



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**USO DE SIMULACIONES CLIMÁTICAS DE ALTA RESOLUCIÓN
(SAAG-NCAR) EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO HUASCO,
CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

CAMILA IGNACIA SANHUEZA ORELLANA

PROFESOR GUÍA:
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI
CATALINA JEREZ TOLEDO
HÉCTOR JIMÉNEZ ORELLANA

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: CAMILA IGNACIA SANHUEZA ORELLANA
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

USO DE SIMULACIONES CLIMÁTICAS DE ALTA RESOLUCIÓN (SAAG-NCAR) EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO HUASCO, CHILE

El presente estudio se enfoca en la evaluación de las simulaciones de alta resolución WRF-SAAG para la modelación hidrológica de las cuencas de los ríos El Carmen y El Tránsito en la región de Atacama, Chile. El objetivo principal es determinar la aplicabilidad y el rendimiento de las simulaciones WRF-SAAG en la simulación hidrológica de estas cuencas.

Para lograr esto, se realizó una evaluación de las simulaciones de temperatura y precipitación utilizando estaciones en superficie para calcular el error medio, RMSE, Pbias y el coeficiente de Pearson. En promedio, para cada estación el modelo de simulaciones mostró un Pbias positivo superior al 70 % en todos los años analizados, indicando una sobreestimación considerable de las precipitaciones anuales. Una parte fundamental de la investigación fue el desarrollo de curvas PDA (Precipitación-Duración-Área), herramienta esencial para entender la relación entre la cantidad de precipitación, su duración y el área afectada. Para el evento de 2017, según las simulaciones del WRF-SAAG para la duración de 1 hora, en un pixel de 4 km x 4 km la precipitación máxima fue de 13.01 mm.

Además, se ajustaron y modificaron los inputs para el modelo hidrológico Raven (Craig et al., 2020) que fue utilizado por (Jiménez, 2022) testeado con otras forzantes, utilizando datos provenientes de las simulaciones WRF-SAAG. Luego se calibraron los parámetros en dos periodos, la tormenta marzo 2015 y el periodo 2015-2017. La comparación de dos calibraciones distintas en el modelo hidrológico revela importantes diferencias en su desempeño, ilustrando cómo la selección y ajuste de parámetros afectan significativamente la precisión de las simulaciones. La primera calibración muestra una correlación moderada con los datos observados pero indica sobreestimaciones en variabilidad y volumen, reflejado en valores negativos de NSE, sugiriendo un ajuste pobre. La segunda calibración, a pesar de mantener valores negativos de NSE, evidencia mejoras en la correlación y estimaciones de variabilidad y volumen, resaltando la sensibilidad del modelo a las técnicas de calibración. En conclusión se logró evidenciar que las simulaciones en crudo (sin ninguna corrección), tal como está, no es recomendable para su uso.

*Infinitas gracias
a mi misma.*

Agradecimientos

Quería partir agradeciendo a mi familia, a mis papas por su esfuerzo, siempre priorizarnos y amarnos incondicionalmente, gracias por confiar y siempre estar para mi. Carlos, Lorena esto también es para ustedes. Gracias a mi hermano que siempre me miro desde lejos.

Para los que realmente me conocen saben el suplicio que significó para mi este periodo de Universidad, sobre todo concentrarme y estudiar, gracias por el apoyo de mis amigos del colegio, que independientemente de todos los años que han pasado, siempre han estado para mi, con un abrazo unas palabras de ánimo o preocupación, Javi, Rena, Pipe, Cris, Leito, los amo.

Amor real a mis amigas de Bachillerato, Romi, Consu, Niki, son lo mejor, gracias por todos esos momentos juntas, y por hacer ameno ese periodo de mi vida. Al Enzo y el Pao, que compartimos los primeros años míos en Beauchef, gracias por el tiempo y siempre estar dispuestos a ayudarme.

Quiero agradecer al Profesor Miguel, por su aguante y compromiso, también por su tiempo, igualmente a Héctor. Cada persona con la que me topé en esta etapa de mi vida, gracias y siempre lo recordaré, fue un duro y lindo proceso.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Organización de la memoria	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Modelos Climáticos	4
2.2. South America Affinity Group (SAAG)	5
2.3. Modelación Hidrológica	6
2.3.1. Plataforma modular Raven	6
2.4. Precipitación Duración Área	7
3. Zona de estudio	9
3.1. Curvas hipsométricas	11
3.2. Clima y línea de nieve	12
3.3. Geología y Hidrogeología	13
4. Metodología	15
4.1. Análisis de datos de precipitación y temperatura	16
4.1.1. Datos utilizados	17
4.1.2. Análisis datos de precipitación y temperatura	18
4.1.2.1. Análisis de datos de precipitación tormenta 2015 y 2017 . .	21
4.2. Construcción de Curvas Precipitación Duración Área	22
4.2.1. Datos Utilizados	22
4.2.2. Construcción Curvas Precipitación Duración Área	23
4.3. Construcción Modelo Hidrológico	24
4.3.1. Generación de forzantes meteorológicas WRF-SAAG	26
4.3.2. Calibración de modelo hidrológico WRF	26
4.3.3. Métrica de eficiencia	27
5. Resultados	29
5.1. Análisis Datos de precipitación	29
5.1.1. Métricas anuales y totales	29
5.1.2. Estudio tormenta a nivel horario y acumulado para los años 2015 y 2017	35

5.1.2.1.	Tormenta 2015	36
5.1.2.2.	Tormenta 2017	37
5.2.	Análisis datos de temperatura	40
5.3.	Curvas precipitación duración área	48
5.4.	Construcción modelo Hidrológico	49
5.4.1.	Modelo hidrológico CR2MET 2001-2021	50
5.4.2.	Resultados de la calibración tormenta 2015	51
5.4.3.	Resultados de la calibración 2015-2017	54
6.	Discusión	56
7.	Conclusiones	58
	Bibliografía	59
	Anexos	63
A.	Estructura del modelo hidrológico	63
A.0.1.	Infiltración	63
A.0.2.	Flujo base desde capa de suelo superficial a superficie	64
A.0.3.	Flujo base desde capa de suelo profunda a superficie	64
A.0.4.	Percolación	64
A.0.5.	Flujo intermedio	65
A.0.6.	Evaporación del suelo	65
A.0.7.	Ascenso capilar	65
A.0.8.	Balance de nieve	65
A.0.9.	Derretimiento de nieve	66
A.0.10.	Evapotranspiración potencial	66
A.0.11.	Partición de lluvia y nieve	67
B.	Calibración de modelo hidrológico CR2MET	67
B.1.	Métricas de rendimiento	69
C.	Precipitación	70
C.1.	Comparación series de precipitación	70
C.2.	Promedios anuales de precipitación para todas las estaciones	73
C.3.	Métricas de rendimiento de Precipitacion	78
C.4.	Estaciones de interes	83
D.	Temperatura	85
E.	Curvas de Precipitación Duración Área por horas	85
F.	Modelo hidrológico WRF	88

Índice de Tablas

4.1.	Estaciones de medición de temperatura	17
4.2.	Estaciones de medición de precipitación	18
4.3.	Intervalo de extracción de píxeles para el cálculo de PDA	22
4.4.	Estaciones fluviométricas utilizadas en el proceso de calibración y validación del modelo hidrológico.	25
4.5.	Intervalo de extracción de píxeles para el cálculo de modelo hidrológico	26
4.6.	Resumen de parámetros por proceso calibrados nuevos	26
5.1.	Métricas totales precipitación para cada estación, que corresponden a los puntos rojos de los gráficos.	34
5.2.	Error medio °C por estación y el promedio para temperatura	45
5.3.	RMSE °C por estación y el promedio para temperatura	46
5.4.	pBias por estación y el promedio para temperatura	47
5.5.	r por estación y el promedio para temperatura	48
5.6.	Resultados NSE y KGE por Estaciones	50
5.7.	Resultados NSE por Estaciones	51
5.8.	Métricas asociadas a caudales simulados y observados	54
5.9.	Resultados NSE por Estaciones	54
5.10.	Métricas asociadas a caudales simulados y observados	55
B.1.	Resumen de parámetros por proceso	68
C.1.	Resultados error medio por año y estación	79
C.2.	Resultados RMSE por año y estación	80
C.3.	Resultados pBias por año y estación	81
C.4.	Resultados Coeficiente de Pearson por año y estación	82
C.5.	Desempeño de las simulaciones por estación	83

Índice de Ilustraciones

3.1.	Zona de estudio con estaciones fluviométricas y meteorológicas utilizadas para el trabajo.	10
3.2.	Subcuencas río el Carmen y río el Tránsito	11
3.3.	Curvas hipsométricas de subcuencas río el Carmen y río el Tránsito.	12
3.4.	Climatología y línea de nieves en cuenca de estudio. Climatología es obtenida a partir del producto CR2MET (Boisier et al., 2018) y línea de nieves a partir del producto satelital de cobertura de nieves MODIS (NASA, 2021). Fuente:(Jiménez, 2022).	13
3.5.	Mapa hidrogeológico de cuenca de estudio. Fuente: (Jiménez, 2022) adaptada de (Dirección General de Aguas (DGA), 2004). 14	14
4.1.	Resumen de actividades desarrolladas durante el estudio.	16
4.2.	Zona de extracción de precipitación para la construcción de las PDA.	22
4.3.	Modelo conceptual hidrológico generado en Raven.	24
4.4.	Discretización de subcuencas en la zona de estudio, las subcuencas se encuentran coloreadas según el orden de Strahler, las subcuencas con orden de Straler 5,4,3 y 2 son del tipo río. En cambio, las subcuencas con orden 1 son del tipo quebrada. Los puntos rojos representan la ubicación de las estaciones fluviométricas utilizadas para calibrar el modelo hidrológico.	25
5.1.	Error Medio Precipitación [mm], la dispersión del boxplot viene dada por el calculo de cada métrica por año y el punto rojo es el promedio de las métricas de todos los datos en el periodo de estudio.	30
5.2.	RMSE Precipitación [mm],la dispersión del boxplot viene dada por el calculo de cada métrica por año y el punto rojo es el promedio de las métricas de todos los datos en el periodo de estudio.	31
5.3.	pBias Precipitación [%], la dispersión del boxplot viene dada por el calculo de cada métrica por año y el punto rojo es el promedio de las métricas de todos los datos en el periodo de estudio.	32
5.4.	Coefficiente de Correlación Pearson Precipitación,la dispersión del boxplot viene dada por el calculo de cada métrica por año y el punto rojo es el promedio de las métricas de todos los datos en el periodo de estudio.	33
5.5.	Tormenta 24 de Marzo 2015, Estación Río Huasco	36
5.6.	Tormenta 24 de Marzo 2015, Estación El Tránsito	36
5.7.	Tormenta 11 de Mayo 2017, Estación San Félix	37

5.8.	Tormenta 11 de Mayo 2017, Estación Tránsito	38
5.9.	Tormenta 11 de Mayo 2017, Estación Río Huasco	38
5.10.	Precipitación acumulada, a) Estaciones de estudio, b) producto grillado CR2MET, c) Simulaciones WRF-SAAG, para las tormentas de marzo 2015 y mayo 2017.	39
5.11.	Pbias % con respecto a las estaciones de estudio, a) producto grillado CR2MET, b) Simulaciones WRF-SAAG, para las tormentas de marzo 2015 y mayo 2017.	40
5.12.	Comparación series de temperatura	41
5.13.	Promedio diario de temperatura anual	42
5.14.	Error Medio Temperatura [°C]	43
5.15.	RMSE Temperatura [°C]	43
5.16.	pBias Temperatura %	44
5.17.	Coeficiente de Correlación Pearson Temperatura	44
5.18.	PDA para diferentes intervalos de tiempo	49
5.19.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente .	50
5.20.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Algodones	51
5.21.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Ramadilla	52
5.22.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Tránsito	52
5.23.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Corral	53
5.24.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Angostura	53
C.1.	Serie de Precipitación para las estaciones E1-E6.	70
C.2.	Serie de Precipitación para las estaciones E7-E12.	71
C.3.	Serie de Precipitación para las estaciones E13-E18.	71
C.4.	Serie de Precipitación para las estaciones E19-E24.	72
C.5.	Serie de Precipitación para las estaciones E25-E30.	72
C.6.	Precipitación observada vs. simulada por WRF-SAAG	73
C.7.	Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones	74
C.8.	Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones	74
C.9.	Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones	75
C.10.	Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones	75
C.11.	Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones	76
C.12.	Precipitación promedio anual simulada vs observada por WRF-SAAG	77
C.13.	Promedio anual observada, simulada por WRF-SAAG	78
C.14.	Series de tiempo observada, simulada por WRF-SAAG	84
D.1.	Temperatura observada vs. simulada por WRF-SAAG	85
E.1.	PDA 24 Horas	86
E.2.	PDA 18 Horas	86

E.3.	PDA 12 Horas	87
E.4.	PDA 6 Horas	87
E.5.	PDA 2 Horas	88
E.6.	PDA 1 Hora	88
F.1.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente .	89
F.2.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente .	89
F.3.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente .	90
F.4.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente .	90
F.5.	Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente .	91

Capítulo 1

Introducción

Chile es un país con fuerte presencia de montañas que, en conjunto con la ocurrencia de eventos meteorológicos intensos, resulta en que sea un país altamente vulnerable a episodios hidrometeorológicos extremos como lo son las crecidas y aluviones. En un contexto de un clima cambiante a escala global, es posible esperar que los eventos extremos se incrementen en ciertos periodos y en determinadas regiones, tanto, en relación a su frecuencia como en su magnitud, y que consecuentemente esta tendencia se exprese también en la severidad de los desastres provocados por los mismos (Easton, Tello, y Ide, 2018). En este contexto desde principios del siglo XX, el análisis de datos históricos revela que la mayoría de los desastres aluviales en el sur del Desierto de Atacama (26-30°S) han sido desencadenados por eventos de lluvias extremas, predominantemente entre los meses de marzo y septiembre, bajo la influencia de condiciones de El Niño.(Ortega et al., 2024)

Para abordar estas preocupaciones frente a eventos hidrometeorológicos extremos, la modelación hidrológica se ha convertido en una herramienta fundamental en la hidrología, que se enfoca en modelar procesos, con el objetivo de mejorar la predictibilidad del ciclo del agua, por ejemplo, cómo se vería afectado ante factores antropogénicos, qué consecuencias tendría sobre la partición de la precipitación en evaporación y escorrentía, etc (Clark y Hrachowitz, 2017). La modelación hidrológica en el norte de Chile es sumamente desafiante, esto puede deberse a la naturaleza convectiva de precipitaciones en de la zona norte del país pudiendo generar crecidas súbitas en los cauces e, incluso, aluviones con el consecuente impacto social y ambiental. Estas tormentas pueden emplazarse en lugares puntuales que no abarcan más de 5 [km].

La información climática de escala regional a local se ha convertido en un tema de importancia central para poder integrar las necesidades de adaptación en niveles regionales y locales. Dado que los modelos climáticos globales (GCM) generalmente no representan características a escala regional debido a sus resoluciones espaciales gruesas ($\sim 100\text{--}200$ km), programas globales multimodelo como el Experimento Regional Coordinado de Reducción

de Escala (CORDEX) son importantes para mejorar aún más la calidad de los resultados del modelo climático regional (RCM). (Bozkurt, Boiser, Rondanelli, Garreaud, y Gallardo, 2019).

El desarrollo sostenible en la región requiere una mejor comprensión de los procesos hidroclicmáticos. Hay varios obstáculos para la comprensión y adaptación al cambio climático en América del Sur. La cobertura de datos es insuficiente, ya que las observaciones son escasas (Lagos-Zúñiga et al., 2024). Esto limita la comprensión física y la cuantificación de las tendencias, lo que dificulta los estudios de atribución climática. Las simulaciones, con espaciamientos horizontales de la malla a escala de kilómetros, pueden aliviar muchos de los problemas en las simulaciones de GCM y RCM porque no se utilizan parametrizaciones de la convección profunda, y las heterogeneidades de la superficie se representan con mayor detalle. En consecuencia, estas simulaciones reducen significativamente muchos de los sesgos existentes en los modelos más gruesos y representan los procesos, lo que debería ayudar en la modelacion hidrológica (Dominguez et al., 2024).

La innovación de este trabajo radica en la utilización de las simulaciones SAAG-NCAR. Este estudio se centra en la evaluación del modelo hidrológico RAVEN implementado por Jiménez (2022), donde se trabajo con el mismo modelo pero forzado con nuevas forzantes meteorológicas, las simulaciones WRF-SAAG. La clave del avance propuesto es la resolución explícita de la convección dentro de los modelos dinámicos atmosféricos, un enfoque esencial para capturar con precisión los procesos de precipitación intensa a escalas más finas. Al hacerlo, se espera mejorar no solo la representación de las forzantes dinámicas, sino también la precisión global de las preyecciones meteorológicas y hidrológicas.

1.1. Objetivos

El objetivo general de esta memoria consiste en evaluar la capacidad de las simulaciones del WRF-SAAG como forzante meteorológico para un modelo hidrológico semi-distribuido en la cuenca del río Huasco, Chile.

Objetivos específicos:

1. Realizar un análisis comparativo de las simulaciones WRF-SAAG mediante observaciones en superficie para las variables de precipitación y temperatura a escala diaria.
2. La construcción de curvas precipitación duración área (PDA), obteniendo información sobre la intensidad máxima y su relación con las áreas de afectación para distintas duraciones.
3. Verificar la aplicabilidad de las simulaciones WRF-SAAG para simular hidrológicamente la cuenca del río Huasco.

1.2. Organización de la memoria

La organización de la memoria se establece comenzando con una revisión bibliográfica, seguida por una descripción de la zona de estudio. Posteriormente, se explica la metodología empleada en la investigación, que abarca varios aspectos fundamentales. Inicialmente, se describen los datos utilizados, incluyendo las simulaciones WRF-SAAG y las observaciones en superficie, junto con el marco metodológico para el análisis comparativo. Luego, se detalla la construcción de curvas PDA, que son cruciales para entender la relación entre la precipitación, su duración y el área afectada, proporcionando una mejor comprensión de los eventos extremos y su impacto potencial. Además, se discute el ajuste y modificación de inputs para el modelo hidrológico, utilizando los datos de las simulaciones, mencionando los desafíos y las soluciones adoptadas para mejorar la representación de los procesos hidrológicos en estudio.

Los resultados obtenidos de esta metodología se presentan en el capítulo siguiente, y la memoria concluye con un capítulo de conclusiones y discusiones que derivan del estudio realizado.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Modelos Climáticos

El cambio climático se ha vuelto cada vez más evidente, como lo demuestra el aumento de la temperatura media global de la superficie desde que comenzaron los registros instrumentales en el siglo XIX (Bindoff et al., 2013). Sus posibles riesgos para el medio ambiente y la sociedad se han convertido en uno de los problemas más apremiantes para la humanidad. A medida que las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando debido a las actividades humanas en el futuro previsible, la temperatura media global aumentará y, en consecuencia, también lo harán los eventos extremos climáticos (Li et al., 2019).

Los modelos numéricos, respaldados por validaciones de observaciones exhaustivas, son herramientas indispensables para mejorar nuestro conocimiento del sistema climático y hacer proyecciones climáticas. Los modelos climáticos globales (GCM) se han utilizado ampliamente para evaluar los impactos climáticos de las emisiones acumuladas de gases efecto invernadero y proyectar el clima futuro bajo diferentes escenarios de emisiones desde la revolución industrial (Li et al., 2019).

Frente a esto la información climática a escala regional y local se ha convertido en un tema de importancia, especialmente para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático e integrar las necesidades de adaptación a niveles regional y local. Dado que los modelos climáticos globales (GCM) generalmente no logran representar la escala regional debido a sus resoluciones espaciales gruesas (aproximadamente 100–200 km), en los últimos años han surgido varias iniciativas para coordinar simulaciones de modelos climáticos regionales (RCM) con el fin de proporcionar información sobre el cambio climático a escala regional y local (aproximadamente 50–10 km) (Bozkurt et al., 2019). Los modelos climáticos regionales (RCMs) han sido herramientas fundamentales en la predicción del clima y la evaluación de escenarios futuros a escalas regionales. Sin embargo, estos modelos enfrentan limitaciones significativas, especialmente en su capacidad para resolver explícitamente las precipitaciones convectivas.

Los recientes desarrollos en los modelos climáticos que permiten la convección (convection-permitting climate models, CPCM) han marcado un avance significativo. Estos modelos operan a escalas espaciales suficientemente finas para simular directamente los procesos convectivos, eliminando la necesidad de parametrizaciones convectivas y, por ende, aumentando la precisión en la simulación de patrones de precipitación.

Los resultados resaltan que las resoluciones más gruesas que 50 km (por ejemplo, GCM y reanálisis) no capturan gradientes climáticos importantes impuestos por la topografía compleja. Dado que la resolución espacial más alta de las simulaciones regionales actuales sobre América del Sur es de aproximadamente 50 km, resoluciones más altas son importantes para mejorar nuestra comprensión de los procesos dinámicos que determinan el clima en terrenos complejos y entornos extremos (Bozkurt et al., 2019).

Los modelos climáticos regionales que permiten la convección (CPCMs) han demostrado ser útiles para escalar información climática a gran escala hacia escalas regionales y locales. Estos modelos aportan valor a la representación de parámetros relevantes para el impacto, como la temperatura cerca de la superficie, la precipitación y la representación de extremos, al mejorar los procesos a escala local como las interacciones suelo-atmósfera, la dinámica de la capa de nieve o la representación de la convección profunda. Debido a sus altos costos computacionales, la mayoría de las simulaciones CPCM se han restringido a dominios pequeños del orden de unos pocos cientos de kilómetros. En tales dominios pequeños, los CPCMs podrían no alcanzar su máximo potencial porque están restringidos por el forzamiento de los límites laterales y pueden no ser capaces de activarse adecuadamente (Prein, Rasmussen, Clark, Ikeda, y Liu, 2015).

2.2. South America Affinity Group (SAAG)

Con el fin de potenciar herramientas para estudios hidrológicos, el grupo South America Affinity Group (SAAG) se estableció para acelerar la investigación y descubrimientos centrados en el ciclo del agua y la energía de América del Sur. Este esfuerzo está liderado por el programa de Sistemas de Agua del National Center for Atmospheric Research (NCAR, USA) y el Programa de Aplicaciones Hidrometeorológicas (HAP) y fomenta colaboraciones en NCAR además de la comunidad internacional de investigación. (University Corporation for Atmospheric Research, 2023)

El papel de NCAR en este proyecto es desarrollar un sistema de modelado de alta resolución que permita la convección para América del Sur, lo que posibilita una comprensión sin precedentes de los procesos atmosféricos e hidroclimáticos en América del Sur. NCAR colabora estrechamente con socios universitarios en Estados Unidos y América del Sur, y apoya actividades de investigación internacionales como ANDEX, que es un posible Proyecto Hidro-

climático Regional (RHP) de GEWEX (University Corporation for Atmospheric Research, 2023). NCAR generó simulaciones meteorológicas que resuelven explícitamente la convección atmosférica, mediante el uso del modelo Weather Research and Forecasting (WRF), forzado por ERA-5 con resolución horizontal de 4 km para Sudamérica entre 2000 y 2021; en adelante WRF-SAAG (Dominguez et al., 2024).

2.3. Modelación Hidrológica

Los modelos hidrológicos se utilizan para predecir inundaciones, sequías, recarga de aguas subterráneas y el intercambio entre la tierra y la atmósfera, y son de importancia crítica como herramientas para desarrollar estrategias de planificación y gestión de recursos hídricos. Esto es particularmente cierto a la luz de los crecientes efectos del cambio climático y el cambio en el uso de la tierra en el ciclo del agua terrestre.

Sin embargo, a pesar de su importancia, estos modelos tienen considerables incertidumbres y predicciones poco fiables. Los modelos tienen como objetivo encapsular nuestra comprensión del sistema. No obstante, su debilidad para hacer predicciones sugiere que, además del impacto de las incertidumbres observacionales, al menos algunos de los procesos que controlan cómo se almacenan, transfieren y liberan agua y energía en diferentes partes de un sistema de flujo no están representados de manera suficientemente precisa en los modelos de vanguardia (Clark y Hrachowitz, 2017).

La modelación de procesos hidrológicos naturales depende de múltiples aristas, como pueden ser la zona y objetivos del estudio. Una simulación hidrológica puede ser realizada tanto con un modelo estadístico o con modelos conceptuales y de base física resolviendo modelos numéricos que simplifican procesos físicos (Oubeidillah, Kao, Ashfaq, Naz, y Tootle, 2014).

La modelación hidrológica física permite analizar en detalle los procesos que gobiernan los sistemas fluviales, con el objetivo de base de representar realísticamente lo que ocurre entre el suelo, río, atmósfera y demás reservorios analizados. Considerando lo anterior, una buena alternativa para estudiar aluviones es utilizar un modelo hidrológico de base física, debido a que se puede representar las condiciones de humedad de suelo, caudales de crecida e infiltración con magnitudes cercanas a las ocurridas durante tormentas de alta precipitación (Jiménez, 2022).

2.3.1. Plataforma modular Raven

El modelo hidrológico Raven, es un paquete de software para la simulación de cuencas hidrográficas. Raven es un modelo mixto de tipo lumped/semi-distribuido que se puede utilizar

para comprender el comportamiento hidrológico de una cuenca y evaluar los posibles impactos del uso de la tierra, el clima y otros cambios ambientales en propiedades de la cuenca, como el potencial de inundación, la disponibilidad de agua en el suelo o la recarga de aguas subterráneas. El modelo se puede utilizar para investigar eventos de tormentas individuales o desarrollar balances a largo plazo de agua, masa y energía para la gestión de recursos y evaluación de la calidad del agua.

La singularidad de Raven proviene principalmente de su flexibilidad; Raven es capaz de utilizar una amplia variedad de algoritmos para representar cada componente individual del ciclo del agua y tiene un tratamiento general de todas las posibles opciones del modelo, desde el acceso a la salida hasta el algoritmo de simulación numérica. Debido a su diseño modular, los usuarios tienen acceso a varios métodos diferentes para interpolar datos forzantes meteorológicos, encauzar el agua aguas abajo, representar la evaporación y cualquier otra opción de modelo. Con esta flexibilidad, un modelador puede examinar la amplia gama de resultados posibles que resultan de la incertidumbre acerca de un modelo de cuenca, y probar hipótesis sobre el funcionamiento de la cuenca (Craig, J., y Team., R. D., 2020).

El modelo puede ser utilizado para estudiar tanto tormentas individuales como hidrología a largo plazo en una cuenca, por medio de balances de masa y energía. La principal característica distintiva de Raven por sobre otros modelos, es que tiene una gran robustez y flexibilidad numérica, debido a que es posible utilizar una gran variedad de algoritmos para representar las componentes del ciclo hidrológico. Para lograr esta flexibilidad, el modelador puede examinar un amplio rango de algoritmos de simulación numérica, variando métodos de interpolación de forzantes meteorológicas, rastreo de agua, representación de la humedad, entre muchas otras cosas. De este modo, se puede caracterizar la incertidumbre desde múltiples componentes de la modelación hidrológica (Craig et al., 2020).

Con respecto a la configuración espacial, una cuenca está formada por un conjunto de subcuencas. A su vez, estas subcuencas pueden estar formadas por unidades de respuesta hidrológica contiguas o separadas. Estas unidades de respuesta hidrológica se definen como áreas con respuestas hidrológicas únicas ante eventos de precipitación (Craig et al., 2020).

2.4. Precipitación Duración Área

Las curvas de precipitación-duración-área (PDA) son herramientas fundamentales en hidrología utilizadas para caracterizar y visualizar cómo varía la intensidad de las precipitaciones en función de la duración del evento y el área geográfica afectada. Estas curvas representan gráficamente la relación entre la intensidad máxima de la precipitación registrada durante un período de tiempo específico (duración) y el tamaño del área sobre la cual se calcula esta intensidad máxima.

“Es importante disponer de un fichero de los datos relativos al volumen de las precipitaciones caídas durante el paso de las perturbaciones atmosféricas, para estudiar ciertos problemas relativos a las crecidas y para llevar a cabo las actividades de planificación de las obras hidráulicas, tanto si se trata de evacuar el agua como de obstaculizar el paso de la misma. Esta información se presenta por regla general en forma de cuadros en donde se indica la altura máxima de las precipitaciones medias caídas durante un temporal sobre distintas áreas dadas, por ejemplo 100 km^2 , 500 km^2 , etc., para duraciones o intervalos de referencia normalizados tales como 6 horas, 24 horas, etc. Estos valores máximos para un temporal determinado se llaman datos de cantidad-superficie-duración de la precipitación. Estos datos pueden ser representados en forma gráfica "(Manual for Depth-Area-Duration Analysis of Storm Precipitation", 1969).

Las precipitaciones de mayor duración cubren un área más amplia. Las precipitaciones de corta duración normalmente cubren áreas pequeñas. La precipitación rara vez ocurre de manera uniforme en un área grande; en general se observan variaciones en la intensidad y la profundidad total desde los centros hasta las periferias de las tormentas. Cuanto más nos alejamos del centro de la precipitación, menos precipitación observamos. Conocer los parámetros de la precipitación es muy importante para los ingenieros que diseñan estructuras hidráulicas, como construcciones para transporte o almacenamiento. La información sobre la precipitación es esencial para las estimaciones y cálculos de caudales de diseño. Generalmente, esta información se resume en tablas o se presenta en gráficos que indican la profundidad de la precipitación en un área específica para una duración específica. Usando esta información, se puede obtener la profundidad máxima de la precipitación en cada área y cada duración. Las estaciones de registro de precipitaciones registran la cantidad de precipitación puntual y este punto puede o no ser el centro de la precipitación. Por lo tanto, la precipitación máxima a menudo no se registra (Mohammadi y Mahdavi, s.f.).

Capítulo 3

Zona de estudio

El norte de Chile, una estrecha franja de tierra entre el Pacífico sudeste (SE) subtropical y la Cordillera de los Andes, presenta un clima extremadamente seco y estable, albergando el Desierto de Atacama, ampliamente considerado como la zona más árida del mundo. Las estaciones muestran que la precipitación anual media a largo plazo, es típicamente inferior a 5 mm en áreas costeras y zonas de baja altitud (hasta 1000 m s.n.m.). Las partes de alta altitud de Atacama (más de 3000 m s.n.m.) reciben más precipitación (10–100 mm por año) principalmente durante el verano austral y asociadas con tormentas que son alimentadas por la humedad del lado este de los Andes (Bozkurt, Rondanelli, y Garreaud, 2015). A continuación se presenta en la Figura 3.1 la delimitación del área de estudio y la ubicación geográfica de estaciones utilizadas para el análisis, y en la Figura 3.2 se presentan las subcuencas de estudio.

Subcuencas del río el Carmen y río el Tránsito, Región de Atacama, Chile.
Coordenadas geográficas WSG 84.
Estaciones metereológicas y fluviométricas. Fuente: DGA.

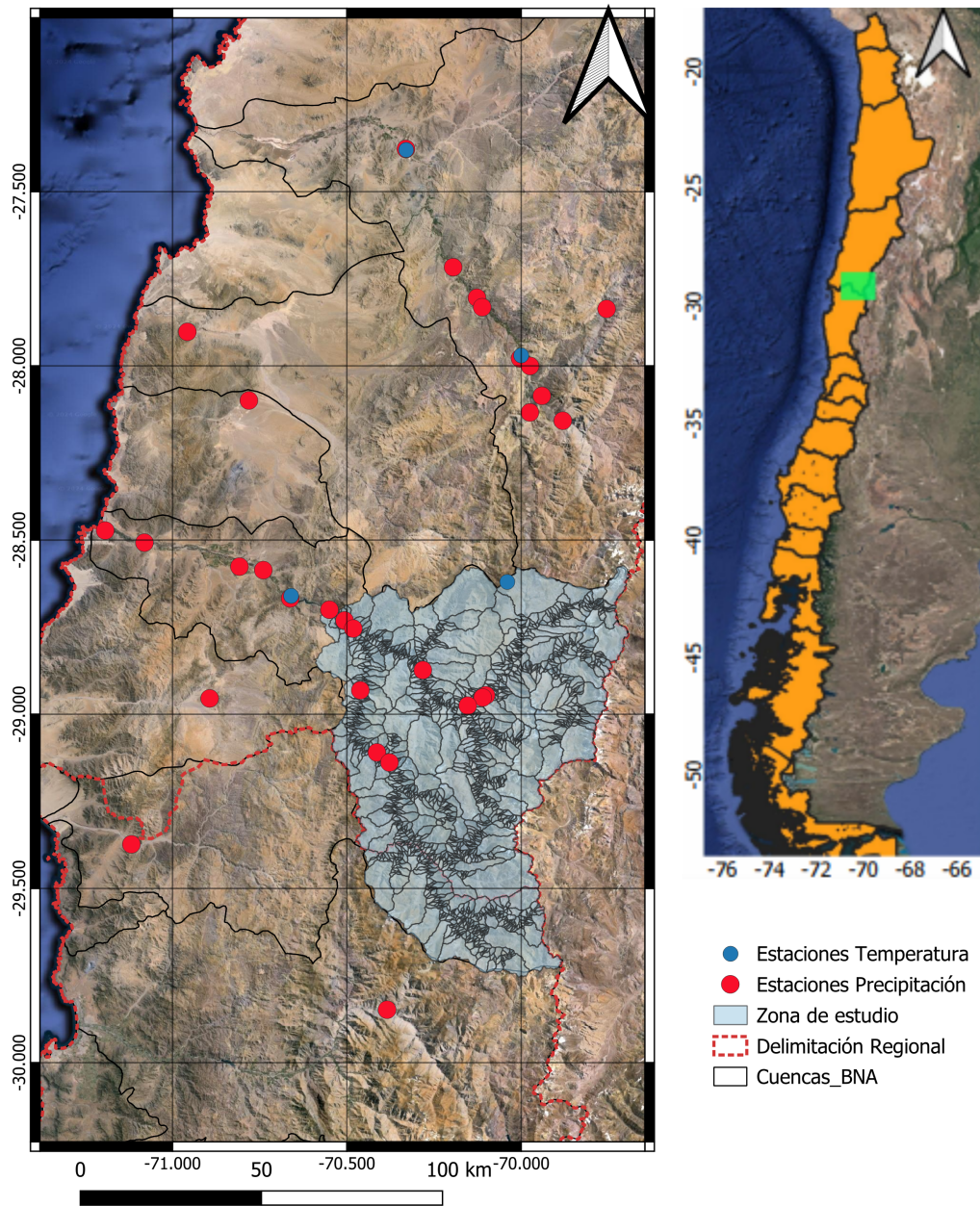


Figura 3.1: Zona de estudio con estaciones fluviométricas y meteorológicas utilizadas para el trabajo.

Subcuencas del río el Carmen y río el Tránsito, Región de Atacama, Chile.

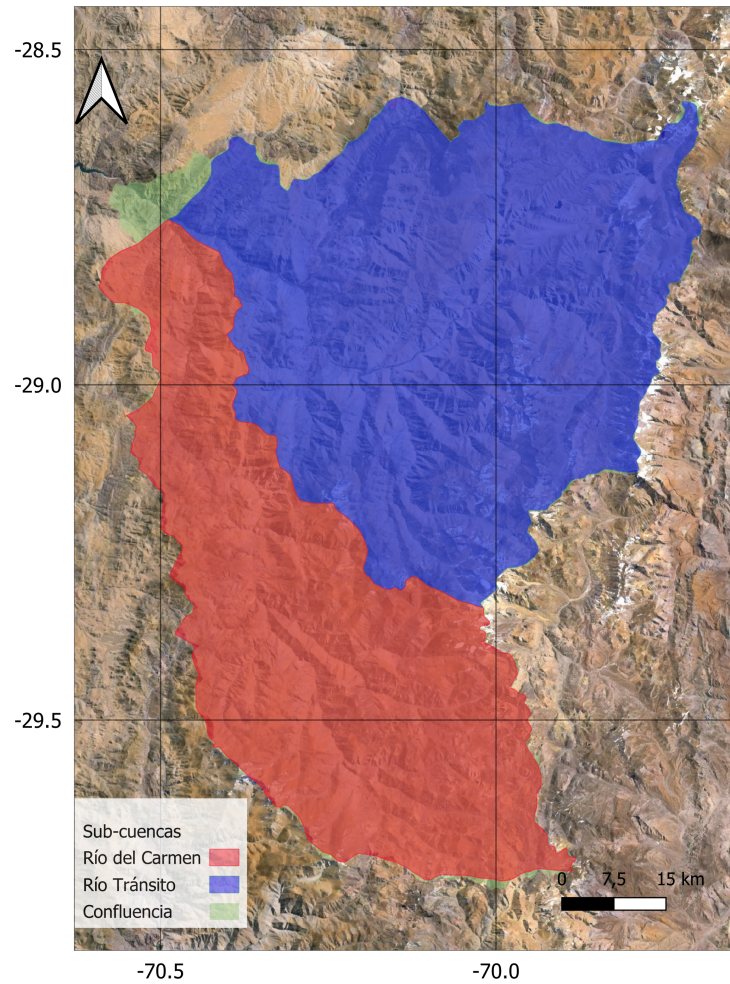


Figura 3.2: Subcuencas río el Carmen y río el Tránsito

3.1. Curvas hipsométricas

En la Figura 3.3 se presentan las curvas hipsométricas de las principales subcuencas del estudio. Las elevaciones de las subcuencas río el Carmen y río el Tránsito son similares, teniendo valores menores a 2000 [m.s.n.m] hasta los 6000 [m.s.n.m]. La subcuenca confluencia muestra elevaciones con valores entre los 1000 y 2500 [m.s.n.m] (Jiménez, 2022). Fuente: (Jiménez, 2022)

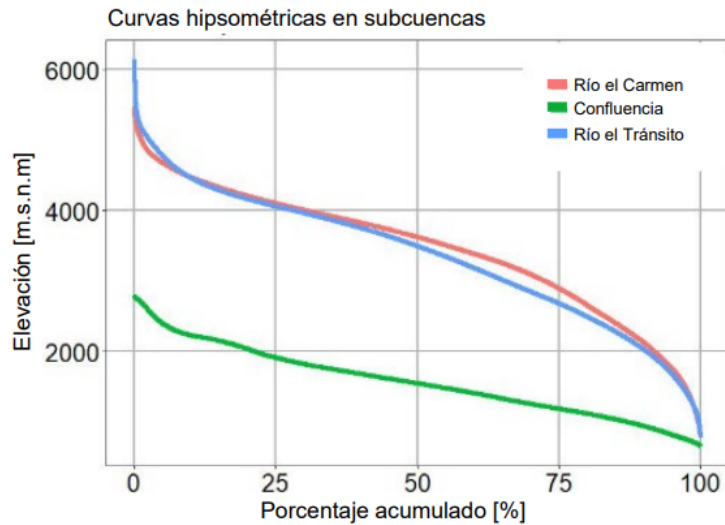


Figura 3.3: Curvas hipsométricas de subcuencas río el Carmen y río el Tránsito.

3.2. Clima y línea de nieve

En la Figura 3.4 se muestra la distribución mensual de temperatura, precipitación y línea de nieves promedio en la cuenca de estudio. En los meses de invierno la temperatura disminuye y la precipitación aumenta, lo cual induce una reducción de la línea de nieves en la cuenca. Los montos de precipitación promedio mensual se concentran en los meses de otoño e invierno (mayo-agosto), siendo máximos en el mes de julio con 35 [mm/mes]. La temperatura se encuentra en un rango promedio entre los 14 [°C] como máxima y 3 [°C] como mínima (Jiménez, 2022).

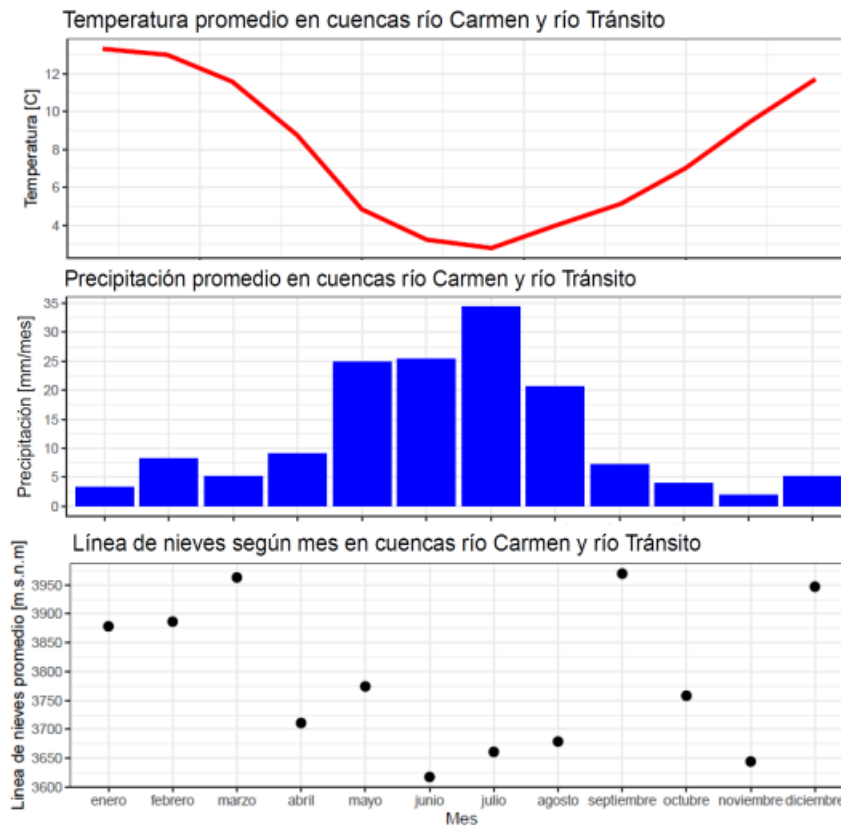


Figura 3.4: Climatología y línea de nieves en cuenca de estudio. Climatología es obtenida a partir del producto CR2MET (Boisier et al., 2018) y línea de nieves a partir del producto satelital de cobertura de nieves MODIS (NASA, 2021). Fuente:(Jiménez, 2022).

3.3. Geología y Hidrogeología

Las formaciones geológicas en las cuencas presentan una alta gama de rocas, destacándose Kilm de tipo sedimentaria del Cretácico inferior y secuencias sedimentarias marinas litorales (calizas calcarenitas areniscas, margas y coquinas) (Dirección General de Aguas (DGA), 2004). En particular, los ríos de la cuenca se encuentran sobre rellenos de depósitos fluviales, depósitos no consolidados; gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación (Dirección General de Aguas (DGA), 2004).

En la Figura 3.5 se muestra el mapa hidrogeológico de las subcuencas río Carmen y Tránsito. En la parte alta destaca la existencia de permeabilidad muy baja, debido a la existencia de rocas plutónicas e hipabisales del paleozoico formado por intrusivos graníticos y basamentos impermeables junto con rocas volcánicas, coladas y depósitos piroclásticos reolíticos, dacíticos, andesíticos y basálticos del período jurásico de muy baja permeabilidad.

El escurrimiento es en sentido NNW, para luego virar en las cercanías de Alto del Carmen en sentido NWW, desde esta ciudad en adelante la permeabilidad se hace de media a alta al pasar de rocas sedimentarias – volcánicas depósitos no consolidados o rellenos, encajonadas por intercalaciones de rocas sedimentarias, plutónicas e hipabisales. A partir de Vallenar existen recargas del río Huasco por afloramientos (Pozo Dirección General de Aguas con nivel freático de 1 m) los cuales continúan hasta su desembocadura (Dirección General de Aguas (DGA), 2004).

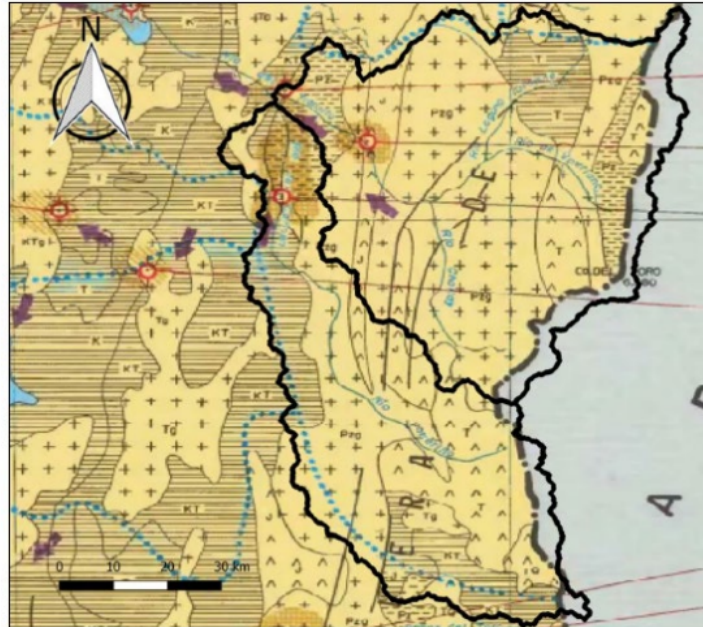


Figura 3.5: Mapa hidrogeológico de cuenca de estudio. Fuente: (Jiménez, 2022) adaptada de (Dirección General de Aguas (DGA), 2004). 14

Capítulo 4

Metodología

Esta sección detallará la metodología empleada para la selección y procesamiento de los datos utilizados en el estudio. Se describirá el proceso de extracción y preparación de los datos simulados para su posterior análisis comparativo. Asimismo, la construcción de curvas de precipitación duración área, y finalmente se explicará los pasos a seguir para la construcción del modelo hidrológico.

Se trabajará con un modelo hidrológico semi-distribuido con la plataforma Raven construido por Jiménez (2022). Para generar simulaciones hidrológicas distribuidas se utilizó el producto CR2MET (Boisier et al., 2018) corregido con observaciones de estaciones meteorológicas y desagregado temporalmente con el reanálisis grillado ERA5-Interim (Hrachowitz y Clark, 2017) lo que de ahora en adelante llamaremos modelo hidrológico CR2MET.

Para verificar la aplicabilidad de las simulaciones WRF-SAAG, las que se utilizarán para simular hidrológicamente la cuenca del río Huasco, se ocupará el modelo hidrológico mencionado anteriormente pero se modificarán las forzantes meteorológicas, utilizando las simulaciones WRF-SAAG, lo que llamaremos de ahora en adelante modelo hidrológico WRF. Luego, se estudiarán los resultados mediante métricas para evaluar el desempeño del modelo.

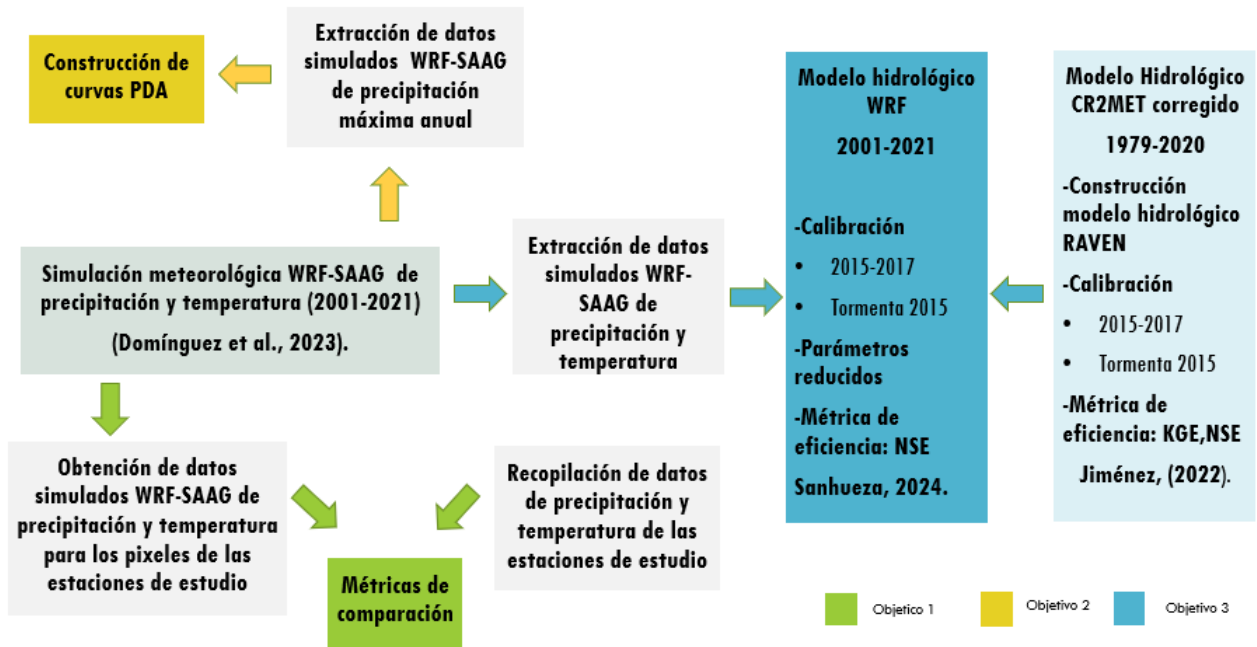


Figura 4.1: Resumen de actividades desarrolladas durante el estudio.

4.1. Análisis de datos de precipitación y temperatura

En el marco del presente estudio, se realiza un análisis de los datos generados por el Sistema de Análisis Atmosférico Regional (SAAG) basado en el modelo Weather Research and Forecasting (WRF), con el propósito de evaluar su capacidad para replicar las condiciones meteorológicas observadas en un área geográfica específica de interés.

Para llevar a cabo esta evaluación, se contrastarán los datos de precipitación y temperatura, generados por el WRF-SAAG con observaciones in situ recopiladas de una red compuesta por 30 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de la mencionada área. Estas estaciones, gestionadas por la DGA, proporcionan registros que sirven como referencia, los que se llamarán datos observados. Las estaciones elegidas tienen diferentes periodos de existencia de datos, lo importante es que se estudia la comparación de datos de estaciones y los extraídos de la simulación WRF-SAAG solo cuando existe datos en las estaciones. Como el estudio es de la eficiencia de las simulaciones WRF-SAAG en comparación de las estaciones, no importa la cantidad de datos que tengan las estaciones.

El análisis cuantitativo de la correlación entre los datos simulados y observados se llevará a cabo mediante la aplicación de diversas métricas estadísticas, incluyendo el error medio, Pbias, el error cuadrático medio, y el coeficiente de correlación de Pearson. Estas métricas permitirán una evaluación de la precisión de la simulación WRF-SAAG.

Los datos utilizados, de la simulación WRF-SAAG en este estudio se han extraído de los píxeles más cercanos a las coordenadas de longitud y latitud correspondientes a cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Esta aproximación garantiza una correlación espacial directa entre los datos simulados por el WRF-SAAG y los datos observados. Para capturar adecuadamente la variabilidad y tendencias de los eventos meteorológicos a lo largo del tiempo, los datos son extraídos a escala horaria de la simulación WRF-SAAG. Luego, la precipitación ha sido acumulada para obtener series de datos diarios. Por otro lado, para la temperatura se ha calculado un promedio diario. El periodo de tiempo seleccionado para este análisis se extiende desde el 1 de enero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2021.

4.1.1. Datos utilizados

La comparación de los datos simulados con las observaciones reales se realizará tomando como referencia los registros de las estaciones meteorológicas con datos de precipitación diaria y temperatura media diaria, las estaciones de temperatura se presentan en la Tabla 4.1 y las estaciones de precipitación se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1: Estaciones de medición de temperatura

Fuente	Nombre	Longitud	Latitud	Estación
DGA	Copiapó	-70.33	-27.38	E1
DGA	Lautaro Embalse	-70.00	-27.97	E2
DGA	Portezuelo el Gaucho	-70.04	-28.62	E3
DGA	Santa Juana	-70.66	-28.66	E4

Tabla 4.2: Estaciones de medición de precipitación

Fuente	Nombre	Longitud	Latitud	Estación
DGA	Copiapó	-70.33	-27.38	E1
DGA	Elibor Campamento	-70.20	-27.72	E2
DGA	Río Copiapó en la Puerta	-70.13	-27.80	E3
DGA	Los Loros	-70.11	-27.83	E4
DGA	Jorquera en la guardia	-69.76	-27.84	E5
DGA	El Totoral	-70.96	-27.90	E6
DGA	Lautaro Embalse	-70.00	-27.98	E7
DGA	Río Copiapó en Pastillo	-69.97	-28.00	E8
DGA	Río Pulido en Vertedero	-69.94	-28.09	E9
DGA	Canto de Agua	-70.78	-28.10	E10
DGA	Manflas	-69.98	-28.13	E11
DGA	Iglesia Colorada	-69.88	-28.16	E12
DGA	Huasco Bajo	-71.19	-28.47	E13
DGA	Freirina	-71.08	-28.51	E14
DGA	La Compañía (Vallenar)	-70.81	-28.58	E15
DGA	Vallenar	-70.74	-28.59	E16
DGA	Santa Juana	-70.66	-28.67	E17
DGA	Río Huasco en Chépica	-70.55	-28.70	E18
DGA	Río Huasco en Algodones	-70.51	-28.73	E19
DGA	Junta del Carmen	-70.48	-28.75	E20
DGA	El Transito	-70.28	-28.87	E21
DGA	San Félix	-70.46	-28.93	E22
DGA	Río Conay en las Lozas	-70.10	-28.95	E23
DGA	Conay en Albaricoque	-70.11	-28.95	E24
DGA	Domeyko	-70.89	-28.95	E25
DGA	Conay	-70.15	-28.98	E26
DGA	Río Carmen en El Corral	-70.41	-29.10	E27
DGA	El Corral	-70.37	-29.13	E28
DGA	El Trapiche	-71.11	-29.37	E29
DGA	Huanta	-70.38	-29.84	E30

4.1.2. Análisis datos de precipitación y temperatura

Los datos de la simulación WRF-SAAG de precipitación y temperatura tiene un formato NetCDF, el cual corresponde a un archivo por mes desde el año 2001 al 2021. Para la extracción y análisis de estos se utilizaron las librerías de Python xarray, pandas y numpy. La librería xarray (Hoyer y Hamman, 2017) facilitó el manejo de datos multidimensionales

etiquetados, como los formatos netCDF comunes en climatología. Pandas (McKinney, 2010) permitió el manejo de series temporales y datos tabulares, realizando operaciones como agrupamiento por fechas y cálculo de estadísticas, mientras que numpy (Harris, Millman, van der Walt, et al., 2020) proporcionó las herramientas necesarias para realizar cálculos numéricos rápidos sobre grandes arrays. Esta combinación de herramientas ofreció una plataforma para manipular y analizar eficientemente grandes volúmenes de datos climáticos.

Una vez que se ha completado la extracción de datos y se han preparado las series de tiempo de precipitación para el periodo de estudio, el siguiente paso crucial es el cálculo de métricas estadísticas que permitan cuantificar las diferencias entre los datos observados y los simulados.

Error medio (EM):

En el contexto de este estudio, el EM se utiliza para evaluar la precisión del modelo SAAG-WRF en la simulación de la precipitación y temperatura diaria a lo largo del periodo de estudio, comparando estas simulaciones con las mediciones reales obtenidas de las estaciones meteorológicas. El EM es una métrica que calcula la diferencia promedio entre los valores predichos y los valores observados reales. Se define como la suma de todas las diferencias individuales (sin considerar la dirección de la diferencia) dividida por el número total de observaciones. Esta métrica es particularmente útil para identificar si el modelo tiene tendencia a sobrestimar o subestimar las mediciones.

La ecuación para calcular EM (James, Witten, Hastie, y Tibshirani, 2013) se define como:

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (4.1)$$

donde:

- N es el número total de observaciones.
- P_i representa los valores simulados i .
- O_i representa los valores observados reales para la observación i .

Error Cuadrático Medio Raíz (RMSE):

A diferencia del EM, el RMSE da mayor peso a los errores grandes, ya que estos se elevan al cuadrado antes de calcular el promedio, y luego se extrae la raíz cuadrada del resultado. Esto hace que el RMSE sea particularmente sensible a los outliers.

El RMSE mide la magnitud de los errores entre los valores predichos y los valores observados, ofreciendo una idea de cuán dispersas están estas diferencias. Es especialmente útil para

entender el tamaño de los errores en las mismas unidades que las de la variable de interés, facilitando su interpretación.

La ecuación para calcular el RMSE (James et al., 2013) se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (4.2)$$

donde:

- N es el número total de observaciones.
- P_i representa los valores simulados i .
- O_i representa los valores observados reales para la observación i .

Porcentaje de Sesgo (PBIAS):

El PBIAS es otra métrica importante utilizada para evaluar la precisión de las predicciones de las simulaciones SAAG-WRF. Esta métrica mide la tendencia promedio de las predicciones simuladas a ser mayores o menores que sus correspondientes observaciones reales. Un PBIAS cercano a cero indica un sesgo muy bajo, es decir, que el modelo no tiene una tendencia sistemática a sobreestimar o subestimar las observaciones. Valores positivos indican una subestimación sistemática por parte del modelo, mientras que valores negativos indican una sobreestimación.

El PBIAS proporciona un indicador claro de la tendencia promedio del error en las predicciones del modelo en relación con las observaciones reales. Al expresarse en porcentaje, facilita la interpretación de la magnitud del sesgo en comparación con los valores observados.

Para calcular el PBIAS (Moriasi et al., 2007) en este contexto, donde se compara la suma de la precipitación promedio anual observada con la simulada, la ecuación se modifica de la siguiente manera:

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{a=1}^A (\sum_{i=1}^{N_a} P_{ai} - \sum_{i=1}^{N_a} O_{ai})}{\sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{N_a} O_{ai}} \right) \times 100 \quad (4.3)$$

donde:

- A es el número total de años en el período de estudio.
- N_a es el número de observaciones (días con precipitación) en el año a .
- O_{ai} representa el valor observado de precipitación en el día i del año a .
- P_{ai} representa el valor simulado de precipitación en el día i del año a .

El Coeficiente de Correlación de Pearson:

Mide la correlación lineal entre las series de tiempo de precipitación observada y simulada, se define como:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (4.4)$$

donde:

- n es el número total de observaciones en las series de tiempo.
- O_i representa el valor de la precipitación observada en el tiempo i .
- S_i representa el valor de la precipitación simulada en el tiempo i .
- \bar{O} es el promedio de los valores de precipitación observada.
- \bar{S} es el promedio de los valores de precipitación simulada.

Este coeficiente varía entre -1 y 1, donde 1 indica una correlación positiva perfecta, -1 una correlación negativa perfecta, y 0 ninguna correlación lineal entre las series de tiempo observada y simulada.

4.1.2.1. Análisis de datos de precipitación tormenta 2015 y 2017

Durante los días 23, 24 y 25 de marzo del año 2015 se desarrolló una tormenta en el área norte del país, en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, que provocó una serie de daños debido a los flujos de detritos y barro y a las inundaciones generadas. En particular, en la parte superior de la cuenca del río Huasco, en las áreas de los ríos El Carmen y El Tránsito, un conjunto de quebradas se activaron y desarrollaron flujos aluvionales que afectaron a la población, dañando viviendas y zonas agrícolas (Gómez, Cepeda, Lagos, y Montserrat, 2017).

La cuenca del río Huasco ha sido una zona afectada por múltiples tormentas desencadenantes de aluviones (Aguilar, Cabre, Fredes, y Villela, 2020). Como el estudio de Jiménez,(2022) se centra en el estudio aluvional, se analizarán las tormentas de marzo 2015 y mayo 2017 que son eventos con montos de precipitación que superan los 50 (mm) en todas las quebradas de estudio.

Se presenta una comparación a escala horaria de las simulaciones WRF-SAAG con las estaciones que presentaban datos de manera horaria en la cuenca y luego se compara el producto grillado CR2MET (Boisier et al., 2018) y las simulaciones WRF-SAAG con las estaciones correspondientes, calculando el Pbias %.

4.2. Construcción de Curvas Precipitación Duración Área

4.2.1. Datos Utilizados

Para la construcción de las curvas precipitación duración área, se extrajo la precipitación horaria de todos los píxeles de un área de estudio que se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Intervalo de extracción de píxeles para el cálculo de PDA

Longitud	Latitud
[- 69.50,-70.50]	[- 28.50,-30.00]

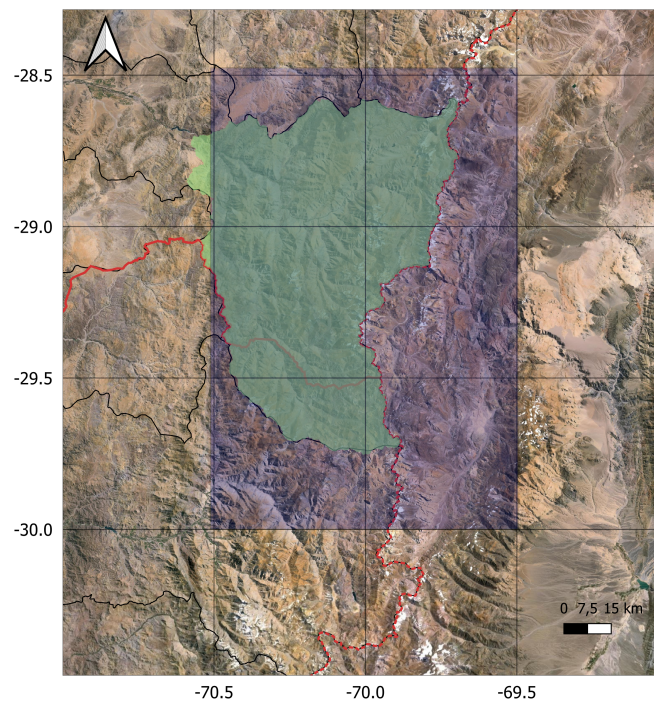


Figura 4.2: Zona de extracción de precipitación para la construcción de las PDA.

4.2.2. Construcción Curvas Precipitación Duración Área

La construcción de las curvas PDA involucra un proceso detallado que comienza con la extracción de datos de precipitación simulada para un área específica. Esta área se define mediante coordenadas que delimitan cada punto de grilla, señalados anteriormente.

Luego se identifico el evento de precipitación máxima de 24 horas para cada año, y se extrajo la serie de precipitación horaria de las simulaciones WRF-SAAG. Esta selección de eventos máximos permite concentrarse en los episodios más significativos desde el punto de vista hidrológico.

Posteriormente, los datos de precipitación horaria seleccionados se organizan en orden descendente, de mayor a menor. Se analiza la precipitación acumulada por píxel, teniendo en cuenta que cada píxel representa una superficie de área constante.

Se replica la metodología para el evento de precipitación máxima pero con duraciones de 18, 12, 6, 2 y 1 hora(s), respectivamente. Esto permite capturar la variabilidad de la precipitación en diferentes escalas temporales, ofreciendo una visión más completa de la capacidad del área de estudio para experimentar eventos de precipitación intensa en períodos cortos. Con los datos recopilados y organizados para todas las duraciones especificadas, se procedió a la generación de curvas de precipitación-duración-área. Estas curvas se construyeron tomando en cuenta el evento máximo de precipitación para las distintas duraciones (18, 12, 6, 2, y 1 hora) a lo largo de todos los años analizados.

4.3. Construcción Modelo Hidrológico

El modelo hidrológico es implementado utilizando la plataforma modular de modelación hidrológica Raven v3 (Craig, J., y Team., R. D., 2020). El modelo considera dos estratos de suelo, basándose en el modelo hidrológico HMETs (Martel, Demeester, Brissette, Poulin, y Arsenault, 2017) y se esquematiza en la Figura 4.3. Este representa los procesos hidrológicos simulados en cada sub-cuenca. Cada proceso hidrológico tiene asociado uno o mas parámetros, que regulan las magnitudes de flujo tanto de entrada como de salida de los reservorios. En el Anexo A se muestran las funciones de los procesos hidrológicos del modelo.

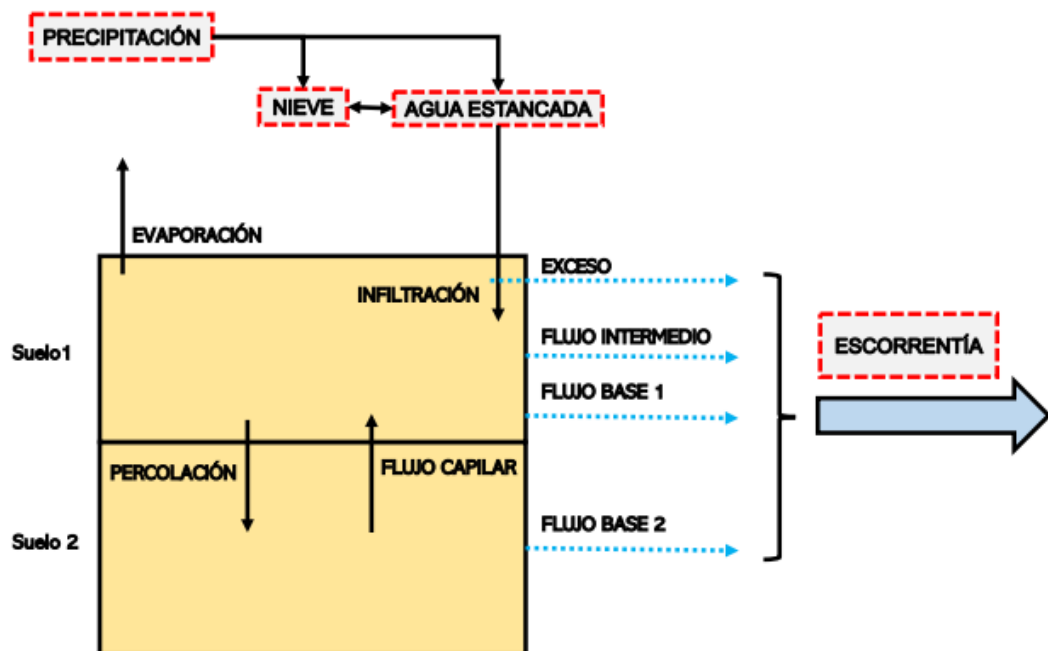


Figura 4.3: Modelo conceptual hidrológico generado en Raven.

La discretización en unidades de respuesta hidrológica (sub-cuenca) fue generada en el programa QGIS, con la extensión QSWAT (Dile, Srinivasan, y George, 2019). Por medio de este programa, es posible generar subcuencas de cualquier área a partir de un DEM (SRTM 30x30 [m]). La discretización final consiste en agregar todas las subcuencas asociadas a una misma quebrada en busca de representar la heterogeneidad de los procesos hidrológicos entre quebradas y ríos, teniendo en cuenta la distinción entre estos tipos de unidades y otorgándole diferentes parámetros. La Figura 4.4 muestra la discretización final.

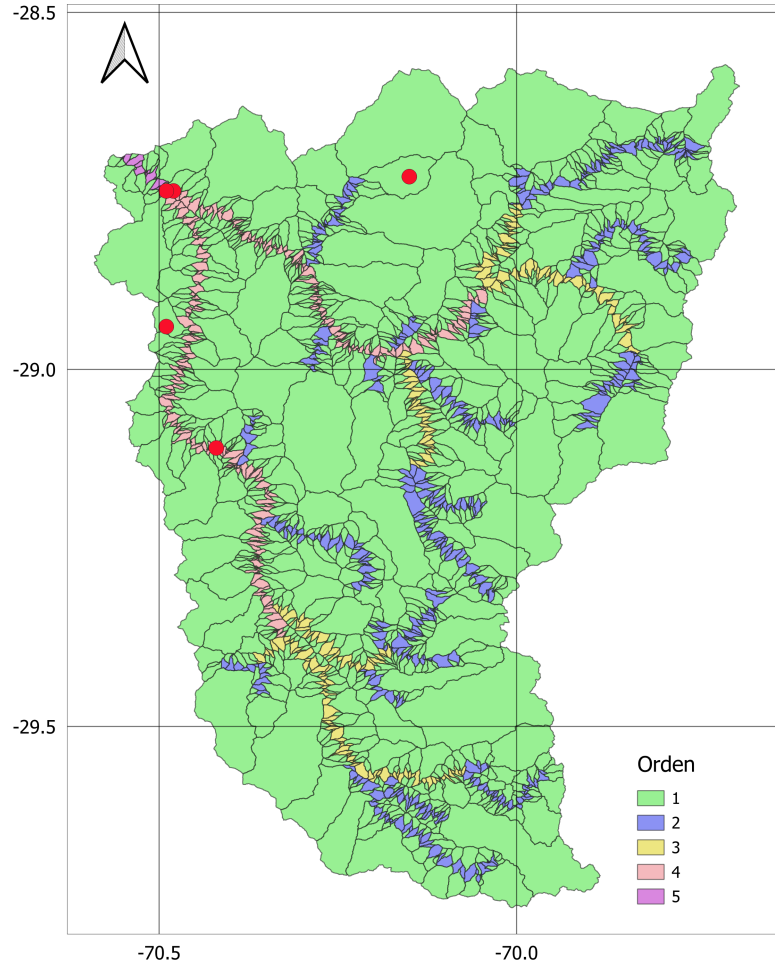


Figura 4.4: Discretización de subcuencas en la zona de estudio, las subcuencas se encuentran coloreadas según el orden de Strahler, las subcuencas con orden de Straler 5,4,3 y 2 son del tipo río. En cambio, las subcuencas con orden 1 son del tipo quebrada. Los puntos rojos representan la ubicación de las estaciones fluviométricas utilizadas para calibrar el modelo hidrológico.

Tabla 4.4: Estaciones fluviométricas utilizadas en el proceso de calibración y validación del modelo hidrológico.

Codigo BNA	Nombre	Nombre	ID RAVEN	Latitud[°]	Longitud[°]
03820001-1	Río Huasco en Algodones	Algodones	11	-28.73	-70.15
03806001-5	Río Transito Antes Junta Río Carmen	Transito	65	-28.75	-70.48
03815001-4	Río Carmen En Ramadillas	Ramadillas	145	-28.75	-70.49
03804002-2	Río Transito En Angostura Pinte	Angostura	207	-28.94	-70.49
03814003-5	Río Carmen En El Corral	Corral	17	-29.11	-70.42

4.3.1. Generación de forzantes meteorológicas WRF-SAAG

Para la generación de los input de temperatura y precipitación WRF-SAAG horaria se trabajó con archivos NetCDF con las coordenadas de latitud y longitud del área de estudio, entre los años 2001 y 2021. Se calculan los pesos basándose en la superposición espacial entre las coordenadas de los datos climáticos y las áreas de las HRUs definidas en los shapefiles. Para lo anterior se emplea el código desarrollado por Han et al., (2020).

Para desarrollar el modelo hidrológico, se emplearon datos WRF-SAAG durante el periodo analizado. El proceso se realizó utilizando archivos NetCDF mencionados anteriormente, que contenían datos de precipitación y temperatura a escala horaria de la zona de estudio.

Tabla 4.5: Intervalo de extracción de píxeles para el cálculo de modelo hidrológico

Longitud	Latitud
[- 69.57,-70.88]	[- 28.48,-30.08]

4.3.2. Calibración de modelo hidrológico WRF

Los parámetros de un modelo hidrológico pueden ser uniformes o distribuidos en el total de subcuencas de la zona de estudio. La asignación uniforme implica que todas las subcuencas tendrán los mismos parámetros calibrados. Sin embargo, la calibración uniforme de parámetros no permite generar representaciones heterogéneas de los procesos hidrológicos, ya que todas las subcuencas se parametrizan de igual manera. Al contrario, la calibración distribuida permite obtener valores diferentes en las subcuencas para un parámetro determinado.

En este modelo se genera una calibración distribuida en toda la cuenca. Los parámetros a calibrar se redujeron a los que tenían mayor variabilidad, con el objetivo de disminuir el costo computacional de la calibración. En el Anexo B se encuentra la calibración del modelo CR2MET. En la Tabla B.1 se muestran los parámetros calibrados:

Tabla 4.6: Resumen de parámetros por proceso calibrados nuevos

Proceso	Parámetro	Mínimo	Máximo	Unidad	Tipo
Infiltración	β	0.5	3	-	Perfil de suelo
	Swilt	0	0.9	-	Perfil de suelo
	Sfc	0	0.9	-	Perfil de suelo
Flujo base	Mmax	0.001	1000	mm/d	Perfil de suelo

Para la calibración del modelo nuevo se utilizó el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe

(NSE), que es una estadística utilizada para evaluar la precisión de las simulaciones en modelos hidrológicos. Este coeficiente determina qué tan bien la gráfica de los valores observados se ajusta a la serie de datos modelados.

La ecuación del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) se define como:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{\text{obs},t} - Q_{\text{mod},t})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{\text{obs},t} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2} \quad (4.5)$$

donde:

- $Q_{\text{obs},t}$ es el caudal observado en el tiempo t ,
- $Q_{\text{mod},t}$ es el caudal modelado (o simulado) en el tiempo t ,
- \bar{Q}_{obs} es el caudal medio observado para el período de tiempo considerado,
- T es el número total de pasos de tiempo.

El NSE puede tomar valores desde $-\infty$ hasta 1. Un valor de 1 indica un ajuste perfecto entre los caudales modelados y observados. Un valor de 0 indica que el modelo predice tan bien como el promedio de los datos observados, mientras que un valor negativo indica que el modelo tiene un rendimiento peor que el promedio de las observaciones. El NSE es ampliamente utilizado porque resume la precisión de las predicciones en un solo número, facilitando la comparación entre diferentes modelos o enfoques de modelado.

La calibración del modelo hidrológico se desarrolla considerando un periodo para obtener métricas de rendimiento en dos estaciones simultáneamente, este periodo se indica a continuación:

- 2015-01-01 a 2018-01-01: Corresponde a un periodo de tres años en los cuales se generan eventos de crecidas con bastantes datos fluviométricos para calibrar en las estaciones utilizadas.
- 2015-01-01 a 2015-03-01: Corresponde a un periodo de tres meses en los cuales se generan eventos de crecidas con bastantes datos fluviométricos para calibrar en las estaciones utilizadas.

Con respecto al algoritmo de optimización de parámetros, se utiliza el algoritmo Dynamically dimensioned search (Tolson y Shoemaker, 2007).

4.3.3. Métrica de eficiencia

A continuación se define la métrica de eficiencia utilizada para generar la función objetivo de error empleada en el proceso de calibración del modelo hidrológico.

Eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE):

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{o,i} - y_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{o,i} - \bar{y}_o)^2} \quad (4.6)$$

Donde $y_{o,i}$ y $y_{s,i}$ son el caudal observado y simulado en el paso de tiempo i , respectivamente; \bar{y}_o denota el valor promedio de la serie de caudales observados y n es el número de datos considerados en la serie observada de caudales.

Para calibrar con la métrica NSE, se consideran los siguientes rangos de rendimiento:

- **Buen ajuste:** $\text{NSE} \geq 0.75$
- **Ajuste intermedio:** $0.75 > \text{NSE} \geq 0.5$
- **Ajuste pobre:** $0.5 > \text{NSE} > 0$
- **Ajuste muy pobre:** $\text{NSE} \leq 0$

Capítulo 5

Resultados

La sección de resultados presenta un análisis de los datos recopilados y procesados a partir de las simulaciones realizadas con el modelo WRF-SAAG, así como su comparación con las mediciones obtenidas de las estaciones meteorológicas distribuidas en el área de estudio. Esta comparativa se centra en evaluar la precisión y fiabilidad del modelo a través de una serie de métricas estadísticas, aplicadas tanto a los datos de precipitación como de temperatura. Además, se discute la construcción y análisis de las curvas de precipitación-duración-área, identificando los eventos máximos de precipitación para diferentes duraciones y su distribución espacial a lo largo del periodo de estudio. Donde finalmente se explica y presentan los resultados de la modelación hidrológica Raven con datos de WRF-SAAG como inputs meteorológicos.

5.1. Análisis Datos de precipitación

5.1.1. Métricas anuales y totales

En la siguiente sección, se detalla el desempeño del modelo a través de métricas de rendimiento, evaluadas tanto anualmente como en el agregado total para cada estación meteorológica considerada en el estudio. Es importante destacar que, para estos cálculos, se ha excluido la estación E7 y E9 debido a que no existía confiabilidad de las observaciones. Esta decisión se tomó tras una evaluación preliminar que identificó inconsistencias significativas en los datos de esta estación, lo que podría comprometer la validez de las comparaciones generales.

En los gráficos subsiguientes, existe la ausencia de outliers en los boxplots que se atribuye a la metodología estándar para definir outliers, que se basa en el rango intercuartílico (IQR) y emplea límites convencionales (típicamente $Q1 - 1.5IQR$ y $Q3 + 1.5IQR$).

En las Figuras 5.1, 5.2, 5.3,5.4 se muestra para cada métrica un boxplot para cada estación de estudio, la dispersión del boxplot viene dada por el calculo de cada métrica por año y el punto rojo es el promedio de las métricas de todos los datos en el periodo de estudio.

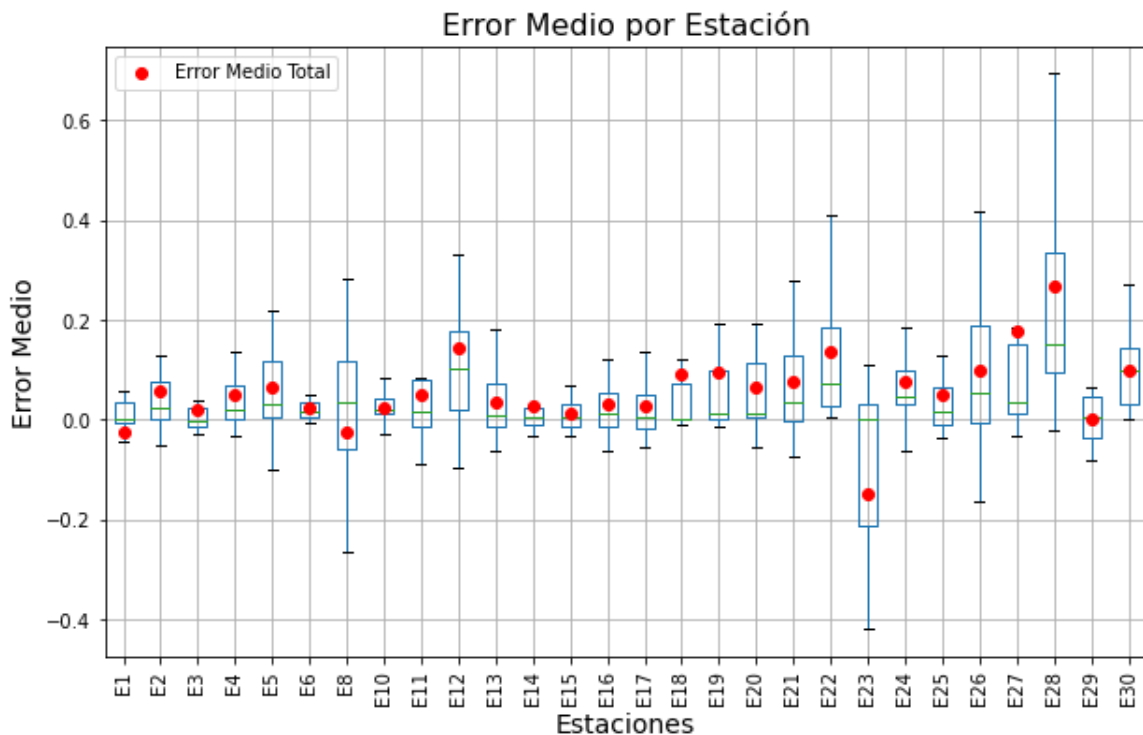


Figura 5.1: Error Medio Precipitación [mm], la dispersión del boxplot viene dada por el calculo de cada métrica por año y el punto rojo es el promedio de las métricas de todos los datos en el periodo de estudio.

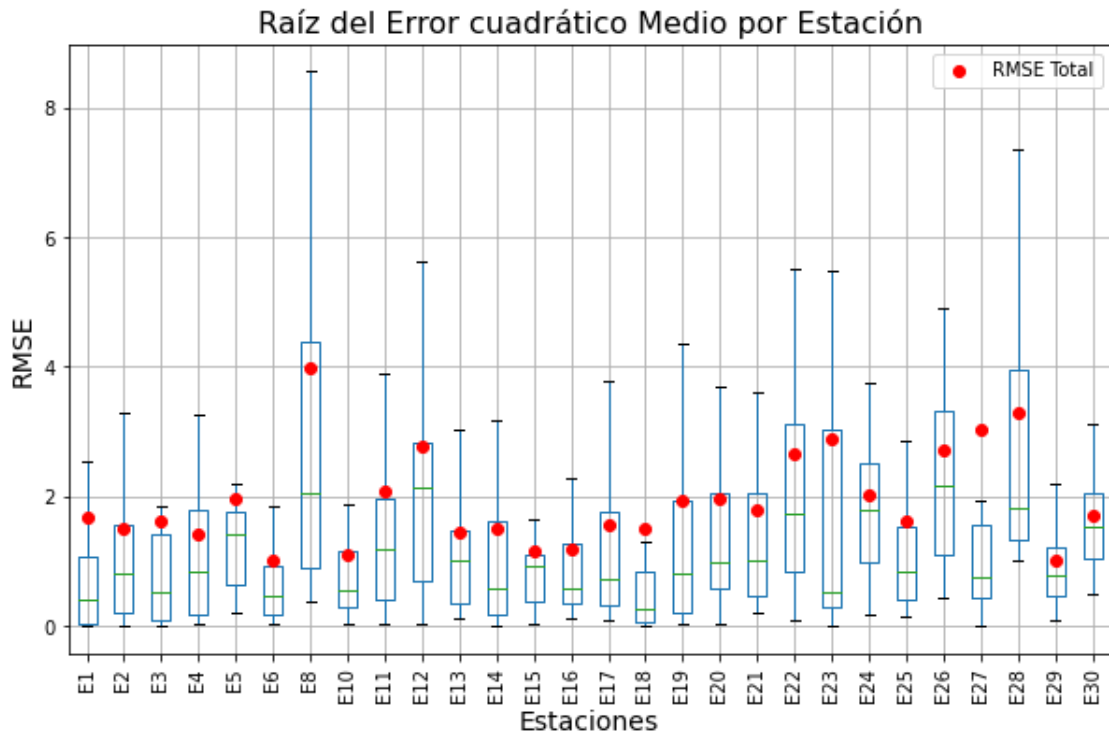


Figura 5.2: RMSE Precipitación [mm], la dispersión del boxplot viene dada por el calculo de cada métrica por año y el punto rojo es el promedio de las métricas de todos los datos en el periodo de estudio.

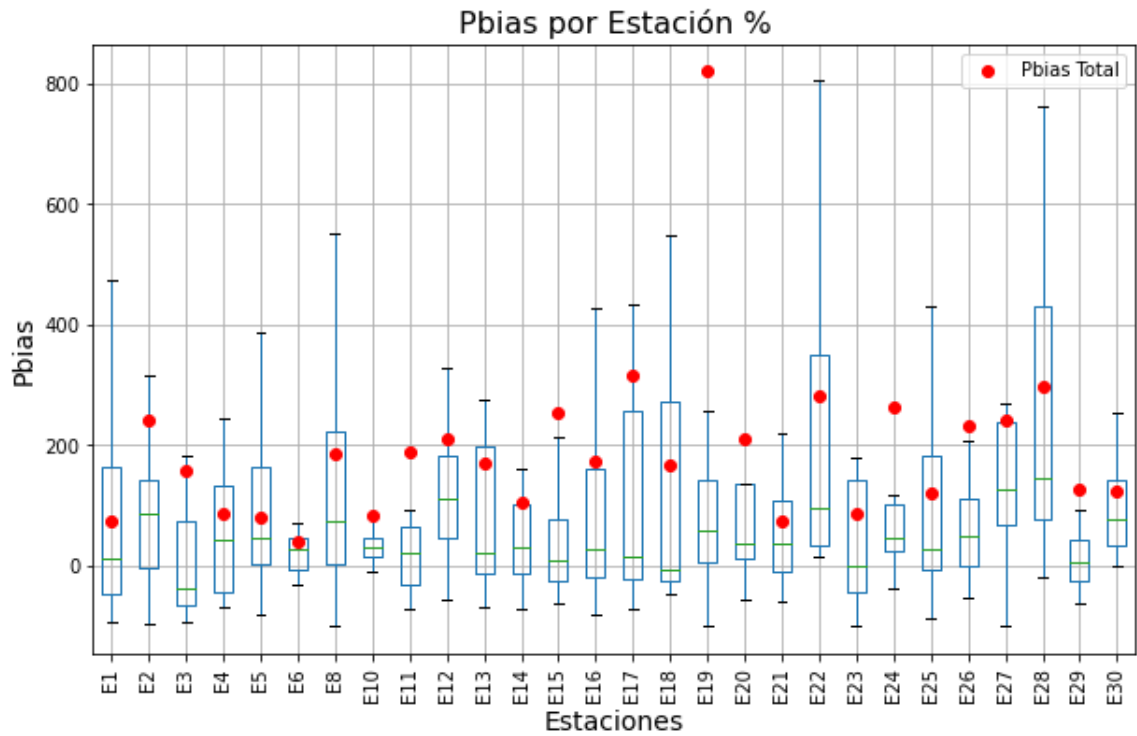


Figura 5.3: pBias Precipitación [%], la dispersión del boxplot viene dada por el calculo de cada métrica por año y el punto rojo es el promedio de las métricas de todos los datos en el periodo de estudio.

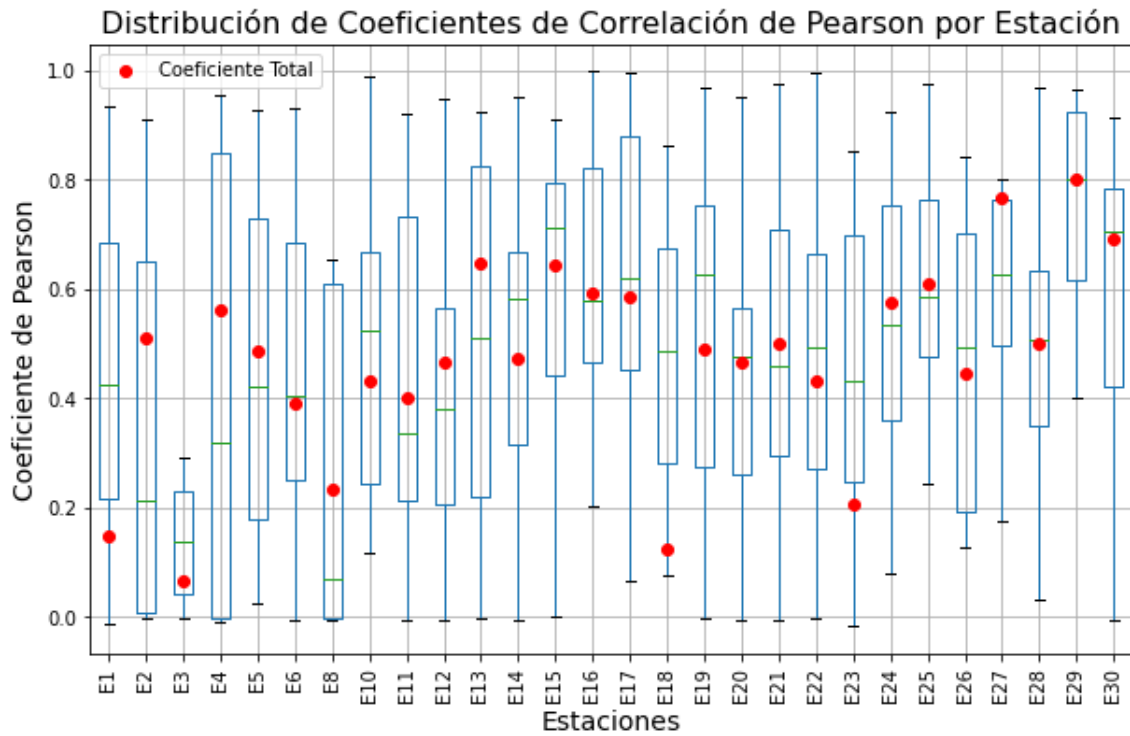


Figura 5.4: Coeficiente de Correlación Pearson Precipitación, la dispersión del boxplot viene dada por el cálculo de cada métrica por año y el punto rojo es el promedio de las métricas de todos los datos en el periodo de estudio.

La tabla 5.1 muestra las métricas totales de precipitación para cada estación.

Tabla 5.1: Métricas totales precipitación para cada estación, que corresponden a los puntos rojos de los gráficos.

Estación	Error medio [mm]	RMSE [mm]	pBias %	r
E1	-0.03	1.67	73.70	0.15
E2	0.06	1.50	239.76	0.51
E3	0.02	1.62	158.42	0.06
E4	0.05	1.42	85.79	0.56
E5	0.07	1.96	78.45	0.49
E6	0.02	1.02	38.33	0.39
E8	-0.03	3.99	186.49	0.23
E10	0.02	1.11	81.38	0.43
E11	0.05	2.06	189.26	0.40
E12	0.14	2.77	208.30	0.46
E13	0.04	1.45	170.68	0.65
E14	0.03	1.49	105.22	0.47
E15	0.01	1.16	252.17	0.65
E16	0.03	1.18	173.75	0.59
E17	0.03	1.56	313.81	0.59
E18	0.09	1.49	164.90	0.12
E19	0.10	1.93	818.83	0.49
E20	0.07	1.97	208.67	0.46
E21	0.08	1.78	73.87	0.50
E22	0.14	2.65	281.71	0.43
E23	-0.15	2.90	86.47	0.20
E24	0.08	2.01	262.29	0.58
E25	0.05	1.63	119.28	0.61
E26	0.10	2.71	230.87	0.45
E27	0.18	3.03	240.92	0.77
E28	0.27	3.29	296.96	0.50
E29	0.00	1.02	124.66	0.80
E30	0.10	1.71	124.34	0.69

Según el análisis el error medio varía desde un mínimo de -0.15 hasta un máximo de 0.27, si el valor es negativo indica que el modelo subestima las observaciones mientras que si es positivo señala una sobreestimación de las observaciones. No obstante, la mayoría de las estaciones presentan errores medios cercanos a cero, lo que implica que el modelo se ajusta razonablemente bien a las observaciones en general, sin mostrar una tendencia clara a sobreestimar o subestimar de manera significativa la precipitación total.

En cuanto al RMSE, se observa una variabilidad considerable en su magnitud entre las estaciones, oscilando desde 1.02 hasta 3.99, lo que refleja diferencias significativas en la precisión del modelo a lo largo de diversas ubicaciones. Un RMSE bajo, como los observados en las estaciones E6 y E29 con valores de 1.02, sugiere un buen desempeño de las simulaciones. Por el contrario, un RMSE elevado, tal como el de 3.99 en la estación E8, podría reflejar problemas en la precisión del modelo en esa localidad específica.

Si el valor del pBias es negativo indica una subestimación de las precipitaciones observadas, mientras que si es positivo refleja una sobreestimación. Esto es crucial para entender cómo las simulaciones maneja la magnitud de las precipitaciones en comparación con las observadas.

Finalmente, los valores del coeficiente de correlación Pearson varían notablemente entre las estaciones, oscilando desde 0.06 hasta 0.80. Esto demuestra una amplia gama en la fuerza y dirección de la relación lineal entre las precipitaciones simuladas y observadas. Por ejemplo, una correlación fuerte y positiva, como la de la estación E29 con un valor de 0.80, indica que las precipitaciones simuladas y observadas están estrechamente alineadas. Por otro lado, un valor bajo como el 0.06 en la estación E3 sugiere una correlación muy débil, indicando que las simulaciones pueden no estar capturando adecuadamente la variabilidad en las precipitaciones observadas.

5.1.2. Estudio tormenta a nivel horario y acumulado para los años 2015 y 2017

Para examinar en detalle el comportamiento de las precipitaciones a nivel horario, en particular durante eventos extremos, se seleccionaron dos de las tormentas más significativas de los últimos años que provocaron aluviones en la zona norte del país: las ocurridas en marzo de 2015 y mayo de 2017. La elección de estos eventos se debe a su relevancia meteorológica y al impacto significativo que tuvieron en términos de precipitaciones intensas y sus consecuencias hidrológicas.

El análisis se enfoca en las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca que disponen de registros horarios de precipitaciones, permitiendo así una evaluación detallada del desarrollo y la intensidad de las tormentas a lo largo del tiempo. Este enfoque posibilita la comparación directa entre los datos observados y los simulados por el modelo WRF-SAAG, poniendo especial atención en la capacidad del modelo para reproducir la dinámica temporal de eventos extremos.

5.1.2.1. Tormenta 2015

Las estaciones que presentaban datos de forma horaria para la tormenta son la estación del río Huasco Figura 5.5 y la estación el Transito Figura 5.6, las precipitaciones comenzaron en la mañana del 24 de marzo y se graficó hasta la tarde del 26 de marzo.

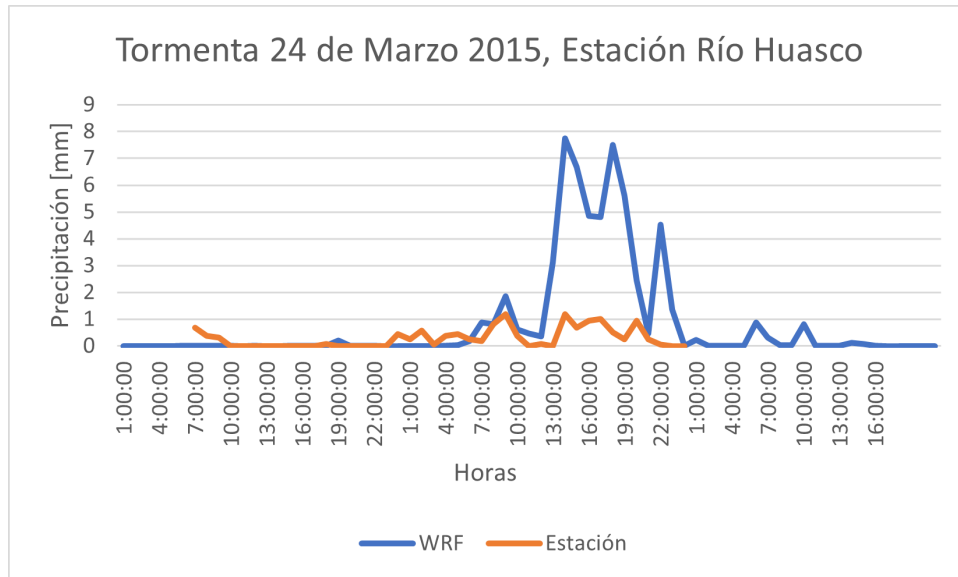


Figura 5.5: Tormenta 24 de Marzo 2015, Estación Río Huasco

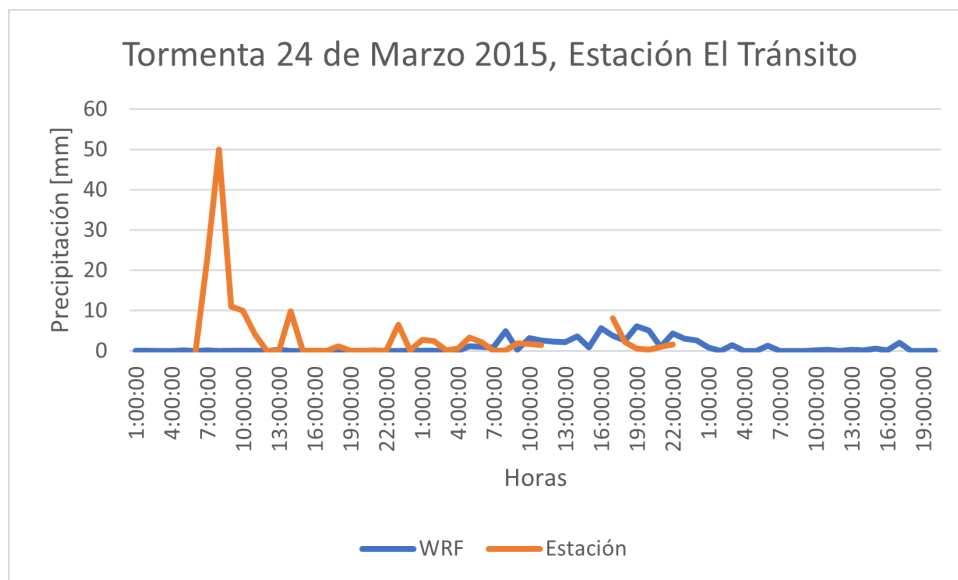


Figura 5.6: Tormenta 24 de Marzo 2015, Estación El Tránsito

Las precipitaciones de cada estación y las precipitaciones WRF-SAAG se encuentran en horario local, es posible observar una discrepancia para la estación del río Huasco, donde

existe una mayor precipitación entre las 10:00 y las 01:00 hrs que las simulaciones son sobreestimadas, mientras que en la estación del Tránsito existe un peak entre las 07:00 y las 10:00 hrs que las simulaciones WRF-SAAG no demuestran.

Para la estación del Tránsito, la precipitación acumulada para 72 horas fue de aproximadamente 43 mm, mientras que las simulaciones WRF-SAAG muestran una precipitación acumulada de 65 mm. Para la estación río Huasco la precipitación acumulada es de 44 mm aproximadamente, según las simulaciones la precipitación acumulada alcanza 57,4 mm.

5.1.2.2. Tormenta 2017

Las estaciones que presentaban datos de forma horaria para la tormenta son la estación San Félix Figura 5.7, la estación del río Huasco Figura 5.8 y la estación el Tránsito Figura 5.9, las precipitaciones de las simulaciones WRF-SAAG comenzaron en la madrugada del 11 de mayo y se graficó hasta la madrugada del 13 de mayo.

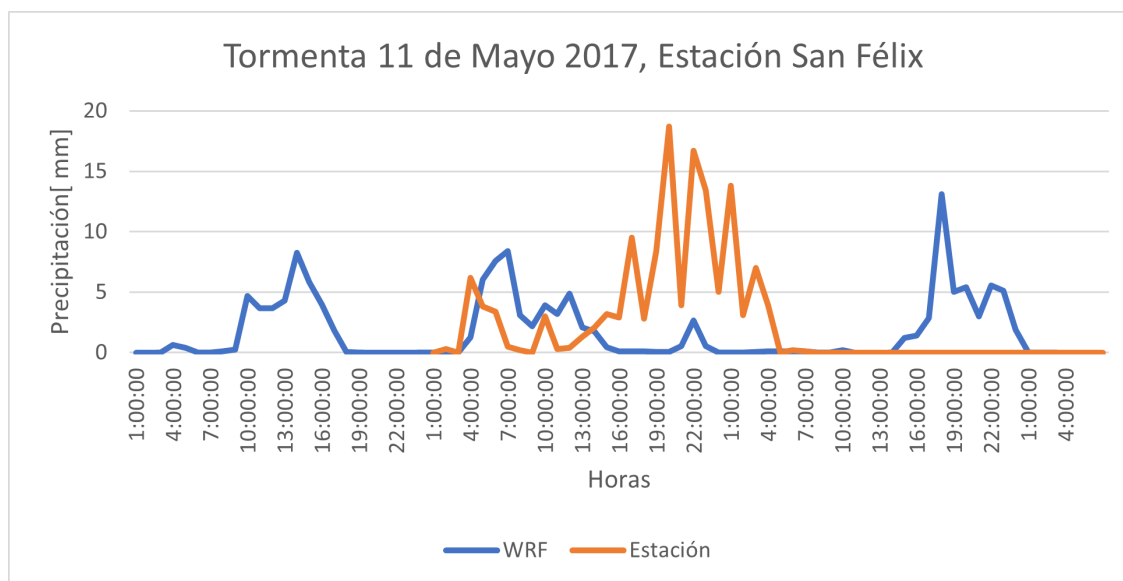


Figura 5.7: Tormenta 11 de Mayo 2017, Estación San Félix



Figura 5.8: Tormenta 11 de Mayo 2017, Estación Tránsito



Figura 5.9: Tormenta 11 de Mayo 2017, Estación Río Huasco

En la estación El Tránsito es posible observar una correspondencia entre las 16:00 y las 01:00 hrs, mientras que en la estación San Félix, entre las 16:00 y las 04:00, existe un aumento en las precipitaciones medidas por la estación, pero no representadas por WRF-SAAG.

Las precipitación acumulada de las estación San Félix es de aproximadamente 33 mm, en cambio las simulaciones WRF-SAAG entrega precipitaciones acumuladas del orden de 130 mm. Para la estación del río Huasco la precipitación acumulada es del orden de los 22 mm y para las simulaciones arrojan una precipitación acumulada del orden de los 100 mm.

En cambio para la estación el Tránsito la precipitación acumulada es del orden de 44 mm

aproximadamente lo que concuerda con las simulaciones WRF-SAAG que son del orden de los 47 mm.

A continuación se presenta las precipitaciones acumuladas de ambas tormentas, representando las estaciones del área de estudio, el producto CR2MET, y las simulaciones WRF-SAAG representando de manera cualitativa las magnitudes de precipitación en la Figura 5.10, luego se presenta el Pbias con respecto a las estaciones representando el sesgo de manera cuantitativa en la Figura 5.11.

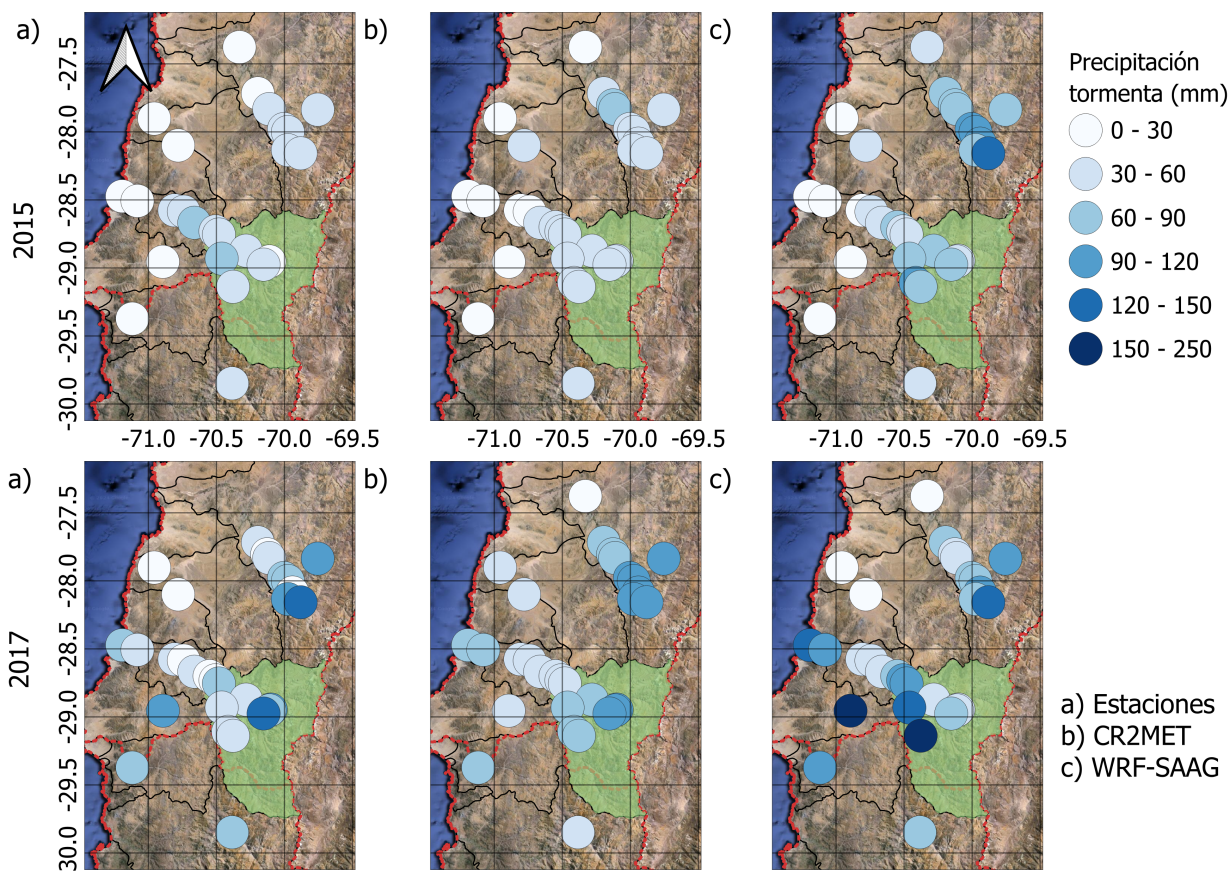


Figura 5.10: Precipitación acumulada, a) Estaciones de estudio, b) producto grillado CR2MET, c) Simulaciones WRF-SAAG, para las tormentas de marzo 2015 y mayo 2017.

Es posible observar que existe una mayor precipitación en las imágenes de las simulaciones WRF-SAAG, representadas en un azul mas oscuro, que se intensifica en la tormenta de 2017.

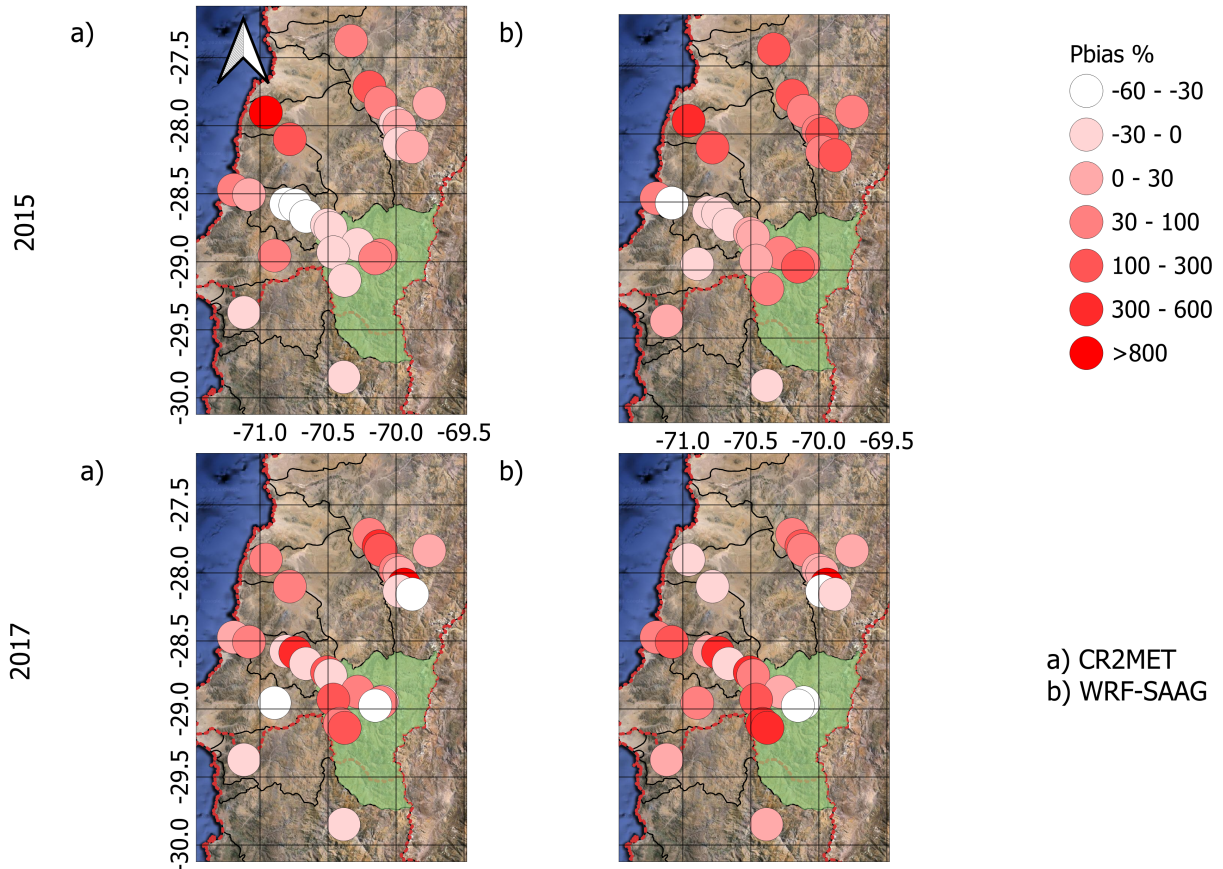


Figura 5.11: Pbias % con respecto a las estaciones de estudio, a) producto grillado CR2MET, b) Simulaciones WRF-SAAG, para las tormentas de marzo 2015 y mayo 2017.

Es posible observar un mayor porcentaje de sesgo en las imágenes b) de las simulaciones WRF-SAAG.

5.2. Análisis datos de temperatura

En esta sección del estudio, se procede a examinar detalladamente las variaciones de temperatura registradas y simuladas a lo largo del periodo comprendido entre el año 2001 y el 2021. Esta comparativa se enfoca en cuatro estaciones estratégicamente seleccionadas dentro del área de estudio, las cuales presentan registros representativos de las variaciones de temperatura en la zona. En la Figura 5.12 se presenta las series de temperatura para los datos observados y simulados.

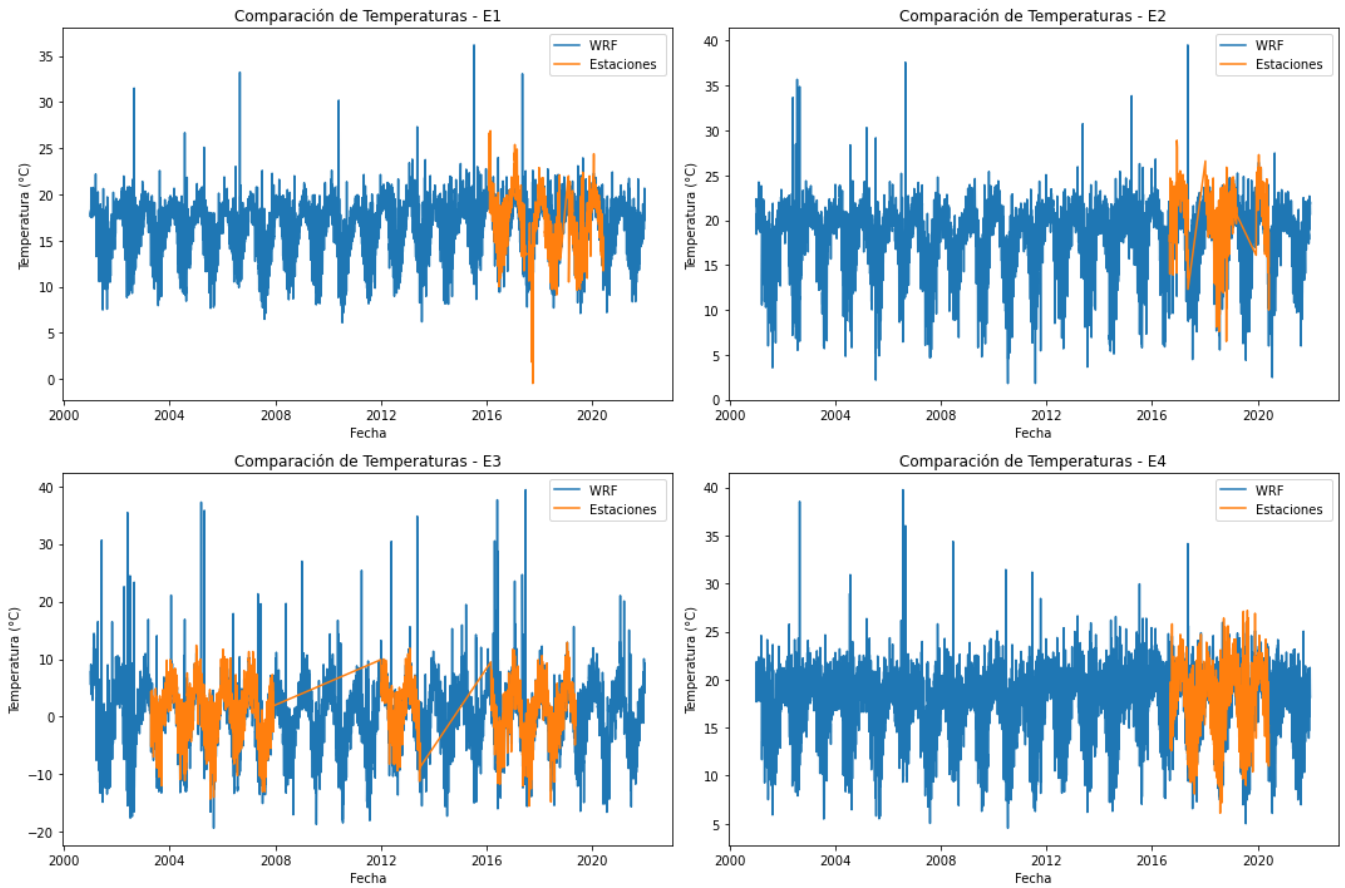


Figura 5.12: Comparación series de temperatura

Para una comprensión más profunda de las tendencias y fluctuaciones térmicas a lo largo del tiempo, se han generado gráficos que comparan los promedios diarios de temperatura observados y modelados, desglosados por cada día del año. Esta aproximación permite una visualización clara de las diferencias estacionales, así como la identificación de patrones o anomalías específicas en los datos simulados en comparación con las mediciones reales.

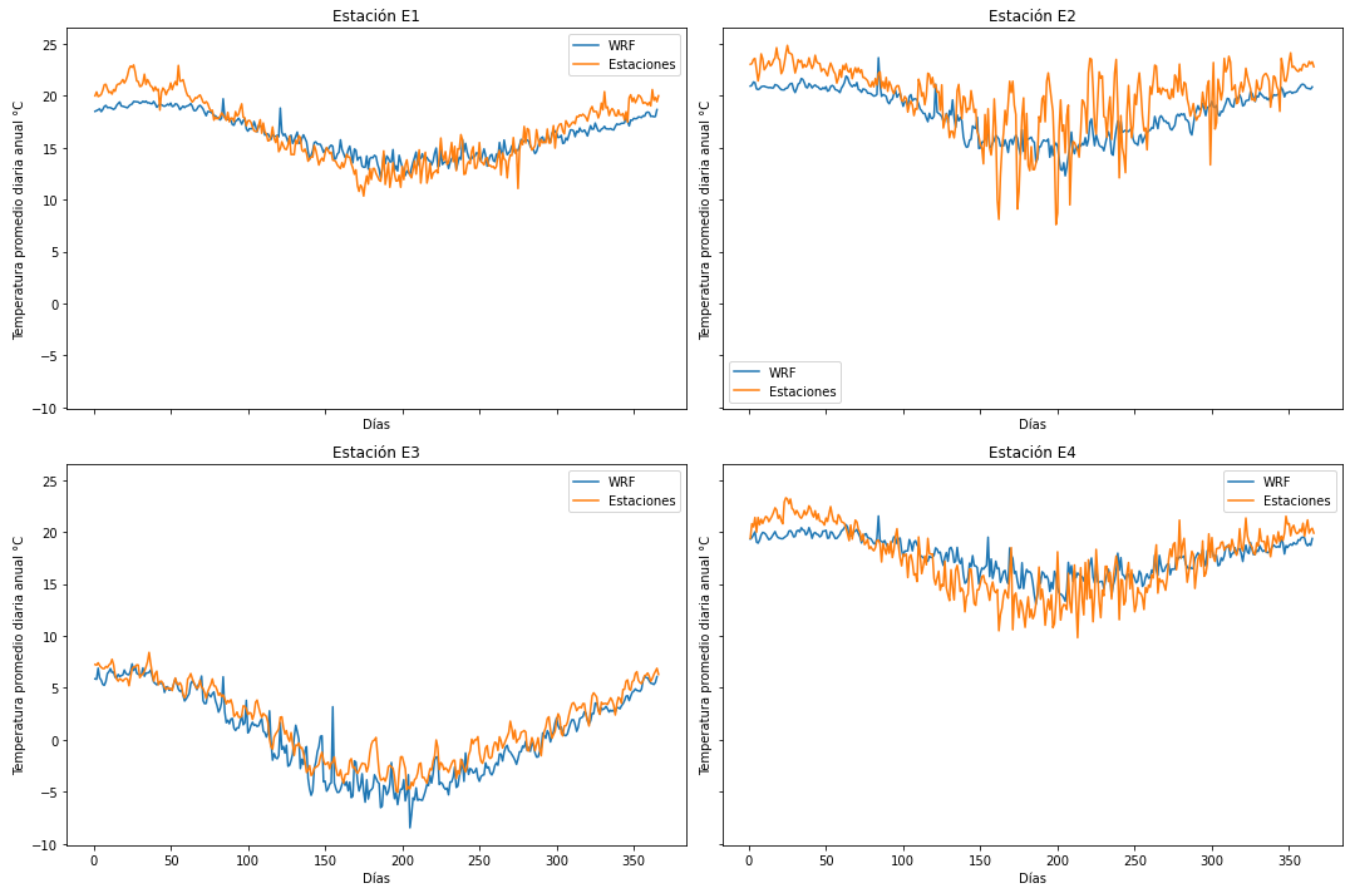


Figura 5.13: Promedio diario de temperatura anual

Tras la comparación visual de los promedios diarios de temperatura entre las observaciones y las simulaciones WRF-SAAG, se procede a cuantificar el rendimiento de las simulaciones a través de diversas métricas estadísticas. La Figura 5.14 presenta el Error Medio (ME) °C, la Figura 5.15 la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) °C, la Figura 5.16 el Sesgo Porcentual (PBIAS) % y la Figura 5.17 el Coeficiente de Correlación de Pearson (r),

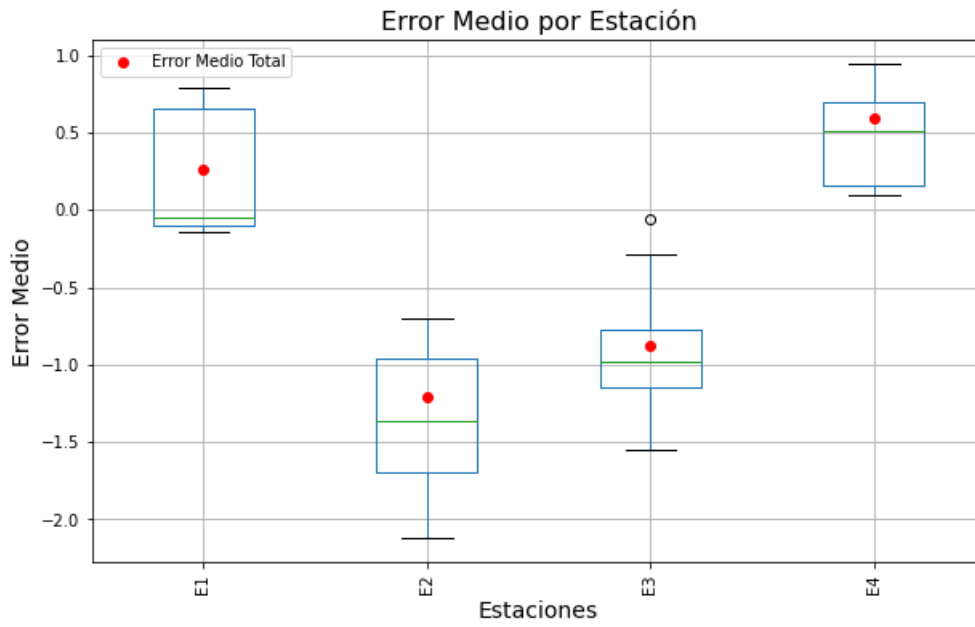


Figura 5.14: Error Medio Temperatura [°C]

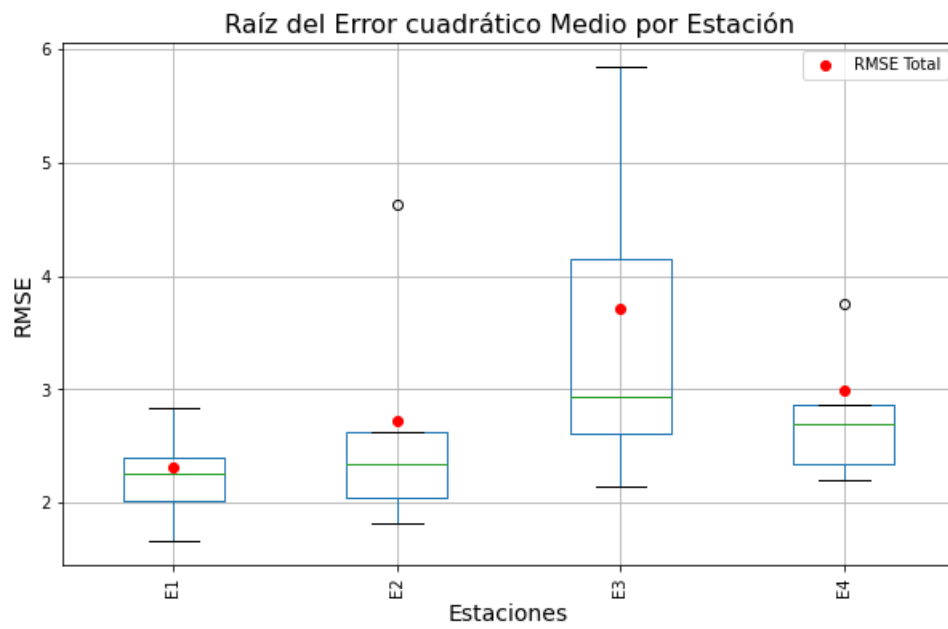


Figura 5.15: RMSE Temperatura [°C]

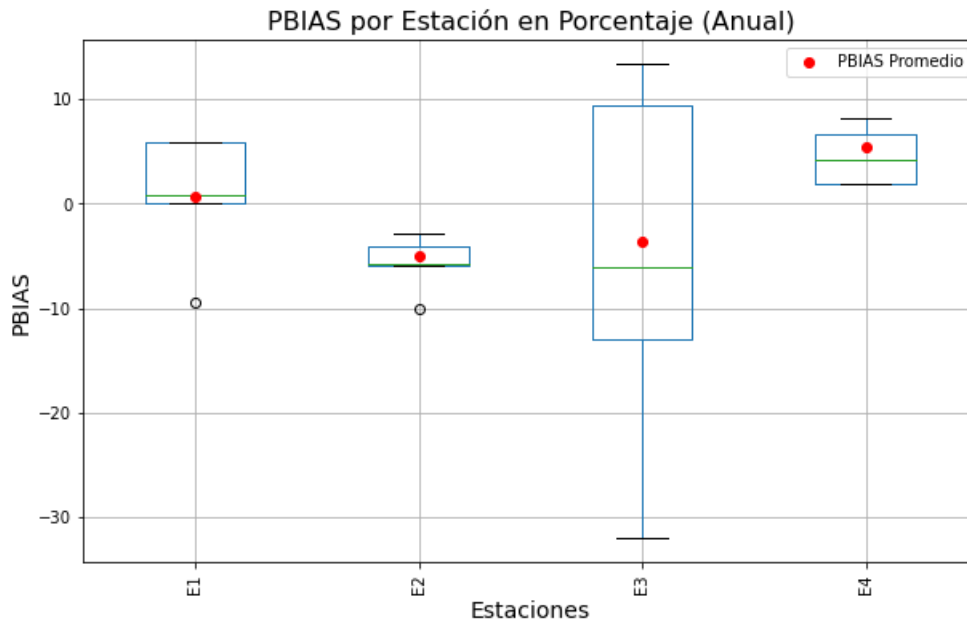


Figura 5.16: pBias Temperatura %

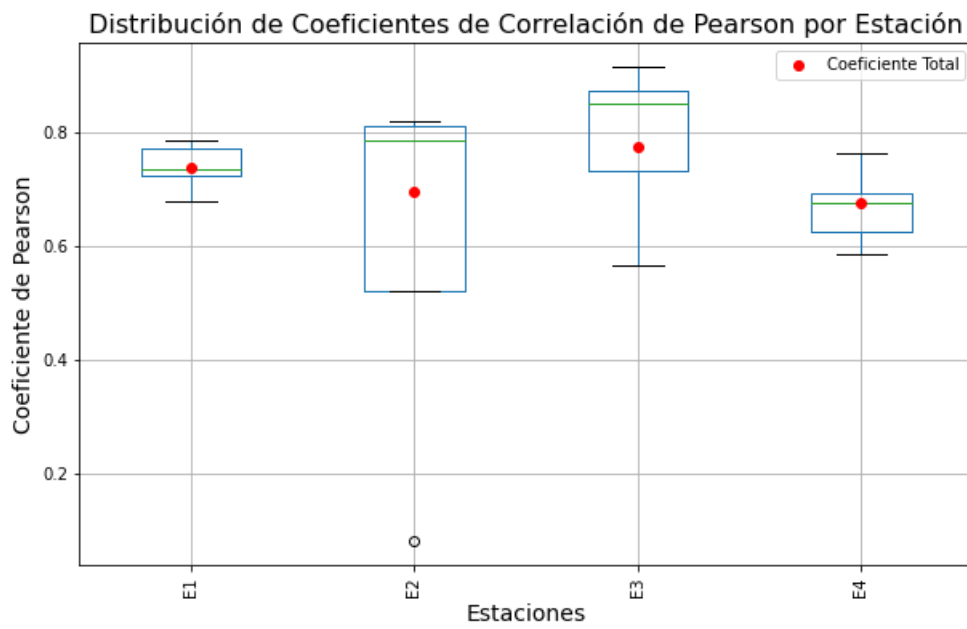


Figura 5.17: Coeficiente de Correlación Pearson Temperatura

Tabla 5.2: Error medio °C por estación y el promedio para temperatura

	E1	E2	E3	E4
2001				
2002				
2003			-1.55	
2004			-1.09	
2005			-0.99	
2006			-1.18	
2007			-1.17	
2008				
2009				
2010				
2011				
2012			-0.87	
2013			-0.72	
2014				
2015				
2016	-0.05	-2.12	-0.06	0.16
2017	-0.14	-1.70	-0.29	0.70
2018	0.65	-0.71	-0.83	0.95
2019	0.78	-0.96	-1.13	0.51
2020	-0.10	-1.36		0.09
2021				
Total	0.26	-1.20	-0.88	0.60

La estación E1 muestra una transición de errores negativos en 2016 a valores positivos en 2018 y 2019, lo que podría indicar un calentamiento o una sobrestimación creciente en las mediciones o modelos para esta estación. E2, por su parte, presenta consistentemente los errores más negativos entre las estaciones, sugiriendo una tendencia sistemática a subestimar las temperaturas, similar a lo observado en E3. En contraste, E4 tiende a registrar errores positivos en los años analizados, indicando una tendencia a sobreestimar las temperaturas, patrón que es particularmente notable en los años más recientes.

Tabla 5.3: RMSE °C por estación y el promedio para temperatura

	E1	E2	E3	E4
2001				
2002				
2003			2.51	
2004			2.94	
2005			3.66	
2006			3.49	
2007			2.90	
2008				
2009				
2010				
2011				
2012			2.70	
2013			4.63	
2014				
2015				
2016	2.02	2.62	5.19	2.20
2017	2.84	4.63	5.85	3.76
2018	2.40	2.04	2.15	2.87
2019	2.26	1.82	2.41	2.70
2020	1.66	2.35		2.34
2021				
Total	2.32	2.73	3.70	2.99

La estación E3 tiene el RMSE promedio más alto (3.70) entre todas las estaciones, lo que sugiere que las predicciones para esta estación tienden a ser menos precisas que para las otras estaciones. E1 y E4 tienen valores promedio de RMSE más bajos (2.32 y 2.9, respectivamente), indicando una mayor precisión en las predicciones de temperatura para estas estaciones en comparación con E2 y E3. E2, con un RMSE promedio de 2.73, muestra una variabilidad moderada en la precisión de sus predicciones de temperatura.

El año 2013 destaca por tener el RMSE más alto registrado para E3 (4.63), lo que indica una discrepancia particularmente grande entre las temperaturas predichas y reales para esta estación.

Tabla 5.4: pBias por estación y el promedio para temperatura

	E1	E2	E3	E4
2001				
2002				
2003			-21.87	
2004			10.36	
2005			13.40	
2006			-5.14	
2007			8.41	
2008				
2009				
2010				
2011				
2012			-15.08	
2013			10.41	
2014				
2015				
2016	0.80	-10.08	-10.75	1.94
2017	-9.40	-5.87	-6.13	6.68
2018	5.90	-2.86	-6.99	8.14
2019	5.92	-4.02	-32.00	4.26
2020	0.10	-5.75		1.88
2021				
Total	0.70	-4.98	-3.58	5.46

E1 muestra un PBIAS total promedio de 0.70, lo que sugiere una tendencia general a sobreestimar las mediciones reales a lo largo del período de estudio, aunque esta tendencia es leve. E2 tiene un PBIAS total promedio de -4.98, indicando una tendencia a subestimar. E3 presenta un PBIAS total promedio de -3.58, señalando una tendencia a subestimar, pero menos pronunciada que en E2. E4 tiene un PBIAS total promedio de 5.46, lo que indica una tendencia más fuerte a sobreestimar en comparación con E1.

Tabla 5.5: r por estación y el promedio para temperatura

	E1	E2	E3	E4
2001				
2002				
2003			0.88	
2004			0.85	
2005			0.81	
2006			0.78	
2007			0.88	
2008				
2009				
2010				
2011				
2012			0.86	
2013			0.68	
2014				
2015				
2016	0.74	0.81	0.57	0.62
2017	0.68	0.08	0.59	0.58
2018	0.72	0.82	0.91	0.69
2019	0.77	0.52	0.85	0.76
2020	0.78	0.78		0.67
2021				
Total	0.74	0.69	0.77	0.68

Es la estación con mejor rendimiento en términos de simulación vs. observación según estos datos. E4, aunque aún muestra una correlación positiva fuerte, es la más baja entre las estaciones. Esto sugiere que, aunque las simulaciones están razonablemente alineadas con las observaciones, E4 tiene la mayor discrepancia en comparación con las otras estaciones.

5.3. Curvas precipitación duración área

En esta sección de resultados, se presenta las curvas de precipitación-duración-área (PDA) generadas a partir de los eventos de precipitación máxima anual para distintas ventanas temporales, abarcando desde 1 hasta 24 horas. Este análisis revela patrones significativos en la distribución espacial y temporal de la precipitación en el área de estudio, proporcionando información cruciales sobre la variabilidad y la intensidad de los eventos de precipitación más significativos registrados durante el periodo de estudio, desde 2001 hasta 2021.

Primero se generó un gráfico para cada duración 1, 2, 6, 12, 18 y 24 hrs, con la precipitación máxima, las cuales se detallan en el Anexo E. Para la elaboración de la Figura 5.18, se seleccionó el año 2017, puesto que, en todas las duraciones consideradas para el evento resultó ser el de mayor precipitación, sirviendo como la curva envolvente.

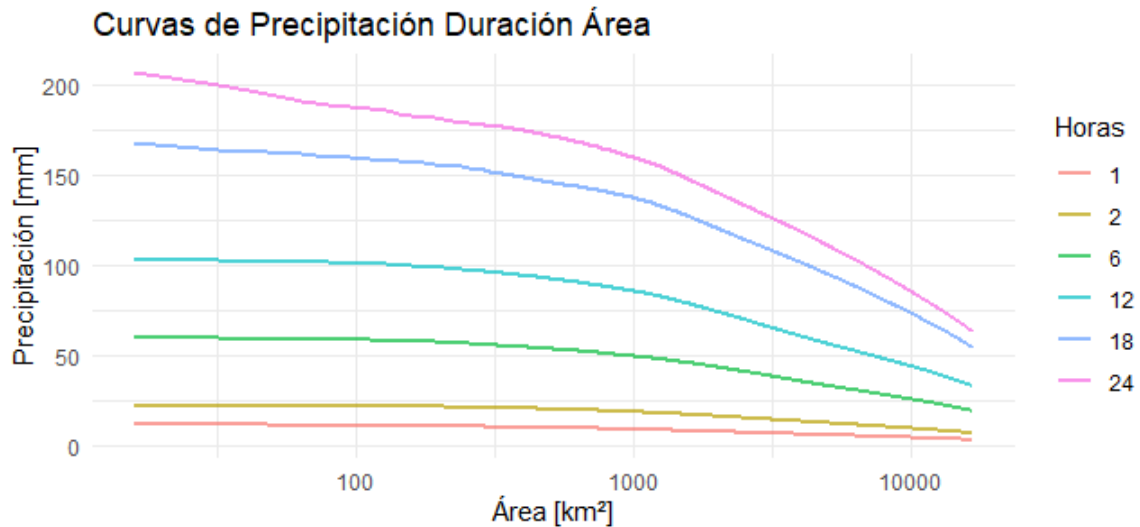


Figura 5.18: PDA para diferentes intervalos de tiempo

Para finalizar se identificó que para el evento de 2017, según las simulaciones del WRF-SAAG para duración de 1 hora, en un pixel de 4 km x 4 km la precipitación máxima fue de 13.01 mm, mientras que la estación El Tránsito según el visualizador climático VisMet (VISMET Development Team, 2024) fue un máximo de 6.14 mm en una hora.

En cambio con respecto a la precipitación máxima en 24 horas se muestra deficiente, ya que de la curva PDA se puede obtener 206.7 mm simulados, lo que difiere de las estaciones que presentan datos en la zona, la que alcanza una precipitación máxima de 47.31 mm/día. En la tormenta de mayo 2017 se identificó una precipitación en 72 horas de 112.4 mm lo que aun así es inferior a lo que simula WRF-SAAG, lo que demuestra una sobreestimación de la precipitación de las simulaciones WRF-SAAG.

5.4. Construcción modelo Hidrológico

Primero se especificarán los resultados de las métricas del modelo CR2MET para 5 estaciones utilizadas para la calibración, luego se expondrán los resultados del modelo hidrológico WRF-SAAG para dos periodó de calibración.

5.4.1. Modelo hidrológico CR2MET 2001-2021

En la Figura 5.19 es posible observar los caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente del modelo de (Jiménez, 2022), y la Tabla 5.6 muestra los resultados de NSE Y KGE por estaciones obtenidos de la calibración.

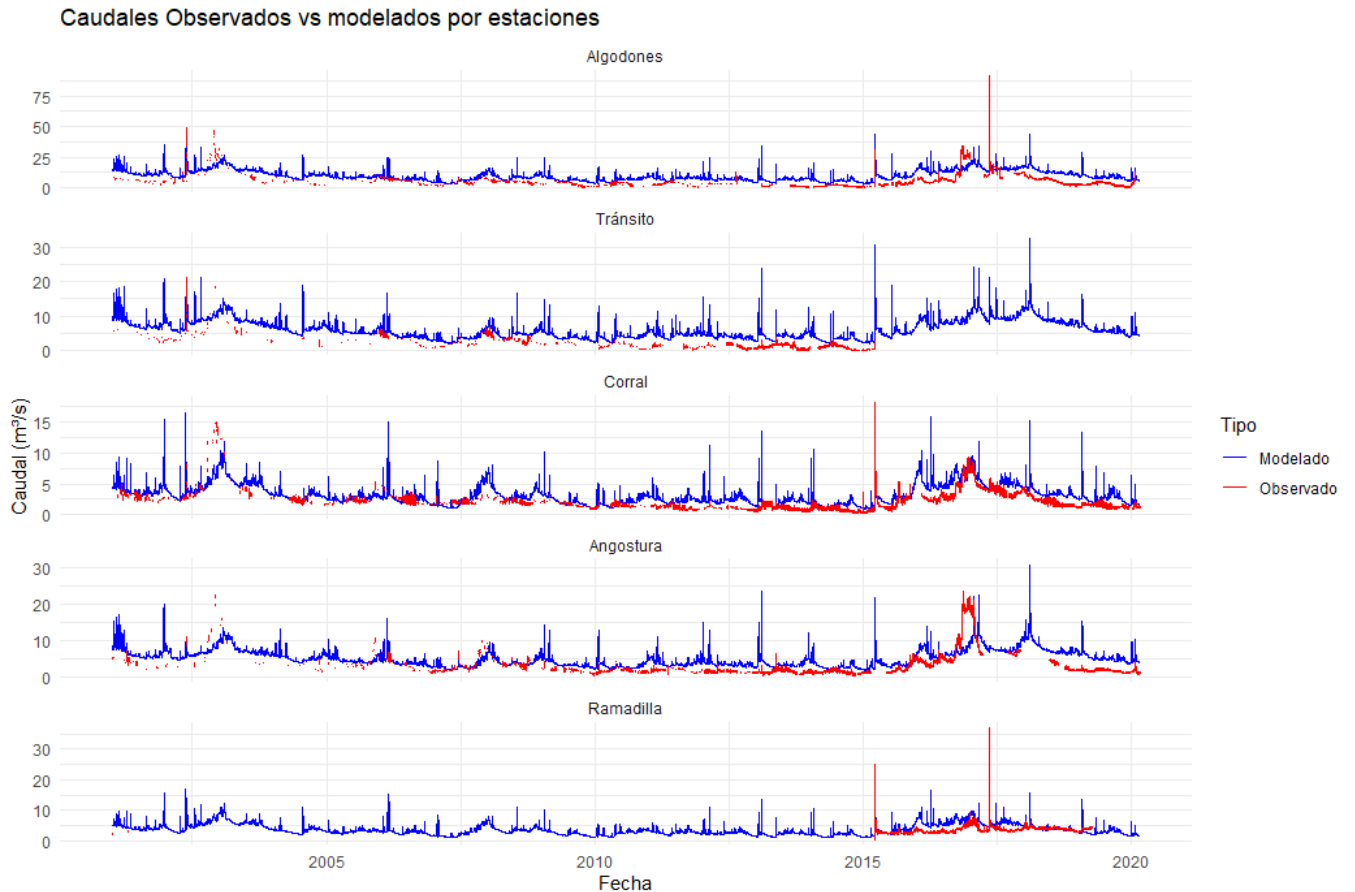


Figura 5.19: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente

Tabla 5.6: Resultados NSE y KGE por Estaciones

Cuenca	Nombre	NSE	KGE
11	Algodones	0.0983	0.0056
65	Transito	0.0547	-0.1159
145	Corral	0.2695	0.3019
207	Amgostura	0.0982	0.2590
17	Ramadilla	0.0407	0.1129

5.4.2. Resultados de la calibración tormenta 2015

En la Tabla 5.7 se presentan los datos de NSE obtenidos en la calibración en el periodo de tormenta en los primeros meses de 2015, lo que muestra un ajuste muy pobre.

Tabla 5.7: Resultados NSE por Estaciones

Cuenca	NSE
Algodones	-11.10
Transito	-4.74
Corral	-0.79
Angostura	-13.55
Ramadilla	-10.71

A continuación en la Figura 5.20 se presentan la comparación entre caudales observados y modelados como resultado de la modelación hidrológica, para las estaciones de interés.

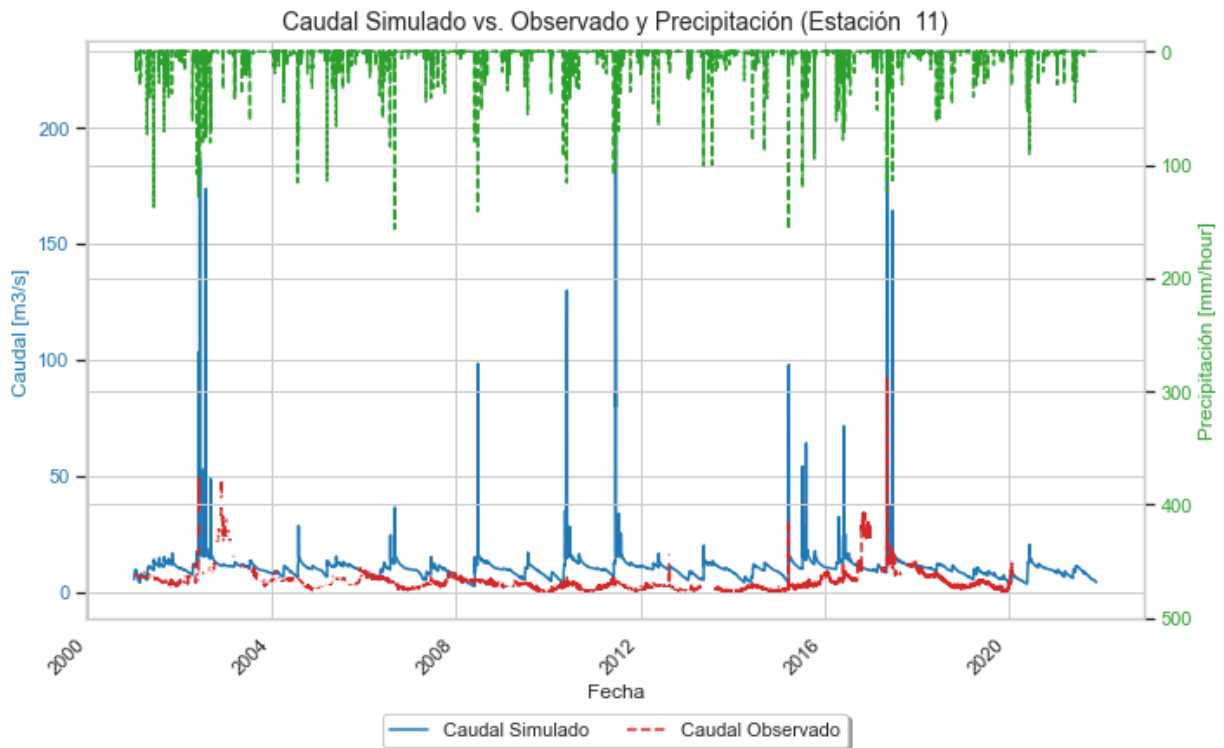


Figura 5.20: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Algodones

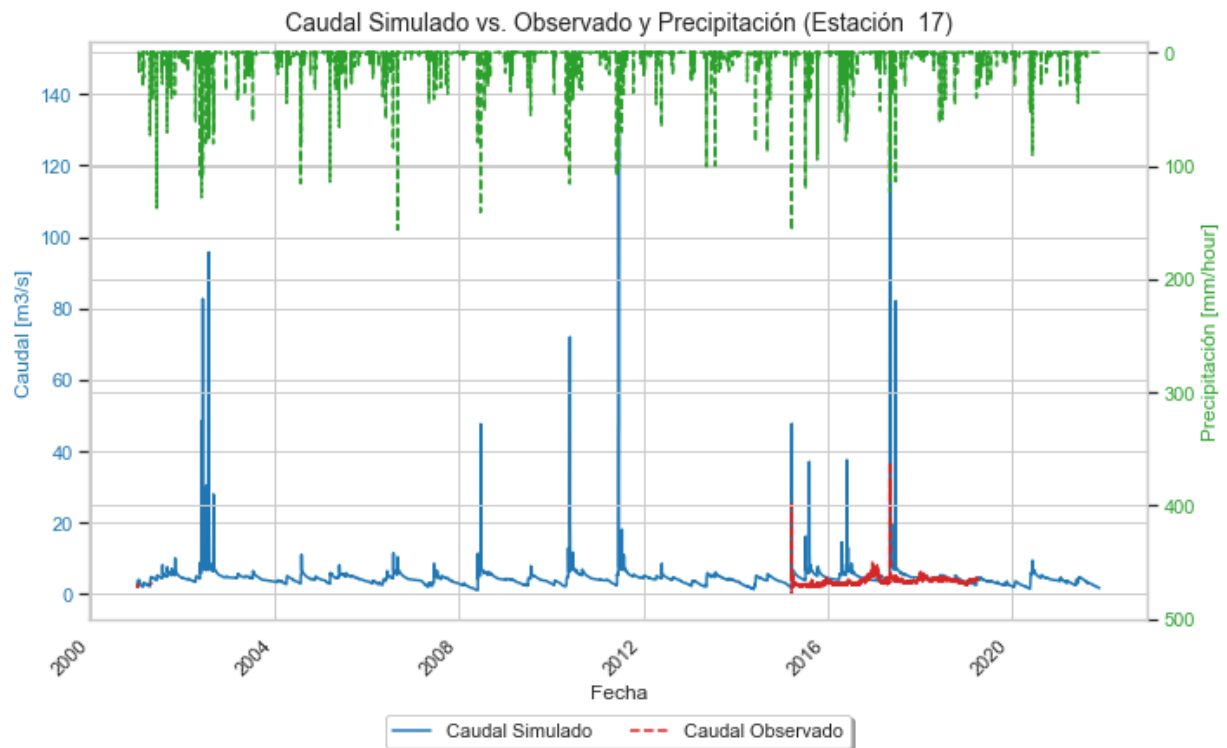


Figura 5.21: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Ramadilla

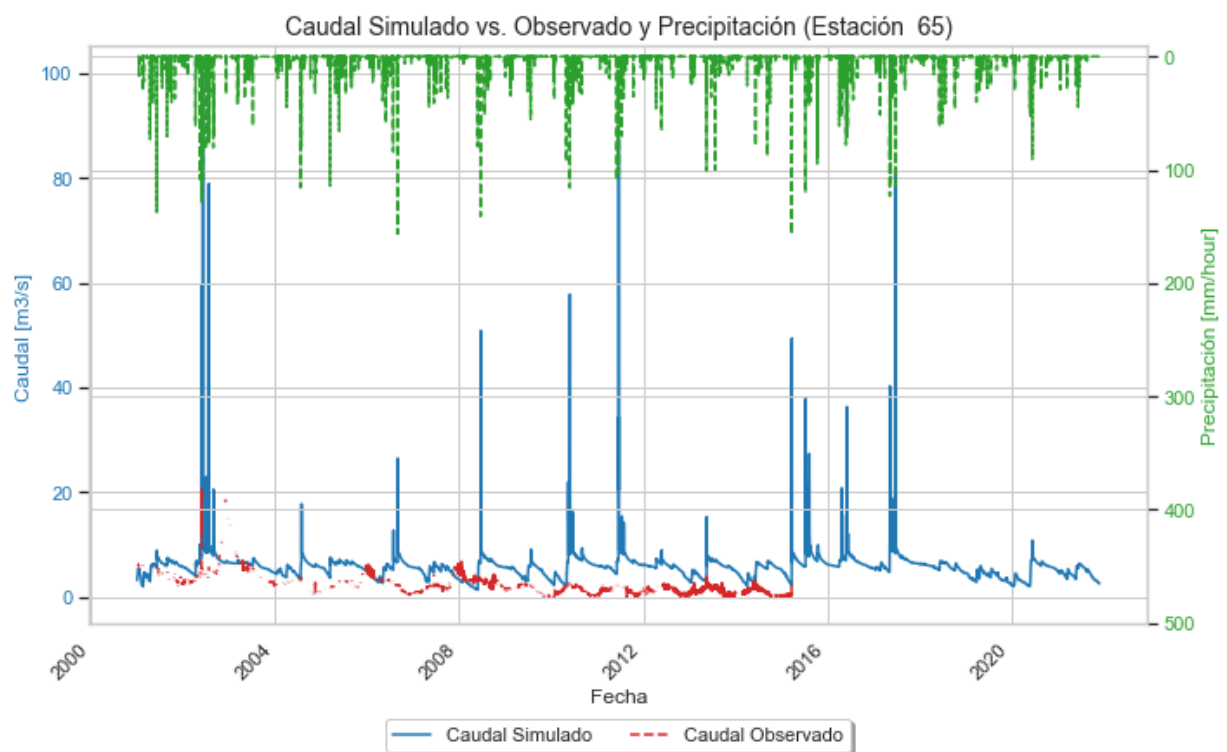


Figura 5.22: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Tránsito

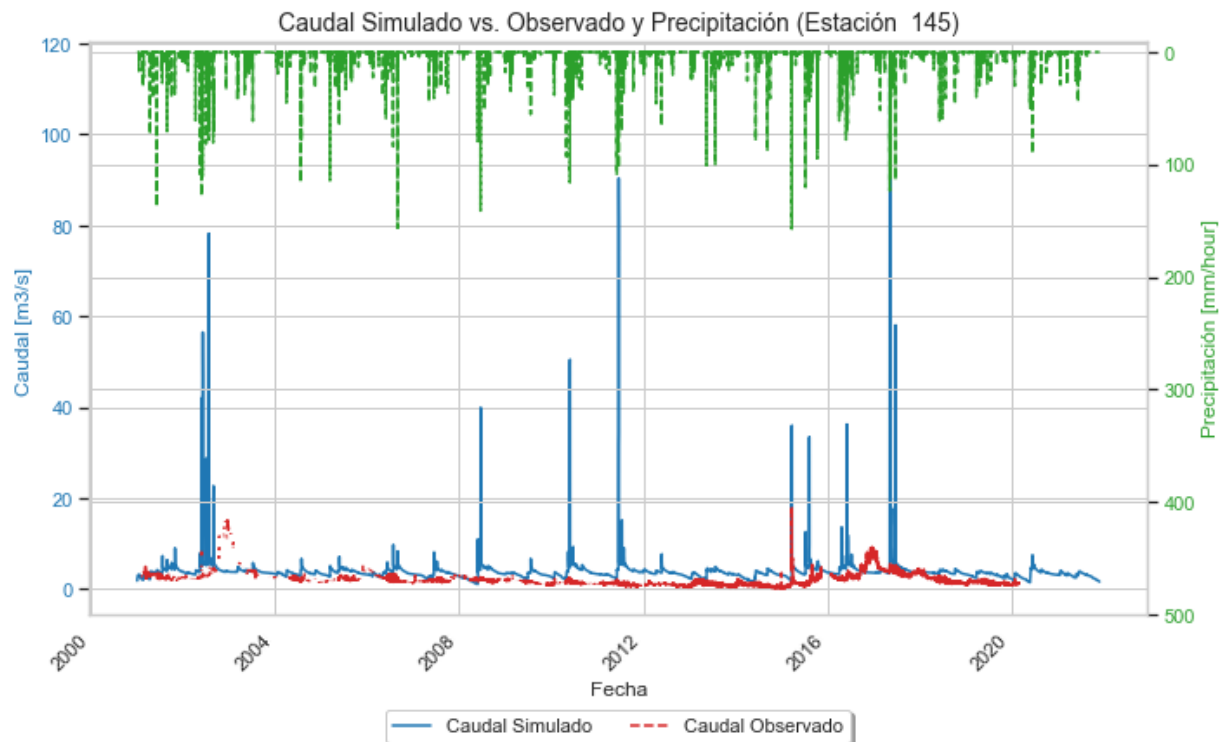


Figura 5.23: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Corral

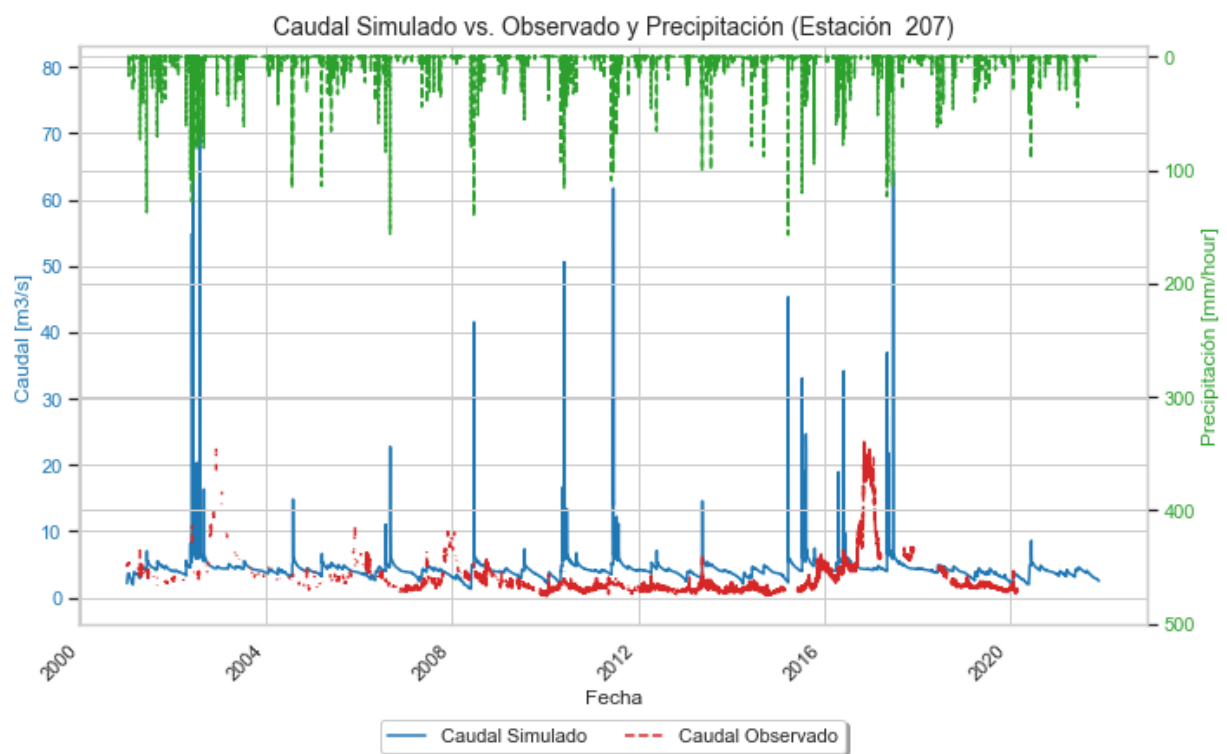


Figura 5.24: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente Estación Angostura

En la Tabla 5.8 presentan métricas de rendimiento de las estaciones de estudio.

Tabla 5.8: Métricas asociadas a caudales simulados y observados

Station	r	alpha	beta	KGE
11	0.21	1.13	2.15	-0.40
17	0.29	4.41	1.44	-2.51
65	0.09	1.13	2.62	-0.86
145	0.11	1.67	1.81	-0.38
207	0.11	0.47	1.39	-0.11

Las correlaciones entre las simulaciones y las observaciones son generalmente bajas, con valores de r que apenas superan el 0.29, indicando una débil relación lineal. Los valores de α y β muestran una variabilidad considerable en la capacidad del modelo para estimar la amplitud y el sesgo de los eventos; por ejemplo, un α de 4.41 en la estación 17 destaca una sobreestimación extrema de la variabilidad. Además, los valores negativos de KGE, especialmente notorios en la estación 17 con un valor de -2.51, reflejan una eficiencia de modelado muy pobre, evidenciando problemas significativos tanto en la captura de la magnitud de los flujos como en la concordancia temporal de los eventos modelados con los observados.

5.4.3. Resultados de la calibración 2015-2017

En la Tabla 5.9 se presentan los datos de NSE obtenidos en la calibración en el periodo de 2015 -2017, lo que muestra un ajuste muy pobre.

Tabla 5.9: Resultados NSE por Estaciones

Cuenca	NSE
Algodones	-0.94
Transito	-1.36
Corral	-4.60
Angostura	-0.66
Ramadilla	-18.14

Las imágenes asociadas a cada estación están especificadas en el Anexo F, Figuras F.1, F.2, F.3, F.4, F.5.

Tabla 5.10: Métricas asociadas a caudales simulados y observados

Estación	r	alpha	beta	KGE
11	0.26	4.59	5.75	-5.00
17	-0.09	11.22	4.26	-9.78
65	0.23	6.30	6.76	-6.86
145	0.22	5.64	5.16	-5.28
207	0.23	2.78	4.10	-2.66

Los datos de la Tabla 5.10 muestran que el modelo hidrológico evaluado generalmente sobreestima la variabilidad y el volumen de los caudales en las estaciones observadas, con coeficientes de correlación de Pearson (r) que indican una correlación débil entre las simulaciones y las observaciones reales. Los valores altos de α sugieren una sobreestimación significativa de la variabilidad por el modelo, mientras que los valores elevados de β indican una tendencia a sobreestimar el caudal medio. Además, los valores negativos de KGE en todas las estaciones reflejan un desempeño pobre del modelo, resaltando discrepancias notables en términos de magnitud y dinámicas temporales entre las simulaciones y las observaciones.

Capítulo 6

Discusión

En este trabajo se evaluaron las simulaciones de precipitación realizadas por el modelo WRF-SAAG en la zona de estudio, utilizando datos de estaciones meteorológicas. Se observó que el modelo WRF-SAAG presenta dificultades para simular adecuadamente los valores medios diarios y anuales de precipitación en la región.

En promedio, para cada estación, el modelo mostró un Pbias positivo superior al 70 % en todos los años analizados, indicando una sobreestimación considerable de las precipitaciones anuales. Aunque para el caso de las tormentas, el modelo también tiende a sobreestimar la precipitación, se detecta una variabilidad significativa en las precipitaciones horarias.

Las discrepancias observadas en el estudio de las tormentas de forma horaria entre las mediciones de precipitación acumulada y las simulaciones del WRF-SAAG resaltan la necesidad de mejorar las parametrizaciones y la resolución de las simulaciones para capturar mejor la variabilidad local y los procesos convectivos. Es crucial la validación constante con datos observados para ajustar y mejorar las predicciones del modelo de simulaciones WRF-SAAG.

La variabilidad temporal y estacional en los errores y la precisión de las mediciones o predicciones de temperatura revelan patrones significativos. A lo largo del año y entre diferentes estaciones, se observan cambios en los errores medios y en el RMSE, subrayando cómo la exactitud de las predicciones de temperatura fluctúan con el tiempo y varían estacionalmente. Idealmente, se busca un PBIAS cercano a cero, lo cual indicaría una estimación precisa sin inclinaciones marcadas hacia la sobreestimación o subestimación. Sin embargo, los valores negativos y positivos del PBIAS demuestran tendencias de subestimación y sobreestimación, respectivamente, por parte del modelo.

Con respecto a las PDA, al comparar las curvas PDA para las diferentes duraciones, los resultados ponen de manifiesto ciertas discrepancias entre los datos simulados y observados,

que son cruciales para entender la precisión del modelo y su capacidad para representar eventos de precipitación extrema. Las simulaciones del WRF-SAAG, utilizadas para generar las PDA, mostraron sobreestimaciones en la precipitación acumulada en comparación con los datos observados en varias estaciones meteorológicas del área de estudio. La sobreestimación en las simulaciones puede influir en la confiabilidad de las PDA.

. El norte de Chile está caracterizada por un clima predominantemente árido, donde las tormentas convectivas pueden tener impactos significativos pero esporádicos. Las tormentas convectivas en esta región pueden ser de corta duración pero muy intensas, a menudo localizadas en áreas con compleja topografía que amplifica los efectos convectivos. Cuanto más nos alejamos del centro de la precipitación, menos precipitación observamos, como podemos observar en las curvas PDA. La región sur del Desierto de Atacama ha experimentado más de 50 eventos de lluvias intensas desde el siglo XX. El 98 % de estos eventos tuvieron lugar durante el otoño-invierno austral, y más del 60 % de ellos causaron daños devastadores en varias ciudades chilenas, la mayoría de estos eventos extremos de lluvia ocurrieron durante eventos clásicos de El Niño (Ortega et al., 2020).

En cuanto al modelo hidrológico WRF-SAAG en la calibración de la tormenta 2015, se observó valores de coeficiente de correlación de Pearson (r) que sugieren una correlación moderada entre las simulaciones y las observaciones, indicando que el modelo, captura en cierta medida la tendencia general de los datos observados. Sin embargo, los valores de α y β altos sugieren que el modelo tiende a sobreestimar tanto la variabilidad como el volumen de los caudales. Los valores negativos de KGE en esta primera calibración reflejan un ajuste muy pobre del modelo a los datos observados, lo que indica una discrepancia significativa entre las simulaciones y las observaciones.

En contraste, los resultados de la segunda calibración muestran valores de r , α , y β que sugieren una mejora en la capacidad del modelo para capturar tanto la tendencia general de los caudales como su variabilidad y magnitud. A pesar de que en ambas calibraciones se presentan valores negativos de KGE, implicando que todavía hay margen de mejora, la variación entre las métricas de las dos calibraciones sugiere que ajustes en los parámetros o en la metodología de calibración pueden influir significativamente en el desempeño del modelo.

Capítulo 7

Conclusiones

La evaluación del modelo de simulaciones WRF-SAAG de precipitación y temperatura revela, primero, la tendencia del modelo a sobreestimar las mediciones de precipitación en ciertas estaciones, lo que indica una necesidad de ajustes para mejorar la precisión. La variabilidad temporal y estacional observada en los errores y en la precisión de las predicciones de temperatura subraya la importancia de considerar estos factores en la evaluación de modelos. Además, con respecto al modelo hidrológico WRF-SAAG la variabilidad significativa en los valores negativos de KGE, especialmente notorios en la estación 17 con un valor de -2.51, y en las correlaciones entre los caudales observados y simulados a través de diferentes períodos sugiere que el modelo exhibe un rendimiento muy pobre.

Los hallazgos sobre la capacidad del modelo para simular eventos de precipitación extensa y su desempeño variable en diferentes escalas temporales recalcan la complejidad de modelar sistemas hidrológicos y la necesidad de un enfoque meticuloso en la calibración y validación de modelos. Esto incluye la consideración de la posibilidad de recalibrar el modelo hidrológico para adaptarse mejor a las variaciones en las condiciones meteorológicas.

En conclusión, mientras que los modelos actuales proporcionan herramientas valiosas para la simulación de procesos hidrológicos y de temperatura, los resultados destacan la necesidad crítica de mejorar estos modelos mediante la corrección y ajuste de los datos de precipitación y temperatura. Por lo tanto, una sugerencia es que el modelo de simulaciones WRF-SAAG, tal como está, no es recomendable para su uso en la modelación hidrológica del río Huasco. Como trabajo futuro, las simulaciones deberían ser corregidas, tal como (Jiménez, 2022) corrigió los datos de CR2MET con el método Cressman.

Bibliografía

- Aguilar, G., Cabre, A., Fredes, V., y Villela, B. (2020). Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern atacama desert: An assessment of the magnitude, return time, and conditioning factors of erosion and debris flow generation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), 1247–1265. doi: 10.5194/nhess-20-1247-2020
- Bindoff, N., Stott, P., Rao, K. A., Allen, M., Gillett, N., Gutzler, D., . . . Zhang, X. (2013). Detection and attribution of climate change: From global to regional. En T. Stocker et al. (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 867–952). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., y Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in chile. En *Egu general assembly conference abstracts* (p. 19739).
- Bozkurt, D., Boiser, J., Rondanelli, R., Garreaud, R., y Gallardo, L. (2019). Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest south america: present climate conditions and added value analysis. *Climate Dynamics*.
- Bozkurt, D., Rondanelli, R., y Garreaud, R. (2015). Impact of warmer eastern tropical pacific sst on the march 2015 atacama floods. *Journal Name, Volume Number*(Issue Number), Page Range. (Center for Climate and Resilience Research, University of Chile)
- Clark, M., y Hrachowitz, M. (2017). Hess opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Craig, J., Brown, G., Chlumsky, R., Jenkinson, R., Jost, G., Lee, K., . . . Tolson, B. (2020, abril). Flexible watershed simulation with the raven hydrological modelling framework. *Environmental Modelling and Software*, 129, 104728. doi:10.1016/j.envsoft.2020.104728
- Craig, J., y Team., R. D. (2020). Raven: User’s and developer’s manual [Manual de software informático]. (<http://raven.uwaterloo.ca/>)
- Dile, Y., Srinivasan, R., y George, C. (2019). *Qgis interface for swat (qswat)*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2004). *Cuenca del río huasco* (Reporte técnico). Gobierno de Chile. (Elaborado por CADEPE-IDEPE Consultores en Ingeniería)

- Dominguez, F., Rasmussen, R., Liu, C., Ikeda, K., Prein, A., Varble, A., ... Schneider, T. (2024). Advancing south american water and climate science through multidecadal convection-permitting modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*, E32–E44. (Online Publication: 08 Jan 2024, Print Publication: 01 Jan 2024) doi: 10.1175/BAMS-D-22-0226.1
- Easton, G. V., Tello, S. P., y Ide, P. A. (2018). *Aluviones y resiliencia en atacama. construyendo saberes sobre riesgos y desastres* (1.^a ed.; G. V. Easton, S. P. Tello, y P. A. Ide, Eds.). Santiago: Social-Ediciones.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., y Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80–91. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Gómez, T., Cepeda, J., Lagos, M., y Montserrat, S. (2017). Modelación hidrológica de la tormenta 25m en la cuenca del río huasco: Validación de caudales usando datos sedimentológicos. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*.
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., y cols. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362. doi: 10.1038/s41586-020-2649-2
- Hoyer, S., y Hamman, J. (2017). xarray: N-d labeled arrays and datasets in python. *Journal of Open Research Software*, 5(1), 10. doi: 10.5334/jors.148
- Hrachowitz, M., y Clark, M. P. (2017). Hess opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., y Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning*. Springer.
- Jiménez, H. (2022). *Análisis hidrometeorológico de eventos extremos y su relación con la ocurrencia de aluviones: Aplicación a las cuencas de los ríos el carmen y el tránsito en la región de atacama, chile* (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile.
- Lagos-Zúñiga, M., Balmaceda-Huarte, R., Regoto, P., Torrez, L., Olmo, M., Lyra, A., ... Bettolli, M. L. (2024). Extreme indices of temperature and precipitation in south america: Trends and intercomparison of regional climate models. *Climate Dyn..* (in press)
- Li, Y., Li, Z., Chen, L., Kurkute, S., Scaff, L., y Pan, X. (2019). High-resolution regional climate modeling and projection over western canada using a weather research forecasting model with a pseudo-global warming approach. *Hydrol. Earth Syst.Sci.*
- Manual for depth-area-duration analysis of storm precipitation [Manual de software informático]. (1969). (This publication is a part of the contribution of WMO to the International Hydrological Decade)

- Martel, J., Demeester, K., Brissette, F., Poulin, A., y Arsenault, R. (2017). HMETTS - a simple and efficient hydrology model for teaching hydrological modelling, flow forecasting and climate change impacts to civil engineering students. *International Journal of Engineering Education*, 34, 1307–1316.
- McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in python. En *Proceedings of the 9th python in science conference* (pp. 51–56).
- Mohammadi, S. E., y Mahdavi, M. (s.f.). Investigation of depth-area-duration curves for kurdistan province. *Faculty of Natural Resources, Kurdistan University*.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Ortega, C., Vargas, G., Rojas, M., Rutllant, J. A., Muñoz, P., Lange, C. B., ... Ortlieb, L. (2020). Extreme ENSO-driven torrential rainfalls at the southern edge of the Atacama desert during the Late Holocene and their projection into the 21th century. *Journal Name*.
- Ortega, C., Vargas, G., Rojas, M., Rutllant, J. A., Muñoz, P., Lange, C. B., ... Ortlieb, L. (2024). Extreme enso-driven torrential rainfalls at the southern edge of the atacama desert during the late holocene and their projection into the 21st century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(3), e2024JD034567. (In press) doi: 10.1029/2024JD034567
- Oubeidillah, A. A., Kao, S. C., Ashfaq, M., Naz, B. S., y Tootle, G. (2014). A large-scale, high-resolution hydrological model parameter data set for climate change impact assessment for the conterminous us. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 67–84. doi: 10.5194/hess-18-67-2014
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andre, V., Anctil, F., y Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2-towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303, 290–306.
- Prein, A. F., Rasmussen, R., Clark, M. P., Ikeda, K., y Liu, C. (2015, December). Continental-scale convection-permitting regional climate modeling. En *Agu fall meeting abstracts* (Vol. 2015, p. A34C-02).
- Tolson, B. A., y Shoemaker, C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43(1), 1–16. doi: 10.1029/2005WR004723
- University Corporation for Atmospheric Research. (2023). *South america affinity group (saag)*. <https://ral.ucar.edu/projects/south-america-affinity-group-saag>. (Accessed: 2024-02-24)
- VISMET Development Team. (2024). *VISMET: Visualizador Meteorológico*. <https://www>

[.vismet.com](https://vismet.com). (Accedido el 23 de junio de 2024)

Anexos

Anexo A. Estructura del modelo hidrológico

A continuación, se explican los módulos utilizados en Raven (Craig et al., 2020), mostrando sus ecuaciones y supuestos.

A.0.1. Infiltración

Corresponde al flujo de agua que viaja desde el reservorio de agua estancada hasta la capa superficial de suelo (Suelo 1) del modelo. Se utiliza el módulo INF HBV (Jiménez, 2022).

$$Minf = R \cdot \left(1 - \left(\frac{\phi_{soil}}{\phi_{max}} \right)^\beta \right) \quad (A.1)$$

Donde:

- $Minf$ es el flujo de agua [$mm/tiempo$] que viaja desde el agua estancada a la primera capa de suelo.
- R es la precipitación líquida más el derretimiento nival [$mm/tiempo$].
- ϕ_{soil} y ϕ_{max} [mm] corresponden al almacenamiento y almacenamiento máximo de agua en la primera capa de suelo respectivamente.

$$\phi_{max} = H \cdot p \cdot (1 - SF) \quad (A.2)$$

$$\phi_{tens} = \phi_{max} \cdot (Sfc - Swilt) \quad (A.3)$$

$$\phi_{fc} = \phi_{max} \cdot Sfc \quad (A.4)$$

Donde:

- $p[-]$ corresponde a la porosidad.
- $H[mm]$ es el espesor de la capa de suelo.
- $SF[-]$ es la fracción de rocas.

- $\phi_{\text{tens}}[mm]$ es el almacenamiento de máxima tensión.
- $Sfc[-]$ es la saturación a capacidad de campo.
- $Swilt[-]$ es la saturación en el punto de marchitamiento.
- $\phi_{\text{fc}}[mm]$ es el almacenamiento de capacidad de campo.

A.0.2. Flujo base desde capa de suelo superficial a superficie

Corresponde al flujo desde la capa de suelo superficial (Suelo 1) al flujo superficial. Se utiliza el módulo BASE LINEAR, en el cual el flujo base es linealmente proporcional al almacenamiento en el suelo (Jiménez, 2022).

$$M_{\text{base1}} = k_b \cdot \phi_{\text{soil}} \quad (\text{A.5})$$

Donde:

- M_{base1} es el flujo de agua [mm/tiempo] que se convierte en escorrentía desde el Suelo 1.
- k_b [1/tiempo] es el coeficiente de flujo base.

A.0.3. Flujo base desde capa de suelo profunda a superficie

Corresponde al flujo desde la capa de suelo más profunda (Suelo 2) al flujo superficial (Escorrentía). Se utiliza el módulo BASE VIC, donde el flujo base depende de un parámetro exponencial (n) y una tasa máxima de flujo base en condiciones de saturación (M_{max}) (Jiménez, 2022).

$$M_{\text{base2}} = M_{\text{max}} \cdot \left(\frac{\phi_{\text{soil}}}{\phi_{\text{max}}} \right)^n \quad (\text{A.6})$$

Donde:

- M_{base2} [mm/tiempo] es el flujo de agua que se convierte en escorrentía desde el Suelo 1.
- M_{max} [mm/tiempo] es el máximo flujo base posible.

A.0.4. Percolación

Corresponde al flujo desde la capa superficial de suelo hacia la capa más profunda de suelo. Se utiliza el módulo PERC LINEAR, en el cual la percolación es linealmente proporcional al almacenamiento en el suelo (Jiménez, 2022).

$$M_{\text{perc}} = k_p \cdot \phi_{\text{soil}} \quad (\text{A.7})$$

Donde:

- M_{perc} [mm/tiempo] es el flujo de agua desde el Suelo 1 a Suelo 2.
- k_p [1/tiempo] es el coeficiente de percolación.

A.0.5. Flujo intermedio

Se refiere al agua que viaja desde la capa de suelo superficial lateralmente hacia el flujo superficial (escorrentía). Se utiliza el módulo INTERFLOW PRMS (Jiménez, 2022).

$$M_{\text{inter}} = M_{\text{max}} \cdot \left(\frac{\phi_{\text{soil}} - \phi_{\text{tens}}}{\phi_{\text{max}} - \phi_{\text{tens}}} \right) \quad (\text{A.8})$$

Donde:

- M_{inter} [mm/tiempo] es el flujo de agua desde el Suelo 1 al flujo superficial.
- M_{max} [mm/tiempo] es la tasa máxima de flujo intermedio.

A.0.6. Evaporación del suelo

Flujo de agua desde la capa superficial de suelo hacia la atmósfera. Se utiliza el módulo SOILEVAP LINEAR (Jiménez, 2022).

$$M_{\text{evap}} = \min(\alpha \cdot \phi_{\text{soil}}, PET) \quad (\text{A.9})$$

Donde:

- M_{evap} [mm/tiempo] es el flujo de agua evaporado desde una subcuenca.
- PET [mm/tiempo] es la tasa de evapotranspiración potencial.
- α [1/tiempo] es el coeficiente de evaporación.

A.0.7. Ascenso capilar

Flujo de agua desde la capa más profunda de suelo a la capa más superficial, se produce debido a la tensión superficial. Se utiliza el módulo CRISE HBV (Jiménez, 2022).

$$M_{\text{crise}} = M_{\text{max}}^{\text{cr}} \cdot \left(1 - \left(\frac{\phi_{\text{soil}}}{\phi_{\text{max}}} \right) \right) \quad (\text{A.10})$$

Donde:

- M_{crise} [mm/tiempo] es el ascenso capilar desde la capa de Suelo 2 hasta el Suelo 1.
- $M_{\text{max}}^{\text{cr}}$ [mm/tiempo] es la tasa de ascenso capilar máxima.

A.0.8. Balance de nieve

Se utiliza el módulo SNOBAL HBV, que controla el derretimiento y congelamiento de la nieve (Jiménez, 2022).

$$M_{\text{refreeze}} = K_a \cdot \max(T_f - T, 0) \quad (\text{A.11})$$

Donde:

- M_{refreeze} [mm/tiempo] es el agua estancada que se congela.
- T_f y T [°C] son la temperatura de derretimiento (cero por defecto) y la temperatura en el paso de tiempo actual, respectivamente.
- K_a [mm/d/°C] es el factor de congelamiento.

A.0.9. Derretimiento de nieve

Estima el derretimiento de nieve, siendo un flujo desde la nieve hacia el suelo superficial. Se utiliza el módulo POTMELT HBV (Jiménez, 2022).

$$M_{\text{melt}} = M_a \cdot \max(T - T_f, 0) \quad (\text{A.12})$$

$$M_a = C_f \cdot C_a \cdot (M_{a.\text{min}} + (M_{a.\text{max}} - M_{a.\text{min}}) \cdot \frac{1 - \cos(\eta - \eta_s)}{2}) \quad (\text{A.13})$$

Donde:

- M_{melt} [mm/tiempo] es el flujo de nieve derretida.
- C_f y C_a [-] son factores de corrección por bosques y aspecto respectivamente.
- $M_{a.\text{min}}$ y $M_{a.\text{max}}$ [mm/tiempo/°C] son los factores de derretimiento mínimo y máximo.
- η y η_s son el ángulo diario y el ángulo de solsticio de invierno (constante igual a 23.5[°]) respectivamente.
- J es el día juliano.

$$\eta = \frac{2\pi J}{365} \quad (\text{A.14})$$

Los módulos asociados a la nieve simulan el contenido de líquido de agua en la nieve. $\phi_{sl\text{max}}$ [mm] es el almacenamiento máximo de agua líquida en el manto de nieve, SWE [mm] es el contenido de agua equivalente en la nieve y SWI [-] es un parámetro global calibrable (Jiménez, 2022). La relación entre estos componentes se describe mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_{sl\text{max}} = SWE \cdot SWI \quad (\text{A.15})$$

A.0.10. Evapotranspiración potencial

Se utiliza el módulo PET OUDIN (Oudin et al., 2005).

$$PET = \frac{SET}{\lambda_v \cdot \rho_w} \cdot \min\left(\frac{T_{\text{ave}} + 5}{100}, 0\right) \quad (\text{A.16})$$

Donde se considera:

- La radiación de onda corta SET [$MJ/m^2/tiempo$],
- El calor latente de vaporización λ_v [MJ/kg],
- La densidad del agua ρ_w [kg/m^3],
- La temperatura promedio diaria T_{ave} .

A.0.11. Partición de lluvia y nieve

Particiona la precipitación total en lluvia y caída de nieve. Se utiliza el método RAIN-SNOW DINGMAN, que es una aproximación basada en rangos de temperatura (Jiménez, 2022).

$$\alpha_s = \frac{T_{trans} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (A.17)$$

Donde:

- α_s [–] es la fracción de precipitación total que corresponde a nieve,
- T_{trans} [$^{\circ}C$] es la temperatura de transición lluvia-nieve,
- T_{max} [$^{\circ}C$] y T_{min} [$^{\circ}C$] son la temperatura diaria máxima y mínima respectivamente.

Anexo B. Calibración de modelo hidrológico CR2MET

A continuación se presenta una tabla resumen de los parámetros calibrados en el modelo CR2MET (Jiménez, 2022).

Tabla B.1: Resumen de parámetros por proceso

Proceso	Parámetro	Mínimo	Máximo	Unidad	Tipo
Infiltración	β	0.5	3	-	Perfil de suelo
	S_{wilt}	0	0.9	-	Perfil de suelo
	S_{fc}	0	0.9	-	Perfil de suelo
Flujo base	n	0.5	5	-	Perfil de suelo
	M_{max}	0.001	1000	mm/d	Perfil de suelo
	k_b	0	1	1/d	Perfil de suelo
Percolación	k_p	0.001	0.1	1/d	Perfil de suelo
Flujo intermedio	M_{max}	0	200	mm/d	Perfil de suelo
Evaporación	α	0.01	0.1	1/d	Uso de suelo
Ascenso Cap.	M_{max}^{cr}	1	100	mm/d	Perfil de suelo
Balance nival	K_a	0	5	mm/d/°C	Uso de suelo
	SWI	0.04	0.07	-	Global
	$M_{a.max}$	0	5	mm/d/°C	Uso de suelo
Partición lluvia-nieve	T_{trans}	-3	3	°C	Global

El modelo utiliza la métrica de eficiencia de Kling Gupta (Gupta, Kling, Yilmaz, y Martinez, 2009) que ha demostrado ser una métrica que permite representar correctamente el ciclohidrológico y también los eventos de crecidas (Jiménez, 2022). Además se utiliza la eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) lo que compara los caudales simulados con los observados. La métrica NSE puede tener valores entre $-\infty$ y 1, donde 1 indica un ajuste perfecto entre los caudales simulados y observados.

Eficiencia de Kling-Gupta (KGE):

Mide el grado de ajuste de caudales simulados y observados por estaciones fluviométricas. Los valores de KGE van desde $-\infty$ hasta 1 (siendo 1 un ajuste perfecto). Esta métrica considera tres aspectos de los hidrogramas: correlación lineal (r), sesgo (β) y la variabilidad relativa entre los caudales observados y simulados (α).

La ecuación de KGE se define como:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (\text{B.1})$$

donde:

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad (\text{B.2})$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad (\text{B.3})$$

Aquí, σ_s y σ_o representan la desviación estándar de los caudales simulados y observados respectivamente, y μ_s y μ_o son los promedios de los caudales simulados y observados, respectivamente.

La calibración del modelo hidrológico se desarrolla con una calibración simultánea, considerando dos periodos para obtener métricas de rendimiento en dos estaciones simultáneamente, estos periodos se indican a continuación:

- 2015-03-23 a 2015-03-29: Corresponde al periodo en el cual se genera una tormenta que provocó la presencia de aluviones en las quebradas del río Carmen y río Tránsito.
- 2015-01-01 a 2018-01-01: Corresponde a un periodo de tres años en los cuales se generan eventos de crecidas con bastantes datos fluviométricos para calibrar en las dos estaciones utilizadas.

Con respecto al algoritmo de optimización de parámetros, se utiliza el algoritmo Dynamically dimensioned search (Tolson y Shoemaker, 2007), un método heurístico, que inicia como un método global para luego mutar a una búsqueda local de parámetros. Con este método se realizan pruebas de calibración utilizando entre 5000 a 25000 iteraciones (mientras mayor es el número de parámetros a calibrar mayor el número de iteraciones requeridas). (Jiménez, 2022)

B.1. Métricas de rendimiento

Para estudiar el rendimiento del modelo nuevo se utiliza la métrica de eficiencia de Kling-Gupta. Para calibrar con la métrica KGE, se consideran los siguientes rangos de rendimiento (Towner et al., 2019):

- Buen ajuste: $KGE \geq 0.75$
- Ajuste intermedio: $0.75 > KGE \geq 0.5$
- Ajuste pobre: $0.5 > KGE > 0$
- Ajuste muy pobre: $0 \geq KGE$

El coeficiente de correlación de Pearson mide la correlación lineal entre dos conjuntos de datos, en este caso, los datos simulados por el modelo y los datos observados en las estaciones. Rango de valores: -1 a 1, donde 1 significa una correlación perfecta positiva, -1 indica una correlación perfecta negativa, y 0 indica que no hay correlación lineal.

Alpha (α) mide la relación entre la variabilidad (desviación estándar) de los datos simulados y la de los datos observados. Un valor de 1 indica que la variabilidad de los datos simulados es igual a la de los datos observados. Valores mayores que 1 indican mayor variabilidad en los datos simulados respecto a los observados, y valores menores que 1 indican menor variabilidad.

Beta (β) mide la relación entre el promedio de los datos simulados y el promedio de los datos observados. Un valor de 1 indica que el promedio de los datos simulados es igual al de los datos observados. Valores mayores que 1 indican que el modelo sobreestima el promedio, mientras que valores menores que 1 indican subestimación

KGE es una métrica integral que combina la correlación, el error sistemático (sesgo), y la variabilidad relativa entre las simulaciones y las observaciones en un solo número. Rango de valores: $-\infty$ a 1, donde 1 es el valor óptimo que indica que las simulaciones coinciden perfectamente con las observaciones.

Anexo C. Precipitación

C.1. Comparación series de precipitación

Para profundizar en la comparación de las series de precipitación, este segmento se enfoca en el análisis detallado de los datos recopilados desde el año 2001 hasta el 2021 de todas las estaciones meteorológicas en estudio. La comparativa se estructura en torno a la evaluación de las diferencias y similitudes entre los datos observados directamente en las estaciones y aquellos simulados por el modelo WRF-SAAG. A continuación se muestran las Figuras: C.1, C.2, C.3, C.4 y C.5 con la comparación de las precipitaciones agrupadas por estaciones.

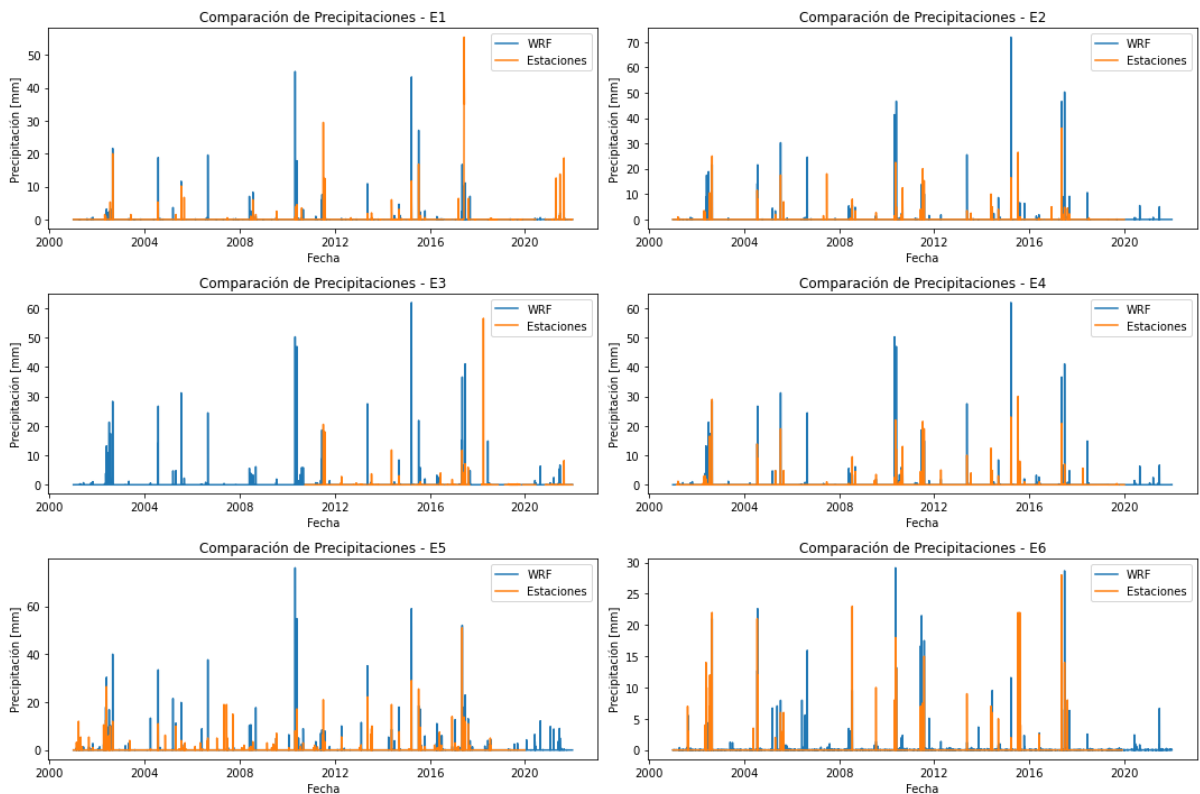


Figura C.1: Serie de Precipitación para las estaciones E1-E6.

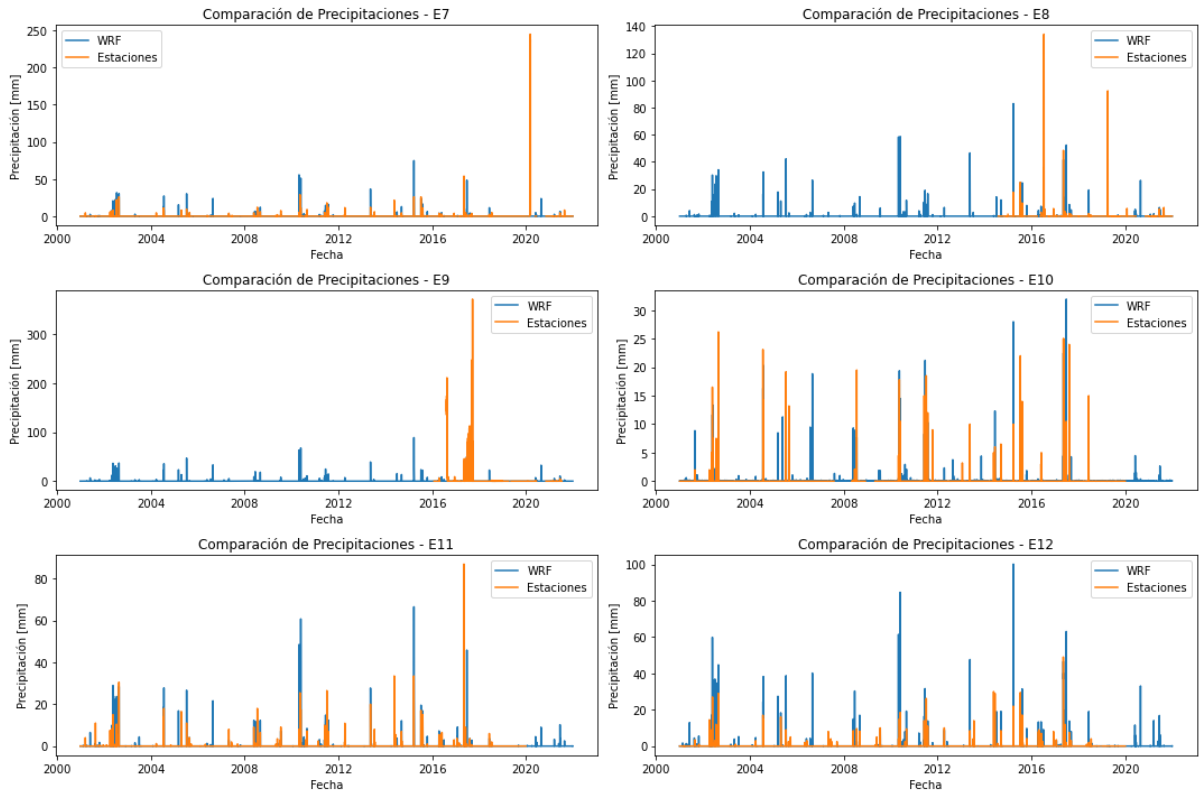


Figura C.2: Serie de Precipitación para las estaciones E7-E12.

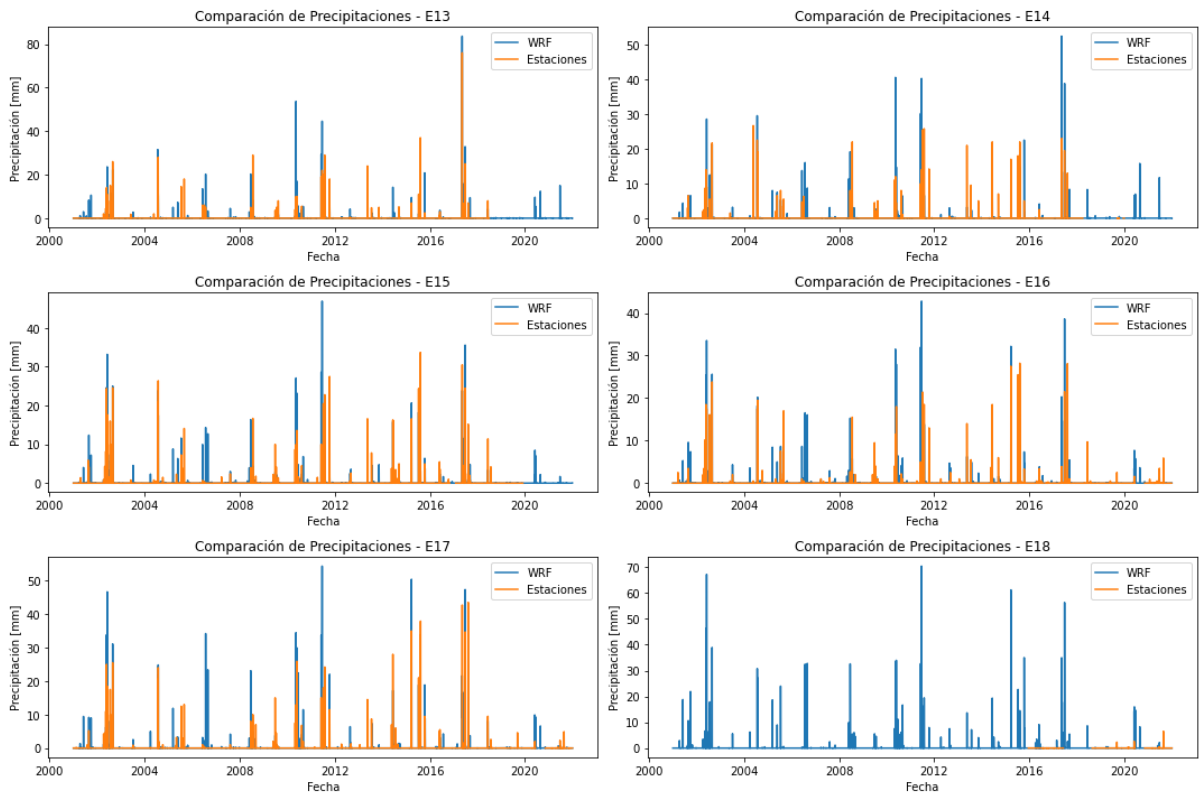


Figura C.3: Serie de Precipitación para las estaciones E13-E18.

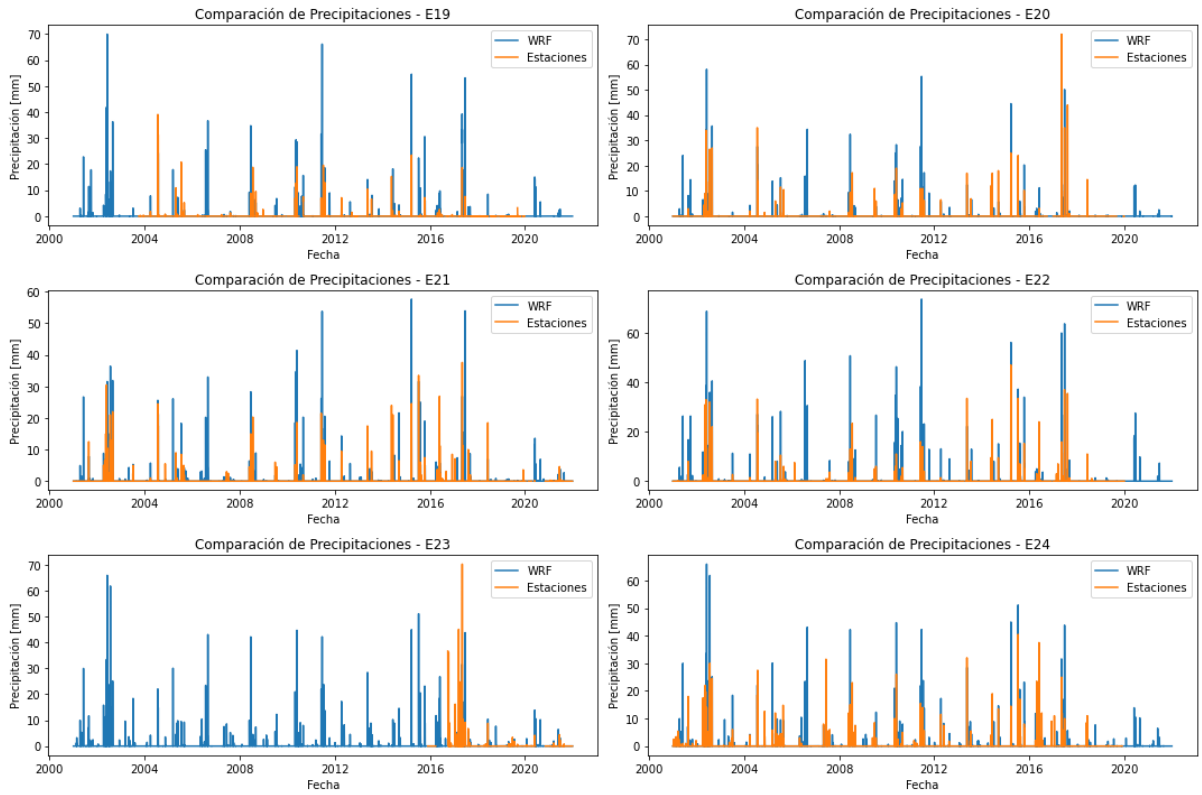


Figura C.4: Serie de Precipitación para las estaciones E19-E24.

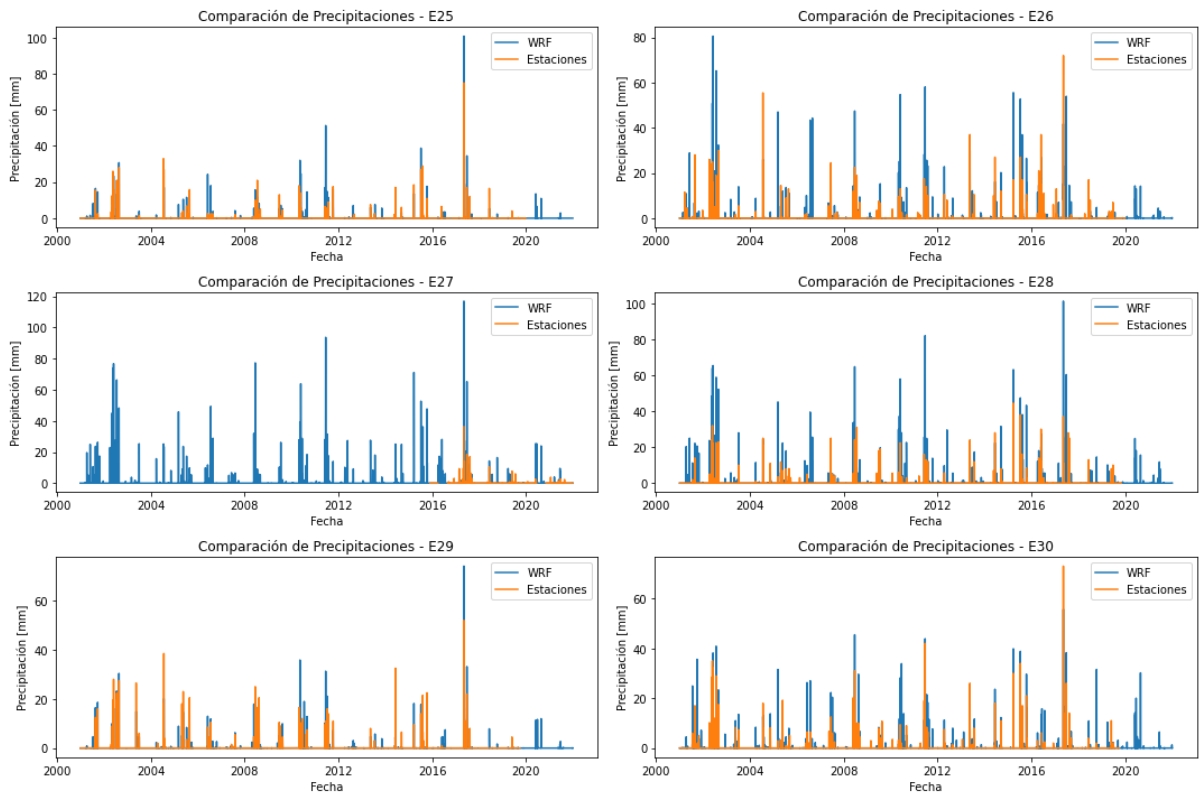


Figura C.5: Serie de Precipitación para las estaciones E25-E30.

A continuación en la Figura C.6 se presentan los gráficos de dispersión, para cada estación en estudio.

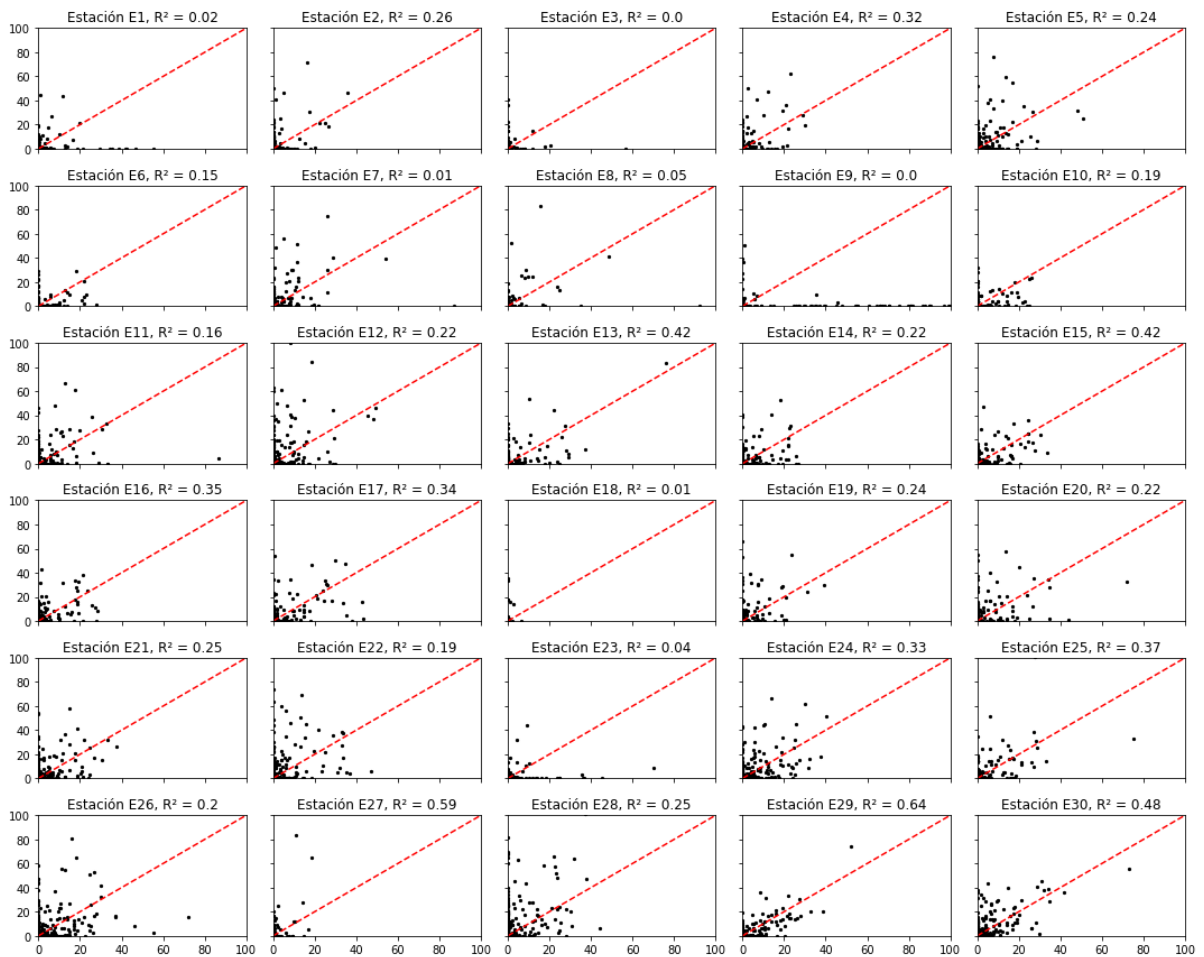


Figura C.6: Precipitación observada vs. simulada por WRF-SAAG

C.2. Promedios anuales de precipitación para todas las estaciones

Se presentan en las Figuras C.7, C.8, C.9, C.10, C.11 gráficos de comparación de los promedios diarios de todas las estaciones. Luego se trabajó con los datos de promedio anual y se graficó la dispersión para cada estación, Figura C.12 y se presentan curvas de comparación con las métricas en la Figura C.13.

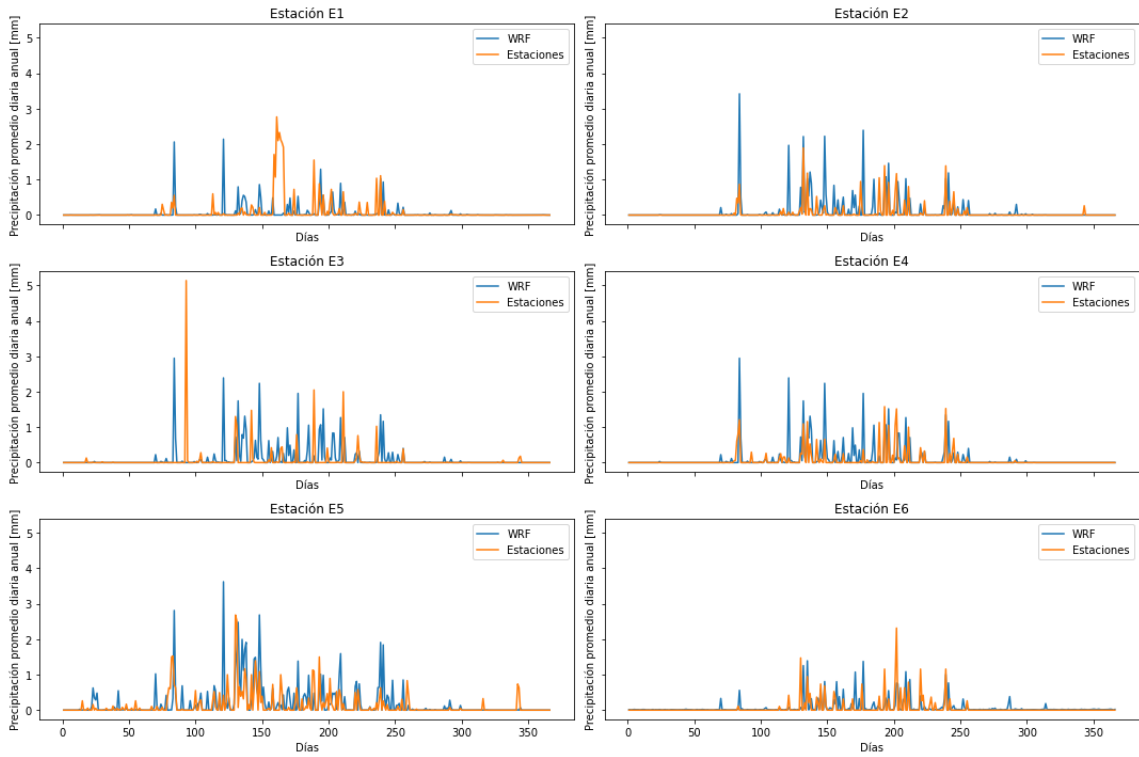


Figura C.7: Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones

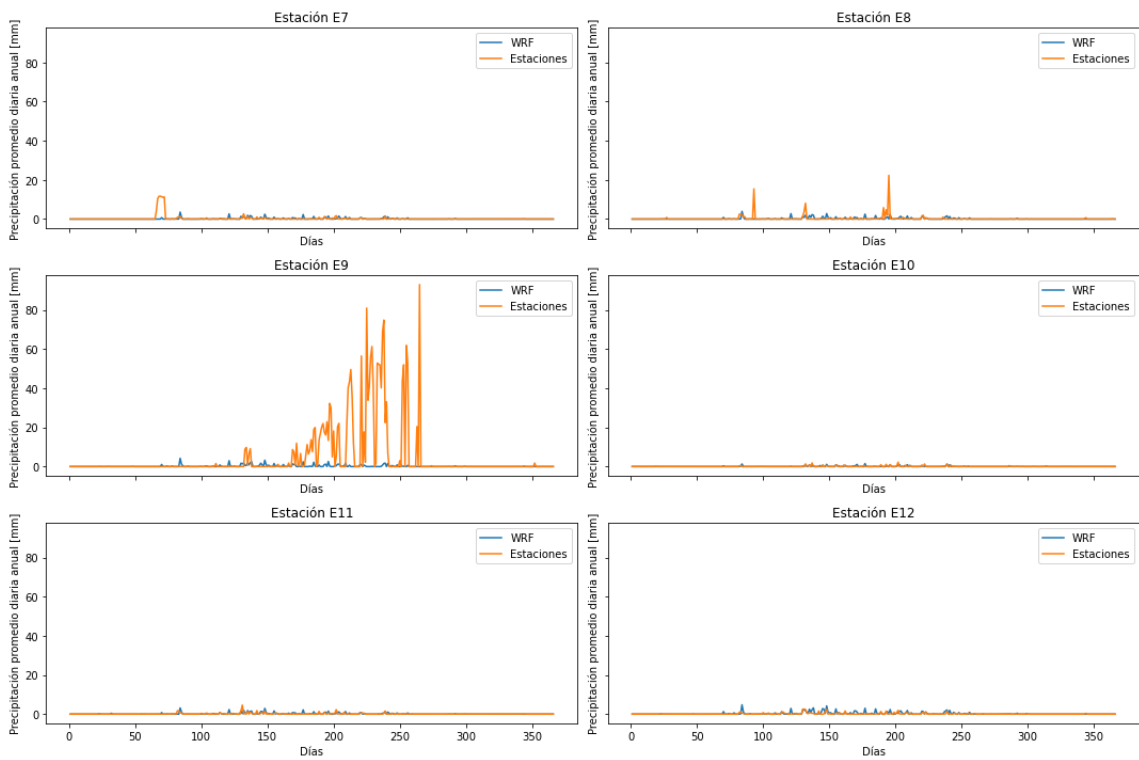


Figura C.8: Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones

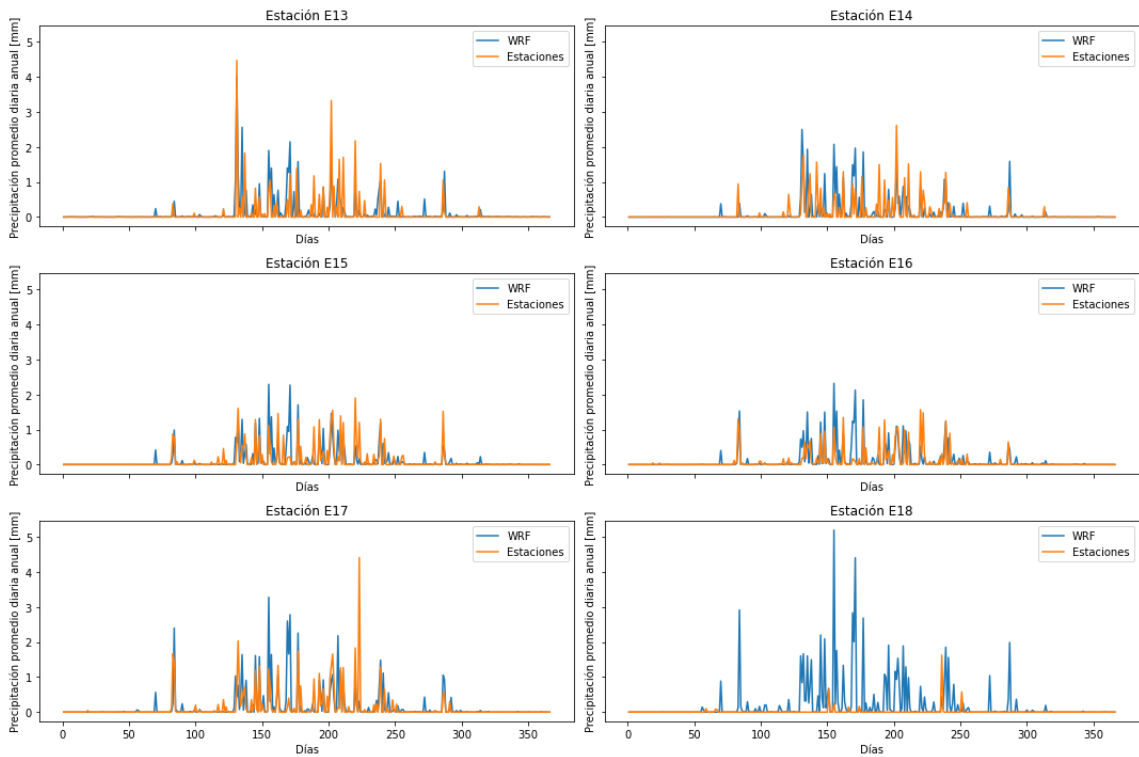


Figura C.9: Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones

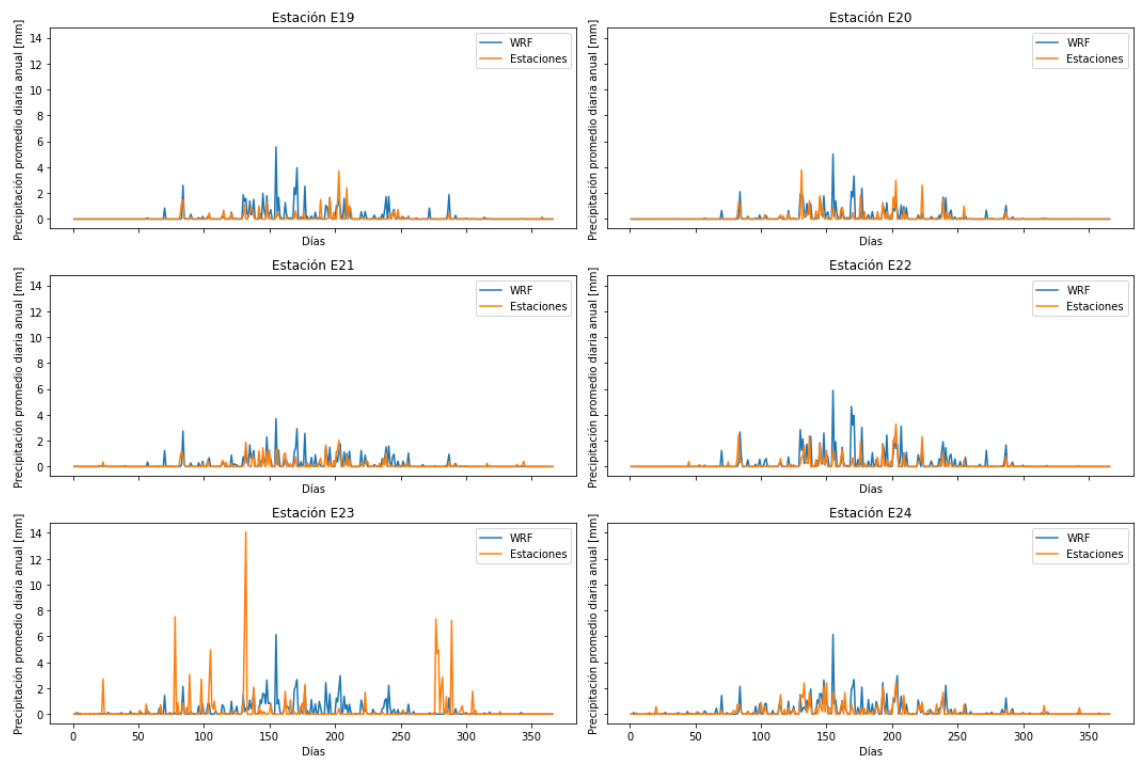


Figura C.10: Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones

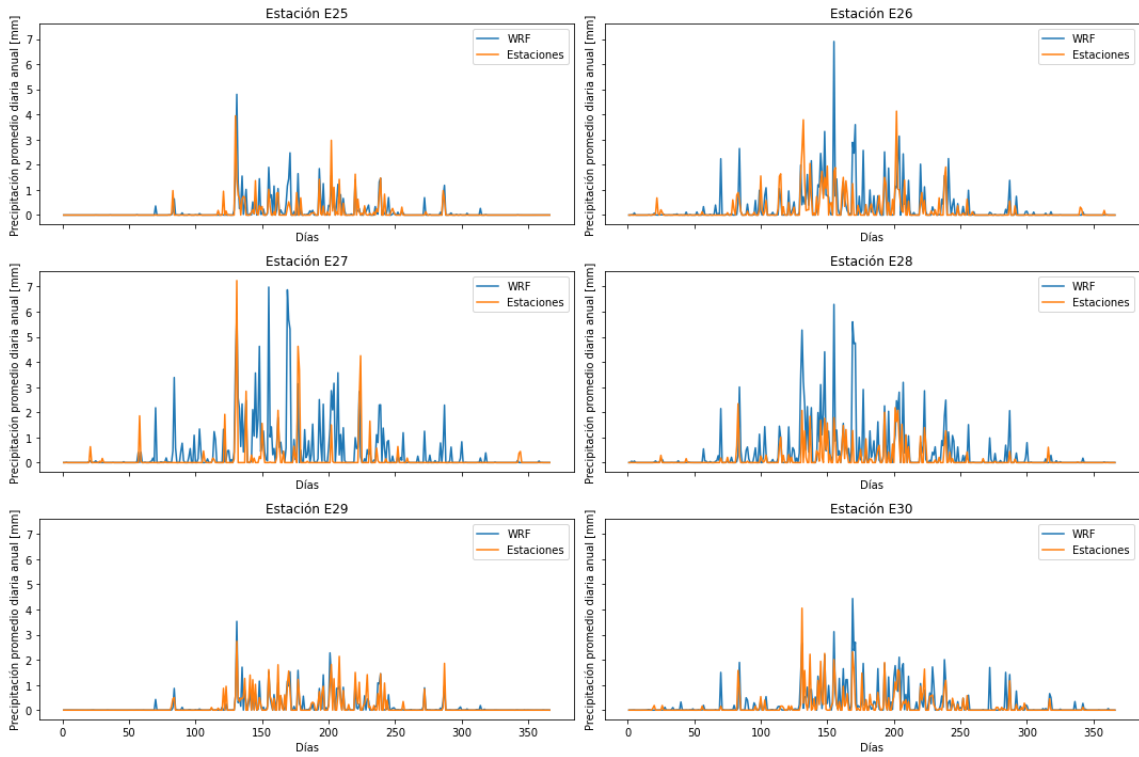


Figura C.11: Precipitación promedio diaria de todos los años para las estaciones

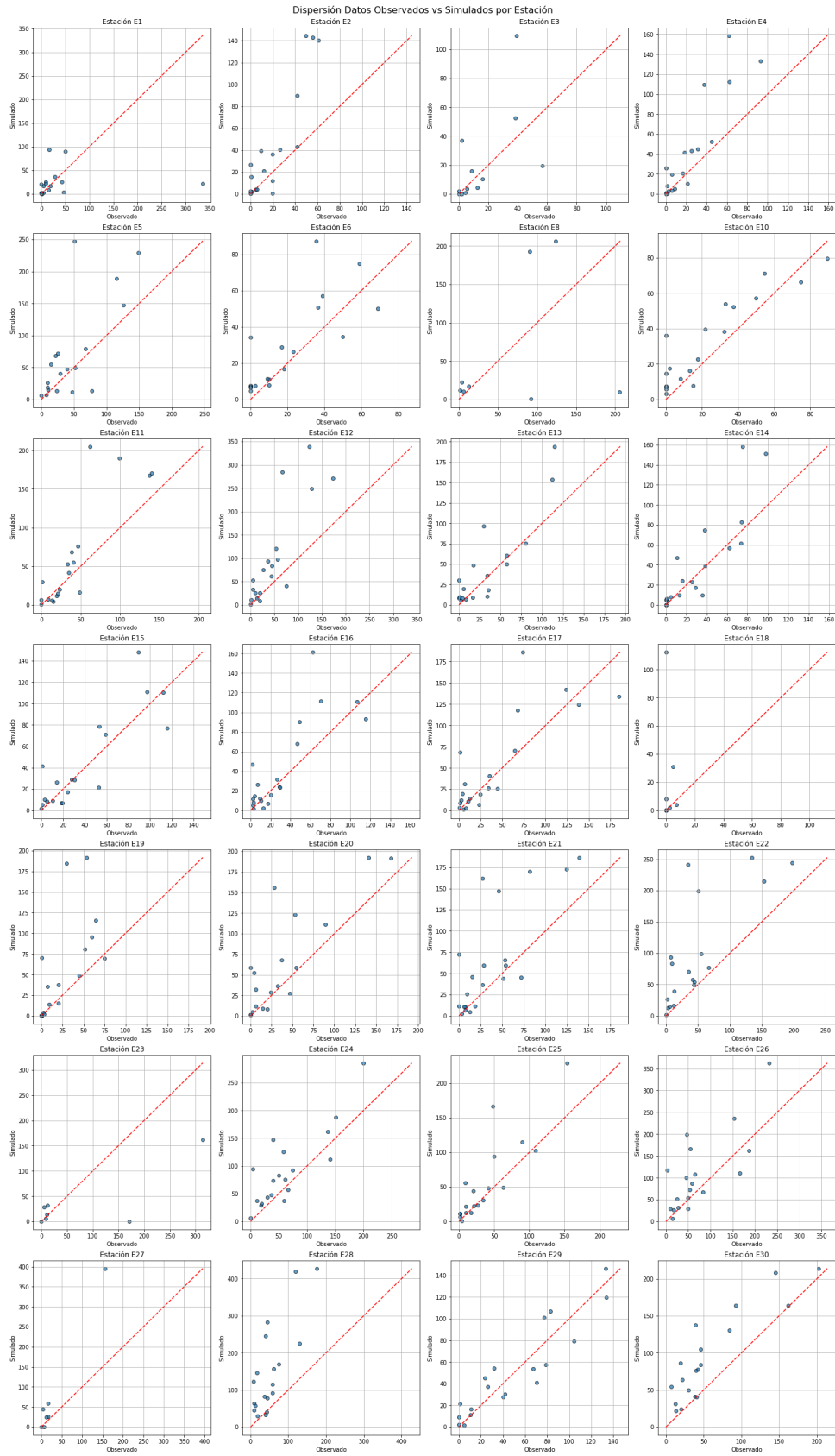


Figura C.12: Precipitación promedio anual simulada vs observada por WRF-SAAG

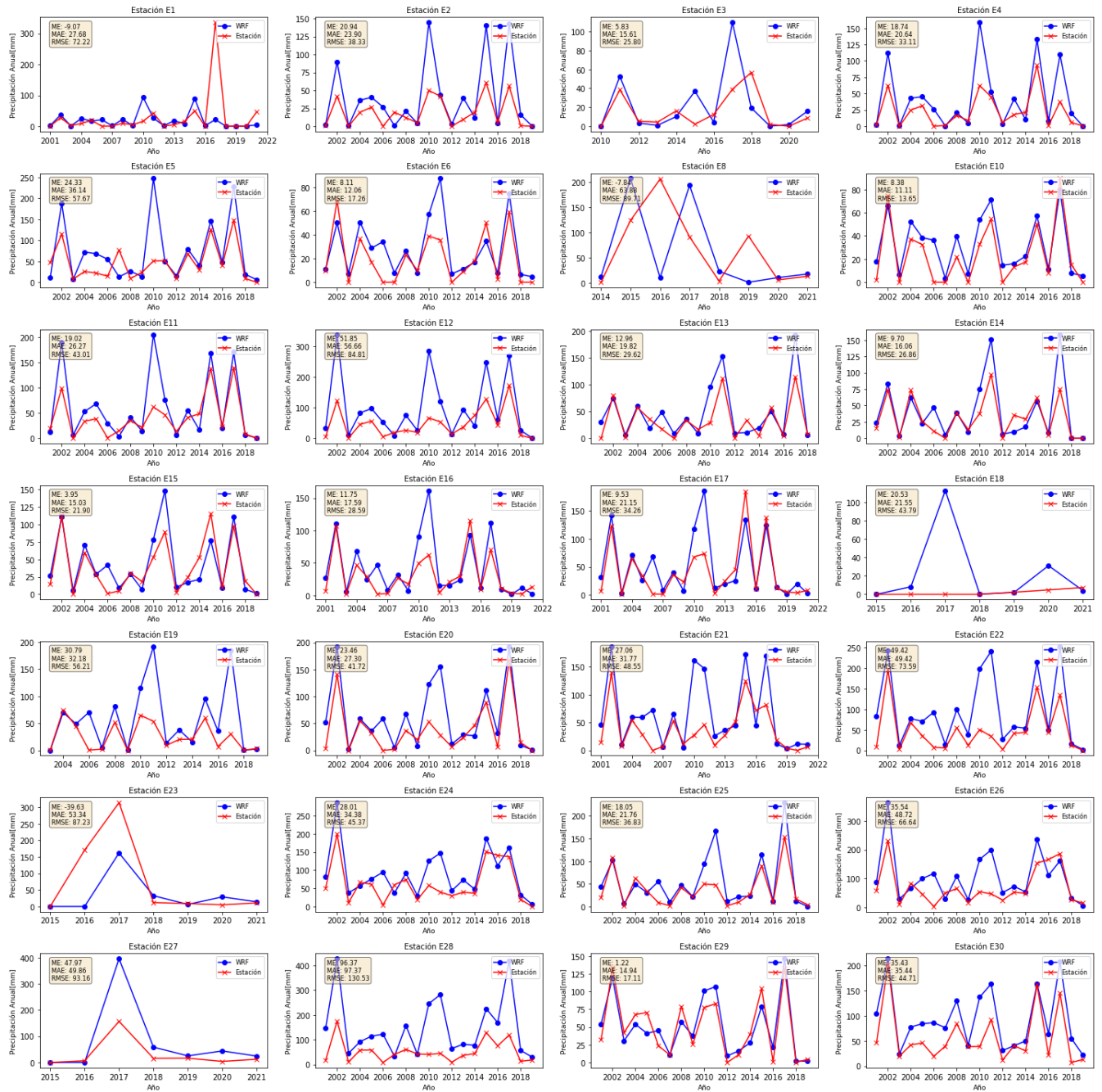


Figura C.13: Promedio anual observada, simulada por WRF-SAAG

C.3. Métricas de rendimiento de Precipitación

Se presentan tablas de resumen con todas las métricas por estación por año de estudio. Primero se presenta en la Tabla C.1 el error medio, en la Tabla C.2 RMSE, luego en la Tabla C.3 pBias en porcentaje para terminar en la Tabla C.4 con el coeficiente de Pearson, para la precipitación.

Tabla C.1: Resultados error medio por año y estación

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
E1	0.01	0.02	0.00	0.04	-0.01	0.06	0.00	0.03	-0.01	0.21	-0.04	0.00	0.04	-0.02	0.11	0.01	-1.11	0.00	0.00	0.00	-0.13
E2	0.00	0.13	0.00	0.05	0.04	0.07	-0.05	0.02	0.00	0.26	0.00	0.01	0.08	-0.02	0.22	0.00	0.24	0.04	0.00		
E3										0.00	0.04	-0.01	-0.01	-0.02	0.10	-0.03	0.30	-0.16	-0.01	0.01	0.02
E4	0.00	0.14	0.00	0.05	0.04	0.07	0.00	0.01	-0.01	0.27	0.02	-0.01	0.07	-0.03	0.11	0.02	0.20	0.04	0.00		
E5	-0.10	0.20	0.00	0.13	0.13	0.11	-0.18	0.05	-0.03	0.54	0.00	0.01	0.03	0.03	0.06	0.02	0.22	0.03	0.02		
E6	0.00	-0.05	0.02	0.04	0.03	0.09	0.02	0.01	-0.01	0.05	0.14	0.02	0.01	0.00	-0.04	0.01	0.05	0.02	0.01		
E8														0.08	0.23	-0.74	0.28	0.05	-0.26	0.02	0.01
E10	0.04	-0.02	0.02	0.04	0.02	0.10	0.02	0.08	0.03	0.06	0.05	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	-0.03	-0.02	0.02		
E11	-0.02	0.25	0.02	0.05	0.08	0.08	-0.03	0.02	-0.02	0.39	0.08	-0.02	0.04	-0.09	0.08	-0.01	0.08	0.00	0.00		
E12	0.08	0.59	0.03	0.10	0.11	0.13	-0.03	0.13	0.02	0.60	0.19	0.00	0.17	-0.10	0.33	0.05	0.27	0.05	0.00		
E13	0.08	-0.01	0.01	0.01	-0.05	0.09	0.02	0.01	-0.02	0.18	0.12	0.02	-0.06	0.04	-0.02	0.01	0.22	-0.01			
E14	0.02	0.02	0.01	-0.03	-0.01	0.10	0.01	0.00	-0.01	0.10	0.15	0.02	-0.07	-0.03	-0.01	0.01	0.23	0.00	0.00		
E15	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.11	0.01	0.00	-0.03	0.07	0.16	0.02	-0.02	-0.09	-0.11	-0.01	0.04	-0.03	0.00		
E16	0.05	0.01	0.01	0.06	-0.01	0.12	0.02	0.01	-0.03	0.11	0.27	0.03	-0.01	-0.02	-0.06	0.01	0.11	0.00	0.00	0.04	-0.03
E17	0.07	0.05	0.01	0.02	-0.02	0.18	0.02	0.01	-0.04	0.14	0.31	0.03	-0.01	-0.05	-0.14	0.00	-0.04	0.00	-0.01	0.08	-0.02
E18															0.00	0.03	0.75	0.00	0.00	0.12	-0.01
E19			-0.01	-0.01	0.01	0.19	0.01	0.08	0.00	0.17	0.38	0.01	0.05	-0.01	0.10	0.09	0.50	0.00	0.00		
E20	0.13	0.14	0.00	0.01	0.01	0.16	0.01	0.08	-0.03	0.19	0.35	0.01	0.01	-0.05	0.06	0.09	0.07	-0.01	0.00		
E21	0.08	0.13	0.01	0.01	0.08	0.20	0.00	0.03	-0.02	0.37	0.28	0.05	0.03	-0.02	0.13	-0.07	0.24	-0.02	0.00	0.09	0.01
E22	0.20	0.13	0.03	0.03	0.10	0.23	0.02	0.12	0.07	0.41	0.57	0.07	0.05	0.03	0.17	0.02	0.32	0.01	0.01		
E23															0.00	-1.07	-0.42	0.06	-0.01	0.11	0.01
E24	0.09	0.24	0.07	-0.03	0.04	0.25	-0.06	0.05	0.03	0.19	0.29	0.04	0.09	0.03	0.10	-0.09	0.07	0.04	0.02		
E25	0.07	-0.02	0.01	-0.04	-0.01	0.13	0.02	0.02	0.00	0.12	0.33	0.03	0.03	-0.01	0.07	0.01	0.21	-0.01	-0.01		
E26	0.08	0.36	0.05	-0.05	0.15	0.31	-0.06	0.12	0.03	0.31	0.42	0.07	0.05	0.01	0.23	-0.16	-0.07	0.01	-0.02		
E27															0.00	-0.03	0.69	0.12	0.03	0.18	0.03
E28	0.36	0.69	0.10	0.09	0.15	0.31	-0.02	0.26	0.00	0.56	0.65	0.15	0.12	0.09	0.27	0.26	0.82	0.12	0.04		
E29	0.06	-0.04	-0.03	-0.04	-0.08	0.06	0.00	-0.06	0.03	0.06	0.07	0.03	0.01	-0.03	-0.07	0.06	0.04	0.01	-0.01		
E30	0.16	0.03	0.01	0.10	0.11	0.18	0.10	0.13	0.01	0.27	0.20	0.05	0.00	0.05	0.01	0.13	0.19	0.13	0.03		

Tabla C.2: Resultados RMSE por año y estación

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
E1	0.04	0.42	0.07	1.07	0.41	1.03	0.03	0.60	0.13	2.52	1.74	0.03	0.57	0.43	2.11	0.05	6.90	0.01	0.01	0.03	1.39
E2	0.07	1.65	0.03	1.53	0.82	1.29	0.95	0.62	0.11	3.11	1.59	0.10	1.28	0.78	3.28	0.29	2.88	0.61	0.01		
E3										0.00	1.84	0.08	0.21	0.71	1.26	0.38	3.71	3.78	0.10	0.10	0.64
E4	0.12	1.87	0.06	1.69	0.73	1.28	0.06	0.63	0.16	3.27	1.90	0.17	1.06	0.84	2.72	0.23	2.10	0.85	0.02		
E5	1.03	2.20	0.30	1.60	1.46	1.81	1.70	0.79	0.50	4.63	1.40	0.25	1.27	1.42	3.43	1.25	3.80	0.49	0.20		
E6	0.39	0.87	0.10	1.64	0.64	0.98	0.07	0.76	0.46	0.70	1.85	0.08	0.45	0.47	1.50	0.20	2.79	0.14	0.04		
E8														1.03	4.17	8.55	3.08	1.01	4.97	0.58	0.38
E10	0.37	0.63	0.06	1.78	1.09	1.11	0.03	1.21	0.18	0.39	1.84	0.24	0.43	0.54	1.88	0.34	2.60	0.72	0.03		
E11	0.70	2.53	0.24	1.99	1.26	1.18	0.44	1.36	0.28	3.36	1.73	0.39	1.01	1.94	3.91	0.64	5.48	0.29	0.02		
E12	0.80	5.63	0.35	2.12	2.22	2.14	0.56	1.96	0.53	5.13	2.57	0.17	2.99	2.66	5.45	1.35	3.65	0.97	0.03		
E13	0.75	0.97	0.17	1.07	1.23	1.18	0.24	1.54	0.39	2.36	2.89	0.23	1.27	0.84	1.79	0.11	3.02	0.32			
E14	0.46	1.38	0.18	1.65	0.57	1.16	0.17	1.64	0.22	2.45	2.99	0.17	1.11	0.50	1.58	0.15	3.17	0.00	0.00		
E15	0.70	1.08	0.24	1.04	0.99	1.12	0.13	0.98	0.46	1.35	3.23	0.18	0.77	0.92	1.65	0.28	1.47	0.48	0.02		
E16	0.59	1.17	0.13	1.33	1.04	1.27	0.15	0.90	0.41	1.38	3.19	0.35	0.58	0.36	1.72	0.25	2.28	0.45	0.13	0.46	0.35
E17	0.72	1.77	0.09	0.31	0.98	2.18	0.23	1.05	0.64	2.07	3.78	0.36	0.71	0.77	3.04	0.26	3.02	0.32	0.23	0.78	0.28
E18															0.00	0.25	4.49	0.02	0.11	1.29	0.36
E19			0.05	0.80	1.17	2.35	0.07	1.93	0.03	1.62	4.37	0.35	0.82	0.88	2.33	0.68	4.30	0.03	0.19		
E20	1.50	2.74	0.08	0.61	0.99	2.00	0.12	1.70	0.57	2.22	3.70	0.45	0.93	1.24	2.09	0.64	5.20	0.77	0.04		
E21	1.57	2.29	0.26	0.47	1.57	2.06	0.21	1.37	0.28	2.75	3.60	0.86	0.79	1.98	3.12	0.89	3.17	0.91	0.20	1.01	0.29
E22	2.18	3.85	0.45	0.83	1.80	3.06	0.44	2.41	1.41	3.18	5.36	0.85	1.74	1.22	3.98	0.88	5.52	0.59	0.07		
E23															0.00	5.18	5.48	0.51	0.19	0.86	0.41
E24	1.80	3.76	0.87	1.07	1.80	2.64	1.30	2.44	0.64	1.48	3.27	0.81	1.86	1.30	2.59	1.95	3.01	0.89	0.17		
E25	0.90	1.06	0.15	1.60	1.04	1.51	0.22	0.84	0.53	2.06	2.86	0.37	0.53	0.21	1.53	0.44	5.03	0.71	0.21		
E26	1.94	4.90	0.66	3.35	2.80	3.30	1.30	3.03	0.90	2.76	4.38	0.86	2.15	1.56	3.51	2.04	4.21	0.90	0.44		
E27															0.00	0.28	6.70	1.20	0.74	1.92	0.60
E28	2.42	4.62	1.02	1.33	2.48	2.72	1.21	4.21	1.32	3.71	6.25	1.70	1.64	1.82	4.33	1.74	7.35	1.07	1.05		
E29	0.63	1.08	0.67	1.10	1.49	0.68	0.18	1.32	0.80	2.19	1.38	0.20	0.43	0.77	0.93	0.50	1.60	0.09	0.26		
E30	2.39	1.54	0.49	1.09	1.73	1.83	1.14	1.52	0.48	2.29	2.45	0.86	1.38	0.92	2.33	1.25	3.11	1.81	0.97		

Tabla C.3: Resultados pBias por año y estación

Data	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
E1		31.63	-46.06	179.87	-10.77		156.50	131.63	-56.88	472.08	-38.76	265.82	280.02	-48.78	80.32		-93.66	-32.38			-91.39
E2	101.39	113.18		86.43	51.74		-96.47	75.21	-13.40	190.52	3.23		314.93	-37.80	130.63	-24.49	154.86	2546.50			
E3											36.74	-36.41	-79.54	-36.92	1660.22	-64.71	180.56	-66.04	-93.73		84.01
E4	29.20	79.68		73.24	44.12		-45.34	24.46	-43.22	156.13	16.99	-43.83	131.84	-52.08	42.60	677.17	192.64	245.03	-70.20		
E5	-76.11	63.91	-9.73	180.45	209.43	280.04	-82.98	192.68	-42.65	387.44	-3.11	53.13	16.94	38.97	16.66	21.19	53.85	112.01			
E6	10.71	-27.30		38.66	69.10			14.74	-22.04	46.79	146.16		25.63	-5.93	-30.84	205.52	27.10				
E8													841.72	67.08	-95.19	112.09	550.66	-98.88	80.12	34.32	
E10	783.72	-11.55		40.32	18.76			81.39		64.27	30.58		22.02	29.04	14.31	44.75	-11.14	-48.50			
E11	-38.18	91.49		56.94	76.91	2892.32	-72.41	18.90	-31.17	231.71	63.81	-56.94	34.84	-66.10	22.18	-11.93	21.96	-16.90			
E12	576.05	174.80	815.20	83.85	71.84	947.07	-55.30	184.90	31.23	328.34	125.79	2.44	153.86	-46.53	93.78	41.51	56.30	164.20			
E13		-6.61	223.97	5.49	-47.68	186.98		6.11	-45.14	226.13	37.51	1816.65	-68.41	276.32	-13.34	79.10	68.82	-14.96			
E14	49.75	12.17	161.07	-15.81	-10.49	327.43		1.68	-27.77	97.34	54.99	962.30	-72.28	-40.31	-8.25	80.54	111.22				
E15	86.15	-1.41	587.45	19.58	4.04	3691.84	79.25	-5.22	-62.31	47.12	65.88	213.39	-29.18	-59.13	-33.55	-16.14	14.22	-62.96			
E16	275.06	4.24	111.67	46.02	-16.37	2236.32	210.17	19.45	-58.97	84.12	159.34	272.66	-23.94	-21.00	-19.07	27.03	58.43	-9.77	-50.84	425.69	-81.54
E17	390.53	15.31	255.09	9.76	-21.88	4434.36	746.60	13.68	-69.73	74.18	153.26	381.63	-21.71	-43.35	-27.42	4.63	-9.99	14.01	-73.07	434.09	-69.99
E18																			-7.50	548.34	-46.14
E19			-100.00	-6.67	9.55	11635.64	104.83	56.26		77.39	257.55	44.54	87.37	-25.00	59.62	402.29	515.41	9.88	-27.44		
E20	1203.05	36.39		7.12	10.57		136.65	82.90	-57.16	133.38	454.01	81.30	21.28	-42.32	24.17	430.43	14.27	-35.58	1046.98		
E21	205.58	34.19	46.27	10.16	108.53		-7.33	24.11	-60.64	494.32	219.61	173.87	34.92	-13.89	38.55	-37.32	108.27	-36.30	-16.68		77.40
E22	803.91	23.57	366.22	14.99	100.35	1142.78	159.25	80.30	213.24	294.86	609.49	1026.58	38.78	22.61	39.56	13.60	87.44	33.24			
E23																-100.00	-48.51	179.52	-30.52	488.59	29.75
E24	63.95	43.23	245.18	-13.93	24.25	2000.62	-37.94	23.50	58.60	117.08	270.39	46.62	85.30	29.91	24.73	-20.31	18.00	66.28	1938.08		
E25	117.34	-5.67	324.98	-21.55	-9.64	518.23	428.27	14.79	4.08	87.81	247.29	469.75	117.36	-13.96	27.59	25.58	49.28	-27.30	-88.01		
E26	48.30	56.66	197.31	-20.11	118.29	3264.18	-41.20	64.82	49.89	206.02	324.09	102.07	37.63	9.76	53.65	-33.01	-13.37	15.97	-54.33		
E27																-100.00	152.48	267.52	54.92	971.85	98.74
E28	762.46	144.52	354.18	58.95	95.41	1427.48	-19.27	159.20	-3.99	507.13	527.48	576.24	121.44	75.48	74.71	124.82	252.76	337.09	66.07		
E29	69.14	-10.35	-27.24	-20.26	-41.76	91.71	5.22	-27.25	43.55	30.28	28.96		49.59	-30.66	-24.26	2034.88	10.04		-62.34		
E30	127.46	5.62	21.28	84.35	83.71	342.78	92.02	54.96	6.53	253.49	77.21	157.40	-0.17	66.85	1.30	197.75	43.42	679.71	66.73		

Tabla C.4: Resultados Coeficiente de Pearson por año y estación

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
E1		0.93	0.35	0.00	0.79		-0.01	0.26	0.74	0.39	0.10	0.59	0.62	0.35	0.67		-0.01	0.86			0.46
E2	0.01	0.54		0.00	0.91		0.00	0.21	0.78	0.49	0.14		0.85	0.00	0.65	0.08	0.66	0.00			
E3											0.12	0.87	0.00	0.25	0.29	0.11	0.17	0.00	0.15		0.02
E4	-0.01	0.60		0.13	0.96		0.00	0.32	0.87	0.53	0.12	0.89	0.93	0.00	0.68	-0.01	0.85	0.00	-0.01		
E5	0.18	0.74	0.16	0.77	0.54	0.68	0.19	0.25	0.42	0.87	0.32	0.93	0.84	0.16	0.42	0.14	0.53	0.03			
E6	0.39	0.85		0.25	0.40			0.87	0.68	0.93	0.23		0.30	0.60	0.41	-0.01	0.02				
E8														-0.01	0.59	0.01	0.66	0.12	0.00	-0.01	0.65
E10	0.99	0.94		0.19	0.51			0.52		0.96	0.19		0.62	0.60	0.24	0.12	0.31	0.67			
E11	0.09	0.68		0.13	0.73	0.01	0.34	0.24	0.87	0.85	0.32	0.92	0.90	0.00	0.41	0.25	0.21	0.50			
E12	0.10	0.33	-0.01	0.53	0.57	0.00	0.26	0.26	0.72	0.86	0.20	0.95	0.56	-0.01	0.44	0.21	0.72	0.45			
E13		0.86	0.09	0.85	0.16	0.48		0.37	0.81	0.82	0.51	0.00	0.24	0.00	0.51	0.85	0.81	0.92			
E14	0.65	0.73	0.00	0.65	0.60	0.36		0.18	0.83	0.06	0.41	-0.01	0.57	0.95	0.54	0.77	0.59				
E15	0.44	0.91	0.00	0.83	0.32	0.40	0.80	0.44	0.74	0.73	0.32	0.72	0.61	0.70	0.77	0.70	0.84	0.82			
E16	0.58	0.90	0.97	0.64	0.26	0.31	0.69	0.47	0.82	0.85	0.27	0.44	0.69	0.95	0.76	0.56	0.52	0.49	0.20	1.00	0.48
E17	0.56	0.88	1.00	0.99	0.40	0.07	0.46	0.57	0.92	0.66	0.31	0.17	0.60	0.93	0.63	0.78	0.62	0.80	0.45	1.00	0.29
E18																			0.49	0.86	0.08
E19				0.97	0.63	0.00	0.83	0.45		0.85	0.18	0.64	0.63	0.15	0.75	0.76	0.40	0.01	0.37		
E20	0.26	0.76		0.95	0.51		0.35	0.49	0.57	0.39	0.11	0.17	0.48	0.51	0.73	0.91	0.35	0.21	-0.01		
E21	0.09	0.74	0.69	0.97	0.38		0.40	0.62	0.97	0.71	0.14	0.25	0.70	0.15	0.61	0.87	0.45	0.34	-0.01		0.46
E22	0.05	0.66	1.00	0.92	0.50	0.00	0.42	0.54	0.28	0.72	0.08	0.14	0.53	0.67	0.49	0.81	0.27	0.47			
E23																-0.02	0.23	0.75	0.55	0.85	0.31
E24	0.35	0.75	0.75	0.82	0.37	0.13	0.76	0.34	0.57	0.93	0.08	0.69	0.44	0.39	0.77	0.72	0.51	0.27	0.53		
E25	0.69	0.91	0.92	0.71	0.38	0.55	0.77	0.76	0.68	0.46	0.58	0.29	0.49	0.98	0.83	0.24	0.58	0.58	0.02		
E26	0.43	0.70	0.74	0.17	0.17	0.17	0.64	0.18	0.30	0.78	0.13	0.84	0.40	0.49	0.71	0.72	0.55	0.50	0.21		
E27																0.75	0.80	0.49	0.18	0.77	0.50
E28	0.43	0.89	0.97	0.78	0.53	0.15	0.50	0.16	0.49	0.74	0.10	0.27	0.54	0.54	0.51	0.73	0.46	0.52	0.03		
E29	0.91	0.92	0.96	0.93	0.62	0.79	0.85	0.75	0.48	0.40	0.80		0.54	0.96	0.89	0.45	0.96		0.67		
E30	0.23	0.91	0.76	0.70	0.47	0.84	0.80	0.90	0.85	0.60	0.71	0.04	0.37	0.76	0.76	0.58	0.74	0.00	-0.01		

C.4. Estaciones de interes

Para el estudio de las precipitaciones, de estaciones de interés se presenta las series de precipitación cuando existen datos en las estaciones, las estaciones presentadas son :

Tabla C.5: Desempeño de las simulaciones por estación

Estación	Código	Pearson	Alpha	Beta	KGE
Algodones	E19	0.49	1.94	2.18	-0.59
Tránsito	E26	0.45	1.38	1.50	0.16
Corral	E28	0.50	2.21	2.83	-1.25

La evaluación del desempeño de un modelo hidrológico a través de varias estaciones indica una moderada correlación positiva entre las simulaciones y las observaciones reales, con valores de correlación de Pearson que oscilan entre 0.45 y 0.50. Aunque esta correlación sugiere que el modelo logra captar la tendencia general de los datos, la fuerza de esta relación es solamente moderada, señalando la necesidad de mejorar cómo el modelo se alinea con los patrones observados en la realidad.

En términos de variabilidad y sesgo, los resultados muestran que el modelo tiende a sobreestimar ambos aspectos. Los valores de alpha, que indican la variabilidad de las simulaciones en comparación con las observaciones, varían de 1.38 a 2.21, sugiriendo una sobreestimación de la dispersión de los datos. Esto puede apuntar a una sensibilidad excesiva del modelo a ciertas entradas o a una representación inadecuada de los procesos que naturalmente limitarían esta variabilidad. De manera similar, los valores de beta, que reflejan el sesgo en las simulaciones, se encuentran entre 1.50 y 2.83, revelando una tendencia generalizada del modelo a producir valores más altos que los observados, lo que indica sesgos sistemáticos que necesitan ser corregidos.

La eficiencia del modelo, evaluada mediante el coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), muestra un rango que va desde significativas desviaciones (-1.25) hasta una eficiencia moderada (0.16). Estos valores subrayan las discrepancias entre las simulaciones y las observaciones, derivadas de una mala correlación, sesgos significativos, o diferencias en la variabilidad. La presencia de valores negativos de KGE es particularmente preocupante, ya que indica un ajuste pobre del modelo a los datos observados, destacando áreas críticas donde se requiere la mejora del modelo para incrementar su precisión y fiabilidad

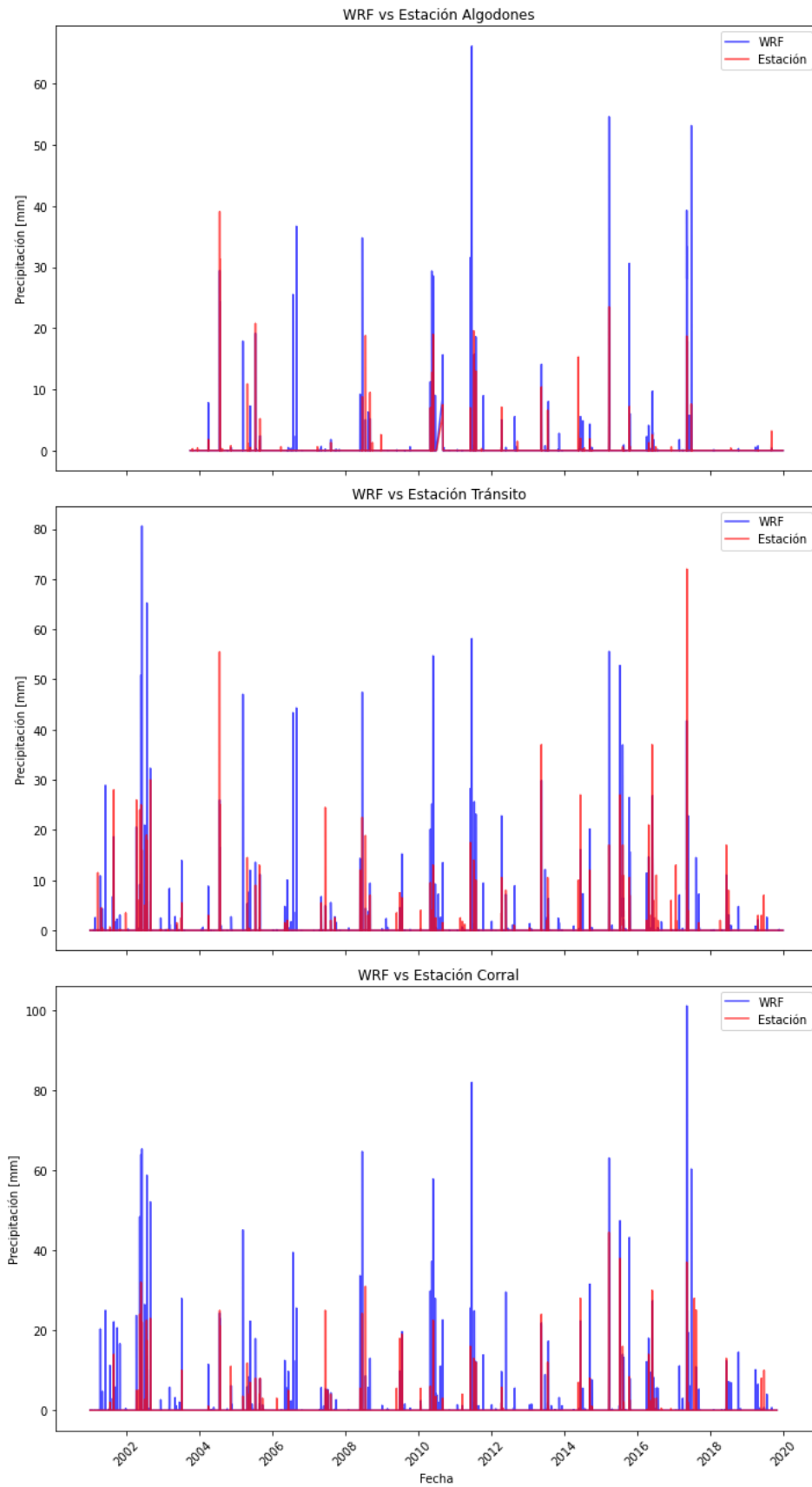


Figura C.14: Series de tiempo observada, simulada por WRF-SAAG

Anexo D. Temperatura

Se presenta la dispersión de los datos de temperatura diarios, simulados versus observados.

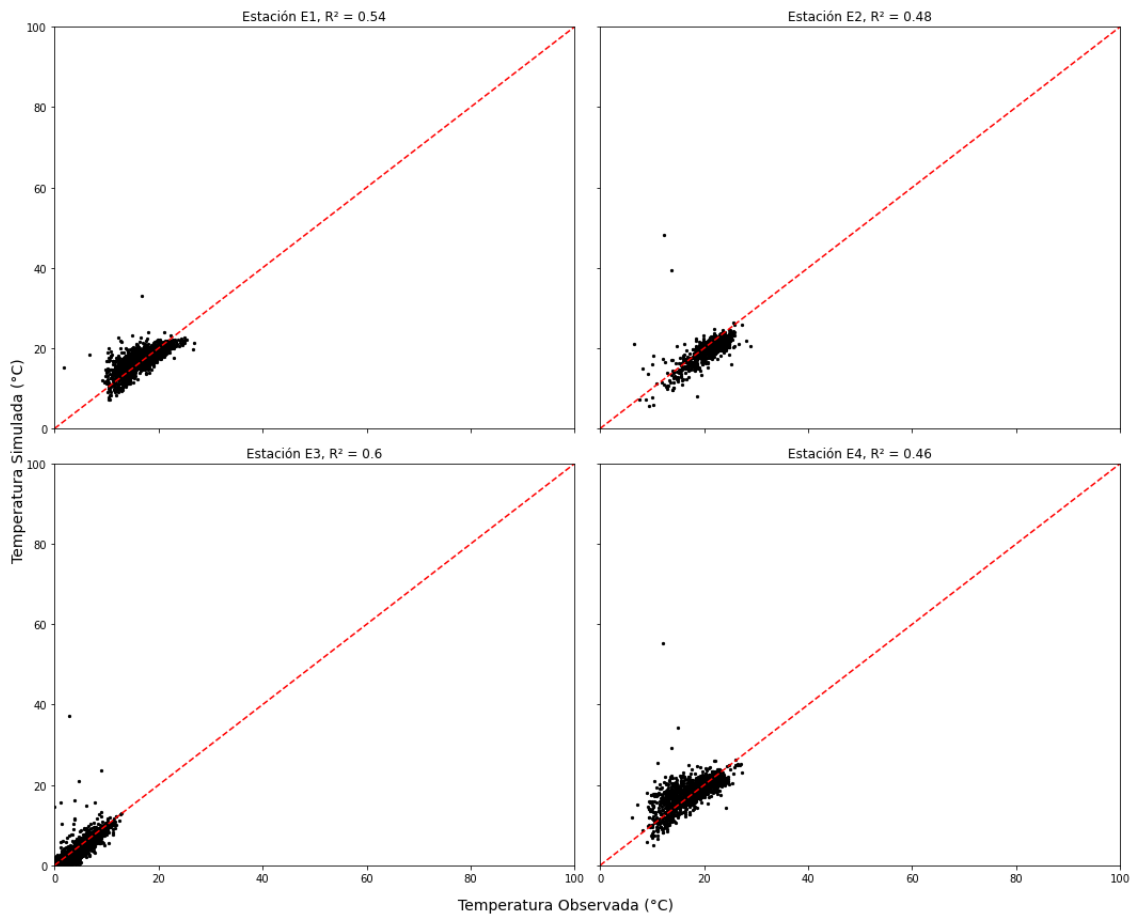


Figura D.1: Temperatura observada vs. simulada por WRF-SAAG

Anexo E. Curvas de Precipitación Duración Área por horas

Se presenta las curvas PDA para los periodos de 24, 18, 12, 6, 2, 1 horas.

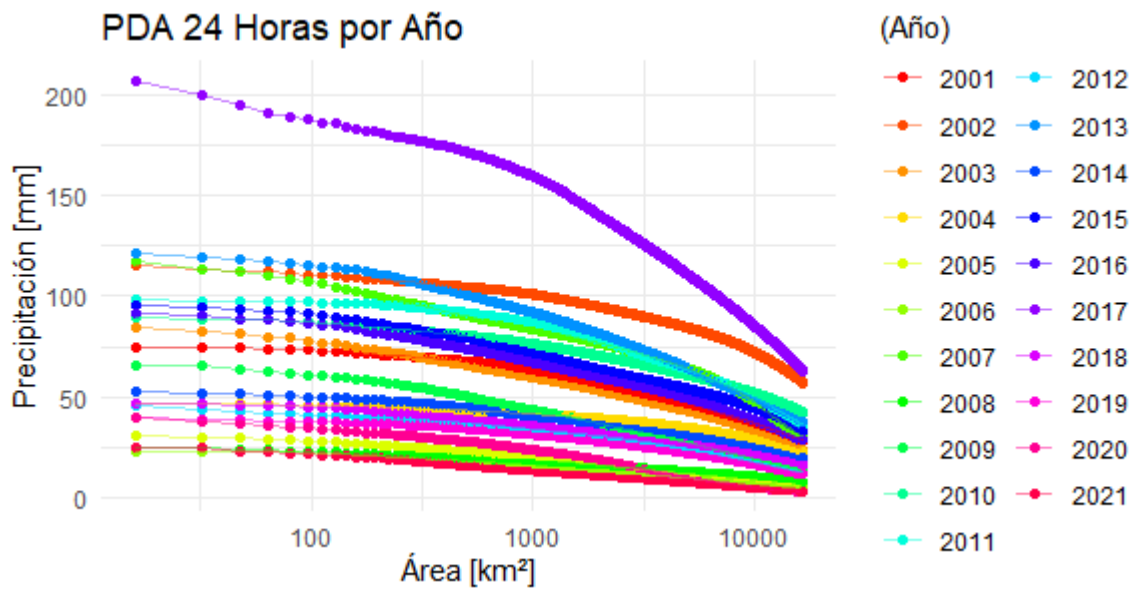


Figura E.1: PDA 24 Horas

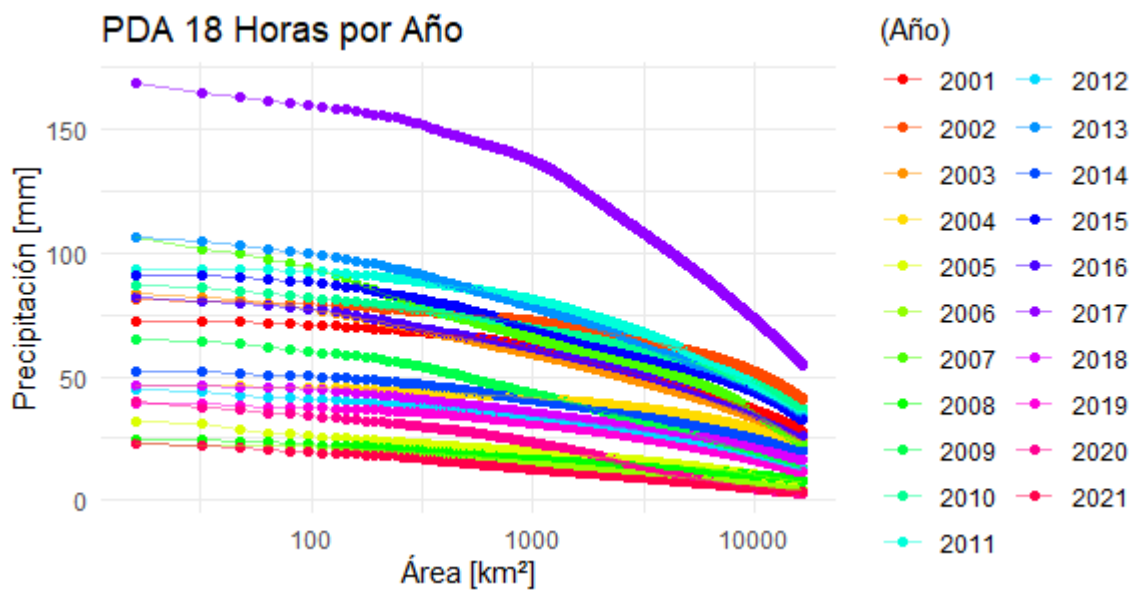


Figura E.2: PDA 18 Horas

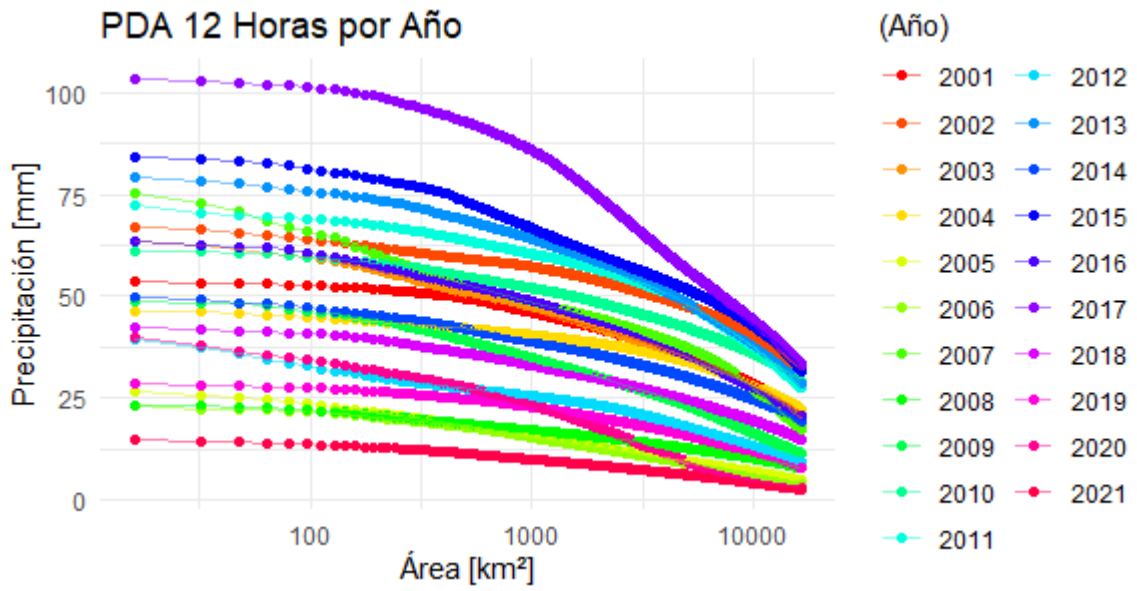


Figura E.3: PDA 12 Horas

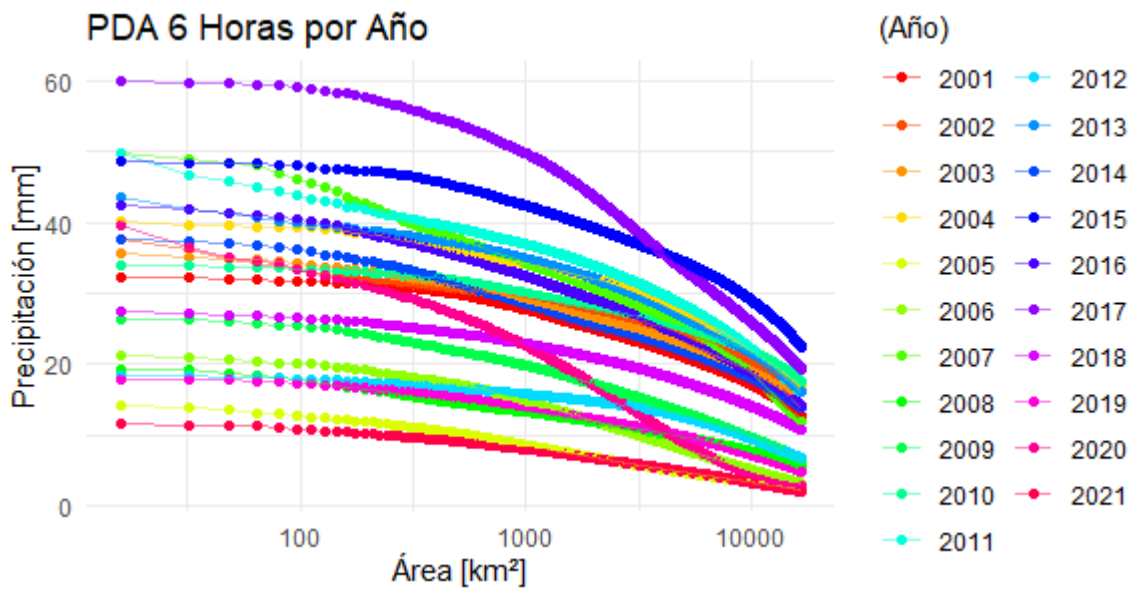


Figura E.4: PDA 6 Horas

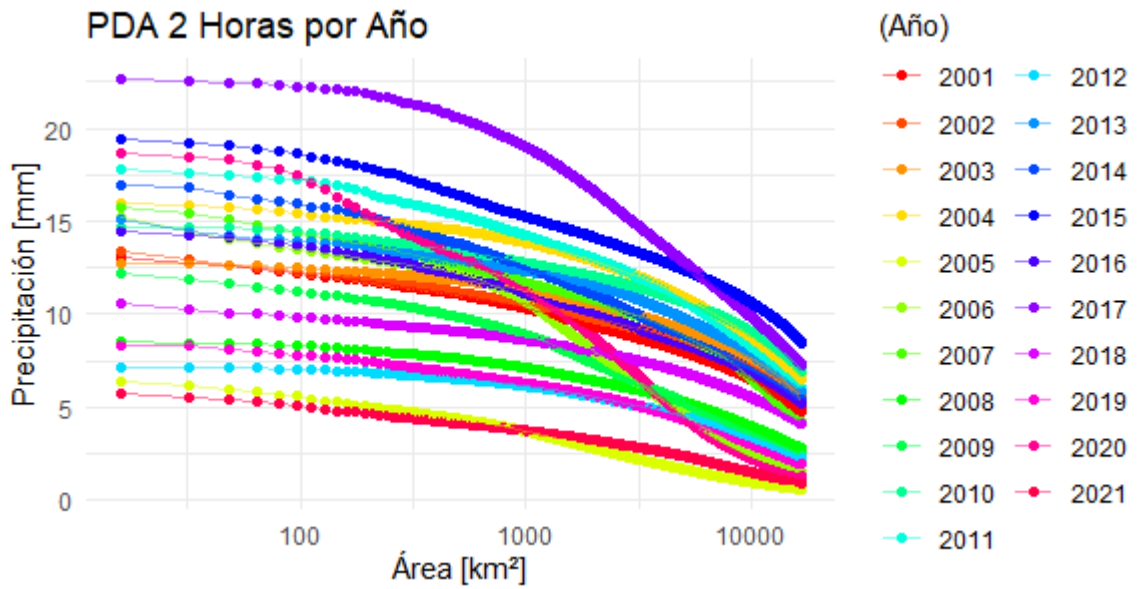


Figura E.5: PDA 2 Horas

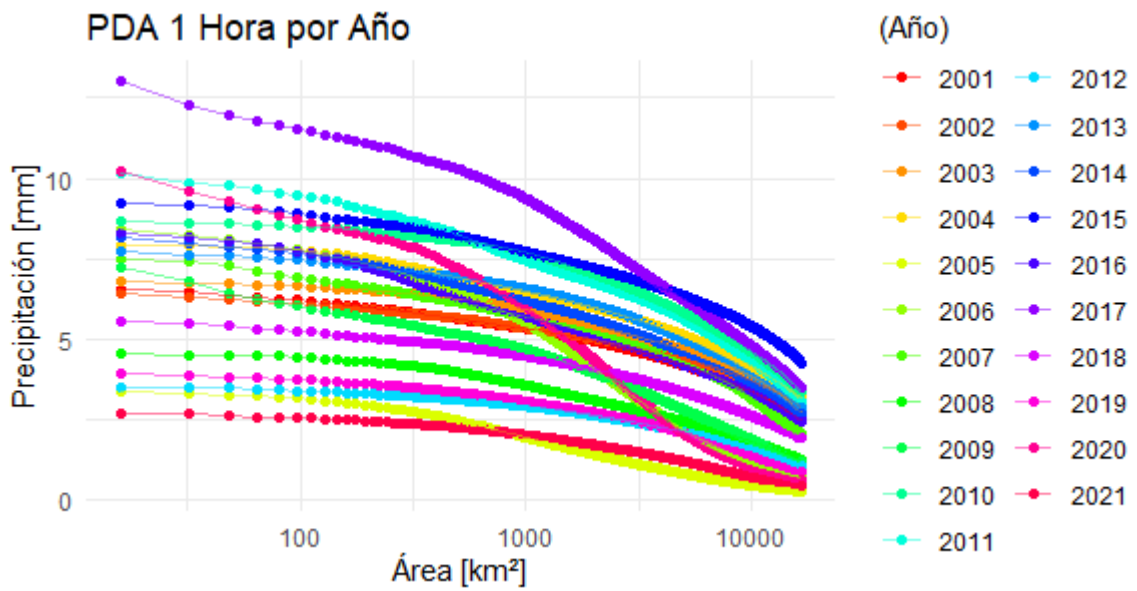


Figura E.6: PDA 1 Hora

Anexo F. Modelo hidrológico WRF

Se presentan los resultados para la calibración 2015-2017, para cada una de las estaciones que se calibraron.

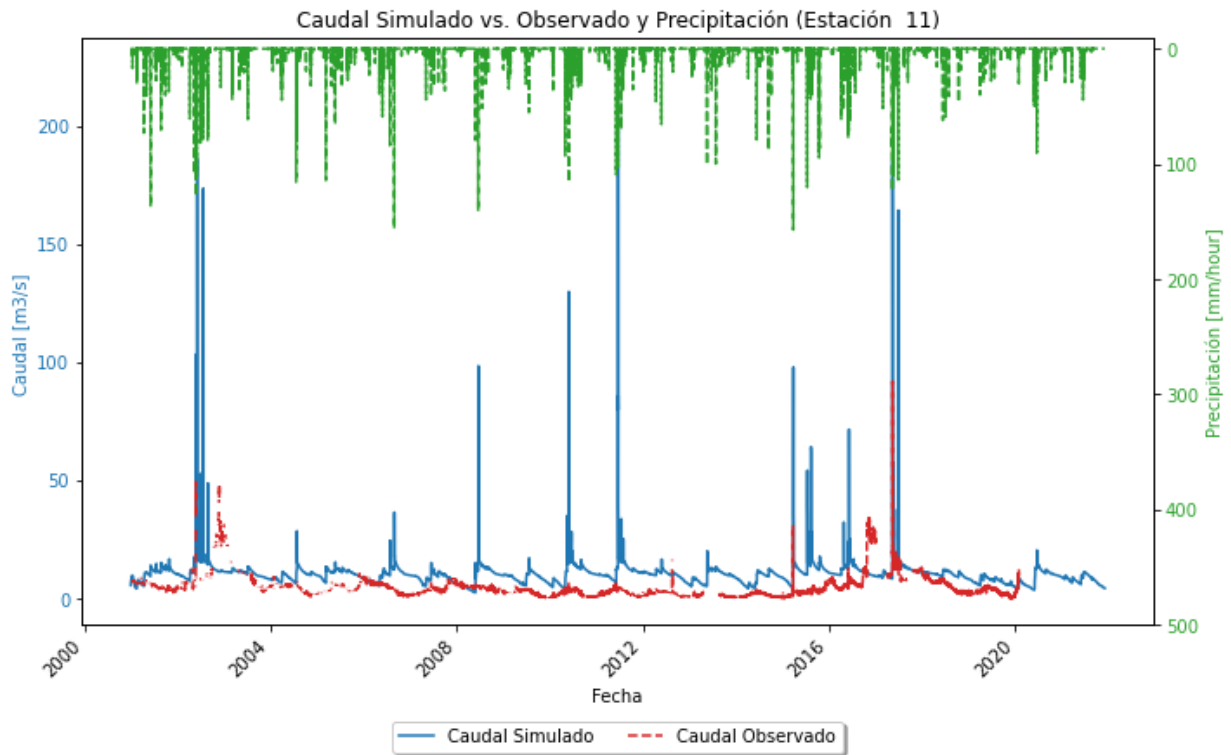


Figura F.1: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente

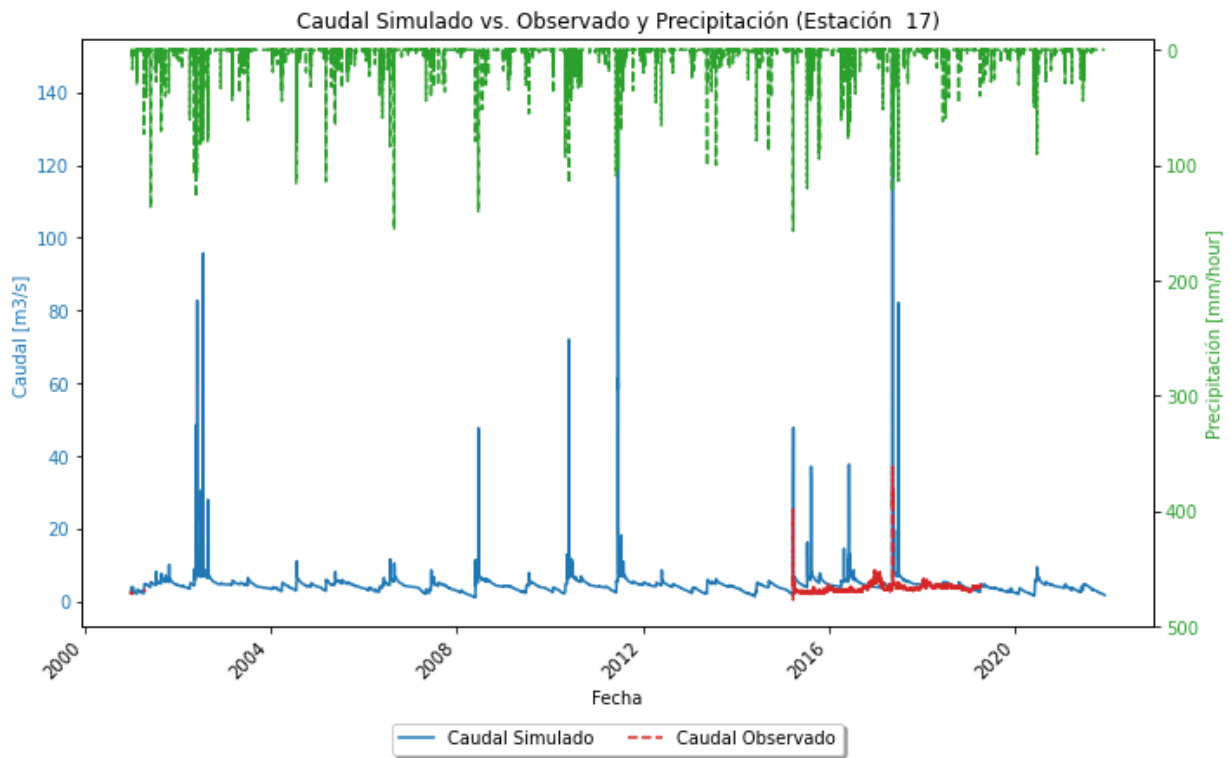


Figura F.2: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente

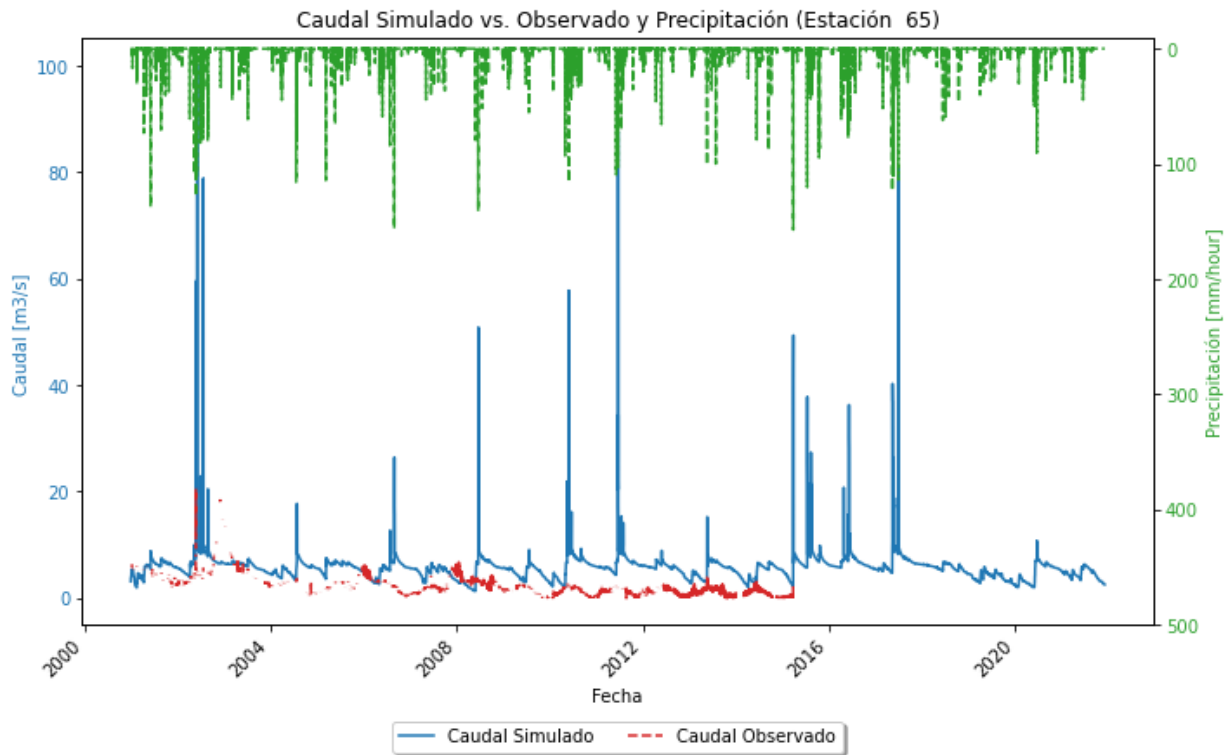


Figura F.3: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente

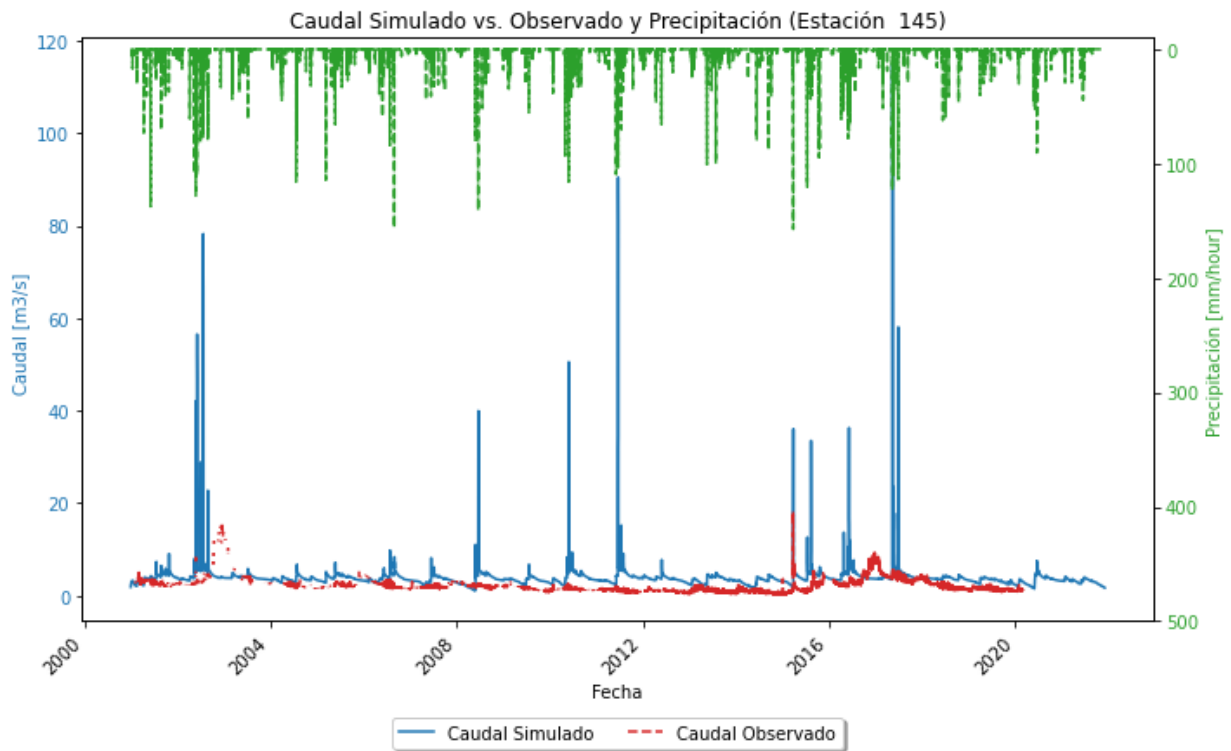


Figura F.4: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente

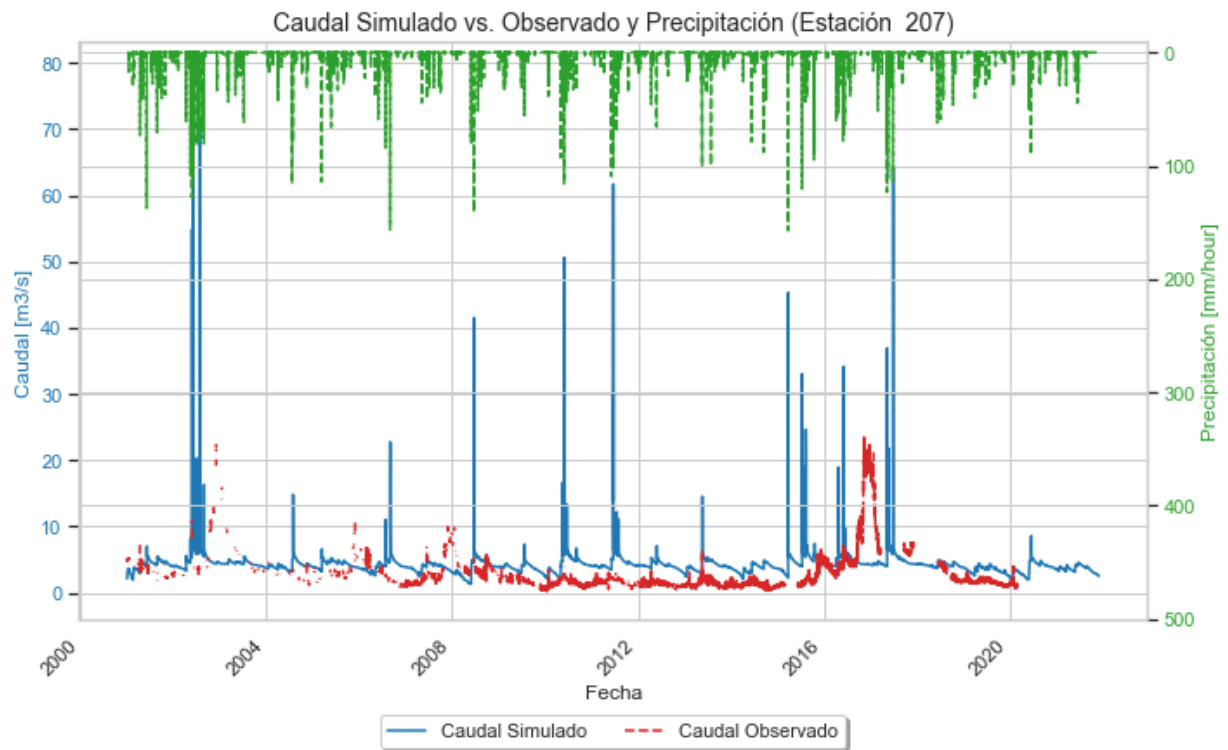


Figura F.5: Caudales observados y simulados por el modelo calibrados simultáneamente