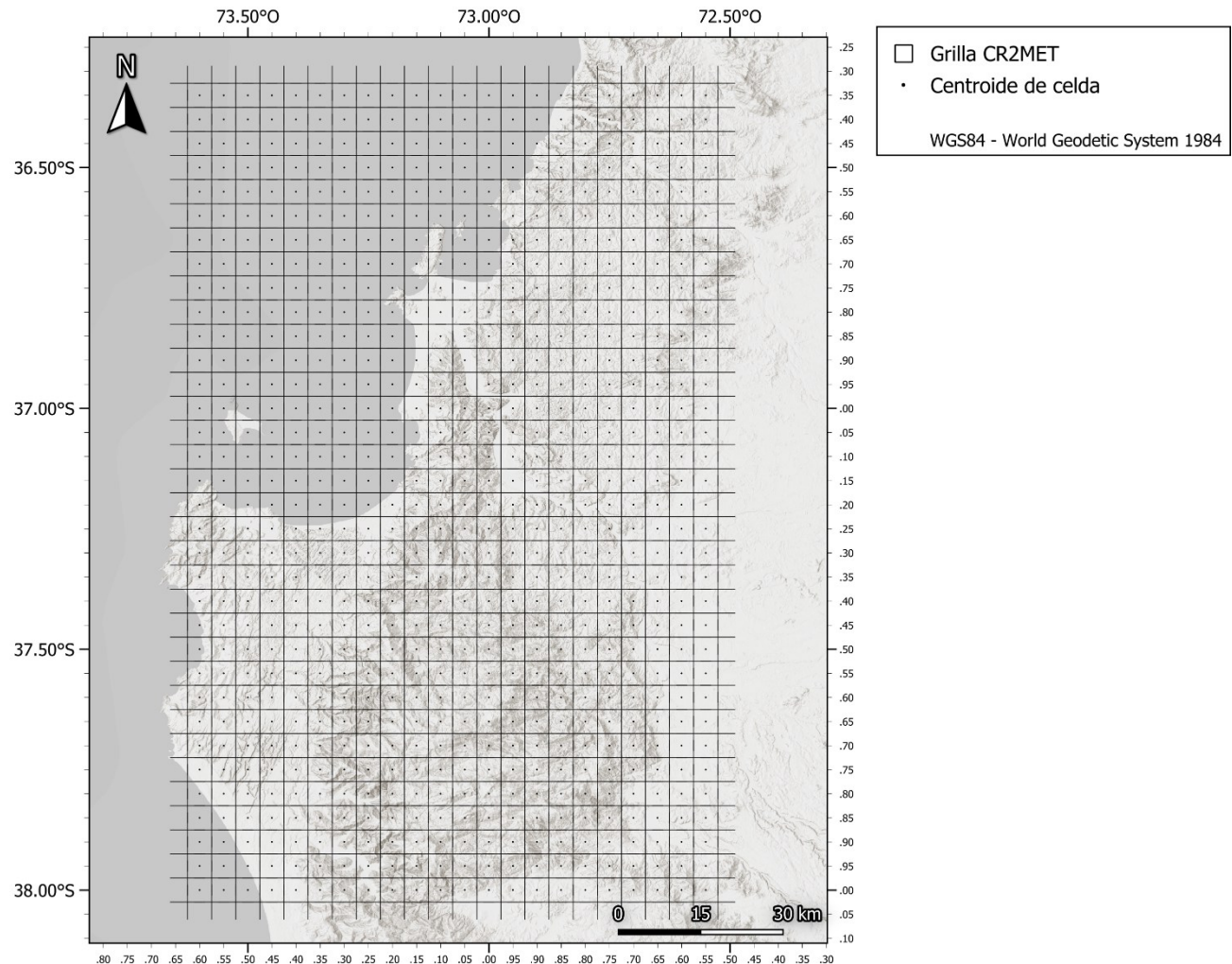


Figura 3.8 Grilla CR2MET

3.3.2. Información fisiográfica

3.3.2.1. Morfometría y relieve

Usando el paquete `terra` en R, se obtuvo un modelo de elevación digital (MDE o *DEM*, en inglés) mediante la unión de porciones de los MDE del satélite Alos Palsar de las Regiones Biobío, Ñuble y Araucanía, recogidos de la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile) que opera bajo el Ministerio de Bienes Nacionales. Este MDE tiene una resolución de 12.5 x 12.5 m, y en la Figura 3.9 se visualiza para toda la zona de estudio.

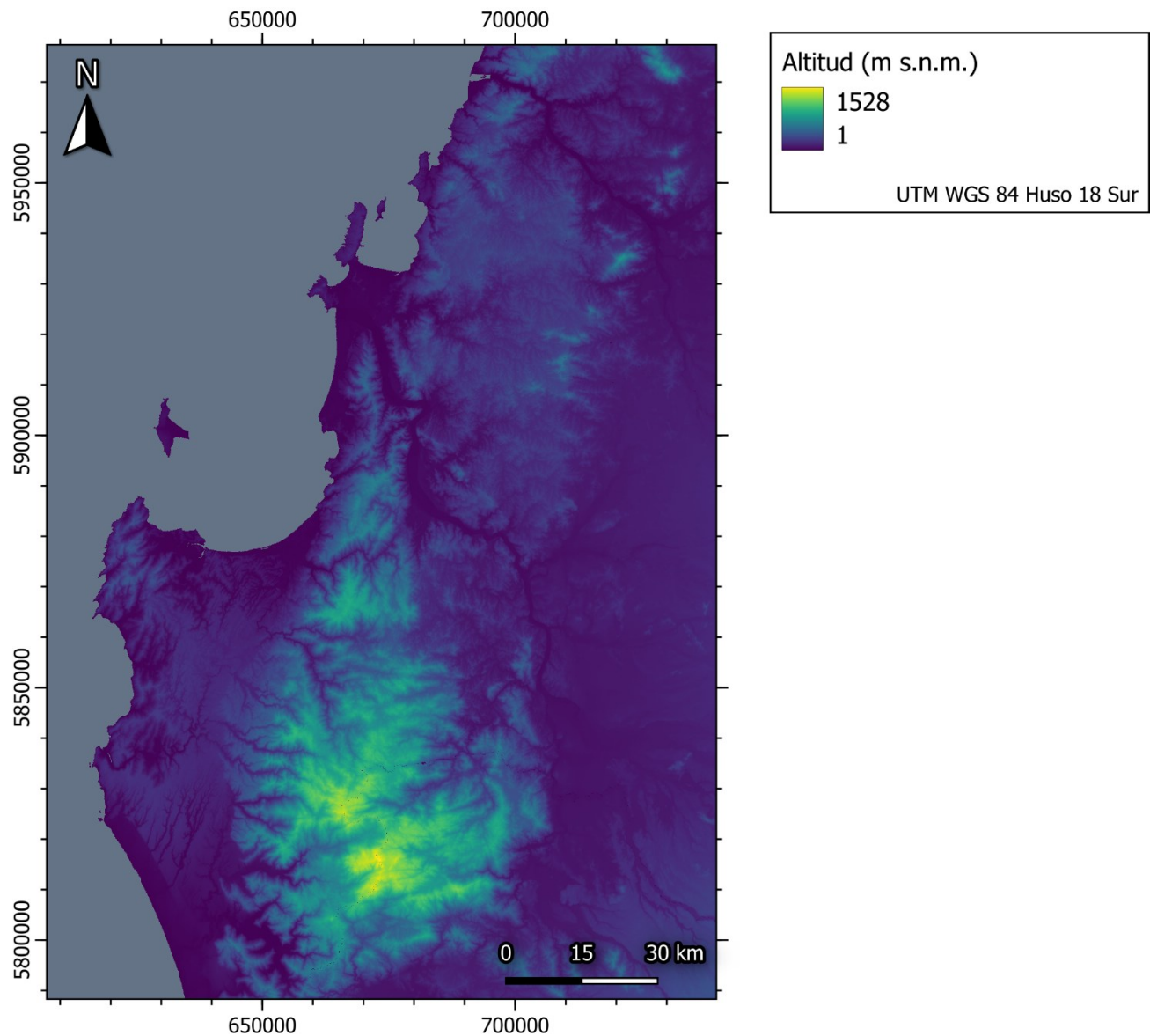


Figura 3.9 Modelo de elevación digital zona de estudio.

Usando este modelo, se delimitaron las cuencas estudiadas y se calcularon los parámetros morfométricos de cada una de ellas, los que se describen en las Tablas Tabla 3.4 y Tabla 3.5. Entre las herramientas computacionales usadas destacan el complemento GRASS en QGIS, y los paquetes *sf*, *terra* y *whitebox* en R.

Tabla 3.4 Parámetros de área y forma

Parámetro	Abreviación	Descripción	Ecuación
Área	A	Área que drena al punto de salida.	—
Perímetro	P	Longitud del límite exterior de la cuenca.	—
Densidad del drenaje	D_d	Relación entre la longitud de todas las corrientes (L_{corr}) y la superficie de la cuenca.	$D_d = \frac{L_{corr}}{A} \quad (3.1)$
Índice de circularidad (Miller)	I_c	Relaciona el área de la cuenca con el área de un círculo con el mismo perímetro.	$I_c = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3.2)$
Índice de compacidad (Gravelius)	K_c	Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo con la misma área.	$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (3.3)$
Factor de forma (Horton)	K_f	Razón entre el ancho promedio (A_{prom}) de la cuenca y su longitud medida a lo largo del cauce principal hasta la divisoria (L). Se asume $A_{prom} \sim \frac{A}{L}$	$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (3.4)$
Razón de elongación (Schumm)	R_e	Razón entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma (L).	$R_e = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L} \quad (3.5)$

Tabla 3.5 Parámetros lineales y de relieve

Parámetro	Abreviación	Descripción
Longitud de la cuenca	L	Longitud de la cuenca medida a lo largo del cauce principal hasta la divisoria (longitud máxima de la cuenca).
Longitud cauce principal	L_c	Longitud de la cuenca medida a lo largo del cauce principal entre su nacimiento y el punto de salida.
Longitud al centroide	L_{ca}	Longitud medida a lo largo del cauce principal entre el punto de salida y el punto más cercano al centroide de área de la cuenca.
Elevación mínima	h_{min}	Altitud mínima de la cuenca respecto al nivel del mar.
Elevación media	$\bar{h}$	Altitud promedio de la cuenca respecto al nivel del mar.
Elevación máxima	h_{max}	Altitud máxima de la cuenca respecto al nivel del mar.
Pendiente media	S	Pendiente promedio de la superficie de la cuenca.
Razón hipsométrica	R_h	Relación entre las áreas sobre y bajo la curva hipsométrica adimensional.

Para obtener la razón hipsométrica se construyó la curva hipsométrica, mediante el cálculo de las proporciones acumuladas de área y elevación. Luego:

$$R_h = \frac{S_s}{S_t} \quad (3.6)$$

Donde:

S_s : Área sobre la curva.

S_t : Área bajo la curva.

Con ambos parámetros calculados mediante integración numérica.

3.3.2.2. Uso de suelo

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) tiene a disposición los Catastros de Usos de la Tierra y Recursos Vegetacionales de Chile, que elabora y actualiza periódicamente para cada región. En ellas, presenta las coberturas cartográficas del territorio describiendo el uso de la tierra, caracterizando y localizando las distintas formaciones vegetales naturales existentes. En este estudio, se utilizó las últimas versiones de las regiones Biobío (act. 2015), Ñuble (act. 2015) y Araucanía (act. 2017). A partir de ellas se obtuvo el uso de suelo de la zona de estudio (Figura 3.10) y los porcentajes para cada cuenca según tipo de uso.

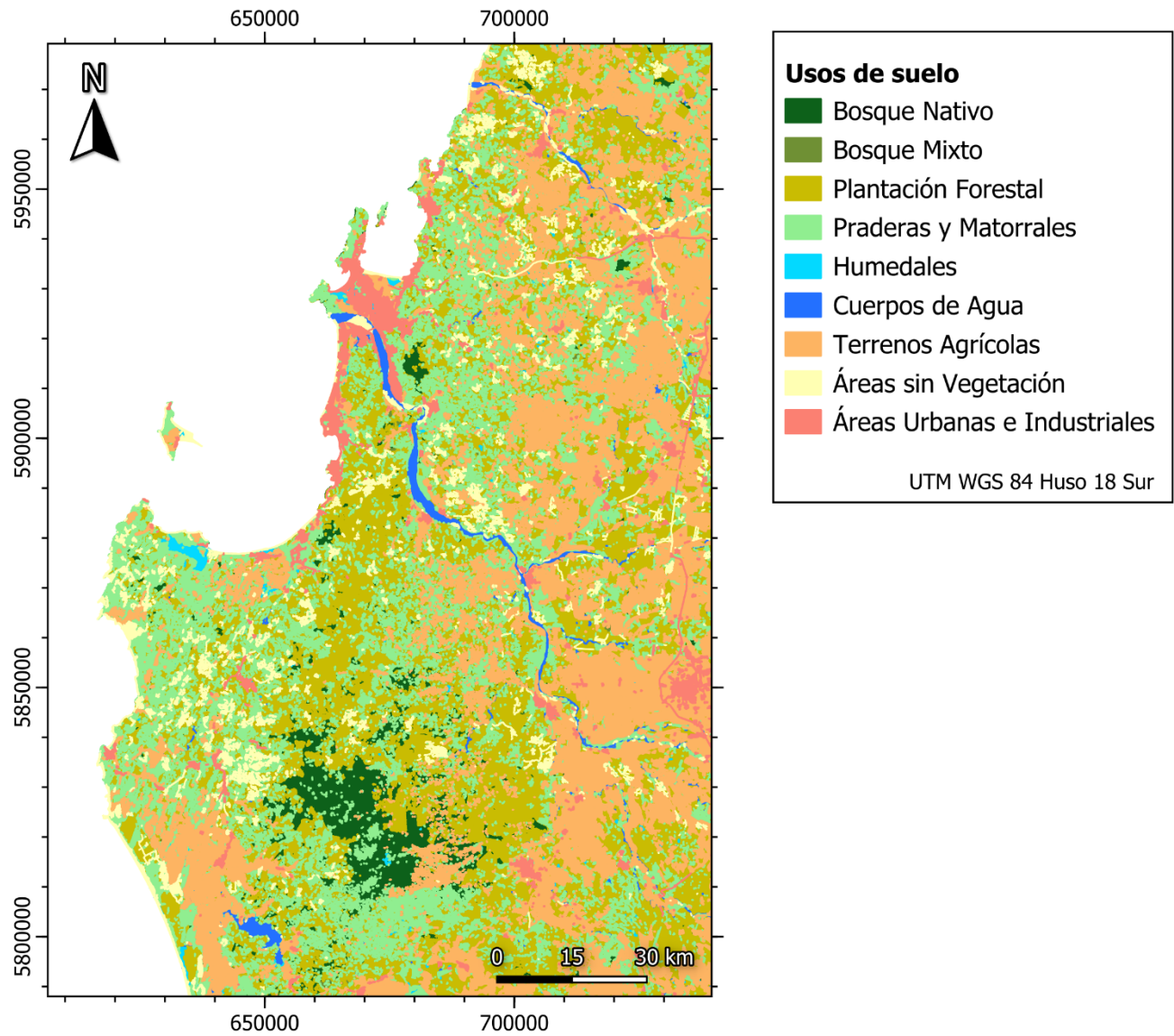


Figura 3.10 Usos de suelo en la zona de estudio

3.3.3. Derechos de aprovechamiento de agua

Usando la base de datos de Derechos de aprovechamiento de aguas concedidos de la DGA para las regiones del Biobío, Araucanía y Ñuble, se efectuó el análisis de derechos de agua.

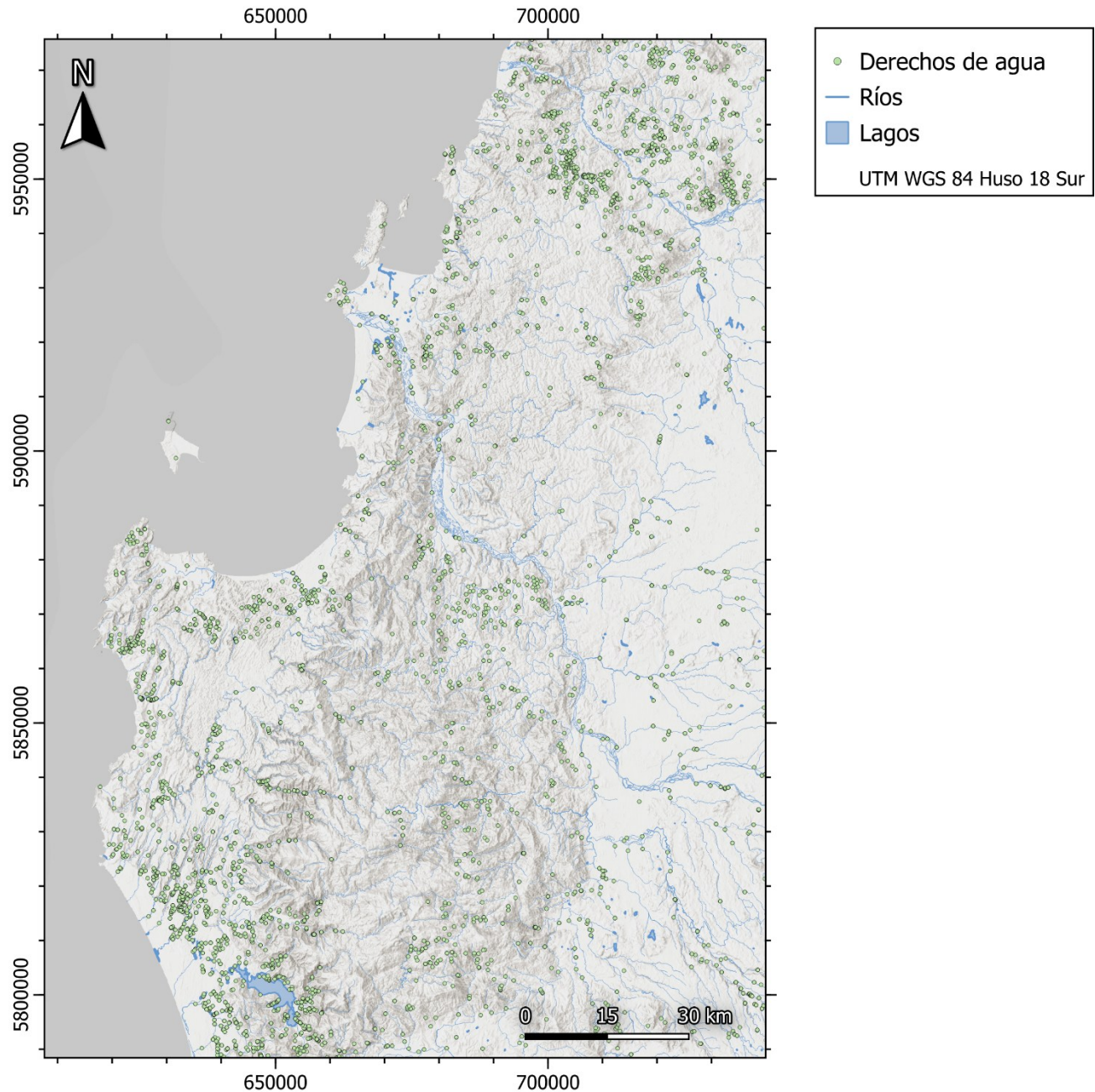


Figura 3.11 Derechos de aprovechamiento de agua zona de estudio

Para ello, se tuvo en cuenta solo los derechos superficiales, estandarizando los caudales a m^3/s , descartando aquellos cuyo caudal fuera medido en “acciones”, “porcentaje” o “regadores”, eliminando datos sucios o con errores de localización, y re proyectando las coordenadas al UTM WGS 84 Huso 18 Sur. La Figura 3.11 se muestra la localización de los derechos de aprovechamiento concedidos en la zona de estudio.

3.4. Métodos de regionalización

Para formular los modelos de estimación de caudales se eligieron métodos de regionalización hidrológicamente dependientes. Las limitaciones de estos métodos radican en su tendencia a la generalización, la mayor incertidumbre en las estimaciones y su dificultad para capturar procesos hidrológicos complejos. Sin embargo, destacan por ser fáciles de implementar, flexibles, escalables y especialmente útiles en regiones con escasez de datos.

Para el desarrollo de todos los métodos se reemplazó el caudal por el caudal específico como variable de interés y predictora, según:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (3.7)$$

Donde:

q : Caudal medio diario específico.

Q : Caudal medio diario.

A : Área de la cuenca.

El proceso de calibración, validación y aplicación de los modelos se muestra en el esquema de la Figura 3.12 y la Tabla 3.6 presenta las ecuaciones que describen los métodos utilizados.

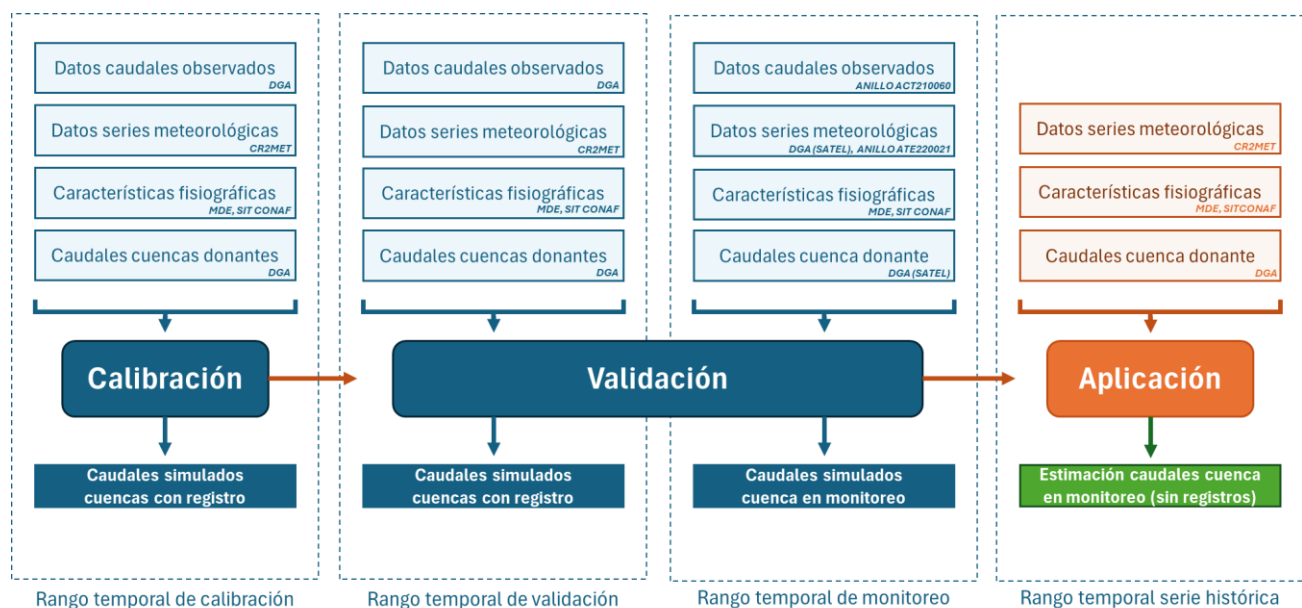


Figura 3.12 Esquema de calibración, validación y aplicación métodos de regionalización.

Tabla 3.6 Métodos de regionalización utilizados

Método	Abreviación	Ecuación
Transposición	MT	$q_{obj} = q_{don}$ (3.8)
Regresión lineal	MRL	$q_{obj} = \beta_0 + \beta_1 q_{don}$ (3.9)
Regresión lineal logarítmica	MRLl	$\ln q_{obj} = \beta_0 + \beta_1 \ln q_{don}$ (3.10)
Regresión lineal múltiple	MRLM	$q_{obj} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p$ (3.11)
Regresión lineal logarítmica múltiple	MRLlM	$\ln q_{obj} = \beta_0 + \beta_1 \ln x_1 + \beta_2 \ln x_2 + \dots + \beta_p \ln x_p$ (3.12)

Donde:

q_{obj} : Caudal medio diario específico de la cuenca objetivo.

q_{don} : Caudal medio diario específico de la cuenca donante.

β_i : Coeficientes de la regresión, con $i = 1, 2, \dots, p$.

x_i : Variables predictoras, con $i = 1, 2, \dots, p$, donde $x_1 = q_{don}$.

En los métodos de regresión lineal múltiple y logarítmica múltiple, se añadieron y removieron variables predictoras x_i usando el método iterativo sistemático *stepwise* (selección escalonada) para identificar aquellas más relevantes, reducir problemas de multicolinealidad y sobreajuste, permitiendo así construir un modelo parsimonioso.

Como se desprende de la Figura 3.12, las posibles variables son las series de caudal de las cuencas donantes, las series de precipitaciones y temperatura, parámetros morfométricos y porcentajes de uso de suelo de la cuenca objetivo. Dado el dominio de la función logarítmica, las ecuaciones (3.10) y (3.12) exigen que las variables predictoras x_i sean mayores que cero, por lo que se les sumó un valor positivo $\epsilon = 1$.

3.5. Calibración

Para ajustar los coeficientes de cada modelo de manera que simularan valores lo más aproximados posible a los observados, se usaron los datos de cuencas con registros históricos. Se seleccionaron pares de cuencas objetivo – donante, usando una cuenca donante aguas abajo (o lo más cercana posible) de la cuenca objetivo, y un rango temporal de datos con disponibilidad superior a 90%. Luego se elaboró una matriz de datos diarios con todas las variables del modelo para todos los pares de cuencas. En los modelos de regresión múltiple, las variables fisiográficas y de uso de suelo se

asumieron constantes para cada cuenca objetivo. La Tabla 3.7 muestra los pares elegidos para la calibración y sus rangos temporales. La Figura 3.13 muestra la localización geográfica de las cuencas objetivo y donante.

Tabla 3.7 Pares de cuencas calibración

Cuenca objetivo	Cuenca donante	Rango temporal
Río Andalién antes ex peaje Chaimávida	Río Andalién camino a Penco	2018 – 2020
Río Carampangue en Ramadillas (CA)	Río Carampangue aguas abajo bocatoma Planta Arauco	2021
Río Curanilahue en Curanilahue	Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)	2020 – 2021
Río Butamalal en Butamalal	Río Leiva en puente camino a Contulmo	2020

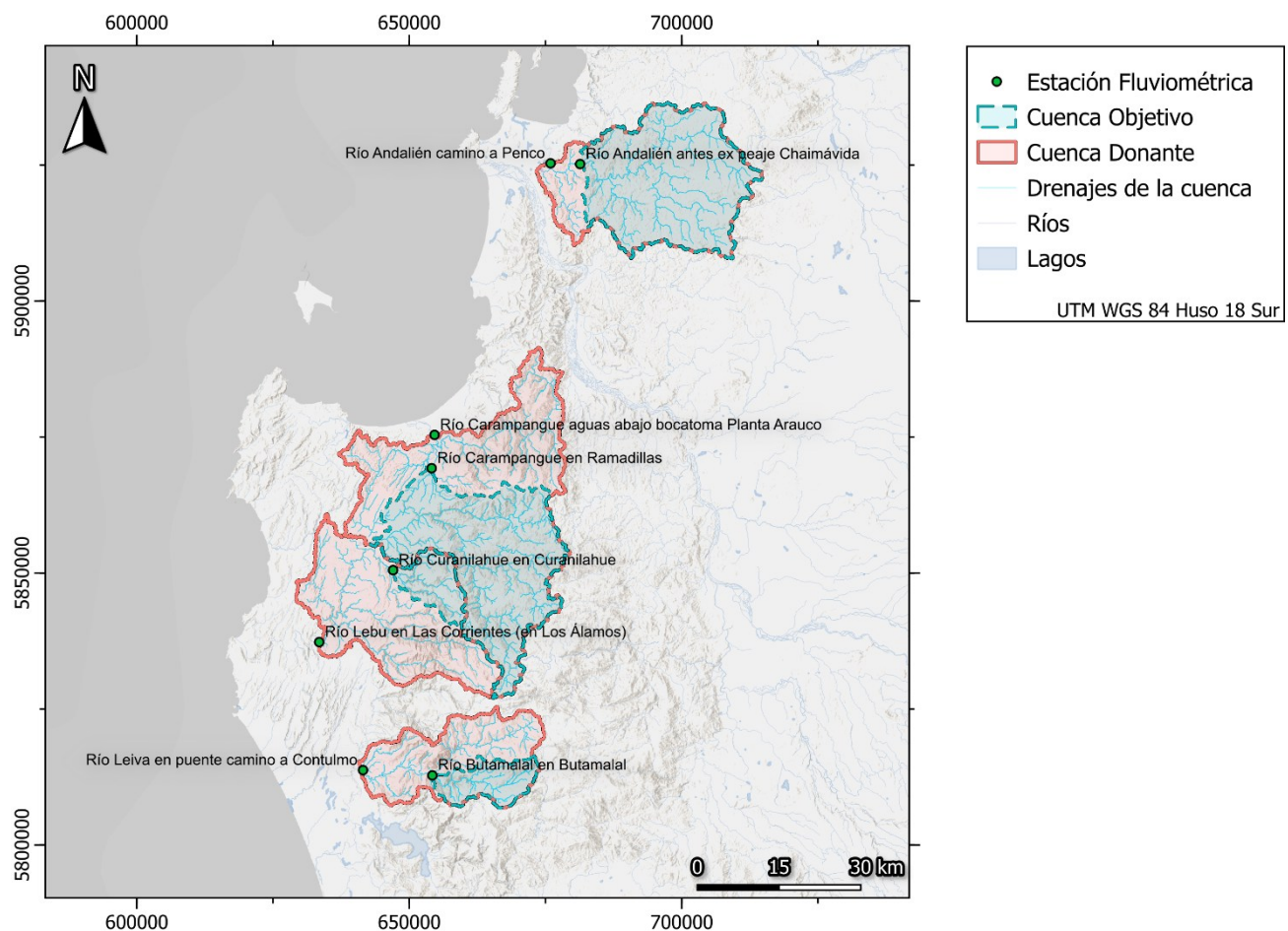


Figura 3.13 Localización geográfica cuencas objetivo – donante calibración

3.6. Validación

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo, se comprobó, en primera instancia, el ajuste de los datos simulados para los mismos pares de cuencas de la calibración en un nuevo rango temporal, a excepción del par Río Carampangue en Ramadillas (CA) – Río Carampangue aguas abajo bocatoma Planta Arauco, ya que no contaba con otro año con suficiente disponibilidad y consistencia de datos. En su lugar, se utilizó el par Río Cayucupil en Cayucupil – Río Butamalal en Butamalal. Los pares de cuencas utilizados y sus rangos temporales se muestran en la Tabla 3.8. y se visualizan en la Figura 3.14. Luego de simular los caudales, haciendo uso del paquete `hydroGOF` de R, se realizaron pruebas de bondad de ajuste, las que se describen en el siguiente subcapítulo.

Tabla 3.8 Pares de cuencas primera validación

Cuenca objetivo	Cuenca donante	Rango temporal
Río Andalién antes de ex peaje Chaimávida	Río Andalién camino a Penco	2015
Río Cayucupil en Cayucupil	Río Butamalal en Butamalal	2019
Río Curanilahue en Curanilahue	Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)	2018
Río Butamalal en Butamalal	Río Leiva en puente camino a Contulmo	2013
Río Caramávida en Caramávida	Río Nicodahue en Pichún	2019

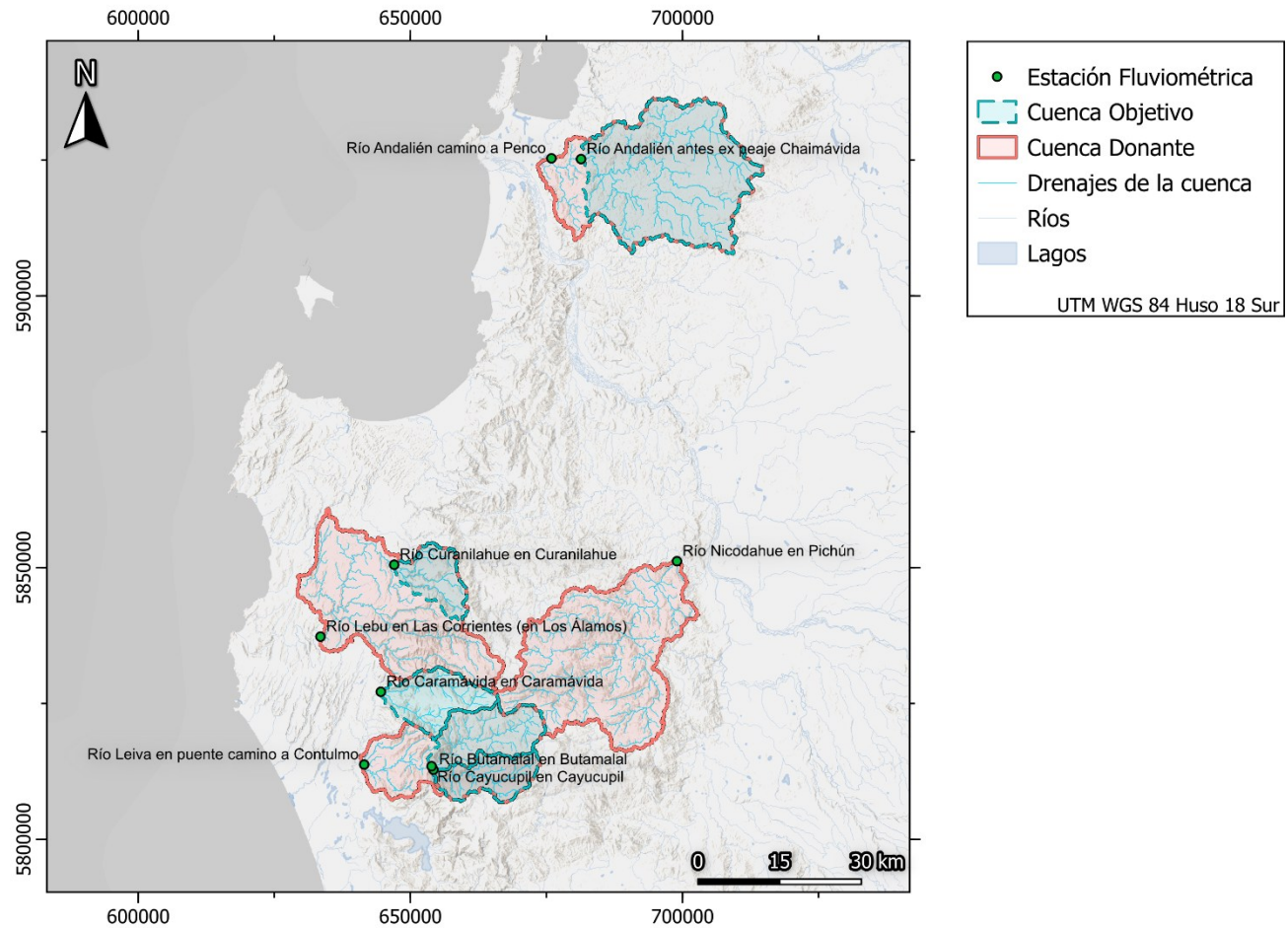


Figura 3.14 Localización geográfica cuencas objetivo – donante primera validación

En segunda instancia, se comprobó el ajuste de los datos simulados con nuevos pares de cuencas, esta vez con Río Carampangue en Bajo Cifuentes como cuenca objetivo, para el período de monitoreo. Las cuencas donantes escogidas se muestran en la Tabla 3.9. Las ubicaciones de las cuencas usadas para esta validación se muestran en la Figura 3.15.

Tabla 3.9 Pares de cuencas segunda validación

Cuenca objetivo	Cuenca donante
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	Río Carampangue aguas abajo bocatoma Planta Arauco
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	Río Caramávida en Caramávida
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	Río Curanilahue en Curanilahue
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	Río Cayucupil en Cayucupil
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	Estero Plegarias antes de junta con río Curanilahue
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	Río Butamalal en Butamalal

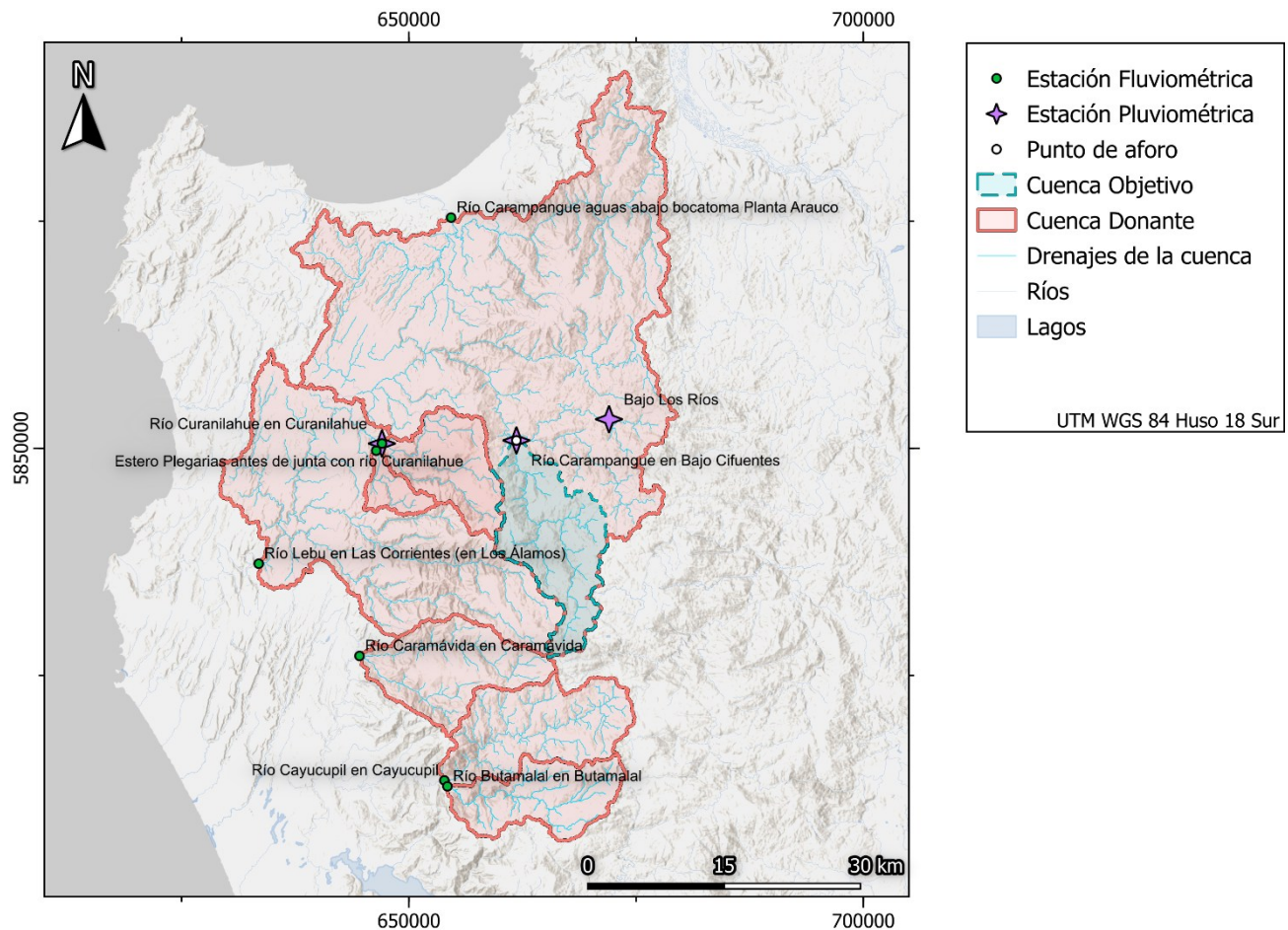


Figura 3.15 Localización geográfica cuencas objetivo – donante segunda validación

En este caso, para la cuenca donante se extendieron los datos de caudales usando los recogidos por el Sistema Hidrométrico en Línea de la DGA. Para la temperatura de la cuenca en monitoreo se usó los datos de los sensores HOBO® asumiendo un valor uniforme para toda la cuenca, y para las precipitaciones se usaron los datos satelitales de las estaciones meteorológicas cercanas “Río Curanilahue en Curanilahue” y “Bajo Los Ríos” (Figura 3.15). Además, desde abril del 2024, el Proyecto Anillo ATE220021 “Cambio Climático y la Sociohidrología de las Inundaciones” monitorea una estación meteorológica en Bajo Cifuentes, por lo que también se usaron los datos de precipitación y temperatura disponibles. Finalmente, se realizaron las pruebas de bondad de ajuste, que se describen a continuación.

3.6.1. Coeficiente de determinación (R^2)

Mide la proporción de la variabilidad de los datos observados versus los simulados. Se puede describir como el cuadrado del coeficiente de correlación r , según:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (3.13)$$

Donde:

O_i : Valor observado.

S_i : Valor simulado

$\bar{O}$: Promedio de los valores observados.

$\bar{S}$: Promedio de los valores simulados.

n : Cantidad total de datos.

El valor de R^2 tiene un rango entre 0 y 1, con $R^2 = 1$ un ajuste perfecto y $R^2 = 0$ un ajuste nulo. Generalmente un valor mayor o igual a 0.7 permite indicar un ajuste aceptable, y sobre 0.9 un ajuste muy bueno.

3.6.2. Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE)

Este estadístico es ampliamente usado en ciencias ambientales, especialmente en hidrología, y consiste en la comparación de la magnitud relativa de la varianza residual con la variación de los datos de medición, mediante:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.14)$$

Donde:

O_i : Valor observado.

S_i : Valor simulado.

$\bar{O}$: Promedio de los valores observados.

n : Cantidad total de datos.

El NSE tiene un rango entre $-\infty$ y 1. Si $NSE = 0$, el modelo no es mejor que usar la media de los valores como predicción, pero si $NSE < 0$, el modelo es menos eficiente que usar la media de los valores como predicción. Por otro lado, un valor de $NSE = 1$ indica un ajuste perfecto, es decir, errores nulos. Si $0 < NSE < 1$, el modelo tiene cierta capacidad predictiva. Se consideró valores mayores a 0.75 como muy buenos, entre 0.35 y 0.75 como aceptables, y bajo 0.35 como insatisfactorios.

3.6.3. Percent Bias (PBIAS)

A diferencia de los estadísticos anteriores, que miden el ajuste global del modelo, esta métrica evalúa la dirección y magnitud del sesgo, es decir, la tendencia a subestimar o sobrestimar los valores observados. Se calcula mediante:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \cdot 100 \quad (3.15)$$

Donde:

O_i : Valor observado.

S_i : Valor simulado.

n : Cantidad total de datos.

Un valor de $PBIAS = 0$ indica que no hay sesgo, es decir, el modelo no tiene tendencia a sobrestimar ni subestimar los valores observados. Si $PBIAS < 0$, el modelo tiende a subestimar los valores observados, es decir, predice menos de lo que realmente ocurre. A menor valor negativo, mayor subestimación. Si $PBIAS > 0$, el modelo tiende a sobrestimar los valores observados, es decir, predice más de lo que realmente ocurre. A mayor valor positivo, mayor sobrestimación. Se consideró valores absolutos menores al 20% como muy buenos, entre 20% y 40% como aceptables, y mayores a 40% como insatisfactorios.

3.7. Aplicación del modelo

Una vez validados, se usó el modelo con mejor ajuste y el par de cuencas con mejor desempeño en la segunda validación para simular la serie de caudales históricos en la cuenca monitoreada.

3.8. Conclusión

Se presentó la zona de estudio y las cuencas monitoreadas, reduciéndolas a aquella que fuera posible estudiar las cuencas con registros recogidas para analizar. Se proporcionó las fuentes de información y los métodos de obtención de características hidrometeorológicas y fisiográficas para todas las cuencas. Se mostraron los métodos de elaboración de los modelos de predicción de caudales medios diarios, detallando los procesos de calibración, validación y aplicación.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan las características hidrometeorológicas y fisiográficas de las cuencas analizadas, además de los derechos agua reportados en la cuenca en monitoreo, También se presentan los resultados de la calibración y validación de los modelos formulados. Finalmente se muestra la serie de caudales históricos estimados en la cuenca en monitoreo.

4.2. Características hidrometeorológicas

4.2.1. Climatología de cuencas con registros

La Figura 4.1 muestra curvas suavizadas del caudal medio diario específico promedio de las cuencas con registros, para el período de datos disponibles (1979 – 2022).

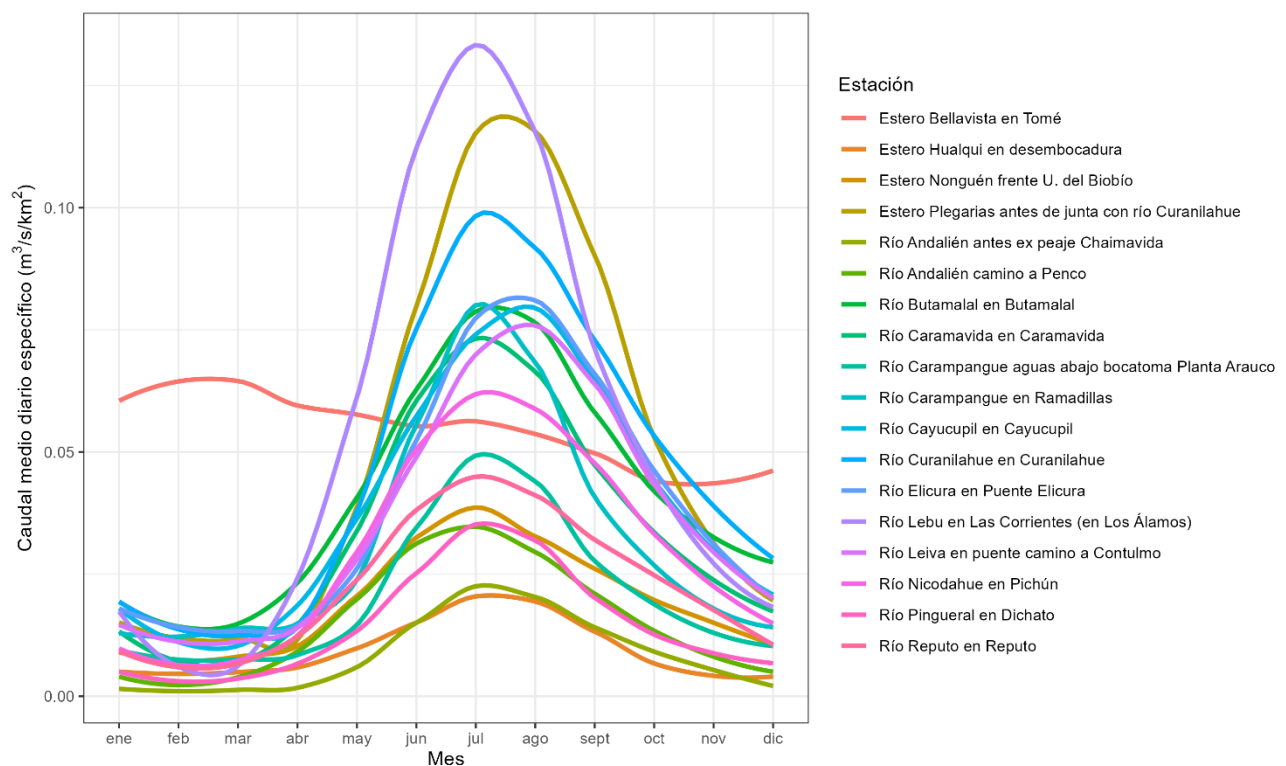


Figura 4.1 Caudales medios diarios específicos promedio cuencas con registros

Se desprende que los regímenes de todas las cuencas son del tipo pluvial, como se podría esperar de cuencas costeras, sin embargo, el Estero Bellavista en Tomé destaca por describir un comportamiento más bien constante, con máximos entre febrero y marzo, lo que sugeriría una cuenca de alta intervención humana, razón por la que se descartó de la selección. Las Figuras Figura 4.2 y Figura 4.3 muestran curvas suavizadas de la precipitación diaria promedio y la variabilidad diaria promedio de

la precipitación de las cuencas con registros, para el período del producto grillado CR2MET (1960 – 2021). La Tabla 4.1 muestra las precipitaciones anuales promedio de todas las cuencas estudiadas.

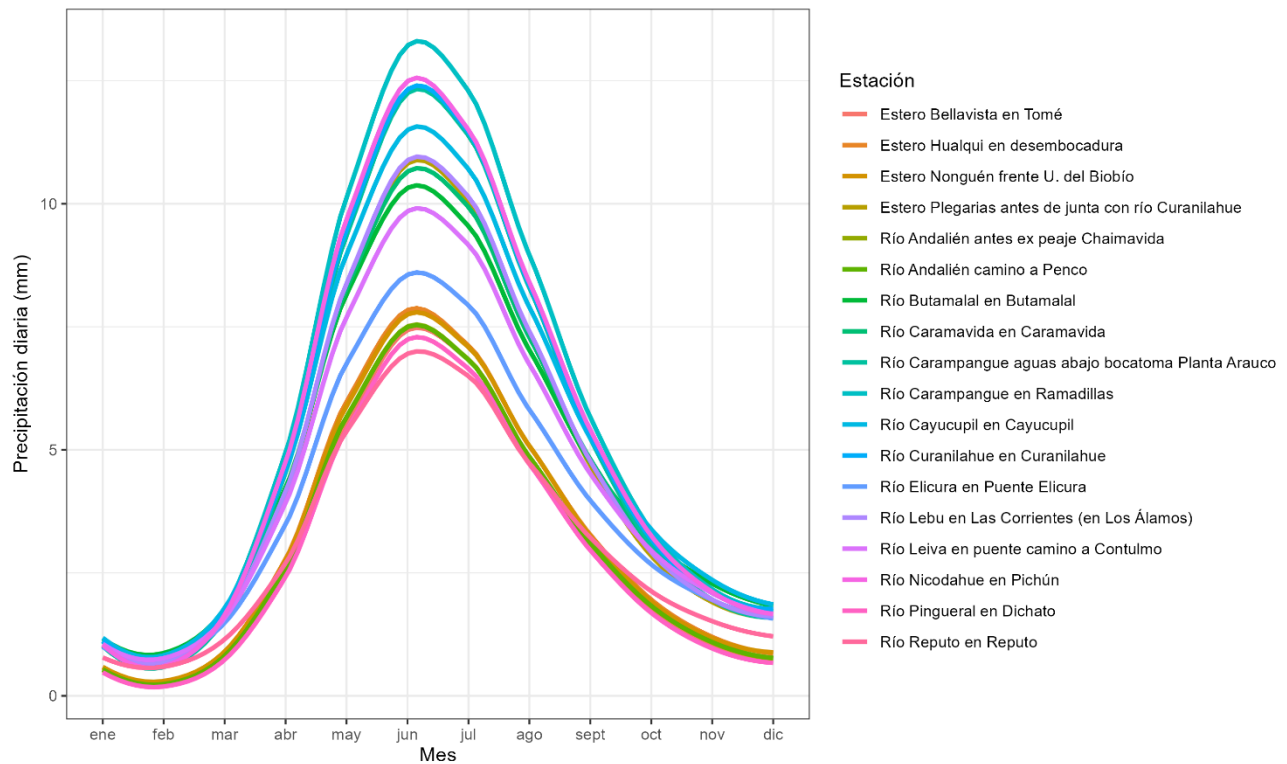


Figura 4.2 Precipitaciones diarias promedio en cuencas con registros

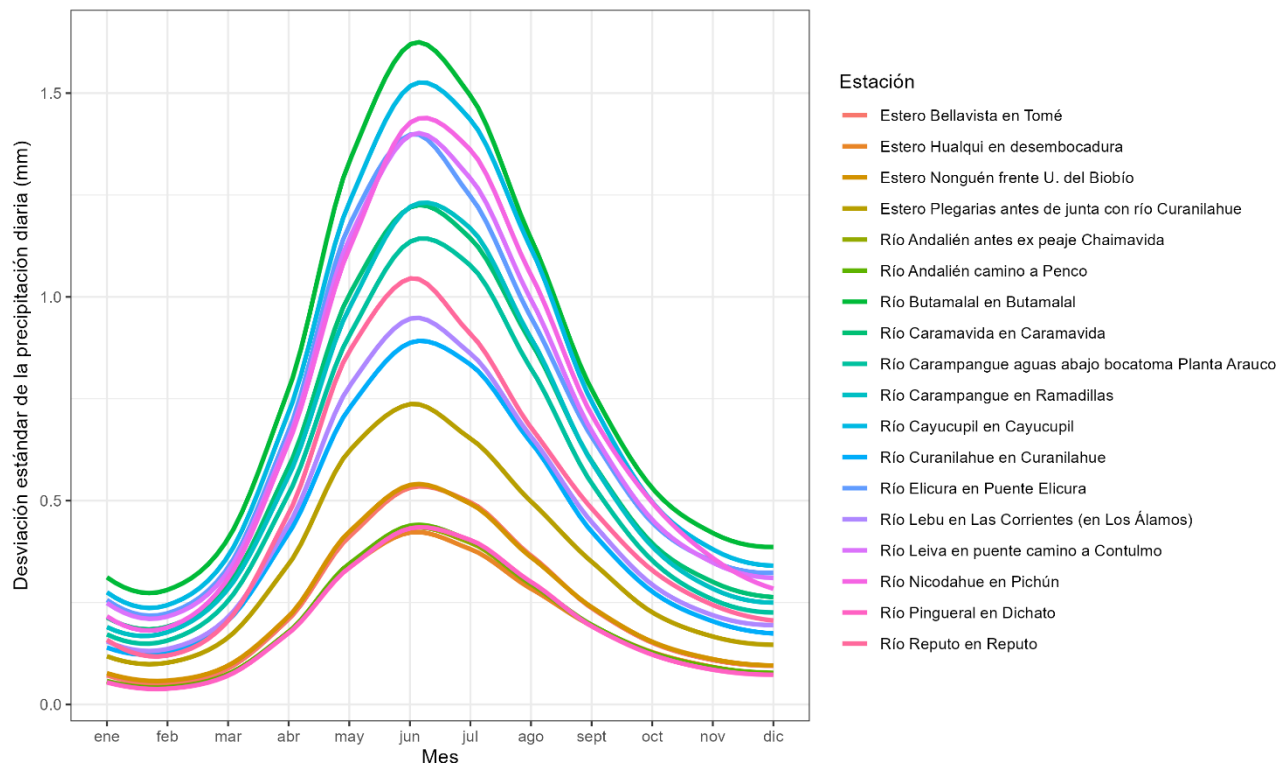


Figura 4.3 Variabilidad diaria promedio de las precipitaciones en cuencas con registros

Tabla 4.1 Precipitación media anual en todas las cuencas estudiadas

Cuenca	Precipitación media anual (mm)
Río Andalién camino a Penco	1100
Río Andalién antes ex peaje Chaimávida	1100
Estero Bellavista en Tomé	1087
Río Butamalal en Butamalal	1691
Río Carampangue aguas abajo bocatoma Planta Arauco	1869
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	2332
Río Carampangue en Ramadillas	2027
Río Caramávida en Caramávida	1707
Río Curanilahue en Curanilahue	1908
Río Cayucupil en Cayucupil	1850
Estero Hualqui en desembocadura	1162
Río Elicura en Puente Elicura	1410
Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)	1705
Río Lía en punto de monitoreo	1845
Río Leiva en puente camino a Contulmo	1596
Río Nicodahue en Pichún	1922
Estero Nonguén frente U. del Biobío	1154
Estero Plegarias antes de junta con río Curanilahue	1686
Río Pingueral en Dichato	1047
Río Reputo en Reputo	1130

Todas las cuencas presentan comportamiento meteorológico similar, con precipitaciones medias anuales en el rango de entre 1000 y 2000 mm, con la excepción de Río Carampangue en Ramadillas y Río Carampangue en Bajo Cifuentes, que presentan valores por encima de los 2000 mm. Las Figuras Figura 4.4 y Figura 4.5 muestran las series de temperaturas extremas diarias promedio en las cuencas con registros, para el período del producto grillado CR2MET (1960 – 2021). La Tabla 4.2 muestra los máximos de temperatura anuales promedio en cada cuenca. Las medias anuales de las temperaturas extremas en todas las cuencas son muy similares, con máximas del orden de los 30°C y mínimas del orden de los -2°C.

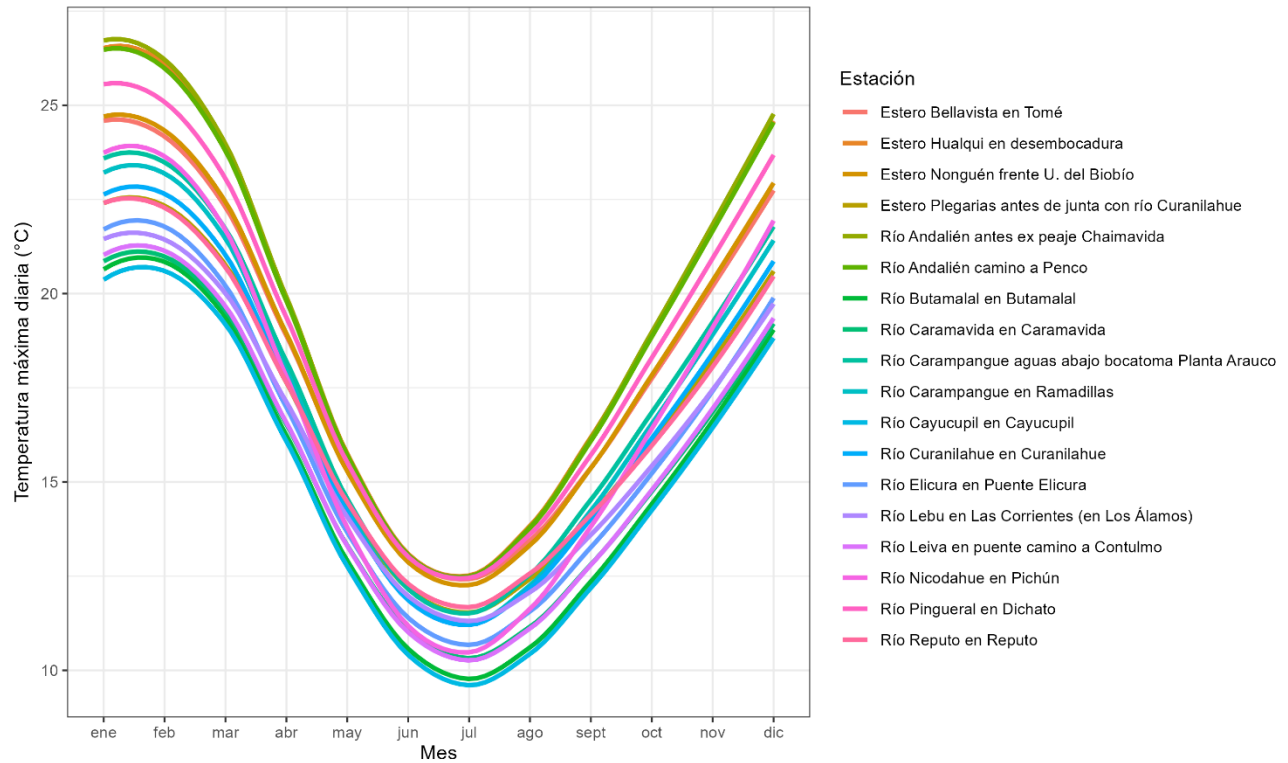


Figura 4.4 Serie de temperaturas máximas diarias promedio en cuencas con registros

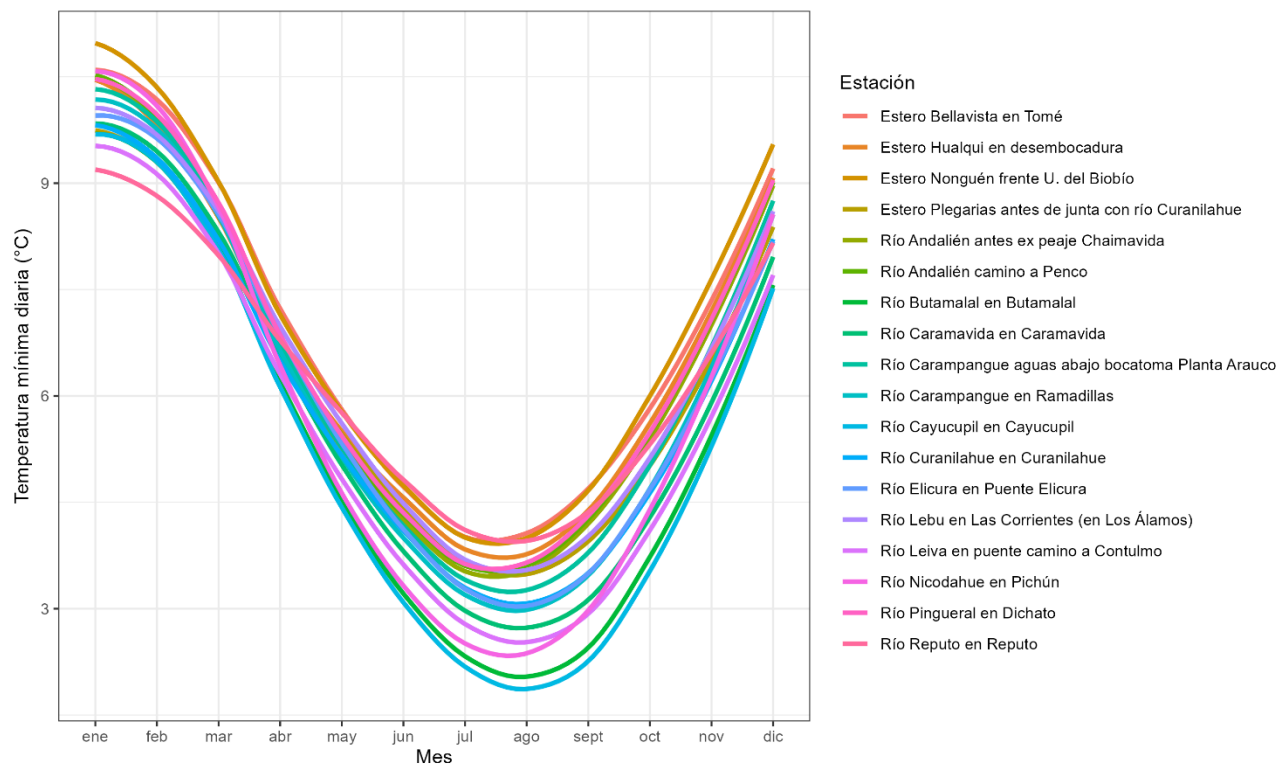


Figura 4.5 Serie de temperaturas mínimas diarias promedio en cuencas con registros

Tabla 4.2 Temperaturas extremas anuales promedio en cuencas con registros

Cuenca	Temperatura máx. anual (°C)	Temperatura mín. anual (°C)
Río Andalién camino a Penco	33	-2
Río Andalién antes ex peaje Chaimávida	33	-2
Estero Bellavista en Tomé	31	-1
Río Butamalal en Butamalal	29	-3
Río Carampangue aguas abajo bocatoma Planta Arauco	31	-2
Río Carampangue en Bajo Cifuentes	30	-2
Río Carampangue en Ramadillas	31	-2
Río Caramávida en Caramávida	28	-2
Río Curanilahue en Curanilahue	30	-2
Río Cayucupil en Cayucupil	28	-3
Estero Hualqui en desembocadura	33	-2
Río Elicura en Puente Elicura	30	-2
Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)	28	-1
Río Lía en punto de monitoreo	32	-2
Río Leiva en puente camino a Contulmo	29	-2
Río Nicodahue en Pichún	31	-3
Estero Nonguén frente U. del Biobío	31	-1
Estero Plegarias antes de junta con río Curanilahue	29	-2
Río Pingueral en Dichato	32	-2
Río Reputo en Reputo	29	-1

4.2.2. Series de caudales en cuenca monitoreada

La Figura 4.6 muestra la serie de caudales medios diarios observados en Río Carampangue en Bajo Cifuentes durante el período de monitoreo, que describe un comportamiento pluvial.

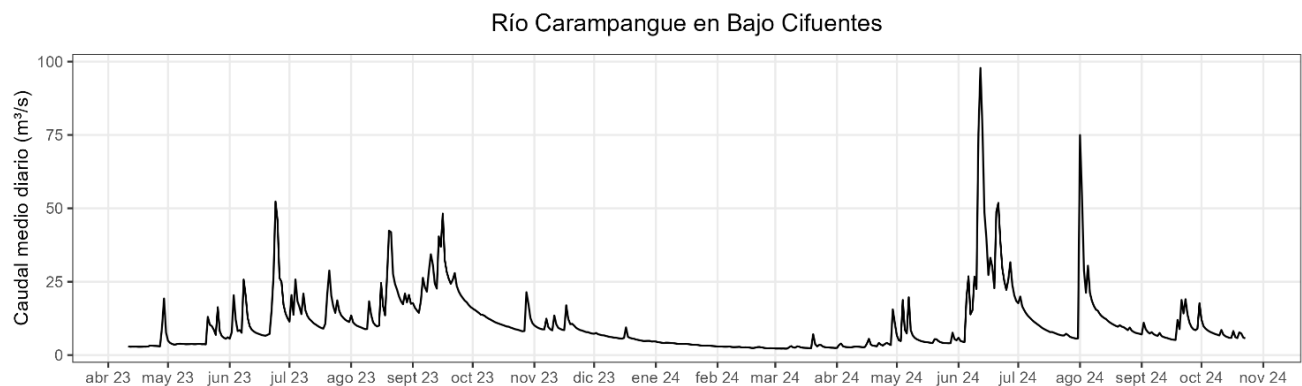


Figura 4.6 Serie de caudales medios diarios monitoreados Río Carampangue en Bajo Cifuentes

4.3. Características fisiográficas

4.3.1. Morfometría y relieve

Las Tablas Tabla 4.3 y Tabla 4.4 muestran los parámetros morfométricos obtenidos para las cuencas estudiadas.

Tabla 4.3 Parámetros de área y forma cuencas estudiadas

Cuenca	A (km ²)	P (km)	D_d (km/m ²)	I_c	K_c	K_f	R_e
BAJO CIF	164.2	105	0.52	0.19	2.31	0.12	0.39
ACP	752.2	219	0.63	0.20	2.25	0.12	0.39
AXP	651.6	190	0.41	0.23	2.10	0.14	0.42
BET	83.8	69	0.81	0.22	2.14	0.08	0.32
BML	116.9	84	0.80	0.21	2.18	0.15	0.44
CAPA	1244.0	363	0.23	0.12	2.90	0.18	0.47
CRCA	695.4	253	0.76	0.14	2.71	0.14	0.42
CRMV	147.9	86	0.68	0.25	2.00	0.17	0.46
CUC	107.5	73	0.70	0.25	1.98	0.20	0.50
CYC	170.4	97	1.05	0.23	2.10	0.12	0.40
EHD	65.7	54	0.89	0.28	1.89	0.33	0.65
EPE	68.3	60	0.71	0.24	2.04	0.19	0.49
LELC	653.7	220	0.63	0.17	2.42	0.18	0.48
LPCC	422.4	159	0.80	0.21	2.18	0.15	0.44
NEP	739.6	218	0.75	0.20	2.26	0.18	0.48
NUBB	51.7	55	0.70	0.21	2.17	0.15	0.44
PAJC	27.9	41	0.71	0.21	2.17	0.12	0.39
PED	241.0	141	0.84	0.15	2.56	0.10	0.35
RPT	17.4	27	1.08	0.31	1.79	0.29	0.60

Tabla 4.4 Parámetros lineales y de relieve cuencas estudiadas

Cuenca	L (km)	L_c (km)	L_{ca} (km)	h_{min} (m s.n.m.)	$\bar{h}$ (m s.n.m.)	h_{max} (m s.n.m.)	S (°)	R_h
BAJO CIF	37.6	35.1	19.7	127	726	1323	15	1.21
ACP	78.7	75.1	45.6	6	219	592	10	0.57
AXP	69.4	64.8	34.9	6	227	592	10	0.60
BET	32.6	30.6	20.9	9	265	415	10	1.71
BML	27.7	26.8	14.7	50	805	1528	15	1.04
CAPA	84.2	81.8	35.4	7	412	1323	14	0.45
CRCA	70.8	70.4	35.3	14	493	1323	14	0.59
CRMV	29.9	27.8	13.4	66	634	1383	17	0.84
CUC	23.3	20.8	12.4	137	483	1009	14	0.66
CYC	37.2	33.4	16.4	47	785	1513	16	1.07
EHD	14.2	12.5	6.4	29	143	365	13	0.51
EPE	19.2	19.1	10.0	28	573	1043	17	1.16
LELC	60.7	58.0	44.1	12	390	1309	13	0.41
LPCC	53.2	51.5	24.9	29	621	1528	15	0.65
NEP	64.6	64.6	33.1	63	595	1393	14	0.74
NUBB	18.4	16.9	9.8	16	222	458	12	0.87
PAJC	15.1	12.3	6.6	139	322	753	12	0.42
PED	50.1	50.1	26.9	1	253	456	10	1.24
RPT	7.8	7.0	3.5	59	328	599	17	0.99

4.3.2. Uso de suelo

La Figura 4.7 muestra el uso de suelo en Río Carampangue en bajo Cifuentes. La Tabla 4.5 muestra el uso de suelo en porcentaje para todas las cuencas estudiadas.

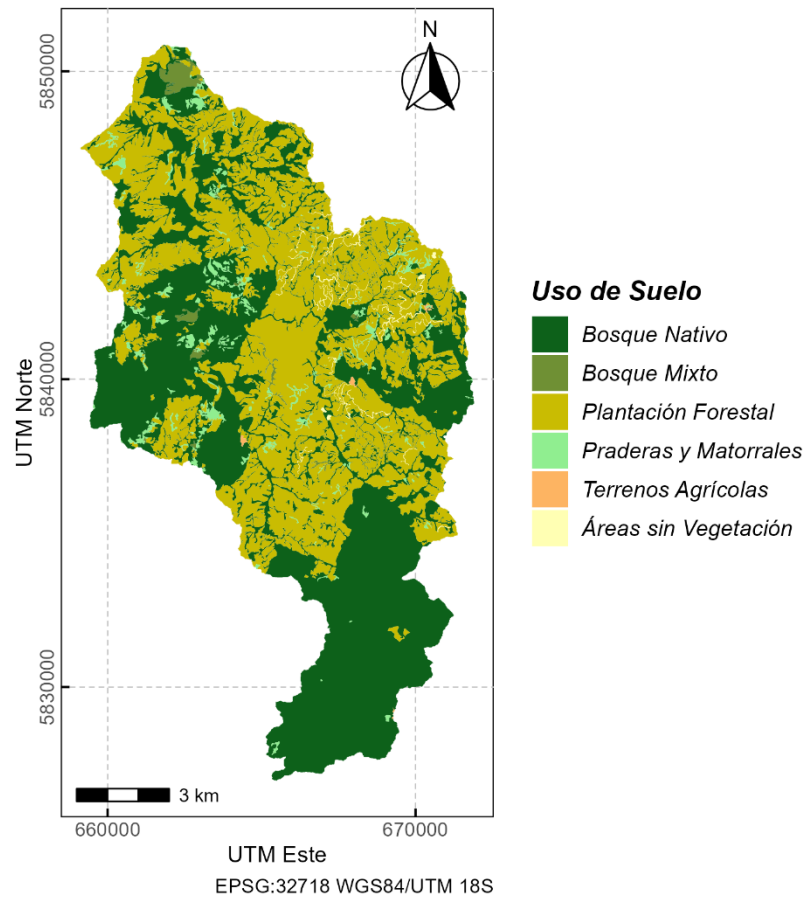


Figura 4.7 Uso de suelos Río Carampangue en Bajo Cifuentes

Tabla 4.5 Porcentajes de uso de suelos en cuencas estudiadas (%)

Cuenca	Bosque Nativo	Bosque Mixto	Plantación Forestal	Cuerpos de Agua	Humedales	Praderas y Matorrales	Terrenos Agrícolas	Áreas sin Vegetación	Áreas Urbanas e Industriales
BAJO CIF	49.3	0.9	46.7	0	0	2.5	0.1	0.5	0
ACP	8.3	8.5	56.2	0.2	0.4	14.0	10.1	0.3	2.2
AXP	5.1	8.7	59.5	0.1	0.4	14.2	11.2	0.3	0.5
BET	14.9	10.9	48.1	0	0.1	21.5	3.9	0.3	0.4
BML	52.8	0.6	36.4	0	0	9.2	0.3	0.4	0.1
CAPA	24.5	2.9	62	0.1	0.5	7.3	2.2	0.3	0.2
CRCA	29.5	1.8	61.8	0.1	0	5.8	0.4	0.4	0.1
CRMV	62.2	1	29.8	0.1	0	5.3	1.3	0.1	0
CUC	25.7	2.9	65.1	0	0	4.7	0	0.5	1.0
CYC	57	0.3	32.3	0	0	9.5	0.7	0	0

Cuenca	Bosque Nativo	Bosque Mixto	Plantación Forestal	Cuerpos de Agua	Humedales	Praderas y Matorrales	Terrenos Agrícolas	Áreas sin Vegetación	Áreas Urbanas e Industriales
EHD	5.1	7.2	62.6	0	0.6	21.1	1.9	0.3	1.2
EPE	30.2	1.2	52.4	0	0.1	14.6	1.2	0.2	0.2
LELC	23.9	1.9	63.6	0.1	0	8.0	0.8	0.7	1.0
LPCC	43.7	0.9	37.2	0.1	0.1	8.6	8.6	0.2	0.5
NEP	44.3	2.2	45.9	0.1	0.1	4.0	3.2	0.2	0
NUBB	52.2	8.5	23.8	0	0	8.4	1.2	0	6.0
PAJC	3.9	0.9	85.6	0	0	7.7	0.4	0.8	0.7
PED	4.8	5.9	62.9	0.2	0.3	13.7	11.5	0.4	0.3
RPT	31.3	0.8	55	0	0	4.8	8.0	0.1	0

Todas las cuencas presentan un uso predominante de bosques (nativo, mixto y plantación forestal), por sobre el 70%. De ese porcentaje, la mayoría consiste en plantación forestal, con la excepción de Río Butamalal en Butamalal, Río Caramávida en Caramávida, Río Cayucupil en Cayucupil, Río Leiva en puente camino a Contulmo, Estero Nonguén frente U. del Biobío y Río Carampangue en Bajo Cifuentes, cuyo uso mayoritario es bosque nativo. Casi no hay cuerpos de agua, humedales ni áreas sin vegetación presentes en estas cuencas. Las praderas y matorrales, así como los terrenos agrícolas, están pero en mucho menor proporción, y las áreas urbanas e industriales también son casi inexistentes (salvo en Estero Nonguén frente U. del Biobío, donde aun así es bajo). En ANEXO 4.1 se presentan los mapas de uso de suelos para todas las cuencas estudiadas.

4.4. Derechos de aprovechamiento de agua

Del análisis de derechos de agua se reportan dos derechos de agua de uso eventual y discontinuo para bebida, uso doméstico y saneamiento cerca del punto de aforo (aguas arriba) de un total de caudal promedio de 0.9 l/s, por lo que no son significativos. Más arriba, en la confluencia del Estero Pajillas con el Río Carampangue, se reportan cuatro derechos de aprovechamiento de aguas superficiales concedidos de un caudal promedio de 4.45 m³/s, pero para uso de generación de energía hidroeléctrica (no consuntivo), por lo que no impactan en el efluente de la cuenca.

4.5. Calibración

La Tabla 4.6 muestra las ecuaciones calibradas para los diferentes modelos de regresión lineal, formulados para estimar los caudales medios diarios en la cuenca en monitoreo. Cabe mencionar que la ecuación del modelo de transposición no se calibró, por lo que no se incluye en la tabla.

Tabla 4.6 Modelos calibrados

Modelo	Ecuación
MRL	$q_{obj} = -5.7 \cdot 10^{-4} + 1.07q_{don}$ (4.1)
MRLL	$\ln q_{obj} = 1.7 \cdot 10^{-4} + 1.08 \ln q_{don}$ (4.2)
MRLM	$q_{obj} = 2.89 \cdot 10^{-2} + 1.03q_{don} + 3.14 \cdot 10^{-4}pr - 3 \cdot 10^{-4}t_{max} + 4.18 \cdot 10^{-4}t_{min} - 1.5 \cdot 10^{-4}a + 5.07 \cdot 10^{-4}p - 6.37 \cdot 10^{-2}d_d$ (4.3)
MRLLM	$\ln q_{obj} = -1.57 \cdot 10^{-2} + 1.04 \ln q_{don} + 1.46 \cdot 10^{-3} \ln pr - 8.23 \cdot 10^{-2} \ln t_{max} + 1.29 \cdot 10^{-1} \ln t_{min} + 1.05 \cdot 10^{-1} \ln a - 1.62 \cdot 10^{-1} \ln p + 1.93 \cdot 10^{-1} \ln d_d$ (4.4)

Donde:

q_{obj} : Caudal medio diario específico de la cuenca objetivo.

q_{don} : Caudal medio diario específico de la cuenca donante.

pr : Precipitación diaria de la cuenca objetivo.

t_{max} : Temperatura máxima de la diaria cuenca objetivo.

t_{min} : Temperatura mínima diaria cuenca objetivo.

a : Área de la cuenca objetivo.

p : Perímetro de la cuenca objetivo.

d_d : Densidad del drenaje de la cuenca objetivo.

Con el método *stepwise* se determinó que, para simular el caudal medio diario, las variables predictoras más relevantes que reducen multicolinealidad y garantizan mayor parsimonia son: las variables meteorológicas (extremos de temperaturas, precipitaciones), las variables morfométricas de área (área, perímetro, densidad de drenaje) y, por supuesto, el caudal de la cuenca donante. Este último elemento es esencial en todos los modelos ya que todos se basan en él.

La Tabla 4.7 muestra los resultados de las pruebas de bondad de ajuste para la calibración de los modelos.

Tabla 4.7 Resultado pruebas de bondad de ajuste calibración

Cuenca objetivo		Río Andalién antes ex peaje Chaimávida	Río Carampangue en Ramadillas	Río Curanilahue en Curanilahue	Río Butamalal en Butamalal
Cuenca donante		Río Andalién camino a Penco	Río Carampangue aguas abajo bocatoma Planta Arauco	Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)	Río Leiva en puente camino a Contulmo
MT	R²	0.94	0.71	0.92	0.83
	NSE	0.81	0.24	0.9	0.76
	PBIAS	-8	19.7	13	6.6
MRL	R²	0.94	0.71	0.92	0.83
	NSE	0.84	0.41	0.92	0.8
	PBIAS	-18.7	9	4.2	-1.7
MRLl	R²	0.94	0.71	0.92	0.83
	NSE	0.86	0.43	0.92	0.8
	PBIAS	-16.4	9.7	3.7	-2.1
MRLM	R²	0.9	0.71	0.93	0.83
	NSE	0.86	0.47	0.93	0.8
	PBIAS	0	0	0	0
MRLlM	R²	0.91	0.73	0.93	0.83
	NSE	0.87	0.5	0.93	0.8
	PBIAS	0.3	0.3	0.1	0.1

En general, todas las pruebas de bondad de ajuste de la calibración indican rendimientos satisfactorios en todos los modelos, especialmente en los de regresión múltiple. Particularmente, el modelo de regresión lineal múltiple no produce sesgos.

En ANEXO 4.2 se presentan los gráficos de valores observados y simulados en proceso de calibración para cada modelo en cada par de cuencas.

4.6. Validación

La Tabla 4.8 muestra los resultados de las pruebas de bondad de ajuste para la primera validación de los modelos, usando cuencas donante y objetivo con registros históricos.

Tabla 4.8 Resultado pruebas de bondad de ajuste primera validación

Cuenca objetivo		Río Andalién antes ex peaje Chaimávida	Río Cayucupil en Cayucupil	Río Curanilahue en Curanilahue	Río Butamalal en Butamalal	Río Caramávida en Caramávida
Cuenca donante		Río Andalién camino a Penco	Río Butamalal en Butamalal	Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)	Río Leiva en puente camino a Contulmo	Río Nicodahue en Pichún
MT	R ²	0.95	0.92	0.89	0.83	0.82
	NSE	0.91	0.88	0.87	0.79	0.17
	PBIAS	-22.5	-11.7	18.3	5.5	58.4
MRL	R ²	0.95	0.92	0.89	0.83	0.82
	NSE	0.87	0.84	0.88	0.82	0.39
	PBIAS	-30	-18.4	9.7	-2.8	44.4
MRLl	R ²	0.95	0.92	0.89	0.83	0.82
	NSE	0.88	0.83	0.88	0.82	0.41
	PBIAS	-29.1	-18.8	8.7	-3.1	45.1
MRLM	R ²	0.9	0.91	0.9	0.85	0.84
	NSE	0.87	0.79	0.9	0.83	0.57
	PBIAS	-21.1	44.2	6.4	-1.2	18.6
MRLLM	R ²	0.92	0.92	0.9	0.84	0.82
	NSE	0.89	-1.02	0.89	0.83	0.58
	PBIAS	-20.8	-59.4	6.2	-0.6	13.8

En la primera validación, todos los ajustes de R² son buenos (o aceptables para el caso de Río Caramávida en Caramávida – Río Nicodahue en Pichún), sin embargo, los otros parámetros indican peor desempeño en ciertos casos. El par Río Cayucupil en Cayucupil – Río Butamalal en Butamalal presenta un valor insatisfactorio de PBIAS en los modelos de regresión múltiple, con NSE negativo en el MRLLM, mientras que el par Río Caramávida en Caramávida – Río Nicodahue en Pichún presenta valores insatisfactorios de PBIAS y NSE en los modelos que no son del tipo regresión múltiple. Por lo demás, los modelos presentan valores de medidas de bondad de ajuste satisfactorios o aceptables para el resto de los pares de cuencas. En términos generales, en esta validación los modelos MT, MRL y MRLl tuvieron un muy buen desempeño, salvo excepciones, presentando valores de MBA similares en cada par de cuencas. Por otro lado, los modelos de regresión se comportan de manera óptima, salvo ciertas sobrestimaciones, pero en contraste tienen un desempeño excelente para el par Río Curanilahue en Curanilahue – Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos).

La Tabla 4.9 muestra los resultados de las pruebas de bondad de ajuste para la segunda validación (con la cuenca en monitoreo como cuenca objetivo), detallando las cuencas donantes para los distintos modelos.

Tabla 4.9 Resultado pruebas de bondad de ajuste segunda validación

Cuenca objetivo		Río Carampangue en Bajo Cifuentes						
Cuenca donante		Río Carampangue aguas abajo bocatoma Planta Arauco	Río Caramávida en Caramávida	Río Curanilahue en Curanilahue	Río Cayucupil en Cayucupil	Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)	Estero Plegarias antes de junta con río Curanilahue	Río Butamalal en Butamalal
MT	R ²	0.84	0.92	0.71	0.73	0.82	0.8	0.89
	NSE	0.62	0.61	0.4	-0.71	0.59	0.73	0.32
	PBIAS	18.8	47.6	-44.4	41.5	-25.5	14.6	33.9
MRL	R ²	0.84	0.92	0.71	0.73	0.82	0.8	0.89
	NSE	0.71	0.73	0.36	-0.33	0.55	0.72	0.52
	PBIAS	10.3	36.8	-48.1	31.2	-30.6	6.4	24.2
MRLL	R ²	0.84	0.92	0.71	0.73	0.82	0.8	0.89
	NSE	0.73	0.75	0.34	-0.26	0.53	0.7	0.56
	PBIAS	9.2	35.6	-49.2	30.2	-31.9	5	23.1
MRLM	R ²	0.84	0.9	0.71	0.72	0.83	0.81	0.87
	NSE	0.67	0.84	0.25	0.04	0.49	0.7	0.62
	PBIAS	-19.3	-6.5	-55.1	-9	-43	-21.6	-12.6
MRLLM	R ²	0.85	0.92	0.72	0.74	0.82	0.81	0.89
	NSE	0.04	-0.18	0.49	-2.13	0.59	0.57	-0.74
	PBIAS	172.9	389.1	-25.6	330.5	12.9	151	276.2

Para la segunda validación se mantiene todavía un buen ajuste de R² en todos los modelos, pero las dos pruebas restantes son las decisivas para la evaluación de los modelos. Sobresale el desempeño insatisfactorio del modelo MRLLM en la mayoría de los casos, tanto por valores de PBIAS que se disparan, como por NSE negativos. Este modelo solo tiene un buen desempeño para la cuenca donante Río Lebu en Las Corrientes que, en el resto de los modelos presenta valores de PBIAS aceptables, pero se producen subestimaciones importantes. La cuenca donante Estero Plegarias antes de junta con río Curanilahue presenta muy buenos ajustes en todos los modelos (salvo MRLLM), sobre todo MRL y MRLL. En general, el mejor desempeño lo obtiene el modelo de regresión lineal múltiple con la

cuenca donante Río Caramávida en Caramávida. La Figura 4.8 muestra el ajuste del modelo MRLM con esta cuenca como donante.

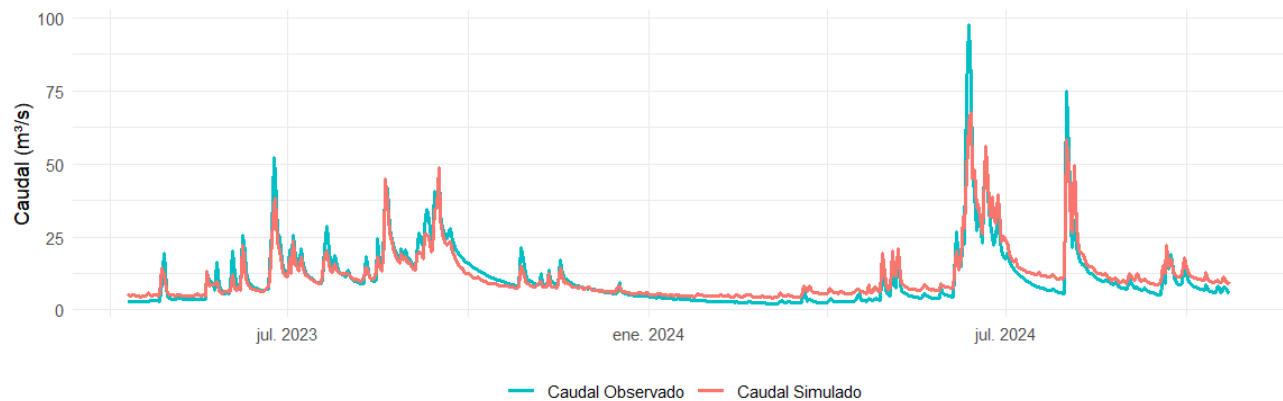


Figura 4.8 Caudal observado y simulado en Río Carampangue en Bajo Cifuentes por modelo con mejor ajuste

En términos generales se observa concordancia entre los caudales observados y simulados, sin embargo, el modelo tiende a subestimar los caudales *peak* y sobrestimar tanto el caudal base como algunos de los caudales de recesión. Para esta validación, es posible que la precipitación de la cuenca al considerarse constante y no distribuida suscite una pérdida en la representatividad de los eventos meteorológicos, lo que pudiera explicar estas discrepancias. Otra posibilidad, siguiendo la línea de las variables de entrada, es que el modelo no capture adecuadamente los procesos de almacenamiento y concentración de la cuenca a falta de datos asociados a la humedad del suelo o infiltración.

En ANEXO 4.3 y ANEXO 4.4 se presentan los gráficos de valores observados y simulados en la primera y segunda instancia de validación respectivamente, para cada modelo en cada par de cuencas.

4.7. Aplicación: serie de caudales

La Figura 4.9 muestra las series de caudales medios diarios históricos simulados para la cuenca en monitoreo para dos períodos: 1983 – 1989 y 2016 – 2020 usando el modelo elegido y la cuenca donante Río Caramávida en Caramávida. Se seleccionó esta cuenca por su buen desempeño en la segunda validación y por tener un porcentaje de datos mayor al 90% en estos períodos. Otras candidatas son Río Carampangue aguas abajo bocatoma Planta Arauco y Estero Plegarias antes de junta con río Curanilahue con los modelos MRL o MRLM, sin embargo, cuentan con menos datos que la cuenca seleccionada (Figura 3.7).

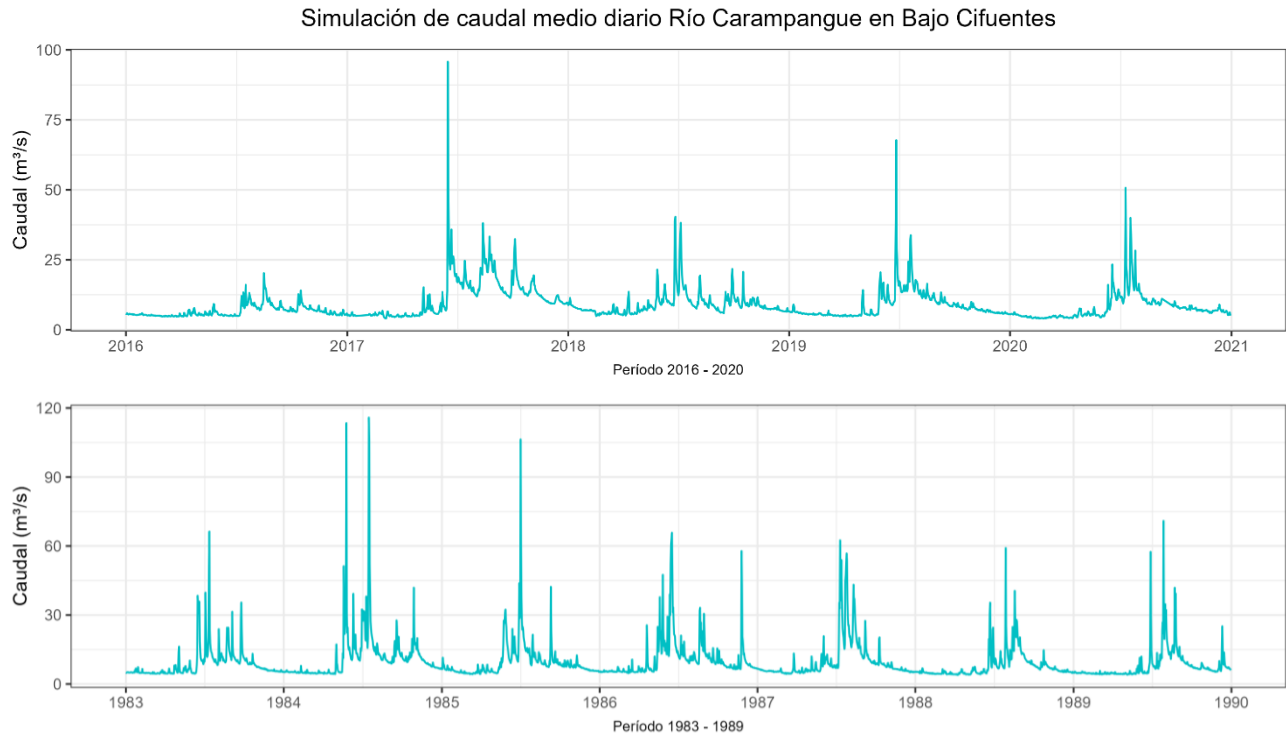


Figura 4.9 Serie de caudales históricos con la cuenca donante Río Caramávida en Caramávida

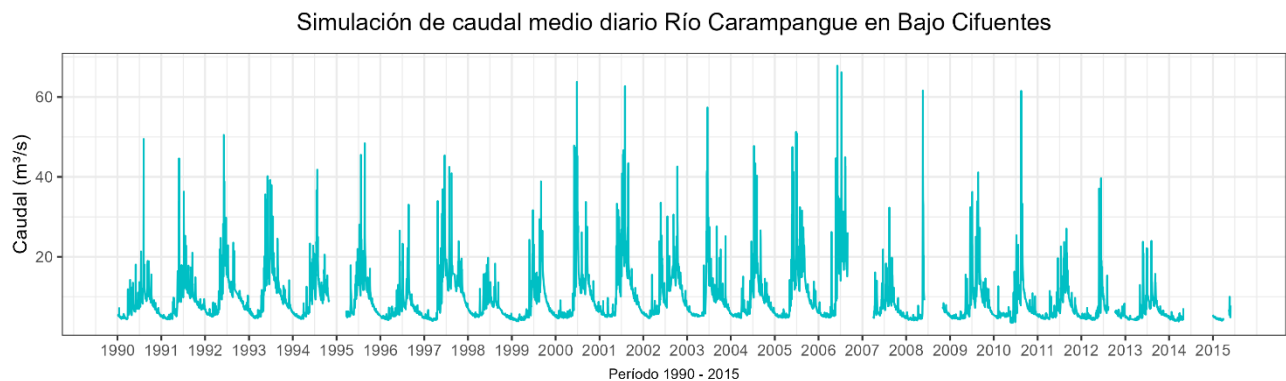


Figura 4.10 Serie de caudales históricos con la cuenca donante Río Nicodahue en Pichún

La Figura 4.10 muestra la serie de caudales medios diarios históricos simulados para la cuenca en monitoreo en el período 1990 – 2015 usando el modelo elegido y la cuenca donante Río Nicodahue en Pichún. Esta cuenca fue seleccionada por tener un historial consistente de datos en el período entre 1989 y 2016 además de tener un desempeño aceptable en la primera validación para el modelo elegido. Se observan *gaps* entre algunos meses de 1994 – 1995, 2006 – 2007 y 2014 – 2016 debido a la falta de datos de caudales en Río Nicodahue en Pichún. A pesar de lo anterior, se obtuvo suficiente información para generar series de caudales medios diarios con más del 50% de datos disponibles en prácticamente todos los años, para un rango temporal de 38 años.

Teniendo entonces las simulaciones para tres periodos completos, se construyó la serie de caudales históricos en Río Carampangue en Bajo Cifuentes para el período 1983 – 2020, que se muestra en la Figura 4.11.

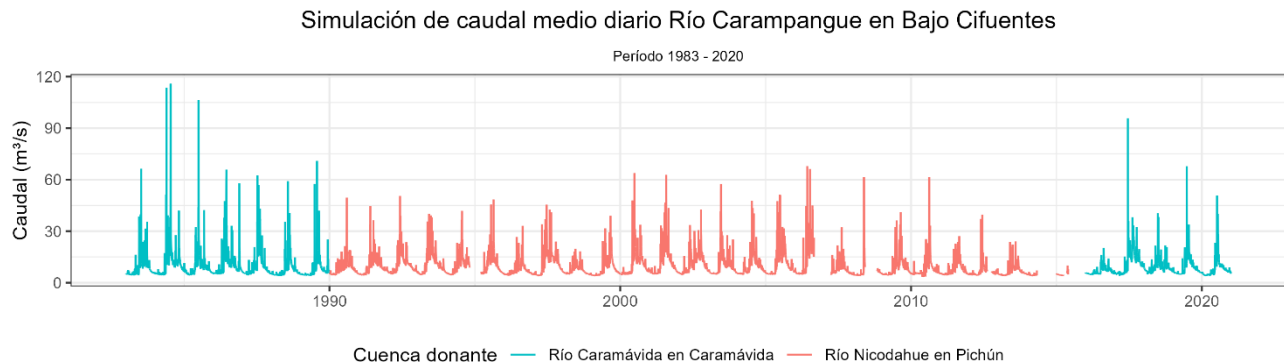


Figura 4.11 Serie completa de caudales medios diarios históricos simulados para Río Carampangue en Bajo Cifuentes

Los resultados de las validaciones previas sugieren que las simulaciones presentadas son correctas, sin embargo, se asoma un cierto nivel de incertidumbre al no ser usada Río Nicodahue en Pichún para la segunda validación, por no estar presente entre las cuencas que envían datos satelitales al Sistema Hidrométrico en línea de la DGA. Esta incertidumbre impacta principalmente en los caudales *peak* del período 1990 – 2015. Por lo demás, se observa que Río Carampangue en Bajo Cifuentes presenta un comportamiento estacional de régimen pluvial tal como la cuenca del Río Carampangue, a la que pertenece, con un caudal medio de $9 \text{ m}^3/\text{s}$ y un máximo histórico de $116 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.8. Conclusión

Se obtuvieron las series de caudales, precipitaciones y temperaturas extremas, así como parámetros morfométricos y porcentajes de uso de suelos de todas las cuencas estudiadas. Se aplicó el método de transposición de caudales y se calibraron cuatro modelos de regresión para simular los caudales medios diarios. Los resultados de las validaciones indican que es posible simular correctamente caudales medios diarios mediante modelos empíricos en Río Carampangue en Bajo Cifuentes. En la primera validación, los métodos de regresión múltiple son capaces de producir los mejores resultados. En la segunda validación, en la cuenca en monitoreo, depende mucho de la cuenca donante el desempeño de cada modelo, pero en general el que mejor se comporta es el método de regresión lineal múltiple. Se eligió el modelo con mejor ajuste para el par de cuenca objetivo – donante de mejor desempeño y se construyó la serie histórica de caudales medios diarios en la cuenca sin registros.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

La estimación de caudales en cuencas sin registros es un desafío que ha propiciado un gran campo de estudio dentro de la ingeniería hidrológica, ya que aborda el problema de no contar con registros de caudal en la gran mayoría de las cuencas del mundo, registros esenciales para la gestión de recursos hídricos y el desarrollo de obras civiles. En esta memoria se aplicaron métodos empíricos basados en la regionalización para estimar caudales medios diarios en una cuenca de la costa centro sur de Chile.

Se obtuvieron las características hidrometeorológicas y fisiográficas de todas las cuencas. Se elaboraron las series de tiempo de caudales medios diarios de 18 cuencas de la zona de estudio, se elaboraron las series de tiempo de precipitaciones y temperatura de todas las cuencas estudiadas usando productos grillados, y se desarrollaron programas para obtener los parámetros morfométricos y de uso de suelo de todas las cuencas.

Para la modelación se formularon modelos con un método de escala y cuatro métodos de regresión: modelo de transposición, modelos de regresión lineal y lineal logarítmica, modelos de regresión lineal múltiple y lineal logarítmica múltiple. En estos últimos, se aplicó un método *stepwise* para determinar aquellas variables adicionales al caudal de la cuenca donante. La calibración de los modelos se efectuó usando pares de cuencas de la zona, tal que la donante se encontrara aguas abajo de la cuenca objetivo. La primera validación usó los mismos pares de cuencas que en la calibración (de ser posible), en rangos temporales distintos. La segunda validación se logró con los datos obtenidos en el trabajo en terreno y extendiendo las series de caudal en las cuencas con registros recurriendo al Sistema Hidrométrico en Línea.

Los resultados de la modelación indican que es posible simular caudales medios diarios a través de modelos empíricos en cuencas costeras del centro sur de Chile. Para la validación en cuencas con registro, se encontró que los modelos que mejor se ajustan son los métodos de regresión múltiple. Para la validación en la cuenca en monitoreo, los modelos con mejor ajuste varían dependiendo de la cuenca donante elegida, pero en general el mejor desempeño lo obtuvo el método de regresión lineal múltiple, obteniendo resultados satisfactorios a muy buenos, en la mayoría de los casos. Este modelo simula

correctamente los caudales, aunque tiende a subestimar los *peak* de caudales y sobrestimar los caudales de recesión.

Al contrastar los resultados de esta memoria con el trabajo de Saenger (2023), podemos concluir que la metodología, usada para calcular caudales en zonas andinas del centro sur de Chile, se puede aplicar correctamente en el escenario de cuencas costeras del centro sur de Chile. Entre las diferencias resaltan los parámetros relevantes encontrados en cada caso.

En las cuencas andinas asoma la razón hipsométrica como una variable geomorfológica predictora relevante y descartando el perímetro. Lo anterior cobra sentido al situarse en un contexto de cuencas jóvenes (según el ciclo de Davis) con alta variabilidad en la razón hipsométrica, caracterizadas por relieves abruptos, fuertes pendientes y alta energía erosiva. En el caso de las cuencas costeras, los parámetros de relieve indican más bien cuencas en fase de madurez a vejez, con relieves intermedios, ríos meándricos de baja pendiente y alta sedimentación. En contraste, un parámetro que sí fue calculado y determinado relevante en este trabajo fue la densidad de drenaje, que para todas las cuencas en análisis describe valores bajos, acorde a terrenos menos abruptos, de suaves pendientes y lluvias estacionales. Al usar la razón hipsométrica, los modelos de cuencas andinas se enfocan en interpretar el impacto de la variación del relieve en la esorrentía, sugiriéndolo como enfoque geomorfológico. Los modelos costeros, en cambio, al priorizar el perímetro y la densidad de drenaje, sugieren mayor relevancia de la forma de la cuenca y la distribución del drenaje como enfoques geomorfológicos, enfocándose en capturar las dinámicas de drenajes más extendidos y de menor pendiente. Además, dado las variables que entrega la versión del producto grillado usada en este trabajo, no se contó con las temperaturas medias, sino con los extremos de temperatura. Esto explica el uso de los extremos de temperatura en la calibración de todos los modelos de regresión múltiple, cosa que no ocurre en los modelos en cuencas andinas, donde en ciertos modelos bastaba la temperatura media, o solo la máxima. Ambos casos de estudio coinciden en seleccionar como variables predictoras relevantes las precipitaciones, el área, algún parámetro de temperatura, además del caudal de la cuenca donante.

En el caso de las cuencas montañosas, se contó con varias cuencas en monitoreo con las que contrastar resultados, para las cuales se simuló una serie de tiempo de caudales históricos en un rango de tiempo

acotado. En esta memoria, se contó con dos cuencas, de las cuales solo se pudo estudiar una, por lo que para la segunda instancia de validación hubo que contrastar modelos con distintas cuencas donantes para la misma cuenca objetivo, encontrando diferencias relevantes en los resultados dependiendo de la elección de la cuenca donante.

Finalmente, se simuló una serie histórica completa de caudales medios diarios para la cuenca en monitoreo, utilizando el modelo de mejor ajuste y las cuencas donantes con mejor disponibilidad de datos para el período 1983 – 2020.

Como posibles líneas de investigación futuras, sería ideal extender este estudio a nuevas cuencas sin registros en la zona, con el fin de contrastar modelos y su desempeño. Además, dado el contexto geográfico, sería interesante poder capturar los procesos de infiltración y almacenamiento de las cuencas, para poder describir mejor el comportamiento de ellas, especialmente los caudales de recesión. Así como esta metodología ha sido aplicada para cuencas andinas y también costeras del centro sur de Chile, podría aplicarse en distintas latitudes, para ver las diferencias en las selecciones e impacto de otras variables, como los regímenes de precipitaciones o series de temperatura, entre otras.

REFERENCIAS

- Blöschl, G., Bierkens, M. F., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J. W., McDonnell, J. J., Savenije, H. H. G., Sivapalan, M., Stumpp, C., Toth, E., Volpi, E., Carr, G., Lupton, C., Salinas, J. L., Széles, B., Viglione, A., Aksoy, H., . . . Kalantari, Z. (2019). Twenty-three Unsolved Problems in Hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10), 1141-1158. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>
- Dasgupta, R., Das, S., Banerjee, G., y Mazumdar, A. (2024). Revisit hydrological modeling in ungauged catchments comparing regionalization, satellite observations, and machine learning approaches. *HydroResearch*, 7, 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2023.11.001>
- Devia, G. K., Ganasri, B., y Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Du, T. L., Lee, H., Bui, D. D., Arheimer, B., Li, H., Olsson, J., Darby, S. E., Sheffield, J., Kim, D., y Hwang, E. (2020). Streamflow prediction in “geopolitically ungauged” basins using satellite observations and regionalization at subcontinental scale. *Journal Of Hydrology*, 588, 125016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125016>
- Gianfagna, C. E., Johnson, C., Chandler, D. G., y Hofmann, C. (2015). Watershed area ratio accurately predicts daily streamflow in nested catchments in the Catskills, New York. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 583-594. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.09.002>
- Golian, S., Murphy, C., y Meresa, H. (2021). Regionalization of hydrological models for flow estimation in ungauged catchments in Ireland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100859. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100859>
- Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., y Wang, Z. (2020). Regionalization of Hydrological Modeling for Predicting streamflow in ungauged Catchments: A Comprehensive Review. *WIREs Water*, 8(1). <https://doi.org/10.1002/wat2.1487>
- Liu, L., Zhou, L., Gusyev, M., y Ren, Y. (2023). Unravelling and improving the potential of global discharge reanalysis dataset in streamflow estimation in ungauged basins. *Journal Of Cleaner Production*, 419, 138282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138282>

- Muñoz, E., Acuña, M., Lucero, J., y Rojas, I. (2018). Correction of precipitation records through inverse modeling in watersheds of South-Central Chile. *Water*, 10(8), 1092. <https://doi.org/10.3390/w10081092>
- Perera, U., Coralage, D., Ekanayake, I., Alawatugoda, J., y Meddage, D. (2024). A new frontier in streamflow modeling in ungauged basins with sparse data: A modified generative adversarial network with explainable AI. *Results in Engineering*, 21, 101920. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101920>
- Razavi, T., y Coulibaly, P. (2013). Streamflow prediction in ungauged basins: Review of Regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 958-975. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000690](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000690)
- Razavi, T., y Coulibaly, P. (2016). Improving streamflow estimation in ungauged basins using a multi-modelling approach. *Hydrological Sciences Journal*, 61(15), 2668-2679. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1154558>
- Saenger, V., (2023). Simulación de caudales en cuencas del centro-sur de Chile. [Trabajo de pregrado sin publicar] Universidad de Concepción.
- Sivapalan, M., Blöschl, G., Zhang, L., y Vertessy, R. (2003). Downward approach to hydrological prediction. *Hydrological Processes*, 17(11), 2101-2111. <https://doi.org/10.1002/hyp.1425>
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P. A., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., y Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538–2567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>
- Wagener, T., y Wheater, H. S. (2006). Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 132-154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.015>
- Wu, H., Shi, P., Qu, S., Yang, X., Zhang, H., Wang, L., Ding, S., Li, Z., Lü, M., y Qiu, C. (2024). A hydrologic similarity-based parameters dynamic matching framework: Application to enhance the real-time flood forecasting. *Science Of The Total Environment*, 907, 167767. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167767>

ANEXOS

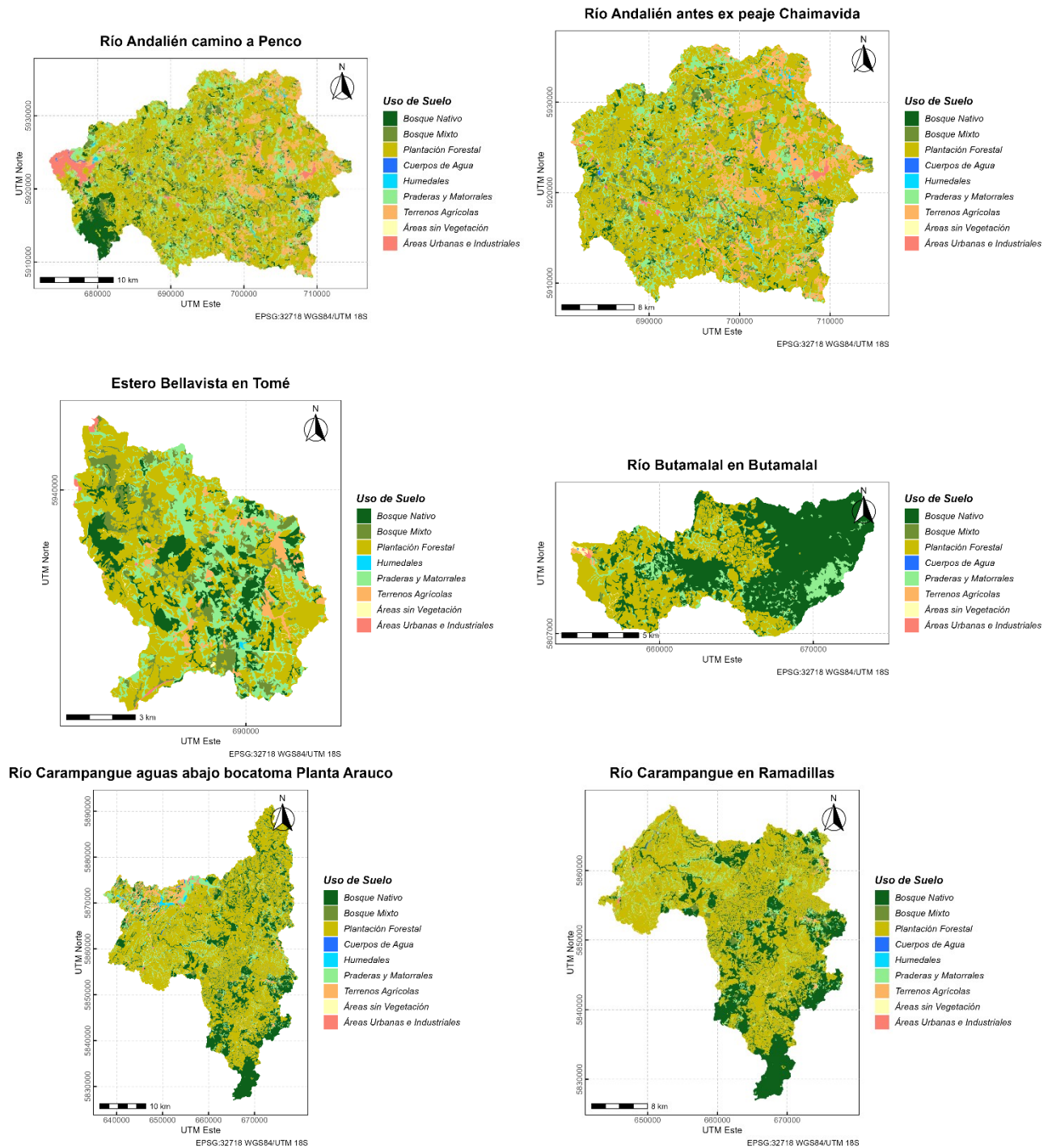
ANEXO 1.1 Contribución a los ODS

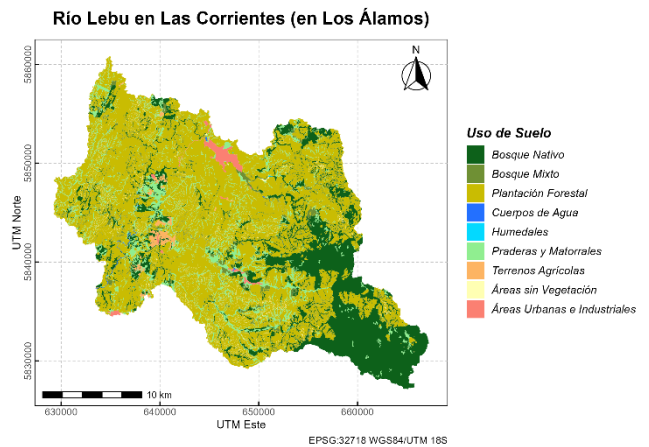
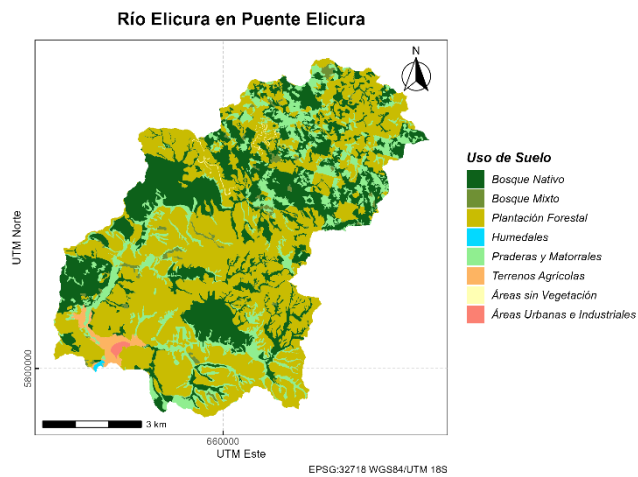
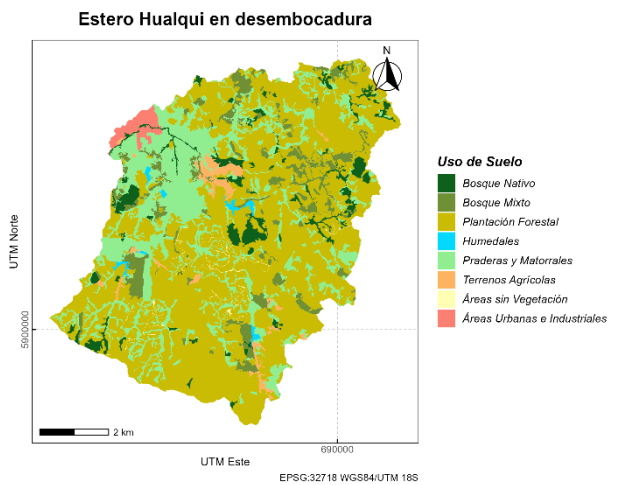
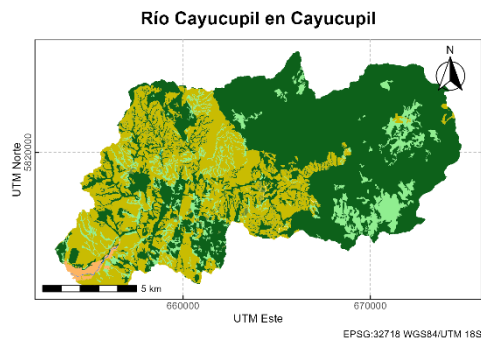
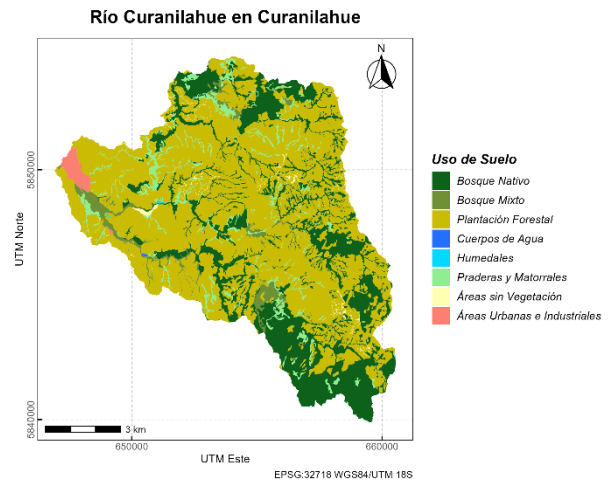
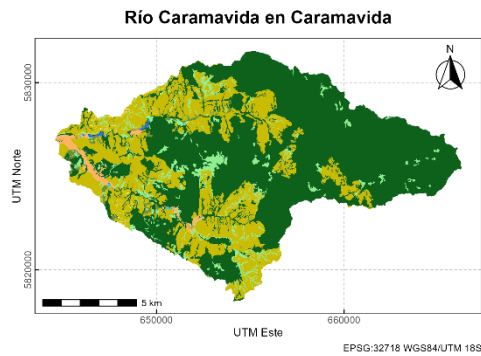
Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Esta Memoria de Título contribuye a los siguientes ODS:

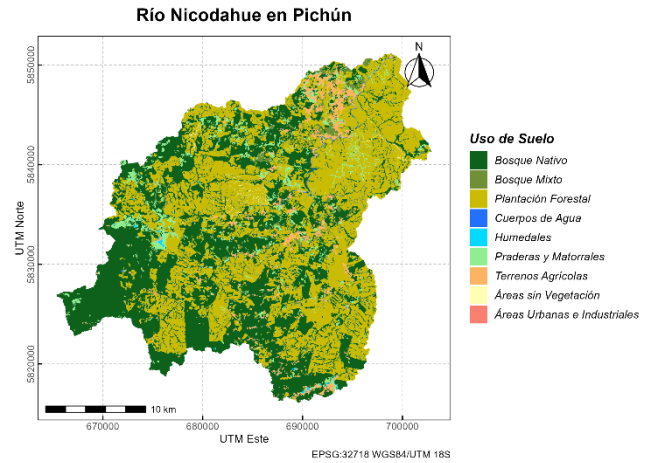
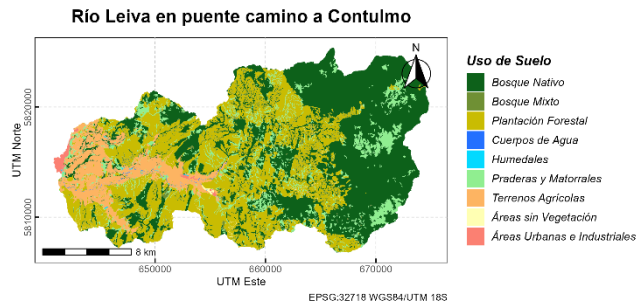
- ✓ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ✓ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ✓ ODS-13 : Acción por el clima.
- ✓ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.

Vinculación
Este trabajo aporta a la gestión sostenible del agua al generar información fluviométrica en cuencas sin registros históricos, permitiendo decisiones informadas sobre su uso (ODS 6, Meta 6.4). La simulación de caudales y la reconstrucción de series históricas ayudan a comprender la disponibilidad hídrica en escenarios de cambio climático y mejorar la predicción de eventos como sequías o inundaciones (ODS 13, Meta 13.1). Además, el conocimiento de los caudales es clave para la gestión de ecosistemas fluviales, asegurando su equilibrio ecológico y la protección de la biodiversidad (ODS 15, Meta 15.1). Finalmente, esta información es esencial para el diseño y planificación de infraestructura hidráulica como embalses, canales y obras de control de inundaciones (ODS 9, Meta 9.1).

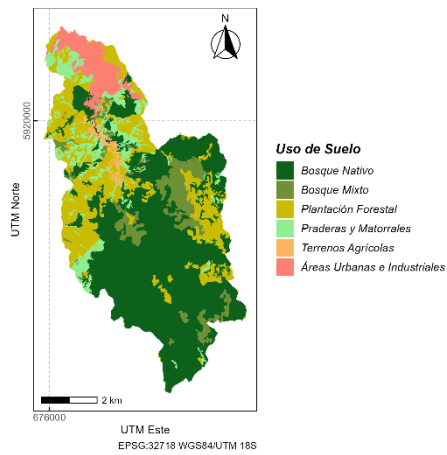
ANEXO 4.1 Usos de suelo por cuenca



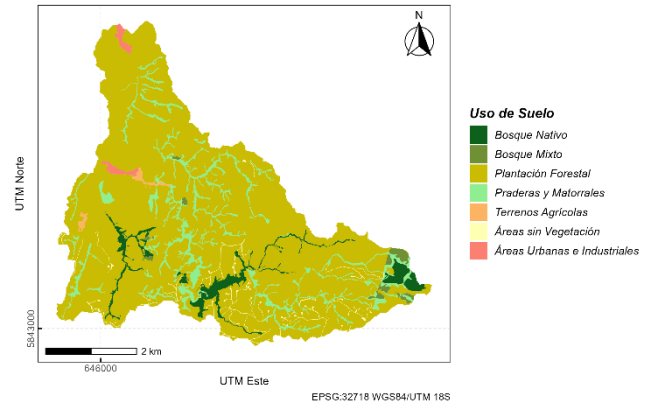




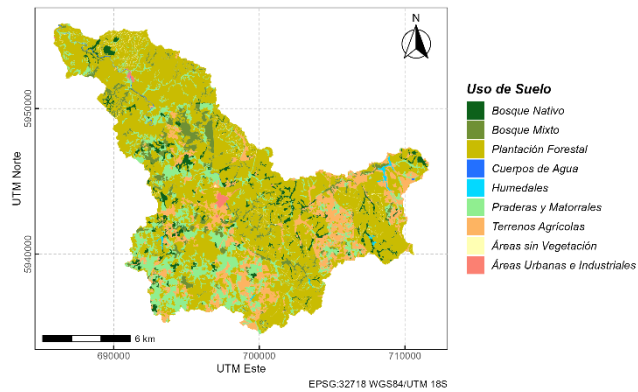
Estero Nonguén frente U. del Biobío



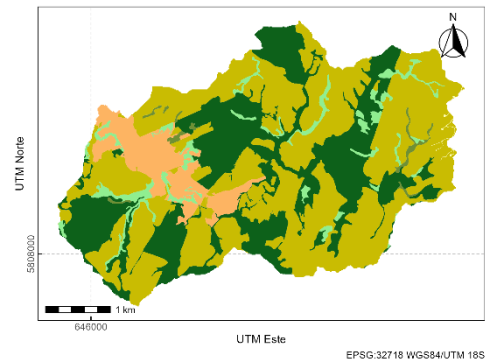
Estero Plegarias antes de junta con río Curanilahue



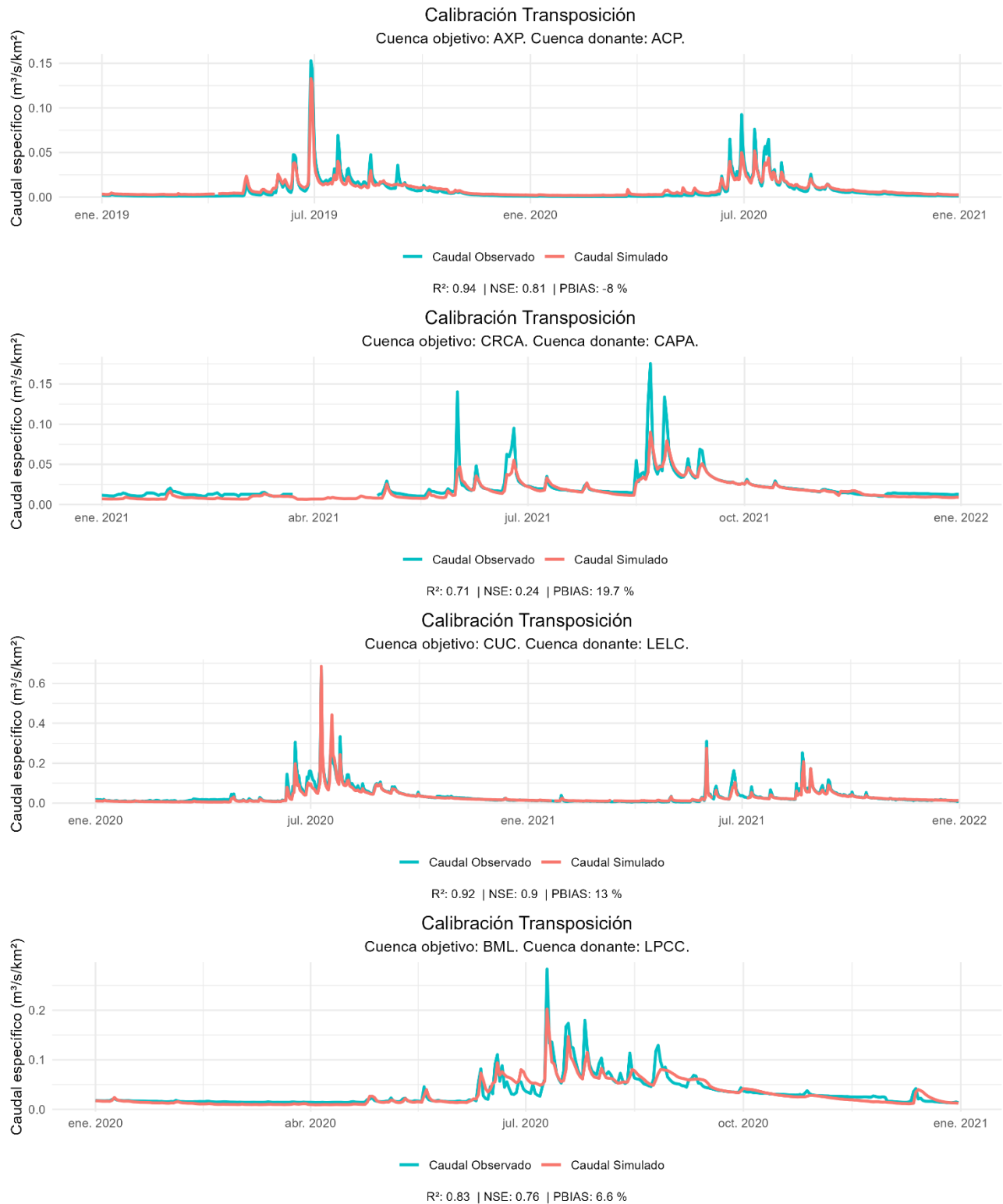
Río Pingüeral en Dichato

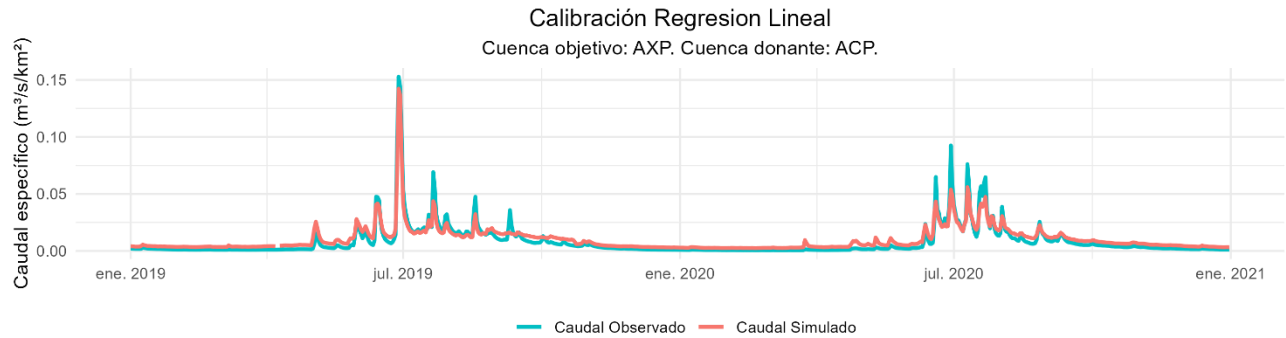


Río Reputo en Reputo

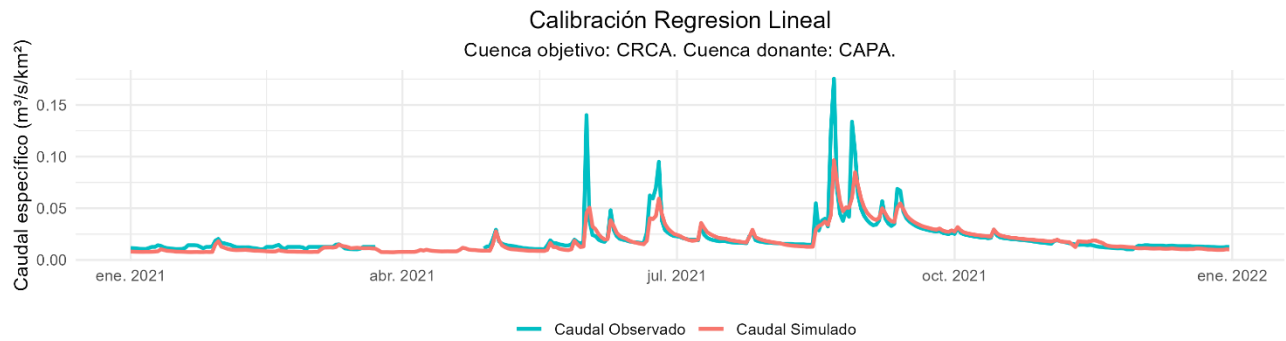


ANEXO 4.2 Caudal observado versus simulado calibración

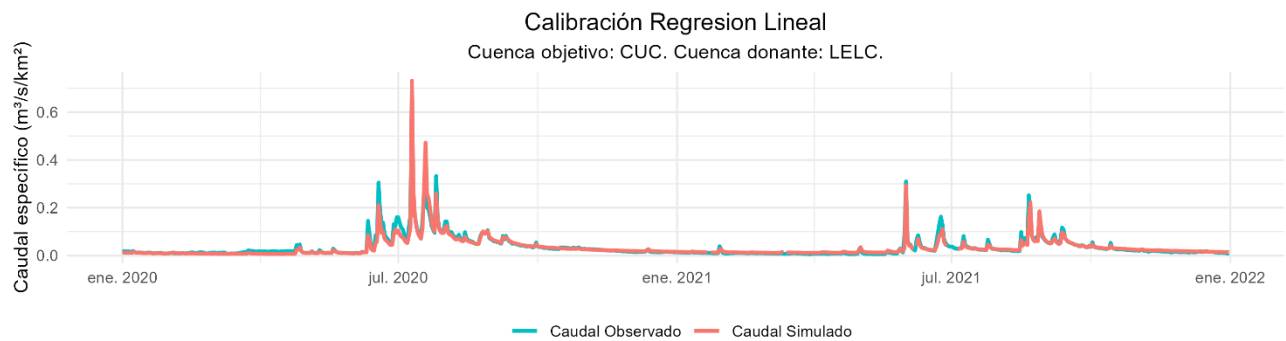




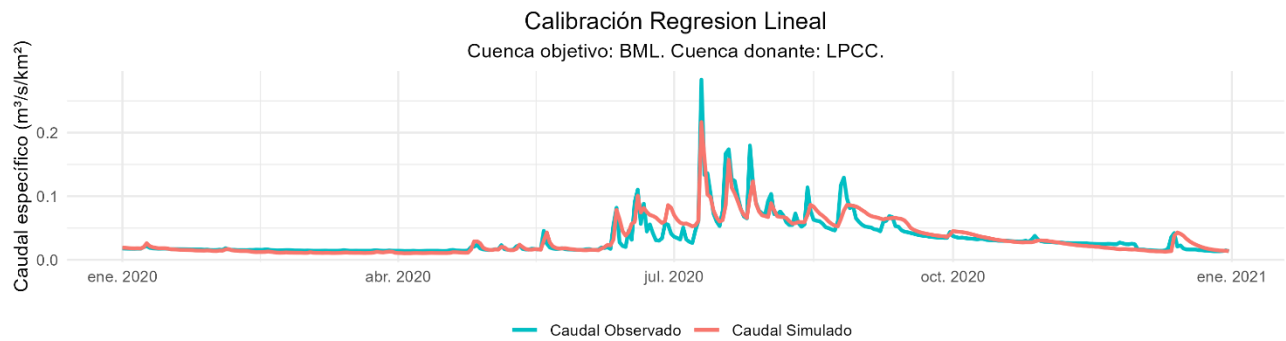
$R^2: 0.94$ | $\text{NSE}: 0.84$ | $\text{PBIAS}: -18.7\%$



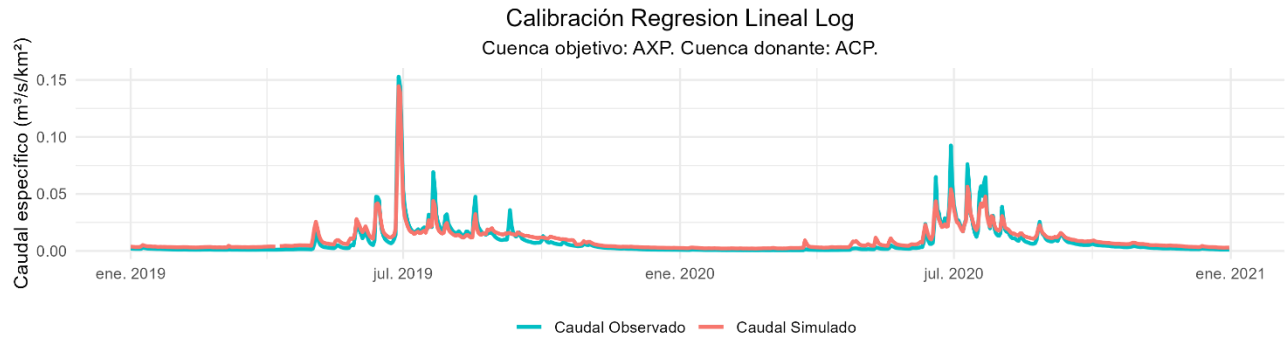
$R^2: 0.71$ | $\text{NSE}: 0.41$ | $\text{PBIAS}: 9\%$



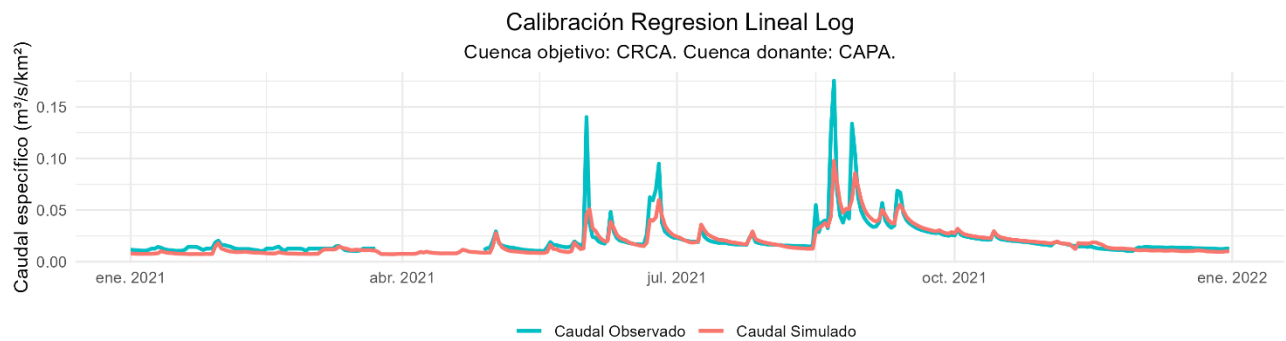
$R^2: 0.92$ | $\text{NSE}: 0.92$ | $\text{PBIAS}: 4.2\%$



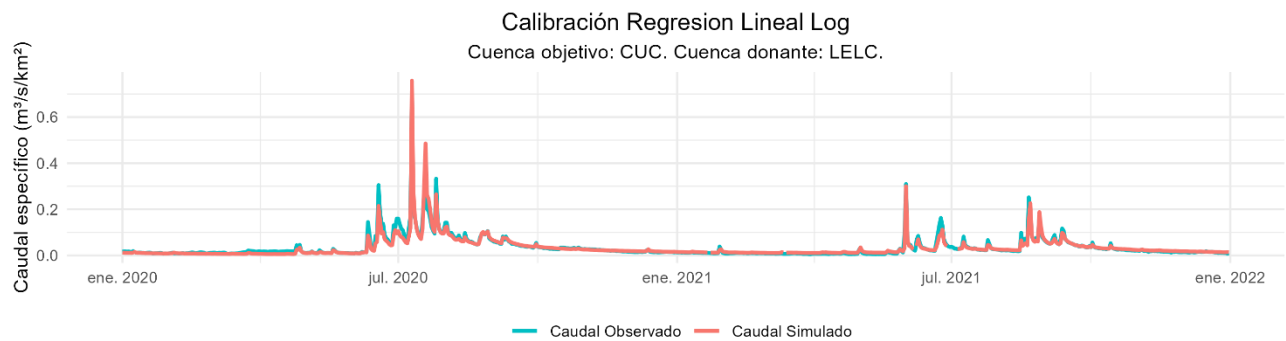
$R^2: 0.83$ | $\text{NSE}: 0.8$ | $\text{PBIAS}: -1.7\%$



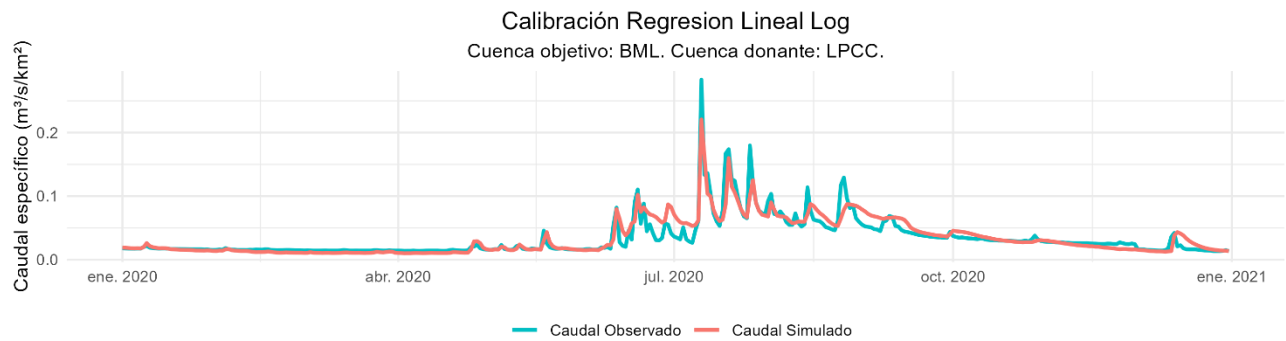
$R^2: 0.94$ | $\text{NSE}: 0.86$ | $\text{PBIAS}: -16.4 \%$



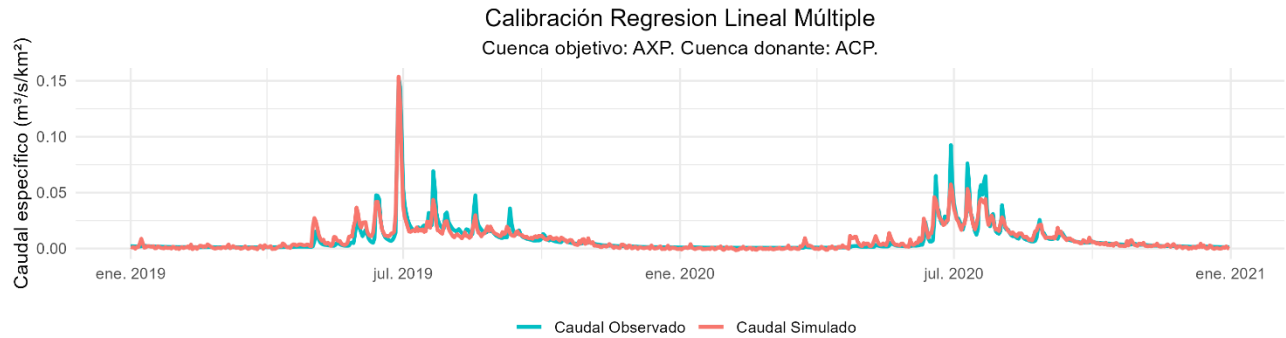
$R^2: 0.71$ | $\text{NSE}: 0.43$ | $\text{PBIAS}: 9.7 \%$



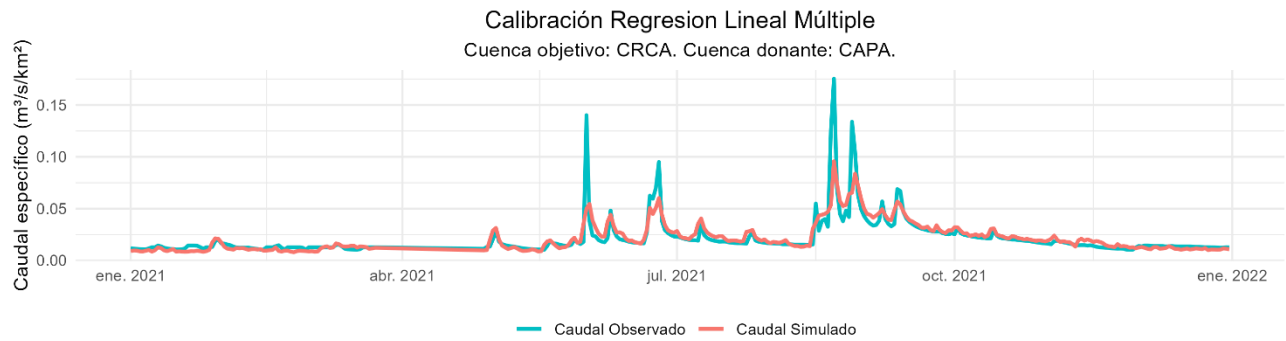
$R^2: 0.92$ | $\text{NSE}: 0.92$ | $\text{PBIAS}: 3.7 \%$



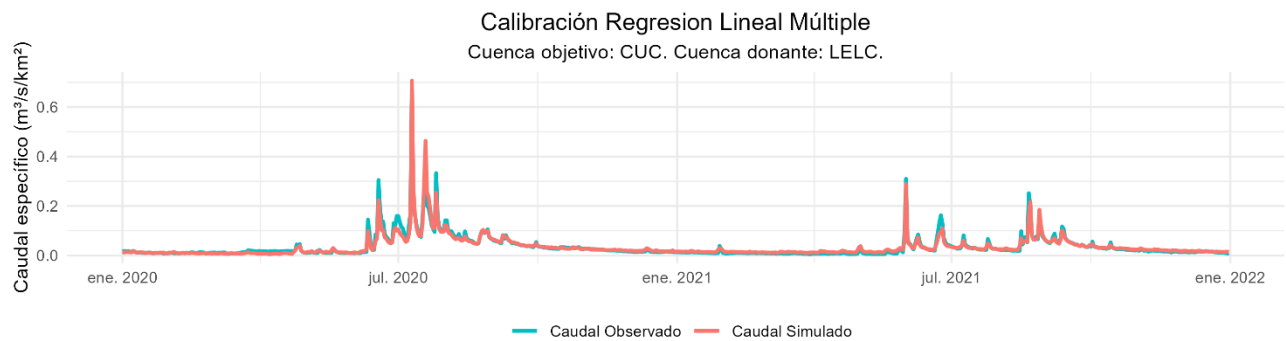
$R^2: 0.83$ | $\text{NSE}: 0.8$ | $\text{PBIAS}: -2.1 \%$



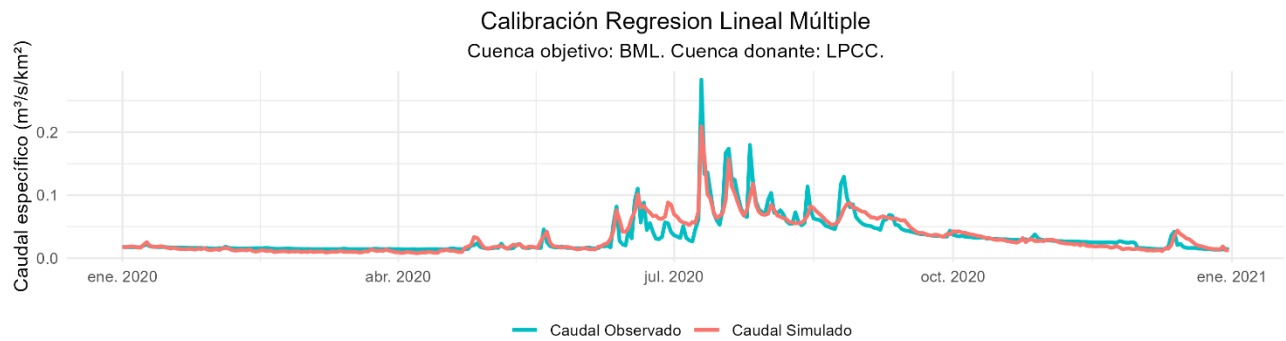
$R^2: 0.9$ | $\text{NSE}: 0.86$ | $\text{PBIAS}: 0\%$



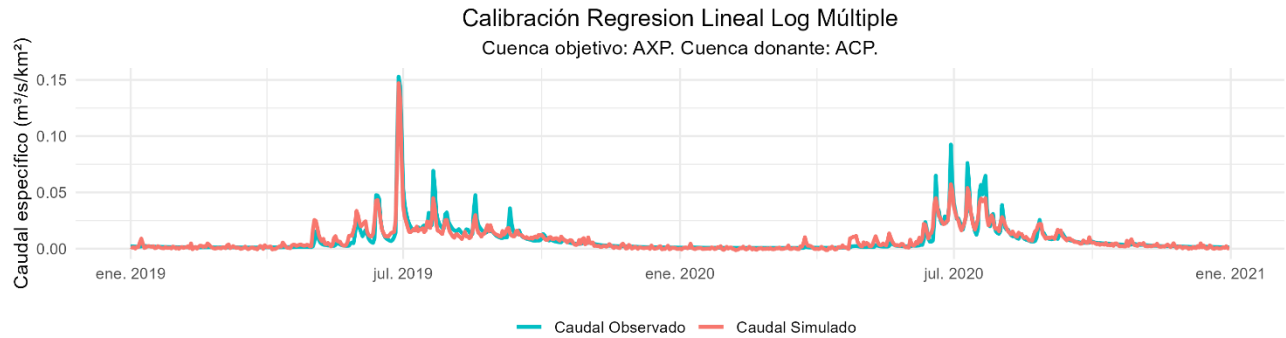
$R^2: 0.71$ | $\text{NSE}: 0.47$ | $\text{PBIAS}: 0\%$



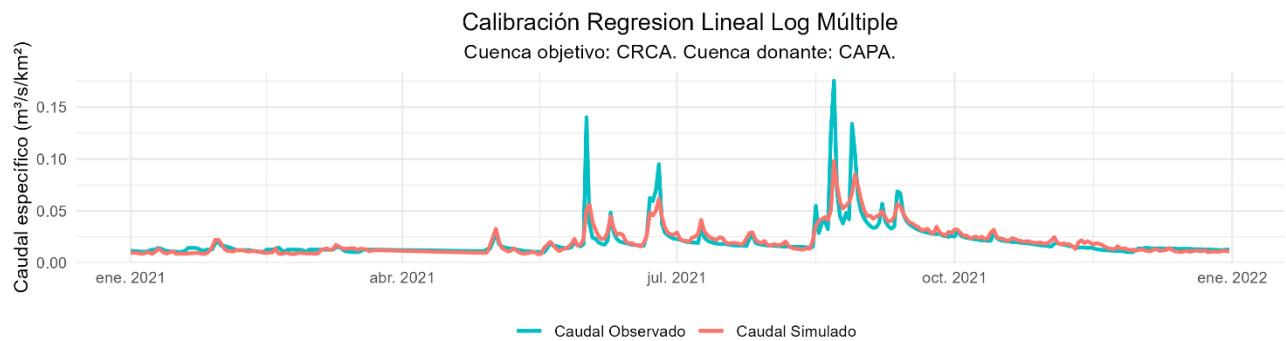
$R^2: 0.93$ | $\text{NSE}: 0.93$ | $\text{PBIAS}: 0\%$



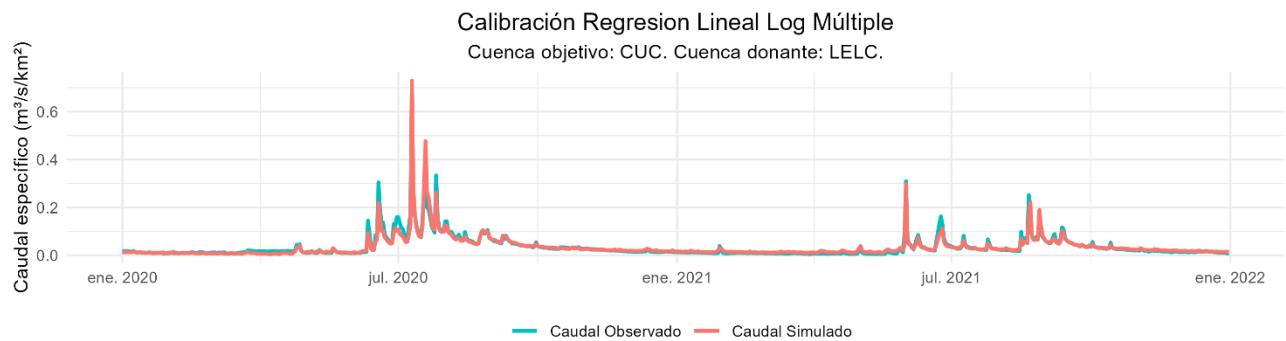
$R^2: 0.83$ | $\text{NSE}: 0.8$ | $\text{PBIAS}: 0\%$



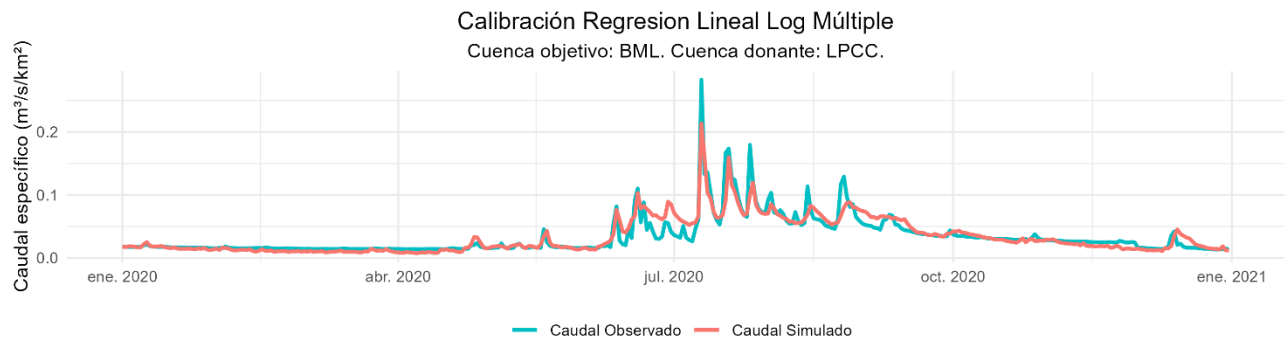
$R^2: 0.91$ | $\text{NSE}: 0.87$ | $\text{PBIAS}: 0.3\%$



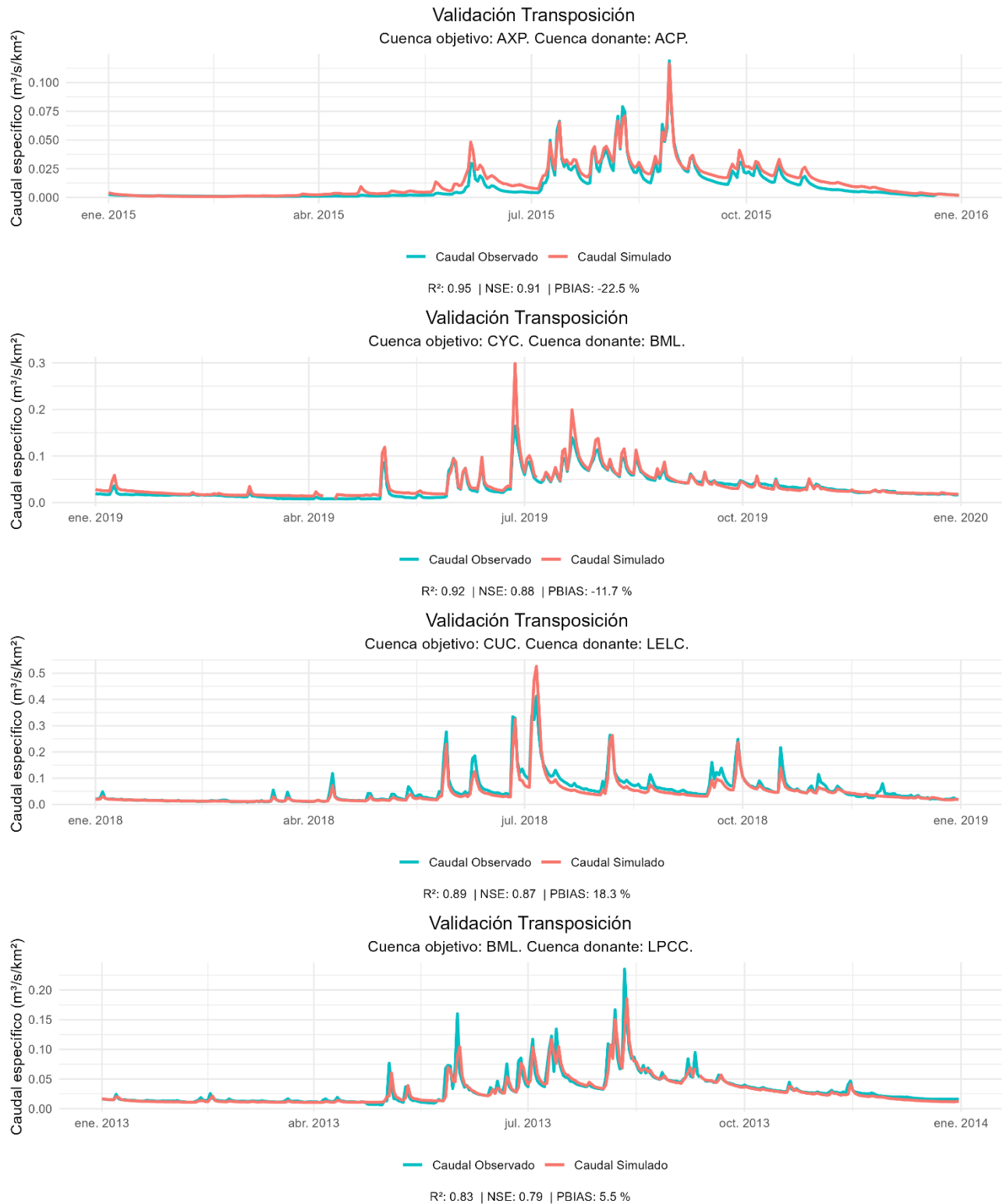
$R^2: 0.73$ | $\text{NSE}: 0.5$ | $\text{PBIAS}: 0.3\%$

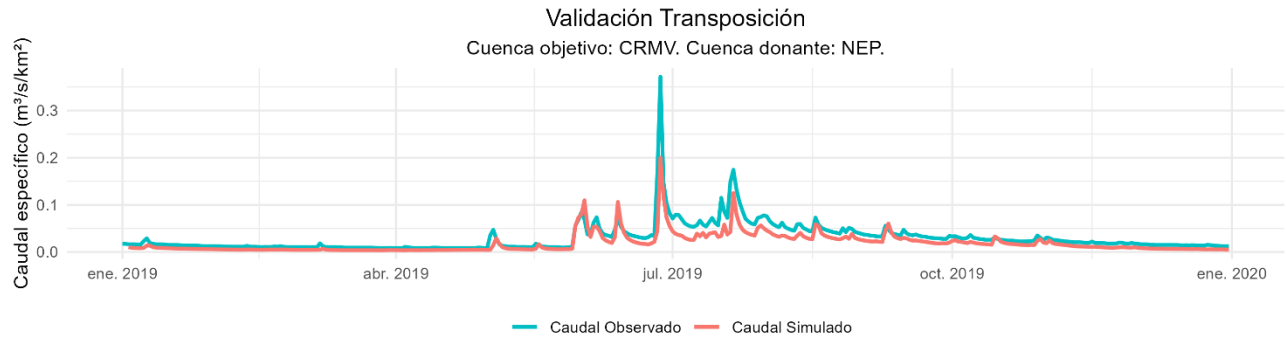


$R^2: 0.93$ | $\text{NSE}: 0.93$ | $\text{PBIAS}: 0.1\%$

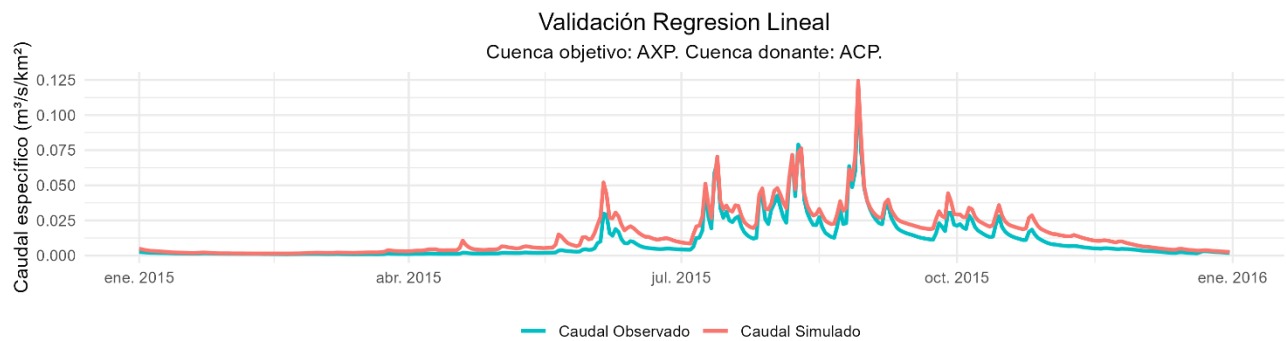


$R^2: 0.83$ | $\text{NSE}: 0.8$ | $\text{PBIAS}: 0.1\%$

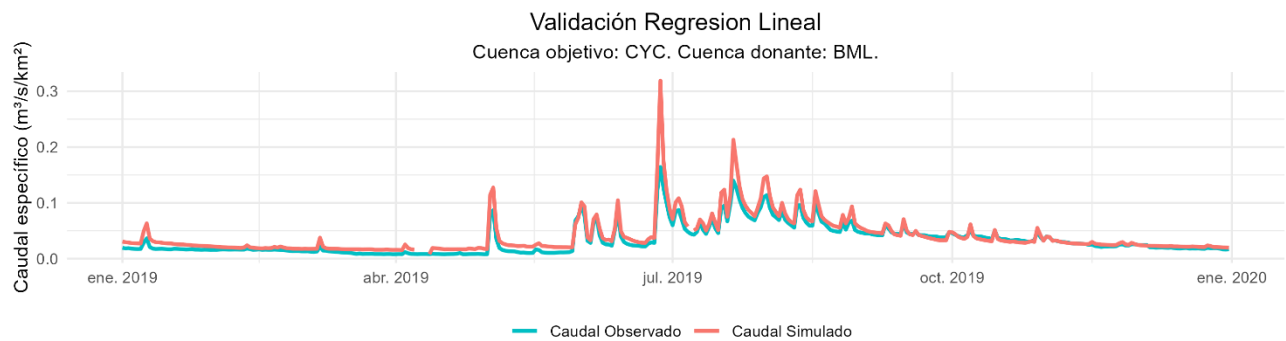
ANEXO 4.3 Caudal observado versus simulado primera validación



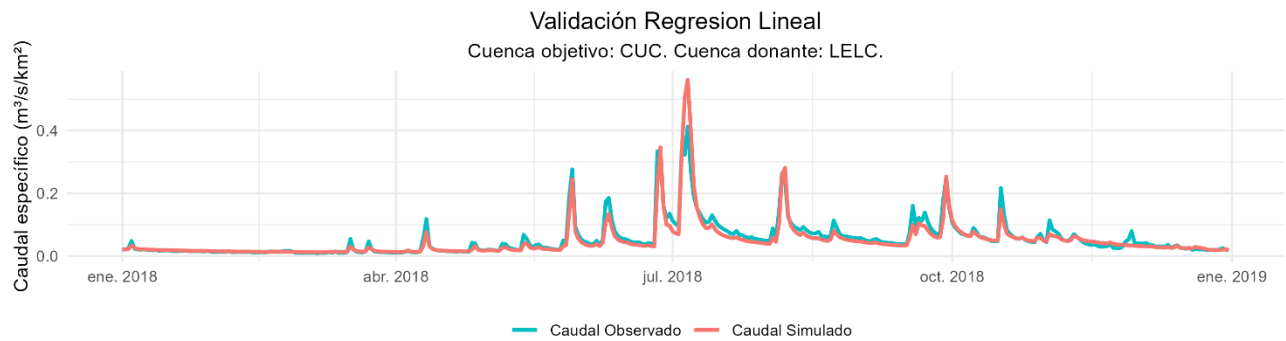
$R^2: 0.82$ | $\text{NSE}: 0.17$ | $\text{PBIAS}: 58.4 \%$



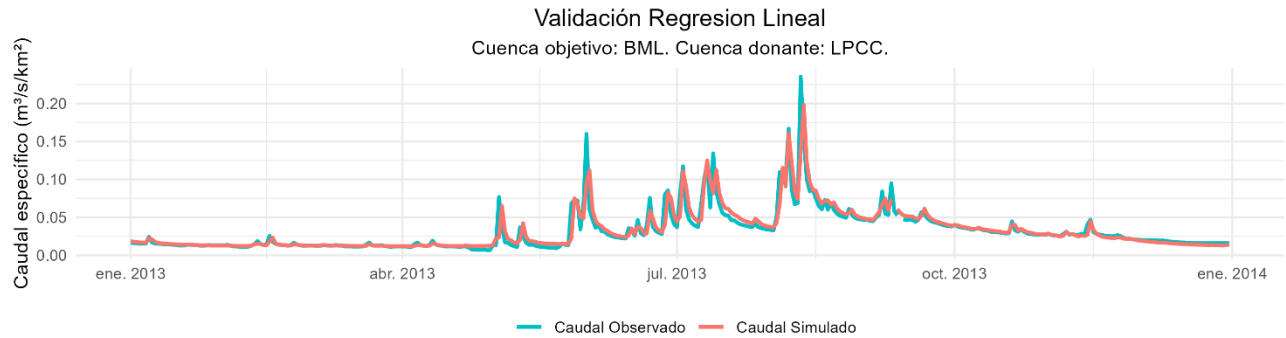
$R^2: 0.95$ | $\text{NSE}: 0.87$ | $\text{PBIAS}: -30 \%$



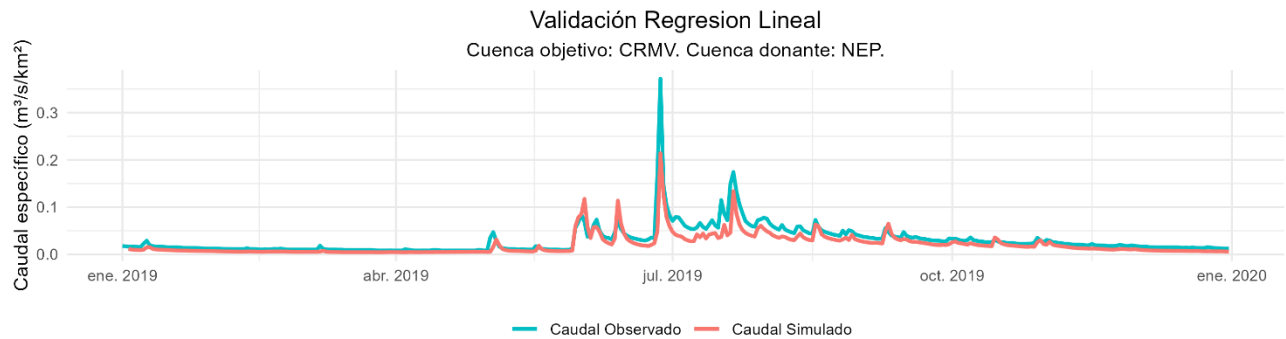
$R^2: 0.92$ | $\text{NSE}: 0.84$ | $\text{PBIAS}: -18.4 \%$



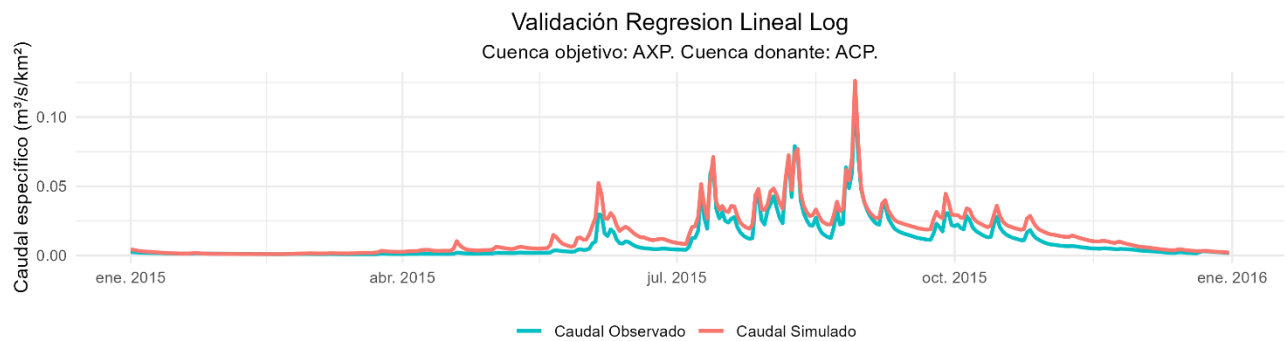
$R^2: 0.89$ | $\text{NSE}: 0.88$ | $\text{PBIAS}: 9.7 \%$



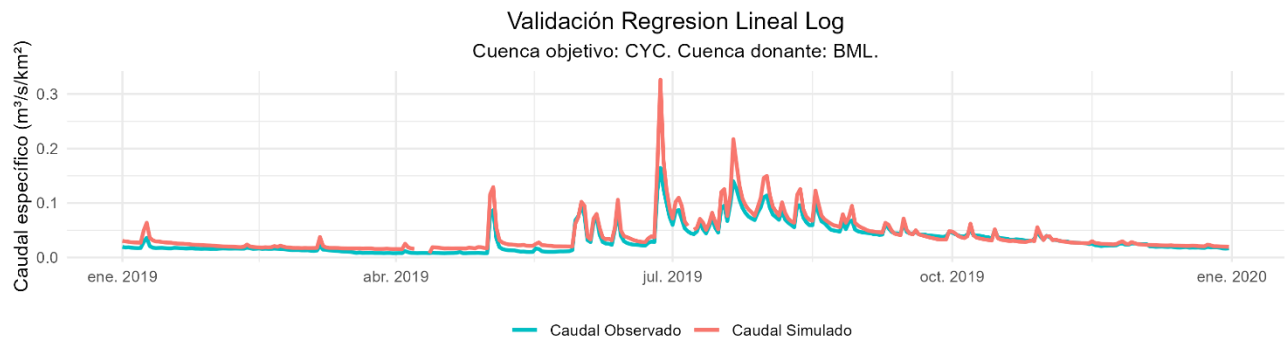
$R^2: 0.83$ | $\text{NSE}: 0.82$ | $\text{PBIAS}: -2.8 \%$



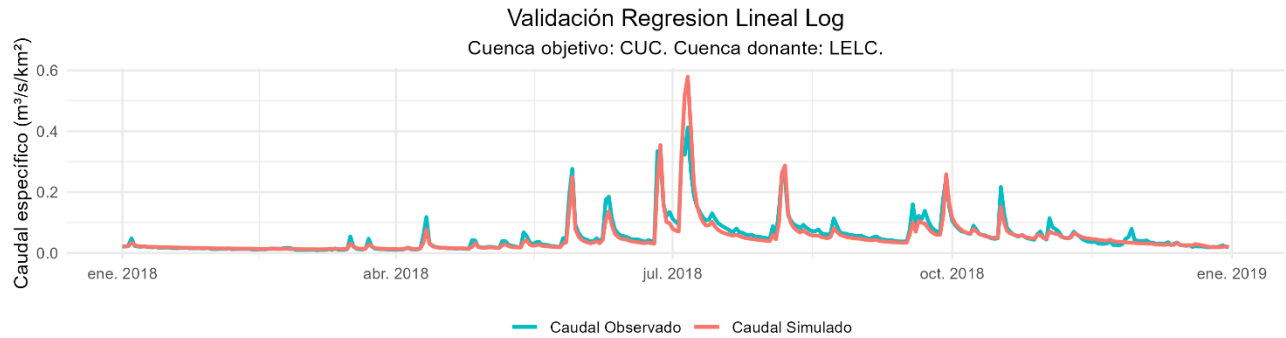
$R^2: 0.82$ | $\text{NSE}: 0.39$ | $\text{PBIAS}: 44.4 \%$



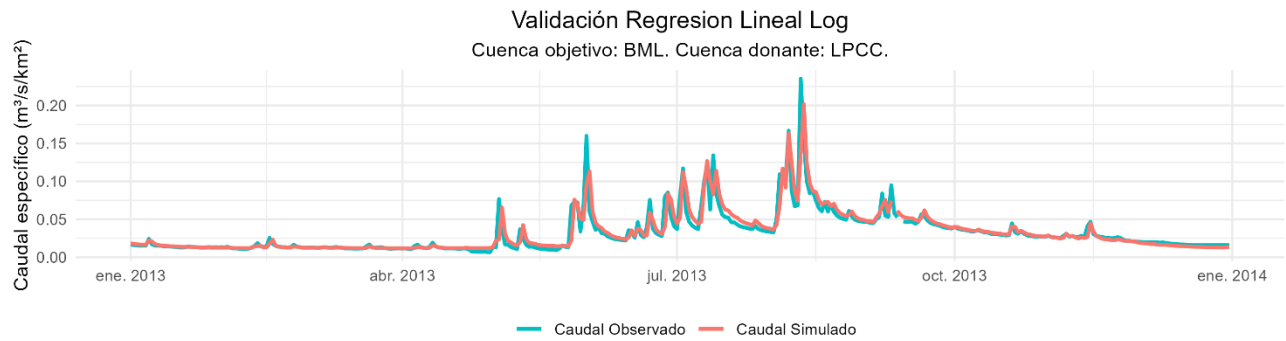
$R^2: 0.95$ | $\text{NSE}: 0.88$ | $\text{PBIAS}: -29.1 \%$



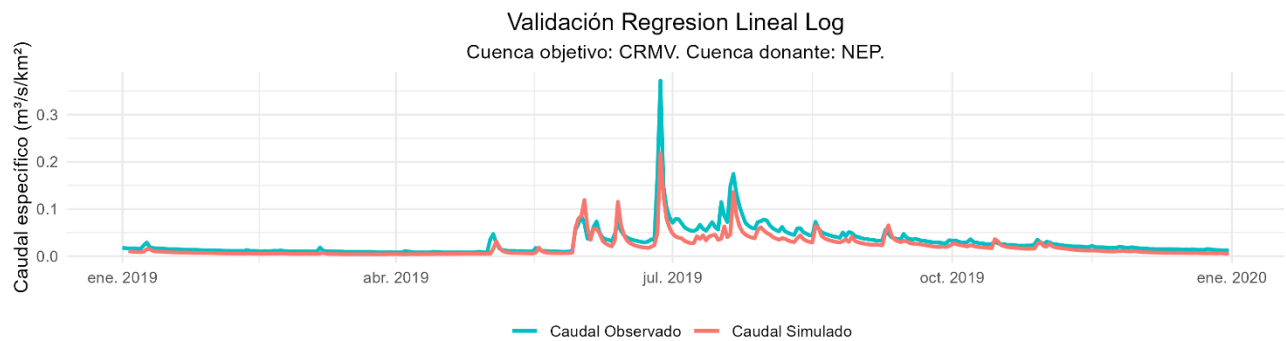
$R^2: 0.92$ | $\text{NSE}: 0.83$ | $\text{PBIAS}: -18.8 \%$



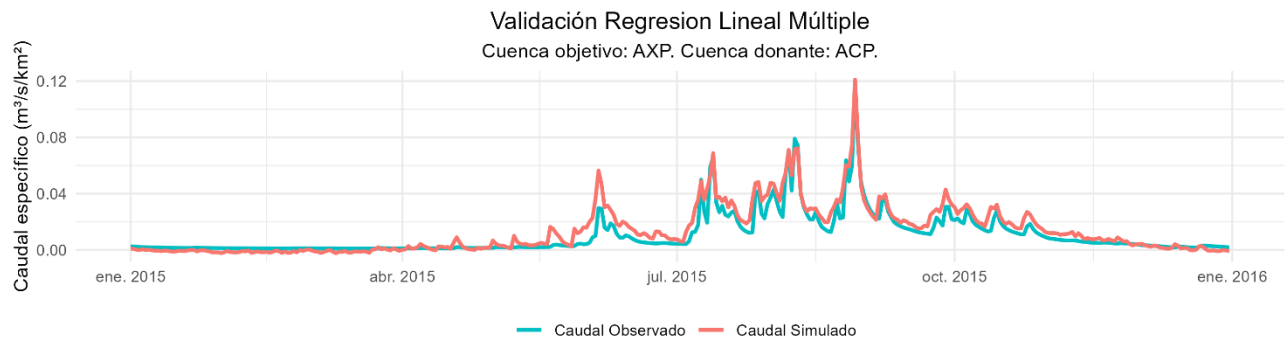
$R^2: 0.89$ | $\text{NSE}: 0.88$ | $\text{PBIAS}: 8.7\%$



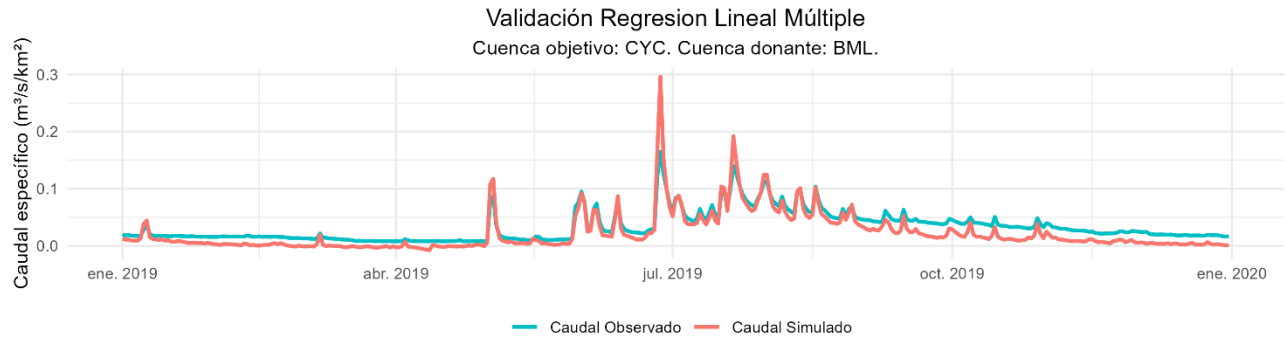
$R^2: 0.83$ | $\text{NSE}: 0.82$ | $\text{PBIAS}: -3.1\%$



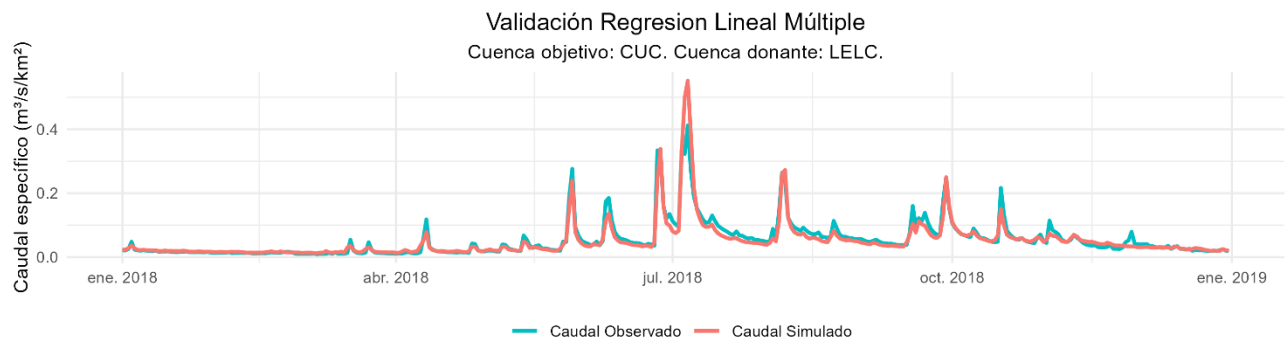
$R^2: 0.82$ | $\text{NSE}: 0.41$ | $\text{PBIAS}: 45.1\%$



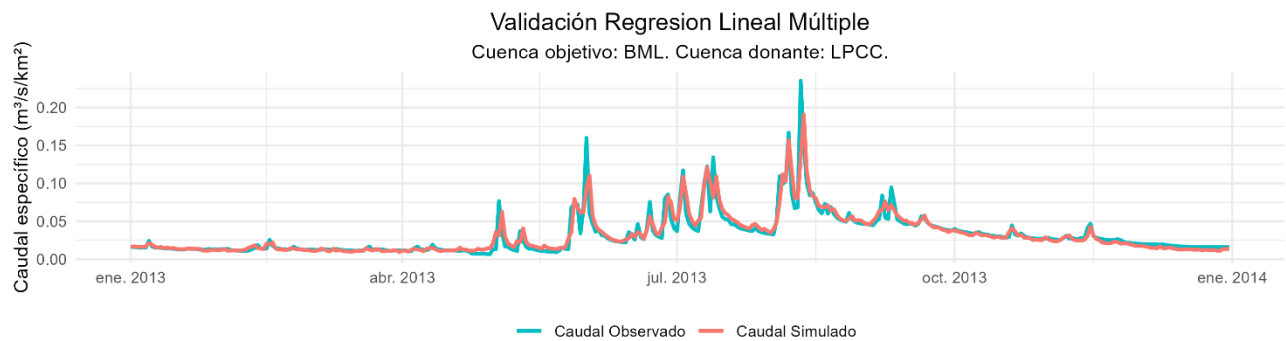
$R^2: 0.9$ | $\text{NSE}: 0.87$ | $\text{PBIAS}: -21.1\%$



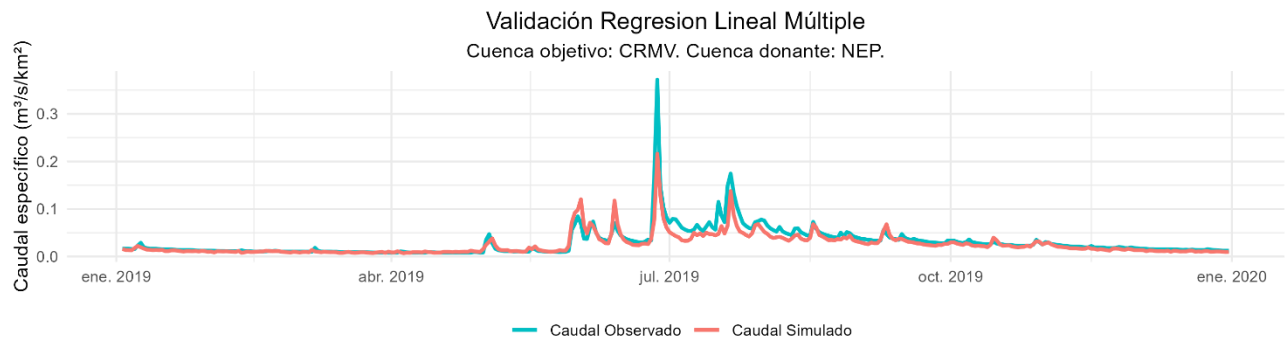
R^2 : 0.91 | NSE: 0.79 | PBIAS: 44.2 %



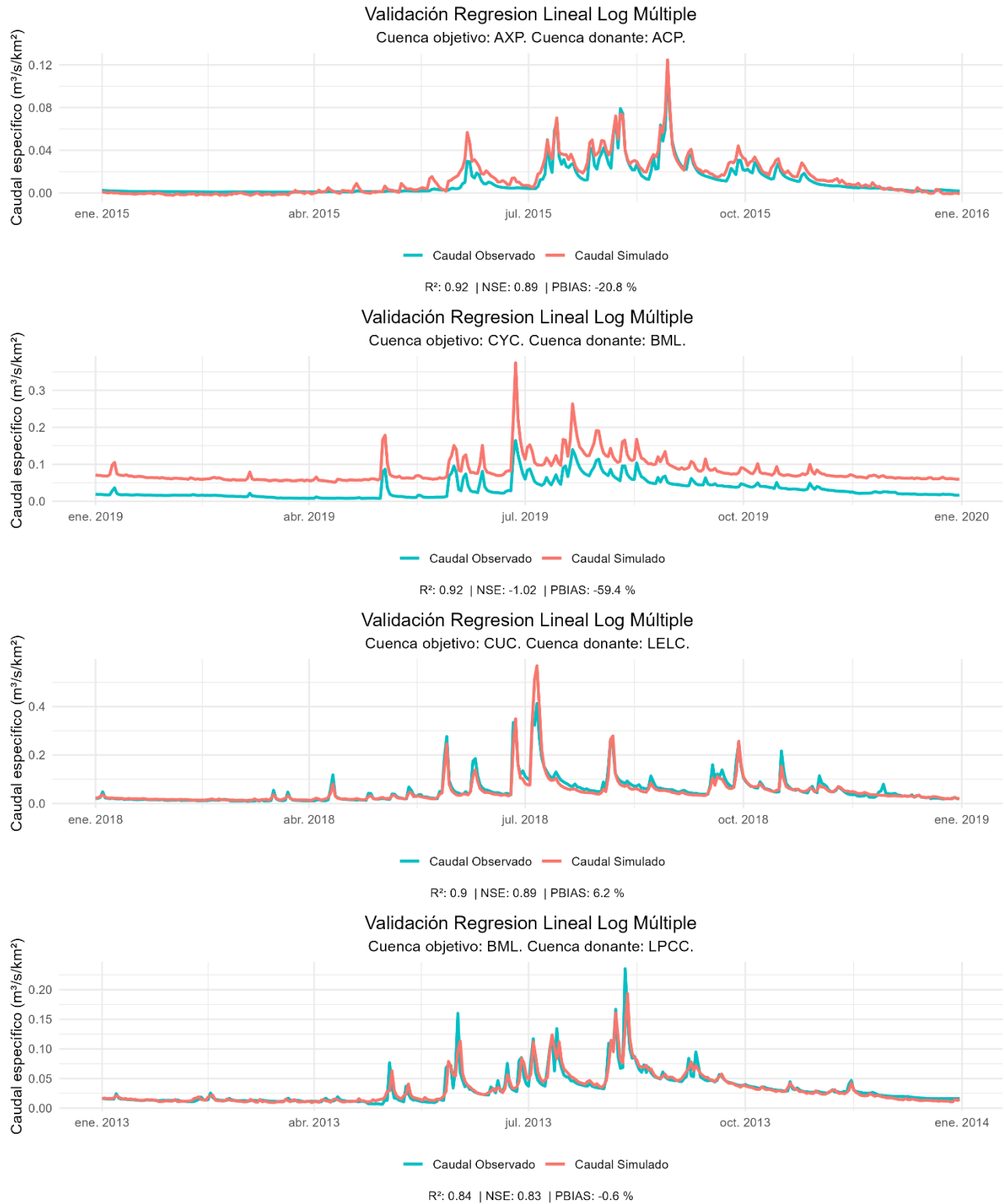
R^2 : 0.9 | NSE: 0.9 | PBIAS: 6.4 %

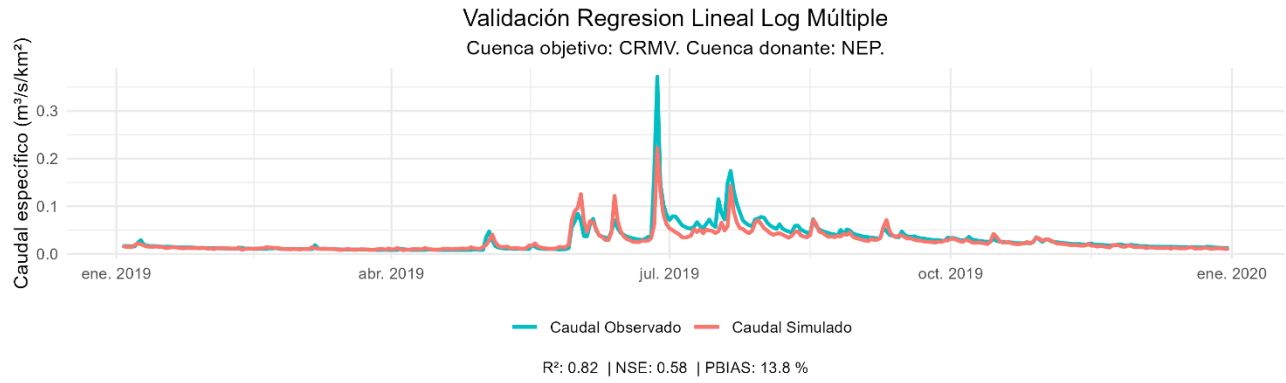


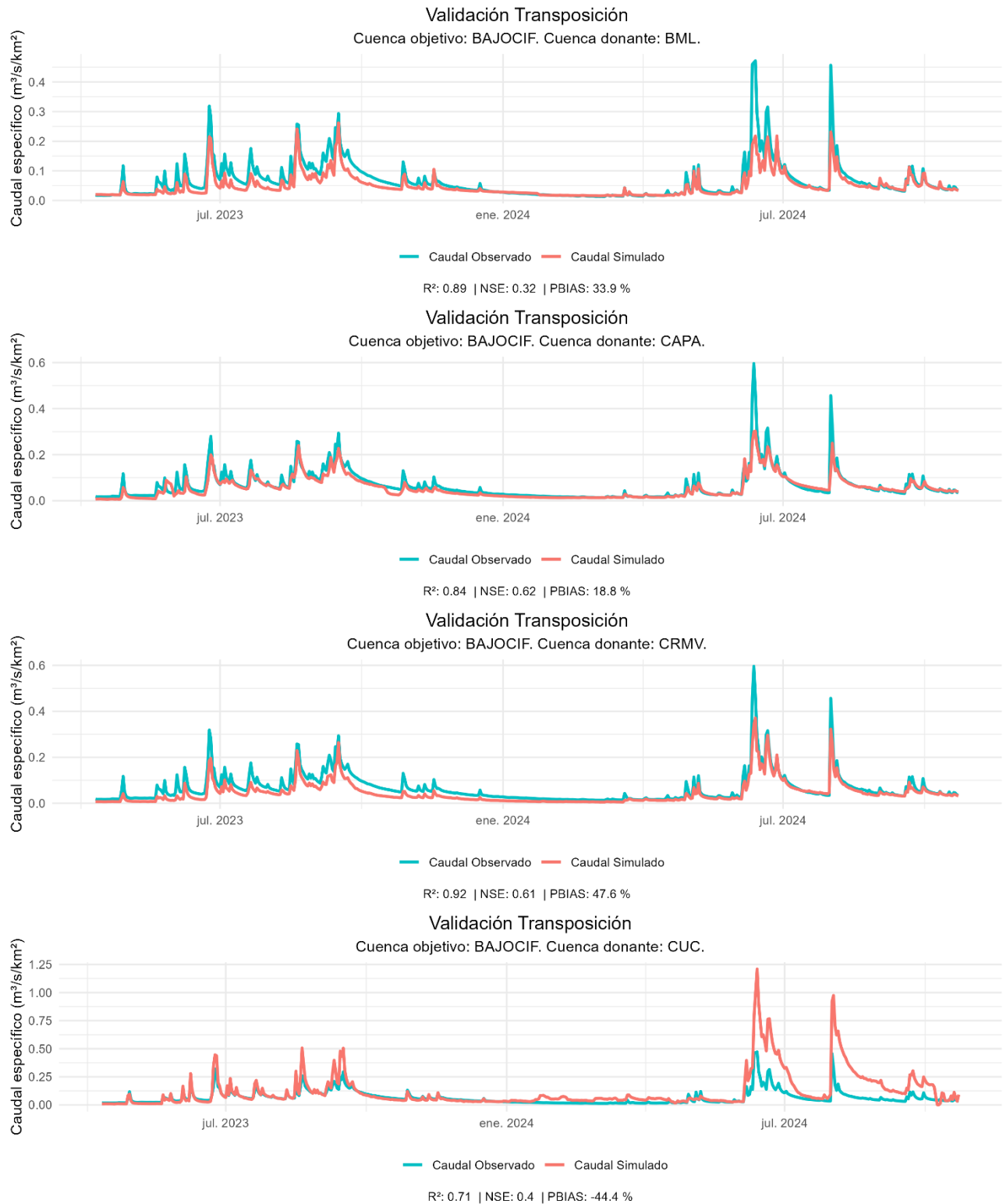
R^2 : 0.85 | NSE: 0.83 | PBIAS: -1.2 %

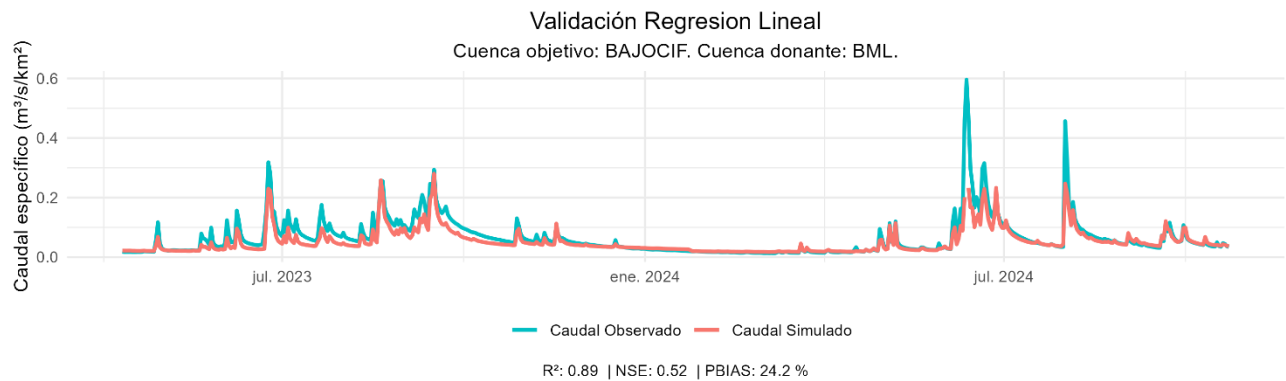
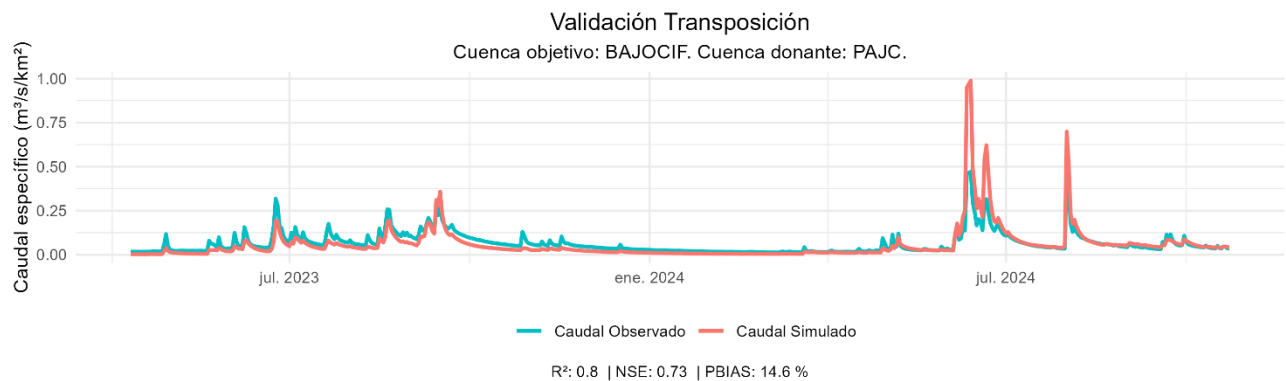
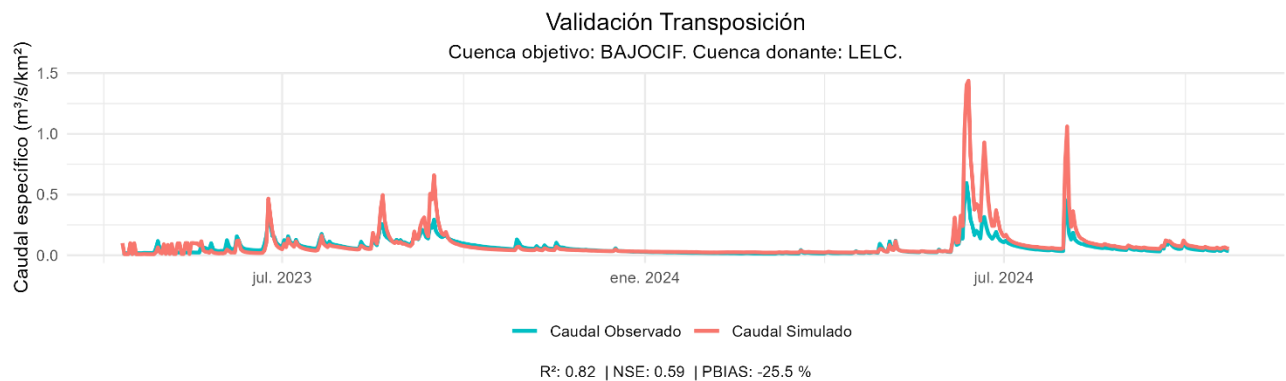
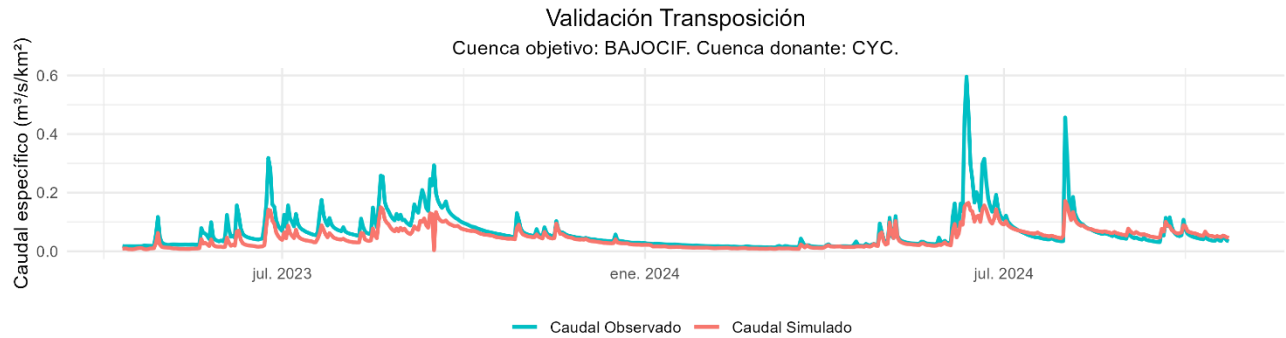


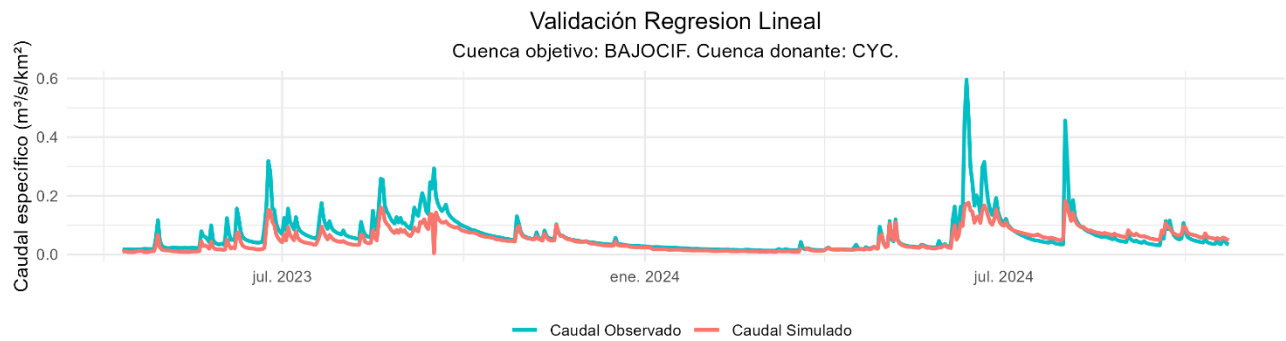
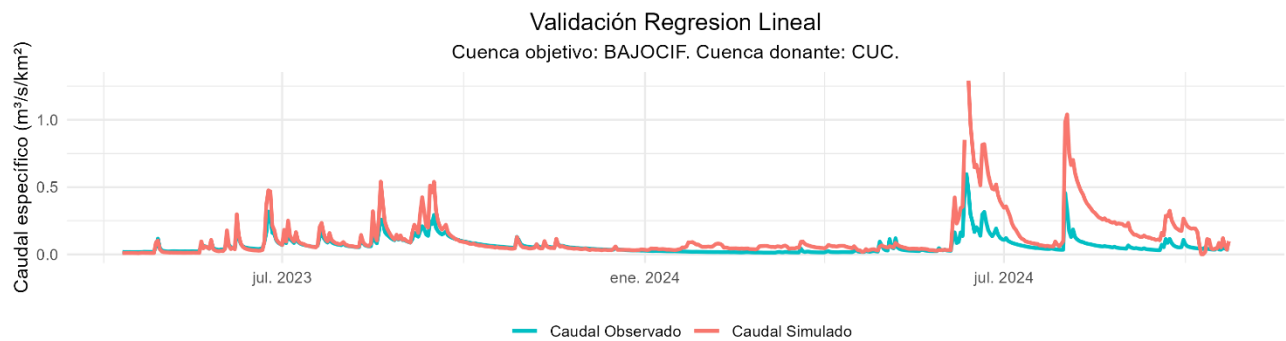
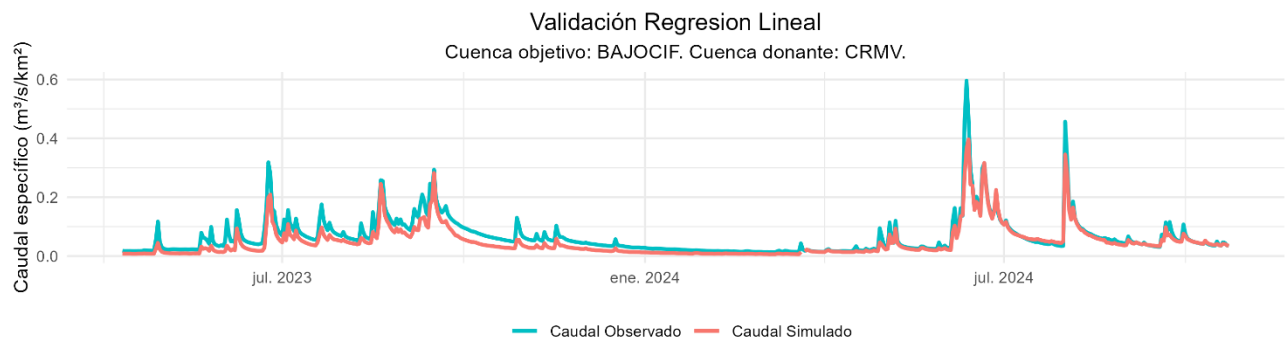
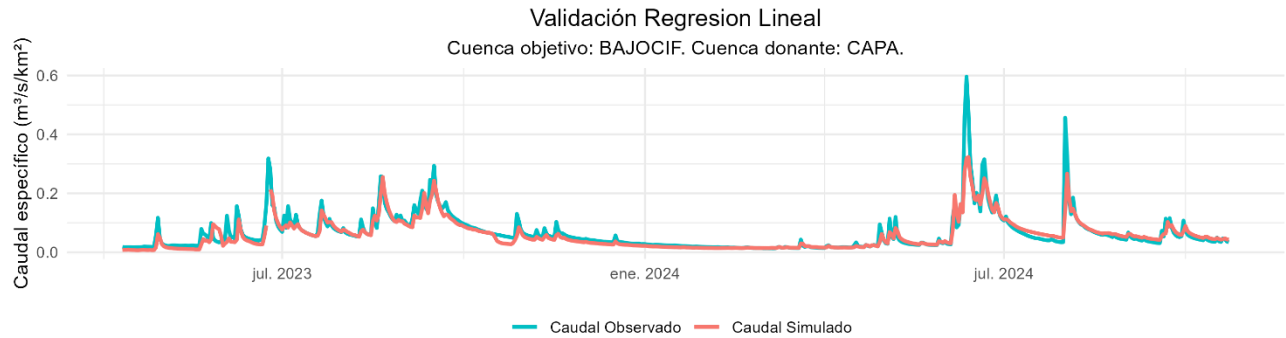
R^2 : 0.84 | NSE: 0.57 | PBIAS: 18.6 %

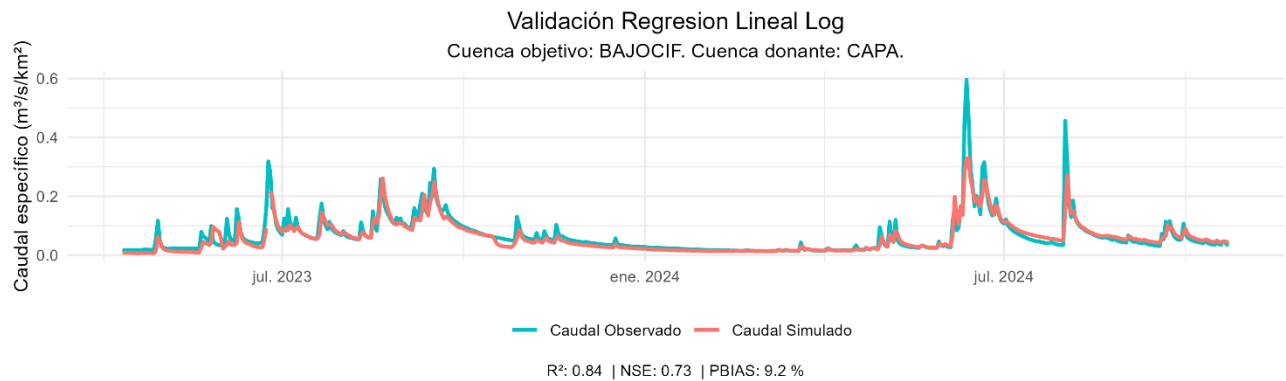
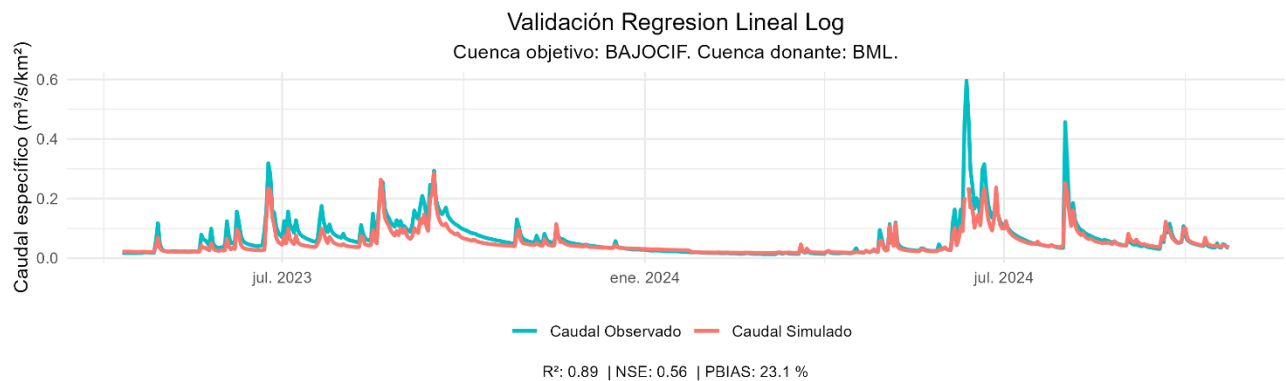
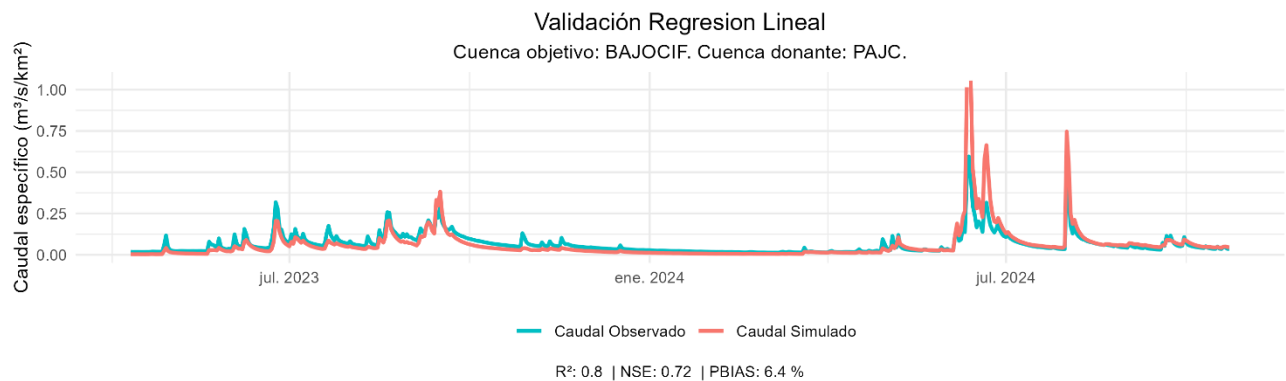
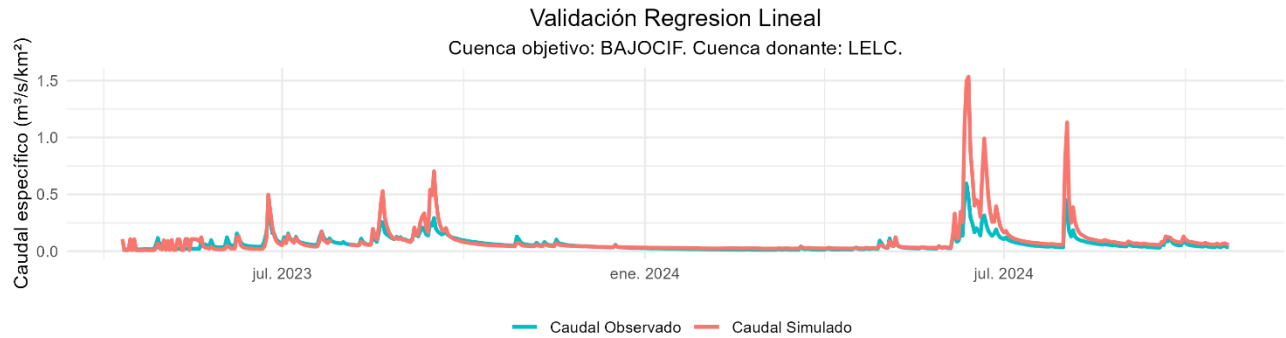


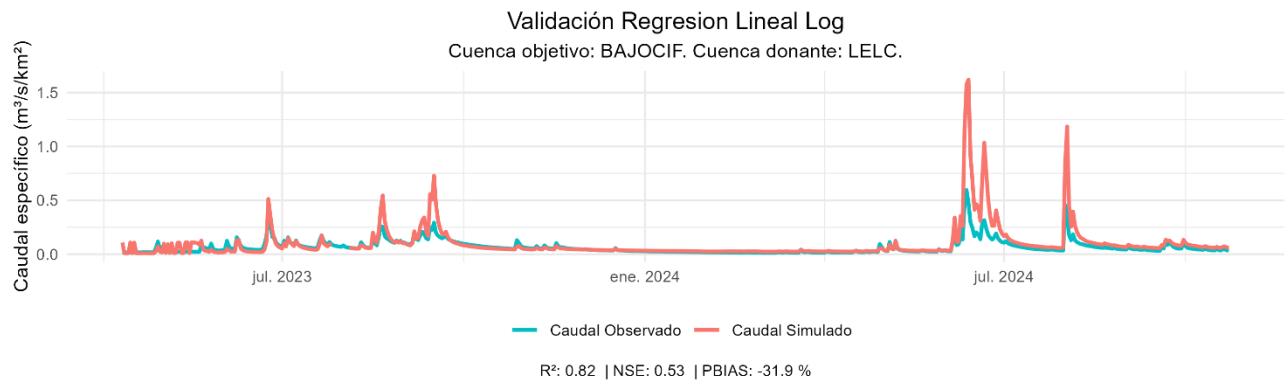
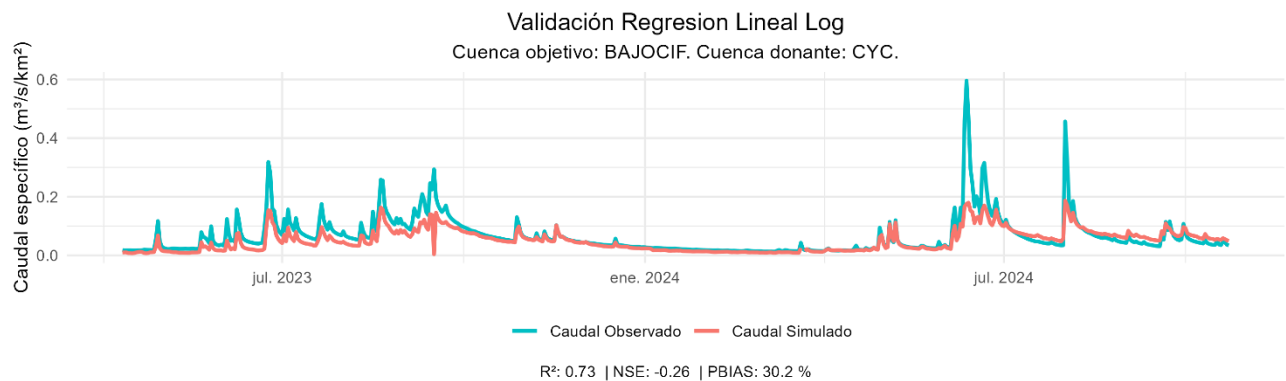
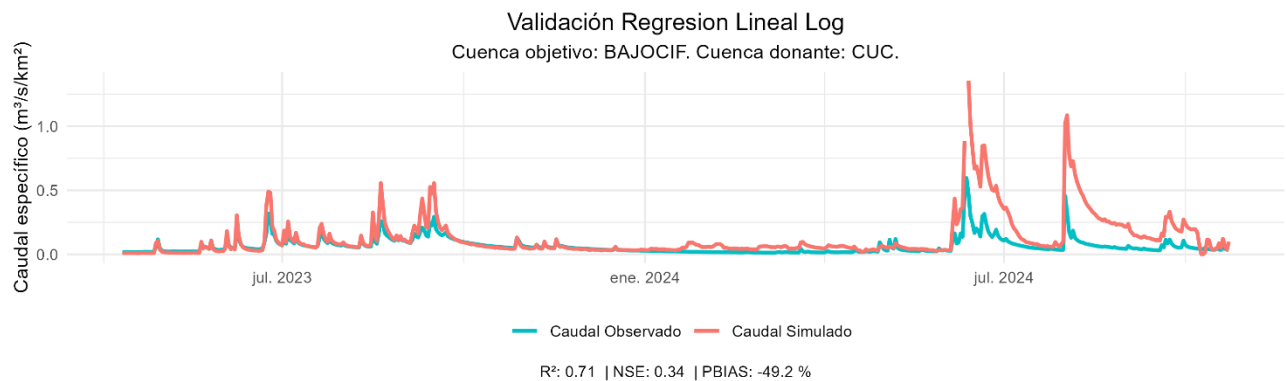
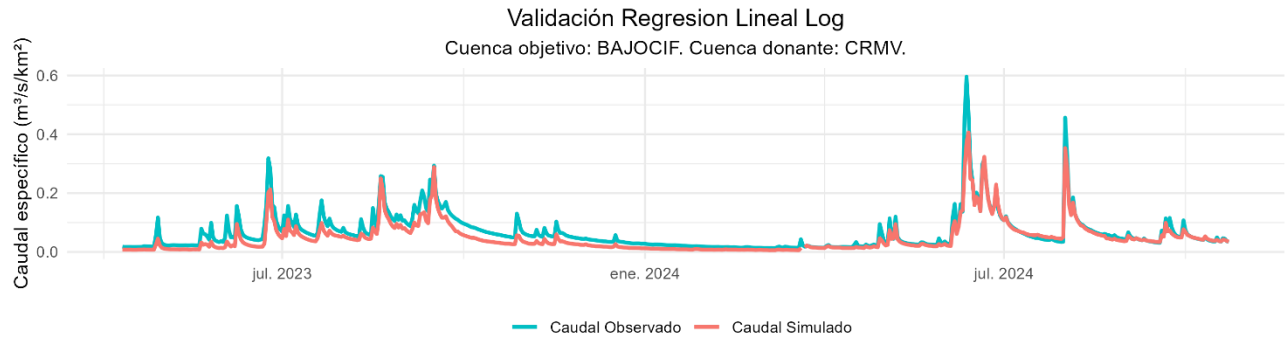


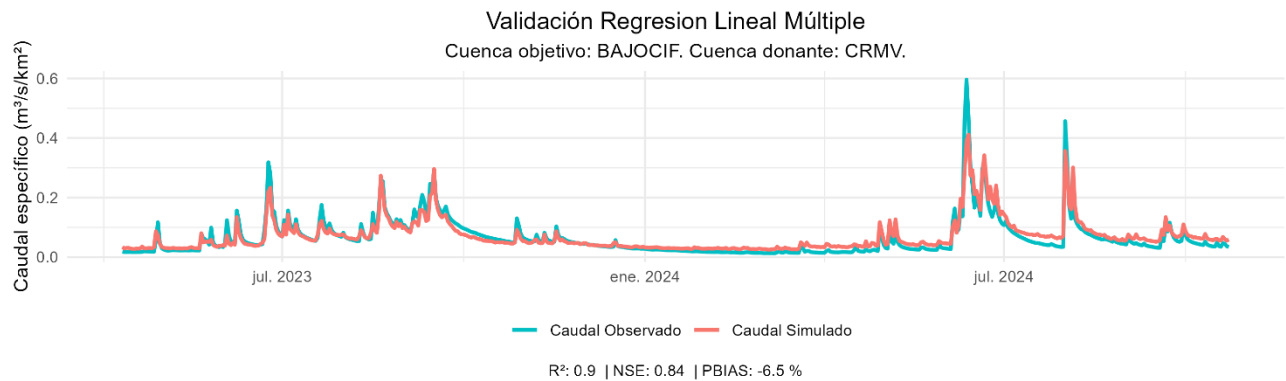
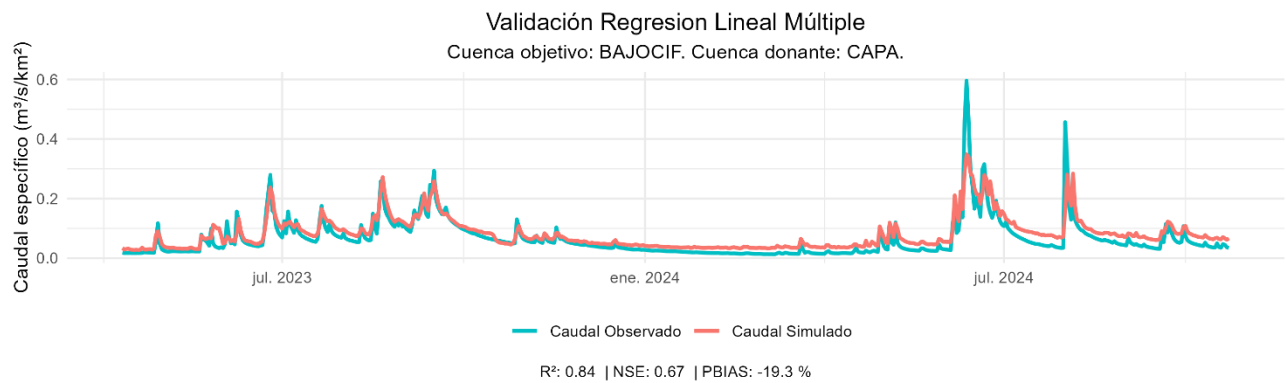
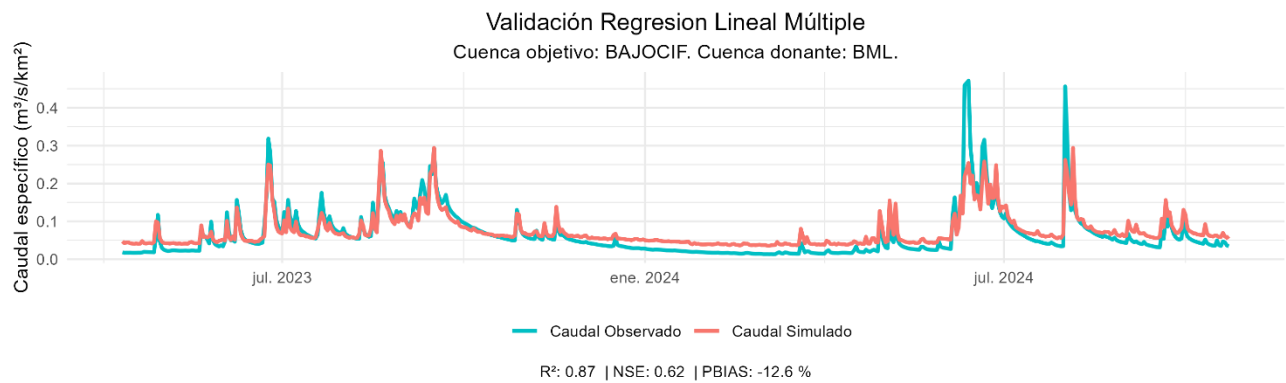
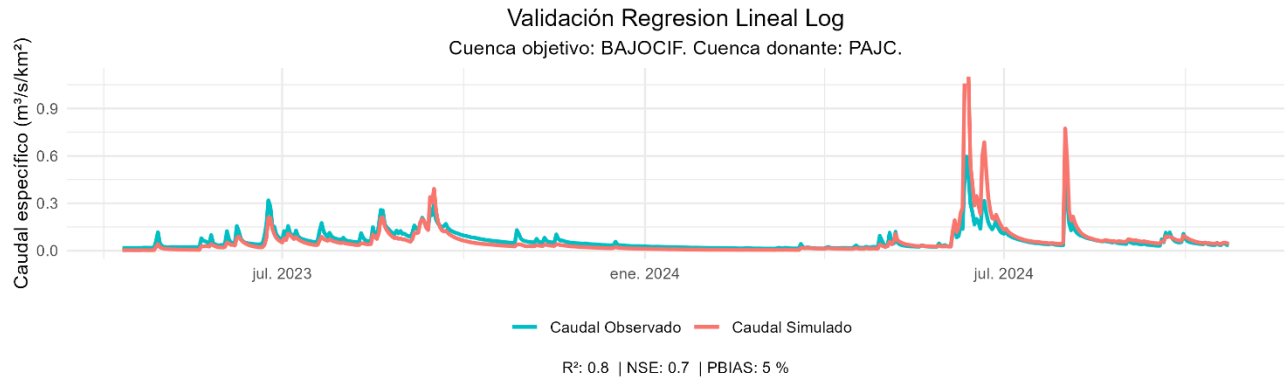
ANEXO 4.4 Caudal observado versus simulado segunda validación

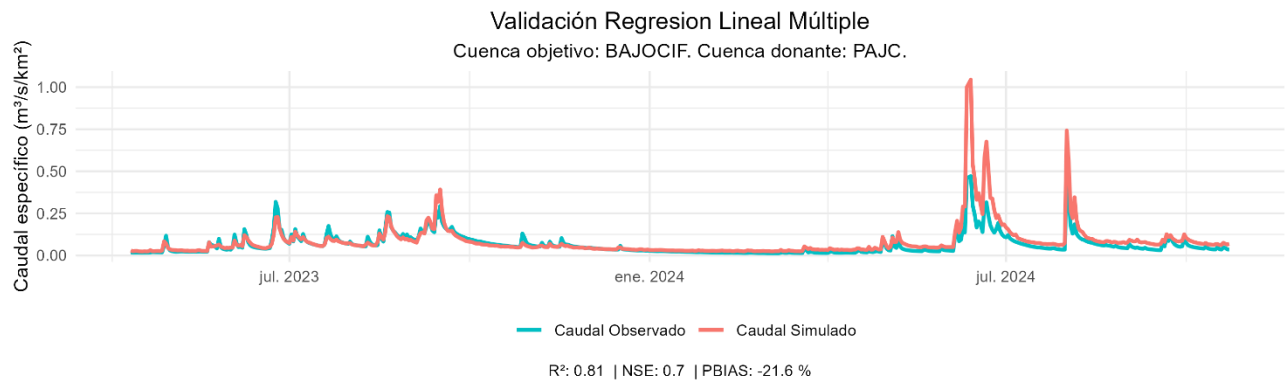
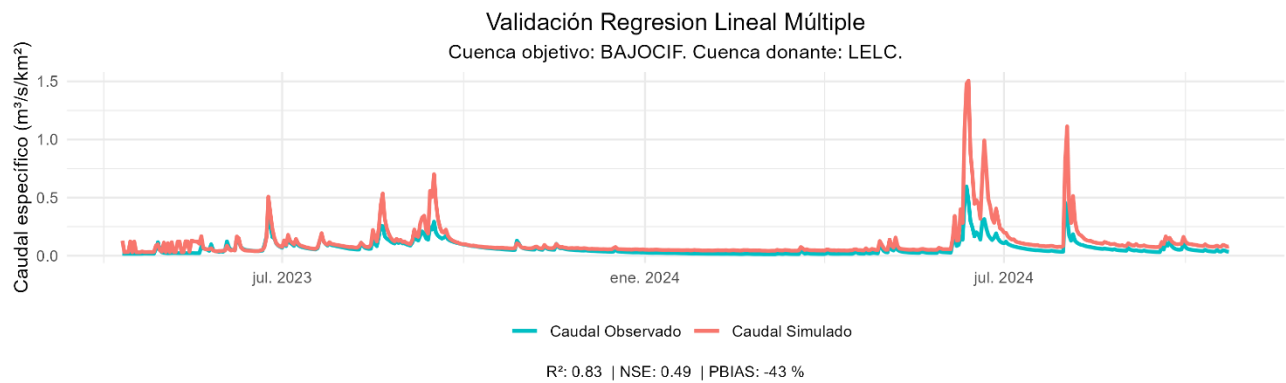
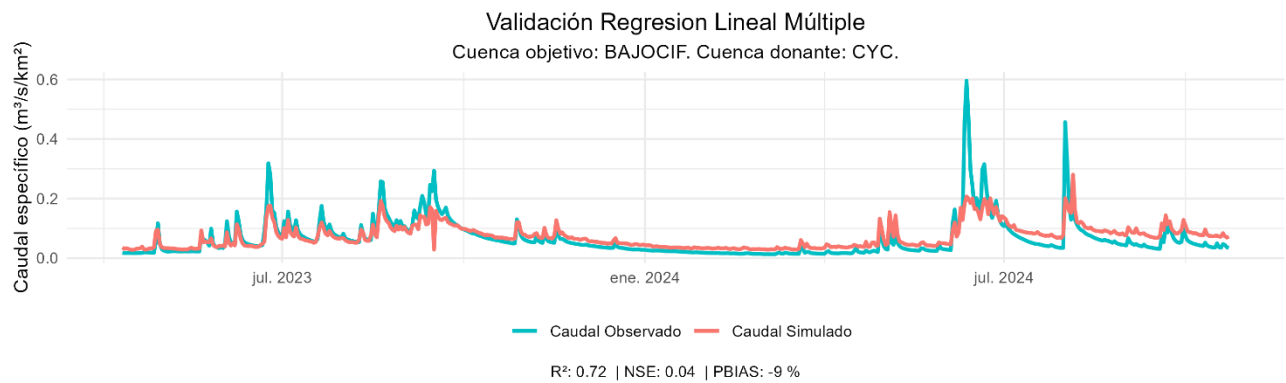
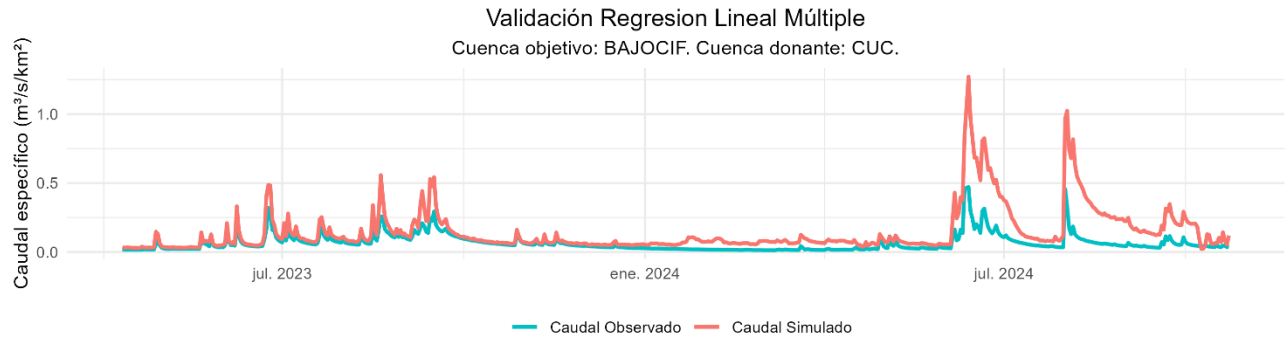


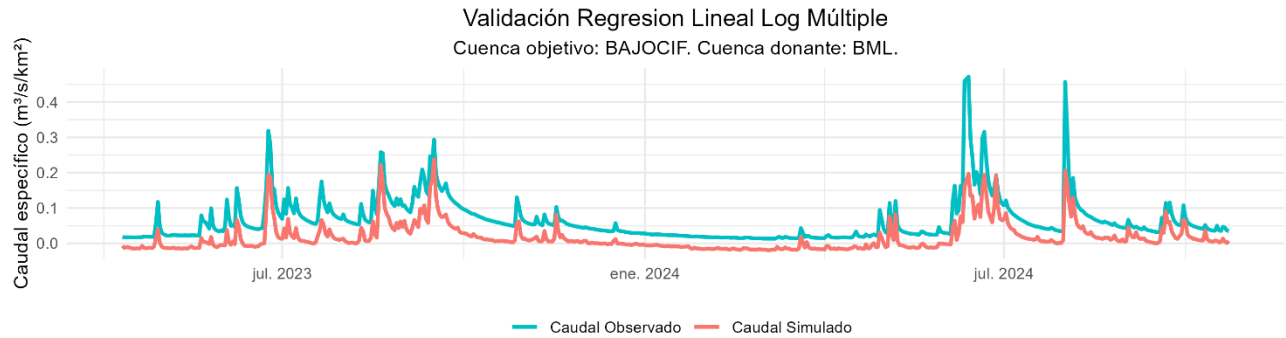




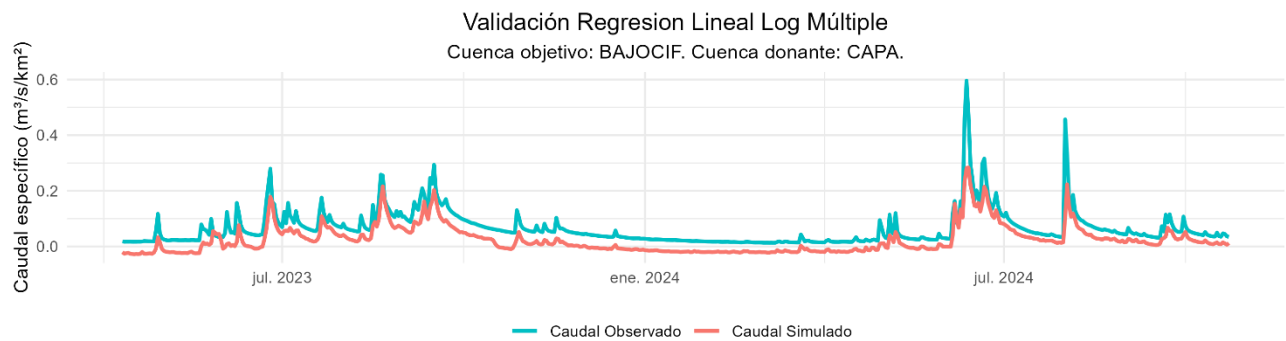




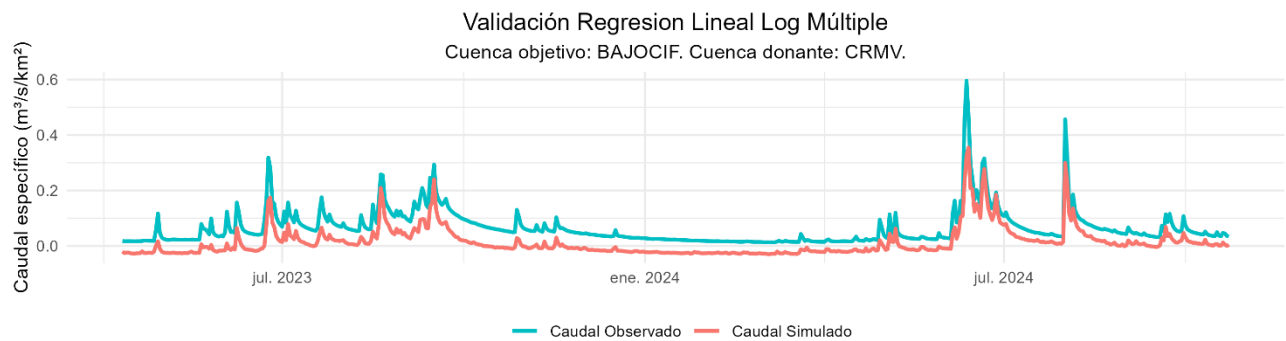




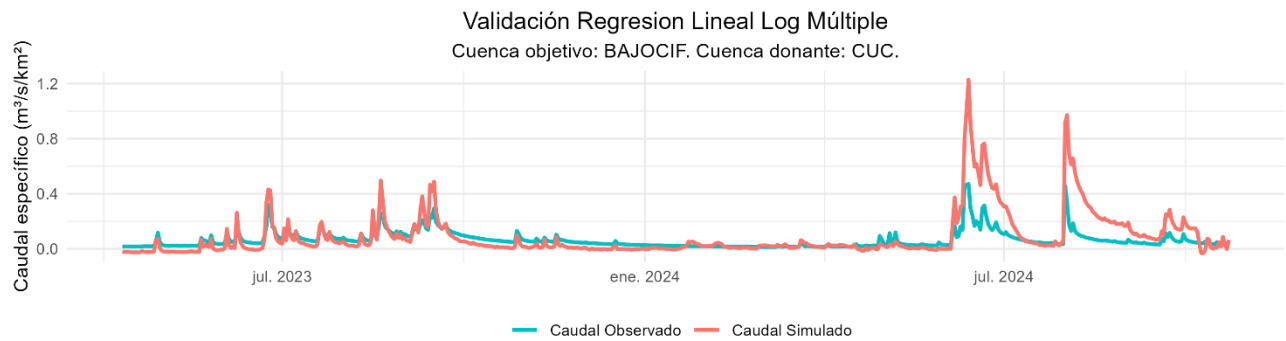
$R^2: 0.89$ | $NSE: -0.74$ | $PBIAS: 276.2 \%$



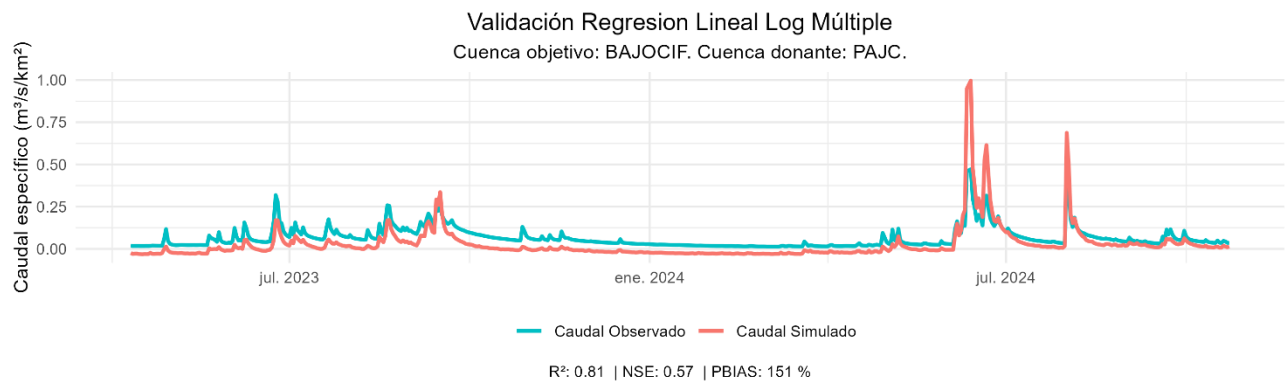
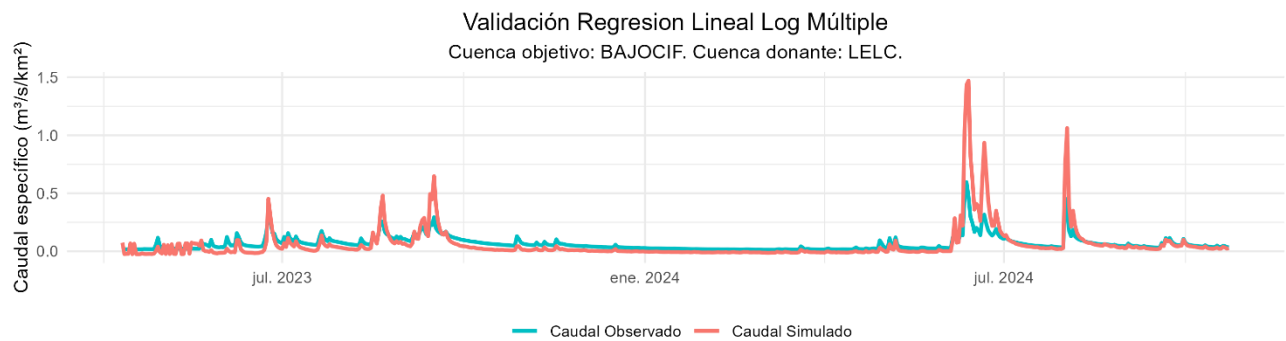
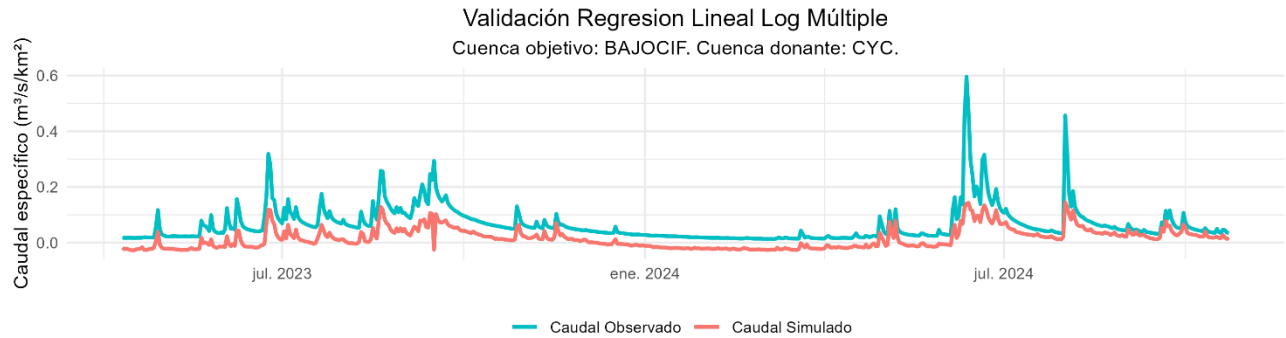
$R^2: 0.85$ | $NSE: 0.04$ | $PBIAS: 172.9 \%$



$R^2: 0.92$ | $NSE: -0.18$ | $PBIAS: 389.1 \%$



$R^2: 0.72$ | $NSE: 0.49$ | $PBIAS: -25.6 \%$



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Pablo Villegas Salgado
Título de la memoria : Simulación de caudales en cuencas costeras del centro-sur de Chile
Fecha de la presentación oral : 2 5 / 0 3 / 2 0 2 5

Profesor(es) Guía : Alejandra Stehr Gesche
Profesor(es) Revisor(es) : Maricarmen Guerra París
Concepto :
Calificación :

Resumen
El agua es esencial para la vida y la sociedad, determinando la subsistencia y economía de la población. Para su gestión, es clave contar con datos fluviométricos, que registran los niveles históricos y actuales de los ríos. Sin embargo, en Chile muchas cuencas carecen de esta información. Este estudio busca simular caudales medios diarios en dos cuencas costeras de la región del Biobío sin registros históricos. Se recopiló información hidrometeorológica y fisiográfica de cuencas cercanas con datos disponibles y se monitorearon las cuencas en estudio. Con estos datos, se desarrollaron modelos empíricos mediante métodos de escala y regresiones, utilizando información fluviométrica de una cuenca donante. Los modelos fueron calibrados y validados con pruebas de bondad de ajuste. El método de transposición de caudales mostró buenos resultados, aunque los modelos de regresión fueron más precisos. El modelo de regresión lineal logarítmica múltiple tuvo un desempeño deficiente, mientras que el mejor fue el de regresión lineal múltiple, con pequeñas discrepancias en caudales altos y de recesión. Este modelo permitió reconstruir la serie histórica de caudales medios diarios de una cuenca desde 1983 hasta 2020.