



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
CIVIL**



**ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS PARA EL  
PERIODO 2020 - 2060 A PARTIR DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS  
OBTENIDOS DESDE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT.**

POR

**Gabriel Ignacio Espinoza Agurto**

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

Profesora Guía  
Alejandra Stehr Gesche

Profesor Revisor  
Maricarmen Guerra Paris

Octubre, 2024  
Concepción (Chile)



© 2024 Gabriel Ignacio Espinoza Agurto

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

## Resumen

La información fluviométrica es esencial para el diseño de diferentes obras civiles, desde puentes y caminos, hasta planes de emergencia y evacuación. Es por esto mismo que se necesita contar con datos de caudales simulados futuros, para poder evaluar las obras y planes existentes en un escenario incierto de cambio climático.

En este estudio, se recopiló información fluviométrica histórica y se desarrollaron modelos hidrológicos semi distribuidos para dos cuencas del centro-sur de Chile, el río Carampangue en Carampangue y el río Quepe en Quepe. Con estos modelos, se simularon caudales medios diarios futuros bajo diferentes escenarios de cambio climático, con el objetivo de evaluar su impacto en los caudales asociados a periodos de retorno característicos para el diseño de obras civiles. Para mejorar la precisión de estas estimaciones, se aplicó el método propuesto por Chen, que permite transformar los caudales medios diarios simulados en caudales máximos instantáneos. De esta manera, se obtuvieron estimaciones de caudales futuros para ambas cuencas.

Con estos caudales máximos instantáneos, se realizó el cálculo de caudales para distintos periodos de retorno, y se analizó el cambio que existe entre los determinados con los datos observados por la DGA, y con los datos simulados, en los periodos 1991-2020 y 2025-2054. Estos modelos no fueron capaces de predecir de buena forma los caudales máximos.

Comparando ambos periodos antes mencionados se tienen distintas variaciones según el modelo de cambio climático utilizado.

En el caso del río Carampangue se ven aumentos de hasta 37% en los caudales de 100 años de periodo de retorno, y con otro modelo, reducciones de hasta un 33% para el caudal con el mismo de periodo de retorno. Para el río Quepe también se tiene un espectro de variaciones que van desde aumentar un 39%, hasta disminuciones de 21% para el caudal con periodo de retorno de 100 años.

## Abstract

Fluviometric information is essential for the design of various civil works, ranging from bridges and roads to emergency and evacuation plans. For this reason, it is necessary to have data on future simulated flows in order to assess existing infrastructure and plans in an uncertain climate change scenario.

In this study, historical fluviometric information was collected, and semi-distributed hydrological models were developed for two watersheds in south-central Chile: The Carampangue River in Carampangue and the Quepe River in Quepe. Using these models, future daily mean flows were simulated under different climate change scenarios to assess their impact on the flows associated with characteristic return periods for civil engineering design. To improve the accuracy of these estimates, Chen's proposed method was applied, which transforms simulated daily mean flows into instantaneous peak flows. This allowed for future flow estimates to be obtained for both watersheds.

With these instantaneous peak flows, flow calculations were made for different return periods, and the changes between those determined with observed data from the DGA and with simulated data for the periods 1991-2020 and 2025-2054 were analyzed. These models were not able to accurately predict peak flows.

Comparing the two periods, there are various changes depending on the climate change model used. In the case of the Carampangue River, increases of up to 37% were observed for 100-year return period flows, while another model showed reductions of up to 33% for flows with the same return period. For the Quepe River, there is also a spectrum of variations, ranging from a 39% increase to a 21% decrease for the 100-year return period flow.

## **Dedicatoria**

*A la memoria de mi papá.*

## **Agradecimientos**

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

Se agradece al centro de investigación Bioforest, de la forestal Arauco, por haber proporcionado la base de datos de tipo de suelo para la cuenca del río Carampangue, los que fueron necesarios para una correcta modelación de dicha cuenca.

También agradezco la labor de don René Iribarren Catalán, Nicole Vyhmeister Vargas, Pablo Villegas Salgado y Vicente Saenger Derache, quienes formaron parte del equipo de trabajo en terreno, me enseñaron mucho y me ofrecieron su ayuda a lo largo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a mi profesora guía Alejandra Stehr Gesche por su ayuda, buena disposición, paciencia y confianza durante este proceso, así como a mi profesora comisión Maricarmen Guerra Paris por su buena disposición y consejos.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos Generales y Específicos .....	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. Organización de la memoria.....	3
2. Revisión Bibliográfica.....	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Cambio climático.....	4
2.3. Modelos climáticos.....	4
2.4. Modelo SWAT .....	6
2.5. Caudales medios diarios a máximos instantáneos.....	7
2.6. Conclusión.....	12
3. Materiales y métodos.....	13
3.1. Introducción.....	13
3.2. Área de estudio .....	13
3.3. Fuentes de información .....	16
3.3.1. Información climática histórica.....	16
3.3.2. Información fisiográfica .....	16
3.3.3. Información fluviométrica.....	19

---

3.4.	Software para modelación .....	20
3.4.1.	ArcSWAT.....	20
3.4.2.	SWAT-CUP.....	20
3.5.	Easy Fit.....	23
3.6.	Calibración y validación.....	24
3.6.1.	Cuenca del Río Carampangue. ....	24
3.6.2.	Cuenca del Río Quepe .....	27
3.7.	Cambio Climático.....	27
3.7.1.	Selección de modelos a utilizar .....	27
3.8.	Conclusión .....	29
4.	Resultados.....	30
4.1.	Introducción.....	30
4.2.	Análisis de tendencia de caudales máximos anuales para ambas cuencas .....	30
4.2.1.	Análisis de tendencia de los modelos cambio climático .....	31
4.3.	Modelación en SWAT .....	34
4.4.	Integración modelos de cambio climático a los modelos SWAT.....	41
4.5.	Cálculo de caudales máximos asociados a distintos periodos de retorno a partir de datos medios diarios. ....	42
4.5.1.	Validación método de Chen (2017).....	42
4.5.2.	Cálculo de caudales máximos modelados asociados a distintos periodos de retorno para la cuenca del Río Carampangue (Periodo 1981-2019). ....	43
4.5.3.	Cálculo de caudales máximos modelados asociados a distintos periodos de retorno para la cuenca del Río Quepe (Periodo 1981-2019). ....	44
4.5.4.	Caudales máximos futuros asociados a distintos periodos de retorno para la cuenca del río Carampangue en Carampangue.....	44

---

4.5.5. Caudales máximos modelados asociados a distintos periodos para la cuenca del río Carampangue en Quepe. ....	47
4.6. Conclusiones.....	50
5. Conclusión.....	52
Referencias .....	54
Anexo 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible.....	56
Anexo 3.1 Análisis de disponibilidad de datos para las cuencas de los ríos en estudio.....	58
Anexo 4.1 Resultados del análisis de tendencia para los modelos de cambio climático en la cuenca del río quepe. ....	60
Anexo 4.2 Caudales Medios diarios para los periodos de calibración en ambas cuencas en estudio.....	62
Anexo 4.3 Parámetros y valores calibrados para los modelos swat de las cuencas en estudio. ....	63
Anexo 4.4 Caudales medios diarios sobre los umbrales de calibración para los ríos en estudio. ....	66
Anexo 4.5 Validación del método de Chen.....	67
Anexo 4.6 Caudales máximos anuales para las cuencas en estudio. ....	69
Anexo 4.7 Caudales máximos anuales futuros simulados para la cuenca del Carampangue .....	71
Anexo 4.8 Caudales máximos anuales futuros simulados para la cuenca del quepe .....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Tasa de cambio mundial para la precipitación en distintos escenarios de cambio climático. Fuente (IPCC 2023).....	5
Figura 2.2: Funcionamiento del modelo SWAT. ....	7
Figura 2.3: Hidrograma del río Biobío en desembocadura con tres series medidas por la estación DGA, agosto 2023 .....	8
Figura 2.4: Hidrograma "Triangular" de Chen. Fuente: Chen - Estimating instantaneous peak flow from mean daily Flow (2017) .....	10
Figure 2.5: Relación entre área de drenaje y el radio entre IPF y MDF.....	11
Figura 2.6: Comparación basada en regresión lineal simple de los IPF predichos y observados para nueve cuencas. Fuente: Chen et al. 2017 .....	11
Figura 3.1: a) Ubicación de las cuencas a escala regional, b) Cuenca Carampangue c) Cuenca Quepe.....	14
Figura 3.2: Uso y tipos de suelo para la cuenca del río Carampangue.....	18
Figura 3.3: Uso y tipos de suelo para la cuenca del río Quepe .....	19
Figura 3.4: Cuenca del Carampangue y las estaciones y subcuencas que se usaron para trasponer .....	25
Figura 4.1: Diferencia porcentual en la precipitación anual promedio entre los periodos 1990-2020 y 2021-2060, cuenca del río Carampangue .....	34
Figura 4.2: Cuencas de los ríos Carampangue y Quepe en SWAT.....	35
Figura 4.3: Caudales diarios simulados y observador para el periodo de calibración del río Carampangue .....	37
Figura 4.4: Caudales diarios simulados y observador para el periodo de calibración del río Quepe.....	38
Figura 4.5: Comparación de caudales medios diarios observados y simulados, para el periodo de validación del río Carampangue, con parámetros peak. ....	40
Figura 4.6: Comparación de caudales medios diarios observados y simulados, para el periodo de validación del río Quepe, con parámetros peak. ....	40

---

Figura 4.7: Caudales medios diarios Simulados para la cuenca del río Carampangue con los modelos de cambio climático .....	41
Figura 4.8: Caudales medios diarios Simulados para la cuenca del río Quepe con los modelos de cambio climático.....	42
Figura 4.9: Caudales máximos simulados con periodo de retorno asociado, río Carampangue en Carampangue. ....	47
Figura 4.10: Caudales máximos simulados con periodo de retorno asociado, río Quepe en Quepe, periodo 1991-2019 .....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Parámetros morfométricos de ambas cuencas.....	15
Tabla 3.2: Disponibilidad de datos para el Río Carampangue en Carampangue .....	26
Tabla 3.3: Robustez de la señal de cambio en las distintas zonas. Fuente: CEPAL, 2012. (Actualización del balance hídrico nacional, MOP 2017).....	28
Tabla 3.4: Características de los modelos a utilizar (MOP, 2017).....	29
Tabla 4.1: Resultados de test de tendencia para los caudales máximos anuales (Periodo 1981-2019).....	31
Tabla 4.2: Precipitación anual en Cuenca del Carampangue .....	31
Tabla 4.3: Precipitación máxima anual en Cuenca del Carampangue .....	32
Tabla 4.4: Temperatura máxima anual en Cuenca del Carampangue .....	32
Tabla 4.5: Temperatura mínima anual en Cuenca del Carampangue.....	32
Tabla 4.6: Tendencias en los modelos de cambio climático para cada cuenca .....	33
Tabla 4.7: Parámetros de bondad de ajuste para la simulación general de los ríos Carampangue y Quepe, periodo de Calibración.....	38
Tabla 4.8: Medidas de bondad de ajuste para modelos calibrados para peaks.....	39
Tabla 4.9: Caudales máximos para distintos periodos de retorno típicos para el río Carampangue en Carampangue (Periodo 1981-2019).....	43
Tabla 4.10: Caudales asociados a distintos periodos de retorno, Río Quepe en Quepe (Periodo 1981-2019) .....	44
Tabla 4.11: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Carampangue .....	45
Tabla 4.12: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Carampangue, para el periodo 1991-2019.....	45
Tabla 4.13: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Carampangue, para el periodo 2025-2054.....	46

---

Tabla 4.14: Diferencia porcentual entre caudales máximos y sus respectivos de periodos de retorno para la cuenca del río Carampangue, periodos 1991-2019 y 2025-2054.....	46
Tabla 4.15: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Quepe, para la totalidad de los datos. ....	48
Tabla 4.16: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Quepe, para el periodo 1991-2019.....	48
Tabla 4.17: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Quepe, para el periodo 2025-2054.....	48
Tabla 4.18: Diferencia porcentual entre caudales máximos y sus respectivos de periodos de retorno para la cuenca del río Quepe, periodos 1991-2019 y 2025-2054.....	49

# 1. INTRODUCCIÓN.

## 1.1. Motivación

La información fluviométrica resulta clave para un correcto manejo de los recursos hídricos, siendo, entre otras cosas, clave para el diseño de obras de infraestructura civil, para la elaboración de planes de emergencia y para la planeación territorial en general. A medida que la sociedad va progresando van siendo necesarias nuevas fuentes de información, además de las fuentes tradicionales, como lo son los registros medidos por las instituciones estatales (ej. DGA, DMC, etc.), para así poder tener mejores bases para la correcta toma de decisiones.

En el caso puntual de los caudales máximos, su correcta estimación es importante para el desarrollo de distintas obras, como, por ejemplo, puentes, obras de captación y obras en zonas inundables. A estos caudales se les realiza un análisis de frecuencia, para determinar la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento de caudal, y por lo tanto su periodo de retorno, que es la información que se utiliza para el diseño.

Para el caso chileno, se tiene que las estaciones fluviométricas de los distintos organismos públicos no son suficientes para abarcar la extensión y diversidad del territorio, por lo que, muchas veces no se cuenta con una estación fluviométrica cercana al curso de agua en estudio. También suele suceder que la estación que se podría utilizar no cumple con el requisito de tener por lo menos 30 años de registros, o que se informan caudales medios diarios, lo cual, no es ideal para la estimación de máximos anuales, debido a que no representa la magnitud peak que pudo haber ocurrido durante el día registrado.

Por esto mismo, en la investigación de (Chen et al., 2017), el autor recopiló fórmulas empíricas ampliamente utilizadas en la hidrología para transformar caudales medios diarios a máximos instantáneos, además de crear una propia, de mayor simpleza y buen funcionamiento.

Con estas técnicas, y con la simulación hidrológica, en este caso con el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), se pueden obtener series artificiales de caudal que extiendan los registros de cuencas con poca información, para así tomar decisiones más confiables y seguras para la población.

## **1.2. Objetivos Generales y Específicos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Estimar caudales máximos instantáneos diarios para el periodo 2020 – 2060 para distintas cuencas de la región del Bio Bío y Araucanía.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar las cuencas a estudiar, considerando posibles cambios en factores determinantes del nivel de escurrimiento.
- Recopilar y validar modelos hidrológicos existentes para el área de estudio para predicción de caudales bajo escenarios de cambio climático, evaluando la incertidumbre asociada a este.
- Analizar el impacto en los caudales asociados a distintos periodos de retorno utilizados en el diseño de obras de infraestructura y planes de emergencia.

## **1.3. Pregunta de Investigación**

¿Se pueden predecir caudales máximos instantáneos con un modelo hidrológico semi distribuido para escenarios de cambio climático?

## **1.4. Metodología general**

Se recopiló información fluviométrica, fisiográfica y climática para así desarrollar modelos hidrológicos con el software SWAT para las dos cuencas en estudio. Ambos modelos

debieron ser calibrados con registros fluviométricos de la DGA. Luego, se aplican los modelos de cambio climático que se utilizaron en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (MOP) para poder obtener caudales medios diarios futuros.

Posteriormente, se utiliza la formula empírica de Chen, (Método basado en pendiente), para obtener caudales máximos instantáneos para las cuencas en el horizonte temporal de los modelos elegidos.

## **1.5. Organización de la memoria**

Este documento tiene cinco capítulos: Introducción, Revisión bibliográfica, Materiales y métodos, Resultados y Conclusiones. En el primer capítulo se presenta la motivación de esta investigación, los objetivos, la metodología aplicada y la organización de la memoria. En el segundo capítulo se realiza una revisión bibliográfica, la importancia del uso de los modelos hidrológicos junto con los modelos de cambio climático para suplir las necesidades de información fluviométrica para el desarrollo de estudios y obras. En el capítulo 3, se recopila y obtiene toda la información previa al desarrollo de los modelos semi distribuidos, así como la base de comparación para los resultados de estos. El capítulo 4 consta del desarrollo de los modelos, la inclusión de los modelos de cambio climático, y la transformación de caudales medios diarios, a caudales máximos instantáneos. Finalmente, en el capítulo 5 se encuentran las conclusiones y desafíos futuros para este trabajo.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Introducción**

En este capítulo se revisan los antecedentes necesarios para esta investigación, específicamente de cambio climático, modelo SWAT, transformación de caudales medios diarios a máximo instantáneos, entre otros.

### **2.2. Cambio climático**

El cambio climático es un hecho, a estas alturas debido a todos los avances y descubrimientos de la comunidad científica, inequívoco. La influencia humana en el sistema climático es clara y va en aumento, y sus impactos se observan en todos los continentes (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). Por esta razón, se han llevado a cabo investigaciones en todo el mundo respecto al impacto que tiene el cambio climático sobre la hidrología. Dichas investigaciones han arrojado distintos resultados dependiendo de la zona, por ejemplo, un aumento en las precipitaciones totales (IPCC, 2014.), diferencias sustanciales en las tasas de inundaciones, cambios en la estacionalidad de las inundaciones (Blöschl et al., 2017), entre otros. La intensidad y las características del impacto, sin embargo, pueden variar significativamente de una región a otra (Figura 2.1).

Debido a esta variabilidad, es que surge la necesidad de crear herramientas que permitan predecir a los efectos del cambio climático sobre los caudales, para poder anticiparse al comportamiento de las infraestructuras, y así poder, proteger a la población.

En el contexto del cambio climático, resulta esencial cuantificar la incertidumbre de las condiciones de diseño de la infraestructura. Esto debido a que, producto del cambio climático, se espera que los niveles de caudales asociados a un determinado periodo de retorno para el cual son diseñadas, cambien (Das & Umamahesh, 2018).

### **2.3. Modelos climáticos**

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) ha recopilado una amplia gama de modelos climáticos desarrollados por instituciones de investigación a nivel mundial.

Estos modelos simulan una variedad de escenarios futuros (Figura 2.1) , desde los más pesimistas, donde las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando sin control, hasta los más optimistas, donde se implementan medidas efectivas de mitigación. Al considerar esta diversidad de proyecciones, los estados pueden evaluar los posibles impactos del cambio climático en sus territorios y tomar decisiones informadas para adaptar sus infraestructuras y políticas

Los modelos climáticos globales (GCM por sus siglas en inglés), modelan diferentes concentraciones de gases de efecto invernadero, escenarios que, al ser incorporados en los diferentes modelos climáticos, permiten determinar los cambios que conllevan en las distintas variables meteorológicas de interés.

Entre las ventajas de utilizar estos modelos está que, al ser basados en escenarios generalistas, se pueden llegar a considerar como modelo “desde arriba hacia abajo”, con lo cual se podría construir un escenario más complejo y localizado, para poder analizar los impactos del cambio climático (Cheng et al., 2017).

Sin embargo, estos modelos climáticos globales, tienen una resolución horizontal significativamente baja (100-300 km) para el caso de estudios a escala local. Para sortear este obstáculo, se hacen reducciones y correcciones a escala regional, para tener una perspectiva local, y así identificar cambios en escalas menores, que para la simulación hidrológica es muy importante. Estos modelos, pueden ser obtenidos desde diferentes fuentes e instituciones.

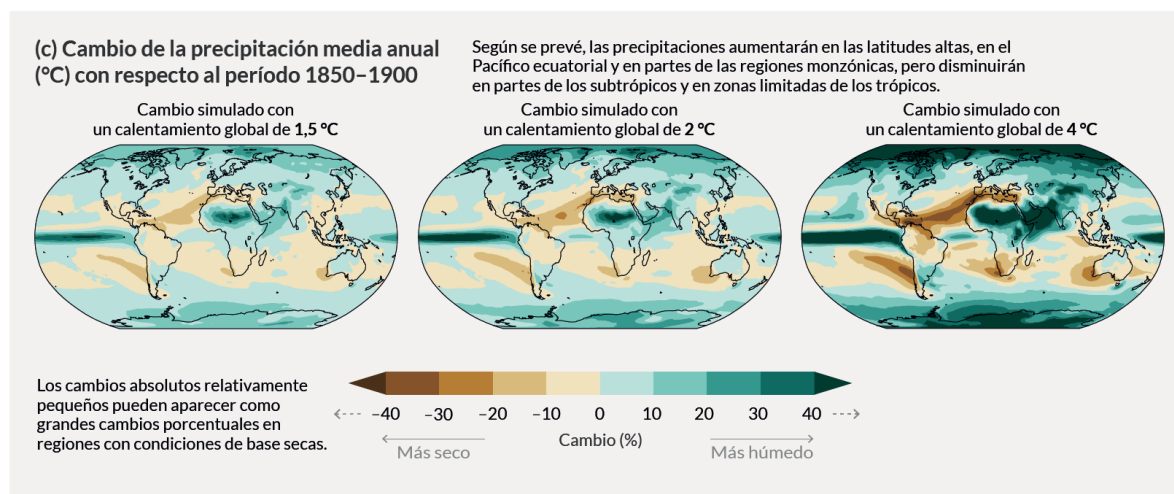


Figura 2.1: Tasa de cambio mundial para la precipitación en distintos escenarios de cambio climático. Fuente (IPCC 2023)

En la modelación hidrológica, la calidad de los datos de entrada juega un rol vital, pues un pequeño error en las etapas iniciales puede inducir un error a través del procesado de datos, llevando a resultados erróneos. Sin embargo, el error derivado de faltas de comprensión de

los procesos modelados, o de las mediciones tomadas, no puede eliminarse del todo. Es por esto por lo que se llevan a cabo análisis de incertidumbre, para tener un orden de magnitud para los errores del modelado (Das & Umamahesh, 2018).

De aquí es que se hace recomendable incorporar distintos modelos con diferentes escenarios de cambio climático, para lograr representar la incertidumbre sobre los caudales con distintos periodos de retorno asociados (Clark et al., 2016).

## 2.4. Modelo SWAT

Los modelos hidrológicos son herramientas que pueden ser utilizadas para simular caudales y producir observaciones artificiales futuras. Existen mayoritariamente dos tipos, los modelos conceptuales y los físicamente basados, siendo estos últimos los de mayor complejidad.

Para esta investigación se utilizó el modelo hidrológico SWAT, el cual se describe como un modelo a escala de cuenca hidrográfica. Es un modelo de tiempo continuo que opera en intervalos diarios, mensuales o anuales, y utiliza una estructura de comandos para encauzar el escurrimiento y productos químicos a través de la cuenca (Arnold et al., 1998).

Fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para predecir el impacto de las prácticas de manejo de agrícolas en los caudales, sedimentos y calidad del agua en cuencas grandes y complejas con diferentes condiciones de suelo, usos de suelo y manejo a lo largo de períodos prolongados.

Para poder cumplir este objetivo el modelo no trabaja con regresiones como otros modelos, si no que, es físicamente basado, lo que significa que necesita información específica sobre el clima y la ubicación en la que se empleará el modelo. Para esto, es que se utiliza la herramienta ArcSWAT (Arc GIS-SWAT) es la versión más reciente disponible que se utiliza como interfaz entre ArcGIS y el modelo SWAT. Datos espaciales (DEM, suelo y uso del suelo) se utilizan en la fase de preprocesamiento y se introducen en el modelo SWAT a través de la interfaz. El suelo y la cobertura terrestre son unidades de respuesta importantes y el modelo SWAT logra manejarlas subdividiendo la cuenca en áreas con combinaciones únicas de uso del suelo, suelo, y pendiente, las cuales se denominan Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) durante el proceso de generación de escurrimiento (Ghobara et. Al. 2015). Un diagrama de flujo desarrollado por Ghobara se puede observar en la Figura 2.2, para mejor entendimiento de la línea de proceso que se debe llevar trabajando con el modelo SWAT.

La topografía de la cuenca está definida por un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés). Esta se utiliza para calcular parámetros de subcuenca como la pendiente y

para definir la red de drenaje. Los datos de suelo son necesarios para definir las características y atributos del suelo. Los datos de cobertura terrestre proporcionan información sobre la vegetación en el suelo y sus procesos ecológicos en tierras y suelos. Los datos climáticos, de precipitación y de caudal se obtienen y preparan según los requisitos de entrada de SWAT (Ghoraba, 2015).

Para realizar los cálculos de escorrentía superficial y subterránea, el algoritmo de SWAT trabaja sobre la ecuación 2.1, la cual modela el contenido de agua final en el suelo, la cual se utiliza sobre cada unidad de respuesta hidrológica (HRU por sus siglas en inglés) (Arnold et al., 1998).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (2.1)$$

En la cual,

- $SW_t$  = Volumen de agua final en el suelo (mm)
- $t$  = Tiempo (días)
- $SW_0$  = Volumen de agua inicial en el suelo (mm)
- $R_{day}$  = Volumen de precipitación en el día (mm)
- $Q_{surf}$  = Escorrentía superficial en el día (mm)
- $E_a$  = Volumen de evapotranspiración (mm)
- $w_{seep}$  = Volumen de agua entrando en la zona vadosa desde el perfil de suelo (mm)
- $Q_{gw}$  = Volumen de flujo subterráneo en el día (mm)

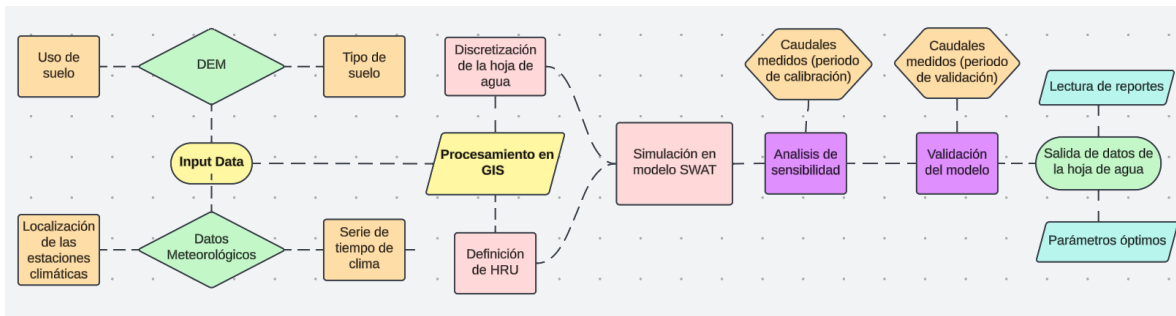


Figura 2.2: Funcionamiento del modelo SWAT.

## 2.5. Caudales medios diarios a máximos instantáneos

Por regla general, para el diseño y construcción de estructuras hidráulicas, o bien estructuras que se ven afectadas por la hidráulica de un lugar se deben estimar caudales de diseño para diferentes periodos de retorno, los que corresponden a la probabilidad de que ocurra un evento dentro de cierto intervalo de tiempo.

Los datos de caudal obtenidos mediante el modelo SWAT corresponden a caudales medios, lo que no permite estimar directamente caudales máximos instantáneos a distintas horas. Es por esto por lo que, para evitar la subestimación asociada a los caudales medios diarios (MDF) (Figura 2.3), se recomienda el uso del caudal máximo instantáneo (IPF) para la gestión del riesgo de inundaciones y el diseño de estructuras hidráulicas. (Chen et al., 2017).

Se han determinado distintas formas para poder obtener estos caudales máximos instantáneos, o por lo menos, para hacer una aproximación a ellos, que es, por ejemplo, lo que trata de lograrse con los métodos del Manual de Cálculo de Crecidas en cuencas sin información fluviométrica de la DGA (1995).

Se han creado métodos simples, de bajo requerimiento de datos de entrada, pero efectivos para estimar IPF's a partir de MDF's, dichos métodos son atractivos para regiones con escasez de datos y pueden ayudar en la gestión del riesgo de inundaciones (Chen et al., 2017).

Fill & Steiner (2003) proponen un método para poder realizar dicha estimación, donde se utiliza lo que se llama una corrección por pendiente, que consiste en tomar los valores de caudal medio diario máximo registrado y los caudales medios diarios de los días adyacentes en la serie, para así poder calcular una razón entre el máximo caudal medio diario medido y el caudal máximo instantáneo.

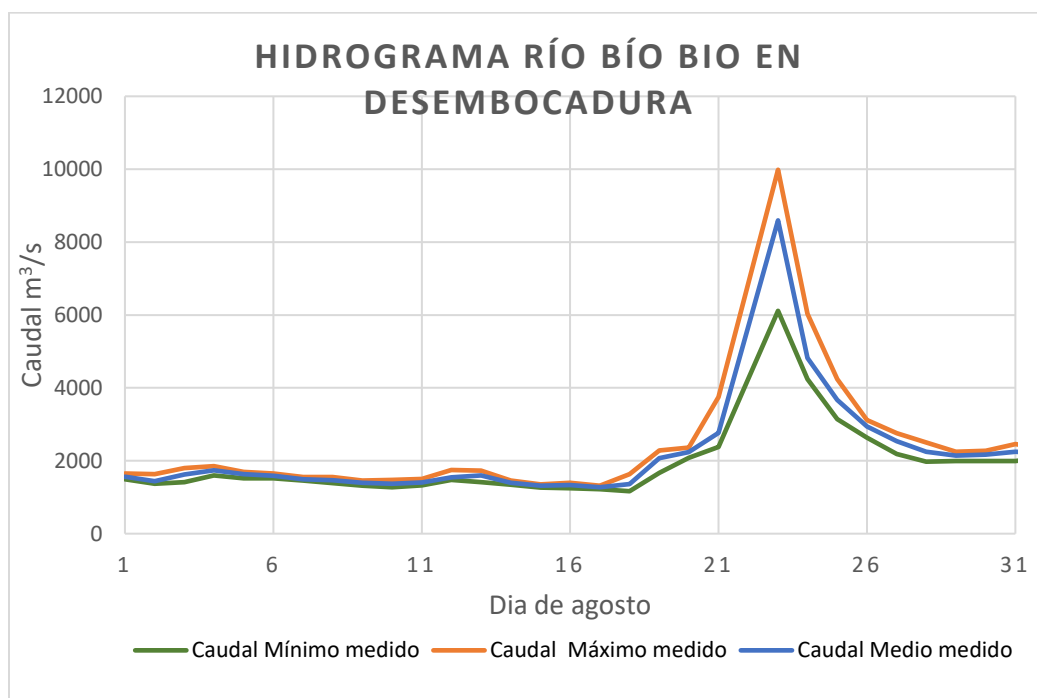


Figura 2.3: Hidrograma del río Biobío en desembocadura con tres series medidas por la estación DGA, agosto 2023

La fórmula original en el estudio de Fill & Steiner (2003) es la siguiente:

$$Q_{max} = a * Q_2 + b(Q_1 + Q_3) \quad (2.2)$$

En donde las variables son:

- $Q_2$  = Caudal medio diario el día que se registra el peak.
- $Q_1$  = Caudal medio diario el día anterior al que se registra el peak.
- $Q_3$  = Caudal medio diario el día posterior al que se registra el peak.

Se tiene, además, que los coeficientes  $a$  y  $b$ , son generados con una regresión, ajustando datos históricos horarios de caudales medidos en 50 eventos de inundación, ubicados en distintas estaciones fluviométricas en Brasil.

La falencia del método descrito por Fill y Steiner (2003) es que se debe contar con información horaria en la cuenca, de manera de poder establecer una relación entre los caudales peak diarios y el caudal medio diario, para poder obtener los coeficientes  $a$  y  $b$ . Estos componentes han sido establecidos por algunos autores para distintas regiones, pero considerando la variabilidad climática y la amplitud de morfologías que existe para las diferentes cuencas, esta parametrización general resulta precaria.

El estudio de Chen et al., (2017), compara diferentes métodos para obtener de forma artificial caudales máximos instantáneos a partir de caudales medios diarios, dentro de los cuales están los métodos de Fuller, Sangal y de Fill & Steiner. Este estudio comprobó el desempeño de estos tres métodos para la creación artificial de caudales máximos instantáneos en 144 cuencas de Iowa, Estados Unidos, con áreas portantes entre los 7 km<sup>2</sup> y 220.000 km<sup>2</sup>.

La innovación presente en el estudio de Chen es la creación de un nuevo método para la generación de caudales máximos instantáneos denominado Slope based method, lo cual traducido sería, método basado en pendiente.

En el estudio de Chen se utilizó registros horarios de caudales en 144 estaciones fluviométricas del USGS, donde se cuenta con registro de crecidas provocadas por precipitación y también por nieve. En este método los autores, mediante relaciones matemáticas entre la ecuación de Fill y Steiner y la forma de los hidrogramas para las 144 cuencas de Iowa crean una nueva ecuación, que ya no depende de factores de correlación como lo hacía la fórmula de Fill y Steiner, si no que solo utiliza los caudales medios diarios de los días anterior y posterior al evento de crecida que se busca modelar. La ecuación obtenida se muestra en la ecuación 2.3.

$$Q_{IPF} = Q_{MDF\ max} + \frac{(Q_{MDF\ max} - Q_{MDF\ pre})(Q_{MDF\ max} - Q_{MDF\ suc})}{2Q_{MDF\ max} - Q_{MDF\ pre} - Q_{MDF\ suc}} \quad (2.3)$$

- $Q_{IPF}$  = Caudal máximo instantáneo artificial.
- $Q_{MDF\ max}$  = Caudal medio diario el día que se registra el peak.
- $Q_{MDF\ pre}$  = Caudal medio diario el día anterior al que se registra el peak.
- $Q_{MDF\ suc}$  = Caudal medio diario el día posterior al que se registra el peak.

Esta fórmula y las suposiciones necesarias para crearla vienen dadas del registro sub horario que se tiene en la figura 2.4, dicho hidrograma se va repitiendo en forma en la mayoría de las cuencas que estudio Chen, con esto, se lograron simplificar algunos factores de la fórmula de Fill y Steiner para poder obtener la ecuación 2.3.

A lo largo de este estudio se analizaron más de 3800 eventos de inundación, donde se aplicaron los 3 métodos ya conocidos, y el método creado por Chen, demostrando que los métodos antes descritos y el método de Chen funcionan bien para una amplia gama de cuencas, todas bastante variadas entre sí. Sin embargo, su capacidad se ve reducida cuando se tienen cuencas con un área menor a los 500 km<sup>2</sup>, como se puede apreciar en la figura 2.5.

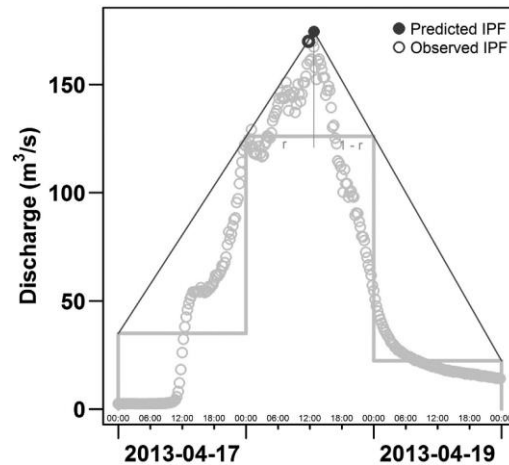


Figura 2.4: Hidrograma "Triangular" de Chen. Fuente: Chen - Estimating instantaneous peak flow from mean daily Flow (2017)

De forma similar, se pudo apreciar que a medida que la cuenca va aumentando de tamaño, la relación paramétrica entre el caudal máximo instantáneo y el caudal medio diario se acerca a uno, es decir, entre más grande es la cuenca, más se parece el caudal medio diario registrado

al caudal máximo instantáneo simulado (Figura 2.5). Esto también puede verse en la figura 2.6.

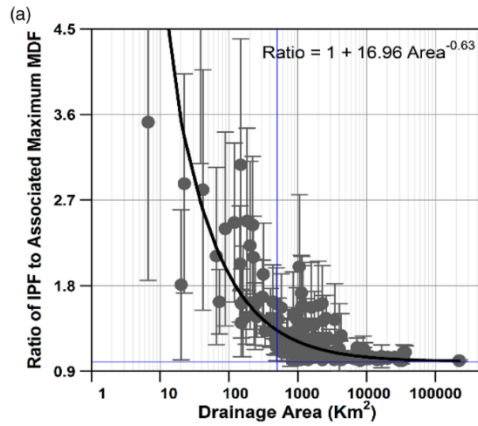


Figure 2.5: Relación entre área de drenaje y el radio entre IPF y MDF

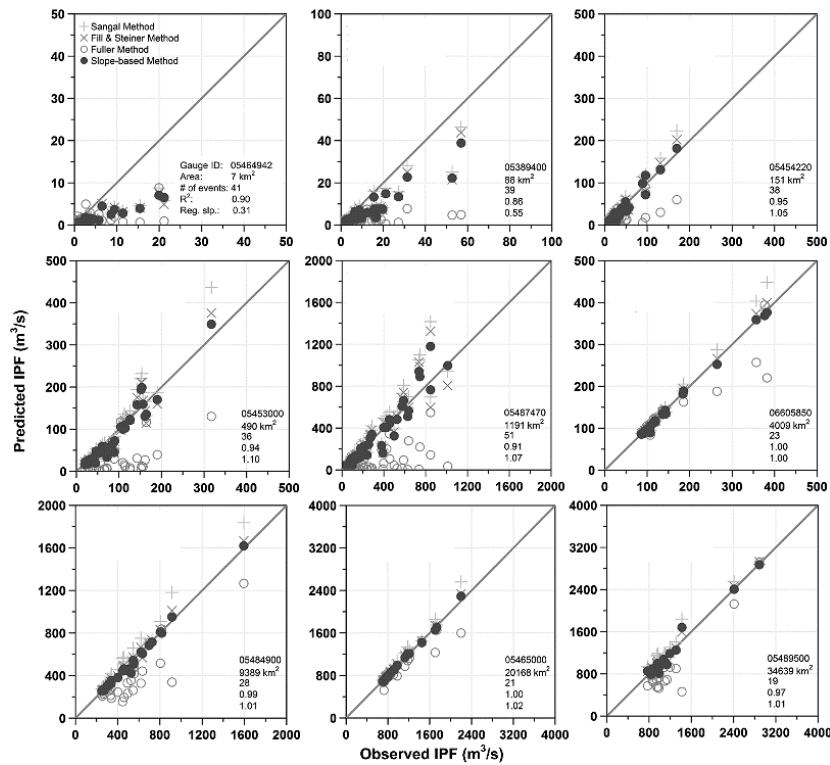


Figura 2.6: Comparación basada en regresión lineal simple de los IPF predichos y observados para nueve cuencas. Fuente: Chen et al. 2017

## **2.6. Conclusión**

En el presente capítulo, se revisó la metodología y la base científica del modelo SWAT, que se utilizaran para el desarrollo de este estudio, la base científica y las líneas de investigación que se siguen en el mundo para el desarrollo y aplicación de los modelos de cambio climático y finalmente, los métodos que se utilizarán para poder cumplir el objetivo de simular caudales máximos instantáneos a partir de caudales medios diario.

## 3.MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Introducción

En este capítulo, se detallan las cuencas a modelar, señalando la información relevante a considerar, para después caracterizar cada una de ellas. Posteriormente se muestran las fuentes de información necesarias para la elaboración de los modelos hidrológicos de cada cuenca, una descripción de cómo trabajar el modelo SWAT y la metodología para transformar los caudales medios diarios obtenidos del modelo a caudales máximos instantáneos.

Para el manejo de datos, creación de modelos, calibración y validación y obtención caudales de periodo de retorno se utilizaron los siguientes softwares: RStudio versión 2024.04.0+735, Microsoft Excel, QGIS versión 3.28.15 , ARCGIS , ARCSWAT, SWAT-CUP premium, EasyFit entre otros.

### 3.2. Área de estudio

Para esta memoria, se analizaron dos cuencas, una en la región del Biobío y otra en la región de la Araucanía, estas cuencas son las del Río Carampangue y la cuenca del Río Quepe respectivamente (Figura 3.1). Ambas cuencas pertenecientes al área de estudio del Proyecto Anillo ACT210060 FIRING.

La cuenca del río Carampangue se encuentra ubicada en la cordillera de Nahuelbuta en la Región del Biobío (VIII Región), entre los paralelos 37°10' y 37°68' de latitud sur, y entre los meridianos 72°98' y 73°45' longitud oeste. Es una cuenca exorreica que desemboca en el Golfo de Arauco, abarcando un área aproximada de 1,200 km<sup>2</sup>. Se trata de una cuenca pluvial, donde el río Carampangue tiene como afluentes los ríos Cifuentes, Cabrera y Nahuelán. En su parte baja cuenta con el estuario Los Patos y el río Lía como afluentes (Rojas Vilches et al., 2010). El mapa de la cuenca y la ubicación en el mapa de Chile se pueden ver en la figura 3.1.

Administrativamente, se encuentra al sur de la ciudad de Concepción entre las provincias de Concepción y Arauco. Dentro de la cuenca se ubican la ciudad de Arauco, la localidad de Carampangue y los pueblos de Codigua, Pichilo, Ramadillas y San José de Colico.

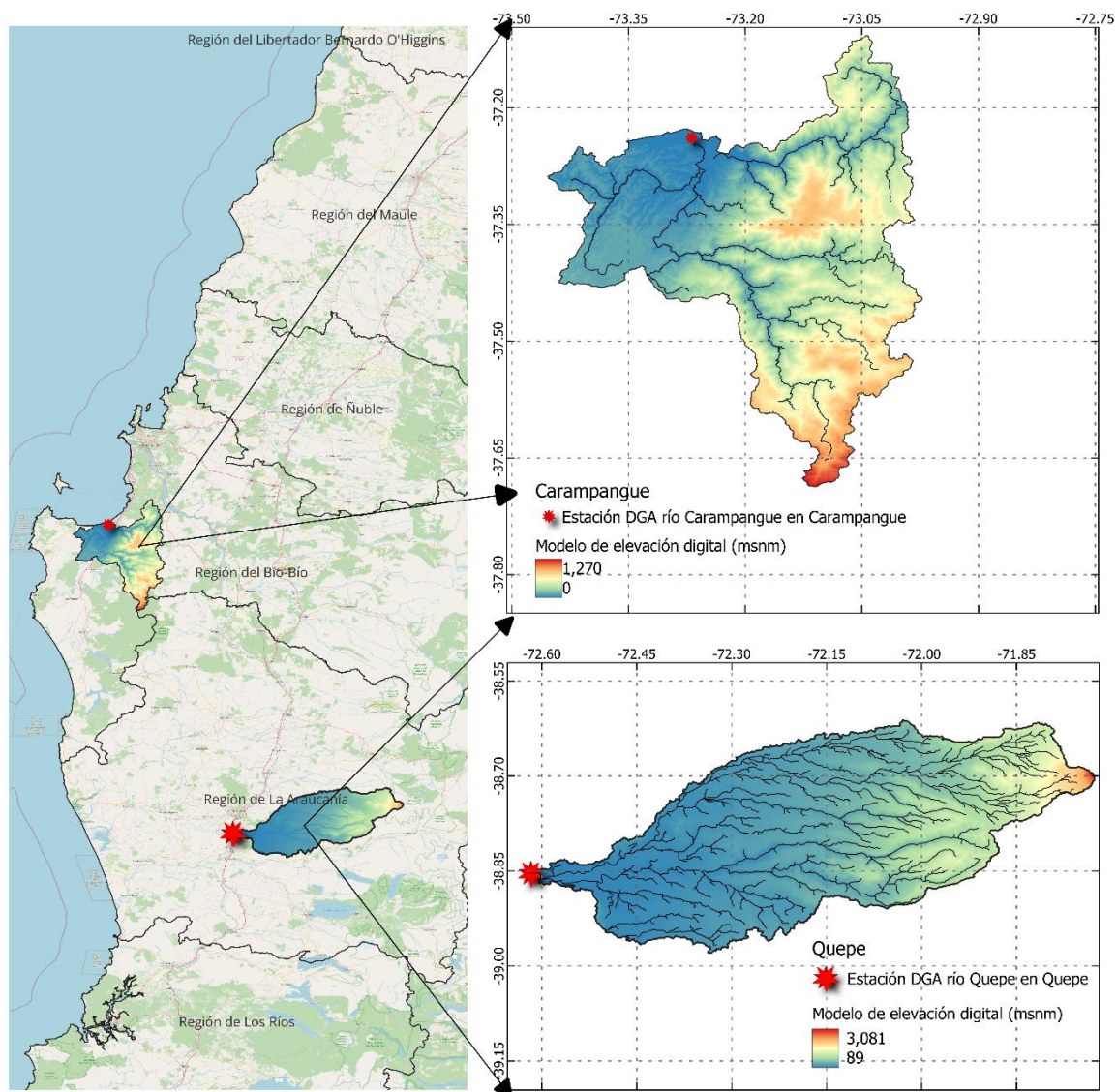


Figura 3.1: a) Ubicación de las cuencas a escala regional, b) Cuenca Carampangue  
c) Cuenca Quepe

La cuenca del río Quepe se ubica en la región de la Araucanía, en la provincia de Cautín, entre los paralelos  $37^{\circ}10'$  y  $37^{\circ}68'$  de latitud sur, y entre los meridianos  $71^{\circ}73'$  y  $72^{\circ}63'$  longitud oeste. El río Quepe corresponde al afluente más importante del río Cautín. Nace en la laguna Quepe y está compuesto por numerosos esteros, principalmente a lo largo de su orilla sur. La geomorfología de la subcuenca consiste en una llanura central con una pendiente orientada de este a oeste. Dentro de la cuenca se encuentra la localidad de Quepe. El mapa de la cuenca y su ubicación se pueden ver en la figura 3.1.

La estación de monitoreo de la Dirección General de Aguas, río Quepe en Quepe, se encuentra inmediatamente aguas abajo de la confluencia con el río Huichahue. Esta subcuenca tiene un régimen de precipitaciones, con mayores caudales durante los meses de invierno.

Los parámetros morfométricos de ambas cuencas fueron obtenidos mediante la delimitación de la cuenca con el software QGIS y se encuentran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros morfométricos de ambas cuencas

<b>Parámetros morfométricos</b>	<b>Río Carampangue</b>	<b>Río Quepe</b>
Área (km <sup>2</sup> )	1233	1666
Perímetro (km)	344.4	345.2
Largo cauce principal (km)	97.4	105.6
Largo hasta la divisoria (km)	102.8	108.1
$\Delta h$ (m)	1270	3000
Distancia al centroide (km)	58.9	54.5
Índice de compacidad	2.766	2.386
Índice de circularidad	0.131	0.176
Factor de forma	0.117	0.143
Razón de elongación	0.385	0.426

Entre los parámetros de la cuenca se ve el índice de compacidad y circularidad, los cuales sirven para comparar la forma de la cuenca con la forma de una circunferencia, entre más cerca de la unidad estén estos índices, más parecida será la forma de la cuenca a la forma de una circunferencia. Como se puede apreciar, tanto por el mapa ilustrado en la figura 3.1 como por los índices, la cuenca tiene una forma más bien elipsoidal, lo cual, puede ser una información relevante, para cuando más adelante, se estimen los parámetros que rigen el escurrimiento.

A partir de la inspección visual de los mapas de la figura 3.1, se puede ver que las cuencas de los ríos Quepe y Carampangue son bastante diferentes en forma, sin embargo, analizando los parámetros determinados en la tabla 3.1, se ve que en cuanto a los distintos índices son

bastante similares. En este caso, prima la inspección visual y la diferencia de elevaciones, por lo que, el comportamiento de ambas cuencas será distinto entre sí.

### **3.3. Fuentes de información**

#### **3.3.1. Información climática histórica.**

Las series de precipitación y temperatura utilizadas para la modelación y calibración de los modelos SWAT para el periodo histórico fueron obtenidas del producto grillado para el territorio nacional CR2MET, desarrollado por El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup>, en su versión 2.0. donde se tienen datos que comprenden el periodo 1979-2020

Este producto consta de una grilla rectangular de 0.05° de latitud x 0.05° de longitud, lo cual es aproximadamente 5 km x 5 km, que contiene precipitación y temperatura (máxima, mínima y media).

#### **3.3.2. Información fisiográfica**

##### **Modelo de elevación digital**

La extracción de las cuencas y la red hídrica se realizó utilizando modelos de elevación digital (MDE) de las regiones del Bío-bío y La Araucanía, disponibles en la plataforma de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile). Dichos modelos tienen una resolución de 12.5 m x 12.5 m.

##### **Uso y tipos de suelo**

Los mapas de uso de suelo utilizados para la elaboración de los modelos SWAT fueron extraídos de los mapas vectoriales de uso de suelo de la CONAF, los cuales fueron desarrollados para todo el territorio nacional en su catastro vegetacional 2007. Los usos de suelo predominante para la cuenca del río Carampangue son Plantación (62.38%), Bosque Nativo Renoval (20.86%) y Rotación Cultivo-Pradera(5.99%) (Figura 3.2). Para el caso del

río Quepe los usos de suelo predominante son Rotación Cultivo-Pradera (48.47%), Bosque Nativo (30.64%) y Plantaciones (10.83%) (Figura 3.3).

Para el caso de tipo de suelo, se tiene una base de datos detallada para la cuenca del río Carampangue facilitada por Bioforest, que es un centro de investigación financiado por la forestal Arauco. Que consta de 15 grupos de tipos de suelo, con su respectiva descripción detallada (Figura 3.2).

Por otro lado, para la cuenca del río Quepe, se utilizarán los suelos del producto FAO-UNESCO Soil Map of the World, volumen 4 de la FAO (1971), que es un registro bastante grueso de tipos de suelo que fue desarrollado a escala latinoamericana, que consta de tres tipos de suelo para la cuenca.

También se tiene que los tipos de suelo predominante para la cuenca del río Carampangue son San Esteban (45.11%), Nahuelbuta (19.97%) y Curanipe (8.53%) (Figura 3.2). Para el caso del río Quepe los tipos de suelo predominante son Th4-a (84.17%) , Nd1-3b (11.76%) y Th5-c (4.07%). (Figura 3.3).

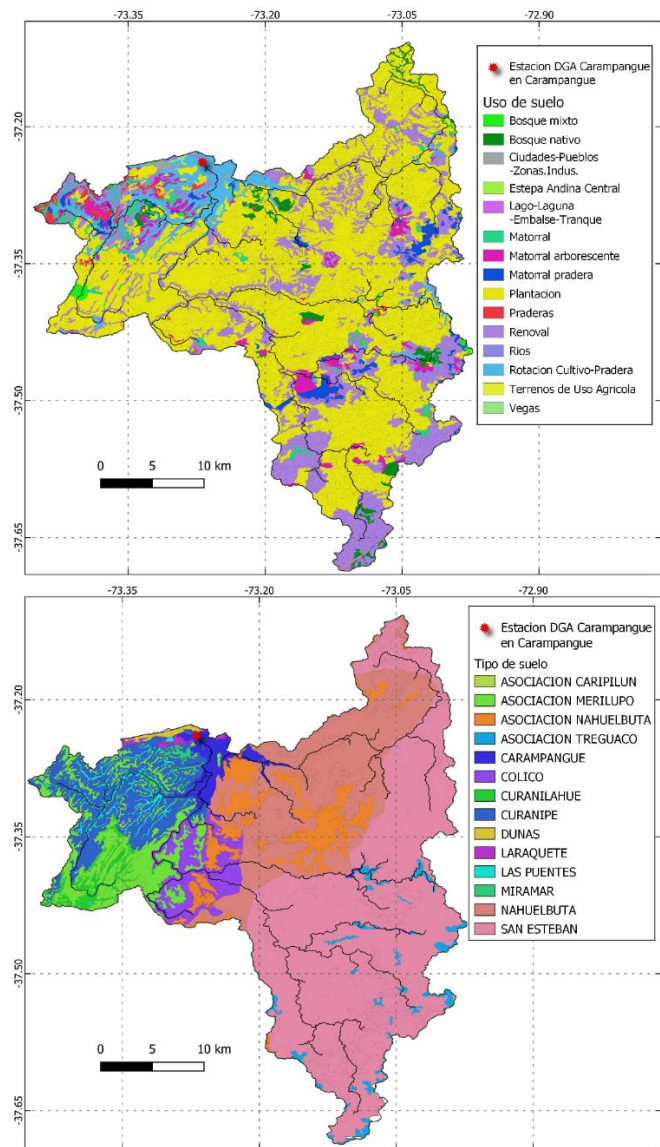


Figura 3.2: Uso y tipos de suelo para la cuenca del río Carampangue

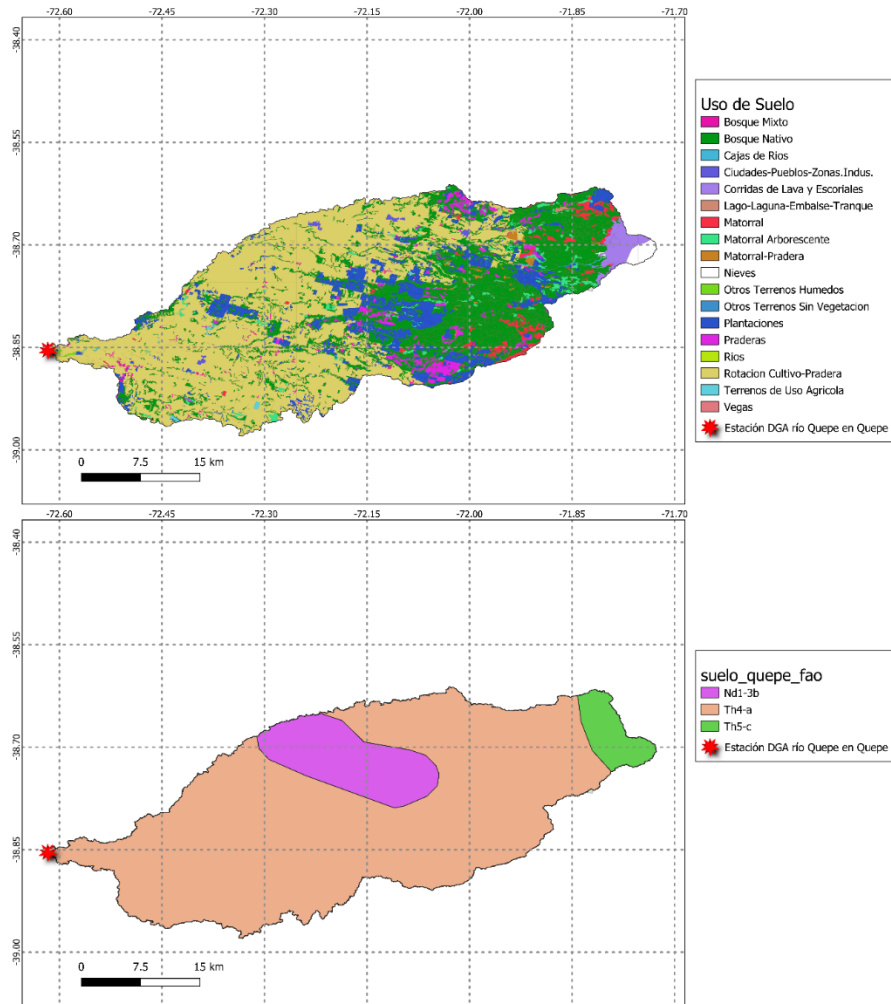


Figura 3.3: Uso y tipos de suelo para la cuenca del río Quepe

Los tipos de suelo determinan las capacidades hidráulicas de cada suelo, las cuales vienen dadas por su textura y composición, entre otras características.

### 3.3.3. Información fluviométrica

Para el proceso de calibración de los modelos se necesita contar con información fluviométrica en alguno de los puntos de la cuenca. Con esta información, se ajustan los diferentes parámetros del modelo, para que, se tenga la mejor representación posible del caudal pasante en distintos puntos de la cuenca.

En este caso en particular, se tiene que la estación que existe en la cuenca del río Carampangue no posee datos desde 1984, donde tiene un registro incompleto. Por esta razón, es que se decide buscar cuencas similares en las proximidades del río Carampangue, para así poder rellenar los datos de la cuenca y poder calibrar el modelo SWAT. Dicho relleno será explicado más adelante.

Para el caso de la cuenca del río Quepe, se cuenta con un registro de caudales bastante bueno para el periodo 1970-2020, por lo que, a diferencia del río Carampangue, no fue rellenada, sin embargo, como se explicará más adelante, si se deben tener ciertas consideraciones al realizar el análisis estadístico.

### **3.4. Software para modelación**

#### **3.4.1. ArcSWAT**

Para el proceso de construcción del modelo en SWAT se utilizó la plataforma ArcSWAT que trabaja sobre el software ArcGis. Con ArcSWAT, se delimita la cuenca a partir de los modelos de elevación digital disponibles. Posteriormente, se ingresan al modelo las capas de uso y tipo de suelo, que fueron descritas en el inciso 3.3 de este capítulo. Con esto, el modelo SWAT divide la cuenca en distintas 104 subcuencas para el río Carampangue, y en 513 subcuencas para el río Quepe. Además de esto, el modelo genera distintas de respuesta hidrológica a partir de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente, que son las unidades a las cuales se les realizan los distintos cálculos.

Una vez armado el modelo SWAT en ArcSWAT se procede a realizar su calibración para ellos se transfieren los archivos al software SWAT-CUP.

#### **3.4.2. SWAT-CUP**

SWAT-CUP es un software para calibración y validación de modelos SWAT desarrollado por 2W2E (Abbaspour et al., 2007).

Este software, ejecuta una calibración semi automática de los modelos. El usuario debe entregar, mediante modificación de textos en el mismo programa tipos de variaciones para

los parámetros que se quieren calibrar, y un determinado rango. Con esto se realiza un número de simulaciones, que debe ser entregado por el usuario, y se van almacenando los valores de caudales para cada simulación.

En el artículo de Abbaspour et al. (2015) se detallan algunos parámetros que son recomendados para calibrar diversas situaciones, como pueden ser, por ejemplo, caudal base muy bajo o alto, caudales peak muy bajos o altos, desfase temporal en los caudales, entre otros casos. De este artículo, se obtienen buenas referencias para las dos calibraciones que fueron realizadas por cada modelo.

Para la evaluación de las iteraciones que realiza SWAT-CUP a los modelos, el programa cuenta con distintas medidas de bondad de ajuste, que sirven para cuantificar la calidad de representación de los datos por el modelo, para este estudio se están observando principalmente tres de ellas, que son:

### **Coefficiente de determinación $R^2$**

El coeficiente  $R^2$  (coeficiente de determinación) mide qué tan bien se ajusta un modelo a los datos observados. Representa la proporción de la varianza total de la variable dependiente que es explicada por las variables independientes en el modelo. Este coeficiente es representado por la siguiente ecuación:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (3.1)$$

Donde, O y S representan los valores observados y simulados, mientras que  $\bar{S}$  y  $\bar{O}$ , representan el promedio de los valores observados y simulados.

Los valores de  $R^2$  van desde el 0 al 1, con uno siendo un ajuste perfecto.

### **Eficiencia de Nash y Sutcliffe**

La Eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) es una métrica desarrollada por Nash y Sutcliffe en 1970 para evaluar la precisión de modelos de predicción en hidrología y otras disciplinas. Indica qué tan bien las predicciones del modelo reproducen los valores observados.

Esta métrica viene determinada por la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3.2)$$

Donde, O y S representan los valores observados y simulados respectivamente.

La Eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) tiene valores que van desde menos infinito hasta 1, donde el rango entre menos infinito y 0 significa que el modelo no representa el modelo que, simplemente trabajando con el promedio de las observaciones, por otro lado, cuando es de un valor de 1, se tiene una predicción perfecta.

### **PBIAS**

El PBIAS (Porcentaje de Sesgo) es una métrica que mide el sesgo de un modelo de predicción al comparar los valores simulados con los valores observados. Indica si el modelo tiende a sobrestimar o subestimar sistemáticamente los valores observados. La ecuación que lo modela es la siguiente:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3.3)$$

Donde, O y S representan los valores observados y simulados respectivamente.

Al ser un proceso iterativo de simulaciones, una de las salidas del programa es un nuevo rango de valores para los parámetros que se están calibrando, lo que entrega una sugerencia de como seguir variando los parámetros en las siguientes iteraciones.

SWAT-CUP, además, integra un algoritmo que realiza análisis de sensibilidad a los parámetros que se están estudiando, lo cual resulta muy ventajoso, ya que, a pesar de ser un proceso necesario para lograr un ahorro en cuanto a gasto computacional en la calibración del modelo, muchas veces este debe realizarse de forma externa.

Cabe destacar, que SWAT-CUP trabaja con un nivel de significancia del 95% para sus datos simulados y para la sugerencia de nuevos rangos de parámetros, por lo tanto, en caso de realizarse un post procesado con los datos, como es el caso de este estudio, se debe tener en consideración que un nivel de significancia de 95% es lo máximo que se le puede exigir.

### 3.5. Easy Fit

Para poder evaluar el impacto del cambio climático en los caudales de ambas cuencas, se determinan los valores de caudal, para distintos periodos de retorno típicos asociados a obras de ingeniería.

Para el cálculo de los caudales de periodo de retorno se utilizó el *software* EasyFit, en su versión 5.6. Este programa tiene la capacidad de ajustar variadas distribuciones de probabilidad a los datos, en este caso caudales máximos anuales, para así poder en primer lugar ajustar la distribución deseada, y posteriormente calcular los caudales asociados distintos periodos de retorno. Las pruebas estadísticas para poder comparar el rendimiento de las distintas distribuciones posibles se detallan a continuación.

#### Kolmogorov-Smirnov

El test de Kolmogorov-Smirnov compara la distribución empírica de los datos con una distribución teórica (elegida en EasyFit) para determinar si los datos siguen esa distribución.

Para esto, se calcula la diferencia más amplia entre la distribución de probabilidad acumulada teórica y la empírica, mediante la ecuación 3.4.

$$D = \max_{0 \leq i \leq n} \left( F(x_i) - \frac{(i-1)}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (3.4)$$

#### Anderson-Darling

El test de Anderson-Darling es una versión mejorada del test K-S, que da más peso a las colas de la distribución. Evalúa si los datos se ajustan a una distribución particular, centrándose en las desviaciones en los extremos. El estadístico viene definido por la ecuación 3.5.

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))] \quad (3.5)$$

#### Chi-cuadrado (Chi-squared)

El test Chi-cuadrado compara las frecuencias observadas en los datos con las frecuencias esperadas según una distribución teórica. Calcula la desviación entre ambas para evaluar la

bondad del ajuste. Este test, trabaja sobre datos agrupados en intervalos, por lo que, la calidad del estadístico depende en gran manera de que tan bien asignados estén dichos intervalos, que se definen al inicio del programa como de igual probabilidad o de igual ancho (igual probabilidad es lo más recomendado pues capta mejor los datos altos).

El valor del estadístico está dado por la ecuación 3.6.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3.6)$$

Donde  $O_i$  corresponde a la frecuencia observada para el intervalo, y  $E_i$  es la frecuencia esperada para dicho intervalo. Donde  $E_i$  se calcula como:

$$E_i = (F_{(x_2)} - F_{(x_1)}) \quad (3.7)$$

La forma para seleccionar que distribución es mejor, en mediante un análisis de los estadísticos obtenidos después de aplicar estas tres pruebas a cada una de las distribuciones. Seguidamente, se escoge la distribución que cuente con los menores valores posibles en las tres pruebas, y que, además, pase todas las pruebas de ajuste con un valor de significancia de por lo menos un 95 %, que son desarrolladas por el software.

Además, se debe llevar a cabo una inspección visual de los gráficos entregados, para ver que se cumpla un buen ajuste con los datos.

Los caudales para los distintos periodos de retorno se calculan con el *stat assist*, de EasyFit, el cual, mediante el ingreso de la Probabilidad de excedencia inversa. Para efectos de este trabajo, los periodos de retorno de interés son: 2, 5, 10, 50, 100, 150 y 200 años.

### 3.6. Calibración y validación

#### 3.6.1. Cuenca del Río Carampangue.

Para el caso del río Carampangue, como se tiene información limitada de caudales (en la estación DGA Río Carampangue en Carampangue, se realiza una transposición de caudal, con estaciones ubicadas en distintas cuencas costeras, para así lograr armar un registro de una longitud adecuada.

Esta estación tiene un registro de caudales que se extiende desde el año 1971 hasta 1983. Sin embargo, dicho registro se encuentra incompleto, no logrando alcanzar un 80% del año registrado. Esto ocurre para los años 1971, 1975, 1978. Este umbral de 80% viene dado por recomendación en diversos libros de hidrología.

Para rellenar, se seleccionan las cuencas de Río Nicodahue en Pichun, Río Caramavida en Caramavida, y Río Curanilahue en Curanilahue (Figura 3.4). Para poder rellenar la estación Carampangue, como se indicó anteriormente, se utiliza el método de transposición de caudales descrito en la ecuación 3.8, que consiste en establecer una relación de áreas entre la cuenca a rellenar, y las cuencas que tienen datos.

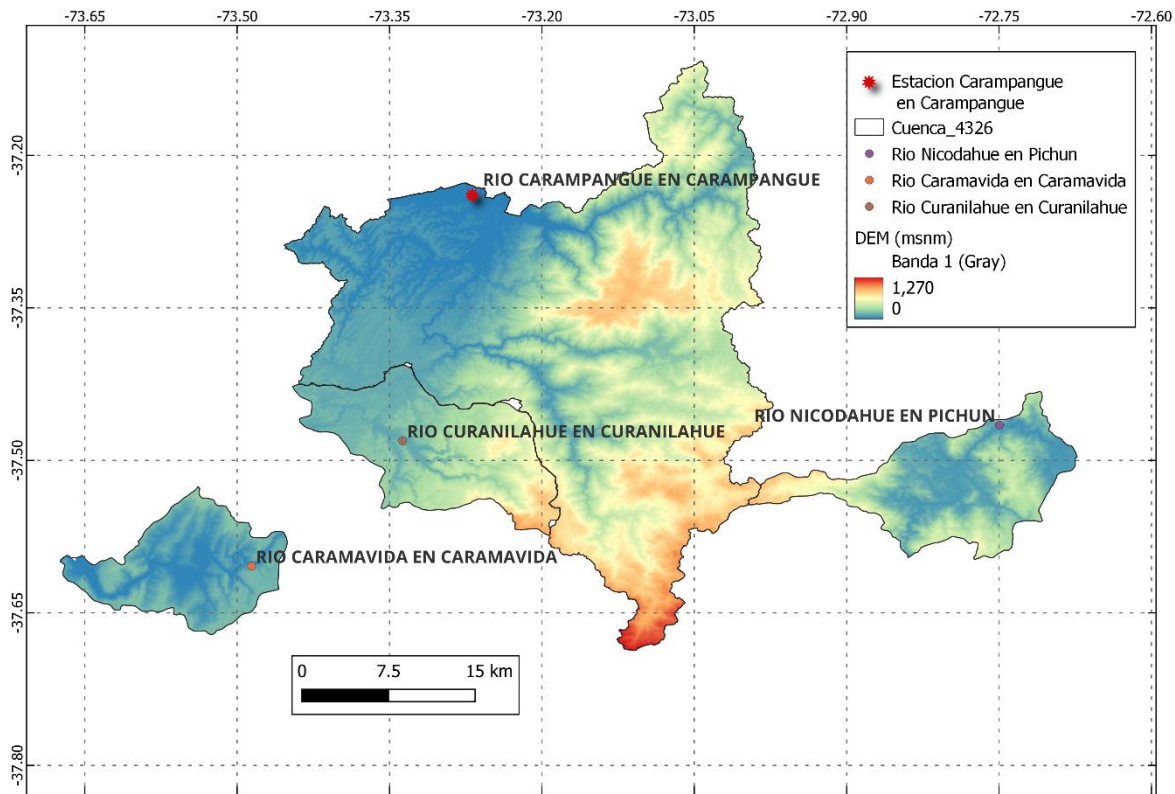


Figura 3.4: Cuenca del Carampangue y las estaciones y subcuencas que se usaron para trasponer

$$Q_1 = Q_2 \frac{A_1}{A_2} \tag{3.8}$$

En donde  $Q_1$  corresponde al caudal con que se rellenará el registro original del río Carampangue,  $Q_2$  es el caudal registrado en una de las cuencas que se utilizarán para rellenar,

$A_1$  y  $A_2$  corresponden a las áreas de las cuencas objetivo y con caudal registrado respectivamente.

Una vez realizado el relleno, se tiene el un registro de datos para el río Carampangue en Carampangue que comprende desde el año 1967 hasta 2020 (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Disponibilidad de datos para el Río Carampangue en Carampangue

<b>Año</b>	<b>Días con registro</b>	<b>% de registro</b>	<b>Año</b>	<b>Días con registro</b>	<b>% de registro</b>	<b>Año</b>	<b>Días con registro</b>	<b>% de registro</b>
1967	274	75.1%	1986	365	100.0%	2005	365	100.0%
1968	366	100.0%	1987	359	98.4%	2006	243	66.6%
1969	150	41.1%	1988	366	100.0%	2007	275	75.3%
1970	157	43.0%	1989	365	100.0%	2008	213	58.4%
1971	287	78.6%	1990	363	99.5%	2009	365	100.0%
1972	365	100.0%	1991	365	100.0%	2010	365	100.0%
1973	334	91.5%	1992	336	92.1%	2011	364	99.7%
1974	365	100.0%	1993	365	100.0%	2012	366	100.3%
1975	365	100.0%	1994	303	83.0%	2013	365	100.0%
1976	366	100.0%	1995	269	73.7%	2014	163	44.7%
1977	365	100.0%	1996	359	98.4%	2015	181	49.6%
1978	365	100.0%	1997	349	95.6%	2016	366	100.0%
1979	365	100.0%	1998	329	90.1%	2017	365	100.0%
1980	366	100.0%	1999	365	100.0%	2018	365	100.0%
1981	365	100.0%	2000	366	100.0%	2019	365	100.0%
1982	365	100.0%	2001	365	100.0%	2020	366	100.0%
1983	365	100.0%	2002	346	94.8%	2021	365	100.0%
1984	366	100.0%	2003	311	85.2%	2022	90	24.7%
1985	365	100.0%	2004	366	100.0%			

Para este estudio, lo que se busca es trabajar con caudales máximos correspondientes a cada año, para esto, se deben seleccionar los valores máximos de cada año de registro de las respectivas estaciones para ambas cuencas.

Para asegurar que los datos seleccionados representen el comportamiento anual de la cuenca, se excluyen algunos valores registrados si no cumplen con dos condiciones, que dicho año cuente con un registro de más del 80% del año calendario y que el registro para los meses de invierno, también sea mayor a un 80%.

Una vez aplicada esta metodología al registro del río Carampangue en Carampangue que fue obtenido mediante trasposición de caudales, se eliminan los años 1967, 1969, 1970, 1971, 1995, 2006, 2007, 2008, 2014, 2015 y 2022 del registro. El detalle del porcentaje de registro invernal antes mencionado se encuentra en el anexo 3.1.

### **3.6.2. Cuenca del Río Quepe**

Para la cuenca del río Quepe, se utilizan los valores registrados por la DGA en la estación Río Quepe en Quepe, que comprenden desde el año 1962 hasta el año 2021. A estos datos, se les aplica la misma metodología que en el punto anterior, para descartar los años con registros deficientes, con lo que se procede a eliminar los años 1962, 1971, 1972, 1973, 1974, 2004, 2016, 2020 y 2021 del registro. El detalle de los registros, al igual que en el punto anterior, puede ser revisado en el anexo 3.1.

## **3.7. Cambio Climático**

### **3.7.1. Selección de modelos a utilizar**

Como se detalló en las primeras secciones de este documento, los modelos de cambio climático representan mediante diferentes ecuaciones, variados escenarios de concentración de gases de efecto invernadero, y sus impactos sobre las distintas variables meteorológicas.

Existen varios Modelos de Circulación Global (GCM), entre los cuales se distinguen, no solo por la severidad de impacto que como sociedad tendríamos en el clima, si no que, además, se tienen diversos tamaños de grilla, sensibilidad de los modelos, y relación con los distintos

fenómenos meteorológicos que afectan a las distintas regiones de estudio a lo largo del planeta.

En el caso de esta investigación, se utilizan para realizar el análisis los modelos GCM regionalizados que se utilizaron en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (Ministerio de Obras Públicas, 2017), donde se llevó a cabo una reducción exhaustiva de distintos modelos de cambio climático, y se cotejó su rendimiento, en diferentes indicadores como lo fueron resolución, sensibilidad climática, correlación con las oscilaciones climáticas presentes en Chile (El niño, La niña, oscilación decadal del Pacífico, modo anular del sur), variación mensual con el periodo histórico y la opinión de los expertos en el tema. Después de este proceso de filtrado, se llegó a cuatro modelos de circulación, que son:

- Sensibilidad baja extrema: CSIRO-Mk3-6-0 (en adelante CSIRO)
- Sensibilidad baja moderada: CCSM4 (en adelante CCSM4)
- Sensibilidad alta moderada: MIROC-ESM (en adelante MIROC)
- Sensibilidad alta extrema: IPSL-CM5A (en adelante IPSL)

Donde la sensibilidad, corresponde a la resiliencia que tiene el modelo, a reaccionar frente a cambios abruptos en las concentraciones de CO<sub>2</sub> a la que se le expone.

Como se puede apreciar en la tabla 3.3, todos los modelos analizados, muestran una disminución en las precipitaciones, por lo cual, se debería esperar una disminución en los caudales futuros. De igual forma, se tiene que, según las interpretaciones de los modelos seleccionados en el balance hídrico nacional, los modelos seleccionados, a una escala nacional general, tienen las características que se listan en la tabla 3.3 y 3.4, por esto, se agrega a la tabla 3.8 una columna de evaluación del riesgo, que servirá para identificar cada modelo de una forma más sencilla.

Tabla 3.3: Robustez de la señal de cambio en las distintas zonas. Fuente: CEPAL, 2012. (Actualización del balance hídrico nacional, MOP 2017)

Zona	Robustez de la señal por períodos en el siglo XXI		
	2010-2039	2040-2069	2070-2099
Zona 1: Altiplano (LAT: 18S-23S)	No existe una señal clara de cambio en la precipitación		
	Disminución: 0% al -10 %		Aumento: +5% al +10%
Zona 2: Norte Grande (LAT: 23S-27S)	No existe una señal clara de cambio en la precipitación		
	Disminución: -5% al -10 %		
Zona 3: Norte Chico (LAT: 28S-32S)	Leve señal de disminución en las precipitaciones		
	Disminución: -5% al -10 %	Disminución: -10% al -20 %	
Zona 4: Chile Central (LAT: 32S-38S)	Señal robusta de disminución en las precipitaciones		
	Disminución: -5% al -10 %	Disminución: -10% al -20 %	Disminución: -20% al -30 %

Zona 5: Zona Sur (LAT: 38S-42S)	Señal robusta de disminución en las precipitaciones		
	Disminución: -5% al -10 %	Disminución: -10% al -20 %	Disminución: -20% al -30 %
Zona 6: Patagonia (LAT: 44S-49S)	No existe una señal clara de cambio en la precipitación		
	Neutra: -5% al 5 %		
Zona 7: Magallanes (LAT: 50S-55S)	Señal robusta de disminución en las precipitaciones		
	Neutra: -5% al 5 %	Aumento: 5% al 10 %	

Tabla 3.4:Características de los modelos a utilizar (MOP, 2017)

<b>Modelo</b>	<b>Sensibilidad (C°)</b>	<b>Delta T°</b>	<b>Delta Pp (%)</b>
CCSM4	1,25	1,13	-2,92
CSIRO	3,99	1,16	-2,86
IPLS	4,1	1,30	-16,07
MIROC	4,65	1,33	-8,07

Para el desarrollo de las estimaciones futuras, se obtienen los datos precipitación y temperatura para los cuatro modelos regionalizados en los centroides de cada subcuenca de las cuencas en estudio. Estos datos se incorporan al modelo SWAT calibrado y validado para la simulación de caudales diarios futuros.

### 3.8. Conclusión

En este capítulo se definió la metodología a seguir para la simulación de caudales máximos instantáneos futuros para las cuencas del río Quepe y el río Carampangue, recopilando la información necesaria para el desarrollo de los modelos SWAT de cada una de las cuencas.

También se informó sobre las distintas fuentes de información utilizadas, y los datos que se utilizarán en el capítulo cuatro para obtener resultados y tener una base comparativa con el escenario actual.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Introducción

En esta sección se describe el proceso de elaboración detallado de los dos modelos en SWAT, incluyendo sus subprocesos de calibración y validación, para posteriormente evaluar los modelos con los escenarios de cambio climático que fueron descritos en la parte final del capítulo 3.

Después, se obtienen los caudales máximos con distintos periodos de retorno para el periodo histórico de ambas cuencas, datos que, posteriormente son utilizados como base comparativa para los resultados de las simulaciones con cambio climático.

Una vez obtenidos los datos de caudales medios diarios a partir de los modelos, se realizó la transformación a caudales máximos instantáneos, los cuales se someten a un análisis de frecuencia para obtener los caudales máximos para distintos periodos de retorno utilizados en el diseño de obras de infraestructura.

### 4.2. Análisis de tendencia de caudales máximos anuales para ambas cuencas

Como en este trabajo el objetivo es obtener caudales de periodo de retorno, considerando datos futuros para ambas cuencas, es importante saber cómo han ido variando históricamente los caudales, para así identificar si los caudales simulados con los modelos de cambio climático siguen las tendencias históricas.

Para analizar si los caudales máximos registrados en ambas cuencas presentan alguna tendencia se utilizan dos pruebas, el test de Mann-Kendall y la pendiente de Sen, que se detallan más abajo.

- Test de Mann-Kendall: Es una prueba no paramétrica que se utiliza para identificar la tendencia monótonica de un conjunto de datos. Esta prueba, es la más recomendada para identificar tendencias climatológicas e hidrológicas.
- Test de la pendiente de Sen: Esta prueba, calcula la pendiente, o tasa de cambio para los datos, entregando una pendiente que representa a la totalidad del registro, el signo de la pendiente indicará la tendencia que se tiene, y el valor del parámetro entregado indicará la magnitud de este cambio.

Los resultados se detallan en la tabla 4.3.

Tabla 4.1: Resultados de test de tendencia para los caudales máximos anuales (Periodo 1981-2019).

Modelo	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope	
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value
Quepe	-1.188	2.35E-01	-3.000	2.35E-01
Carampangue	-3.933	8.40E-05	-8.819	8.40E-05

A partir del análisis de los resultados, se puede ver que en ambas cuencas se ve una tendencia a la disminución en los caudales máximos anuales, sin embargo, en el caso de la cuenca del río Quepe, se tiene que valor de p-stat es mayor a 0.05, por lo tanto, no es posible rechazar la hipótesis nula, y los resultados no son concluyentes. Para el río Carampangue, el valor de p-stat es menor a 0.05, por lo que si existe una tendencia a la disminución significativa.

#### 4.2.1. Análisis de tendencia de los modelos cambio climático

Para realizar en análisis de tendencia de las series de precipitaciones y temperaturas de los cuatro modelos de cambio climático se usaron las mismas dos pruebas de tendencia que en el punto anterior. Estos análisis se aplicaron a las variables de precipitación anual, precipitación máxima anual, temperatura máxima y mínima anual provenientes de los cuatro modelos de cambio climático, en las dos cuencas de estudio, los resultados obtenidos para la cuenca del río Carampangue se muestran en las tablas 4.2 a 4.5, los resultados para la cuenca del río Quepe se encuentran en el anexo 4.1.

Tabla 4.2: Precipitación anual en Cuenca del Carampangue

Modelo	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope	
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value
CCSM4	-1.914	5.56E-02	-2.117	5.56E-02
CSIRO	-1.866	6.20E-02	-1.856	6.20E-02
IPLS	-5.895	3.76E-09	-7.202	3.76E-09
MIROC	-2.995	2.74E-03	-2.695	2.74E-03

Tabla 4.3: Precipitación máxima anual en Cuenca del Carampangue

Modelo	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope	
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value
CCSM4	-1.914	5.56E-02	-2.117	5.56E-02
CSIRO	-1.866	6.20E-02	-1.856	6.20E-02
IPLS	-1.554	1.20E-01	-0.121	1.20E-01
MIROC	-0.469	6.39E-01	-0.023	6.39E-01

Tabla 4.4: Temperatura máxima anual en Cuenca del Carampangue

Modelo	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope	
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value
CCSM4	7.200	6.02E-13	0.035	6.02E-13
CSIRO	5.502	3.75E-08	0.028	3.75E-08
IPLS	6.980	2.96E-12	0.042	2.96E-12
MIROC	7.340	2.13E-13	0.059	2.13E-13

Tabla 4.5: Temperatura mínima anual en Cuenca del Carampangue

Modelo	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope	
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value
CCSM4	4.269	1.97E-05	0.023	1.97E-05
CSIRO	5.210	1.89E-07	0.025	1.89E-07
IPLS	3.208	1.34E-03	0.028	1.34E-03
MIROC	3.904	9.45E-05	0.037	9.45E-05

A partir de los resultados obtenidos, los cuales se resumen en la tabla 4.6, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

Se evidencia claramente una disminución en las precipitaciones anuales y máximas anuales en la cuenca del Carampangue, y se puede distinguir que el modelo RCM que tiene mayores disminuciones en precipitaciones, tanto máximas anuales como anuales es el modelo IPLS.

Para el caso de la cuenca del río Quepe se evidencia una disminución en precipitación anual en todos los modelos, sin embargo, todos los modelos menos el modelo IPLS, indican un aumento en la magnitud de los eventos de precipitación máxima anual, lo cual podría afectar a los caudales generados.

En cuanto a las temperaturas máximas y mínimas, se ve un aumento en todos los modelos en ambas cuencas, destaca el modelo MIROC, que muestra un aumento mayor a los demás en ambas variables.

Tabla 4.6: Tendencias en los modelos de cambio climático para cada cuenca

Modelo	Carampangue			Quepe		
	PP anual	PP máxima	T° máxima	PP anual	PP máxima	T° máxima
CCSM4	-	--	++	-	+	+
CSIRO	-	--	+	-	++	++
IPLS	---	-	++	---	-	++
MIROC	--	-	+++	-	+	+++

Los signos positivos significan una tendencia al aumento y los negativos una tendencia a la disminución, se clasifican además con tres niveles, tres símbolos indican el mayor cambio entre los modelos, uno indica el menor cambio entre los modelos, y dos el punto medio entre los modelos.

Otra forma de analizar los modelos es dividir el horizonte de proyección de los modelos en dos periodos, a esta división, se les pueden realizar distintos cálculos para ver la tasa de cambio entre ambos periodos. En la figura 4.1, se calculó el promedio de la precipitación anual en los periodos 1990 – 2020 y 2021 – 2060, y posteriormente se calculó la diferencia porcentual entre ambos periodos, donde se ve claramente que hay una disminución en las precipitaciones anuales entre ambos periodos. Esto se realizó para los modelos CCSM4 e IPLS en la cuenca del río Carampangue.

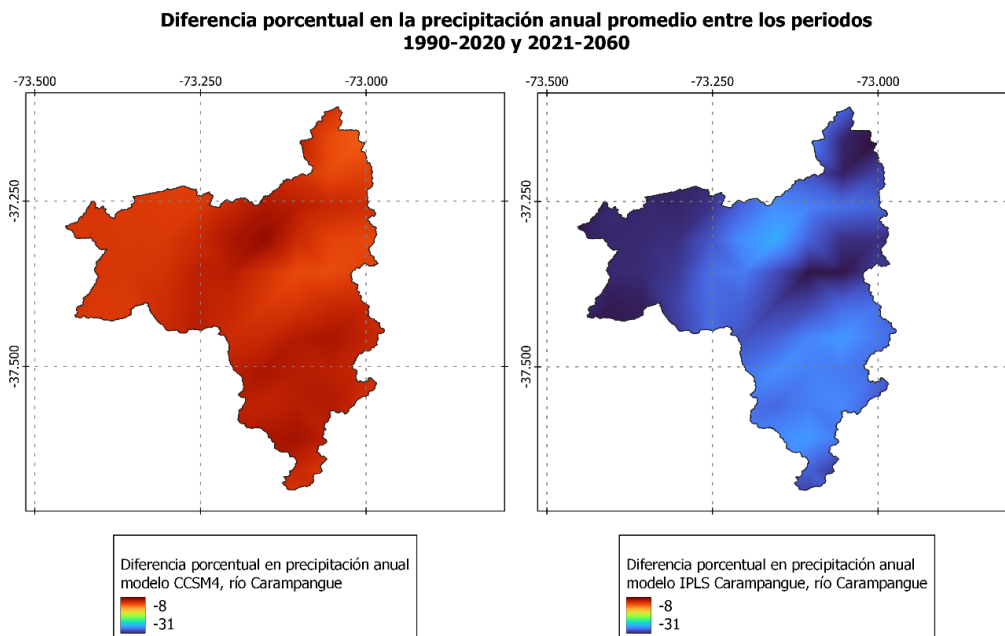


Figura 4.1: Diferencia porcentual en la precipitación anual promedio entre los periodos 1990-2020 y 2021-2060, cuenca del río Carampangue

### 4.3. Modelación en SWAT

Los modelos se construyeron utilizando la información topográfica, de usos del suelo, series del suelo y meteorológica indicada en el capítulo.

En el caso de la cuenca del río Carampangue, se escogió como periodo de calibración el comprendido entre 1981 y 1983, debido a que, en este periodo, se tienen datos medidos en el punto de descarga por la estación DGA, que posteriormente fue deshabilitada (Figura 4.1a)

Para el río Quepe, se utiliza el periodo de calibración va desde el año 1981 hasta 1991, con un periodo de validación entre 1992 y 2002 (Figura 4.1b).

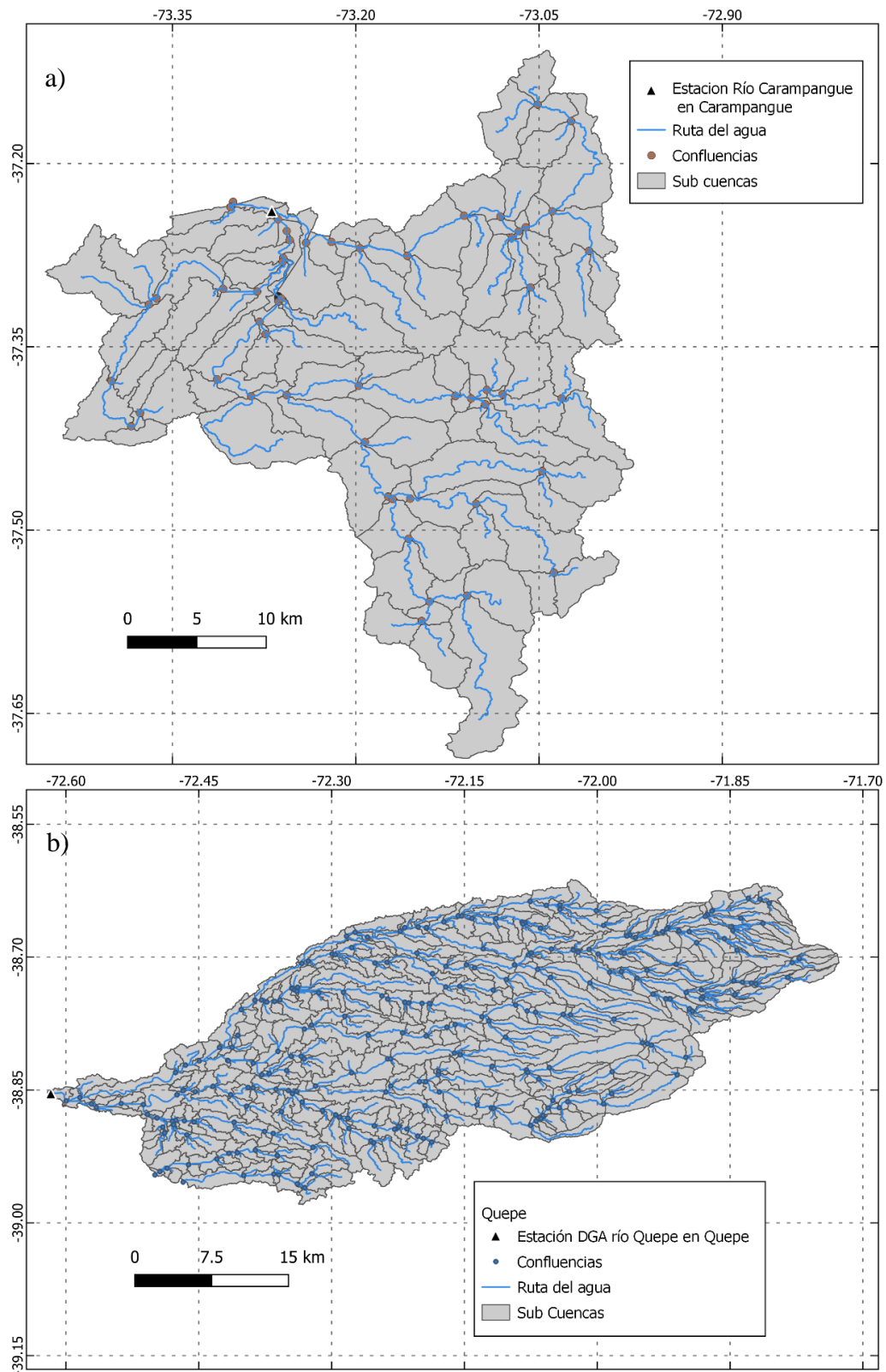


Figura 4.2: Cuencas de los ríos Carampangue y Quepe en SWAT

Una vez finalizada la modelación con SWAT, se creó un nuevo proyecto en el software SWAT-CUP, un programa de calibración semiautomática para modelos hidrológicos SWAT. Este software utilizó como datos de entrada las observaciones de las estaciones DGA de cada cuenca, correspondientes a los periodos de calibración y validación de acuerdo con lo indicado en la metodología.

Para ello, se seleccionaron dos periodos: uno para la calibración y otro para la validación del modelo. Como sus nombres lo indican, en el primer periodo se calibró el modelo, ajustando diversos parámetros relevantes para la variable que se buscaba calibrar (en este caso, el caudal), con el objetivo de que el modelo reflejara con precisión los procesos reales. Debido a la naturaleza iterativa de este proceso, la fase de calibración tomó una cantidad significativa de tiempo.

La gran ventaja de usar el software SWAT-CUP para este paso, es que, genera una gran cantidad de sets de parámetros, que van cambiando entre los valores que el usuario escoja, con esto, en tiempos mucho más reducidos, se pueden llevar a cabo muchos cambios en los sets de parámetros, lo cual, en conjunto con la función de pago “Parallel Processing” permite llevar a cabo cientos de simulaciones diarias con el modelo. Este software, para cada una de las iteraciones que realiza, va calculando distintos parámetros estadísticos de ajuste, entre ellos  $R^2$ , NSE y PBIAS, que son los que se utilizan para discernir el nivel de desempeño del modelo.

En segundo lugar, viene el periodo de validación, que consiste en probar el set de parámetros final junto con sus valores estimados en el periodo de calibración en un nuevo periodo de tiempo. Como es de esperarse, es deseable que se tengan similitudes entre ambos periodos, como pueden ser los caudales promedio, la longitud del registro y la desviación de los datos. Si los valores de los estadísticos de ajuste son considerados correctos, el modelo a estaría terminado.

Para el caso de este estudio, se llevaron a cabo dos procesos de calibración para cada cuenca, una para tratar de replicar el comportamiento de la cuenca a lo largo de todo el periodo, y otro para lograr acercarse de mejor manera a los valores altos de caudal, que finalmente son los que se necesitan para esta investigación.

En el anexo 4.2 se tienen los caudales medios diarios de cada cuenca para los periodos de calibración del modelo.

En este estudio, se realizaron diferentes cambios de parámetros, en tandas de aproximadamente 800 simulaciones en un proceso multi-core, por lo que, aproximadamente, cada corrida de SWATCUP involucraba 800 corridas de SWAT con diferentes valores en cada simulación, para el set de parámetros seleccionado, que tomaban aproximadamente 8

horas en ser completadas, por lo que, queda en evidencia que el costo computacional de este tipo de simulaciones es considerable.

Los resultados obtenidos para la cuenca del río Carampangue se pueden ver graficados en la figura 4.3 y los para la cuenca del río Quepe en la figura 4.4.

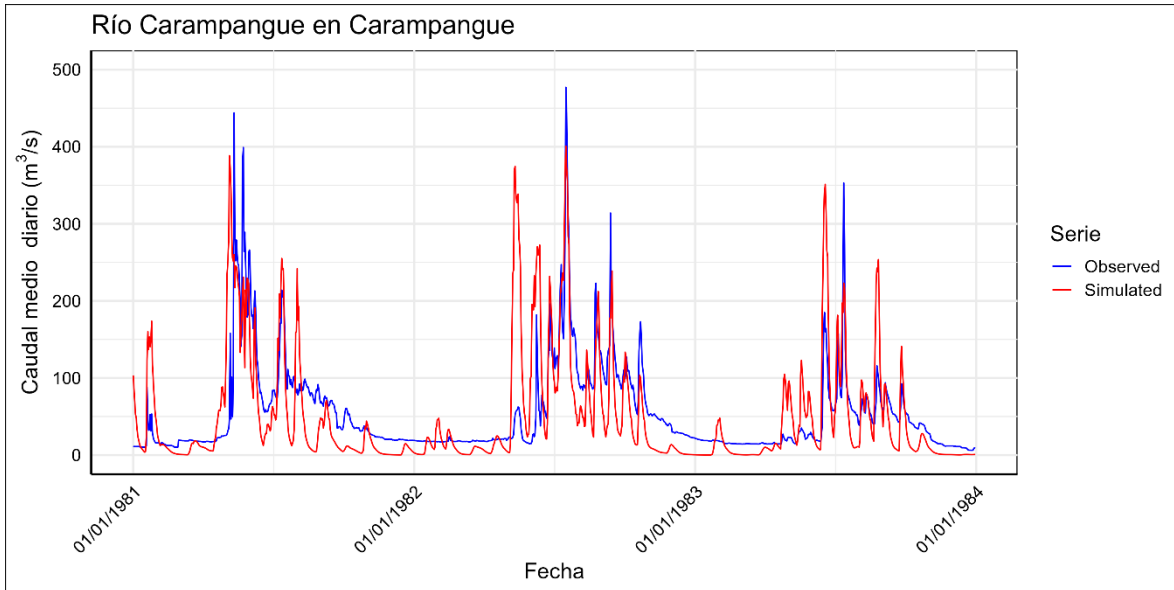


Figura 4.3: Caudales diarios simulados y observados para el periodo de calibración del río Carampangue

Para los modelos SWAT de los ríos Carampangue y Quepe se obtuvieron estadísticos que indican que los modelos cumplen con representar la realidad del río (Tabla 4.7), pero no en su totalidad, y por análisis de las salidas de datos, se puede evidenciar que el modelo subestima en gran manera los caudales peak del río, que son finalmente el producto necesario para poder realizar el siguiente paso de esta investigación. Esto además se puede ratificar analizando gráficamente los caudales obtenidos de esta primera calibración, que se pueden consultar en las figuras 4.3 y 4.4.

Los parámetros que se utilizaron para la calibración de ambas cuencas se encuentran en el anexo 4.3. Los estadísticos de bondad de ajuste obtenidos para ambos modelos se muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4.7: Parámetros de bondad de ajuste para la simulación general de los ríos Carampangue y Quepe, periodo de Calibración.

<b>Carampangue</b>		<b>Quepe</b>	
Medida de bondad de ajuste	Valor	Medida de bondad de ajuste	Valor
R <sup>2</sup>	0.64	R <sup>2</sup>	0.62
NS	0.59	NS	0.615
PBIAS	-24.8	PBIAS	-5.7

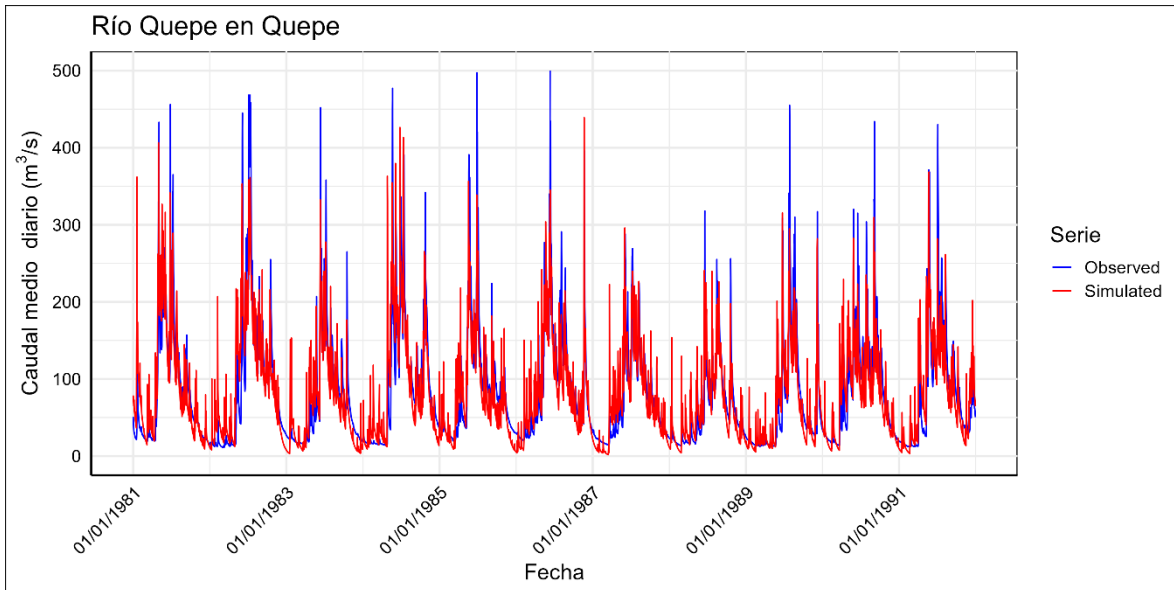


Figura 4.4: Caudales diarios simulados y observador para el periodo de calibración del río Quepe

Como se puede ver, los parámetros R<sup>2</sup> y NS se encuentran en la categoría de bueno, y el PBIAS indica expresamente que el modelo está subestimando no solo los eventos peak, si no también, el comportamiento general de la cuenca.

Para la calibración de los caudales altos, se seleccionó un umbral en base al gráfico de caudales observados de cada cuenca para el periodo de calibración, para así buscar calibrar los valores de la región superior del gráfico. El umbral anteriormente mencionado fue obtenido a partir de la observación de los gráficos de caudal medio diario de las figuras 4.3 y 4.4. A partir de esto, se tiene un umbral de 200 m<sup>3</sup>/s para el río Carampangue en Carampangue y de 450 m<sup>3</sup>/s para el río Quepe en Quepe. En el anexo 4.4 se encuentran las

observaciones durante los periodos de calibración que sobrepasan los umbrales antes mencionados

Para el caso del río Carampangue, se logró obtener el gráfico de caudales observados y simulados que se muestra en la figura 4.5. Como se puede ver, a pesar de que no se ve un ajuste fino como en el gráfico anterior, debido a que los nuevos parámetros para la calibración de peaks generan pulsos de caudal, lo importante es que se logró representar de una mejor manera los caudales más altos del registro, que finalmente son el objetivo de esta investigación.

En el caso del río Quepe, luego de aplicar la calibración para peaks a los registros diarios de caudal, se obtienen resultados no tan buenos como en el caso del río Carampangue, lo que puede ser deberse a que al tener un registro de uso de suelos mucho más general, el modelo no es capaz de simular de buena forma los eventos que sobrepasan por mucho la media de los peak que se escogieron para la calibración, lo cual se puede ver en la figura 4.6.

Aun así, los estadísticos de bondad de ajuste son aceptables, al igual que para la cuenca del Carampangue. Ambos estadísticos se encuentran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8: Medidas de bondad de ajuste para modelos calibrados para peaks

<b>Carampangue</b>		<b>Quepe</b>	
Medida de bondad de ajuste	Valor	Medida de bondad de ajuste	Valor
R2	0.535	R2	0.441
NS	0.463	NS	0.512
PBIAS	-9.2	PBIAS	-18.1

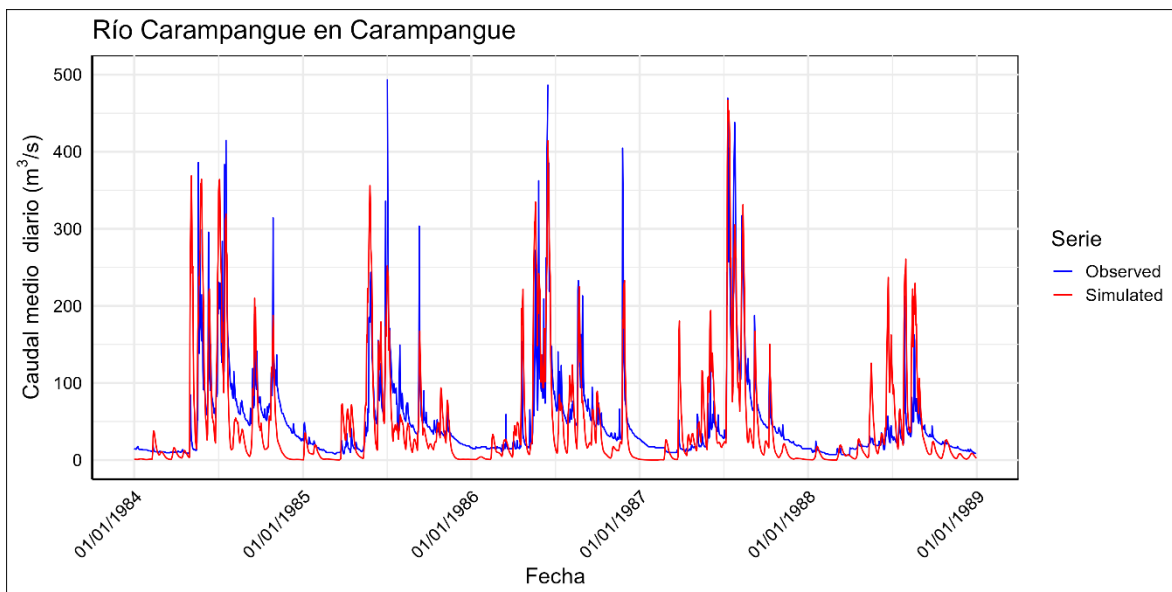


Figura 4.5: Comparación de caudales medios diarios observados y simulados, para el periodo de validación del río Carampangue, con parámetros peak.

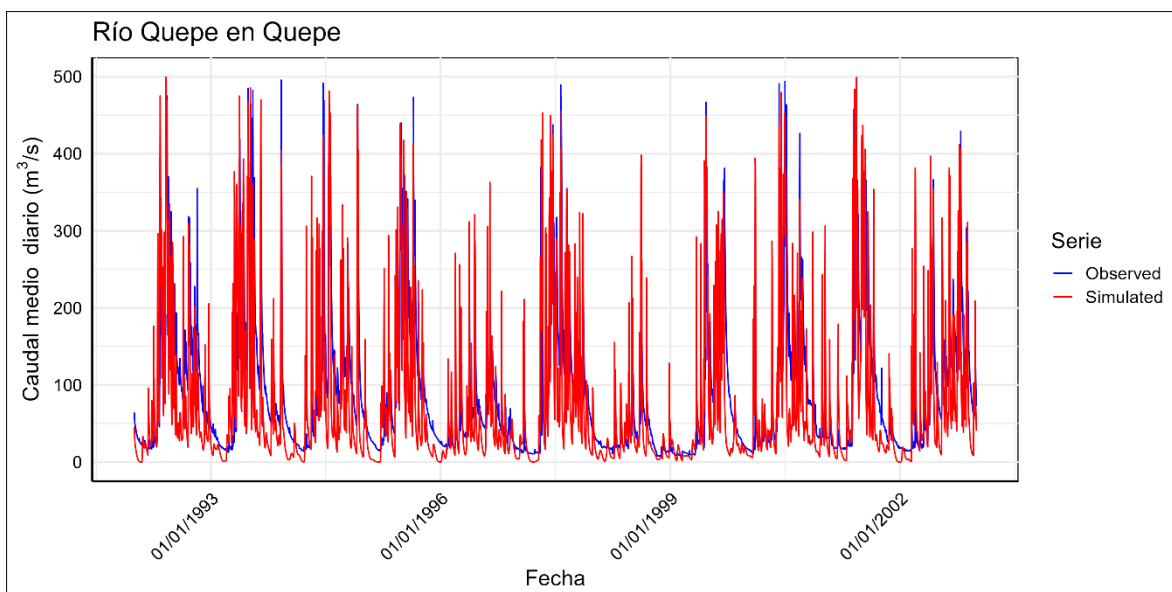


Figura 4.6: Comparación de caudales medios diarios observados y simulados, para el periodo de validación del río Quepe, con parámetros peak.

#### 4.4. Integración modelos de cambio climático a los modelos SWAT

Finalmente, en el modelo SWAT calibrado y validado se reemplazan los datos meteorológicos utilizados durante la etapa de calibración y validación por los provenientes de modelo regionalizados de circulación global. Para esto, se utilizan las precipitaciones y temperaturas de cuatro modelos de cambio climático, las cuales vienen dadas por el producto grillado de cada modelo, por lo que no presenta un mayor inconveniente, ya que los datos utilizados al inicio de la modelación provenientes del CR2 ya estaban en este formato.

El procedimiento para aplicar las condiciones calibradas para peaks obtenidas en el punto anterior del presente capítulo es bastante sencillo, se deben copiar los ficheros del proceso de calibración en la carpeta TxtInOut a la carpeta Default dentro de los archivos del modelo SWAT, para posteriormente correr el modelo con las precipitaciones y temperaturas que corresponden a cada modelo de cambio climático.

Una vez hecho esto, se corrió el modelo ya calibrado, obteniendo los caudales medios diarios que se graficaron en las figuras 4.7 y 4.8, que corresponden a las cuencas del Carampangue y del Quepe respectivamente.

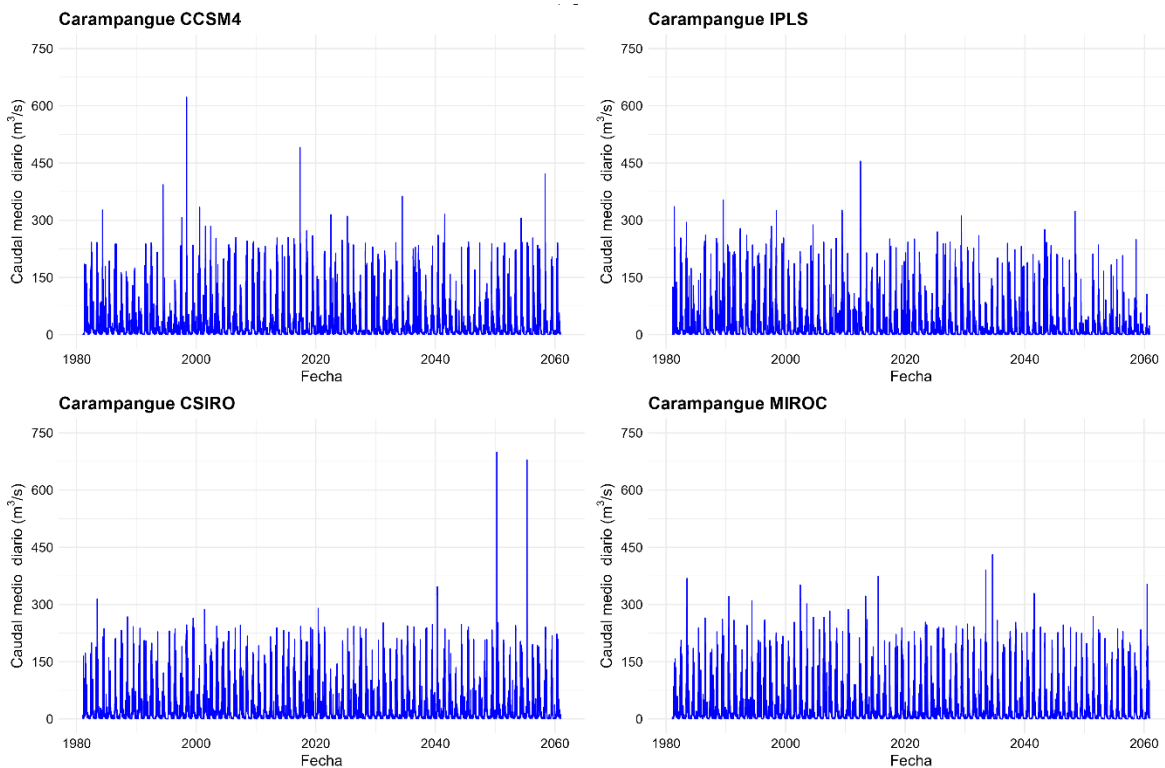


Figura 4.7: Caudales medios diarios Simulados para la cuenca del río Carampangue con los modelos de cambio climático

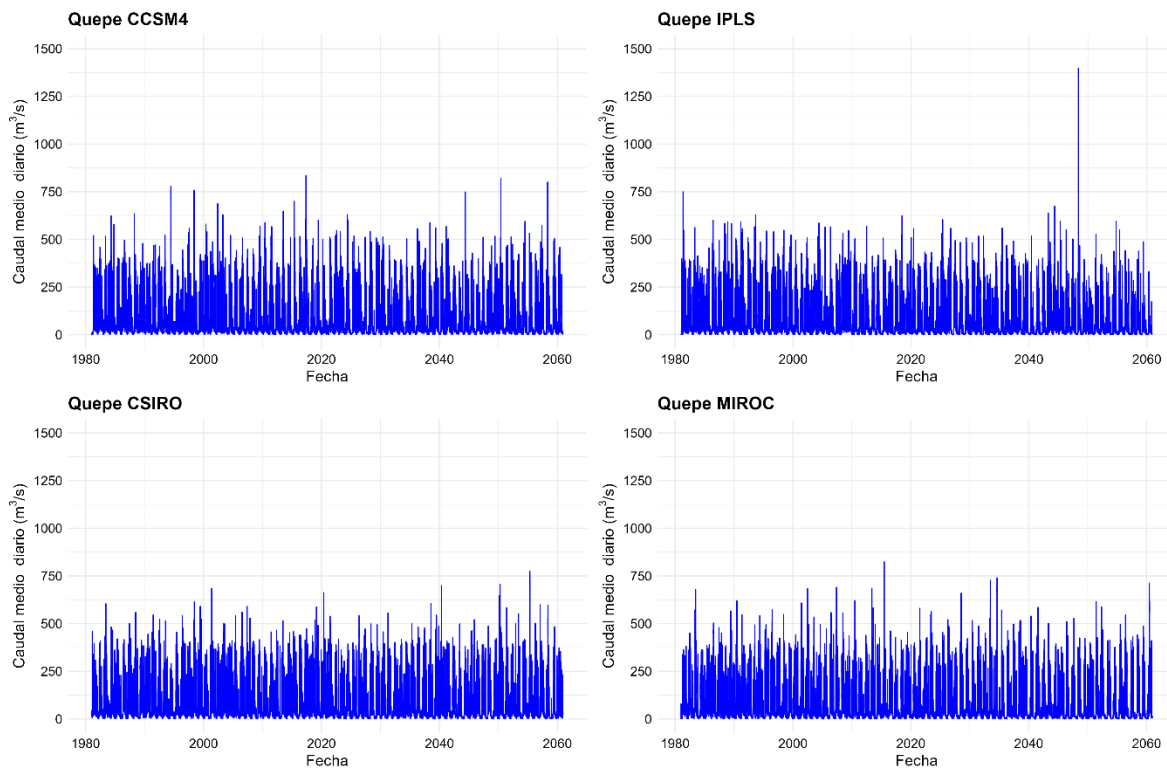


Figura 4.8: Caudales medios diarios Simulados para la cuenca del río Quepe con los modelos de cambio climático

#### 4.5. Cálculo de caudales máximos asociados a distintos periodos de retorno a partir de datos medios diarios.

En esta sección se realiza el cálculo de los caudales máximos asociados a distintos periodos de retorno para la cuenca del río Quepe y del río Carampangue, con los datos históricos, y posteriormente con los datos simulados.

##### 4.5.1. Validación método de Chen (2017)

Antes de calcular los caudales máximos a partir de los caudales modelados con SWAT, se verifica la efectividad del método de Chen (2017). Para esto, se toman los datos horarios existentes registrados por la DGA, de los cuales se selecciona el caudal más alto registrado para cada día, entre los años 1981 y 2019. Estos datos, se contrastan con los caudales máximos instantáneos obtenidos mediante el método de Chen (2017) lo cual puede consultarse en el anexo 4.4 . De este ejercicio se obtiene un error promedio en la estimación

de 7.15% para el río Carampangue y de 6.08% para el río Quepe, por lo que el método funciona de forma satisfactoria.

Una vez analizados y extraídos los caudales medios diarios de la DGA, se procede a aplicar la metodología de Chen, descrita en el capítulo dos del documento. Para esto, como es necesario aplicarlo en los puntos en que el evento es peak, se realiza un filtrado de los datos, en donde solo se aplica la transformación de caudales a un evento que fue un “peak”, que ocurre cuando el caudal medido es mayor que los dos caudales adyacentes, como se puede ver en la ecuación 4.4.

$$Q_{\text{día peak}} > Q_{\text{día posterior}} \ \& \ Q_{\text{día peak}} > Q_{\text{día anterior}} \quad (4.4)$$

Finalmente, con los caudales que resultan de las proyecciones de cambio climático, y de la aplicación de la metodología de Chen, se obtienen los resultados expuestos en la sección siguiente del presente capítulo.

#### 4.5.2. Cálculo de caudales máximos modelados asociados a distintos periodos de retorno para la cuenca del Río Carampangue (Periodo 1981-2019).

A partir de los caudales máximos anuales para el río Carampangue, que pueden ser consultados en el Anexo 4.5, se calculan los caudales máximos con periodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150 y 200 años mediante el Software (Tabla 4.1). Se ajustaron los caudales máximos anuales con la distribución Jhonson SB, que fue la que arrojó mejores resultados en general en las distintas pruebas de bondad de ajuste (Chi cuadrado, Kolmogorov Smirnov y Anderson-Darling) y para el ajuste gráfico.

Tabla 4.9: Caudales máximos para distintos periodos de retorno típicos para el río Carampangue en Carampangue (Periodo 1981-2019)

<b>T</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
2 años	321.01
5 años	430.23
10 años	507.51
20 años	581.76
50 años	675.04
100 años	741.49
150 años	778.53
200 años	804.07

#### 4.5.3. Cálculo de caudales máximos modelados asociados a distintos periodos de retorno para la cuenca del Río Quepe (Periodo 1981-2019).

En esta sección se sigue el procedimiento del punto anterior con los caudales más altos de cada año en el periodo histórico escogido para la cuenca del río Quepe. Haciendo esto se tienen los resultados en el anexo 4.5.

Ahora, se calculan los caudales correspondientes a los periodos de retorno que fueron mencionados anteriormente.

Se obtuvieron como resultados los datos mostrados en la tabla 4.2.

Tabla 4.10: Caudales asociados a distintos periodos de retorno, Río Quepe en Quepe (Periodo 1981-2019)

<b>T</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
2 años	588.94
5 años	859.85
10 años	1055.4
20 años	1243.6
50 años	1481.5
100 años	1653.4
150 años	1749.8
200 años	1818.9

#### 4.5.4. Caudales máximos futuros asociados a distintos periodos de retorno para la cuenca del río Carampangue en Carampangue.

A las series de caudales modelada para el periodo 1980 a 2060 mediante los distintos modelos climáticos se le aplica la metodología mostrada en (Cheng et al., 2017), para así obtener los caudales máximos anuales. Estos resultados de caudales máximos anuales se encuentran en el anexo 4.6.

Seguidamente, se calculan los caudales correspondientes a los diferentes periodos de retorno seleccionados. Esto se realiza mediante un análisis estadístico utilizando software EasyFit, el cual tiene como input los valores máximos anuales obtenidos anteriormente, seleccionándose para el cálculo de los distintos periodos de retorno la función de distribución de probabilidades con mejor ajuste al set de datos, tanto gráficamente, como mediante la evaluación de indicadores estadísticos (Chi-cuadrado, Kolmogorov–Smirnov y Anderson-Darling). Los periodos de retorno de interés son: 2, 5, 10, 50, 100, 150 y 200 años.

Para efectos de este estudio, se dividieron los registros en tres periodos, el primero (tabla 4.11) es el análisis de frecuencia con el total de años con registro máximo instantáneo, que en el caso histórico es de 39 años, en el caso de los valores simulados, se utilizan los caudales máximos instantáneos obtenidos desde 1981 hasta 2060, que es un total de 80 años.

Tabla 4.11: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Carampangue

<b>Modelo</b>	<b>CSIRO</b>	<b>CCSM4</b>	<b>IPLS</b>	<b>MIROC</b>	<b>Histórico</b>
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
2 años	233.12	243.86	231.44	247.03	323.26
5 años	277.24	303.52	280.64	293.81	420.96
10 años	307.94	343.95	312.10	324.96	473.44
20 años	339.97	385.36	342.71	353.35	521.93
50 años	386.47	444.48	382.99	390.43	600.72
100 años	425.83	493.83	413.24	417.88	691.02
150 años	450.82	524.90	430.77	433.76	765.80
200 años	469.52	548.05	443.58	444.96	832.87

En la tabla 4.12 se tiene el análisis de frecuencia para un periodo de control histórico, que comprende 30 años, desde 1990 a 2019, tanto para los datos observados como para los datos simulados con los modelos de cambio climático. Esto es realizado debido a que, para un correcto análisis e interpretación de resultados, se tiene que contar con una cantidad de años igual para ambos registros.

Tabla 4.12: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Carampangue, para el periodo 1991-2019

<b>Modelo</b>	<b>CSIRO</b>	<b>CCSM4</b>	<b>IPLS</b>	<b>MIROC</b>	<b>Histórico</b>
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
2 años	231.12	256.78	237.53	260.87	306.04
5 años	262.33	333.8	279.52	302.21	411.49
10 años	278.76	386.68	307.38	330.23	494.77
20 años	292.56	441.31	335.46	356.78	585.43
50 años	308.25	519.76	374.73	390.17	720.21
100 años	318.81	585.48	406.78	414.53	835.84
150 años	324.58	626.87	426.64	428.46	909.63

200 años	328.53	657.79	441.28	438.25	965.22
----------	--------	--------	--------	--------	--------

Seguidamente, en la tabla 4.13 se tiene un análisis de frecuencia realizado sobre los caudales simulados obtenidos para el periodo futuro, que va desde 2025 hasta 2054.

Tabla 4.13: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Carampangue, para el periodo 2025-2054

<b>Modelo</b>	<b>CSIRO</b>	<b>CCSM4</b>	<b>IPLS</b>	<b>MIROC</b>
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
2 años	236.48	237.19	233.97	246.61
5 años	282.69	277.99	272.72	283.55
10 años	314.92	304.06	291.84	311.54
20 años	348.6	329.44	307.47	341.66
50 años	397.59	362.75	324.87	385.75
100 años	439.12	387.91	336.25	422.79
150 años	465.49	402.6	342.31	446.05
200 años	485.29	413.06	346.39	463.37

Finalmente, se tiene una comparación entre los resultados que se tienen para los dos periodos que se utilizaron en las tablas 4.12 y 4.13, cada comparación, se realiza dentro de los datos obtenidos por el mismo modelo.

Tabla 4.14: Diferencia porcentual entre caudales máximos y sus respectivos de periodos de retorno para la cuenca del río Carampangue, periodos 1991-2019 y 2025-2054

<b>Modelo</b>	<b>CSIRO</b>	<b>CCSM4</b>	<b>IPLS</b>	<b>MIROC</b>
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Δ %</b>	<b>Δ %</b>	<b>Δ %</b>	<b>Δ %</b>
2 años	2.32%	-7.63%	-1.50%	-5.47%
5 años	7.76%	-16.72%	-2.43%	-6.17%
10 años	12.97%	-21.37%	-5.06%	-5.66%
20 años	19.16%	-25.35%	-8.34%	-4.24%
50 años	28.98%	-30.21%	-13.31%	-1.13%
100 años	37.74%	-33.74%	-17.34%	1.99%
150 años	43.41%	-35.78%	-19.77%	4.11%
200 años	47.72%	-37.20%	-21.50%	5.73%

Adicionalmente, se puede ver la diferencia entre los caudales de periodo de retorno para ambos periodos antes mencionados, en el gráfico de las figuras 4.8, donde en línea gruesa se tienen los resultados del periodo 1991-2019 y con línea delgada, los resultados del periodo 2025-2054.

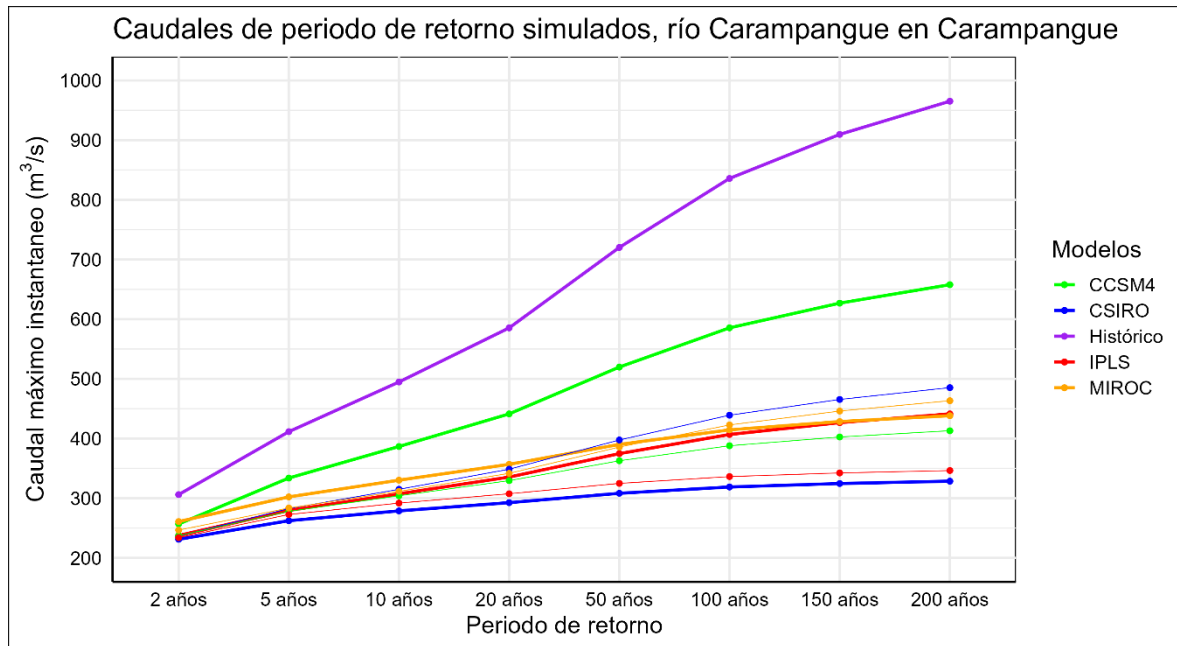


Figura 4.9: Caudales máximos simulados con periodo de retorno asociado, río Carampangue en Carampangue.

#### 4.5.5. Caudales máximos modelados asociados a distintos periodos para la cuenca del río Carampangue en Quepe.

Al igual que en la cuenca anterior se calculan los caudales correspondientes a los diferentes periodos de retorno característicos para el diseño de obras civiles. Bajo los mismos lineamientos estadísticos y con los mismos periodos de retorno de interés, que son: 2, 5, 10, 50, 100, 150 y 200 años. También se utilizan las tres comparaciones de totalidad de datos (tabla 4.15) , 1990-2019 (tabla 4.16) y 2025-2054 (tabla 4.17).

Tabla 4.15: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Quepe, para la totalidad de los datos.

<b>Modelo</b>	<b>CSIRO</b>	<b>CCSM4</b>	<b>IPLS</b>	<b>MIROC</b>	<b>Histórico</b>
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
2 años	514.68	540.17	524.22	514.66	607.05
5 años	590.73	641.66	633.39	607.42	887.00
10 años	639.85	703.88	698.83	671.47	1077.8
20 años	686.06	759.36	757.55	733.75	1263.9
50 años	744.6	825.76	828.99	814.98	1509.1
100 años	787.54	872.17	879.88	876.12	1696.6
150 años	812.19	898.09	908.68	911.82	1807.5
200 años	829.55	914.01	928.22	937.23	1887.1

Tabla 4.16: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Quepe, para el periodo 1991-2019

<b>Modelo</b>	<b>CSIRO</b>	<b>CCSM4</b>	<b>IPLS</b>	<b>MIROC</b>	<b>Histórico</b>
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
2 años	516.11	553.88	529.80	536.29	607.05
5 años	586.68	651.80	585.88	641.46	887.00
10 años	627.51	724.69	621.74	703.94	1077.80
20 años	662.78	804.50	656.63	758.70	1263.90
50 años	703.39	926.70	702.43	823.29	1509.10
100 años	730.47	1035.50	737.03	867.90	1696.60
150 años	745.04	1107.00	757.24	892.62	1807.50
200 años	754.90	1161.80	771.62	909.70	1887.10

Tabla 4.17: Caudales máximos instantáneos simulados y su correspondiente periodo de retorno característico para la cuenca del Quepe, para el periodo 2025-2054.

<b>Modelo</b>	<b>CSIRO</b>	<b>CCSM4</b>	<b>IPLS</b>	<b>MIROC</b>
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
2 años	516.91	520.16	527.44	502.13
5 años	587.22	596.21	660.58	597.66
10 años	632.10	645.75	748.03	665.26
20 años	673.55	695.04	831.99	730.41

50 años	725.05	762.97	941.78	813.84
100 años	762.28	817.66	1025.60	875.36
150 años	783.51	851.20	1075.20	910.78
200 años	798.42	875.83	1110.90	935.77

Igualmente, que, en la cuenca anterior, se tiene una comparación entre los resultados que se tienen para los dos periodos que se utilizaron en las tablas 4.16 y 4.17, cada comparación, se realiza dentro de los datos obtenidos por el mismo modelo.

Tabla 4.18: Diferencia porcentual entre caudales máximos y sus respectivos de periodos de retorno para la cuenca del río Quepe, periodos 1991-2019 y 2025-2054

<b>Modelo</b>	<b>CSIRO</b>	<b>CCSM4</b>	<b>IPLS</b>	<b>MIROC</b>
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Δ %</b>	<b>Δ %</b>	<b>Δ %</b>	<b>Δ %</b>
2 años	0.16%	-6.09%	-0.45%	-6.37%
5 años	0.09%	-8.53%	12.75%	-6.83%
10 años	0.73%	-10.89%	20.31%	-5.49%
20 años	1.62%	-13.61%	26.71%	-3.73%
50 años	3.08%	-17.67%	34.07%	-1.15%
100 años	4.35%	-21.04%	39.15%	0.86%
150 años	5.16%	-23.11%	41.99%	2.03%
200 años	5.77%	-24.61%	43.97%	2.87%

Al igual que en el río Carampangue, se puede ver la diferencia entre los caudales de periodo de retorno para ambos periodos antes mencionados, en el gráfico de las figuras 4.9, donde en línea gruesa se tienen los resultados del periodo 1991-2019 y con línea delgada, los resultados del periodo 2025-2054.

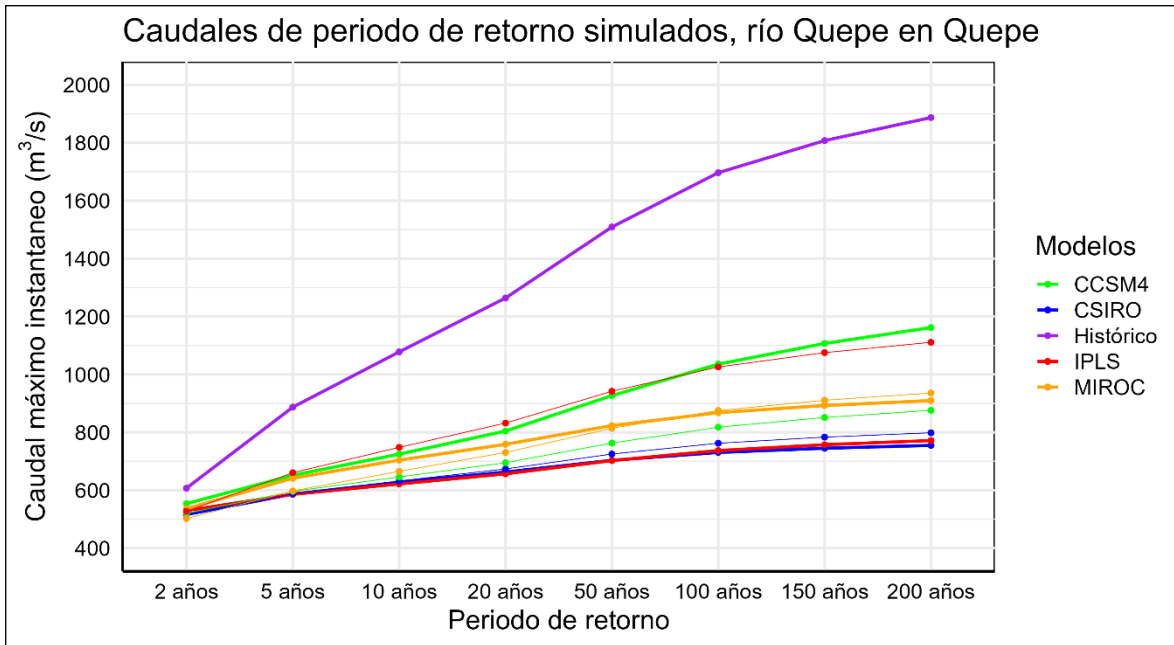


Figura 4.10: Caudales máximos simulados con periodo de retorno asociado, río Quepe en Quepe, periodo 1991-2019

#### 4.6. Conclusiones

Como se puede observar en las tablas 4.11 y 4.15, se tiene una reducción considerable en los caudales máximos asociados a distintos de periodos de en las dos cuencas, y para todos los modelos de cambio climático que se analizaron en el trabajo. En el caso de la cuenca del río Carampangue se tienen reducciones que, en el caso de los periodos de retorno de 100 años, que son los más utilizados para el diseño de obras civiles, hay reducciones de hasta 40% en el caso del modelo IPLS, que resultó ser el modelo más pesimista para esta cuenca, lo cual resulta admisible, ya que, al ampliar el registro de caudales en más de 60 años, se tiene un comportamiento de la cuenca mucho más sencillo de ajustar a una función de probabilidad.

En el caso de la cuenca del río Quepe se ven reducciones de hasta 60% para el caso del modelo CSIRO, que viene siendo el más pesimista para dicha cuenca. Por otra parte, al incluir escenarios de comparación segmentados, se ve que el modelo que refleja mejor el comportamiento de la cuenca, para el periodo 1990-2019 es el modelo CCSM4 tanto para el río Carampangue como para el río Quepe.

En el caso de los resultados presentados en las tablas 4.14 y 4.18, al comparar los modelos de ambas cuencas, en los periodos 1991-2019 y 2025-2054, se tienen resultados que varían en función del modelo utilizado, en el caso del río Carampangue, el modelo CSIRO presenta un aumento en los caudales de casi un 40% para un periodo de retorno de 100 años. Con el modelo CCSM4 se ven reducciones para este mismo periodo de retorno de aproximadamente 34%. Para el caso del río Quepe, el modelo IPLS aumenta también en 40% aproximadamente el caudal para un periodo de retorno de 100 años. En contraste, el modelo CCSM4 disminuye dicho caudal de periodo de retorno en un 21%. Con esto, se ve que el impacto de un mismo modelo, en lugares diferentes, varía.

## 5. CONCLUSIÓN

En el presente estudio se analizó la capacidad del modelo hidrológico semi-distribuido SWAT para generar series futuras de caudales máximos anuales, con el objetivo de evaluar el impacto potencial del cambio climático en el diseño y desarrollo de obras civiles. Para ello, se emplearon cuatro modelos de cambio climático, los mismos utilizados por el MOP (2017) para el territorio nacional, basados en productos grillados de precipitación y temperatura. Estos datos se integraron en el modelo SWAT, que generó series diarias de caudales. Dado que la salida del modelo SWAT son caudales medios diarios, se utilizó el método basado en pendientes de Chen (2017), el cual se comportó de manera satisfactoria para transformar los caudales obtenidos a valores de caudales máximos instantáneos, logrando incrementos en los caudales que varían desde un 0,5% hasta un 20% en algunos casos, especialmente en los caudales más altos del registro, lo cual coincide bien con lo que se conoce sobre caudales máximos instantáneos.

En el caso de la cuenca del río Carampangue, se observa una reducción en los caudales asociados a los diferentes periodos de retorno al comparar los resultados con el registro histórico de la DGA. Esto tiene sentido desde un punto de vista físico, ya que todos los modelos utilizados proyectan una disminución en la precipitación total, lo que se traduce en caudales reducidos. Sin embargo, a diferencia de lo señalado en diversas publicaciones, no se observa un aumento en los eventos de precipitación extrema en esta cuenca, lo cual es respaldado por las pruebas de tendencia realizados en el capítulo 4. En cuanto a los caudales asociados a periodos de retorno, se estiman reducciones de hasta un 45% aproximadamente para el periodo de retorno de 100 años. En caso de que estos datos se utilicen en el diseño de obras, podrían resultar en una disminución en las dimensiones de las estructuras y, por ende, en una reducción de los costos asociados a su desarrollo.

Para el río Quepe, los resultados no son tan satisfactorios. El modelo no logra reproducir correctamente los eventos extraordinarios registrados por la DGA, quedando muy por debajo del mayor evento registrado. Al construir la serie de máximos anuales, no se supera el umbral de los 900 m<sup>3</sup>/s, lo que hace que los caudales asociados a diferentes periodos de retorno sean considerablemente menores (Hasta 60%) en comparación con los obtenidos a través de un análisis estadístico de los caudales registrados por la DGA.

Se llevó a cabo una división en los horizontes generados por los modelos, y al comparar ambos períodos, se observa que el efecto del modelo en los caudales varía. En algunos casos, el período futuro muestra un aumento en los caudales máximos asociados a ciertos períodos de retorno, mientras que en otros se observan reducciones. Este fenómeno se presenta en ambas cuencas y con distintos modelos, lo que refleja la variabilidad e incertidumbre inherentes a este tipo de modelos.

Como se pudo evidenciar, los modelos tienen diferentes impactos en las cuencas del río Carampangue y del río Quepe, esto es debido a las grandes diferencias meteorológicas que existen entre ambas cuencas, consecuencia de la importante distancia que hay entre, estando una ubicada en la cordillera de la costa y otra en la cordillera de los Andes. A causa de esto, se podría esperar que los impactos del cambio climático sean más severos en la cuenca del río Quepe, y menores en el río Carampangue, debido a que la influencia del mar estabiliza los cambios climáticos abruptos.

Para poder mejorar los resultados obtenidos se sugiere en próximas investigaciones realizar una modelación más detallada de las cuencas, especialmente considerando que las series de suelo utilizadas en el modelo del río Quepe carecen de una descripción detallada. Además, sería interesante investigar con nuevos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero para ampliar el abanico de opciones y, en consecuencia, obtener resultados de caudales con mayor dispersión. Esto permitiría realizar simulaciones más diversas para el diseño de obras de infraestructura, proporcionando una base más sólida para la toma de decisiones.

## REFERENCIAS

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Abbaspour, K. C., Vejdani, M., & Haghghat, S. (2007). SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. *MODSIM07 - Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability, Proceedings*, 51(54), 10–15.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., ... Živković, N. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), 588–590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
- Chen, B., Krajewski, W. F., Liu, F., Fang, W., & Xu, Z. (2017). Estimating instantaneous peak flow from mean daily flow. *Hydrology Research*, 48(6), 1474–1488. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.200>
- Cheng, C., Yang, Y. C. E., Ryan, R., Yu, Q., & Brabec, E. (2017). Assessing climate change-induced flooding mitigation for adaptation in Boston's Charles River watershed, USA. *Landscape and Urban Planning*, 167, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.05.019>
- Clark, M. P., Wilby, R. L., Gutmann, E. D., Vano, J. A., Gangopadhyay, S., Wood, A. W., Fowler, H. J., Prudhomme, C., Arnold, J. R., & Brekke, L. D. (2016). Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts of Climate Change. En *Current Climate Change Reports* (Vol. 2, Número 2, pp. 55–64). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0034-x>
- Das, J., & Umamahesh, N. V. (2018). Assessment of uncertainty in estimating future flood return levels under climate change. *Natural Hazards*, 93(1), 109–124. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3291-2>
- Fill, H. D., & Steiner, A. A. (2003). *Estimating Instantaneous Peak Flow from Mean Daily Flow Data*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1084-069920038:6365>

- Ghoraba, S. M. (2015). Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 583–594. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.018>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (s. f.). *Climate change 2014 : synthesis report : longer report*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Technical Summary. En *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 35–144). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Rojas Vilches, O., Reyes, C. M., & Castillo, E. J. (2010). *HISTORICAL RECURRENCE OF FLOODING IN THE LOWER CARAMPANGUE RIVER, Bio-Bio REGIÓN*.

## ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

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. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

La estimación de caudales máximos instantáneos para el periodo 2020 – 2060 presentado en este trabajo contribuye a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), en particular, al ODS-9 y ODS-13.

Para el ODS-9, Industria, innovación e infraestructura, aporta con un método de estimación de caudales máximos instantáneos a partir de un registro simplificado de caudales medios diarios, esta transformación influye en los caudales de diseño para la infraestructura civil, por lo tanto, puede ayudar a mejorar los márgenes de diseño con que se trabajan .

Respecto al ODS-13, Acción por el clima. Este trabajo refleja los impactos que tendrían diferentes escenarios de cambio climático sobre los caudales que pasan por los dos ríos estudiados, mostrando un amplio abanico de posibilidades en cuando a aumentos o disminuciones de caudales se refiere, por lo que, sirve como motivación para la implementación de diferentes medidas de mitigación para con el cambio climático.

## ANEXO 3.1 ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE DATOS PARA LAS CUENCAS DE LOS RÍOS EN ESTUDIO

En las tablas A3.1.1 a A3.1.3 se tienen los porcentajes de datos correctos para los años del registro histórico de ambas cuencas en estudio, tanto en análisis de año completo como de registro invernal.

**Tabla A.3.1.1: Registros en invierno DGA en Río Carampangue en Carampangue**

Año	Días de invierno con registro	% de registro invernal	Año	Días de invierno con registro	% de registro invernal	Año	Días de invierno con registro	% de registro invernal
1967	62	67%	1985	92	100%	2002	76	83%
1968	92	100%	1986	92	100%	2003	84	91%
1970	91	99%	1987	92	100%	2004	92	100%
1971	92	100%	1988	92	100%	2005	92	100%
1972	92	100%	1989	92	100%	2006	92	100%
1973	92	100%	1990	92	100%	2007	92	100%
1974	92	100%	1991	92	100%	2009	92	100%
1975	92	100%	1992	92	100%	2010	92	100%
1976	92	100%	1993	92	100%	2011	92	100%
1977	92	100%	1994	92	100%	2012	92	100%
1978	92	100%	1995	92	100%	2013	92	100%
1979	92	100%	1996	92	100%	2014	12	13%
1980	92	100%	1997	87	95%	2015	30	33%
1981	92	100%	1998	92	100%	2016	92	100%
1982	92	100%	1999	92	100%	2017	92	100%
1983	92	100%	2000	92	100%	2018	92	100%
1984	92	100%	2001	92	100%	2019	92	100%

**Tabla A.3.1.2: Registros DGA en Río Quepe en Quepe**

Año	Días con registro	% de registro anual	Año	Días con registro	% de registro anual	Año	Días con registro	% de registro anual
1962	13	4%	1983	365	100%	2003	365	100%
1963	365	100%	1984	366	100%	2004	241	66%
1964	355	97%	1985	306	84%	2005	344	94%
1965	365	100%	1986	365	100%	2006	365	100%
1966	365	100%	1987	365	100%	2007	365	100%
1967	365	100%	1988	366	100%	2008	366	100%

1968	366	100%	1989	365	100%	2009	348	95%
1969	365	100%	1990	365	100%	2010	365	100%
1970	361	99%	1991	365	100%	2011	331	91%
1971	228	62%	1992	366	100%	2012	312	85%
1972	221	61%	1993	365	100%	2013	343	94%
1973	45	12%	1994	365	100%	2014	345	95%
1974	122	33%	1995	365	100%	2015	347	95%
1975	365	100%	1996	366	100%	2016	152	42%
1976	366	100%	1997	365	100%	2017	334	92%
1977	365	100%	1998	365	100%	2018	365	100%
1979	365	100%	1999	331	91%	2019	365	100%
1980	366	100%	2000	366	100%	2020	274	75%
1981	361	99%	2001	347	95%	2021	262	72%
1982	365	100%	2002	365	100%			

**Tabla A.3.1.3: : Registros en invierno DGA en Río Quepe en Quepe**

<b>Año</b>	<b>Días de invierno con registro</b>	<b>% de registro invernal</b>	<b>Año</b>	<b>Días de invierno con registro</b>	<b>% de registro invernal</b>	<b>Año</b>	<b>Días de invierno con registro</b>	<b>% de registro invernal</b>
1963	92	100%	1984	92	100%	2002	92	100%
1964	92	100%	1985	92	100%	2003	92	100%
1965	92	100%	1986	92	100%	2004	46	50%
1966	92	100%	1987	92	100%	2005	92	100%
1967	92	100%	1988	92	100%	2006	92	100%
1968	92	100%	1989	92	100%	2007	92	100%
1969	92	100%	1990	92	100%	2008	92	100%
1970	92	100%	1991	92	100%	2009	76	83%
1971	74	80%	1992	92	100%	2010	92	100%
1972	92	100%	1993	92	100%	2011	92	100%
1975	92	100%	1994	92	100%	2012	92	100%
1976	92	100%	1995	92	100%	2013	92	100%
1977	92	100%	1996	92	100%	2014	92	100%
1979	92	100%	1997	92	100%	2015	92	100%
1980	92	100%	1998	92	100%	2017	92	100%
1981	92	100%	1999	92	100%	2018	92	100%
1982	92	100%	2000	92	100%	2019	92	100%
1983	92	100%	2001	82	89%	2021	91	99%

## ANEXO 4.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE TENDENCIA PARA LOS MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO QUEPE.

**Tabla A.4.1.1 Precipitación anual en Cuenca del Quepe**

Modelo	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	p-value	K
CCSM4	-3.540	4.00E-04	-3.395	4.00E-04	757	4.22E-03	41
CSIRO	-2.291	2.20E-02	-2.411	2.20E-02	679	1.41E-02	43
IPLS	-5.718	1.08E-08	-8.464	1.08E-08	998	4.47E-05	52
MIROC	-2.811	4.94E-03	-3.254	4.94E-03	668	1.65E-02	30

**Tabla A.4.1.2 Precipitación máxima anual en Cuenca del Quepe**

Modelo	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	p-value	K
CCSM4	0.396	6.92E-01	0.027	6.92E-01	388	3.96E-01	18
CSIRO	0.845	3.98E-01	0.054	3.98E-01	460	2.06E-01	56
IPLS	-0.717	4.73E-01	-0.048	4.73E-01	262	9.56E-01	16
MIROC	0.641	5.22E-01	0.025	5.22E-01	283	8.45E-01	21

**Tabla A.4.1.3 Temperatura máxima anual en Cuenca del Quepe**

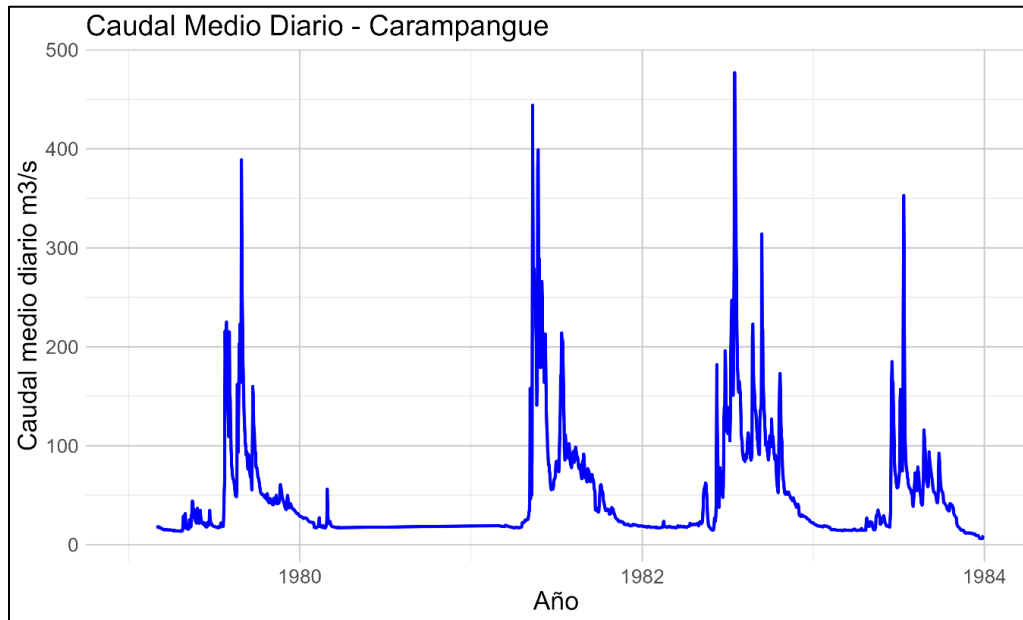
Modelo	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	p-value	K
CCSM4	5.330	9.82E-08	0.038	9.82E-08	1121	2.71E-06	39
CSIRO	4.413	1.02E-05	0.039	1.02E-05	898	3.43E-04	46
IPLS	4.189	2.81E-05	0.047	2.81E-05	765	3.70E-03	47
MIROC	6.239	4.41E-10	0.058	4.41E-10	1069	9.23E-06	33

**Tabla A.4.1.4 Temperatura mínima anual en Cuenca del Quepe**

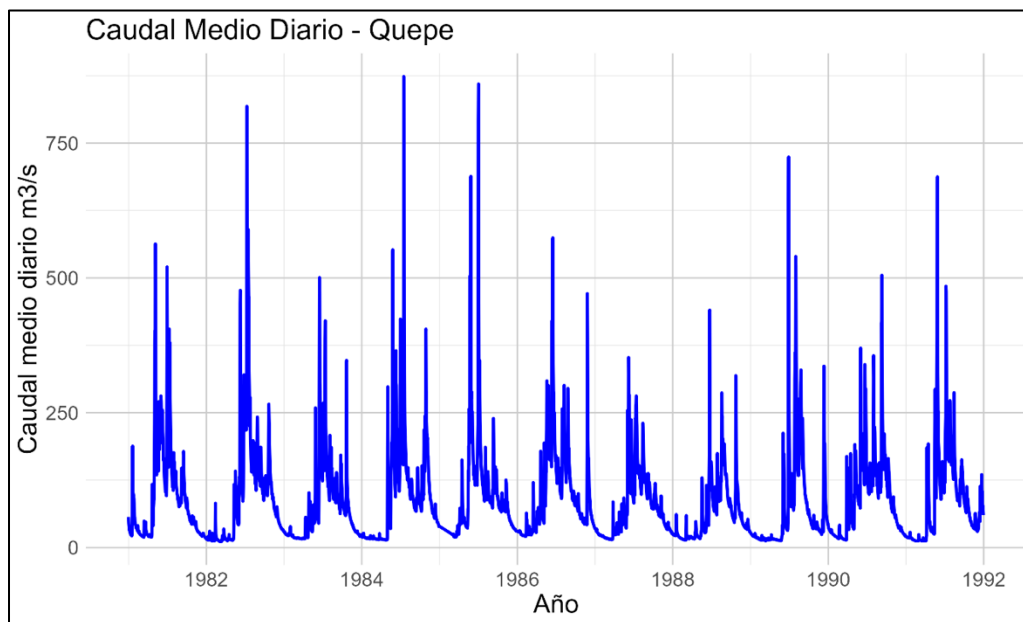
Modelo	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	p-value	K
CCSM4	2.142	3.22E-02	0.013	3.22E-02	548	7.92E-02	36
CSIRO	3.528	4.19E-04	0.020	4.19E-04	841	9.97E-04	43
IPLS	1.606	1.08E-01	0.017	1.08E-01	406	3.40E-01	66
MIROC	2.655	7.93E-03	0.022	7.93E-03	694	1.13E-02	63

## ANEXO 4.2 CAUDALES MEDIOS DIARIOS PARA LOS PERIODOS DE CALIBRACIÓN EN AMBAS CUENCAS EN ESTUDIO

**Figura A.4.2.1: Grafico de caudal medio diario para el río Carampangue en Carampangue**



**Figura A.4.2.2: Grafico de caudal medio diario para el río Carampangue en Quepe**



## ANEXO 4.3 PARÁMETROS Y VALORES CALIBRADOS PARA LOS MODELOS SWAT DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO.

**Tabla A.4.3.1: Parámetros calibrados para el comportamiento general de la cuenca del Carampangue**

<b>Cambio</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Archivos</b>	<b>Valor</b>
relativo	CN2	management	-0.709
variable	GW_DELAY	ground water	24.311
variable	ALPHA_BF	ground water	1.639
variable	RCHRG_DP	ground water	-0.701
variable	ESCO	HRU	2.826
relativo	SOL_AWC	soil	4.155
variable	CH_K1	subbasin	38.723
relativo	CH_K2	main channel	15.701
relativo	CH_N1	subbasin	0.004
relativo	CH_N2	main channel	0.018
variable	PLAPS	subbasin	4.567
variable	TLAPS	subbasin	-7.091
variable	REVAPMN	ground water	1310.500
variable	DEEPST	ground water	1324.146
variable	SHALLST	ground water	5455.179
variable	GWQMN	ground water	3591.564
variable	GW_SPYLD	ground water	0.816
variable	GWHT	ground water	2.317999

**Tabla A.4.3.2: Parámetros calibrados para el comportamiento general de la cuenca del Quepe**

<b>Cambio</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Archivos</b>	<b>Valor</b>
relativo	CN2	Management	-0.886
variable	GWQMN	Ground Water	841.965
variable	REVAPMN	Ground Water	1073.441

variable	GW_REVAP	Ground Water	-0.463
variable	SHALLST	Ground Water	957.969
variable	GW_DELAY	Ground Water	19.542
variable	ALPHA_BF	Ground Water	0.508
variable	RCHRG_DP	Ground Water	-0.535
variable	GW_SPYLD	Ground Water	0.658
variable	GWHT	Ground Water	4.143
variable	ESCO	HRU	1.451
relativo	SOL_AWC	Soil	-1.954
variable	SMTMP	Basin	-1.116
variable	SFTMP	Basin	-2.931
variable	SMFMX	Basin	6.866
variable	SMFMN	Basin	4.113
variable	TIMP	Basin	0.844
variable	DEEPST	Ground Water	12231.484
variable	PLAPS	Subbasin	37.695
variable	TLAPS	Subbasin	-6.023

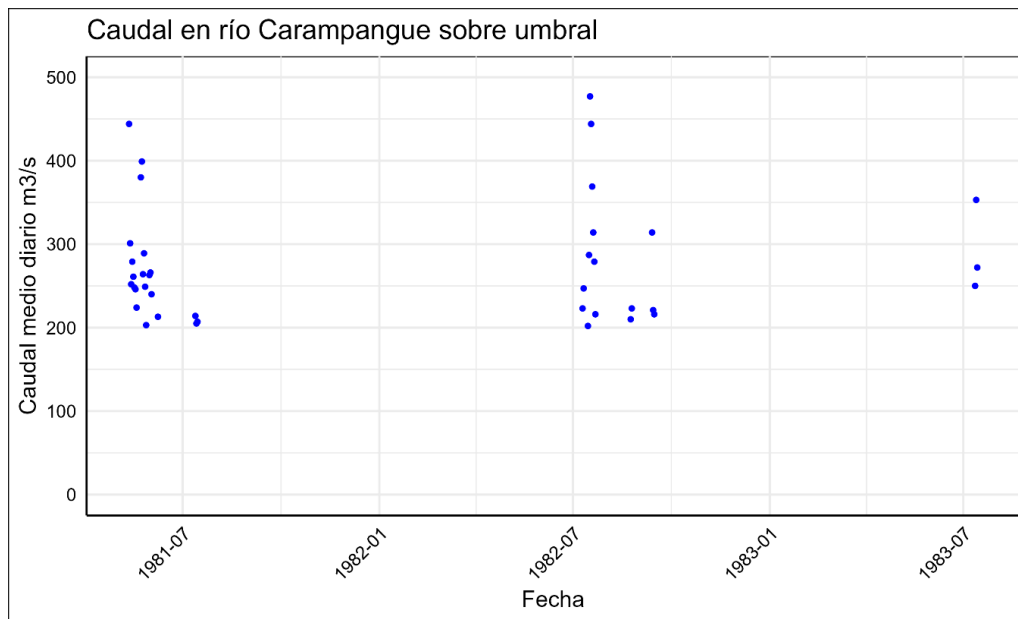
**Tabla A.4.3.3: Parámetros calibrados para el comportamiento de peaks de la cuenca del Quepe**

<b>Cambio</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Archivos</b>	<b>Valor</b>
relativo	CN2	Management	0.920
variable	ALPHA_BF	Ground Water	0.380
variable	GW_DELAY	Ground Water	509.535
variable	GWQMN	Ground Water	3184.633
variable	GW_REVAP	Ground Water	0.222
variable	ESCO	HRU	0.637
variable	CH_N2	Main Channel	0.026
variable	CH_K2	Main Channel	299.988
variable	ALPHA_BNK	Main Channel	1.191
relativo	SOL_AWC()	Soil	0.946
relativo	SOL_K()	Soil	0.786
relativo	SOL_BD()	Soil	0.760
variable	PLAPS	Subbasin	2564.909
variable	TLAPS	Subbasin	0.151
relativo	DEEPST	Ground Water	3145.190
relativo	SHALLST	Ground Water	4588.960
relativo	REVAPMN	Ground Water	246.878
relativo	RCHRG_DP	Ground Water	0.498
relativo	GWHT	Ground Water	10.763
variable	SMTMP	Basin	-21.043
variable	SFTMP	Basin	0.237

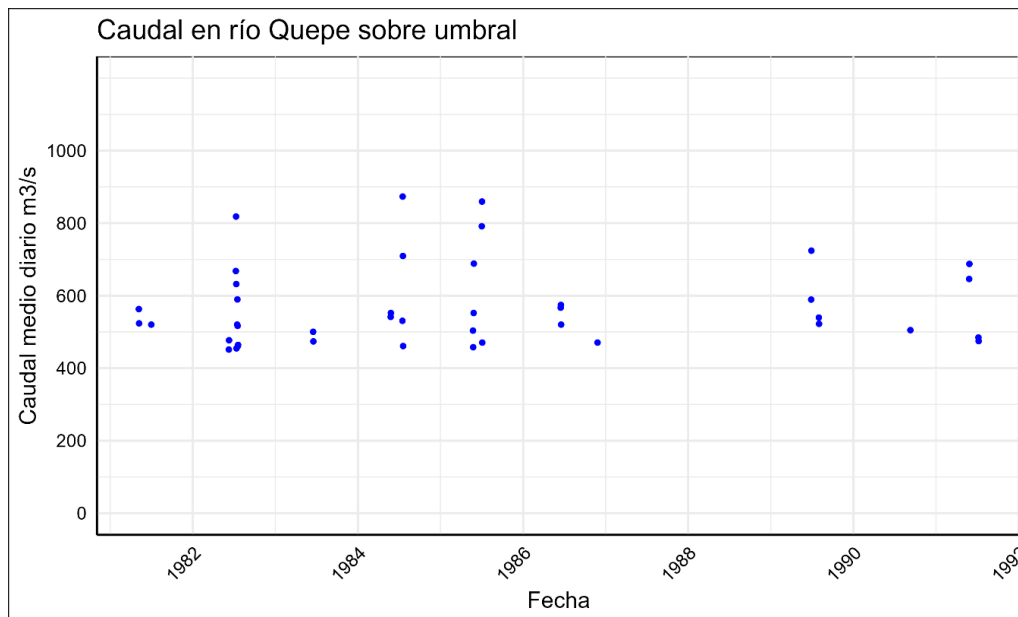
variable	SMFMX	Basin	15.258
variable	SMFMN	Basin	9.135
variable	TIMP	Basin	0.554
variable	SNOEB()	Subbasin	336.736
variable	EPCO	HRU	-0.056
variable	CANMX	HRU	-30.823
variable	EVPOT	HRU	1.514
variable	SON_SUB	Subbasin	57.671
variable	SURLAG	Basin	19.917

## ANEXO 4.4 CAUDALES MEDIOS DIARIOS SOBRE LOS UMBRALES DE CALIBRACIÓN PARA LOS RÍOS EN ESTUDIO.

**Figura A.4.4.1: Caudales extraídos para la calibración del río Carampangue (sobre umbral)**



**Figura A.4.4.2: Caudales extraídos para la calibración del río Quepe (sobre umbral)**



## ANEXO 4.5 VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE CHEN.

**Tabla A.4.5.1: Comparación entre caudales máximos medidos y caudales máximos sintéticos obtenidos con el método de Chen (2017)**

Quepe				Carampangue			
Año	Caudal max. DGA (m <sup>3</sup> /s)	Caudal max. modelo (m <sup>3</sup> /s)	% error	Año	Caudal max. DGA (m <sup>3</sup> /s)	Caudal max. modelo (m <sup>3</sup> /s)	% error
1981	563	598.26	6.26%	1981	444	555.41	25.09%
1982	818.2	901.34	10.16%	1982	477	609.4	27.76%
1983	500.4	523.43	4.60%	1983	353	471.16	33.47%
1984	873.4	984.33	12.70%	1984	368.7	390.76	5.98%
1985	859.6	917.63	6.75%	1985	355.9	366.87	3.08%
1986	574.4	581.07	1.16%	1986	414.2	429.83	3.77%
1987	352.4	394.36	11.91%	1987	466.8	482.89	3.45%
1988	440.2	441.69	0.34%	1988	260.6	273.5	4.95%
1989	724.1	823.84	13.77%	1989	317.4	323.13	1.81%
1990	504.88	581.83	15.24%	1990	242.4	247.87	2.26%
1991	687.56	724.4	5.36%	1991	521.1	581.32	11.56%
1992	1049.44	1302.15	24.08%	1992	235.6	264.95	12.46%
1993	1127.4	1341.45	18.99%	1993	314.5	329.86	4.88%
1994	839.82	988.15	17.66%	1994	364.9	385.13	5.54%
1995	962	1071.83	11.42%	1995	400.1	428.62	7.13%
1996	229.96	257.11	11.80%	1996	238.8	267.76	12.13%
1997	612.4	677.25	10.59%	1997	412.5	471.66	14.34%
1998	214.76	216.05	0.60%	1998	207.1	238.28	15.05%
1999	466.78	467.04	0.06%	1999	298.7	318.2	6.53%
2000	598.36	674.8	12.78%	2000	532.2	622.4	16.95%
2001	529.65	579.29	9.37%	2001	341.3	341.99	0.20%
2002	1528.67	1577.22	3.18%	2002	350.8	352.13	0.38%
2003	676.15	735.51	8.78%	2003	760.1	918.07	20.78%
2004	715.74	827.13	15.56%	2004	255.2	268.75	5.31%
2005	814.8	825.2	1.28%	2005	354.6	359.27	1.32%
2006	941.24	953.92	1.35%	2006	392.6	405.47	3.28%
2007	390.31	406.96	4.26%	2007	238.8	264.42	10.73%
2008	1415.55	1435.32	1.40%	2008	602.4	333.56	-44.63%
2009	650.25	702.28	8.00%	2009	302.9	315.83	4.27%
2010	738.08	751.72	1.85%	2010	277.9	294.77	6.07%

2011	280.58	294.04	4.80%
2012	484.04	362.25	-25.16%
2013	326.98	346.88	6.09%
2014	479.62	496.68	3.56%
2015	484.04	506.76	4.69%
2017	462.04	487.63	5.54%
2018	484.04	373.61	-22.81%
2019	367.83	378.97	3.03%

2011	236.2	261.71	10.80%
2012	259	267.74	3.38%
2013	228.3	243.74	6.76%
2014	328.1	333.99	1.79%
2015	430.5	451.9	4.97%
2016	210.8	239.87	13.79%
2017	274.7	290.69	5.82%
2018	276.7	277.39	0.25%
2019	290.7	306	5.26%

## ANEXO 4.6 CAUDALES MÁXIMOS ANUALES PARA LAS CUENCAS EN ESTUDIO.

**Tabla A.4.6.1: Caudales máximos anuales para el río Carampangue en Carampangue**

Año	Caudal máximo m <sup>3</sup> /s	Año	Caudal máximo m <sup>3</sup> /s	Año	Caudal máximo m <sup>3</sup> /s
1968	135.51	1986	528.31	2002	194.47
1972	413	1987	469.39	2003	280.62
1973	614.72	1988	212.93	2004	216.62
1974	621	1989	426.18	2005	253.54
1975	565	1990	244.93	2009	193.24
1976	374	1991	221.54	2010	300.32
1977	774	1992	252.31	2011	122.83
1978	608	1993	185.85	2012	257.66
1979	389	1994	201.85	2013	216.13
1980	732.56	1996	156.31	2016	208.5
1981	444	1997	212.93	2017	844.19
1982	477	1998	85.29	2018	184.62
1983	353	1999	183.39	2019	182.16
1984	931.9	2000	312.62	2020	282.24
1985	870.04	2001	311.39	2021	107.45

**Tabla A.4.6.1: Caudales máximos anuales en el Río Quepe en Quepe**

Año	Caudal máximo m <sup>3</sup> /s	Año	Caudal máximo m <sup>3</sup> /s	Año	Caudal máximo m <sup>3</sup> /s
1963	783.80	1985	859.60	2002	1528.67
1964	397.00	1986	574.40	2003	676.15
1965	680.60	1987	352.40	2005	814.80
1966	676.20	1988	440.20	2006	941.24
1967	458.00	1989	724.10	2007	390.31
1968	290.40	1990	504.88	2008	1415.55
1969	890.00	1991	687.56	2009	650.25
1970	421.00	1992	1049.44	2010	738.08
1975	467.60	1993	1127.40	2011	280.58
1976	1550.60	1994	839.82	2012	484.04
1977	783.80	1995	962.00	2013	326.98
1979	1010.00	1996	229.96	2014	479.62

1980	887.60	1997	612.40	2015	484.04
1981	563.00	1998	214.76	2017	462.04
1982	818.20	1999	466.78	2018	484.04
1983	500.40	2000	598.36	2019	367.83
1984	873.40	2001	529.65		

## ANEXO 4.7 CAUDALES MÁXIMOS ANUALES FUTUROS SIMULADOS PARA LA CUENCA DEL CARAMPANGUE

**Tabla A.4.7.1: Caudales máximos anuales del río Carampangue con modelo de cambio climático CSIRO**

Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)
1981	193.27	2008	224.48	2035	248.49
1982	211.24	2009	187.72	2036	263.91
1983	322.75	2010	220.02	2037	218.27
1984	248.94	2011	174.32	2038	239.9
1985	172.7	2012	227.46	2039	260.92
1986	231.92	2013	280.89	2040	363.45
1987	259.63	2014	271.41	2041	272.57
1988	289.94	2015	245.5	2042	211.95
1989	281.39	2016	216.4	2043	141.35
1990	242.85	2017	248.85	2044	260.45
1991	226.16	2018	210.49	2045	264.85
1992	199.29	2019	266.42	2046	212.93
1993	232.82	2020	310.55	2047	117.95
1994	133.89	2021	243.27	2048	221.43
1995	256.46	2022	146.2	2049	249.16
1996	274.38	2023	152.29	2050	872
1997	212.25	2024	214.19	2051	216.2
1998	255.43	2025	248.3	2052	216.91
1999	273.55	2026	258.32	2053	254.95
2000	155.51	2027	260.99	2054	223.04
2001	290.98	2028	236.99	2055	776.87
2002	204.91	2029	202.43	2056	216.43
2003	249.47	2030	218.55	2057	203.28
2004	206.02	2031	265.1	2058	253.26
2005	231.71	2032	191.36	2059	227.97
2006	239.85	2033	224.52	2060	225.45
2007	249.3	2034	236.63		

**Tabla A.4.7.2: Caudales máximos anuales del río Carampangue con modelo de cambio climático CCSM4**

Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)
1981	198.32	2008	252.3	2035	105.3
1982	253.74	2009	249.96	2036	256.3
1983	247.65	2010	254.01	2037	263.67
1984	339.68	2011	232.38	2038	183.62
1985	215.53	2012	188.72	2039	259.39
1986	263.58	2013	268.94	2040	268.64
1987	183.12	2014	257.21	2041	327.71
1988	176.84	2015	259.46	2042	180.18
1989	184.74	2016	271.36	2043	149.98
1990	103.82	2017	540.83	2044	254.71
1991	250.29	2018	293.75	2045	254.73
1992	260.98	2019	269.24	2046	186.37
1993	218.53	2020	172.28	2047	262.25
1994	412.57	2021	231.85	2048	145.55
1995	83.35	2022	335.64	2049	240.81
1996	150.33	2023	232.52	2050	234.74
1997	328.85	2024	261.86	2051	254.37
1998	733.81	2025	318.36	2052	221.5
1999	259	2026	268.15	2053	233.56
2000	345.75	2027	170.36	2054	312.78
2001	284.9	2028	242.32	2055	273.35
2002	299.28	2029	240.39	2056	255.73
2003	257.31	2030	232.7	2057	256.81
2004	208.88	2031	235.16	2058	434.46
2005	261.64	2032	186.97	2059	207.82
2006	265.49	2033	249.92	2060	260.22
2007	140.32	2034	375.33		

**Tabla A.4.7.3: Caudales máximos anuales del río Carampangue con modelo de cambio climático IPLS**

Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)
1981	359.97

Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)
2008	258.85

Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)
2035	214.66

1982	264.52	2009	336.55	2036	195.01
1983	307.85	2010	214.57	2037	278.1
1984	193.5	2011	110.26	2038	236.3
1985	162.02	2012	495.7	2039	267.12
1986	272.61	2013	214.89	2040	200.55
1987	222.2	2014	199.35	2041	216.26
1988	253.82	2015	217.69	2042	212.33
1989	373.13	2016	202	2043	290.83
1990	249.34	2017	251.97	2044	259.22
1991	228.91	2018	231.44	2045	222.86
1992	288.21	2019	203.53	2046	217.54
1993	268.7	2020	245.72	2047	207.59
1994	265.01	2021	262.76	2048	336.43
1995	214.49	2022	224.2	2049	153.08
1996	237.97	2023	141.17	2050	50.03
1997	290.6	2024	108.8	2051	238.85
1998	332.44	2025	272.14	2052	244.62
1999	255.94	2026	271.88	2053	185.76
2000	217.02	2027	245.92	2054	193.01
2001	200.79	2028	257.09	2055	205.36
2002	226.21	2029	319.81	2056	220.31
2003	192.69	2030	246.22	2057	96.2
2004	294.35	2031	233.5	2058	262.73
2005	213.5	2032	263.58	2059	59.37
2006	245.64	2033	87.17	2060	111.24
2007	231.72	2034	159.66		

**Tabla A.4.7.4: Caudales máximos anuales del río Carampangue con modelo de cambio climático MIROC**

Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)
1981	178.7	2008	266.37	2035	272.21
1982	234.24	2009	262.39	2036	204.64
1983	368.99	2010	294.36	2037	263.73
1984	198.13	2011	92.34	2038	266.19
1985	245.46	2012	214.46	2039	251.72
1986	275.52	2013	332.72	2040	230.78

1987	188.92	2014	208.83	2041	335.07
1988	235.64	2015	391.78	2042	275.99
1989	268.52	2016	227.14	2043	227.99
1990	327.09	2017	222.71	2044	215.19
1991	265.45	2018	241.17	2045	234.67
1992	192.19	2019	238.94	2046	259.02
1993	246.67	2020	231.34	2047	239.8
1994	322.26	2021	237.83	2048	228.92
1995	227.09	2022	222.7	2049	237.27
1996	271.79	2023	272.44	2050	205.39
1997	217.85	2024	200	2051	281.1
1998	242	2025	247.25	2052	244.54
1999	220.45	2026	272.37	2053	215.77
2000	216.28	2027	178.9	2054	182.36
2001	270.6	2028	246.63	2055	257.26
2002	368.09	2029	268.94	2056	264.42
2003	328.61	2030	251.45	2057	221.86
2004	272.76	2031	248.79	2058	198.45
2005	266.48	2032	241.74	2059	268.02
2006	283.76	2033	392.36	2060	368.69
2007	293.35	2034	439.05		

## ANEXO 4.8 CAUDALES MÁXIMOS ANUALES FUTUROS SIMULADOS PARA LA CUENCA DEL QUEPE

**Tabla A.4.8.1: Caudales máximos anuales del río Quepe con modelo de cambio climático CCSM4**

Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)
1981	559.36	2008	485.51	2035	428.44
1982	499.02	2009	578.75	2036	617.87
1983	549.51	2010	646.41	2037	473.10
1984	646.96	2011	601.24	2038	637.49
1985	457.75	2012	437.80	2039	602.52
1986	514.61	2013	648.70	2040	526.70
1987	455.93	2014	554.11	2041	639.98
1988	636.29	2015	760.86	2042	397.89
1989	502.97	2016	536.02	2043	457.95
1990	464.74	2017	885.33	2044	782.31
1991	547.15	2018	534.06	2045	443.11
1992	490.93	2019	606.82	2046	407.62
1993	587.45	2020	553.82	2047	517.60
1994	816.62	2021	549.44	2048	498.20
1995	413.36	2022	569.97	2049	541.57
1996	479.07	2023	577.19	2050	882.56
1997	570.50	2024	671.50	2051	506.98
1998	797.87	2025	571.34	2052	573.33
1999	457.28	2026	503.72	2053	470.79
2000	580.80	2027	547.45	2054	615.11
2001	514.15	2028	564.08	2055	576.16
2002	704.96	2029	529.69	2056	448.05
2003	632.00	2030	530.74	2057	594.96
2004	545.33	2031	507.32	2058	852.37
2005	446.45	2032	430.66	2059	531.36
2006	534.55	2033	430.32	2060	495.54
2007	457.33	2034	508.45		

**Tabla A.4.8.2: Caudales máximos anuales del río Quepe con modelo de cambio climático CSIRO**

Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)
1981	479.89	2008	457.52	2035	527.94
1982	437.08	2009	475.86	2036	512.16
1983	648.54	2010	442.19	2037	510.98
1984	504.07	2011	487.09	2038	623.80
1985	461.39	2012	506.92	2039	576.33
1986	468.97	2013	569.24	2040	709.62
1987	533.02	2014	482.77	2041	495.49
1988	593.41	2015	476.46	2042	470.85
1989	434.31	2016	483.05	2043	534.10
1990	463.25	2017	505.05	2044	439.57
1991	575.98	2018	556.21	2045	570.70
1992	528.57	2019	635.13	2046	469.25
1993	546.67	2020	673.51	2047	487.48
1994	319.52	2021	550.71	2048	549.40
1995	499.13	2022	486.49	2049	438.69
1996	550.69	2023	401.86	2050	736.89
1997	456.21	2024	455.46	2051	632.49
1998	651.11	2025	449.83	2052	541.97
1999	622.99	2026	581.37	2053	588.23
2000	454.53	2027	497.98	2054	471.36
2001	695.40	2028	509.62	2055	806.29
2002	442.97	2029	510.85	2056	552.47
2003	537.61	2030	495.50	2057	618.77
2004	476.51	2031	612.95	2058	638.33
2005	582.51	2032	411.50	2059	486.04
2006	572.52	2033	461.97	2060	381.81
2007	632.45	2034	486.24		

**Tabla A.4.8.3: Caudales máximos anuales del río Quepe con modelo de cambio climático IPLS**

Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Caudal máximo instantáneo anual (m <sup>3</sup> /s)
1981	810.18	2008	585.62	2035	571.78
1982	427.45	2009	547.09	2036	503.91

1983	572.26	2010	550.39	2037	522.48
1984	406.79	2011	406.81	2038	418.25
1985	468.30	2012	627.98	2039	470.26
1986	660.07	2013	427.04	2040	541.19
1987	544.29	2014	434.37	2041	433.71
1988	608.08	2015	558.33	2042	428.94
1989	616.46	2016	410.85	2043	693.15
1990	559.26	2017	466.10	2044	725.38
1991	615.28	2018	638.51	2045	649.59
1992	548.04	2019	445.84	2046	604.22
1993	667.66	2020	588.03	2047	514.69
1994	524.98	2021	420.21	2048	1697.18
1995	599.36	2022	460.81	2049	435.69
1996	572.45	2023	462.80	2050	362.17
1997	447.24	2024	390.78	2051	540.09
1998	558.92	2025	687.45	2052	451.08
1999	525.16	2026	561.09	2053	391.15
2000	520.87	2027	520.88	2054	638.07
2001	456.71	2028	534.04	2055	602.81
2002	543.32	2029	537.86	2056	476.66
2003	399.57	2030	500.27	2057	359.41
2004	641.00	2031	536.29	2058	469.06
2005	586.47	2032	545.34	2059	535.75
2006	590.04	2033	357.25	2060	417.54
2007	438.60	2034	432.65		

**Tabla A.4.8.4: Caudales máximos anuales del río Quepe con modelo de cambio climático MIROC**

<b>Año</b>	<b>Caudal máximo instantáneo anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Año</b>	<b>Caudal máximo instantáneo anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Año</b>	<b>Caudal máximo instantáneo anual (m<sup>3</sup>/s)</b>
1981	470.70	2008	604.16	2035	588.89
1982	486.30	2009	446.87	2036	504.28
1983	687.35	2010	655.47	2037	524.87
1984	422.37	2011	376.16	2038	539.69
1985	431.20	2012	476.41	2039	456.83
1986	538.86	2013	728.63	2040	553.90
1987	516.33	2014	454.09	2041	586.39
1988	405.57	2015	879.87	2042	435.43
1989	601.53	2016	493.83	2043	515.09

1990	643.64	2017	455.91	2044	415.86
1991	557.44	2018	458.50	2045	439.02
1992	453.46	2019	469.43	2046	514.61
1993	496.66	2020	454.39	2047	583.98
1994	564.36	2021	650.40	2048	451.22
1995	511.71	2022	450.98	2049	437.58
1996	616.17	2023	613.95	2050	433.50
1997	445.38	2024	414.71	2051	643.36
1998	575.32	2025	480.54	2052	609.78
1999	458.23	2026	573.35	2053	473.02
2000	464.26	2027	442.18	2054	424.00
2001	664.25	2028	739.82	2055	542.83
2002	688.38	2029	476.74	2056	553.96
2003	568.90	2030	539.76	2057	468.07
2004	527.95	2031	548.06	2058	472.30
2005	499.63	2032	473.29	2059	527.15
2006	600.97	2033	739.86	2060	715.76
2007	748.19	2034	760.40		

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

<b>Departamento</b>	: Departamento de Ingeniería Civil
<b>Carrera</b>	: Ingeniería Civil
<b>Nombre del memorista</b>	: Gabriel Ignacio Espinoza Agurto
<b>Título de la memoria</b>	: Estimación de caudales máximos instantáneos para el periodo 2020 - 2060 a partir de caudales medios diarios obtenidos desde el modelo hidrológico SWAT
<b>Fecha de la presentación oral</b>	:
<b>Profesor(es) Guía</b>	: Alejandra Stehr Gesche
<b>Profesor(es) Revisor(es)</b>	: Maricarmen Guerra Paris
<b>Concepto</b>	:
<b>Calificación</b>	:

**Resumen**

La información fluviométrica es esencial para el diseño de diferentes obras civiles, desde puentes y caminos, hasta planes de emergencia y evacuación. Es por esto mismo, que se necesita contar con datos de caudales simulados futuros, para poder evaluar las obras y planes existentes, en un escenario incierto de cambio climático.

En este estudio, se recopiló información fluviométrica histórica y se desarrollaron modelos hidrológicos semi distribuidos para dos cuencas del centro-sur de Chile, el río Carampangue en Carampangue y el río Quepe en Quepe. Con estos modelos, se simularon caudales medios diarios futuros bajo diferentes escenarios de cambio climático, con el objetivo de evaluar su impacto en los caudales asociados a periodos de retorno característicos para el diseño de obras civiles. Para mejorar la precisión de estas estimaciones, se aplicó el método propuesto por Chen, que permite transformar los caudales medios diarios simulados en caudales máximos instantáneos. De esta manera, se obtuvieron estimaciones de caudales futuros para ambas cuencas.

Con estos caudales máximos instantáneos, se realizó el cálculo de caudales para distintos periodos de retorno, y se analizó el cambio que existe entre los determinados con los datos observados por la DGA, y con los datos simulados, en los periodos 1991-2020 y 2025-2054.

Estos modelos no fueron capaces de predecir de buena forma los caudales máximos. Comparando ambos periodos antes mencionados se tienen distintas variaciones según el modelo de cambio climático utilizado.

En el caso del río Carampangue se ven aumentos de hasta 37% en los caudales de 100 años de periodo de retorno, y con otro modelo, reducciones de hasta un 33% para el caudal con el mismo de periodo de retorno. Para el río Quepe también se tiene un espectro de

variaciones que van desde aumentar un 39%, hasta disminuciones de 21% para el caudal con periodo de retorno de 100 años.