



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL VALOR AGREGADO DE MODELOS REGIONALES
Y ESCALAMIENTO ESTADÍSTICO EN MODELACIÓN
HIDROLÓGICA.**

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil

IGNACIO WILFREDO ACEVEDO TORRES

PROFESOR GUÍA:

MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

PABLO MENDOZA ZÚÑIGA

LINA CASTRO HEREDIA

Santiago de Chile

2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: IGNACIO WILFREDO ACEVEDO TORRES
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

ANÁLISIS DEL VALOR AGREGADO DE MODELOS REGIONALES Y
ESCALAMIENTO ESTADÍSTICO EN MODELACIÓN HIDROLÓGICA.

Las consecuencias que ha generado el cambio climático ya se hacen presentes y visibles, afectando variables tanto climatológicas como el mismo ciclo hidrológico. Es en este contexto que, este trabajo analiza el valor agregado en proyecciones hidrológicas al utilizar un modelo climático regional (RCM) al que se le va a realizar un escalamiento multivariado, utilizando el escenario RCP 8.5 de contaminación, donde se compararán los resultados con un modelo de circulación global (GCM) que también será escalado bajo las mismas condiciones. El estudio se realiza en una cuenca pluvial, río Itata en General Cruz, además, se definen los periodos de estudio como histórico (1979-2005), futuro cercano (2040-2070) y futuro lejano (2071-2099).

Los resultados muestran que la temperatura aumentaría entre 1.2°C y 1.6°C según las proyecciones del RCM para el futuro cercano y lejano respectivamente, mientras que, para la precipitación, el modelo regional presenta un señal aumento del 8% para la precipitación media acumulada anual en el futuro lejano. Estas señales de cambio inciden directamente en el comportamiento de la hidrología, en particular el de la precipitación, dado el tipo de régimen que la gobierna, mostrando un aumento equivalente al 7% en escorrentía.

La utilización de las forzantes meteorológicas que provienen de un RCM escalado en el modelo hidrológico genera un gran impacto en cuanto a resultados, destacando una buena capacidad para reproducir caudales de gran magnitud, en específico, bajo la probabilidad del 50% de excedencia y también recrea de mejor manera el comportamiento de la curva de variación estacional.

En conclusión, la utilización de un RCM escalado aporta valor de manera transversal en el estudio, tanto para climatología como hidrología, destacando el aporte de obtener información a escala local.

*Para mi abuelita Marta,
Ejemplo de unión, esfuerzo y perseverancia.*

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quiero agradecer a mi familia, quienes me han acompañado durante toda esta etapa de mi vida. A mi papá Wilfredo por motivarme e inculcar la cultura del deporte la cual me acompaña desde pequeño, a mi mamá Isabel por ser alguien incondicional y preocupada de que nada hiciera falta, a mi hermano Sebastián y hermanas Ximena y Javiera, quienes han sido un ejemplo para mí y una gran fuente de motivación e inspiración para seguir adelante. Gracias a mis sobrinas y sobrinos, Valeria, Josetomas, Emilia, Mateo, Alonso y Noelia, por saber llenar de amor mi corazón con su inocencia infantil y sus pequeñas sonrisas, las que muchas veces me permitieron seguir adelante haciéndome saber que todo está bien. También agradecer a mi cuñada Patricia y cuñado David, por su disposición, apoyo y ayuda entregada. A mi primo Cristián, quien me acompañó y se dió el tiempo de ayudarme, guiar y dar consejos útiles para sobrevivir a la vida universitaria.

Agradezco también a mis amigos del liceo Tomás, Bastián, Benjamín, Cristián, David y Agustín que aún me acompañan, escuchan y han sido una gran contención y distracción durante el desarrollo de la carrera.

Esta pequeño capítulo de mi vida, llamado vida universitaria me ha dejado muchas cosas y a muchas personas, de las cuales me siento afortunado y feliz de haberlas conocido, entre ellas están mis primeros amigos y amigas de la universidad Javier, Max, Luccas, Camilo, Erick, Ariel, Catalina y Camila, quienes me dieron apoyo, ayuda, risas y una infinidad de buenos momentos y que además, siguen hasta el día de hoy a pesar de las diferentes etapas que se encuentra cada uno; Agradecer también a mis compañeros de carrera, Patricia, Stephanie, Javiera, Sebastián, Matías y Valentina R., por su apañe, paciencia y buena onda para sacar cuanta cosa adelante sin nunca rendirse; A los de la salita Valentina D., Daniel, Catalina y Javiera, por hacer de este último semestre uno entretenido y diferente.

A Eduardo y Paula, quienes sin conocerme ni tener la obligación de ayudarme en el desarrollo de esta memoria, siempre se mostraron con la disposición y ánimos de echarme una mano de manera desinteresada.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas y docentes que fueron parte de mi carrera universitaria, en particular a Miguel Lagos por su dedicación y demostrar su pasión en lo que hace, la que siempre logró transmitir aun cuando eran momentos difíciles, siendo un ejemplo de persona e inspiración profesional.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVO GENERAL	1
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	CAMBIO CLIMÁTICO.....	3
2.2	HERRAMIENTAS PARA EL ESTUDIO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	5
2.3	RESULTADOS DE ESTUDIOS EN CHILE MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MÉTODOS DE ESCALAMIENTO.....	6
3	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	8
4	DATOS Y MÉTODOS	10
4.1	FORZANTES METEOROLÓGICAS.....	10
4.2	ESCALAMIENTO ESTADÍSTICO	11
4.2.1	Interpolación espacial	11
4.2.2	Corrección de sesgos.	11
4.3	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	12
4.4	VALOR AGREGADO	15
5	RESULTADOS	16
5.1	FORZANTES METEOROLÓGICAS.....	16
5.1.1	Análisis de las simulaciones de temperatura	16
5.1.2	Análisis de las simulaciones de precipitación	21
5.2	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	29
5.2.1	Calibración y Validación	29
5.2.2	Proyecciones de cambio hidrológico.....	32
6	DISCUSIONES	37
6.1	FORZANTES METEOROLÓGICAS.....	37
6.1.1	Temperatura.....	37
6.1.2	Precipitación	37

6.2	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	39
7	CONCLUSIONES	41
8	BIBLIOGRAFÍA	43
9	ANEXOS	45

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 4.1: Extensión de la zona de cuenca de estudio. Sistema de referencia WGS84 H18.	11
Tabla 4.2: Datos de entrada y salida de cada submodelo de HBV – Light.	13
Tabla 5.1: Resultados de medidas de evaluación.	31
Tabla 5.2: Centro de Gravedad y Escorrentía media diaria anual para el producto observado y los modelos en estudio para los diferentes periodos.	36
Tabla A.1: Altura promedio de URH's de la zona de estudio.	46
Tabla B.1: Temperatura Media Mensual Promedio en el periodo futuro cercano 2040-2070 para los modelos global y regional.	46
Tabla B.2: Señal de cambio de temperatura media mensual promedio entre los modelos global y regional en el periodo futuro cercano respecto a sus respectivos modelos en su versión corregida en el periodo histórico.....	47
Tabla B.3: Temperatura Media Mensual Promedio en el periodo futuro lejano 2071-2099 para los modelos global y regional.	48
Tabla B.4: Señal de cambio de temperatura media mensual promedio entre los modelos global y regional en el periodo futuro lejano respecto al producto grillado del CR2Met en el periodo histórico.....	48
Tabla C.1: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano 2040-2070 para los modelos global y regional.....	53
Tabla C.2: Señal de cambio de precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano 2040-2070 para los modelos global y regional.	53
Tabla C.3: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano 2071-2099 para los modelos global y regional.....	54
Tabla C.4: Señal de cambio de precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano 2071-2099 para los modelos global y regional.	55

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 2.1: Promedio global de concentraciones de GEI para el periodo 1850 – 2010. Fuente: IPCC, (2014).....	4
Figura 2.2: Emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico 1970 – 2010. Fuente: IPCC, (2014).....	4
Figura 3.1: Curva de variación estacional para la cuenca Río Itata en General Cruz. ..	8
Figura 3.2: Mapa de la cuenca río Itata en General Cruz con URH utilizadas en modelación hidrológica.	9
Figura 4.1: Diagrama de flujo metodología.	10
Figura 4.2: Estructura esquemática del modelo HBV – light. Fuente: ‘User’s Manual HBV light version 2’ (Seibert, 2005).	13
Figura 5.1: Temperatura media mensual promedio en el periodo histórico 1979 – 2005 del producto grillado CR2Met y modelos global y regional.	17
Figura 5.2: Señal de cambio en la temperatura media mensual promedio en el periodo futuro cercano 2040 – 2070 de los modelos global y regional, comparado a los respectivos modelos corregidos en el periodo histórico 1979 - 2005.	18
Figura 5.3: Diferencia promedio de Temperatura entre modelos corregidos y crudos para el periodo futuro cercano (2040-2070) e histórico (1979 – 2005) para los modelos climáticos global (A) y regional (B).	19
Figura 5.4: Valor agregado de Temperatura para GCM Corregido – GCM Crudo. ...	20
Figura 5.6: Valor Agregado de temperatura GCM Crudo – RCM Crudo.....	21
Figura 5.7: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo histórico 1979 – 2005 del producto grillado CR2Met y modelos global y regional.	22
Figura 5.8: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano (2040 – 2070) de los modelos global y regional corregidos, comparado al periodo histórico (1979 – 2005).	23
Figura 5.9: Diferencia promedio de precipitación anual entre modelos corregidos y crudos para el periodo futuro cercano (2040-2070) e histórico (1979 – 2005) para los modelos climáticos global (A) y regional (B).	24
Figura 5.10: Valor agregado de Precipitación para GCM Corregido – GCM Crudo..	25
Figura 5.11: Valor agregado de Precipitación para RCM Corregido – RCM Crudo..	25
Figura 5.12: Valor agregado de Precipitación para GCM Crudo – RCM Crudo.....	26
5.13: Días con precipitación en el periodo histórico 1979 -2005.....	27

5.14: Días con precipitación en el periodo futuro cercano 2040 -2070.....	28
5.15: Valor agregado de días con precipitación sólida para GCM Corregido – GCM Crudo.	29
5.16: Valor agregado de días con precipitación sólida para RCM Corregido – RCM Crudo.	29
Figura 5.17: Serie de Escorrentía media diaria observada y simulada en los periodos de calibración y validación.....	30
Figura 5.18: Curva de duración observada y simulada en el periodo de calibración (A) y validación(B).	31
Figura 5.19: Curva de Variación Estacional observada y simulada en el periodo de calibración y validación.....	31
Figura 5.20: Ciclo anual promedio de escorrentía periodo 1981 – 2005.	32
Figura 5.21: Valor agregado en Curva de Duración RCM – GCM Corregidos.....	33
Figura 5.22: Valor agregado en Curva de variación estacional RCM – GCM Corregidos.	34
Figura 5.23: ciclo anual promedio de escorrentía para GCM en los periodos histórico, futuro cercano y lejano.	35
Figura 5.24: ciclo anual promedio de escorrentía para RCM en los periodos histórico, futuro cercano y lejano.	35
6.1: Días con precipitación sólida en el periodo histórico 1979 -2005.	39
Figura A.1: Precipitación media anual.	45
Figura A.2: Número de días promedio con precipitación sólida para el periodo 1979 – 2005.	45
Figura B.1: Temperatura media mensual promedio en el periodo futuro lejano 2071-2099 de los modelos global y regional, comparado al producto grillado CR2Met en el periodo histórico 1979-2005.....	47
Figura B.2: Diferencia promedio de Temperatura entre el periodo futuro cercano (2040 – 2070) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático global (a) Crudo y (b) Corregido.	49
Figura B.3: Diferencia promedio de Temperatura entre el periodo futuro cercano (2040 – 2070) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático regional (a) Crudo y (b) Corregido.	50

Figura B.4: Diferencia promedio de Temperatura entre modelos corregidos y crudos para el periodo futuro lejano (2071-2099) e histórico (1979 – 2005) para los modelos climáticos global (A) y regional (B).....	50
Figura B.5: Diferencia promedio de Temperatura entre el periodo futuro cercano (2071 – 2099) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático glonal (a) Crudo y (b) Corregido.	51
Figura B.6: Diferencia promedio de Temperatura entre el periodo futuro cercano (2071 – 2099) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático regional (a) Crudo y (b) Corregido.	52
Figura C1: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro lejano (2071–2099) de los modelos global y regional, comparado periodo histórico 1979 - 2005.	54
Figura C.2: Diferencia promedio de precipitación entre el periodo futuro cercano (2040 – 2070) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático global Crudo (a) y Corregido (b).....	55
Figura C.3: Diferencia promedio de precipitación entre el periodo futuro cercano (2040 – 2070) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático regional Crudo (a) y Corregido (b).....	56
Figura C.4: Diferencia promedio de precipitación anual entre modelos corregidos y crudos para el periodo futuro lejano (2071-2099) e histórico (1979 – 2005) para los modelos climáticos global (A) y regional (B).	56
Figura C.5: Diferencia promedio de precipitación entre el periodo futuro lejano (2071 – 2099) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático global Crudo (a) y Corregido (b).	57
Figura C.6: Diferencia promedio de precipitación entre el periodo futuro lejano (2071 – 2099) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático regional Crudo (a) y Corregido (b).	58
Figura C.7: Días con precipitación en el periodo futuro lejano 2071-2099.	58
Figura C.8: Valor Agregado para días con precipitación sólida entre GCM Crudo – RCM Crudo.	59

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La información climática a escala regional y local se ha convertido en un tema relevante, en la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático e integración de las necesidades de adaptación regional y local (Bozkurt et al., 2019). Para Chile, obtener escalas espaciales que representen de mejor manera la topografía de la zona es un tema que cobra gran relevancia, sobre todo considerando la mega sequía que ha afectado a gran parte del país desde el 2010 y que a la fecha no presenta señales de volver a la normalidad (Boisier et al., 2016).

En base a estos antecedentes, es que se han buscado diferentes alternativas para lograr representar comportamientos climáticos e hidrológicos, tanto para el escenario histórico como proyectado, mediante simulaciones climáticas globales (GCM) y regionales (RCM). Además, se han utilizado métodos de escalamiento estadístico para corregir y llevar los GCM's a resoluciones/escalas más finas (Dionizis et al., 2021), que permitan dilucidar los diferentes comportamientos climatológicos locales según las zonas de estudio, para posteriormente utilizar estos resultados en el cambio hidrológico producto del calentamiento global.

En este estudio, se propone la evaluación del valor agregado de utilizar un modelo climático regional en proyecciones hidrológicas en una cuenca de régimen hidrológico pluvial, así como el post-procesamiento mediante escalamiento estadístico a resoluciones espaciales más finas, utilizando el producto de referencia CR2MET.

1.2 Objetivo general

La memoria tiene como objetivo general comparar los resultados obtenidos de la simulación hidrológica de los periodos 1979-2005 y 2040-2099, usando los productos globales y regionales con escalamiento estadístico, según el escenario RCP 8.5, en la cuenca Río Itata en General Cruz, de régimen pluvial y ubicada en la zona centro-sur de Chile, en específico región del Biobío.

1.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

a) Obtener series de precipitación y temperatura escalada y corregida para la zona de estudio, tanto en el periodo histórico como proyectado según el escenario RCP 8.5 y así analizar y

comparar el comportamiento promedio de estas variables y los cambios que presentan según el modelo global y regional.

b) Contrastar las diferencias en las simulaciones de escorrentía al utilizar los resultados de los modelos globales y regionales escalados estadísticamente en los periodos históricos y proyectados, para así identificar y evaluar los desempeños que presentan.

c) Identificar y diferenciar el aporte del modelo regional escalado en los diversos comparativos existentes en el modelo hidrológico, sobre la utilización de forzantes climáticas de un modelo global escalado.

2 MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo, se pondrá en contexto de qué es el cambio climático y las repercusiones que tiene este a nivel global como local. Además, se hará un análisis de los estudios ya realizados, tanto para cambios meteorológicos como hidrológicos. Finalmente, se realiza un marco de que son los modelos hidrológicos, en especial, del modelo HBV – Light y sus diversas implementaciones.

2.1 Cambio climático

El efecto invernadero es un mecanismo que permite a la atmósfera absorber la energía emitida por la superficie terrestre induciendo a su calentamiento. Este mecanismo ha existido en la Tierra desde hace aproximadamente 4.000 millones de años y es uno de los factores más relevantes en la generación de las condiciones necesarias para la vida en el planeta. El calentamiento global, se ha generado producto de un exceso de gases de efecto invernadero (GEI), fenómeno atribuido a la contaminación humana, la cual va en alza hace aproximadamente 150 años, producto de la quema de combustibles fósiles junto con la tala de bosques (Caballero et al., 2007).

Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial debido al crecimiento económico y demográfico de los diversos países que habitan la Tierra (Benavides and León, 2007), teniendo por consecuencia un aumento de concentraciones atmosféricas de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono, siendo este último el que presenta mayores incrementos. En la Figura 2.1, se tiene el promedio global de concentraciones de GEI para el periodo 1850 – 2010 y en la figura 4.2, se puede observar el aumento progresivo que han tenido las emisiones de GEI en el periodo 1970 – 2010 de origen antropógeno lo que se ha traducido a consecuencias como el aumento de temperatura en superficie terrestres y oceánicas, aumento en el nivel del mar y disminución de volúmenes de nieve y hielo (IPCC, 2014).

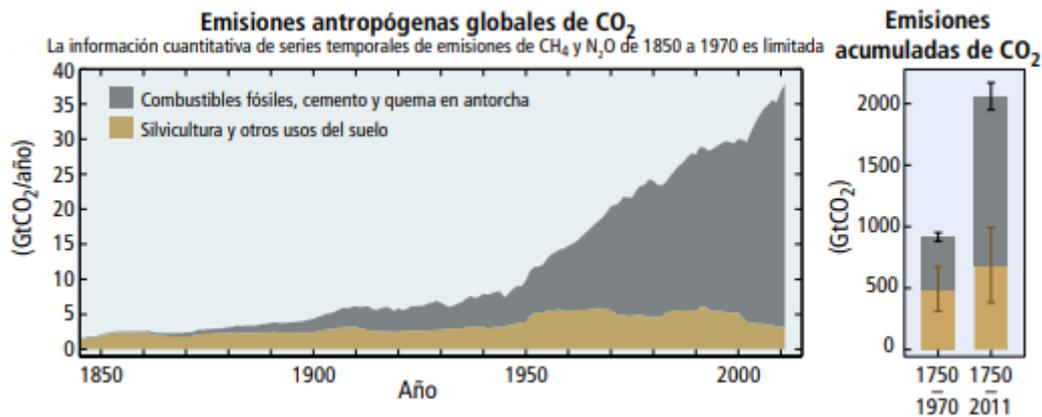


Figura 2.1: Promedio global de concentraciones de GEI para el periodo 1850 – 2010.

Fuente: IPCC, (2014).

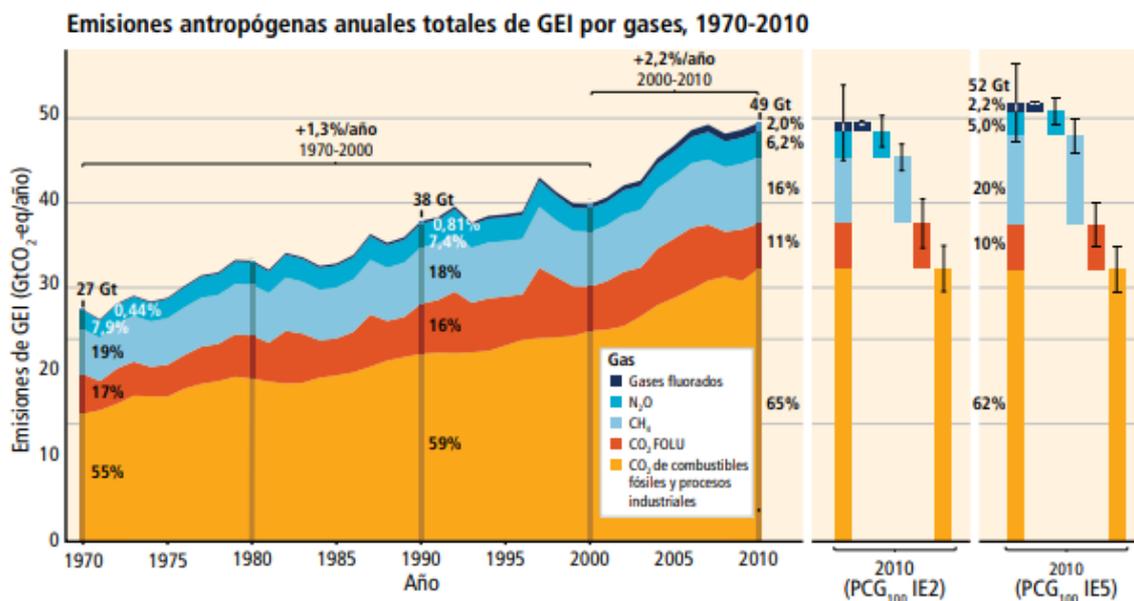


Figura 2.2: Emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico 1970 – 2010. Fuente: IPCC, (2014).

En Chile, se han realizado diversos estudios de las consecuencias que este ha traído y cuál es el panorama para el futuro cercano y lejano, haciendo urgente una toma de conciencia y acción respecto del tema. Por ejemplo, para el futuro cercano se prevé una disminución de precipitaciones para la zona sur, que va desde -5% al -10%, el cual viene acompañado de un incremento en las temperaturas de entre un 2° C a 4°C (DGA, 2017). Para realizar este estudio, se utilizaron cuatro modelos de circulación general forzados por el escenario RCP 8.5. Además, se han realizado estudios utilizando la metodología de escalamiento dinámico (Bozkurt et al., 2019), pero esto se abordará en el apartado 2.2.

2.2 Herramientas para el estudio del cambio climático

Para poder estudiar el cambio climático y como afecta este al planeta y su ecosistema, es que se crea el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), el cual ha preparado informes de evaluación sobre conocimiento científico, técnico y socioeconómico sobre el cambio climático, sus impactos y posibles riesgos futuros. Dentro de este marco, se tiene el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés), proyecto desarrollado en fases sucesivas adaptadas para mejorar el avance de modelos climáticos, además de informar acerca de posibles acciones para mitigar los efectos producidos por el cambio climático. En la presente memoria, se utilizan simulaciones del fase 5 del CMIP.

Como resultado de estos proyectos tenemos los Modelos de Circulación Global (GCM), cuya finalidad es lograr representar el comportamiento histórico observado, para así proyectar series futuras de cambio climático. Los GCM generan series climáticas a partir de la simulación de la interacción de los océanos, atmósfera terrestre y la superficie con sus respectivas características, los cuales son forzados por diferentes escenarios de emisión (Representative Concentration Pathways, RCP, para el caso específico del CMIP5), entregando así diversas series de resultados e implicancias. Una de las características importantes que tienen los GCM, es su resolución horizontal, que oscila entre 100 – 250 km, lo que dificulta la representación en detalle de efectos orográficos de la zona y efectos de microclima (Cannon et al., 2015).

En el caso particular del angosto territorio que comprende Chile, se presenta una gran variación en la topografía, donde se encuentran zonas costeras, valles y montañas, las cuales tienen comportamientos climatológicos diversos, lo que no necesariamente son modelados por los GCM's. Dada esta condición, se desarrollan Modelos de Circulación Regional (RCM), que son el resultado de un escalamiento dinámico de los GCM, utilizando la información de estos como condiciones de borde, por lo que los RCM's son altamente determinados por el GCM que los alimenta (Rojas, 2012). Los RCM's cuentan con una resolución horizontal más fina, que pueden estar entre los 50 km – 10 km, logrando representar de mejor manera los comportamientos climáticos de la zona de estudio según sus propias características.

2.3 Resultados de estudios en Chile mediante la utilización de métodos de escalamiento

Las importantes variaciones que presenta la topografía del territorio chileno hacen que sea indispensable contar con proyecciones de cambio climático capaces de resolver estas escalas espaciales de manera más fina que los modelos globales. Por lo tanto, se debe recurrir a diferentes alternativas de escalamiento, ya sea, dinámico o estadístico. A continuación, se presentan estudios que arrojan resultados y conclusiones de metodologías que incluyen algún método de escalamiento mencionado.

En lo que respecta a resultados de modelación climática utilizando un RCM forzado por un GCM, se tiene que, para un periodo de validación histórico los ciclos anuales de temperatura y precipitación son correctamente representados para diversas zonas del territorio nacional, además, representa de mejor manera que el GCM la variación longitudinal de temperatura y simula correctamente los gradientes latitudinales y longitudinales de precipitación en zonas sin gradientes topográficos. No obstante, para zonas con topografía completa, la precipitación se ve sobreestimada (Rojas, 2012).

En cuanto a proyecciones futuras, se obtienen aumentos de temperatura para todo el territorio nacional, que van desde los 0.5°C (Magallanes) a 2.5°C (Altiplano) para el periodo 2031 – 2050. Además, se proyecta una disminución de precipitación para la zona centro sur de Chile, como también una señal de sequía para la zona norte (Rojas, 2012).

En lo que respecta al estudio llevado a cabo por el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia ((CR)², 2018), el cual utilizó dos RCM's, de resolución horizontal de 50 km y 10 km, se obtienen resultados similares, donde los modelos regionales utilizados logran simular de manera correcta las climatologías y ciclos anuales de temperatura y precipitación en las diversas regiones analizadas, independiente de la escala utilizada.

Ambas simulaciones proyectan un aumento de la temperatura anual en todo el territorio nacional, con un gradiente negativo de norte a sur y de cordillera a océano. Los cambios proyectados generales son más o menos similares en ambas resoluciones espaciales, en los diversos escenarios utilizados. En lo que respecta a temperatura para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 se esperan incrementos de temperatura desde 0.4 °C hasta 1.2 °C y 0.6°C hasta 1.6°C respectivamente. Además, la simulación de 10 km presenta más detalles espaciales de cambios de temperatura y mayor frecuencia de eventos cálidos. En cuanto a precipitación, ambas simulaciones indican una clara disminución de precipitación anual, siendo alrededor

del orden de 20% para la zona norte y centro del país, mientras que, para zonas cordilleranas del centro y sur, se presenta un aumento en la precipitación anual de aproximadamente un 10%, ambos resultados son para el periodo del futuro cercano comprendido entre el 2021 – 2050.

Para un estudio donde se realiza una reducción dinámica de escala para el territorio suroeste de Sudamérica, se logra visibilizar que el modelo climático regional utilizado logra simular la variabilidad espacial de la temperatura media anual, mientras que, para la precipitación este captura de manera correcta la variabilidad interanual media espacial en cada región donde se aplica el estudio (Bozkurt et al., 2019). Sin embargo, existen algunas diferencias para las temperatura simuladas y observadas a escalas locales, además, no se reproduce la tendencia de calentamiento observada en la zona cordillerana para el centro de Chile. Finalmente, concluye que el utilizar este modelo regional agrega valor de temperatura y precipitación sobre gran parte del territorio chileno, en particular, el modelo a escala de 10 km.

Al utilizar y comparar diferentes métodos de escalamientos estadísticos como, *Quantile Delta Mapping* (QDM), *Asynchronous Regression* (AR) y *Multivariate Bias Correction* (MBC), aplicados a las variables meteorológicas de un GCM's se obtiene que, tanto el modelo crudo como escalado coinciden en proyectar aumentos de temperatura cercanos a 1°C, no obstante, para la precipitación se tiene que los modelos proyectan un aumento de esta posterior al escalamiento (Dionizis et al., 2021). A diferencia de los otros estudios revisados, las series climatológicas obtenidas en este estudio fueron utilizadas para realizar una simulación hidrológica, donde se tiene que los montos anuales de caudal simulados por el GCM histórico son consistentes con los observados y a los obtenidos en el periodo de calibración. Además, se tiene que la dispersión en los modelos históricos es menor que en las proyecciones, lo que da cuenta de la incertidumbre asociada a la proyección climática de cada GCM. Finalmente, las curvas de duración de caudales medios diarios y las curvas de variación estacional que se obtienen en cada GCM son capaces de reproducir el comportamiento promedio de los caudales en el periodo histórico, no obstante, estos no son capaces de reproducir la estacionalidad, evidenciando un desplazamiento en el hidrograma.

3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Itata en General Cruz (Código BNA 8124001) está ubicada en la Región del Biobío, cuya delimitación queda determinada por la estación fluviométrica del mismo nombre, ubicada en la latitud $-36,93^\circ$ y longitud $-72,35^\circ$. Esta cuenca está conformada por un área de 1661,9 km², tiene por cota máxima, media y punto de salida, 2242, 613, 79 m.s.n.m respectivamente. En la Figura 3.1 se puede observar que esta cuenca es de régimen pluvial contando con una precipitación anual media de 1480 mm (se adjunta Figura en el apéndice A de la precipitación media por píxel), siendo los meses de invierno los mayores causantes de crecidas en la escorrentía, teniendo un aporte nival prácticamente indetectable, llegando a tener un máximo de 15 días promedio de precipitación sólida en el periodo 1979 - 2005 (se adjunta Figura con los días de precipitación sólida en el Apéndice A), la que se encuentra principalmente en las zonas sobre los 2000 m.s.n.m. (Hidrografía región del Bío-Bío).

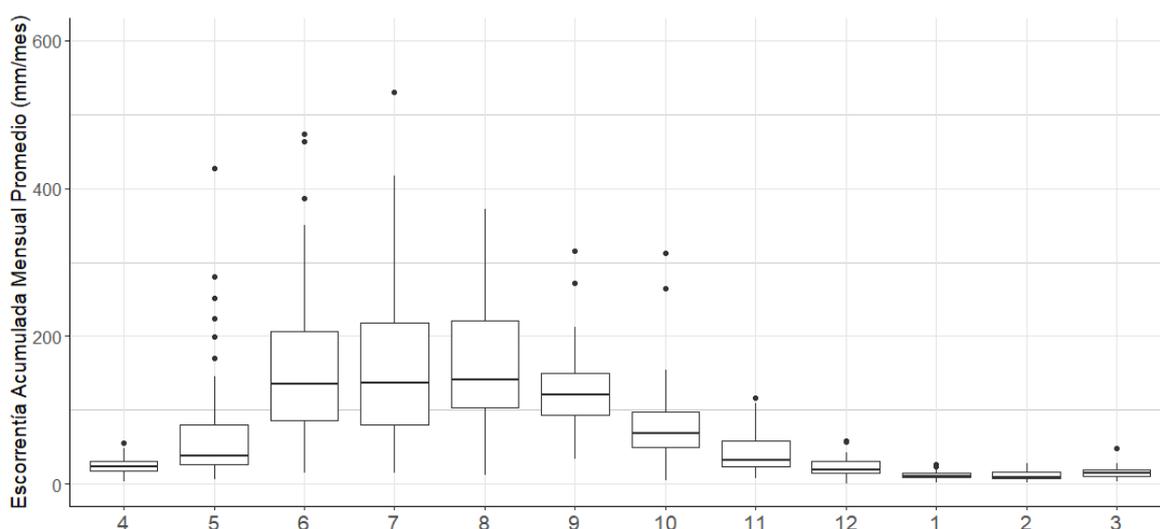


Figura 3.1: Curva de variación estacional para la cuenca Río Itata en General Cruz.

Respecto al clima de la región, esta marca la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que se desarrollan al sur del río Biobío, es por esto que, encontramos diferentes comportamientos en las diferentes cuencas presentes en la zona, ya sean templados húmedos, templado mediterráneo o climas más fríos con precipitaciones abundantes y bajas temperaturas, permitiendo la presencia de nieves permanentes en las alturas de la cordillera. En la cuenca de estudio nos encontramos en los sectores de valle y altos de la macrozona, el cual presenta un clima templado húmedo,

humedad constante y un gran contraste de temperaturas entre día y noche (BCN 2022, Clima y Vegetación Región del Bío-Bío).

Las características climáticas de la región permiten la existencia de una variada vegetación, teniendo existencias del espino, boldo, peumo, quillay y bosque esclerófilo, en donde hoy es posible apreciar el cambio que se ha producido en la vegetación natural por las plantaciones forestales de pinos y por cultivos agrícolas (BCN 2022, Clima y Vegetación Región del Biobío). Al sur del Biobío se ubica un bosque higromórfico, donde predominan especies como el roble, ciprés, roble y mañío, además, posee un bosque de araucarias, el cual habitualmente se asocia con especies como coigüe.

En la Figura 3.2 se presenta el mapa de la cuenca dividida en URH's, las cuales fueron utilizadas en modelación hidrológica, separándolas por porcentajes equitativos de terreno (se adjunta en el Anexo A la tabla con alturas de cada URH).

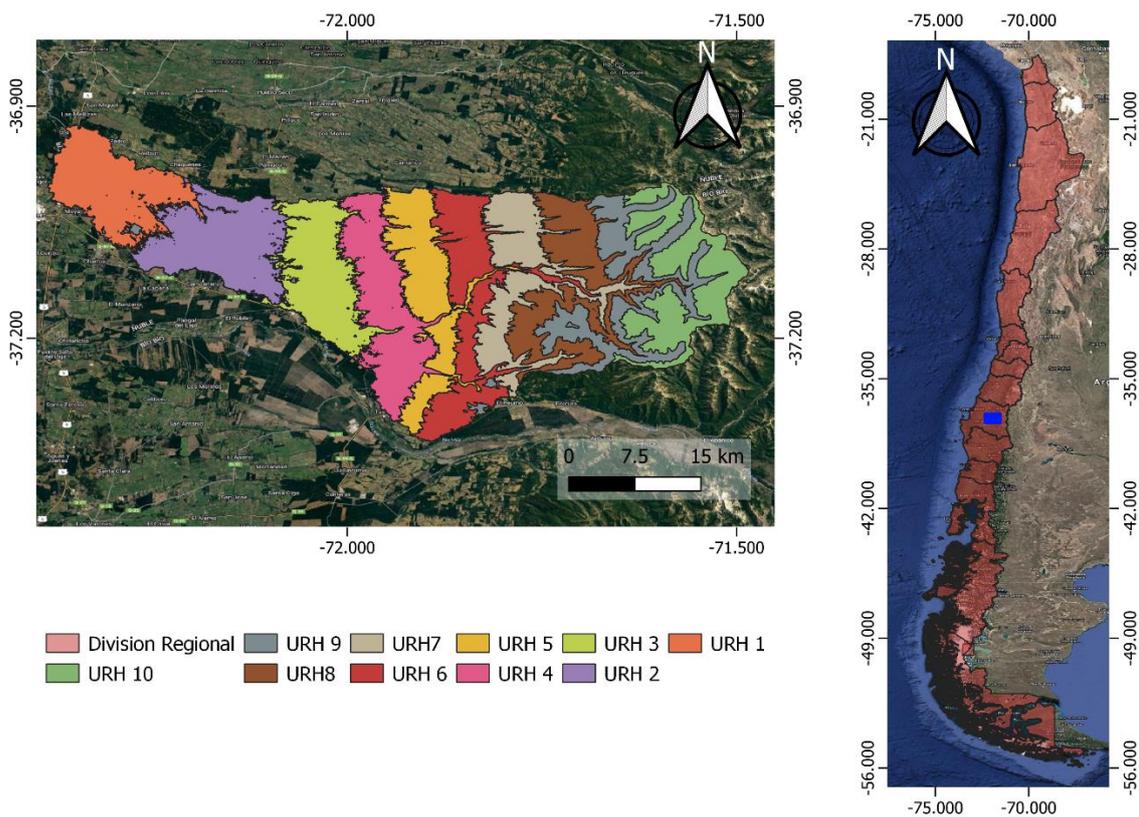


Figura 3.2: Mapa de la cuenca río Itata en General Cruz con URH utilizadas en modelación hidrológica.

4 DATOS Y MÉTODOS

En este capítulo, se presenta la metodología utilizada en este estudio, la cual se resume en la Figura 4.1. Teniendo como base el modelo regional (RegCM4) forzado por el GCM (MPI-ESM-MR), escalado por Bozkurt et al. (2018), se realiza un escalamiento estadístico de series diarias de precipitación y temperatura, mediante el método MBCn (Cannon, 2018), utilizando como referencia el producto CR2MET. A continuación, se analizan las series climáticas obtenidas, presentando especial atención a la temperatura y precipitación. Por último, mediante el uso del modelo HBV – Light versión 2.0 (Seibert, 2005), se generan simulaciones hidrológicas tanto para el periodo histórico 1981-2005 como el periodo futuro 2040-2099, en el escenario RCP8.5.



Figura 4.1: Diagrama de flujo metodología.

4.1 Forzantes meteorológicas

Dada la propuesta de modelo hidrológico, es que se obtienen las forzantes meteorológicas del producto grillado del CR2MET, del modelo de circulación global MPI-ESM-MR y del modelo de circulación regional RegCM4 impulsado por ERA-Interim, tanto de precipitación como de temperatura. Para ambos modelos de circulación, se escoge analizar el escenario de

forzamiento RCP 8.5, asociado a una alta emisión de gases de efecto invernadero. Esta elección de modelos se lleva a cabo para seguir un hilo lógico de comparación, ya que, el modelo RegCM4 utiliza como condiciones de borde lo obtenido por el modelo global MPI-ESM-MR.

4.2 Escalamiento estadístico

4.2.1 Interpolación espacial

En primer lugar, se realiza una interpolación espacial del RCM y GCM a las celdas simuladas por CR2MET, es decir, tanto los modelos como el producto grillado deben tener la misma resolución horizontal. Con tal de optimizar el tiempo de procesamiento de datos, se reduce el área de obtención de datos a las extensiones máximas y mínimas determinadas por la cuenca de estudio, esto tanto para los datos observados, como para los modelos a estudiar.

Tabla 4.1: Extensión de la zona de cuenca de estudio. Sistema de referencia WGS84 H18.

Coordenada	Grado
Norte	-36.92
Sur	-37.33
Este	-71.48
Oeste	-72.38

Para llevar a cabo el cambio de escala, se utilizó el método de interpolación bilineal, el cual utiliza los cuatro píxeles vecinos más cercanos para obtener un promedio de estos ponderados por el inverso de la distancia, por lo que las celdas más cercanas tendrán mayor preponderancia.

4.2.2 Corrección de sesgos.

A fin de representar de manera correcta el comportamiento de las variables meteorológicas históricas y futuras de los modelos, es que es de suma relevancia elegir un método de escalamiento adecuado, más aún cuando se fuerzan modelos hidrológicos y se realiza un análisis de los efectos del cambio climático (Dionizis et al., 2021).

Dicho lo anterior, es que se utiliza el método *Multivariate Bias Correction* (MBCn), el cual utiliza una transformación n-dimensional de las funciones de densidad de probabilidad de las variables (Pitié et al., 2007). El funcionamiento de este método es similar al del QDM

(método utilizado para el Balance Hídrico), aunque difiere en que los escalamientos son multivariados, lo que significa que las series a escalar son tratadas como co-variables y no como variables independientes entre sí, permitiendo así rescatar la relación que existe naturalmente entre la precipitación y la temperatura (Cannon, 2018). El método MBCn garantiza la convergencia del escalamiento sin importar la distribución de las variables originales.

Además, es importante considerar una correcta representación y correlación de las precipitaciones sólidas/líquidas, es por esto que, no es recomendable realizar proyecciones hidrológicas a escala sub-anual, pues no representa de manera correcta los caudales históricos (Dionizis et al., 2021), por lo que, para mantener una correcta estacionalidad de las variables meteorológicas se filtra el escalamiento de manera mensual.

Continuando con una correcta representación de la precipitación, se hace necesario incorporar un valor traza en esta variable, dado que, los modelos de circulación presentan valores mayores a cero durante todo el periodo de estudio, diferenciando la cantidad total de días de precipitación con el producto observado del CR2MET. Para ajustar de manera correcta la serie simulada, se determina un valor que sustituye los eventos con precipitación menor o igual a este índice, con precipitación nula.

Finalmente, se definen los periodos histórico y futuro 1979 – 2005 y 2006 – 2099 respectivamente, esto de acuerdo con que se trabajó con los datos del CMIP5.

4.3 Modelación hidrológica

Se utiliza el modelo hidrológico HBV – light version 2 (Seibert, 2005), el cual utiliza como inputs las forzantes meteorológicas de precipitación diaria, temperatura y la evapotranspiración potencial. Destaca por ser un modelo de estructura simple (Estanques) y semi-distribuido, es decir, permite dividir la cuenca en subcuencas, zonas de elevación y vegetación, por consecuencia, es un modelo conceptual que nos permite simular la escorrentía

Para el cálculo y obtención de la evapotranspiración potencial se utiliza el paquete “*Evapotranspiration*”, donde se utiliza la ecuación de Hargreaves Samani (Guo et al., 2016). Dicho método requiere como insumos la temperatura mínima y máxima, elevación promedio sobre el nivel del mar, latitud en radianes, valor de constante solar y el calor latente de vaporización.

A continuación, en la Figura 4.2 se presenta la estructura del modelo y en la Tabla 4.2 se tienen los submodelos con los correspondientes datos de entrada y resultantes. Para más detalles del funcionamiento específico del modelo y sus rutinas respectivas, puede consultar con ‘User’s Manual HBV light version 2’ (Seibert, 2005).

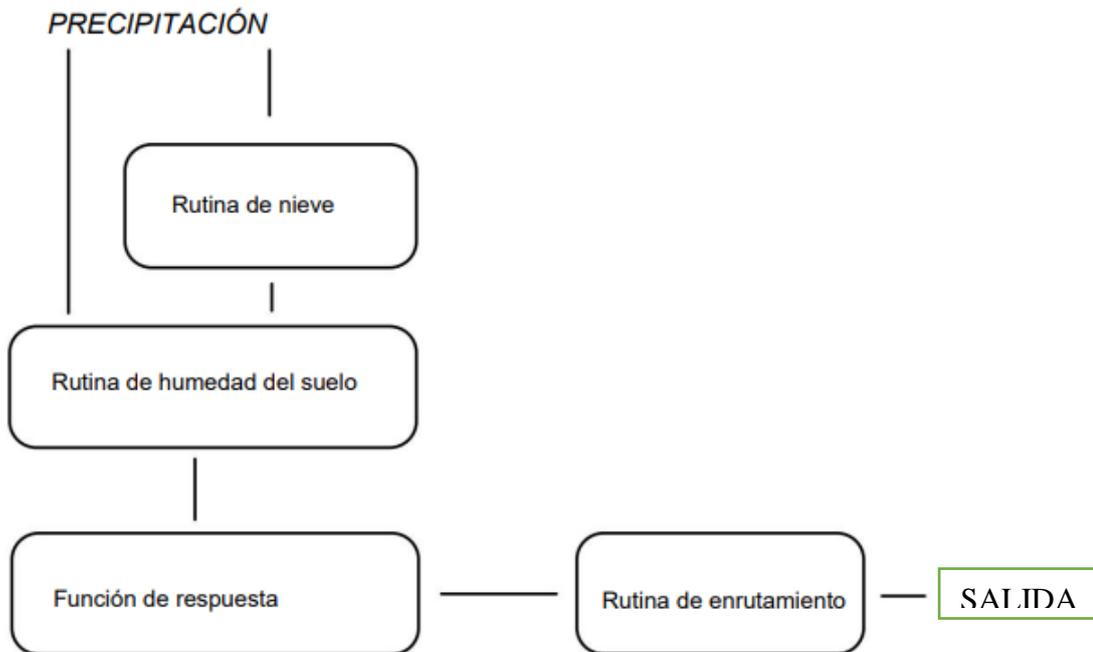


Figura 4.2: Estructura esquemática del modelo HBV – light. Fuente: ‘User’s Manual HBV light version 2’ (Seibert, 2005).

Tabla 4.2: Datos de entrada y salida de cada submodelo de HBV – Light.

Submodelo	Datos de entrada	Datos resultantes
Rutina de nieve	Precipitación Temperatura	Paquete de nieve Nieve derretida
Rutina de suelo	Evapotranspiración potencial Precipitación Deshielo	Evapotranspiración actual Humedad de suelo
Función de respuesta	Recarga de agua subterránea	Escorrentía Nivel de agua subterránea
Rutina de enrutamiento	Salida	Escorrentía simulada

Para el desarrollo del modelo hidrológico, se divide la cuenca en diez URH's de áreas iguales, las que se pueden ver en la Figura 3.2. Para calibrar los parámetros se utiliza una optimización de algoritmo genético (GAP optimisation), donde se debe entregar un rango lógico de valores para los diferentes parámetros que requiere el modelo, donde posteriormente entrega una lista de combinaciones de estos para la posterior utilización. Cada intento de calibración tiene un total de 6000 combinaciones de parámetros, entregando de forma separada los 100 con mejor rendimiento según la función objetivo a utilizar.

Las funciones objetivo a utilizar son el KGE y NSE (Gupta et al., 2009). KGE es un índice de eficiencia que incluye la correlación mediante el índice de correlación lineal r , el sesgo representado por β obtenido como el cociente entre las desviaciones estándar (σ_s y σ_o) y la variabilidad de la simulación representado por α obtenido como el cociente entre la media de la serie simulada y observada (μ_s y μ_o).

$$KGE = 1 - ED$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

$$\alpha = \sigma_s / \sigma_{so}$$

$$\beta = \mu_s / \mu_o$$

Para analizar el desempeño del modelo, se utilizan las métricas de evaluación NSE, R^2 y KGE y métricas de evaluación de la curva de duración (Yilmaz et al., 2008). Estas incluyen los sesgos de caudal alto (BiasFHV), caudal medio (BiasFMM) y caudal bajo (BiasFLV).

$$R^2 = \left(\frac{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}} \right)^2$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

$$BiasFMS = \frac{(\log(Q_{sim - P_{0,2}}) - \log(Q_{sim - P_{0,7}})) - (\log(Q_{obs - P_{0,2}}) - \log(Q_{obs - P_{0,7}}))}{\log(Q_{obs - P_{0,2}}) - \log(Q_{obs - P_{0,7}})} 100$$

$$BiasFHV = \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum Q_{obs}} 100, P_{exc} < 0.2$$

$$BiasFLV = -100 \frac{\sum(\log(Q_{sim}) - \log(\min(Q_{sim}))) - \sum(\log(Q_{obs}) - \log(\min(Q_{obs})))}{\sum(\log(Q_{obs}) - \log(\min(Q_{obs})))}, P_{exc} > 0.7$$

$$BiasFMM = \frac{\log(Q_{sim,med}) - \log(Q_{obs,med})}{\log(Q_{obs,med})} 100$$

Donde Q_{obs} es el caudal observado, Q_{sim} es el caudal simulado, $\overline{Q_{obs}}$ y $\overline{Q_{sim}}$ corresponden a la media de los caudales observados y simulados respectivamente, $Q_{obs-p0.2}$, $Q_{sim-p0.2}$, $Q_{obs-p0.7}$ y $Q_{sim-p0.7}$ los caudales observados y simulados con probabilidad de excedencia 0,2 y 0,7 y finalmente, P_{exc} la probabilidad de excedencia.

El periodo de calibración comienza a partir de enero de 1993 y termina en diciembre de 2019, periodo hidro climáticamente diverso que contiene la mega sequía que se ha desarrollado desde el año 2010 (Garreaud et al., 2020). El periodo de calentamiento parte en enero de 1990, y el periodo de validación es a partir de enero de 1981, terminando en diciembre de 1992.

4.4 Valor Agregado

Para la evaluación y comparación de las simulaciones históricas (1979 – 2005) de los modelos global y regional, se utiliza el concepto de ‘Valor Agregado’ (Bozkurt et al., 2019; Di Luca et al., 2012; Dosio et al., 2015), además, en la presente memoria se utilizará para identificar la existencia del VA luego de realizar un post-procesamiento estadístico de los modelos señalados anteriormente.

El valor agregado está dado por la fórmula:

$$VA = \frac{((X_{GCM} - X_{OBS})^2 - (X_{RCM} - X_{OBS})^2)}{\max((X_{GCM} - X_{OBS})^2, (X_{RCM} - X_{OBS})^2)}$$

Donde X_{GCM} , X_{RCM} y X_{OBS} corresponden a los valores medios anuales de las observaciones y modelados. Esta fórmula se aplica a cada punto de la grilla y donde se obtiene un valor positivo de valor agregado, se tiene que el modelo regional mejora la simulación en comparación al modelo global. Esta ecuación también es utilizada para comparar los modelos regionales y globales crudos versus escalados, teniendo por variables de entrada $X_{GCMcrudo}$, $X_{GCMescalado}$ y X_{OBS} (similar para RCM).

5 RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan las forzantes de precipitación y temperatura del GCM y RCM para los periodos de estudio, con y sin escalamiento estadístico. Además, se presentan los resultados obtenidos de la calibración y validación del modelo hidrológico realizados mediante el modelo HBV – Light, en conjunto con su evaluación y diagnóstico de los modelos.

5.1 Forzantes meteorológicas

5.1.1 Análisis de las simulaciones de temperatura

A partir del escalamiento de los modelos global y regional mediante la utilización del producto grillado del CR2Met, se obtienen las versiones corregidas de los modelos mencionados anteriormente (GCM Corregido y RCM Corregido de ahora en adelante), para la temperatura en el periodo histórico y futuro.

En la Figura 5.1 se observa la temperatura media mensual promedio a escala de cuenca del periodo histórico de estudio 1979 – 2005, para el producto grillado del CR2Met (Observado) y los modelos crudos (i.e., sin escalamiento) y corregidos. Para el GCM, se logra apreciar la corrección del sesgo frío de aproximadamente un 1°C que tiene el modelo, dejando en montos iguales a los valores promedios mensuales de temperatura de la observación y la corrección. En lo que respecta al modelo regional, en su versión cruda este logra representar de mejor manera la temperatura media mensual promedio en comparación a la versión cruda del respectivo modelo global, no obstante, presenta diferencias de igual manera, las cuales se hacen notorias en los meses de invierno, cuyos montos van entre los 0.1 °C hasta los 0.5°. Similar al caso del modelo global, se logran corregir las temperaturas medias mensuales del periodo histórico de estudio para el modelo regional.

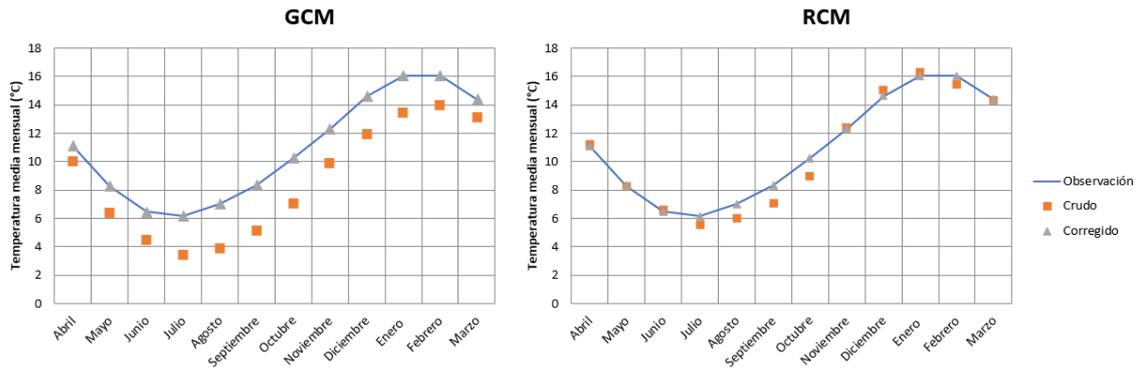


Figura 5.1: Temperatura media mensual promedio en el periodo histórico 1979 – 2005 del producto grillado CR2Met y modelos global y regional.

Luego en la Figura 5.2, se presentan los resultados de la señal de cambio en la temperatura media mensual promedio a escala de cuenca para el futuro cercano (2040-2070) para los modelos global y regional escalados, comparados con los resultados corregidos de estas mismas en el periodo histórico. Para el GCM se observan cambios de temperatura desde 1.2 °C a 3.0°C, siendo los meses de verano los que presentan una mayor alza. En promedio se tiene un alza equivalente a 1.8°C para el periodo futuro cercano.

Para el RCM, se puede notar que las señales de cambio disminuyen considerablemente, observando un de alza entre los 0.2 °C a los 2°C, no obstante, el rango de estos cambios es similar al mostrado por el GCM. A diferencia del modelo global, el mayor cambio de temperatura se presenta en un mes de invierno. En promedio, la señal de cambio de temperatura del RCM es de 1.2 °C, es decir, 0.6°C de diferencia con respecto al GCM. Se adjunta en el anexo B el detalle de los valores de temperatura media mensual promedio obtenidos en el periodo futuro cercano, junto a su respectiva señal de cambio.

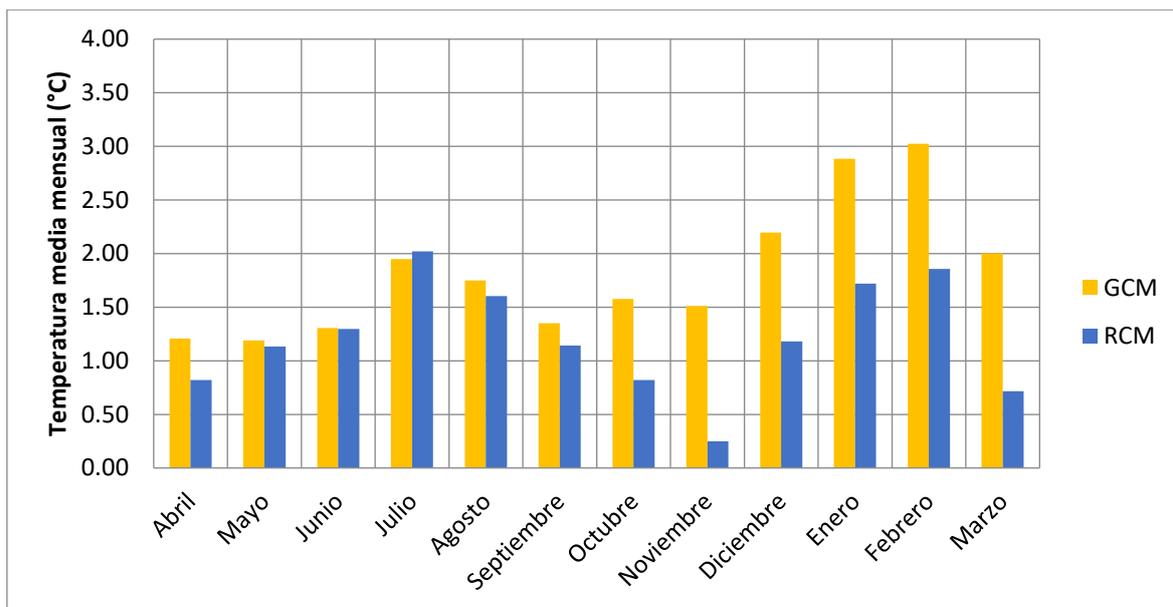


Figura 5.2: Señal de cambio en la temperatura media mensual promedio en el periodo futuro cercano 2040 – 2070 de los modelos global y regional, comparado a los respectivos modelos corregidos en el periodo histórico 1979 - 2005.

En lo que respecta al futuro lejano (2071 – 2099), el GCM corregido presentan un aumento de la temperatura media anual de 2.7°C. Por otro lado, el RCM presenta un cambio de temperatura promedio anual de 1.7°C, siguiendo la tendencia de una disminución en el aumento de temperatura con respecto al GCM. Las Figuras y tablas respecto del futuro lejano se encuentran presentes en el Apéndice B.

Por otro lado, en la Figura 5.3 se presentan los resultados de la diferencia de señal de cambio de temperatura promedio entre los modelos corregidos y crudos, tanto para el GCM y RCM, en los periodos futuro cercano (2040 – 2070) e histórico (1979 – 2005). Como es posible observar, la diferencia de proyección de cambios de temperatura es cercana a 0 para ambos modelos, permitiendo concluir que la señal de cambio entre los modelos crudos y corregidos se mantiene, diferenciándose en la corrección de sesgo que se presenta.

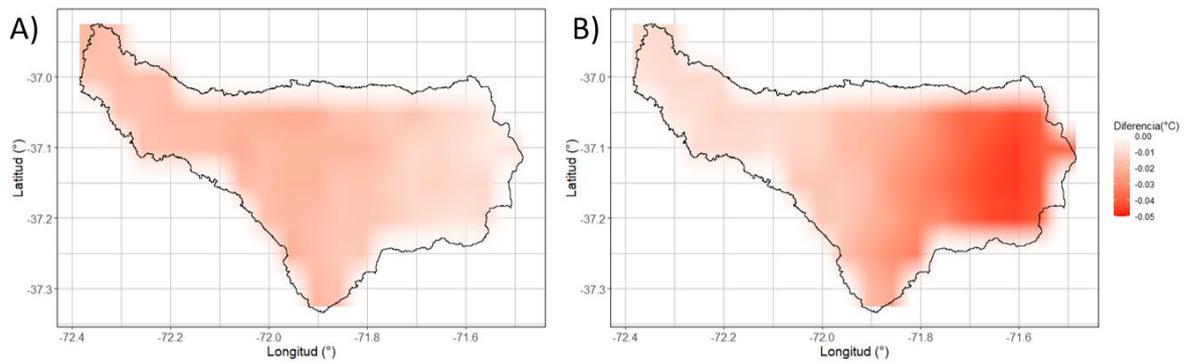


Figura 5.3: Diferencia promedio de Temperatura entre modelos corregidos y crudos para el periodo futuro cercano (2040-2070) e histórico (1979 – 2005) para los modelos climáticos global (A) y regional (B).

Para los cambios píxel a píxel, se tiene que el GCM presenta un aumento de temperatura que van desde los 1.9°C en las zonas de menor altura de la cuenca, hasta 2.1°C en los sectores de mayor elevación. Para el RCM se tienen cambios de temperatura que van desde los 1.2°C hasta los 1.5°C, teniendo el mismo comportamiento presentado por el GCM respecto a la altura de la cuenca. Las Figuras respecto a la señal de cambio píxel a píxel entre el futuro cercano y periodo histórico para el GCM y RCM se encuentran presentes en el Apéndice B.

También se realiza el mismo ejercicio para el periodo de estudio considerado como futuro lejano (2071 – 2099). A diferencia de lo presentado en la Figura 5.3, la diferencia entre señales de cambio aumenta una potencia de diez entre los modelos crudos y corregidos, variando entre los $[-0.5, 0]$, siendo esta mayor en el GCM. Por otra parte, la señal de cambio presente en el GCM va desde los 2.8 °C hasta 3.2°C. Las Figuras respecto a la señal de cambio píxel a píxel entre el futuro lejano y periodo histórico para el GCM y RCM se encuentran presentes en el Apéndice B.

Finalmente, en las figuras 5.4 y 5.5 se presentan los resultados asociados al valor agregado, teniendo en primera instancia la comparación del GCM crudo con el corregido y luego el RCM crudo con el corregido. Para el valor agregado entre el modelo global crudo y corregido (Figura 5.4), se puede observar una mejora a nivel general de la cuenca, obteniendo valores que en su mayoría son superiores a 0.8, resultado que se corrobora con la Figura 5.1 al observar la corrección de sesgo a nivel de cuenca.

Por otro lado, el RCM (Figura 5.5) presenta mejoras entre 0.2 a 0.4 al comparar sus versiones corregidas versus crudas. Si bien, no se alcanzan mejoras de gran magnitud en la escala del valor agregado $[-1, 1]$, éstas se hacen presentes en toda la extensión de la cuenca.

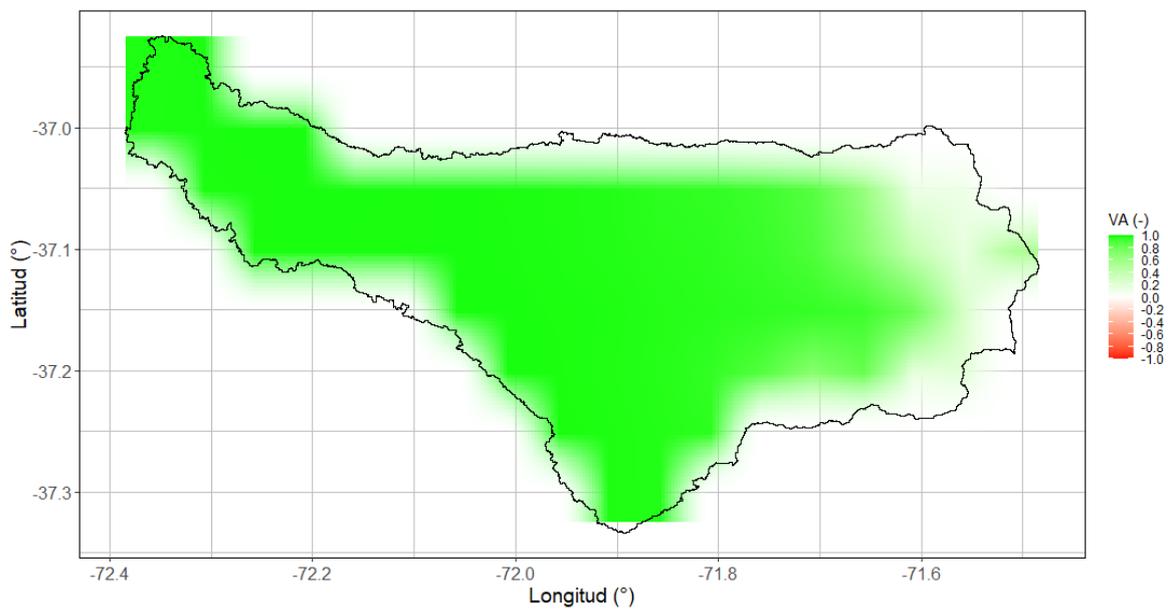


Figura 5.4: Valor agregado de Temperatura para GCM Corregido – GCM Crudo.

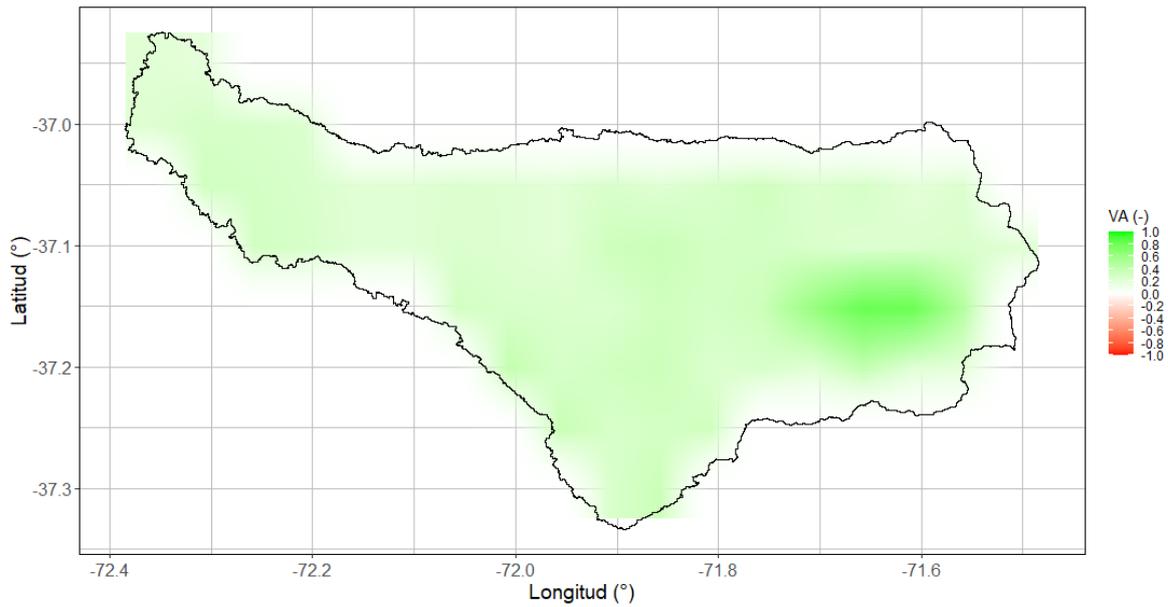


Figura 5.5: Valor agregado de Temperatura para RCM Corregido – RCM Crudo.

Por último, se presenta en la Figura 5.6 el valor agregado del RCM crudo – GCM crudo, donde se puede observar que el modelo regional presenta valores en su mayoría sobre 0.8, similar al presentado en la Figura 5.4, por ende, se tiene que tanto el escalamiento dinámico como el estadístico mejoran de forma importante la versión cruda del GCM.

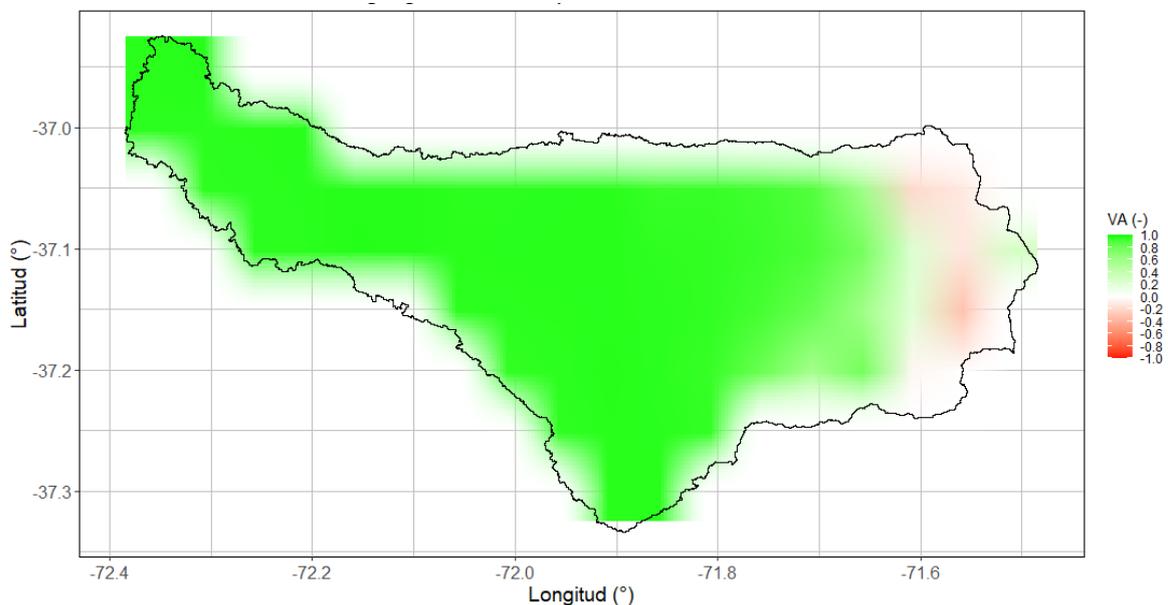


Figura 5.6: Valor Agregado de temperatura GCM Crudo – RCM Crudo.

5.1.2 Análisis de las simulaciones de precipitación

En la Figura 5.7 se observa la precipitación acumulada promedio a escala de cuenca en el periodo histórico de estudio, para el producto grillado del CR2Met (Observado) y los

modelos globales y regionales crudos y corregidos. Para el modelo global se puede apreciar que este en su versión cruda no logra reproducir la magnitud de las precipitaciones presentando una diferencia acumulada de aproximadamente un 22%. Luego, para la versión corregida de este, se logra corregir los montos promedios de precipitaciones mensuales históricas, cumpliendo con lo esperado luego de escalar estadísticamente el modelo. El modelo regional crudo muestra un comportamiento completamente distinto al del modelo global crudo, sobreestimando las precipitaciones promedios en la totalidad de los meses, presentando una diferencia de 47% precipitación acumulada, mientras que, los resultados de la versión corregida del RCM, al igual que el modelo global, logra corregir los montos de precipitación promedio mensual.

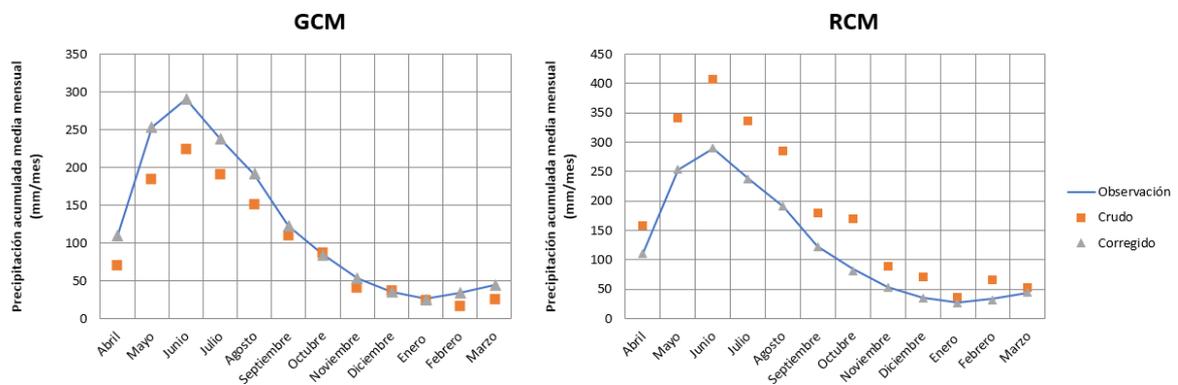


Figura 5.7: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo histórico 1979 – 2005 del producto grillado CR2Met y modelos global y regional.

Posteriormente en la Figura 5.8, se presentan las señales de cambio de precipitación mensual promedio entre el periodo futuro cercano (2040 – 2070) y el periodo histórico (1979 -2005) para los modelos global y regional en sus versiones corregidas. Para el GCM se puede observar que la mayoría de los meses del año presentan una disminución en la precipitación media mensual, destacando diciembre y enero, como los meses que presentan una disminución superior al 40%, no obstante, al ser meses de verano, no es una baja considerable en la precipitación acumulada anual. Además, se presenta una disminución de precipitación en los meses de invierno que llegan a ser de un 20% en promedio, mientras que los meses de agosto y septiembre, son los únicos meses del año que presentan un aumento de precipitación según el GCM.

Por otra parte, el RCM muestra una misma cantidad de meses con aumentos y disminuciones de precipitación, destacando un alza considerable en el mes de septiembre y marzo donde en

ambos se tiene un aumento superior al 40%, sin embargo, dos de sus aumentos de precipitación no superan el 1%. El RCM, al igual que el GCM, presenta señales de disminución de precipitación en los meses invernales alcanzando porcentajes menores al 10%. Se adjunta en el anexo C el detalle de los valores de precipitación media mensual promedio obtenidos en el periodo futuro cercano, junto a su respectiva señal de cambio.

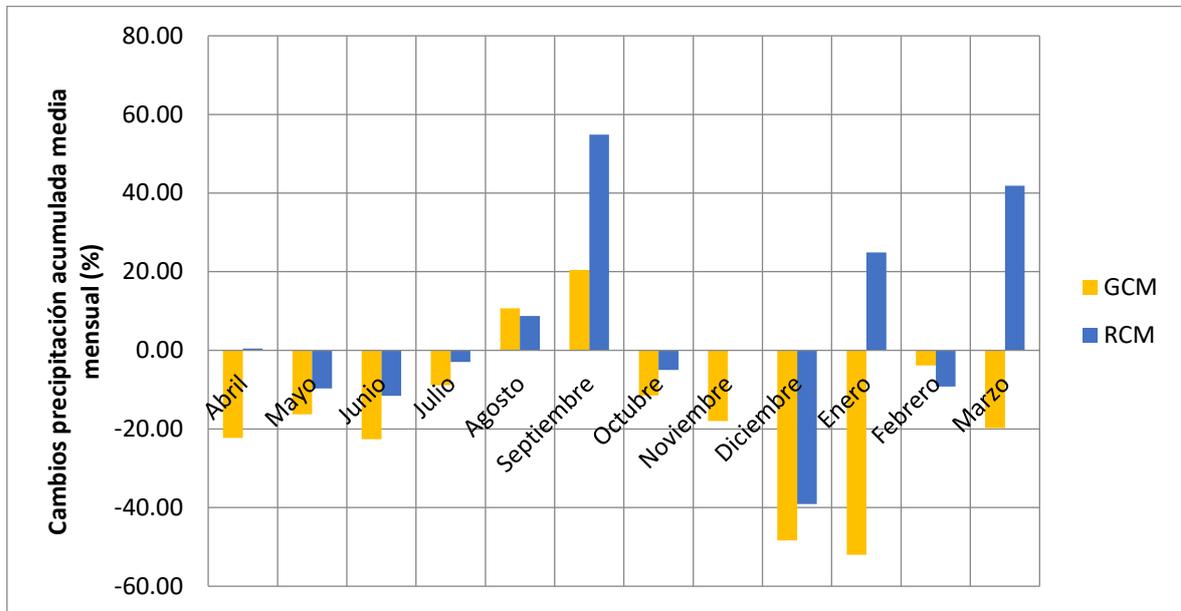


Figura 5.8: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano (2040 – 2070) de los modelos global y regional corregidos, comparado al periodo histórico (1979 – 2005).

En lo que respecta a futuro lejano (2071 – 2099), el GCM presenta en su totalidad de meses señales de disminución en la precipitación, siendo los meses de diciembre y enero lo que presentan la mayor disminución la cuales son del orden de 50% y 30% respectivamente. Para el RCM se vuelven a presentar señales de aumento de precipitación, siendo cuatro meses los que presentan aumentos sobre el 20%, destacando un aumento cercano al 70% del mes de diciembre. Los resultados obtenidos tanto en figuras y tablas se presentan en el Apéndice “C”.

Al realizar un balance anual de cambios de precipitación, se tiene que para el periodo 2040 – 2070 el GCM presenta una disminución del 12% de la precipitación, mientras que, el RCM no presenta cambios. Por otro lado, para el periodo 2071 – 2099 se presenta una disminución del 17% de la precipitación anual para el GCM y un aumento del 8% para el RCM.

En la Figura 5.9 se presentan los resultados de la diferencia de señal de cambio de precipitación promedio entre los modelos corregidos y crudos, para el GCM y RCM, en los periodos futuro cercano (2040 – 2070) e histórico (1979 – 2005). Para el GCM se tienen diferencias de hasta el 5% entre el cambio que nos proyecta el modelo crudo del corregido, siendo esta considerable en comparación a la presentada en el apartado de temperatura. El RCM presenta diferencias de hasta 2% en la proyección de la señal de cambio de precipitación entre el modelo corregido y crudo. Para ambos modelos, la diferencia que presentan las señales es homogénea en la extensión de la cuenca.

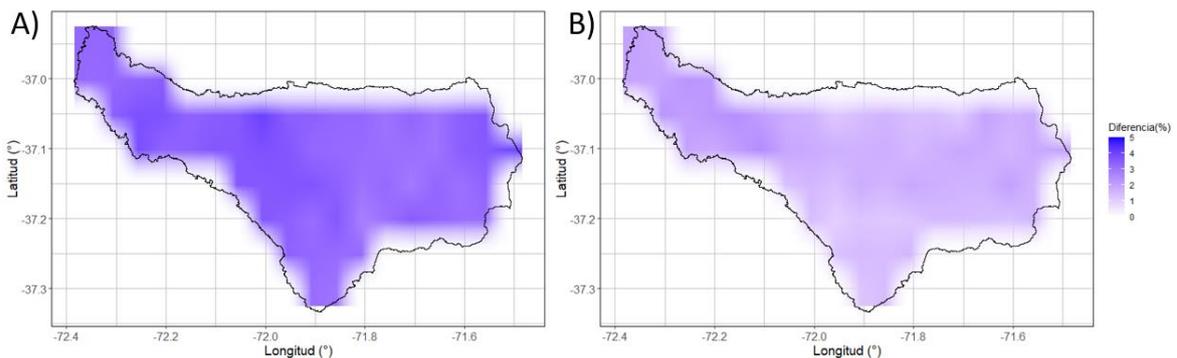


Figura 5.9: Diferencia promedio de precipitación anual entre modelos corregidos y crudos para el periodo futuro cercano (2040-2070) e histórico (1979 – 2005) para los modelos climáticos global (A) y regional (B).

Para el periodo futuro lejano (2071 – 2099), aumentan las diferencias promedio de precipitación anual entre los modelos corregidos y crudos, donde el GCM alcanza diferencias de hasta 8% para las zonas bajas de la cuenca. El RCM también aumenta la diferencia entre las respectivas versiones de los modelos, no obstante, esta diferencia sigue siendo menor a la presentada por el GCM, obteniendo valores de hasta el 5%. Las Figuras respecto a la señal de cambio píxel a píxel entre el futuro lejano y periodo histórico para el GCM y RCM se encuentran presentes en el Apéndice C.

Siguiendo el análisis píxel a píxel, se presenta en la Figura 5.10 y 5.11 los resultados asociados al valor agregado para el GCM y RCM y sus versiones escaladas estadísticamente. En primera instancia, GCM presenta mejoras considerables en las zonas altas de la cuenca las cuales van entre 0.5 a 0.6, cabe destacar que este sector presenta la mayor cantidad de días con precipitación en la cuenca. Por otra parte, para las zonas más bajas de la cuenca se presentan valores entre 0 a 0.3, lo que nos indica que el GCM puede representar bien el

comportamiento de precipitaciones de esta zona de la cuenca, o bien, no se presentan mejoras posterior al escalamiento.

Luego, al observar los resultados obtenidos del valor agregado para el RCM, se tiene una mejora importante en la zona de altura intermedia de la cuenca, alcanzando valores entre los 0.5 a 0.7, mientras que, en las zonas más bajas y altas de la cuenca (o bien, extremos de la cuenca), disminuyen estas mejoras alcanzando valores entre 0.1 y 0.3.

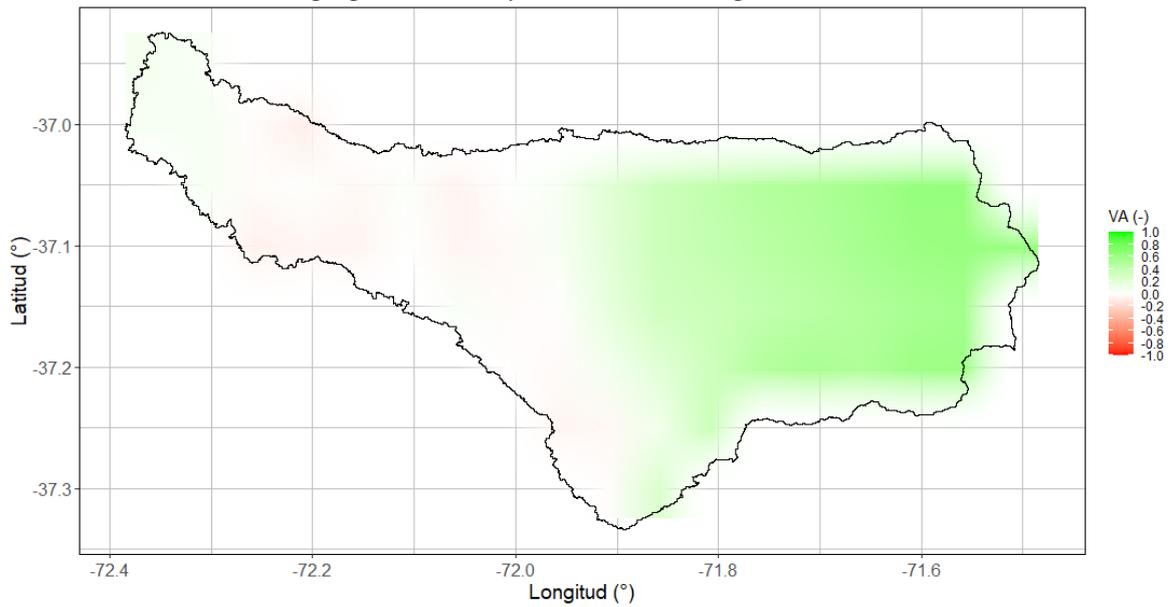


Figura 5.10: Valor agregado de Precipitación para GCM Corregido – GCM Crudo.

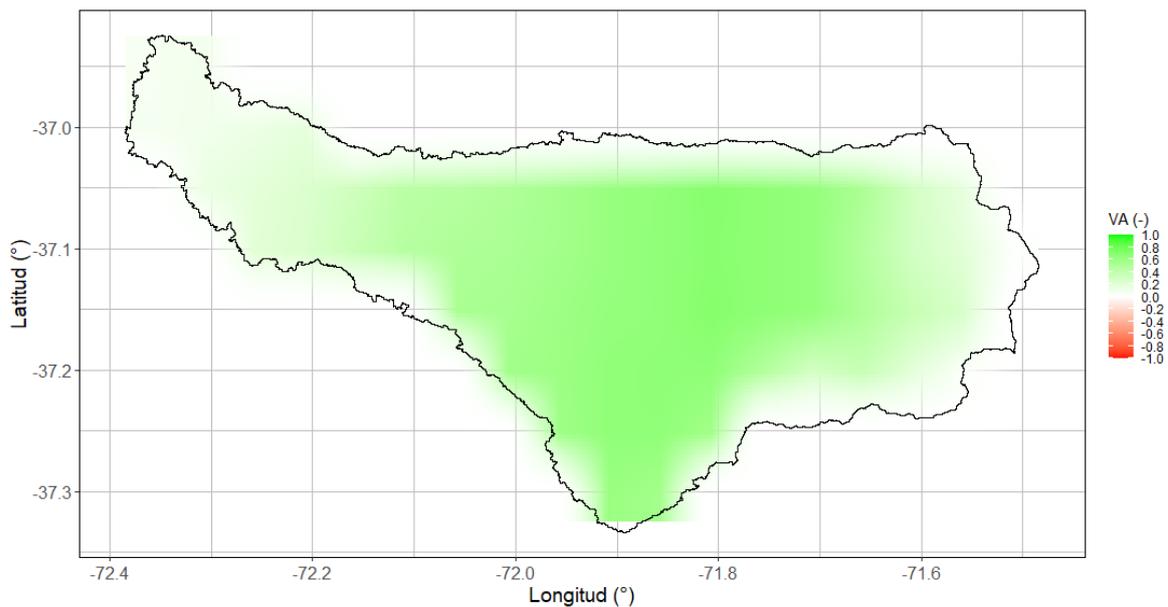


Figura 5.11: Valor agregado de Precipitación para RCM Corregido – RCM Crudo.

Además, se presenta en la figura 5.12 el valor agregado entre los dos modelos sin escalamiento estadístico, es decir, se presenta el valor agregado de un escalamiento dinámico. Como se puede observar, existen mejoras en la zona de mayor altura de la cuenca, cuyo lugar presenta mayor volumen de precipitación y cantidad de días con precipitación líquida y sólida.

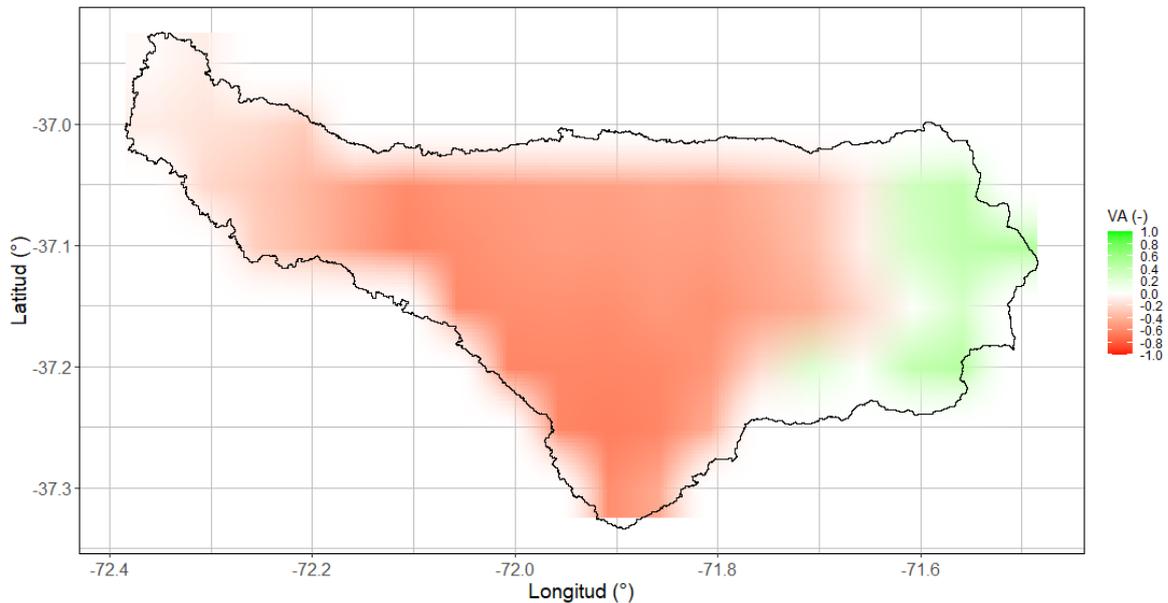
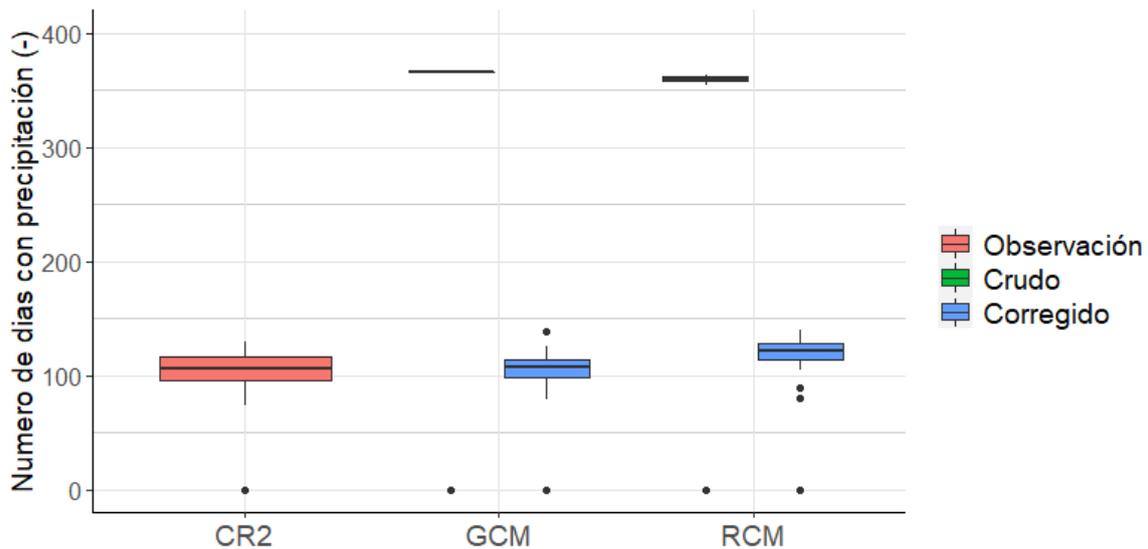


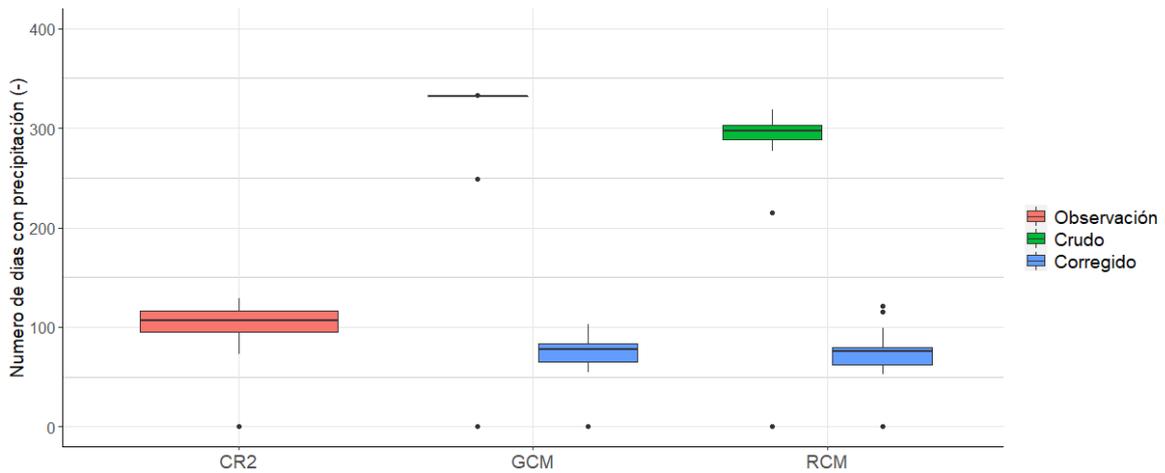
Figura 5.12: Valor agregado de Precipitación para GCM Crudo – RCM Crudo.

Siguiendo con el análisis de precipitación, se presenta en la Figura 5.13 los días con precipitación en el periodo histórico para el producto observado y ambos modelos de estudio en sus versiones cruda y corregida. Como se puede apreciar, ambos modelos en su versión cruda marcan un total de 365 días de precipitación promedio para el periodo histórico, esto dada la naturaleza que presentan los GCM y RCM, dado que registran precipitaciones todos los días pero en su mayoría son con valores de 0.1 mm o mínimamente superior, por otro lado las versiones corregidas nos muestran resultados completamente distintos y bastante más cercanos a la realidad, teniendo una mejor performance los resultados presentados por el GCM, ya que, este muestra una media y variabilidad de precipitación similares al producto observado, mientras que el RCM, como es sabido y fue mencionado anteriormente, presenta una sobreestimación para las precipitaciones, donde se puede ver una media mayor al tercer cuartil del producto observado, además de tener una menor variabilidad.



5.13: Días con precipitación en el periodo histórico 1979 -2005.

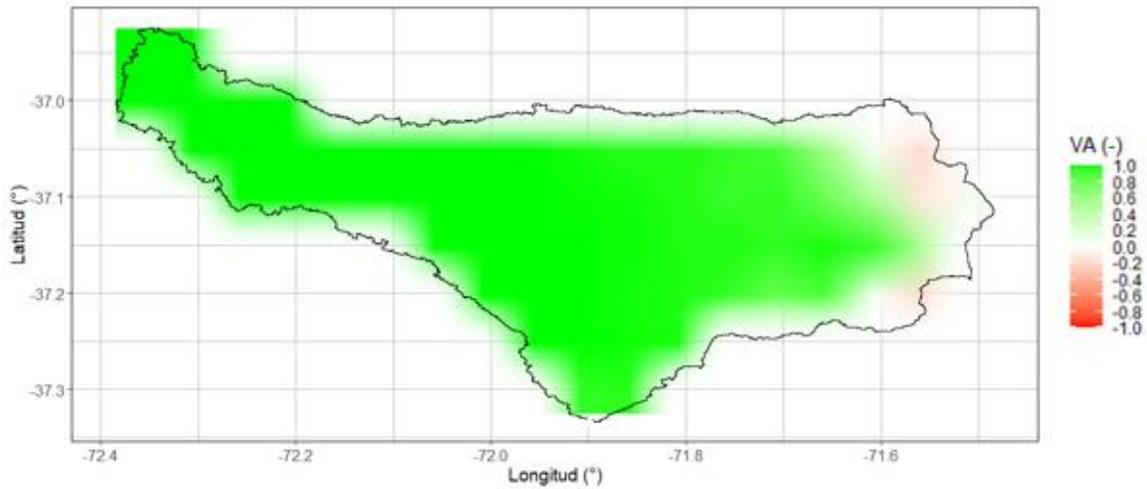
Continuando, en la Figura 5.14 se presentan los resultados de días con precipitación para el periodo considerado como futuro cercano para los modelos en su versión cruda y corregida, comparados con los días con precipitación para el periodo histórico. Similar al caso histórico, en el periodo futuro cercano para los modelos crudos se tiene un registro de 365 días de precipitación. Como se puede apreciar existe una disminución considerable de días con precipitación tanto para el GCM y RCM en sus versiones corregidas, presentando una media bastante similar en ambos casos cercana a los 70 días, mientras que el producto observado tiene su media sobre los 100 días. Por otra parte, para el futuro lejano, tenemos comportamientos diferentes para los modelos, el GCM proyecta una disminución respecto del futuro cercano y además reduce la variabilidad de días para el periodo, teniendo segundo y tercer cuartil muy cercanos a la mediana, aspecto que difiere del futuro cercano. Por otra parte, para el RCM tenemos un aumento de días de precipitación, teniendo por valor del primer cuartil del futuro lejano a la mediana del futuro cercano, no obstante, los valores registrados no superan los 100 días de precipitación para el futuro lejano, siendo entonces aún menor a los días con precipitación del periodo histórico. La Figura que representa el comportamiento de días con precipitación para el futuro lejano se encuentra en el Apéndice “C”.



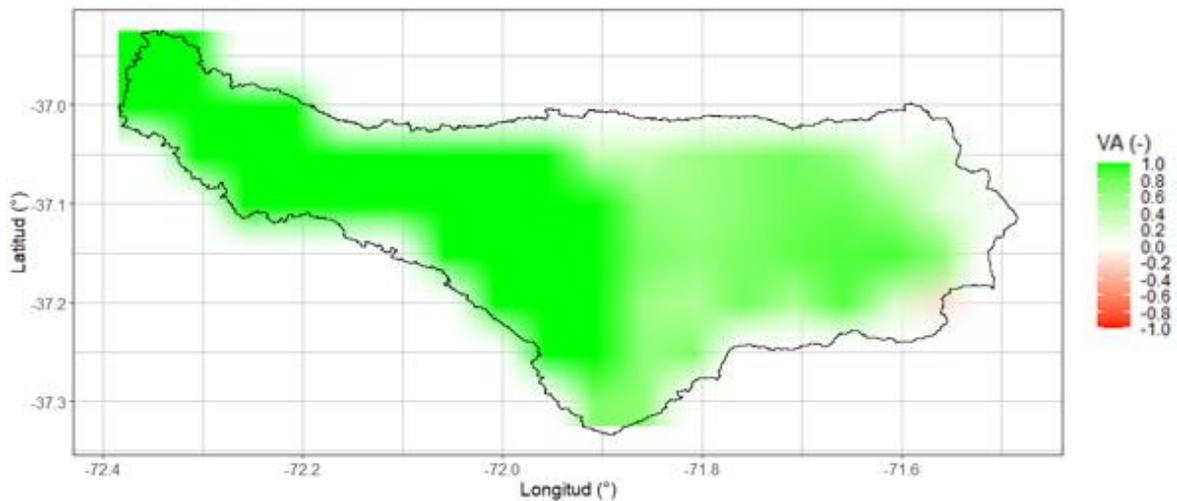
5.14: Días con precipitación en el periodo futuro cercano 2040 -2070.

Para precipitación sólida, se presenta también el valor agregado. En primera instancia, se presenta la Figura 5.15, que muestra el valor agregado del GCM corregido sobre el crudo, donde se ve una completa corrección de las zonas bajas, intermedias e incluso altas de la cuenca, donde la mayoría de los valores presentan un 1 o muy cercano a este, es decir, se logra eliminar la precipitación sólida de los lugares donde el producto observado no registra esta, no obstante, se presentan valores negativos y es justamente en las zonas de la cuenca donde efectivamente se tiene precipitación sólida.

Se presentan los resultados de valor agregado para el RCM en la figura 5.16, donde en la totalidad de la cuenca se evidencian mejoras de los registros posterior al escalamiento estadístico. A partir de la longitud -72.9° los registros de mejora dejan de ser 1 y es que a diferencia del GCM, la corrección del RCM no logra eliminar a cabalidad los días con precipitación sólida para los lugares donde esta no se tiene, no obstante, para el sector de alta montaña de la cuenca, donde efectivamente si se tiene precipitación sólida se logra apreciar una mejora. Para los resultados de valor agregado, también se realizó la comparación de los modelos en su versión cruda, donde se ve que el RCM corrige en su totalidad los sectores donde no se presentan registros de precipitación sólida, mientras que para el sector donde sí se tiene, el registro empeora, es decir, el RCM sobreestima la cantidad de días con precipitación sólida. La figura que presenta los resultados de la comparación mencionada se adjunta en el Anexo C.



5.15: Valor agregado de días con precipitación sólida para GCM Corregido – GCM Crudo.



5.16: Valor agregado de días con precipitación sólida para RCM Corregido – RCM Crudo.

5.2 Modelación hidrológica

5.2.1 Calibración y Validación

El modelo HBV se calibra y valida en la cuenca de estudio para las dos funciones objetivo, mencionadas en metodología, donde se decide la utilización de los resultados obtenidos por la función NSE. Los parámetros y métricas de diagnóstico son presentados en el Anexo D.

En la Figura 5.17 se observan las series diarias observadas y simuladas para la cuenca río Itata en General Cruz. Para el periodo de calibración se obtiene un ajuste para los índices KGE y NSE sobre 0.8, los cuales disminuyen en el periodo de validación a 0.6 y 0.56 respectivamente.

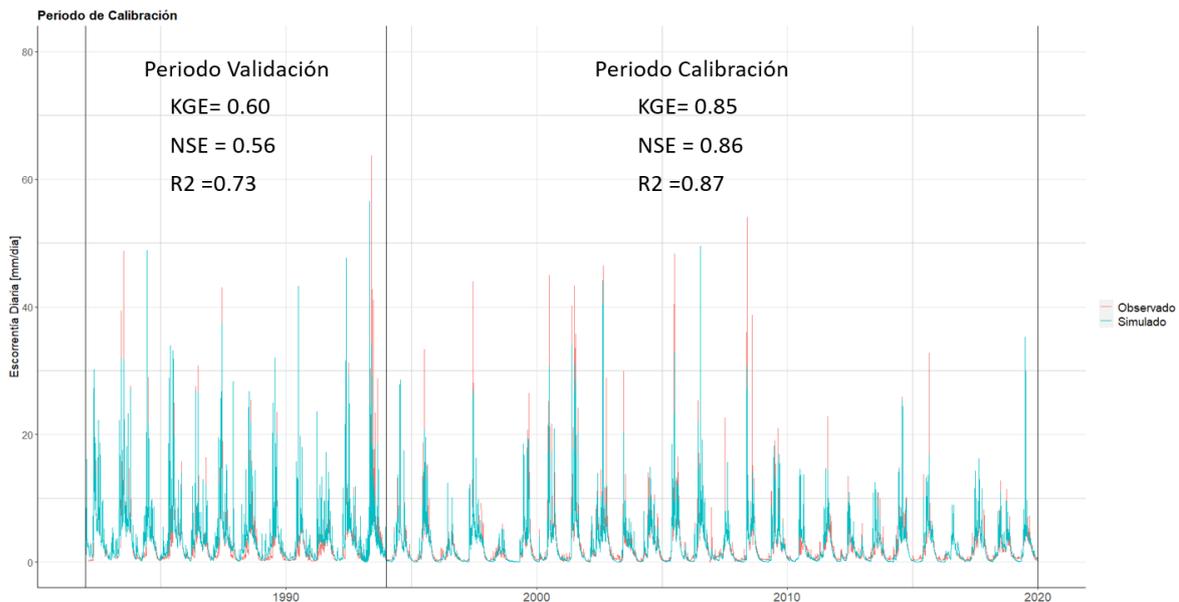


Figura 5.17: Serie de Escorrentía media diaria observada y simulada en los periodos de calibración y validación.

En la Figura 5.18 se presenta la curva de duración para el periodo de calibración y validación para las escorrentías simuladas con la función objetivo NSE y KGE. Ambas simulaciones se tienen comportamientos similares tanto en el periodo de calibración como validación. Para el periodo de calibración se puede observar la dificultad del modelo para reproducir las bajas escorrentías, presentando sesgos de -24% y -19% en el índice BiasFLV para la función objetivo KGE y NSE respectivamente, mientras que, para escorrentías medias y altas, el modelo presenta un buen desempeño, obteniendo sesgos inferiores al 15%. Por otro lado, para el periodo de validación se puede apreciar que el modelo presenta dificultades para reproducir las escorrentías medias y bajas, sobreestimando su comportamiento. Para las escorrentías de baja probabilidad de excedencia en el periodo de validación se tiene un desempeño similar al presentado en calibración, siendo estas escorrentías las mejor reproducidas a modo general por el modelo. En la Tabla 5.1, se presentan los coeficientes de desempeño para las diferentes clasificaciones de escorrentía según las funciones objetivo utilizadas.

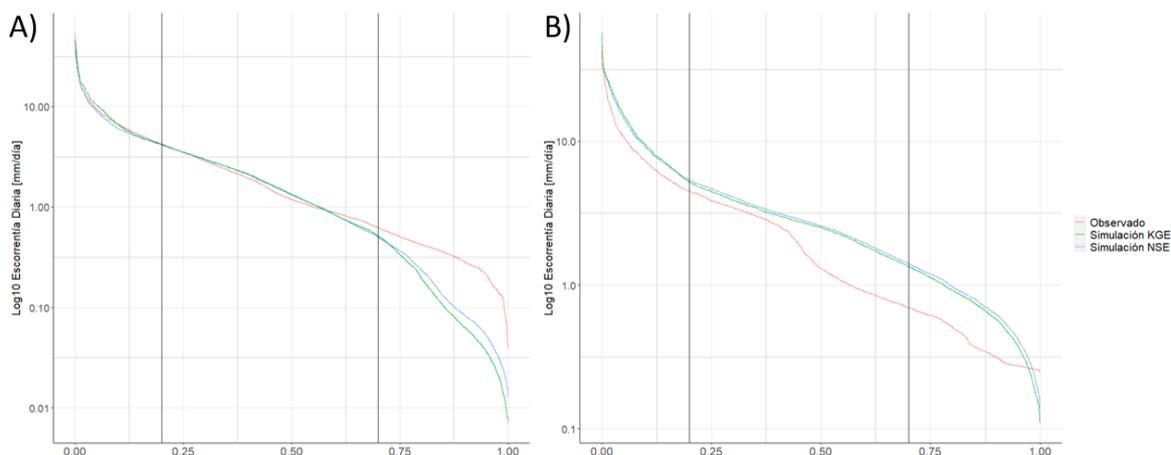


Figura 5.18: Curva de duración observada y simulada en el periodo de calibración (A) y validación(B).

Tabla 5.1: Resultados de medidas de evaluación.

		BiasFMS	BiasFHV	BiasFLV	BiasFMM
Calibración	KGE	-0.09	-3.31	-24.04	13.57
	NSE	0.1	-14.38	-19.11	11.46
Validación	KGE	-0.27	25.40	11.71	92.29
	NSE	-0.28	22.23	13.68	96.49

Para la curva de variación estacional (Figura 5.19) se logra reproducir el comportamiento pluvial de la cuenca, no obstante, tanto para el periodo de calibración como validación el modelo sobreestima la escorrentía en los meses de crecidas, teniendo una diferencia aproximada de hasta 100 [mm/mes] en el mes de Junio para el periodo de validación.

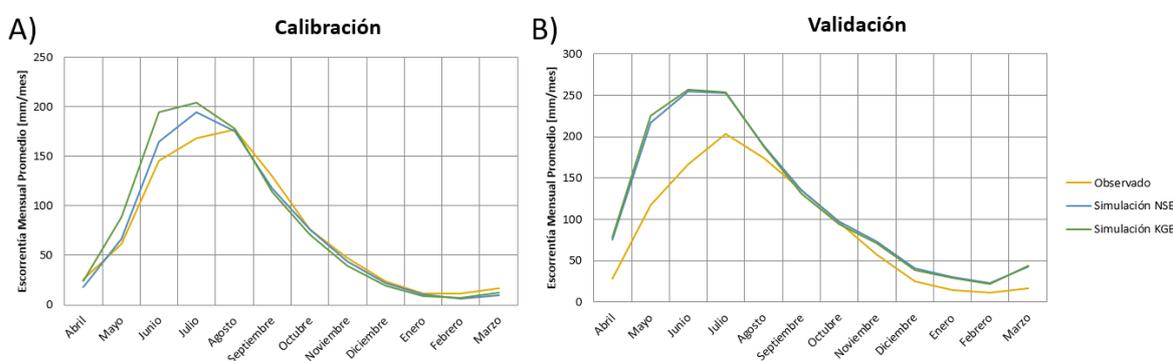


Figura 5.19: Curva de Variación Estacional observada y simulada en el periodo de calibración y validación.

5.2.2 Proyecciones de cambio hidrológico

En la Figura 5.20 se presenta el ciclo anual promedio de escorrentía para el periodo 1981 – 2005 para el resultado obtenido al utilizar las forzantes meteorológicas corregidas en comparación a lo observado. Como se puede observar, los modelos tanto global como regional, no logran reproducir el volumen de escorrentía promedio para casi la totalidad del año a excepción de algunos días del mes entre Julio y Agosto (Días Julianos entre 200 y 230), el déficit de escorrentía es del 30% para el promedio diario anual tanto para el GCM como RCM. Al evaluar con estadísticos se tienen resultados iguales para ambos modelos, tanto para KGE como NSE, obteniendo 0.68 en cada uno.

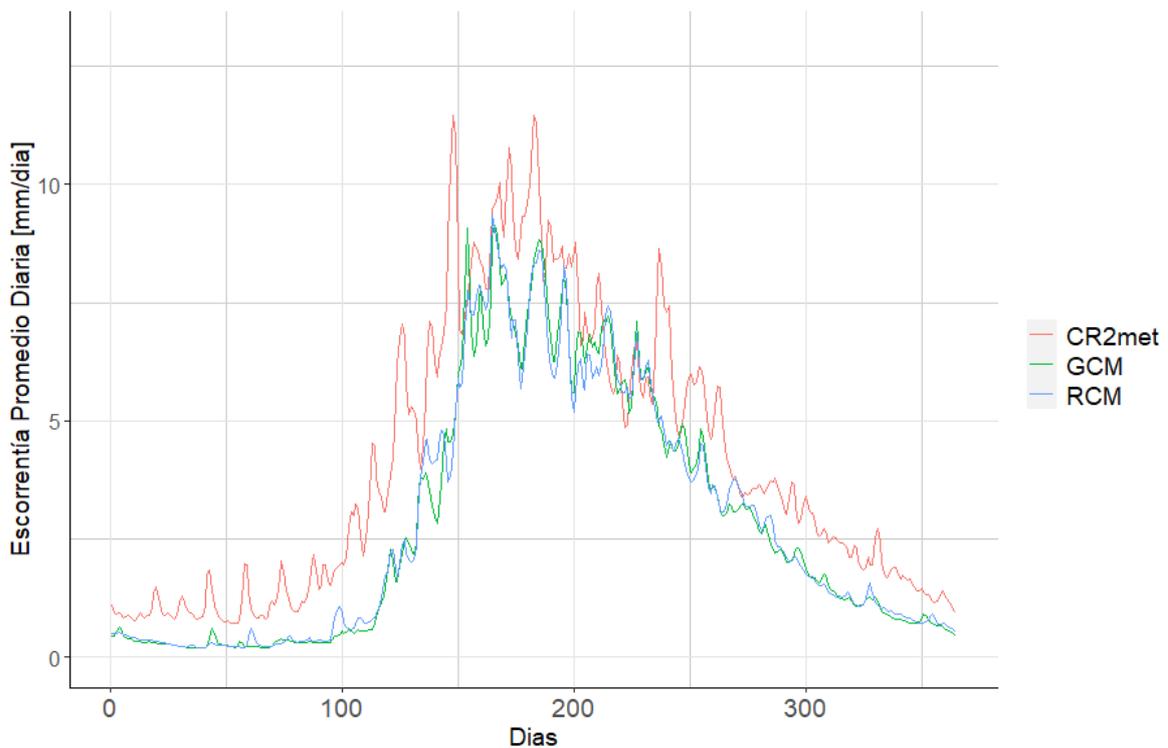


Figura 5.20: Ciclo anual promedio de escorrentía periodo 1981 – 2005.

Siguiendo con el análisis del comportamiento histórico es que se aplica el valor agregado a las métricas de diagnóstico del modelo hidrológico como lo son la curva de duración (Figura 5.21) y la curva de variación estacional (Figura 5.22) para así comparar el rendimiento de los modelos global y regional.

Como se observa en la Figura 5.21, el RCM muestra mejoras de rendimiento sobre el GCM para las escorrentías comprendidas entre los tramos 1%-10% y 26%-49% de probabilidad

de excedencia, sin embargo, estas rondan entre un coeficiente 0.01 y 0.25, donde escasamente sobrepasa el valor 0.3, además se puede notar que entre el 0.1% y 50% existen intervalos de mejora y empeoramiento de los resultados obtenidos, por lo que no se considera claro ni determinante el comportamiento. Por otra parte, podemos ver que la escorrentía sobre el 50% de probabilidades no presente mejora alguna por el RCM, evidenciando la dificultad que tiene para representar la escorrentía base de la cuenca.

Para el valor agregado en la curva de variación estacional, vemos que 9 de 12 meses presentan una mejora las que en su mayoría rondan entre 0.1 y 0.2 y no sobrepasan los 2.5, en contra parte, se observa que para el mes de Julio empeora la muestra obteniendo un valor cercano a -0.5, mes que en particular es el que registra las crecidas más grandes de la cuenca.

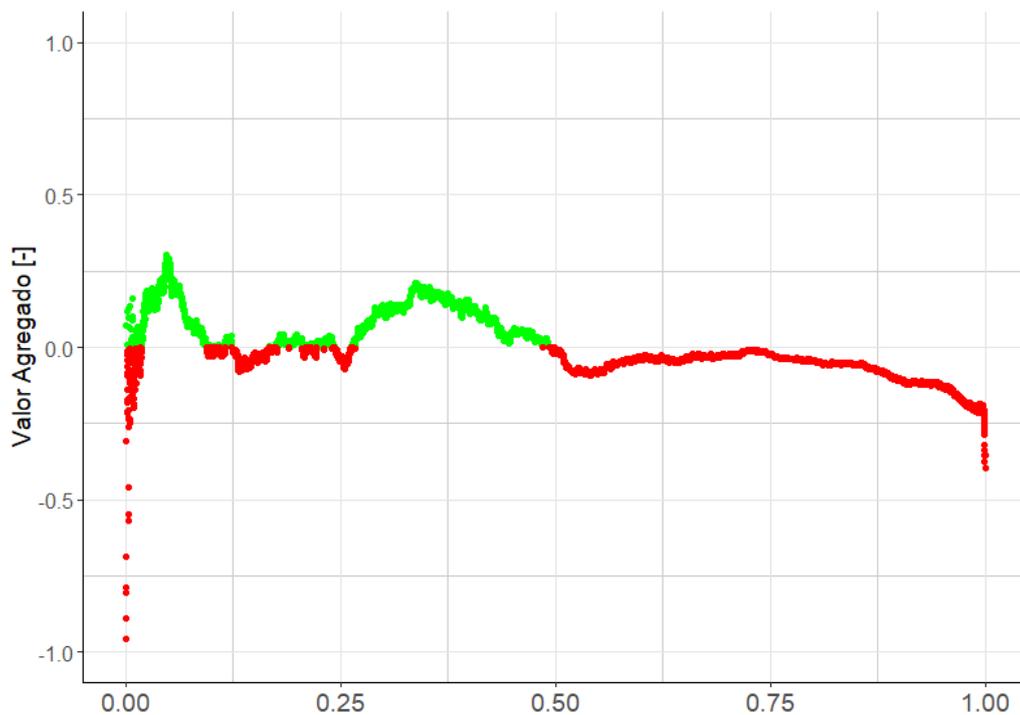


Figura 5.21: Valor agregado en Curva de Duración RCM – GCM Corregidos.

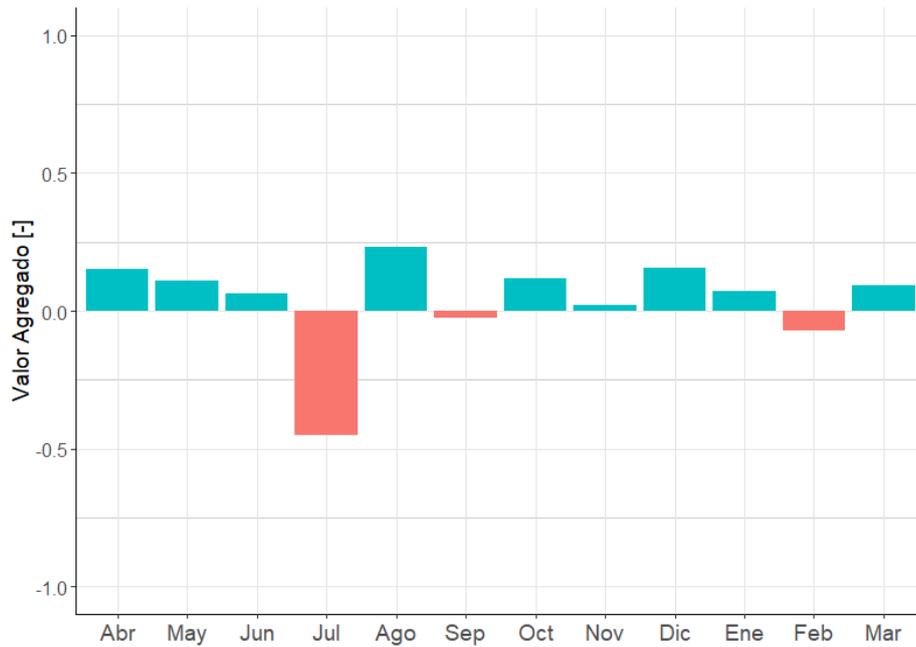


Figura 5.22: Valor agregado en Curva de variación estacional RCM – GCM Corregidos.

Por otro lado, se presenta en la Figura 5.23 y 5.24 los resultados obtenidos de escorrentía promedio diaria para los periodos futuro cercano y lejano de los modelos GCM y RCM, comparados a los resultados obtenidos en el periodo histórico de ambos. En primera instancia, para el GCM se aprecia una disminución de la escorrentía para ambos periodos futuros, principalmente para el inicio de la temporada de invierno, retrasando el peak de crecida en aproximadamente un mes, el cual equipara a los valores presentes en el periodo histórico, luego, comparando entre futuro cercano y lejano, se tiene una vez más una disminución de la escorrentía promedio equivalente a un 10% , la cual se evidencia en la Tabla 5.6, donde se presentan la escorrentía media anual.

El RCM proyecta aumentos en la escorrentía promedio diaria tanto para futuro cercano como lejano. Al observar el comportamiento de la escorrentía promedio diaria del RCM en el futuro cercano, vemos un comportamiento similar al observado en el GCM, es decir, una disminución de la escorrentía en los primeros meses invernales, sin embargo, la escorrentía aumenta al finalizar el invierno y comenzar la temporada primaveral, generando un balance de aumento del 0.3% aproximadamente al calcular el valor promedio diario anual de escorrentía. Finalmente, también se puede observar que el futuro lejano aumenta su escorrentía promedio diaria con respecto al futuro cercano en un 8%, este crecimiento se visualiza principalmente para los primeros meses de invierno, equiparándose a los registros históricos.

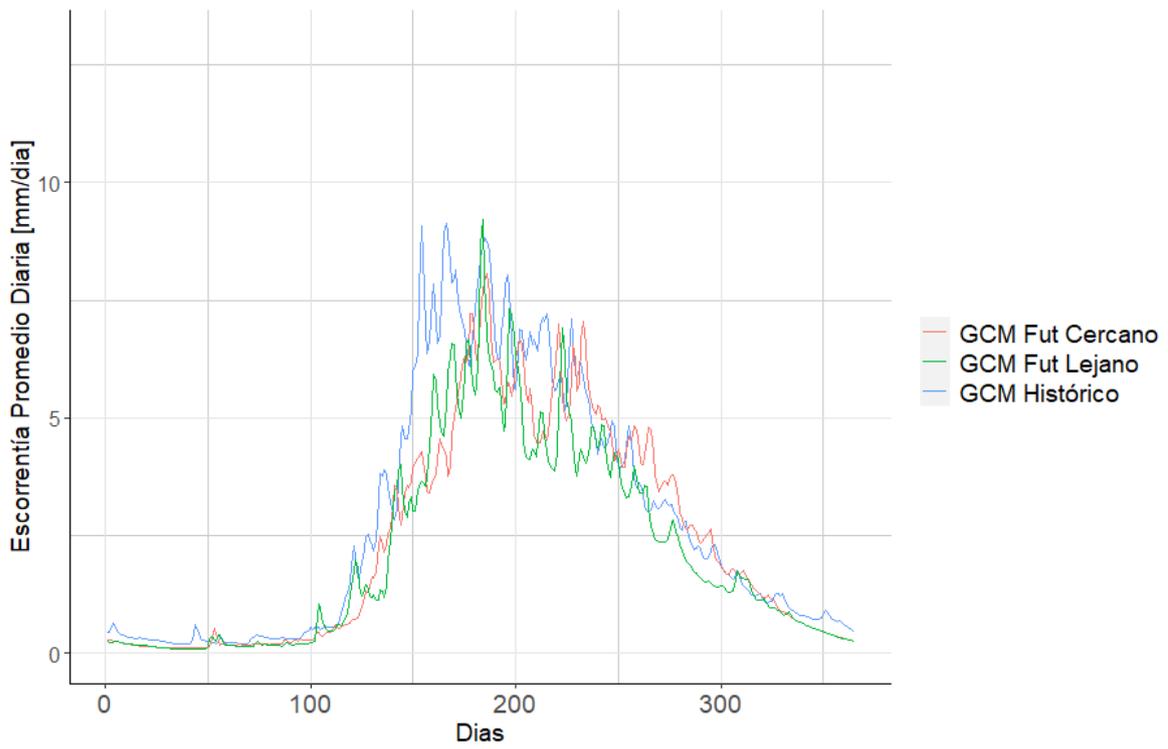


Figura 5.23: ciclo anual promedio de escorrentía para GCM en los periodos histórico, futuro cercano y lejano.

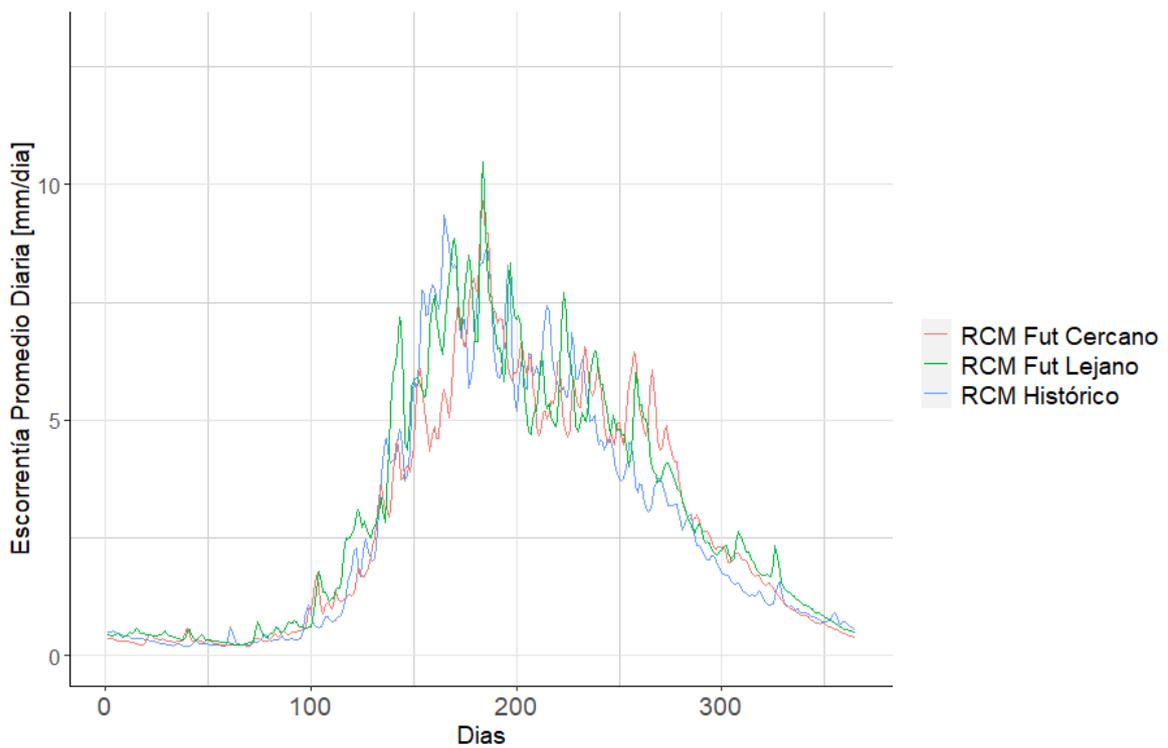


Figura 5.24: ciclo anual promedio de escorrentía para RCM en los periodos histórico, futuro cercano y lejano.

Finalmente, también podemos ver en la Tabla 5.2 los centros de gravedad de la escorrentía promedio diaria, tanto para el producto diario como los modelos en estudio. Para el periodo histórico era esperable el desplazamiento del centro de gravedad, dado que, los modelos no logran reproducir el peak de escorrentía en el momento del año que corresponde según el producto observado, generando un retraso de 9 días en la llegada de este. Para el futuro cercano, tanto el GCM como RCM presentan un retraso del centro de gravedad de 10 y 6 días respectivamente, mientras que para el futuro lejano tenemos un adelanto del centro de gravedad respecto del futuro cercano.

Tabla 5.2: Centro de Gravedad y Escorrentía media diaria anual para el producto observado y los modelos en estudio para los diferentes periodos.

	Centro de Gravedad [día]			Escorrentía media diaria anual [mm/día]		
	Histórico	Futuro Cercano	Futuro Lejano	Histórico	Futuro Cercano	Futuro Lejano
CR2Met	195	x	x	4.01	x	x
GCM	204	214	209	2.79	2.38	2.15
RCM	204	210	205	2.81	2.82	3.06

6 DISCUSIONES

6.1 Forzantes meteorológicas

6.1.1 Temperatura

Las proyecciones de temperatura obtenidas luego del escalamiento del GCM y RCM muestran un aumento de 1.8°C y 1.2°C respectivamente para el futuro cercano, mientras que para el futuro lejano se tienen aumentos de hasta 2.7°C y 1.7°C para el GCM y RCM, coincidiendo y siendo congruentes con los resultados obtenidos por los estudios realizados por Rojas (2012) y Dionizis et al., 2021.

Al ver las Figuras 5.4 y 5.6 podemos notar que el comportamiento del valor agregado tanto del escalamiento estadístico como del escalamiento dinámico es bastante similar, obteniendo en su mayoría coeficientes que van desde los 0.8, dejando en evidencia lo que Bozkurt et al. 2019 nos presenta en su estudio, es decir, la habilidad que tiene este RCM para simular la variabilidad espacial de la temperatura media anual, el cual además se corrobora al observar la Figura 5.5, donde la mejora que presenta el RCM luego del escalamiento estadístico no es tan significativa como la presente en el GCM. Dado esto, es que, considerar las particularidades que presenta la zona de estudio es relevante para modelar de manera correcta la climatología, dando un peso importante a las proyecciones presentadas por el RCM.

6.1.2 Precipitación

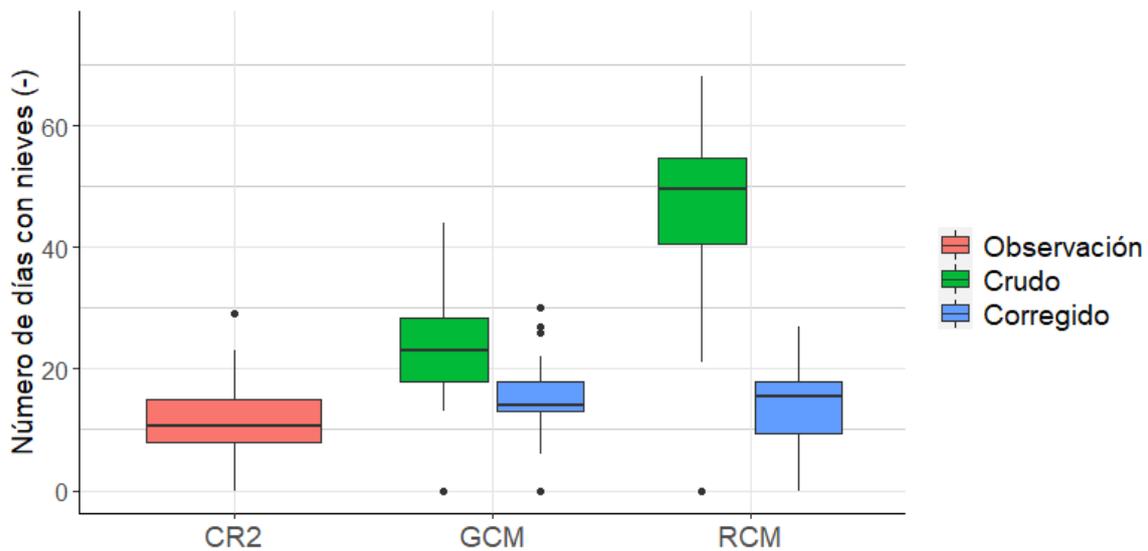
Los proyecciones presentadas por el GCM y RCM luego de realizar el escalamiento estadístico difieren en cuanto a fenómeno de ocurrencia, obteniendo una disminución del 12% en la precipitación media anual para el GCM, mientras que el RCM mantiene el volumen presentado en el periodo histórico, siendo este último congruente con el estudio realizado por el Centro De Ciencia del Clima y Resiliencia ((CR)², 2018), el cual nos habla de un aumento o mantención de los montos anuales de precipitación para la zona cordillerana centro sur de Chile.

Es importante señalar que, el RCM en su versión sin escalamiento estadístico sobreestimó las precipitaciones, comportamiento que se debe a la topografía compleja que presenta la cuenca, similar a los casos estudiados por Rojas (2012).

Las figuras 5.10 Y 5.12 presentan el valor agregado de un escalamiento estadístico y escalamiento dinámico respectivamente, el cual presenta una diferencia de comportamiento,

siendo el primero de estos el que realiza un mejor desempeño a la hora de corregir el modelo climático global, mientras que el RCM por si solo, logra representar de mejor manera la precipitación de las zonas altas de la cuenca, empeorando las muestras para el resto de la cuenca asociado a la topografía variada de la cuenca (Rojas, 2012). No obstante, es importante señalar que la zona de alta montaña de la cuenca es el sector que presenta mayor precipitación media anual y considerando que es una cuenca pluvial, i.e., la precipitación toma un rol fundamental en la esorrentía, es importante una buena modelación de estas, por lo que, el RCM como tal, produce un valor agregado sustancial a pesar de contar con una topografía compleja (Torma et al., 2015). El RCM escalado estadísticamente presenta un mayor volumen de mejora con respecto al GCM, inclusive mejorando las zonas de alta montaña, que, como se señaló anteriormente, ya mostraba un mejor desempeño que el GCM.

La importancia de una buena representación de precipitación de las zonas de alta montaña reside en la capacidad que tendrá este en reproducir el comportamiento de precipitación sólida, ya que, es en esta zona de la cuenca donde se registran estos eventos. Esto se puede observar en la Figura 6.1, donde el RCM escalado estadísticamente si bien sobreestima los días con precipitación sólida en el periodo histórico, a este pareciera importarles la variabilidad que presenta, similar a la presentada por el producto observado del CR2MET. De igual manera, esto se aprecia en la Figura 5.16 donde se presenta el valor agregado de precipitación sólida del RCM escalado estadísticamente, donde se infiere que al considerar las características de la zona se logra un mejor desempeño, corrigiendo y logrando representar el comportamiento del fenómeno.



6.1: Días con precipitación sólida en el periodo histórico 1979 -2005.

6.2 Modelación hidrológica

Con los resultados observados en la figura 5.19, tenemos una correcta representación de la curva de variación estacional para el periodo de calibración (figura 5.19A), sin embargo para el periodo de validación (Figura 5.19B) se observa una clara sobreestimación de escorrentía, la que se justifica al utilizar como periodo de calibración una ventana de tiempo que considera el periodo de 10 años mega sequía existente en Chile (DGA, 2017), donde las precipitaciones disminuyeron entre un 5% y 10%, y dada la naturaleza de la cuenca, es decir, de régimen pluvial, se puede prever que en periodos con mayor precipitación como lo es el periodo de validación exista una sobreestimación de mayor magnitud como lo es el presente caso.

Por otra parte, al igual del estudio realizado por Dionizis et al., 2021, la presente modelación logra reproducir el comportamiento de las curvas de duración de escorrentía media diaria y las curvas de variación estacional y además, tanto el resultado producido por las variables del GCM como RCM escalados, presentan un retraso del centro de gravedad de 9 días, considerando este un valor razonable para las diferencias presentadas según calibración y validación del modelo, es decir, este logra representar la estacionalidad del hidrograma.

Finalmente, los resultados de escorrentía para los periodos futuros cercano y lejano son congruentes a las variables entregadas al modelo, es decir, para el GCM se presentan

disminuciones de precipitaciones en ambos periodos, lo que por consecuencia tiene por resultado la disminución de escorrentía, caso similar al RCM, donde se tiene un aumento de precipitación, por ende, presenta un aumento de escorrentía. Esto toma total sentido al considerar que la cuenca es de régimen pluvial.

Es importante señalar que no se presentan los días con precipitación sólida en los futuros cercano y lejano, ya que, estos arrojaron por resultado la totalidad de 0 días de ocurrencia. Si bien, es un resultado alarmante, este no determina el hecho de que esto suceda efectivamente, ya que, el estudio se realizó mediante la utilización de la serie temperatura promedio diaria y como fue dicho en el apartado de descripción de la zona de estudio, esta cuenca presenta grandes variaciones de temperatura entre el día y la noche por lo que no se descarta la existencia de precipitación sólida.

Finalmente, el modelo hidrológico presentado logra una correcta representación de la escorrentía media diarias máximas y medias según Yilmaz et al., (2008), además, destaca que el RCM reproduce de mejor manera dichas escorrentías que el GCM, presentando valor agregado específicamente en las escorrentías comprendidas entre el 1%-10% y 26%-49% de probabilidad de excedencia. De igual manera, el RCM logra representar de mejor manera la curva de variación estacional.

7 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de escalar estadísticamente un GCM y RCM, y posterior utilización de forzantes meteorológicas para construir un modelo hidrológico, se puede concluir que:

1. El RCM y GCM escalados proyectan bajo el escenario RCP 8.5, un aumento en la temperatura de 1.2°C y 1.8°C respectivamente, afectando directamente a la ocurrencia de precipitación sólida. Dadas las características de la zona y a que se trabajó con temperatura media diaria, es que, no se proyectan días con precipitación sólida, fenómeno que puede afectar la hidrología de la cuenca a pesar de ser de régimen pluvial. Dado el buen desempeño que tiene el RCM en su versión sin escalamiento para representar la temperatura media mensual promedio en el periodo histórico es que, se hace importante considerar las características locales de la zona, con tal de lograr proyectar de forma correcta el comportamiento de esta variable meteorológica.
2. El RCM en su versión cruda logra representar de mejor manera los montos de precipitación acumulada mensual promedio para las zonas de alta montaña, lugar que tiene mayor volumen de precipitación en la cuenca, fenómeno que se puede destacar al ver el valor agregado del RCM sobre el GCM ambos sin escalamiento. Mas importante aún, es que la versión corregida del RCM, mejora considerablemente la versión cruda, destacando mejoras también en el sector de alta montaña, logrando equiparar la variabilidad de días con precipitación sólida y líquida de la cuenca. Finalmente, el RCM proyecta un aumento del 8% de precipitación promedio anual, resultado completamente opuesto a la disminución proyectada por el GCM.
3. El modelo hidrológico HBV se ajusta de manera satisfactoria con índices de NSE y KGE sobre 0.56 para la cuenca de estudio tanto para el periodo de calibración como de validación para la serie diaria de escorrentía. El modelo se destaca al reproducir las escorrentías diarias máximas presentes en la cuenca, lo cual puede ser útil para un estudio de crecidas extremas. Sin embargo, presenta dificultad para reproducir las escorrentías medias y bajas de la cuenca, obteniendo un sesgo negativo del 20% para el periodo de calibración en el índice BiasFLV y un sesgo positivo de 22% en el índice BiasFHV para el periodo de validación.
4. La utilización de forzantes meteorológicas escaladas de un RCM aporta valor en el modelo hidrológico para caudales que tengan una probabilidad de excedencia menor al 50%, i.e., para caudales de gran magnitud, lo que refuerza la idea de utilizar esta metodología para estudios de eventos de crecidas extremas. Además, aporta valor para la curva de variación de la cuenca, presentando mejores en 9 de los 12 meses, dejando entrever que la utilización de un modelo regional que considere las particularidades de la zona de estudio sumado a un escalamiento dinámico aporta valor a niveles generales de estudio.
5. Las proyecciones de caudal presentadas por el GCM y RCM, son consecuentes con el comportamiento de la forzante meteorológica de precipitación, lo que cobra total sentido al recordar que la cuenca de estudio es de régimen pluvial, por ende, los resultados obtenidos para el GCM nos muestran una disminución del caudal, mientras que, el RCM proyecta aumentos de caudal. El porcentaje de disminución y

aumento es similar al obtenido para la precipitación en los respectivos periodos de estudio.

Finalmente, los resultados obtenidos concuerdan con los estudios previos de proyecciones de cambio climático, tanto para los obtenidos por el GCM como RCM, reafirmando el aumento de temperatura de la zona y la diferencia de comportamiento según los modelos para la precipitación. También se logra representar de manera correcta el comportamiento pluvial de la cuenca y su estacionalidad. Además, se destaca la utilización de un RCM escalado estadísticamente por sobre la utilización de un GCM escalado, aportando valor de manera transversal en todas las áreas de estudio abarcadas en la memoria, es por esto que, resulta importante el considerar la información local en las zonas de estudio para obtener resultados que puedan modelar de manera correcta lo ocurrido en periodos históricos y generar proyecciones más certeras, considerando la clara existencia de la incertidumbre de los diversos escenarios.

8 BIBLIOGRAFÍA

- (CR)², 2018. Guía de referencia para la plataforma de visualización de simulaciones climáticas, Proyecto “Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad” 2.
- Benavides, H., León, G., 2007. GASES DE EFECTO INVERNADERO Related papers. *Academia* 08, 35–47.
- Boisier, J.P., Rondanelli, R., Garreaud, R.D., Muñoz, F., 2016. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophys. Res. Lett.* 43, 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Garreaud, R., Gallardo, L., 2019. Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest South America: present climate conditions and added value analysis. *Clim. Dyn.* 53, 6745–6767. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04959-y>
- Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B., 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra 10. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.04.002>
- Cannon, A.J., 2018. Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Clim. Dyn.* 50, 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q., 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J. Clim.* 28, 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- DGA, 2017. Actualización del Balance Hídrico Nacional. SIT N° 417, Minist. Obras Públicas, Dir. Gen. Aguas, Div. Estud. y Planif. Santiago, Chile, Realiz. por Univ. Chile Pontif. Univ. Católica Chile SIT N° 417, 378.
- Di Luca, A., de Elía, R., Laprise, R., 2012. Potential for added value in precipitation simulated by high-resolution nested Regional Climate Models and observations. *Clim. Dyn.* 38, 1229–1247. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1068-3>
- Dionizis, D., Ojeda, P., Quezada, S., Miguel, L., Monserrat, S., 2021. Implicancias de la elección del método de escalamiento estadístico de modelos de circulación general en proyecciones de cambio hidrológico. 1.

- Dosio, A., Panitz, H.J., Schubert-Frisius, M., Lüthi, D., 2015. Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: evaluation over the present climate and analysis of the added value. *Clim. Dyn.* 44, 2637–2661. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2262-x>
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D., 2020. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40, 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Guo, D., Westra, S., Maier, H.R., 2016. An R package for modelling actual, potential and reference evapotranspiration. *Environ. Model. Softw.* 78, 216–224. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2015.12.019>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- IPCC, 2014. Informe Del Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre El Cambio Climático, Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Pitié, F., Kokaram, A.C., Dahyot, R., 2007. Automated colour grading using colour distribution transfer. *Comput. Vis. Image Underst.* 107, 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2006.11.011>
- Rojas, M., 2012. Consultoría para la elaboración de un estudio sobre estado del arte de modelos para la investigación del calentamiento global. Gobierno de Chile. PNUD Chile. MAPS Chile.
- Seibert, J., 2005. HBV light. HBV Light version 2 User's Man.
- Torma, C., Giorgi, F., Coppola, E., 2015. Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain-precipitation over the alps. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/175238c0>
- Yilmaz, K.K., Gupta, H. V., Wagener, T., 2008. A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resour. Res.* 44, 1–18. <https://doi.org/10.1029/2007WR006716>

9 ANEXOS

ANEXO A. Régimen cuenca Río Itata en General Cruz.

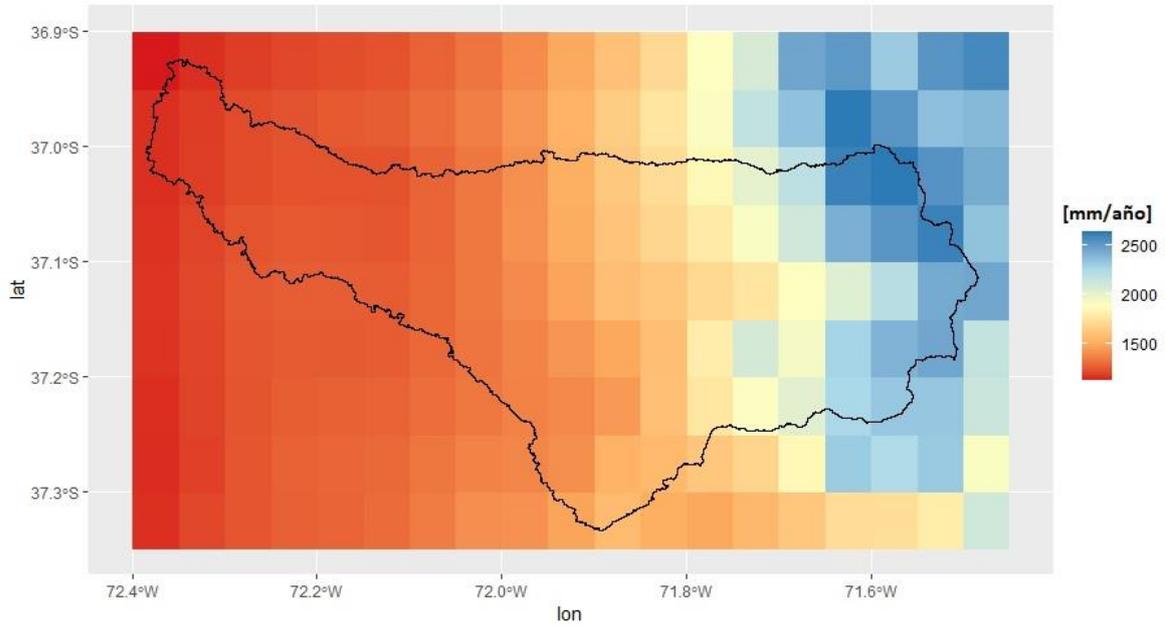


Figura A.1: Precipitación media anual periodo (1979-2019).

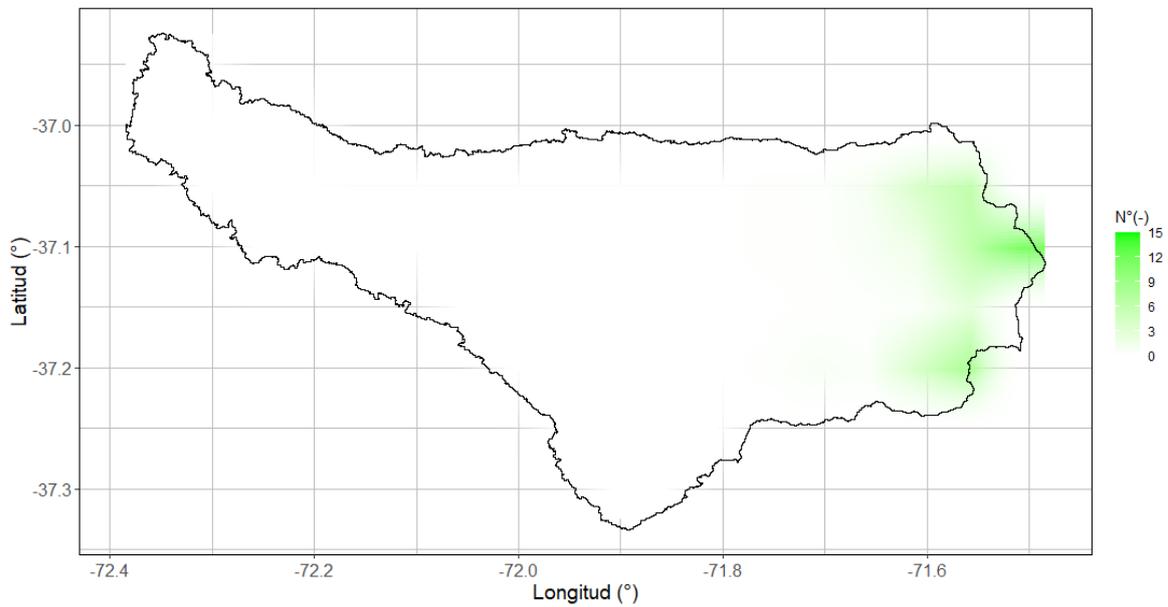


Figura A.2: Número de días promedio con precipitación sólida para el periodo 1979 – 2005.

Tabla A.1: Altura promedio de URH's de la zona de estudio.

URH	Altura [m.s.n.m]
1	136
2	188
3	257
4	324
5	406
6	522
7	678
8	902
9	1190
10	1600

ANEXO B. Forzante meteorológica: Temperatura.

Tabla B.1: Temperatura Media Mensual Promedio en el periodo futuro cercano 2040-2070 para los modelos global y regional.

Mes	GCM Crudo [°C]	GCM Corregido [°C]	RCM Crudo [°C]	RCM Corregido [°C]
Abril	11.22	12.29	12.05	11.91
Mayo	7.58	9.49	9.40	9.44
Junio	5.78	7.79	7.95	7.78
Julio	5.43	8.12	7.68	8.20
Agosto	5.57	8.76	7.62	8.62
Septiembre	6.42	9.68	8.21	9.47
Octubre	8.61	11.84	9.80	11.09
Noviembre	11.34	13.84	12.68	12.57
Diciembre	14.13	16.82	16.34	15.81
Enero	16.35	18.91	18.02	17.74
Febrero	16.99	19.08	17.34	17.91
Marzo	15.11	16.42	15.02	15.13

Tabla B.2: Señal de cambio de temperatura media mensual promedio entre los modelos global y regional en el periodo futuro cercano respecto a sus respectivos modelos en su versión corregida en el periodo histórico.

Mes	Delta GCM Crudo [°C]	Delta GCM Corregido [°C]	Delta RCM Crudo [°C]	Delta RCM Corregido [°C]
Abril	0.14	1.21	0.97	0.83
Mayo	-0.73	1.19	1.10	1.14
Junio	-0.71	1.30	1.46	1.29
Julio	-0.74	1.95	1.51	2.03
Agosto	-1.45	1.75	0.60	1.61
Septiembre	-1.91	1.35	-0.11	1.14
Octubre	-1.65	1.58	-0.47	0.83
Noviembre	-0.99	1.51	0.35	0.25
Diciembre	-0.50	2.19	1.71	1.18
Enero	0.33	2.89	2.00	1.72
Febrero	0.94	3.03	1.29	1.86
Marzo	0.70	2.00	0.61	0.72

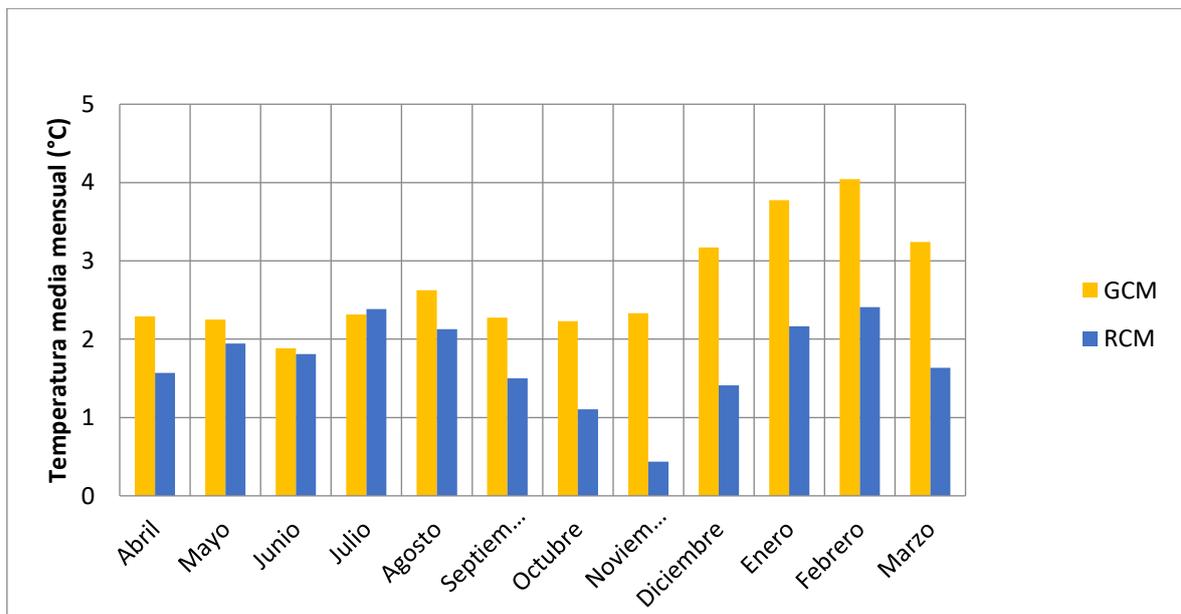


Figura B.1: Temperatura media mensual promedio en el periodo futuro lejano 2071-2099 de los modelos global y regional, comparado al producto grillado CR2Met en el periodo histórico 1979-2005.

Tabla B.3: Temperatura Media Mensual Promedio en el periodo futuro lejano 2071-2099 para los modelos global y regional.

Meses	GCM Crudo [°C]	GCM Corregido [°C]	RCM Crudo [°C]	RCM Corregido [°C]
Abril	12.67	13.38	12.95	12.66
Mayo	8.93	10.56	10.39	10.25
Junio	6.53	8.37	8.48	8.30
Julio	5.93	8.50	8.15	8.56
Agosto	6.52	9.64	8.25	9.15
Septiembre	7.48	10.60	8.70	9.83
Octubre	9.45	12.50	10.18	11.37
Noviembre	12.36	14.66	12.86	12.77
Diciembre	15.45	17.80	16.64	16.04
Enero	17.80	19.81	18.78	18.19
Febrero	18.48	20.10	18.16	18.47
Marzo	16.86	17.66	16.10	16.06

Tabla B.4: Señal de cambio de temperatura media mensual promedio entre los modelos global y regional en el periodo futuro lejano respecto al producto grillado del CR2Met en el periodo histórico.

Meses	GCM Crudo [°C]	GCM Corregido [°C]	RCM Crudo [°C]	RCM Corregido [°C]
Abril	1.59	2.29	1.87	1.58
Mayo	0.63	2.25	2.08	1.94
Junio	0.04	1.88	1.98	1.80
Julio	-0.25	2.32	1.98	2.39
Agosto	-0.49	2.63	1.23	2.13
Septiembre	-0.85	2.27	0.37	1.50
Octubre	-0.81	2.23	-0.09	1.11
Noviembre	0.03	2.33	0.53	0.44
Diciembre	0.81	3.17	2.00	1.41
Enero	1.78	3.78	2.76	2.17
Febrero	2.42	4.04	2.11	2.41
Marzo	2.44	3.24	1.68	1.64

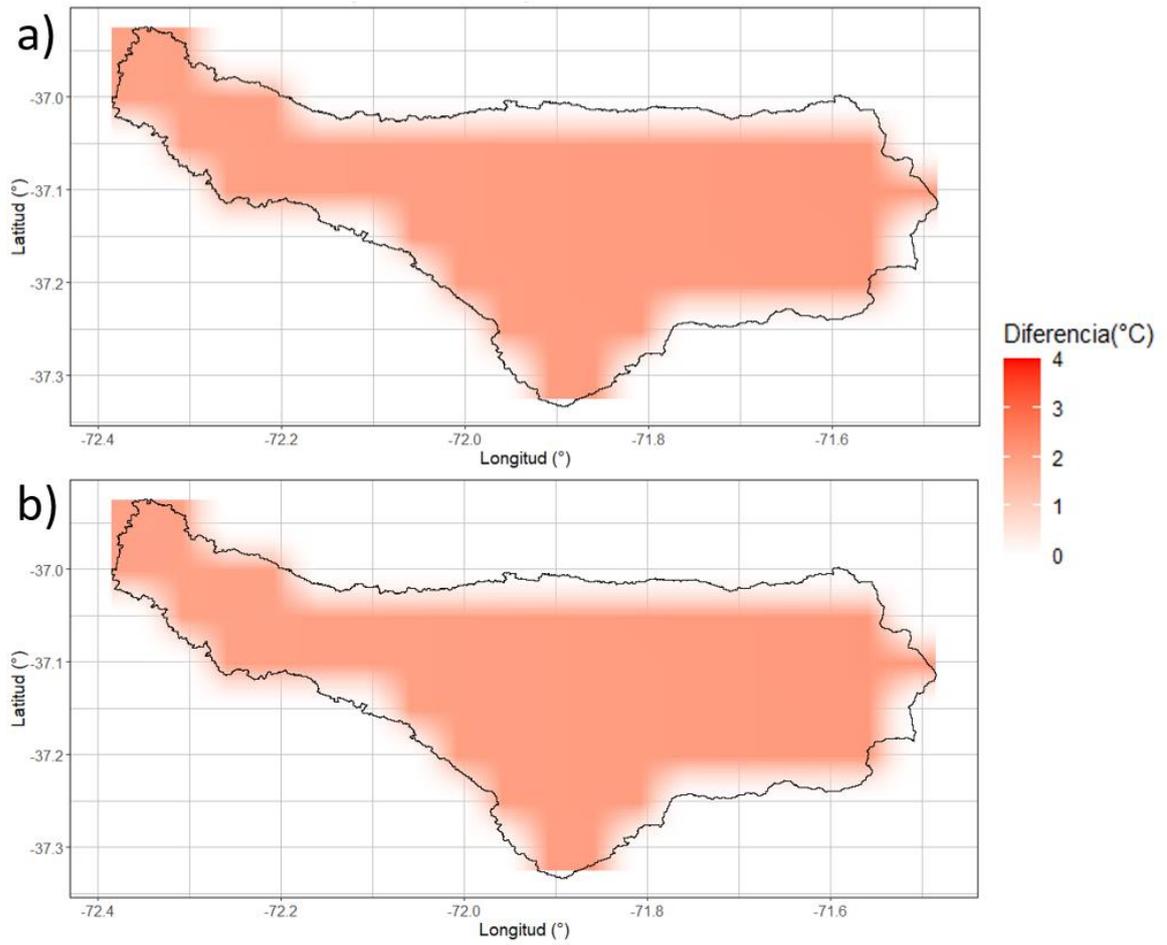


Figura B.2: Diferencia promedio de Temperatura entre el periodo futuro cercano (2040 – 2070) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático global (a) Crudo y (b) Corregido.

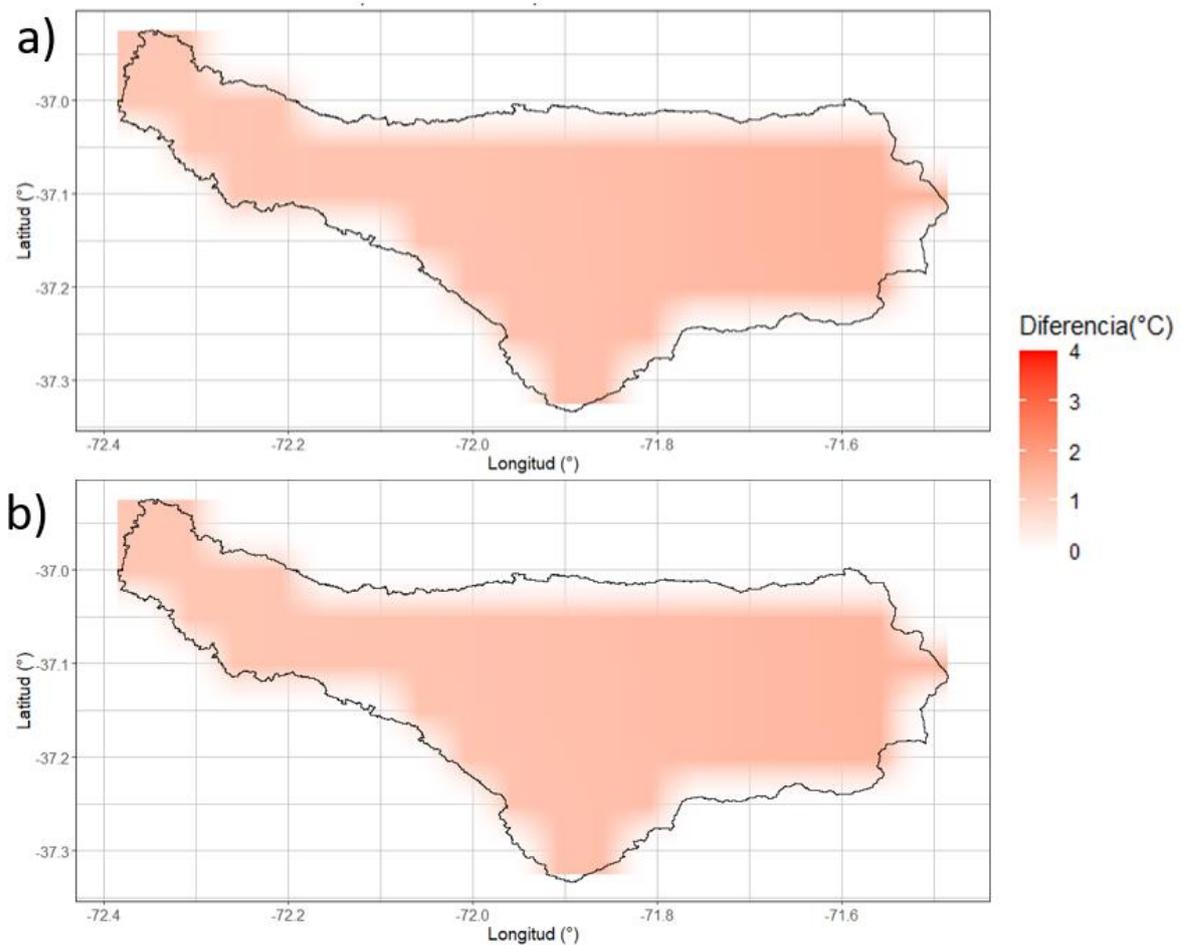


Figura B.3: Diferencia promedio de Temperatura entre el periodo futuro cercano (2040 – 2070) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático regional (a) Crudo y (b) Corregido.

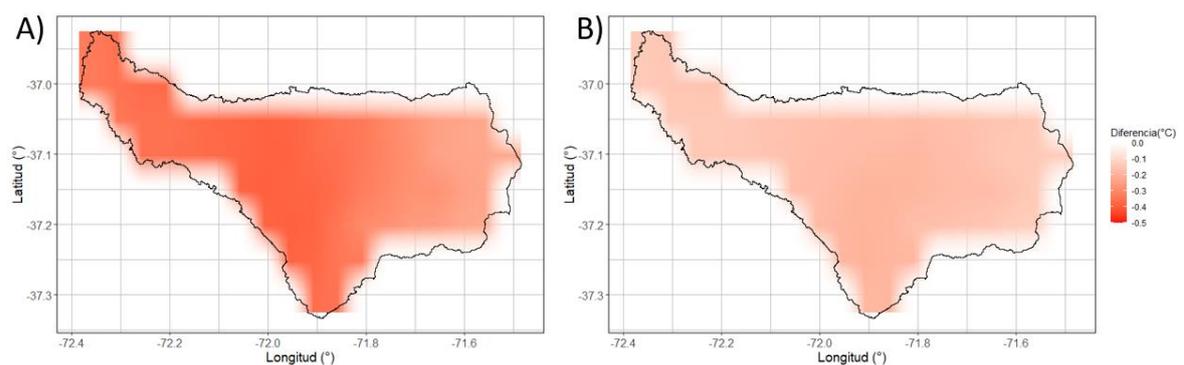


Figura B.4: Diferencia promedio de Temperatura entre modelos corregidos y crudos para el periodo futuro lejano (2071-2099) e histórico (1979 – 2005) para los modelos climáticos global (A) y regional (B).

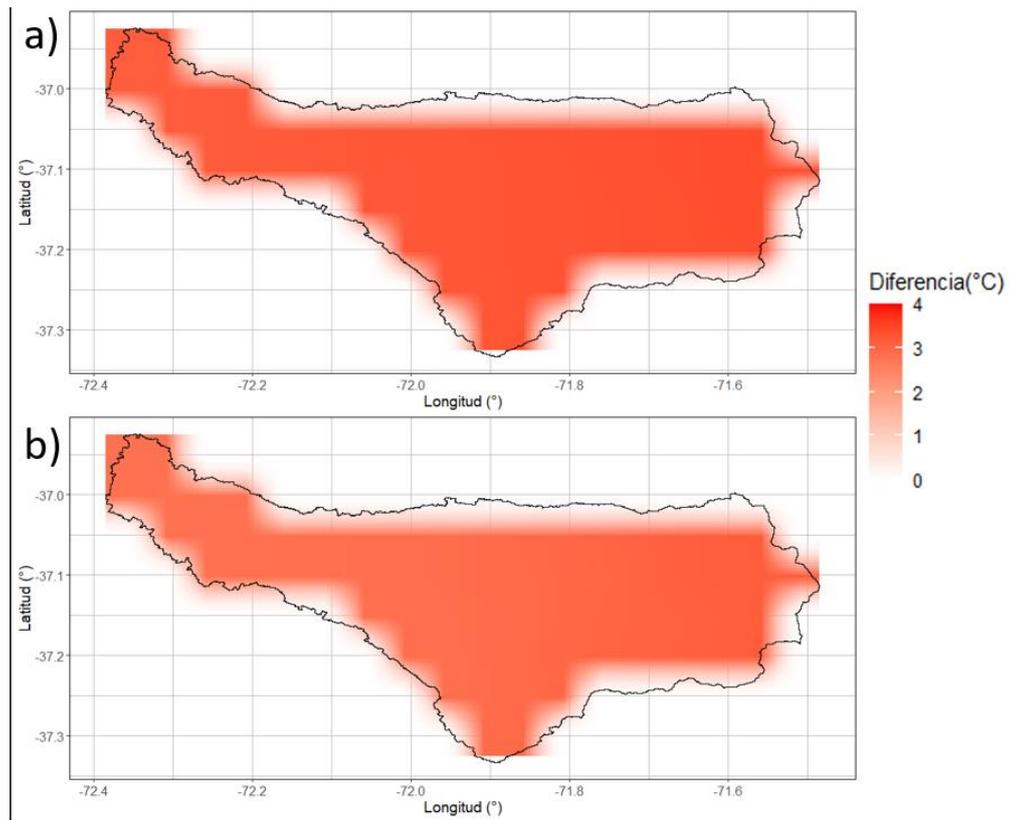


Figura B.5: Diferencia promedio de Temperatura entre el periodo futuro cercano (2071 – 2099) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático glonal (a) Crudo y (b) Corregido.

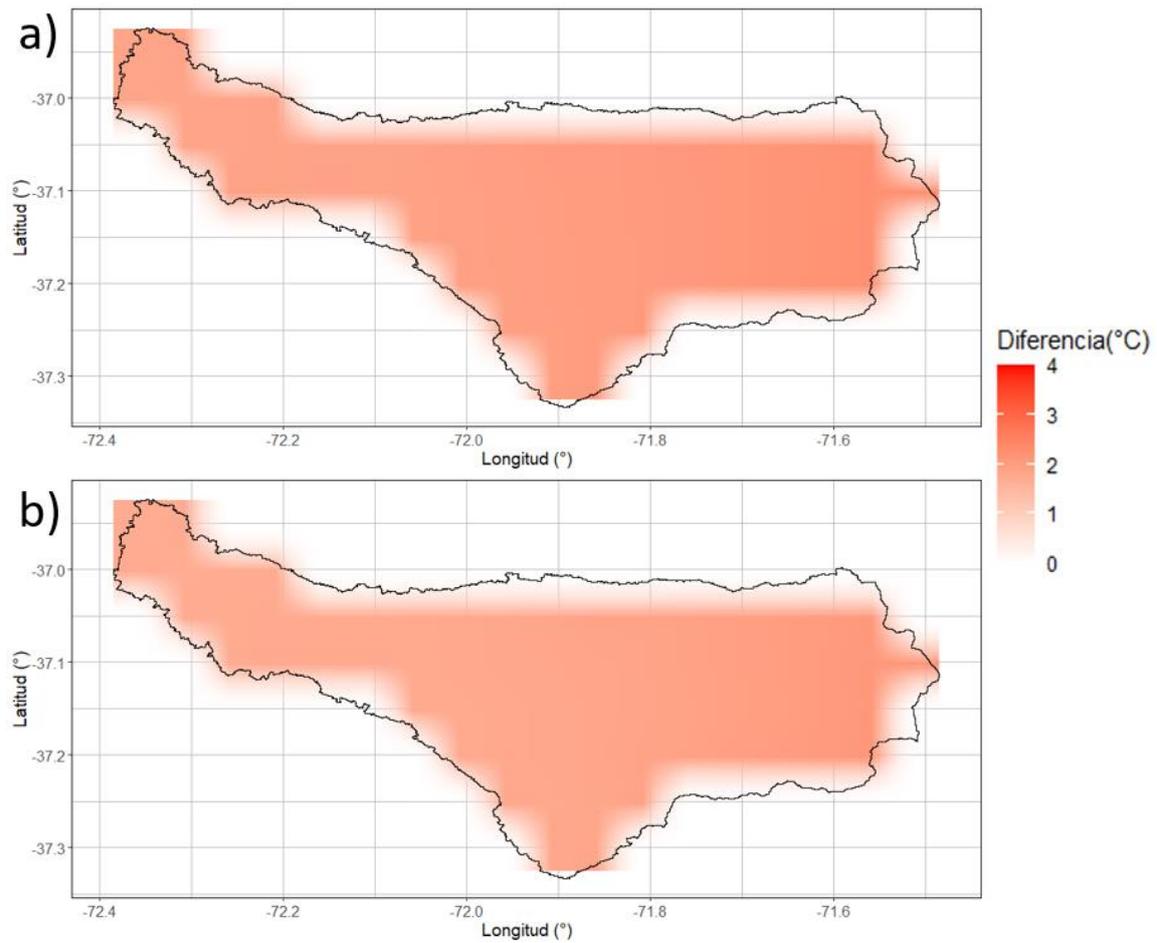


Figura B.6: Diferencia promedio de Temperatura entre el periodo futuro cercano (2071 – 2099) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático regional (a) Crudo y (b) Corregido.

ANEXO C. Forzante meteorológica: Precipitación.

Tabla C.1: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano 2040-2070 para los modelos global y regional.

Mes	GCM Crudo [mm]	GCM Corregido [mm]	RCM Crudo [mm]	RCM Corregido [mm]
Abril	53.61	86.37	165.40	111.66
Mayo	151.50	211.85	299.79	228.82
Junio	169.41	224.45	347.78	256.65
Julio	165.81	216.68	319.89	230.75
Agosto	159.14	211.28	310.54	207.29
Septiembre	126.00	147.20	278.46	189.72
Octubre	71.68	74.25	163.14	77.57
Noviembre	32.25	43.39	90.20	52.47
Diciembre	17.66	17.81	45.03	20.87
Enero	10.82	12.48	41.60	32.28
Febrero	13.11	32.68	57.62	28.14
Marzo	20.02	35.67	74.63	63.13

Tabla C.2: Señal de cambio de precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano 2040-2070 para los modelos global y regional.

Mes	Delta GCM Crudo [%]	Delta GCM Corregido [%]	Delta RCM Crudo [%]	Delta RCM Corregido [%]
Abril	-51.76	-22.28	48.84	0.43
Mayo	-40.19	-16.37	18.35	-9.66
Junio	-41.61	-22.64	19.86	-11.53
Julio	-30.28	-8.90	34.50	-2.94
Agosto	-16.61	10.70	62.72	8.71
Septiembre	2.51	19.77	126.56	54.86
Octubre	-16.40	-13.40	90.29	-4.97
Noviembre	-39.70	-18.86	68.66	0.04
Diciembre	-50.51	-50.09	26.18	-39.11
Enero	-59.34	-53.11	56.35	24.87
Febrero	-61.45	-3.96	69.38	-9.20
Marzo	-55.11	-19.99	67.37	41.84

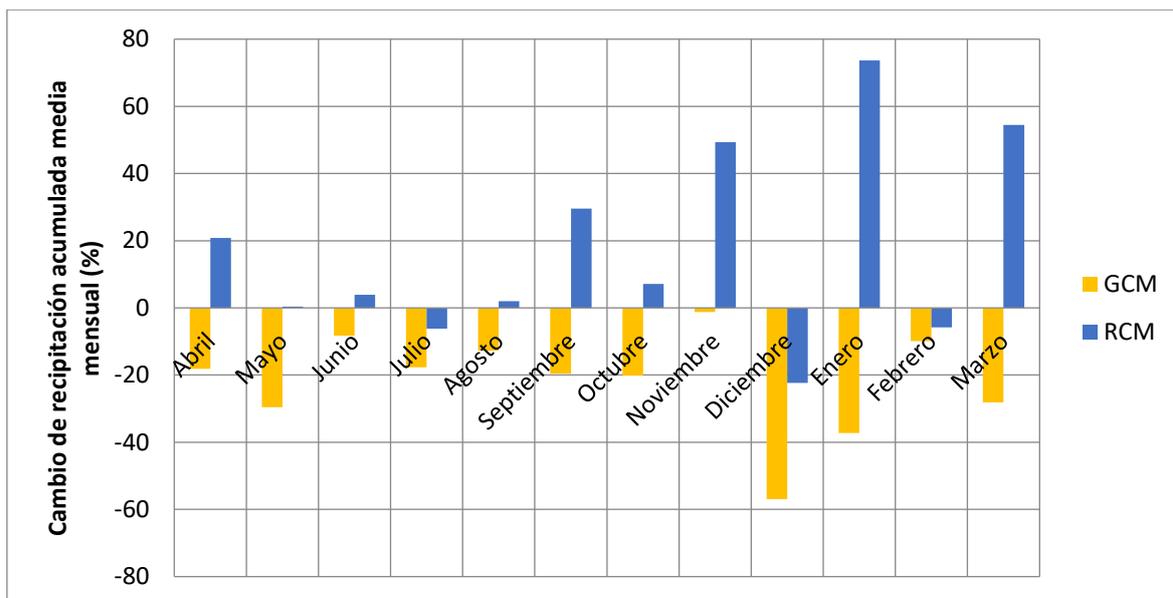


Figura C1: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro lejano (2071–2099) de los modelos global y regional, comparado periodo histórico 1979 - 2005.

Tabla C.3: Precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano 2071-2099 para los modelos global y regional.

Meses	GCM Crudo [mm]	GCM Corregido [mm]	RCM Crudo [mm]	RCM Corregido [mm]
Abril	51.50	90.92	183.79	134.35
Mayo	128.26	178.29	329.56	254.20
Junio	197.29	266.02	399.22	301.36
Julio	151.25	195.65	295.00	223.02
Agosto	126.67	166.46	282.04	194.50
Septiembre	88.19	98.30	230.20	158.78
Octubre	67.39	67.00	178.15	87.46
Noviembre	36.61	52.24	132.09	78.34
Diciembre	14.19	14.86	53.64	26.61
Enero	11.98	16.30	56.65	44.88
Febrero	11.20	30.63	54.07	29.19
Marzo	16.29	31.94	79.21	68.74

Tabla C.4: Señal de cambio de precipitación acumulada mensual promedio en el periodo futuro cercano 2071-2099 para los modelos global y regional.

Meses	Delta GCM Crudo [%]	Delta GCM Corregido [%]	Delta RCM Crudo [%]	Delta RCM Corregido [%]
Abril	-53.66	-18.19	65.38	20.89
Mayo	-49.36	-29.61	30.10	0.35
Junio	-32.00	-8.32	37.59	3.87
Julio	-36.41	-17.74	24.03	-6.23
Agosto	-33.63	-12.78	47.78	1.91
Septiembre	-28.24	-20.02	87.30	29.19
Octubre	-21.39	-21.85	107.79	2.01
Noviembre	-31.55	-2.32	146.99	46.49
Diciembre	-60.23	-58.35	50.30	-25.44
Enero	-54.99	-38.73	112.91	68.68
Febrero	-67.07	-9.98	58.94	-14.20
Marzo	-63.46	-28.35	77.65	54.17

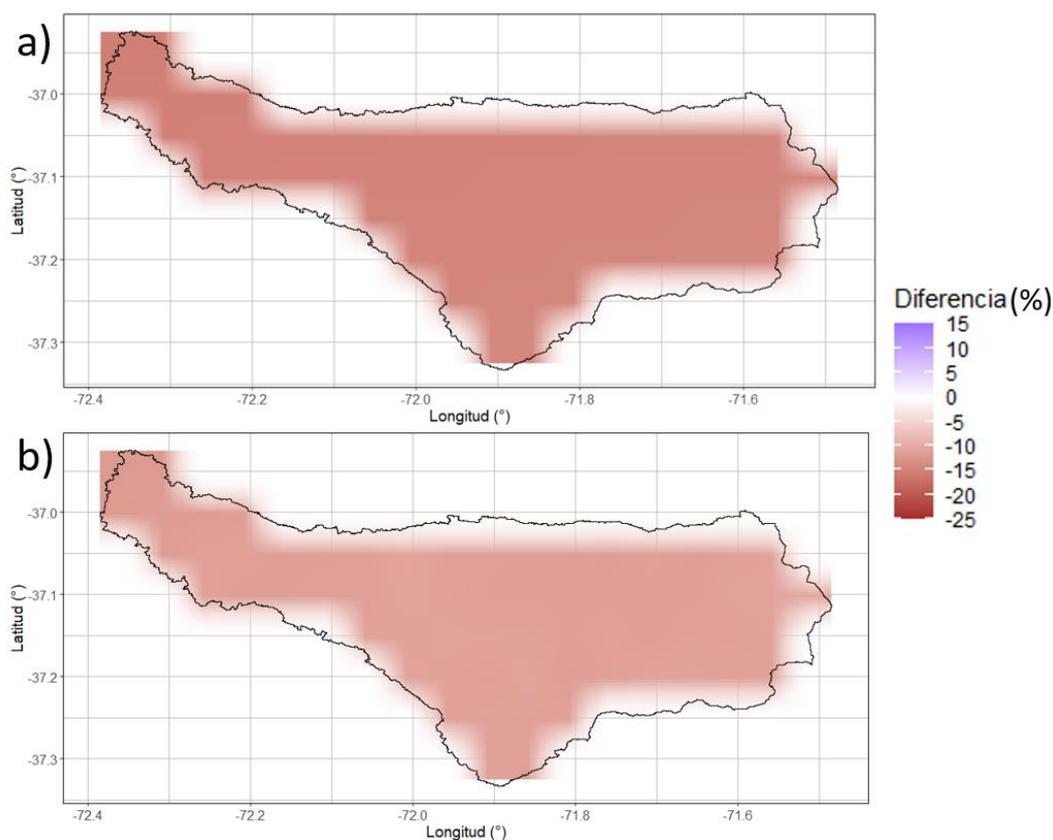


Figura C.2: Diferencia promedio de precipitación entre el periodo futuro cercano (2040 – 2070) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático global Crudo (a) y Corregido (b).

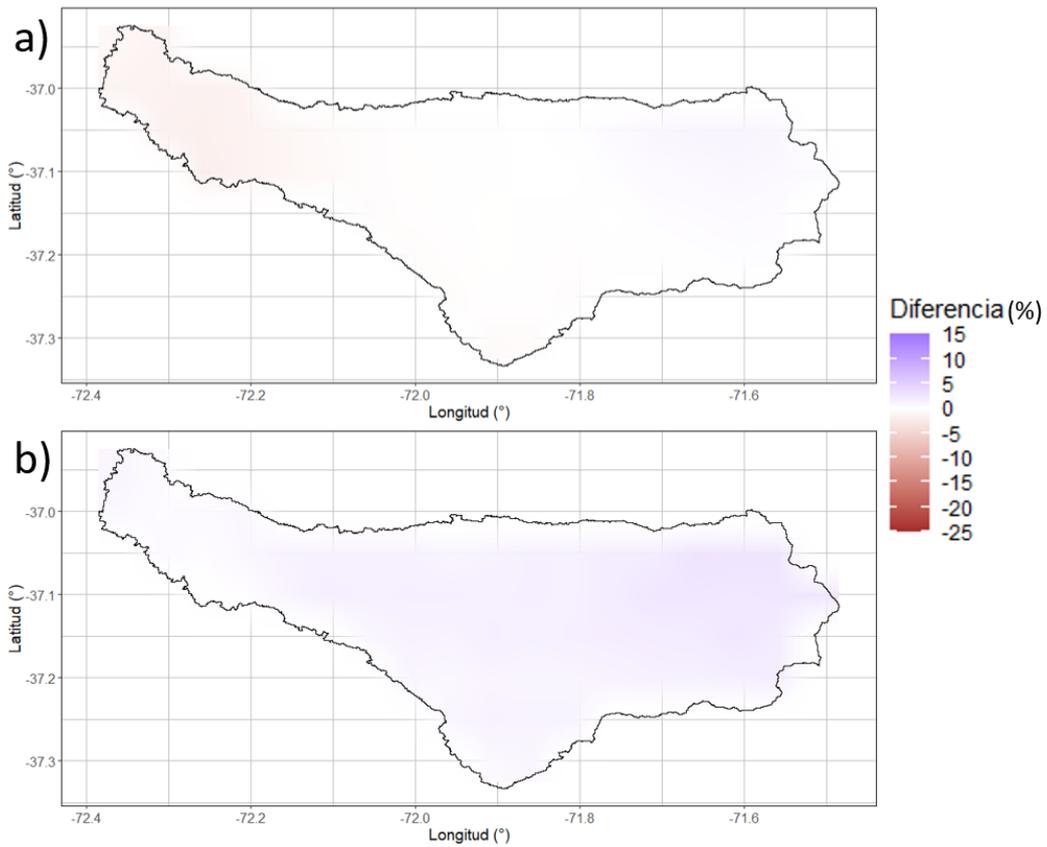


Figura C.3: Diferencia promedio de precipitación entre el periodo futuro cercano (2040 – 2070) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático regional Crudo (a) y Corregido (b).

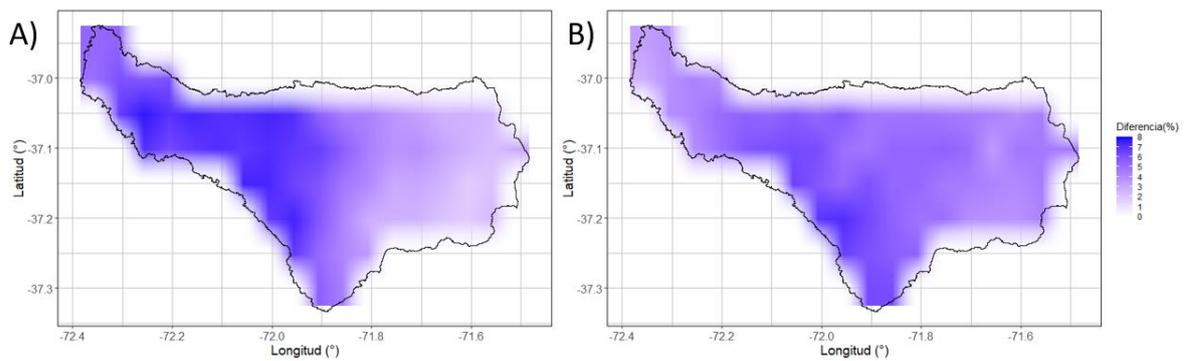


Figura C.4: Diferencia promedio de precipitación anual entre modelos corregidos y crudos para el periodo futuro lejano (2071-2099) e histórico (1979 – 2005) para los modelos climáticos global (A) y regional (B).

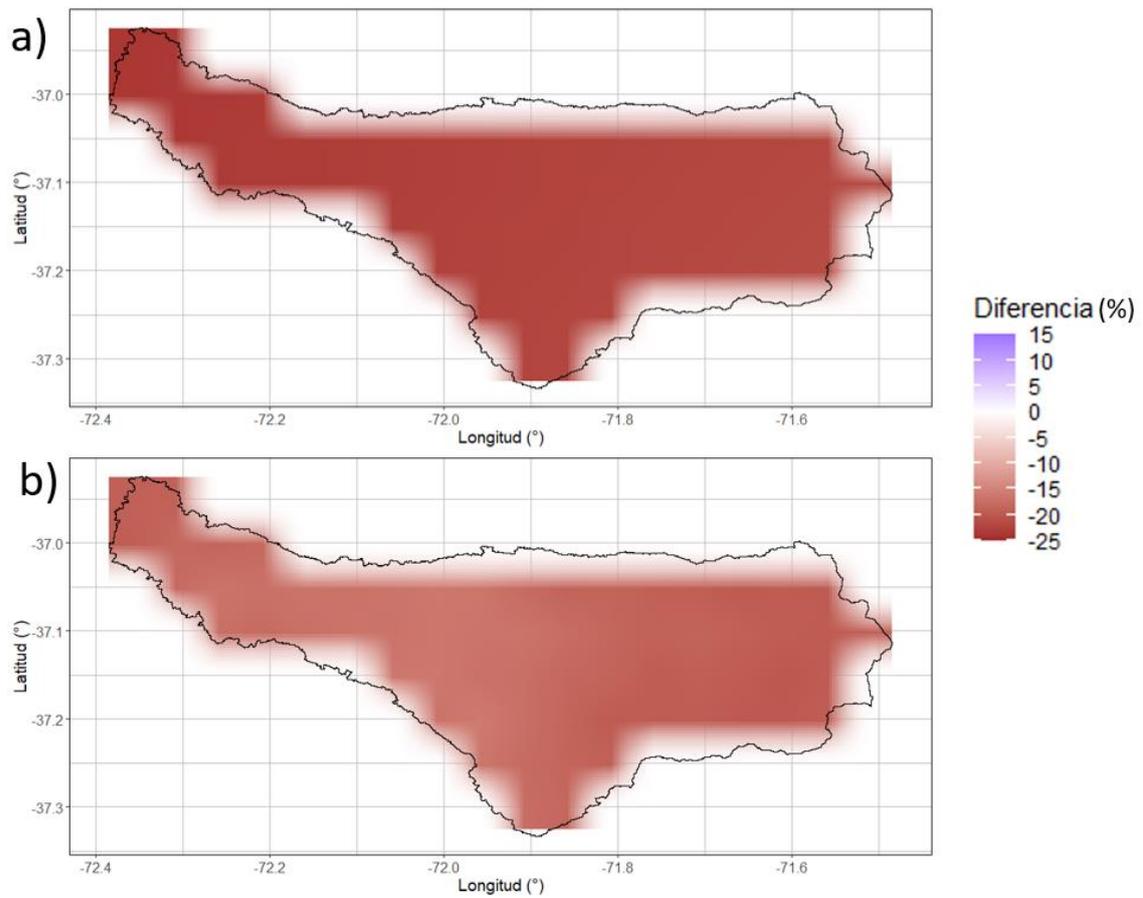


Figura C.5: Diferencia promedio de precipitación entre el periodo futuro lejano (2071 – 2099) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático global Crudo (a) y Corregido (b).

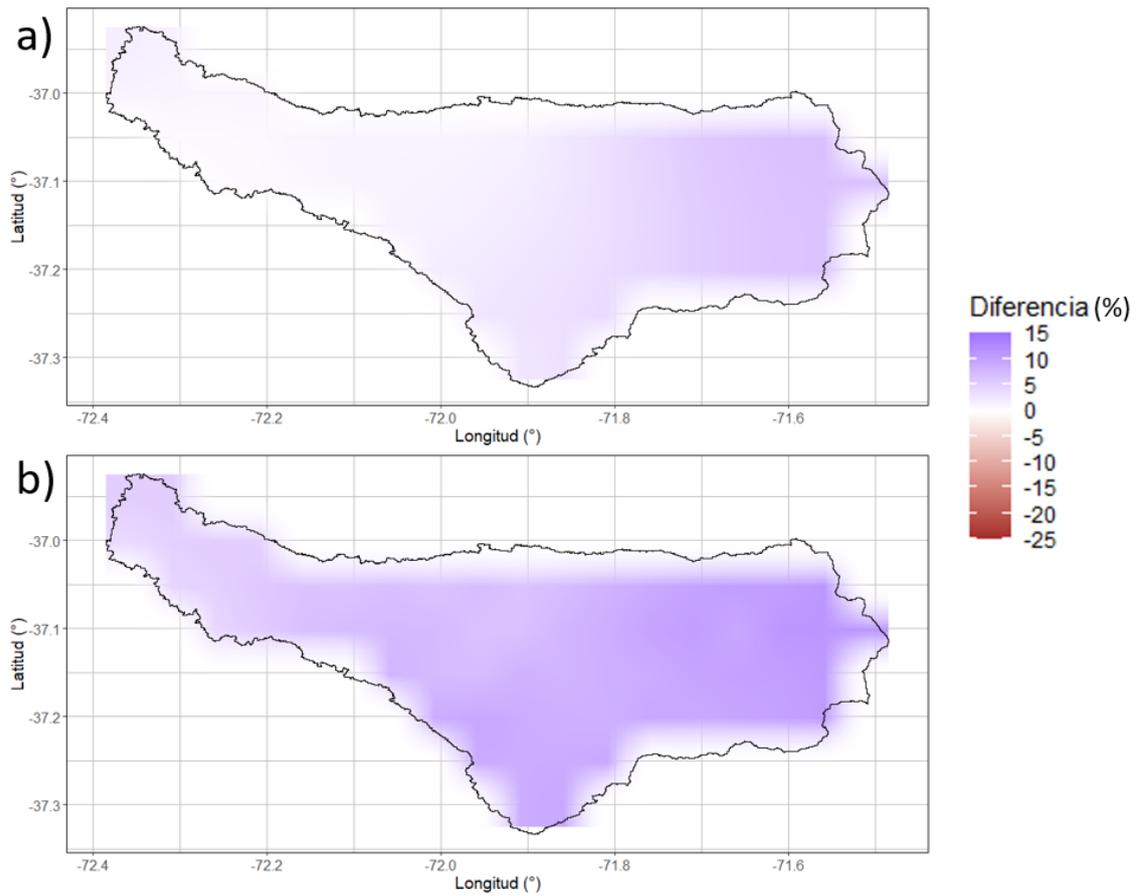


Figura C.6: Diferencia promedio de precipitación entre el periodo futuro lejano (2071 – 2099) y periodo histórico (1979 – 2005) para el modelo climático regional Crudo (a) y Corregido (b).

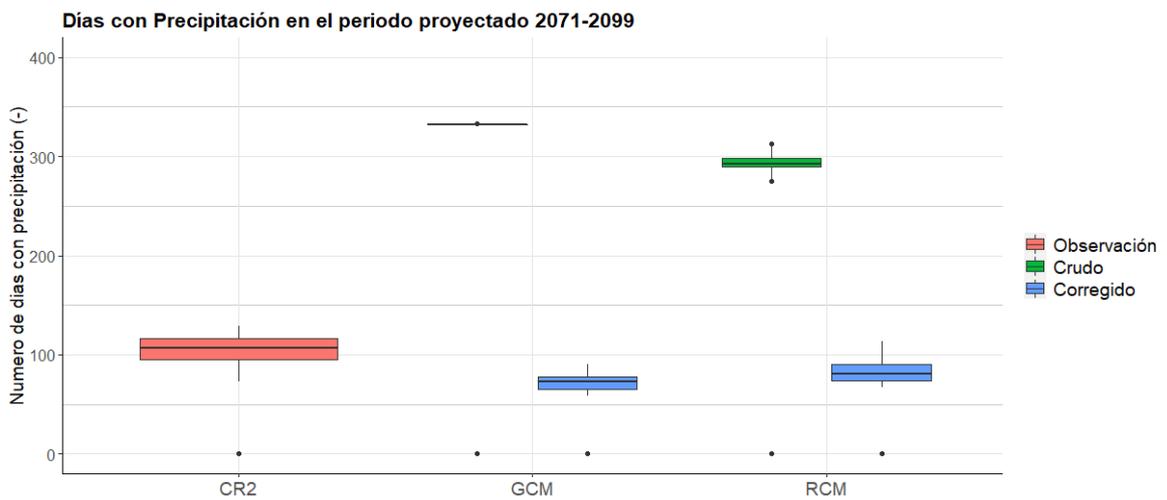


Figura C.7: Días con precipitación en el periodo futuro lejano 2071-2099.

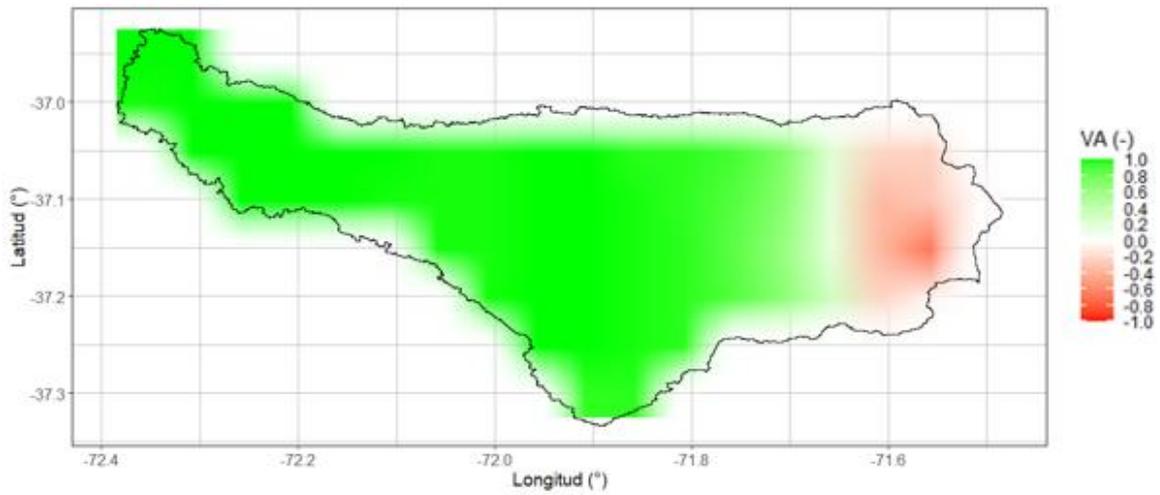


Figura C.8: Valor Agregado para días con precipitación sólida entre GCM Crudo – RCM Crudo.