

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

Según el informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos (UNESCO, 2023): En las últimas décadas, el uso del agua a nivel mundial ha incrementado en un 1% debido al aumento de la población mundial, apoyado por el crecimiento en el consumo y el desarrollo socioeconómico a través de sus diferentes modelos. La demanda mundial de agua se espera que siga aumentando a un ritmo parecido, (Burek et al., 2016) estimaron que esta demanda mundial seguirá creciendo al ritmo del 1% aproximadamente, lo que representa un incremento del 20 al 30% por encima del nivel actual de uso del agua para el 2050, debido principalmente al aumento de la demanda en los sectores industrial y doméstico. Bajo este concepto y sabiendo que el total de agua dulce corresponde solo al 2,45% del total de los recursos hídricos del planeta, y únicamente cerca al 1% puede ser empleada para el consumo en las actividades humanas, sumado a que los volúmenes de captación en las cuencas hidrográficas por precipitación; se ven afectados localmente bajo efectos antrópicos, y mundialmente afectada por el cambio climático, lo cual nos imponen la base del problema de este trabajo.

En la última década, estudios e investigaciones de las diferentes instituciones internacionales que estudian el cambio climático; sus efectos, mitigación, adaptación, entre otros nos revelan los impactos que estos tendrían sobre cada área en el entorno del desarrollo del ser humano. En la Declaración de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) sobre el estado del clima mundial en 2019 (OMM, 2020) señala: “La temperatura media mundial de 2019 estuvo alrededor de $1,1 \pm 0,1$ °C por encima del valor de referencia de 1850-1900...”, la misma tiene impacto directo en el cambio climático y su consecuente efecto sobre los recursos hídricos. De esta manera, el presente trabajo se realiza con el interés de conocer los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos; como se manifiesta el incremento de la temperatura al provocar mayores pérdidas por evaporación en los cuerpos de agua, disminuciones en la intensidad de precipitaciones que podrían conllevar en la disminución en los aportes a la red hídrica de las cuencas y por ende menor disponibilidad y así comprender como las variaciones espacial y temporal del clima está afectando a la zona en la que se desarrolla este trabajo.

Por todo lo anterior, y brindando la herramienta principal en la metodología de este trabajo el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) desarrolló un software de simulación hidrológica denomina HydroBID; una herramienta con la capacidad de realizar simulaciones hidrológicas en una o varias cuencas de la región de América Latina y el Caribe (LAC), bajo sus módulos de escenarios de cambio; climáticos y gestión de embalses. El software trabaja con su propia Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) para cada una de las cuencas muy bien delimitadas de la región, es un programa que fue usado y recomendado por diferentes organismos que trabajan en el área de los recursos hídricos en toda la región de LAC. Es por ello que surge el interés de aplicarlo en nuestra región, desarrollando el presente trabajo que pretende analizar la seguridad de los recursos hídricos superficiales a través del programa de modelación hidrológica: HydroBID, bajo la influencia de escenario de cambio climático en la cuenca del río Tolomosa y embalse San Jacinto del departamento de Tarija, como un estudio práctico enfocado en la sostenibilidad del recurso agua.

1.2. Antecedentes

El desarrollo de una investigación es un trabajo que enmarca grandes desafíos para aquellos que se disponen a realizarla, y enfocándonos en la realización del presente proyecto y a la vez consultando trabajos de investigación previos y otros relacionados con el tema en desarrollo, se logró llegar a la construcción de los presentes antecedentes estructurados desde casos en otros países, hasta estudios presentes en la región.

Existe referencia de la aplicación del modelo HydroBID en Ecuador en la cuenca del río Balsillas, Laverde Alarcon y Moyano Martinez (2019) realizaron un análisis de la oferta y demanda de agua en la cuenca bajo variaciones de la precipitación y temperatura como escenarios de cambio climático, con resultados que demostraron una relación inversamente proporcional entre las variables, generando un déficit en el abastecimiento.

De acuerdo con Leveri Amaya, Pascual-Aguilar, Sadres Blanco, y Rincón Lara (2020) trabajaron en analizar la aplicabilidad de la herramienta HydroBID al territorio de Colombia y Uruguay dando a conocer su potencial utilidad en la modelación hidrológica de cuencas y apoyo técnico para la toma de decisiones eficaces en estudios de gestión de recursos hídricos adaptados a futuros cambios climáticos. Así mismo, se aplicó el modelo para determinar las aportaciones de agua, considerando distintos escenarios futuros,

mostrando resultados que indican que los niveles de caudal se ven afectados de acuerdo al escenario.

Según Moreda, Serago, Escurra, Brantly, y Valdes (2017), analizaron la aplicabilidad de HydroBID bajo los potenciales efectos de cambios en la precipitación y temperatura sobre el flujo de agua superficial de la cuenca del río Chalpi, Ecuador, usando Modelos de Circulación Global (GCM) para modelar dos escenarios de cambio climático.

En un contexto Nacional, el MMAyA (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2021) en colaboración con el BID, realizaron la modelación hidrológica de la cuenca Cachimayu (Chuquisaca) en el modelo HydroBID, donde obtuvieron indicadores estadísticos que lo califican como apto para simulaciones de escurrimiento y manejo para la planificación de recursos hídricos en la cuenca.

De igual manera en la región de la Chiquitanía (Iténez Sur), se realizó la modelación hidrológica aplicando HydroBID, no llegando a simular algunos eventos extremos en el proceso de simulación del flujo. Sin embargo, el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y la correlación en el proceso fueron óptimos.

A nivel departamental: El Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2016) señala que al desarrollar y aplicar una metodología de balance hídrico en la cuenca del río Guadalquivir de acuerdo a los escenarios climáticos existentes, concluyó que el modelo hidrológico representa de forma razonable el comportamiento hídrico superficial en la cuenca.

Mamani López y Fuentes Carrizo (2020) observan que al aplicar el modelo HydroBID en la cuenca del río Guadalquivir y subcuenca afines para estimar caudales medios mensuales, da como resultado un modelo apto y aplicable para la región.

Y por último, teniendo en cuenta a Llanos Puita (2022), trabajo en el que realizó la modelación hidrológica en HydroBID en la cuenca alta del río Guadalquivir bajo escenarios de cambio climático para el pronóstico de sequías; se determinó los porcentajes de variación de caudal para cada escenario donde se observa una disminución del caudal, para finalmente determinar el Índice Estandarizado de Caudal (SQL).

1.3. El problema

La gestión integrada de los recursos hídricos es una de las temáticas que genera una gran preocupación en el mundo actual, la misma tiene como base fundamental el ciclo hidrológico y al estar relacionado directamente con el clima; se están viendo afectados

como consecuencia del cambio climático. Los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos varían geográficamente, en algunas zonas con mayor intensidad que en otras, afectando inicialmente a los países en el ámbito ambiental generando repercusiones en lo económico y social.

En la declaración de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) sobre el estado del clima en 2019, nos dice que se observaron condiciones inusualmente secas en relación con las medias a largo plazo para 2019 en Australia y el oeste de Indonesia y en los países circundantes. Por otra parte, el mismo informe nos señala que las lluvias fuertes y persistentes afectaron a gran parte del centro de los Estados Unidos a finales de 2018 y en el primer semestre de 2019.

Una de las repercusiones causada por el déficit en la disponibilidad hídrica es la sequía, que cada vez son más prolongadas. Sin ir muy lejos, en nuestro país vecino Chile presento una mega sequía histórica desde el año 2008-2015, "...ha registrado el mayor número de años consecutivos con precipitaciones deficitarias (6 años entre 2010 y 2015) y registra el mayor número de años consecutivos con déficit hídrico" (Quezada, 2017).

Eventos como El Niño y La Niña modifican drásticamente el comportamiento climático en muchas regiones del territorio boliviano. Durante El Niño, el Altiplano por lo general sufre una disminución de lluvias, en tanto que en las regiones bajas se observa un aumento relativo de la precipitación (de por sí elevada). Estas anomalías no son siempre de la misma intensidad (BID, 2014).

1.3.1. Planteamiento del problema

La carrera de ingeniería civil de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, en la mención hidráulica y sanitaria, ha intentado mejorar los trabajos de investigación en esta línea de trabajo poco desarrollada en la última década. De esta manera, pensando en el problema de como el cambio climático está afectando la seguridad de los recursos hídricos superficiales dentro de las cuencas hidrográficas y sus repercusiones en sus obras hidráulicas que satisfacen necesidades de la población, y la poca importancia que se le da a tema, sumado a pocos estudios e investigaciones al respecto se ve la necesidad de trabajar en esta problemática.

El cambio climático y los recursos hídricos son temáticas que van de la mano debido al ciclo hidrológico que es su común denominador, el mismo que es afectado por la

variabilidad climática generando repercusiones en el manejo de los recursos hídricos en la cuenca del río Tolomosa. De esta manera generar los resultados y cuantificarlos sobre como el cambio climático afecta los recursos hídricos en la cuenca y con ello lograr abrir la oportunidad de encontrar medidas de mitigación y adaptación necesarias para trabajar en la sostenibilidad de las comunidades que alberga la cuenca, la región y su repercusión en el planeta.

“La cuenca del río Tolomosa es la más importante del municipio, la misma que cuenta con importantes recursos hídricos y áreas de cultivo bajo riego, están inmersas las principales comunidades de Tolomosa, San Andrés, Bella Vista, Tablada Grande, y en la parte baja de esta cuenca se encuentra la represa del proyecto multipropósito de San Jacinto” (Gobierno Municipal de la Provincia Cercado & PROMETA, 2011). Donde en las últimas décadas el municipio y las comunidades se vieron afectados por la presencia de efectos del cambio climático como sequías, irregularidad en las precipitaciones (variaciones temporales), eventos extremos como granizadas, heladas tardías, nevadas entre otros fenómenos que afectan de manera directa a las actividades económicas de las comunidades involucradas y su entorno.

Expuesto lo anterior, y enfocándonos más aun en el efecto que causa el cambio climático sobre la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Tolomosa; principal fuente de abastecimiento al embalse San Jacinto que es una fuente de agua: abastecimiento a sistemas de riego para la producción agrícola y pecuaria de las comunidades y de energía eléctrica para la población del municipio. Por ello en el presente trabajo se pretende trabajar para medir los efectos ante escenarios futuros y llegar a conclusiones que puedan ser usadas y generar aportes a medidas de adaptación y/o mitigación para futuros proyectos.

1.3.2. Formulación del problema

A partir de lo expuesto anteriormente, el problema se traduce en la siguiente interrogante:

¿Cuál es la influencia del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Tolomosa del departamento de Tarija, bajo escenarios de cambio climático aplicando HydroBID?

1.4. Justificación

El agua como recurso hídrico es un elemento básico para el desarrollo económico, social y ambiental de la población. Bajo este entendido junto a los causales antrópicos y climáticos de la región que afectan la disponibilidad y al manejo sustentable del recurso hídrico, denota en la necesidad de aprovechar la tecnología y aplicar el modelo HydroBID bajo dos de sus módulos (cambio climático y gestión de embalses) y lograr exportar resultados que sirvan como elementos en la toma de decisiones.

El presente trabajo es viable, pues se dispone de los recursos físicos y humanos, como la información necesaria para llevarlo a cabo.

En un aspecto académico, el trabajo se enmarca en el área de estudio de los recursos hídricos de la ingeniería civil, se realizará con el fin de brindar resultados a partir del análisis de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales, considerando el embalse dentro de la cuenca del río Tolomosa del departamento de Tarija, los mismos que puedan ser usados para la toma de decisiones para garantizar la sostenibilidad y la seguridad del recurso hídrico de la cuenca hidrográfica. Por otra parte, busca generar formación académica en la línea de estudio de cambio climático dentro del área de la ingeniería civil

El trabajo tiene una utilidad metodológica; para alcanzar los objetivos de estudio, se plantea el uso de información hidrométrica y climática, de series de tiempo adecuadas para el análisis y su debido procesamiento en el modelo HydroBID, en sus módulos de escenarios de cambio y gestión de embalses. Con ello se pretende conocer el resultado de la investigación que contribuirá con información técnica y necesaria para poder entender la importancia de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales ante posibles desastres como consecuencia de los mismos.

En el área social y en el marco de la agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se busca contribuir con este trabajo generando información y resultados que puedan ser usados para futuros trabajos e incrementar la inmersión de los jóvenes y personas para trabajar enfocados en la sostenibilidad de nuestras regiones y países, en armonía y equilibrio con el planeta.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar la aplicabilidad de HydroBID sobre los recursos hídricos superficiales a través de la modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático y gestión de embalse, para estudiar la seguridad del recurso hídrico en la cuenca del río Tolomosa como guía para la adaptación y/o mitigación.

1.5.2. Objetivos específicos

- Preparar los datos de información climática e hidrométrica a través del uso de recursos computacionales y estadísticos para su correcta aplicación en el modelo.
- Establecer escenarios futuros por medio de la regionalización para la cuenca, para estimar el comportamiento de los recursos hídricos superficiales frente al cambio climático.
- Aplicar la herramienta de modelación (HydroBID) del BID, en sus módulos de escenarios de cambio y gestión de embalses simultáneamente para proyecciones futuras.
- Calibrar y validar el modelo HydroBID por medio de los parámetros para la cuenca, para su posterior aplicabilidad en la zona de estudio.
- Modelar los escenarios futuros establecidos, por medio del modelo HydroBID para estimar los volúmenes de flujo próximos a análisis.
- Analizar la seguridad de recurso hídrico superficial con los cambios de variabilidad en la oferta y demanda hídrica bajo los escenarios futuros de cambio climático en la zona de la cuenca del río Tolomosa.

1.6. Alcance

Este trabajo está dirigido a la sociedad tarijeña, universitarios y grupos interesados en el área, con el mismo se pretende aportar con información sobre la aplicabilidad del modelo HydroBID y el estado de la seguridad hídrica superficial en la cuenca del río Tolomosa bajo influencia de cambio climático y su proyección futura.

1.6.1. Limites espaciales

El presente trabajo se aplicará en la cuenca del río Tolomosa, provincia Cercado del departamento de Tarija. Ubicada al sur de la ciudad, cuenta con un área de aporte de 467,56 km².

1.6.2. Límites temporales

Por las características propias del presente trabajo de investigación, se considera como periodo 1979-2022; para su estudio y análisis, y el periodo 2023-2040; para las proyecciones bajo escenario de cambio climático.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Cambio climático

2.1.1. Definición

En el glosario del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático lo define como una variación del estado del clima identificable (p. ej., mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (Allwood, Bosetti, Dubash, Gómez-Echeverri, & von Stechow, 2014).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 2, define el cambio climático como: “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (Organización de Naciones Unidas, 1992).

2.1.2. Causas del cambio climático

El efecto invernadero es un proceso natural que permite a la Tierra mantener las condiciones necesarias para albergar vida: la atmósfera retiene parte del calor del Sol; sin el efecto invernadero, la temperatura media del planeta sería de 18 °C bajo cero.

La atmósfera está compuesta por diversos gases que, en la proporción adecuada, cumplen su cometido. El problema está cuando las actividades del ser humano aumentan la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera y ésta retiene más calor del necesario, provocando que la temperatura media del planeta aumente y se produzca lo que popularmente llamamos calentamiento global (Acciona, 2023).

Entre las principales causas que fomentan el calentamiento global se encuentran las siguientes:

- Aumento de los gases de efecto invernadero.
- La deforestación.
- Destrucción de ecosistemas marinos y terrestres.
- Incremento de la población humana.

2.1.3. Cambio climático y los recursos hídricos superficiales

2.1.3.1. La Gestión integrada de los recursos hídricos

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un proceso sistemático para el desarrollo sostenible, la asignación y el control del uso de los recursos hídricos en el contexto de objetivos sociales, económicos y medioambientales. Contrastá con el enfoque sectorial que se aplica en muchos países. Cuando la responsabilidad por el agua potable recae en una agencia, por el agua de riego en otra y por el medioambiente en otra diferente, la falta de vínculos entre los diferentes sectores lleva a la descoordinación de la gestión y el desarrollo de los recursos (MMAyA, 2019).

2.1.3.2. Disponibilidad y uso del agua

La principal característica de los recursos hídricos es que están desigualmente repartidos tanto espacial como temporalmente –a escala interanual y estacional. Esto implica la existencia de cuencas y áreas geográficas con carencias de agua, debido tanto a su escasez física como a la inexistencia de infraestructuras suficientes que viabilicen la satisfacción de las demandas hídricas (Pacheco, 2009).

En el planeta existe un volumen total de agua de $1.435.105.000 \text{ km}^3$, de la que el 97,554% es salada; y tan sólo una pequeña parte menos del 0,01% o lo que es lo mismo, unos 105.000 km^3 , es susceptible de ser usada directamente por el ser humano para satisfacer sus necesidades vitales y su actividad productiva, así como para las actividades asociadas con los ecosistemas que dependen de ella (WASA-GN, 2023). En la Figura 1 se puede ver las estimaciones de agua y porcentajes de disponibilidad y consumo.

Estimación global de las cantidades de agua dulce y salada en la tierra

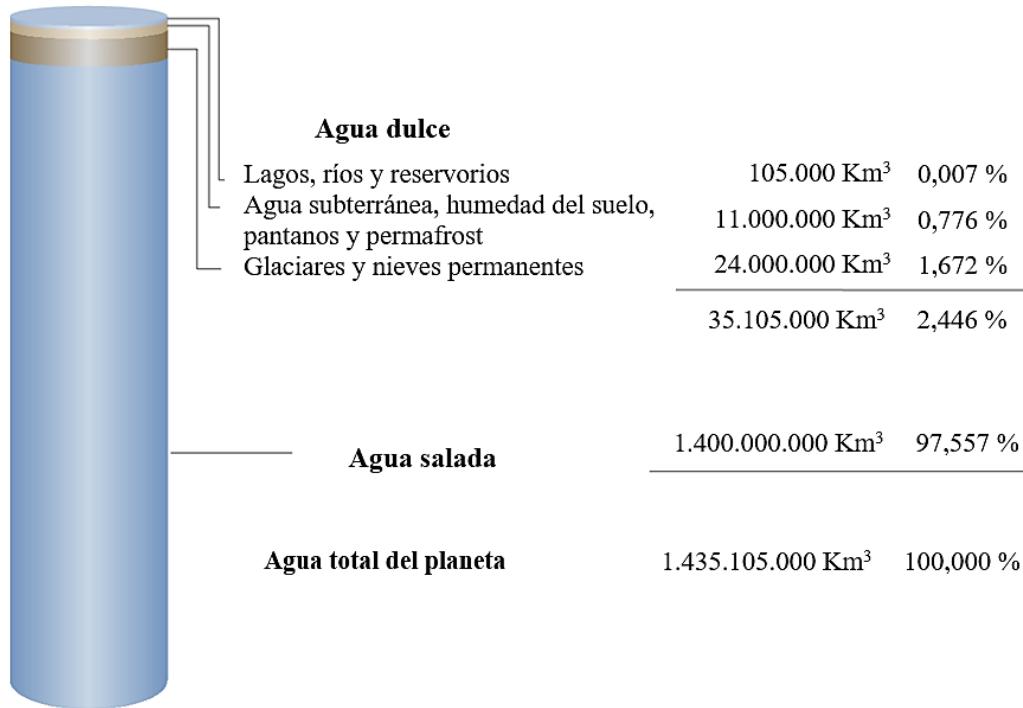


Figura 1: Estimación global de las cantidades de agua dulce y salada en la tierra

Fuente: Tomada y adaptada de “Evaluación y asesoramiento del agua - red global (WASA-GN)”

2.1.3.3. Efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos

El cambio climático afectará de forma importante a los recursos hídricos ya que la disminución de las precipitaciones, causará una disminución de aportaciones hídricas y un aumento de la demanda en los sistemas de regadío. Al mismo tiempo se producirán inundaciones en otras zonas cuyos efectos serán perjudiciales para la población. Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos no sólo dependen de las aportaciones procedentes del ciclo hidrológico, sino que es el sistema de recursos hidráulicos disponible y la forma de manejarlo un factor determinante de la suficiencia o escasez de agua frente a la demanda de la población (Delgado, 2010).

Según el quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC); para un escenario RCP8,5 se presentan aumentos en la precipitación media anual en latitudes altas y en el océano pacífico ecuatorial. Así mismo, una disminución de la precipitación media en regiones secas de latitud media

y subtropical, y un aumento en las precipitaciones media de las regiones húmedas de latitud media. El mismo informe nos señala que es muy probable que los períodos de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes en la mayoría de las zonas terrestres de latitud media y regiones tropicales húmedas en función al aumento de la temperatura media global (IPCC, 2014).

2.2. Modelo de circulación global

Los modelos climáticos globales, o General Circulation Models (GCM), son actualmente las herramientas más avanzadas para simular los efectos del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Un GCM es un modelo numérico que representa el sistema climático en función de sus componentes (atmósfera, océanos, criósfera y superficie terrestre).

Los GCM representan el clima utilizando una cuadrícula tridimensional en la Tierra con una resolución horizontal de 250 a 600 km, una resolución vertical de 10 a 20 capas para la atmósfera y hasta 30 capas para el océano; Estos modelos solo proporcionan información a escala mayor a los 100 km, por lo que son ineficaces para evaluar los efectos de los procesos hidrológicos que ocurren a escalas más pequeñas y no pueden modelarse adecuadamente (Castañeda Vega & Ordoñez Landinez, 2019).

2.3. Escenarios de cambio climático

Según el capítulo 4 del material de capacitación del grupo consultivo de expertos sobre evaluaciones de vulnerabilidad y adaptación; los escenarios de cambio climático se pueden definir como combinaciones plausibles de las condiciones que pueden representar posibles situaciones futuras. son herramientas para facilitar nuestra comprensión sobre cómo los climas regionales pueden cambiar con un aumento de las concentraciones de GEI y para ayudarnos a entender y evaluar cómo los sistemas vulnerables pueden verse afectados por el cambio climático inducido por el ser humano (UNFCCC, 2021). Así mismo, estos escenarios no son pronósticos de climas futuros, debido a que cada escenario representa una alternativa plausible de cómo se podría comportar el clima futuro.

La información obtenida a partir de estos escenarios puede utilizarse en las políticas correspondientes, a modo de orientación para la toma de medidas adecuadas en materia de mitigación y adaptación.

(Escoto, Sánchez, & Gachuz, 2017) Refieren que tradicionalmente, la comunidad científica ha recurrido a la modelación de escenarios prospectivos de cambio global¹ para analizar el papel de los impulsores sistémicos de las emisiones de GEI², con el propósito de cuantificar sus posibles impactos y evaluar sus implicaciones en el forzamiento radiativo y el aumento proyectado de la temperatura media global.

Los escenarios permiten examinar trayectorias de desarrollo alternativas y potenciales efectos de las políticas públicas en tanto que al variar algunos de sus componentes es posible analizar cómo dichos cambios impactarán el futuro. El futuro del cambio climático depende no sólo de cómo evolucionarán los sistemas físicos, sino también está íntimamente ligado al cambio social. Considerar adecuadamente la complejidad de este último es indispensable para entender cómo evolucionarán las emisiones y el clima, así como comprender las implicaciones y retos para la adaptación (Escoto et al., 2017).

Así a continuación, se conceptualizan los escenarios de cambio climático presentados en el sexto informe de evaluación del IPCC denominados SSP (Shared Socioeconomic Pathways) o en español: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas, como sus antecedentes, características e implicaciones que acompañan su potencial uso en los estudios sobre el cambio climático.

2.3.1. Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)

Las SSP describen futuros alternativos de desarrollo socioeconómico y representan, a partir de una narrativa y de variables cuantitativas, cómo podría evolucionar el mundo en las décadas siguientes y qué desafíos suponen esos cambios para la mitigación y la adaptación. Es decir, proponen considerar la evolución de las economías, los niveles de desigualdad futuros, y el cambio demográfico y tecnológico, entre otros. Elementos que inciden sobre los niveles de emisiones de GEI y que, a la par, pueden afectar las alternativas para adaptarse a los impactos del cambio climático.

¹ Dicho de manera simple, un escenario se refiere a condiciones o eventos que podrían tener lugar con base en un conjunto de supuestos; típicamente se estima un grupo de escenarios para dar cuenta de diversos futuros posibles.

² Estos gases tienen un papel clave en el aumento de la temperatura del aire próximo al suelo, pues absorben y emiten radiaciones dentro del rango infrarrojo. Los principales gases de este tipo son: el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitro so (N₂O), los clorofluorcarbonos (CFC) y el ozono (O₃).

Un aspecto esencial en la conceptualización de las SSP son las narrativas que acompañan a los escenarios y que se describen en dos dimensiones: 1) los desafíos que las condiciones socioeconómicas representan para la adaptación, y 2) los retos que representarían para la mitigación (Escoto et al., 2017).

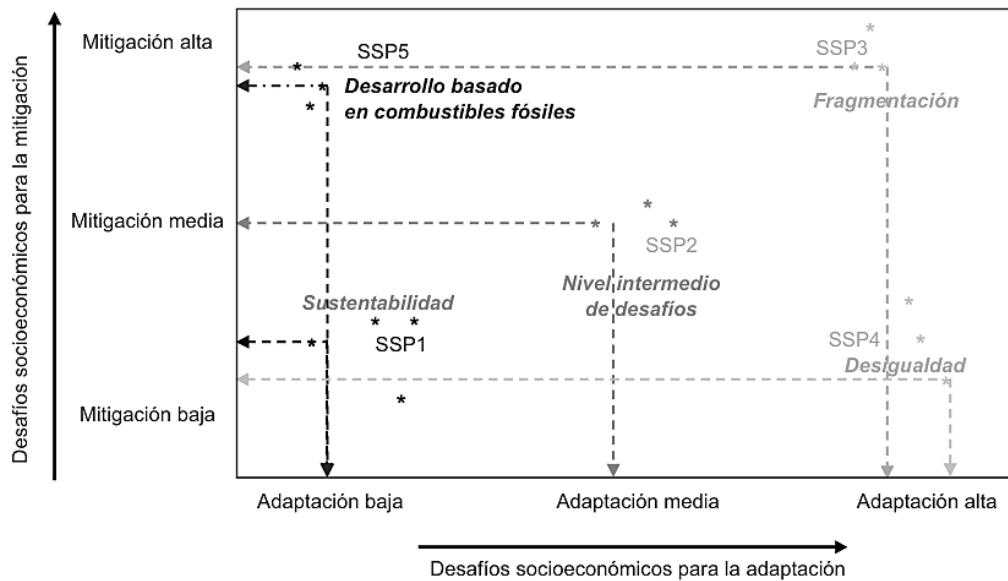


Figura 2: Panorama de las SSP – Espacio de desafíos que identifican cinco escenarios con diferentes retos socioeconómicos

Fuente: Tomada y adaptada de Escoto, Sánchez, & Gachuz, (2017).

De acuerdo al reporte de Riahi et al., (2017) y Escoto et al., (2017), respecto a la Figura 2, los escenarios SSP se describen como:

- 1) SSP1: bajo la narrativa de "Sostenibilidad", representa trayectorias con bajos desafíos para la mitigación y adaptación, al asumir un contexto de bajo crecimiento poblacional, alto crecimiento económico, elevados niveles de educación, buena gobernanza, cooperación internacional y fuerte conciencia ambiental. Este escenario proyecta una sociedad globalizada con avances tecnológicos sostenibles y un enfoque en el bienestar humano, reducción de desigualdades y consumo con menor intensidad de recursos.
- 2) SSP2: denominado “Camino intermedio”, representa trayectorias con desafíos moderados para la mitigación y la adaptación. Se sitúa entre SSP1 y SSP3, asumiendo una evolución socioeconómica que sigue tendencias históricas sin cambios estructurales significativos. El crecimiento

económico y demográfico es desigual y moderado, con instituciones que avanzan lentamente hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Aunque la degradación ambiental persiste, se observan algunas mejoras, y la intensidad del uso de recursos y energía tiende a disminuir. La desigualdad global se mantiene o mejora gradualmente, mientras continúan los desafíos para reducir la vulnerabilidad socio ambiental.

- 3) SSP3: se describen como de “Fragmentación”. Éstos asumen crecimiento poblacional alto y desarrollo económico bajo, niveles de educación inferiores, y una sociedad regionalizada y con poca conciencia ambiental, por lo que representan un nivel alto de desafíos para la adaptación y la mitigación.
- 4) SSP4: bajo la narrativa de “Desigualdad”, describe una división global donde el avance tecnológico se concentra en los países desarrollados, pero sus beneficios no se distribuyen equitativamente entre la población. Esto genera una creciente estratificación, con sectores altamente capacitados que aprovechan la tecnología, mientras que grandes segmentos de la sociedad, especialmente en países de ingresos bajos, enfrentan altos desafíos para adaptarse. Las disparidades en acceso a recursos, educación y oportunidades económicas profundizan las desigualdades, lo que agrava la vulnerabilidad de las poblaciones menos favorecidas frente a los cambios sociales y ambientales.
- 5) SSP5: con la narrativa de “*Desarrollo basado en combustibles fósiles*”, asumen un bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano; sin embargo, la conciencia ambiental y la dependencia de los combustibles fósiles es todavía muy alta, por lo que representa un elevado nivel de desafío para la mitigación. Con alto desafíos para la mitigación y bajos para la adaptación, con un mundo que confía cada vez más en los mercados competitivos, la innovación y las sociedades participativas para producir un rápido progreso tecnológico y el desarrollo del capital humano como camino hacia el desarrollo sostenible.

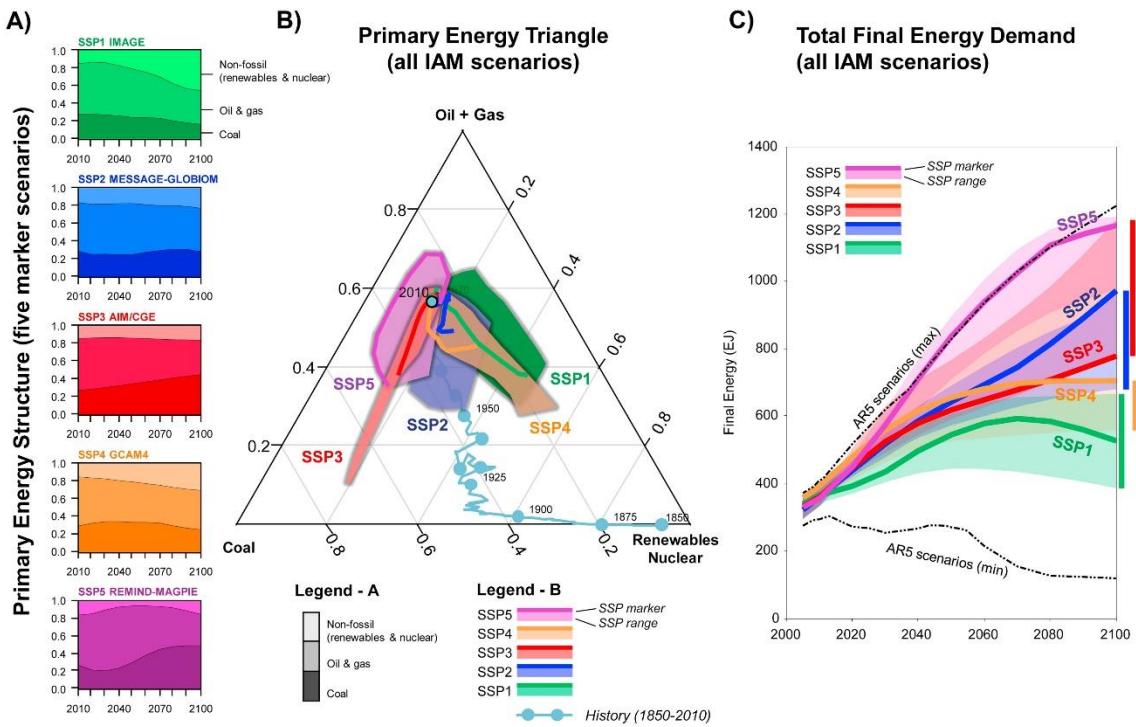


Figura 3: Estructura de energía primaria (Panel A + B) y demanda de energía final (Panel C) de los escenarios SSP y rangos correspondientes.

Fuente: Tomada y adaptada de Riahi et al. (2017)

Según la Figura 3; los escenarios de referencia SSP3 y SSP5, tienen una fuerte dependencia de los combustibles fósiles con una contribución creciente del carbón a la combinación energética (paneles A y B). Por el contrario, SSP1 y SSP4 representan bajos desafíos para la mitigación y, con proporciones crecientes de energías renovables. El SSP2 conduce a un desarrollo energético equilibrado presentando una continuación de la combinación energética actual dominada por combustibles fósiles. En este triángulo energético, los escenarios base para SSP3 y SSP5 se acercan con el tiempo al extremo izquierdo, dominado por el carbón, mientras que los escenarios SSP1 y SSP4 se orientan hacia las energías renovables y la energía nuclear. El escenario SSP2 se mantiene en el centro del triángulo.

Las líneas de base del SSP también abarcan un amplio rango en términos de demanda energética (Panel C), que es otro factor importante que influye en los desafíos futuros. En el extremo superior del rango, el escenario SSP5 exhibe más del triple de la demanda energética a lo largo del siglo (principalmente impulsada por el

rápido crecimiento económico). Los desafíos para la mitigación son más bajos en el SSP1 y el SSP4 y esto se refleja en la demanda baja en los escenarios SSP1, alcanzando su pico alrededor de 2060. La demanda final de energía aproximadamente se duplica en el escenario SSP2 a largo plazo. Y en general, los escenarios de referencia de los SSP3 y SSP4, por ejemplo, representan un fracaso de las políticas actuales de acceso a la energía, lo que lleva a un uso continuo y creciente de biomasa en los hogares de los países en desarrollo (Riahi et al., 2017).

Si quisiéramos imaginar un futuro dentro de una narrativa y cómo ésta podría modificarse para llegar a condiciones distintas de emisiones y, por tanto, a distintos futuros en términos de temperatura, las SSP se pueden combinar con los modelos climáticos asociados a diferentes niveles de forzamiento radiativo (*Representative Concentration Pathways*, RCP por sus siglas en inglés). Un forzamiento radiativo es una medida de la influencia que un factor, en este caso las emisiones, tiene para alterar el equilibrio de la energía entrante y saliente en el sistema tierra-atmósfera, medida en vatios por metro cuadrado (W/m²). Los RCP abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de GEI, aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre. Los RCP ayudan a representar la incertidumbre sobre los efectos climáticos que habrá en un futuro con respecto al incremento de temperatura, precipitación y otras variabilidades climáticas. Por ello, el eje de forzamiento radiativo constituye una interfaz importante entre los motores de emisiones y los motores de cambio climático (Escoto et al., 2017)

2.3.2. Trayectoria de Concentración Representativa (RCP)

El escenario más actualizado es el de vulnerabilidad, en el cuál explora estrategias de mitigación con respecto a los escenarios tradicionales. La información primaria sobre posibles cambios climáticos debido al origen antropogénico, integrados con escenarios alternativos de emisión RCP en español: Trayectoria de Concentración Representativa, que es la manera en que el IPCC nombra a los escenarios posibles por el cambio climático, estos son:

- a) RCP 2.6, es un escenario de mitigación cuyo objetivo es limitar el calentamiento global a menos de 2 °C a fin de siglo; este escenario se ha supuesto que, inicialmente la temperatura crece hasta mediados de siglo, y decrece hacia el final de siglo cumpliendo con el objetivo.
- b) RCP 4.5, es un escenario de estabilización en el existe un decrecimiento demográfico desde 2065, para tener una menor necesidad energética de hasta tres veces el orden de magnitud.
- c) RCP 6.0, hay un crecimiento demográfico, pero a través de imposiciones políticas, se disminuirá las emisiones partir de 2060.
- d) RCP 8.5, es el escenario en los que no hay políticas de cambio climático, es el escenario que tiene valores mayores de todos los escenarios descritos (Andrade, 2020).

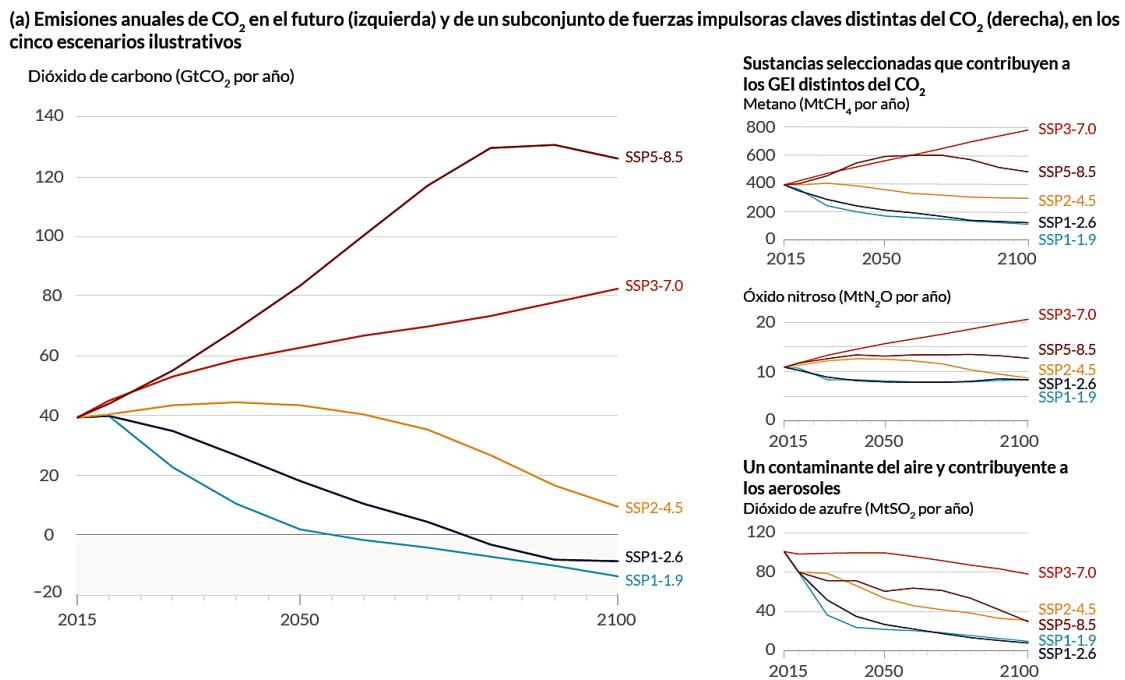
2.3.3. Escenarios de cambio climático integrados

El marco de las SSPs es un conjunto conceptual que incluye narrativas y elementos cuantitativos que se utiliza para modelar y analizar futuros escenarios socioeconómicos en combinación con proyecciones climáticas como los RCPs para evaluar impactos, riesgos y estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático (Green et al., 2021). Así mismo, se consideran un conjunto de cinco nuevos escenarios ilustrativos de emisiones para estudiar la respuesta climática a un abanico más amplio de futuros de gases de efecto invernadero, usos de la tierra y contaminantes atmosféricos que los evaluados en el informe 5 del IPCC. Este conjunto de escenarios sustenta las proyecciones de los modelos climáticos sobre los cambios en el sistema climático. Estas proyecciones tienen en cuenta la actividad solar y el forzamiento de los volcanes. Los resultados correspondientes al siglo XXI se presentan a corto plazo (2021–2040), a medio plazo (2041–2060) y a largo plazo (2081–2100) en relación con el período 1850–1900 (IPCC, 2021).

Comienzan en 2015 e incluyen escenarios con emisiones de GEI altas y muy altas (SSP3-7.0 y SSP5-8.5) y emisiones de CO₂ que prácticamente se duplican con respecto a los niveles actuales para 2100 y 2050, respectivamente; escenarios con emisiones de GEI intermedias (SSP2-4.5) y emisiones de CO₂ que se mantienen en

torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo; y escenarios con emisiones de GEI muy bajas y bajas que disminuyen hasta llegar a emisiones netas iguales a cero en torno a 2050 o después de esta fecha, seguidas de niveles variables de emisiones netas negativas de CO₂ (SSP1-1.9 y SSP1-2.6), como se ilustra en la Figura 4. Las emisiones varían entre los escenarios en función de los supuestos socioeconómicos, los niveles de mitigación del cambio climático y, en el caso de los aerosoles y los precursores del ozono distintos del metano, los controles de la contaminación atmosférica.

De igual manera, se evalúan los resultados de los modelos climáticos que participan en CMIP6³ del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas. Las simulaciones históricas de CMIP6 evaluadas en su informe presentan un cambio de la temperatura media global en superficie del ensamble dentro de 0,2 °C respecto de las observaciones durante la mayor parte del período histórico, y el calentamiento observado está dentro del rango muy probable del ensamble CMIP6 (IPCC, 2021).



³ CMIP6: en inglés Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 o en español, Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6.

(b) Contribución al aumento de la temperatura global en superficie de diferentes emisiones, con un papel predominante de las emisiones de CO₂

Cambio en la temperatura global en superficie en 2081–2100 con respecto al período 1850–1900 (°C)

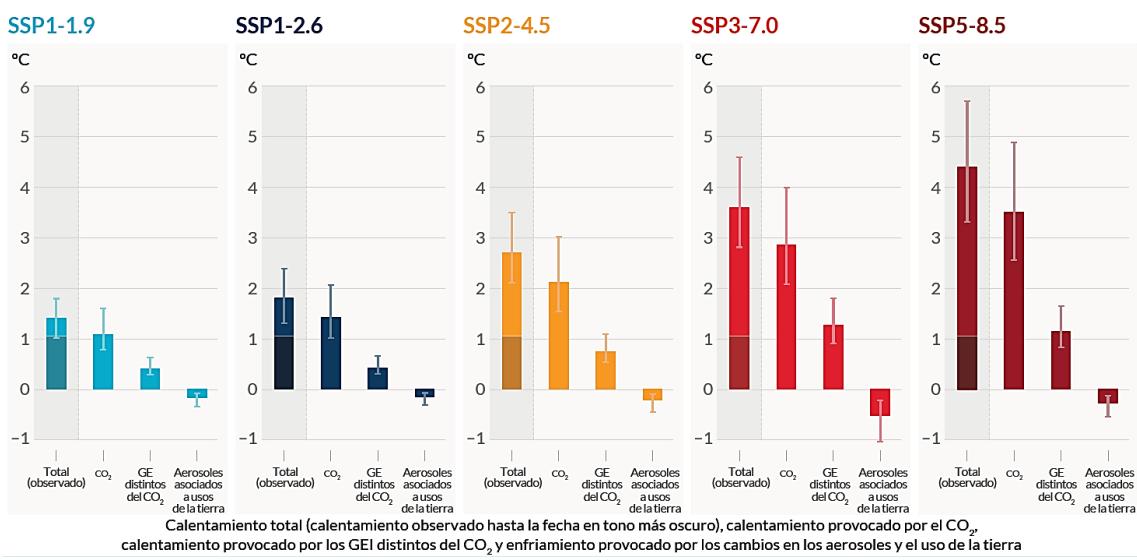


Figura 4: Emisiones antropogénicas futuras de las principales fuerzas impulsoras del cambio climático y contribuciones al calentamiento por grupos de fuerzas impulsoras en los cinco escenarios ilustrativos.

Fuente: Tomada y adaptada de IPCC, (2021).

En base a la Figura 4, en su gráfico (a); Las emisiones anuales antropogénicas (causadas por el ser humano) durante el período 2015–2100. Se muestran las trayectorias de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) procedentes de todos los sectores (GtCO₂/año) (gráfico de la izquierda) y de un subconjunto de tres fuerzas impulsoras claves distintas del CO₂ que se analizan en los escenarios: metano (CH₄, MtCH₄/año, gráfico superior derecho); óxido nitroso (N₂O, MtN₂O/año, gráfico central derecho); y dióxido de azufre (SO₂, MtSO₂/año, gráfico inferior derecho, que contribuye a los aerosoles antropogénicos en el gráfico (b) (IPCC, 2021).

Para el gráfico (b); las contribuciones al calentamiento por grupos de fuerzas impulsoras antropogénicas y por escenario se muestran como el cambio en la temperatura global en superficie (°C) en 2081-2100 en relación con 1850-1900, con indicación del calentamiento observado hasta la fecha. Las barras y los bigotes representan los valores de la mediana y el rango muy probable, respectivamente. En el marco de cada escenario, las barras representan el calentamiento global total (°C; barra “total”); las contribuciones al calentamiento (°C) procedentes de los cambios en

el CO₂ (barra de “CO₂”) y de los gases de efecto invernadero (GEI) distintos del CO₂ (la barra de “GEI distintos del CO₂” comprende los gases de efecto invernadero homogéneamente mezclados y el ozono); y el enfriamiento neto debido a otras fuerzas impulsoras antropogénicas (barra de “aerosoles y uso de la tierra”: aerosoles antropogénicos, cambios en la reflectancia debidos a cambios en el uso de la tierra y el riego, y estelas de condensación de la aviación). Para las barras, la contribución de los grupos de fuerzas impulsoras se calcula con un emulador climático físico de la temperatura global en superficie que se basa en evaluaciones de la sensibilidad climática y del forzamiento radiativo (IPCC, 2021).

En comparación con el período 1850–1900, es muy probable que la temperatura global en superficie promediada en el período 2081–2100 sea superior entre 1,0 °C y 1,8 °C en el escenario de emisiones de GEI muy bajas considerado (SSP1-1.9), entre 2,1 °C y 3,5 °C en el escenario de emisiones de GEI intermedias (SSP2-4.5), y entre 3,3 °C y 5,7 °C en el escenario de emisiones de GEI muy altas (SSP5-8.5).²⁴ La última vez que la temperatura global en superficie se mantuvo en 2,5 °C más que en el período 1850–1900, o por encima de ese valor, fue hace más de 3 millones de años (nivel de confianza medio) (IPCC, 2021).

Tabla 1: Cambios en la temperatura global en superficie, que se evalúan sobre la base de diversas líneas de evidencia, para períodos de 20 años seleccionados y los cinco escenarios ilustrativos de emisiones considerados

	Corto plazo, 2021-2040		Mediano plazo, 2041-2060	
Escenario	Mejor Estimación (°C)	Rango muy probable (°C)	Mejor Estimación (°C)	Rango muy probable (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 - 1,7	1,6	1,2 - 2,0
SSP1-2.6	1,5	1,2 - 1,8	1,7	1,3 - 2,2
SSP2-4.5	1,5	1,2 - 1,8	2	1,6 - 2,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 - 1,8	2,1	1,7 - 2,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 - 1,9	2,4	1,9 - 3,0

Fuente: Adaptada de IPCC, (2021)

En base a la Figura 4 y la Tabla 1, el informe 6 del IPCC, (2021); señala una evaluación de diversas líneas de evidencia, el calentamiento global de 2 °C, en relación

con el período 1850-1900, se superaría durante el siglo XXI en el marco de los escenarios de emisiones de GEI altas y muy altas considerados en el informe 6 del IPCC (SSP3-7.0 y SSP5-8.5). En el escenario de emisiones de GEI intermedias (SSP2-4.5), es sumamente probable que se supere un calentamiento global de 2 °C. En el escenario de emisiones de GEI muy bajas, es sumamente improbable que se supere un calentamiento global de 2 °C (SSP1-1.9), y en el escenario de emisiones de GEI bajas, es improbable que se supere dicho calentamiento (SSP1-2.6). Es muy probable que se supere el nivel de calentamiento global de 2 °C en el período de medio plazo (2041-2060) en el escenario de emisiones de GEI muy altas (SSP5-8.5); es probable que esto se produzca en el escenario de emisiones de GEI altas (SSP3-7.0), y es más bien probable que esto se produzca en el escenario de emisiones de GEI intermedias (SSP2-4.5).

El calentamiento global de 1,5 °C con respecto al período 1850–1900 se superaría durante el siglo XXI en los escenarios de emisiones de GEI intermedias, altas y muy altas que se tienen en cuenta el informe 6 del IPCC (SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, respectivamente). En los cinco escenarios ilustrativos, a corto plazo (2021–2040), es muy probable que se supere el nivel de calentamiento global de 1,5 °C en el escenario de emisiones de GEI muy altas (SSP5-8.5), es probable que se supere en los escenarios de emisiones de GEI intermedias y altas (SSP2-4.5 y SSP3-7.0), es más probable que improbable que se supere en el escenario de emisiones de GEI bajas (SSP1-2.6) y es más bien probable que se alcance ese nivel de calentamiento en el marco del escenario de emisiones de GEI muy bajas (SSP1-1.9).²⁷ Asimismo, en el escenario de emisiones de GEI muy bajas (SSP1-1.9), es más probable que improbable que la temperatura global en superficie vuelva a descender por debajo de 1,5 °C hacia finales del siglo XXI, con un sobrepaso temporal de no más de 0,1 °C por encima de 1,5 °C de calentamiento global (IPCC, 2021).

2.4.Reducción de escala (Downscaling)

El método de reducción de escala o downscaling es una técnica que consiste en establecer una relación entre las variables simuladas por el GCM y los datos históricos registrados en estaciones meteorológicas en superficie. Este método permite obtener

información climática de alta resolución desde modelos climáticos globales, que tienen resolución de 150 a 300 km por 150 a 300 km, por lo cual es necesario implementar un método que permite obtener información a menor escala ya que muchos modelos de impacto requieren datos a escala de 50 km o menos (Duarte Prieto, 2017).

Los métodos de reducción de escala se clasifican en dinámicos y estadísticos; los primeros se basan en un modelo climático regional (RCM), que toma información atmosférica de un GCM e incorpora topografía más compleja, contraste océano-superficie, heterogeneidades de superficie y descripción detallada de los procesos físicos para generar información climática a resolución espacial alrededor de 20 a 50 km. Los métodos de reducción de escala estadísticos establecen relaciones empíricas entre las variables a gran escala y las variables atmosféricas locales futuras generando proyecciones climáticas específicas más detalladas en comparación con el RCM (Espinoza Romero & Soler Ortiz, 2019).

2.5. Modelación hidrológica de cuencas

La base del estudio de la Hidrología es la comprensión del ciclo hidrológico, de sus procesos e interrelaciones tanto superficiales y subsuperficiales, y esta comprensión implica “medir”. Si bien los métodos y técnicas de medición de caudales y precipitaciones han evolucionado en el tiempo, también es cierto que otras componentes del ciclo hidrológico no han corrido la misma suerte pues se presentan bajo el suelo. La infiltración, la percolación profunda, el flujo subsuperficial, el flujo subterráneo, entre otros, son procesos que se miden usualmente de manera indirecta y/o remota, lo que conlleva a una fuerte incertidumbre respecto al funcionamiento del ciclo hidrológico.

Bajo este marco, los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Como consecuencia de ello, los modelos hidrológicos se usan:

- Como herramienta para la gestión y planeamiento.

- Para una mayor comprensión del rol de los componentes del ciclo hidrológico en una determinada cuenca.
- Para extraer potenciales condiciones futuras a partir de condiciones actuales.
- Como base para la modelación de otros procesos, como la calidad de agua, erosión, etc. (Cabrera, 2021).

2.5.1. El proceso de modelación

El primer paso en todo modelamiento hidrológico es crear un "modelo perceptual", es decir, determinar cuáles son los procesos y variables más importantes involucrados en la generación del caudal. Este proceso supone observar, analizar y distinguir las propiedades del suelo, el subsuelo y el clima como elementos clave que constituyen los procesos más importantes de formación de escorrentía.

Una vez identificados estos procesos y variables clave, deben relacionarse mediante ecuaciones para crear un "modelo conceptual". Esta fase contiene coeficientes y parámetros a los que se les deben asignar valores adecuados posteriormente mediante un proceso de calibración (Cabrera, 2021).

El proceso de calibración es la etapa en la cual se asignan valores a todos los parámetros del modelo de manera tal que “la salida del modelo se ajuste lo mejor posible a los datos históricos registrados”. Este “mejor ajuste” implica utilizar herramientas estadísticas para buscar minimizar la diferencia entre valores simulados y registrados, mediante procesos de optimización. Algunos indicadores utilizados son el error medio cuadrático, el criterio de Schultz, el coeficiente de Nash-Sutcliffe y el balance de masas, entre otros.

Finalmente, el modelo debe pasar a una etapa de validación, en la cual se evalúa su capacidad de predicción. La descripción de este proceso de analizará más adelante (Cabrera, 2021).

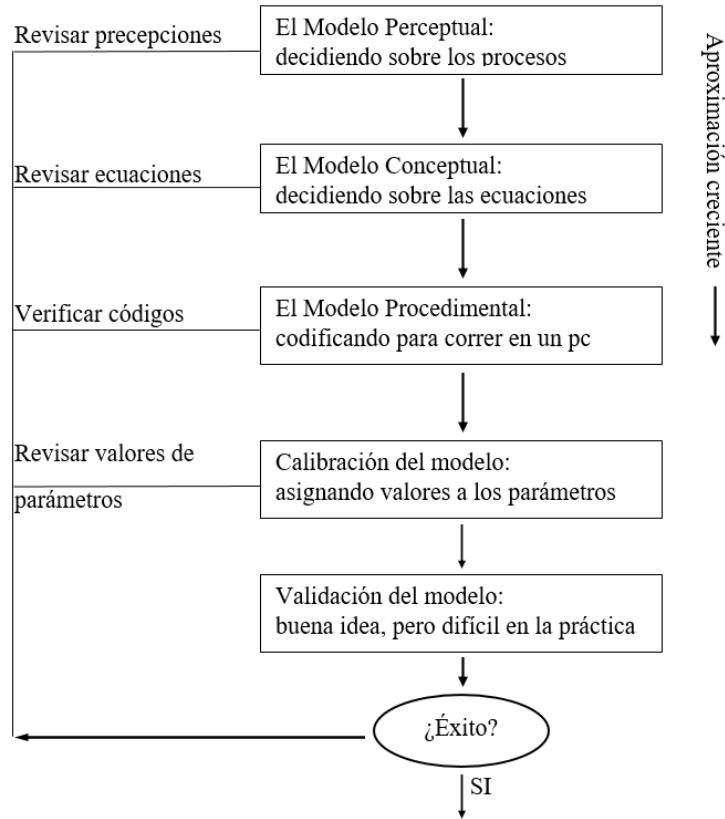


Figura 5: Esquema de un sistema hidrológico, mostrando entradas y salidas.

Fuente: Tomada y adaptada de Cabrera (2021).

2.5.2. Complejidad de modelos vs. Disponibilidad de datos

La disponibilidad de datos es muy importante para elegir el modelo a utilizar y en su capacidad predictiva. Van de la mano y su interrelación debe entenderse claramente.

Si los datos son pobres (baja resolución), aumentar la complejidad del modelo no ayudará a su capacidad predictiva, que será baja. Si la resolución de los datos es alta pero el modelo es simple (no muy complejo), entonces la potencia predicha también será baja porque la simplicidad del modelo introduce incertidumbre (Cabrera, 2021).

En la Figura 6 se muestra la relación entre estas tres variables.

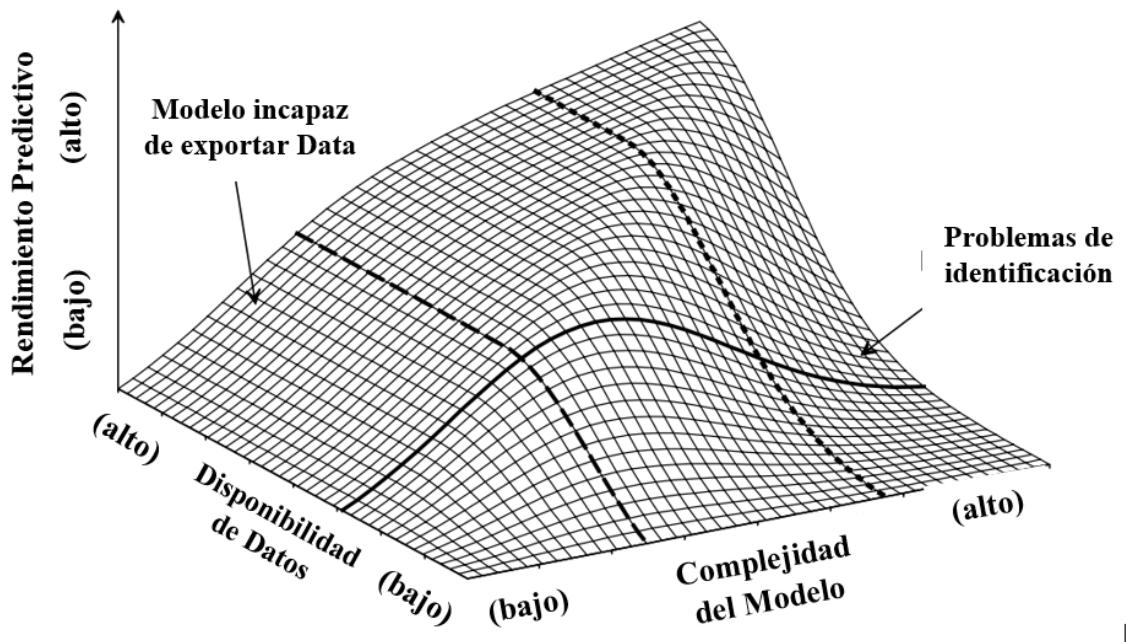


Figura 6: Relación entre complejidad del modelo, disponibilidad de datos y capacidad predictiva

Fuente: Tomada y adaptada de Grayson, Western, & McMahon, (2002).

De esta manera Cabrera, 2021 concluyó que:

- Para datos de baja resolución es recomendable utilizar modelos poco complejos.
- Para datos de alta resolución es recomendable utilizar modelos de mayor complejidad.

2.5.3. Modelos Hidrológicos

Se define un modelo de un sistema como la conceptualización de las interrelaciones y respuestas de un sistema real, a la que se incorpora la esencia del mismo, y que es capaz de predecir las interacciones principales y sus respuestas a un conjunto de condiciones propuesto, es decir es la representación artificial del sistema (Cahuana & Yugar, 2009).

2.5.4. Clasificación de modelos hidrológicos

Para Cabrera (2021) la literatura está llena de modelos y diferentes métodos de clasificación, pero podemos centrarse en analizar las tres funciones básicas del modelado hidrológico en cuencas:

- De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos; pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos.
- De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos; pueden ser determinísticos o estocásticos.
- De acuerdo a su representación espacial; pueden ser agrupados o distribuidos

2.6. HydroBID

HydroBID es una herramienta de simulación creada por el Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID) para dar soporte a la región de Latino América y el Caribe (LAC) en el manejo y planificación del recurso hídrico (BID, 2023).

Como parte de su compromiso de ayudar a los países miembros en la adaptación al cambio climático, el BID patrocina trabajos para desarrollar y aplicar un conjunto integrado de herramientas de simulación de cuencas conocidas como HydroBID. El Sistema de simulación HydroBID incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad (volúmenes y caudales) de agua dulce a escalas regional, de cuencas y de sub-cuencas. Incluirá también los análisis económicos y las herramientas de soporte de decisiones para estimar los costos y beneficios de las medidas de adaptación y ayudar a los responsables de tomar decisiones en la escogencia entre diseños alternativos de proyectos de infraestructura, así como entre políticas de gestión de recursos hídricos.

HydroBID genera salidas de información en forma de series de tiempo diarias de los flujos estimados para la localidad y el período escogidos. A discreción del usuario estas salidas pueden ser resumidas en una serie de tiempo mensual.

Con el fin de ilustrar las entradas, la operación y salidas del Sistema HydroBID el equipo de trabajo preparó un caso de estudio para la distribución de recursos hídricos en la cuenca del Río Grande en Argentina. La versión inicial del HydroBID ha recibido respuesta entusiasta en las presentaciones a usuarios potenciales y miembros del BID, así como de parte de audiencias técnicas externas vía conferencias y talleres (Moreda, Miralles Wilhelm, y Muñoz Castillo, 2014).

2.6.1. Base de Datos de Hidrografía Analítica

La Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) es una base de datos espacialmente explícita (i.e., basada en un sistema de información geográfica (GIS)) de aguas superficiales. Sirve como una plataforma espacial regional para integrar data dispersa que se necesita para apoyar los modelos de hidrografía regional. Provee un marco para la parametrización de modelos en una manera consistente, que provee la conectividad del flujo aguas arriba/aguas abajo necesaria para dichos modelos, y provee la data necesaria para mostrar los resultados en forma gráfica (Rineer & Bruhn, 2014).

La AHD tiene cuatro características claves que permiten el desarrollo y la implementación de herramientas de análisis de recursos hídricos en el contexto de su dinámica en una red hidrográfica.

- una estructura de cuencas de polígono anidado con un esquema único de identificación de cuencas;
- una estructura derivada correspondiente para los segmentos fluviales contenidos dentro de las cuencas;
- atributos descriptivos que crean un sistema interconectado de segmentos fluviales aguas arriba y aguas abajo y entre cuencas;
- una estructura de base de datos para poblar y adjuntar atributos adicionales específicos al modelo.

Cada segmento fluvial en la AHD contiene datos de sus elevaciones máximas y mínimas, longitud, inclinación promedio y otras características geométricas. La estructura de la base de datos también provee campos marcadores de parámetros para una amplia gama de atributos descriptivos adicionales. Cada cuenca en la AHD puede ser relacionada a datos basados en el área relevante a los modelos a ser desarrollados, por ejemplo, área, capa vegetal y uso de suelos, inclinación promedio, tipos de suelos predominantes y datos climáticos. Los modelos utilizarán datos obtenidos de la AHD y generarán resultados que pueden ser relacionados de vuelta a la AHD.

La AHD utiliza un modelo de base de datos vectorial en las que los atributos están representados como puntos, líneas y polígonos en vez de un raster en donde la data es almacenada en una celda (grid). El modelo de base de datos vectorial de la AHD permite atribuciones más realistas de los caudales, de las relaciones entre caudales y la estructura

hidrográfica, si se compara con los enfoques hidrográficos de raster o celda. Los segmentos de ríos y los polígonos de cuencas de la AHD permiten la integración de una vasta gama de data adicional en un solo conjunto de datos, incrementando el desarrollo de modelos y códigos de simulación (Rineer & Bruhn, 2014).

2.6.2. Estructura de HydroBID

El HydroBID utiliza la estructura de datos y las topologías de red de cuencas y corrientes de la AHD. Éste incorpora datos de uso de tierras, tipos de suelos, precipitaciones y temperatura dentro del área de estudio, así como los flujos de corrientes observados para usarlos en calibración. HydroBID incluye una interfaz de pre-procesador para desagregar data de clima mensual en una serie de tiempo diaria de temperatura y precipitación, siendo ésta la forma requerida de entrada de datos. El Sistema aplica el modelo standard Factor de Carga de Cauces Generalizados (GWLF), por sus siglas en inglés, en conjunto con una metodología nueva de tiempo de retardo-enrutamiento (lag-routing) desarrollada por RTI. La salida se genera como una serie de tiempo de proyecciones de flujos de agua, en escala diaria o mensual. El sistema tiene una interfaz de usuario para aceptar la entrada/input del modelo, así como también para mostrar un resumen gráfico y tabular de los outputs (Moreda et al., 2014).

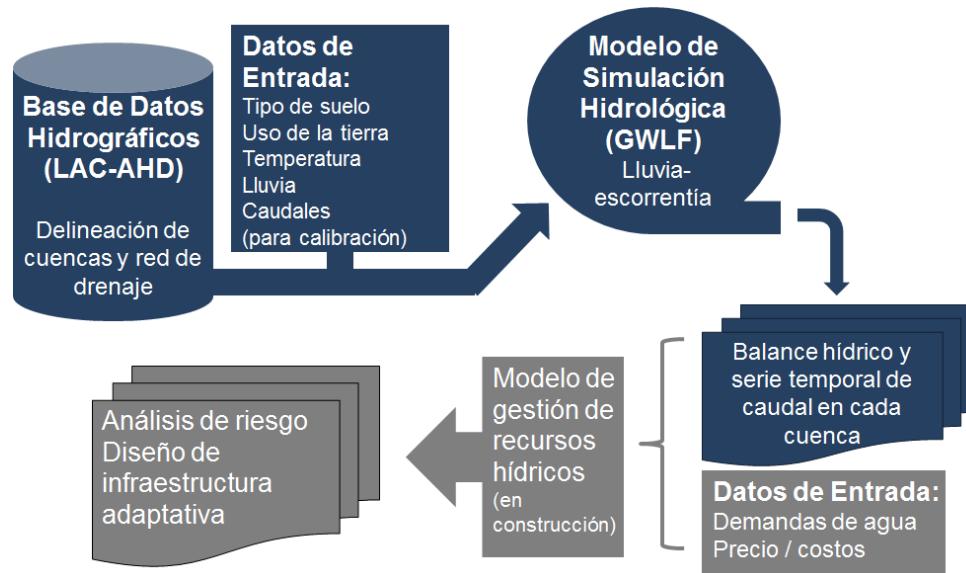


Figura 7: Diagrama de Flujo HydroBID

Fuente: Tomada y adaptada de la Nota técnica HydroBID: Un sistema integrado para la simulación de impactos de cambio climático sobre los recursos hídricos.

HydroBID puede ser utilizado con datos climáticos históricos o proyecciones climáticas futuras para el modelaje de flujos de agua superficiales en toda la cuenca, para evaluar los impactos potenciales del cambio climático en los flujos de aguas y la infraestructura, y apoyar el diseño de proyectos y estrategias de adaptación. Las opciones de adaptación incluyen respuestas a los descensos en los flujos de aguas a largo plazo; al incremento de los flujos; al incremento en la variación de flujos de estación e interanuales (Moreda et al., 2014).

2.6.3. Parámetros del modelo lluvia-escorrentía GWLF (Factor Estándar de Carga de Causes Generalizados)

La mayoría de los parámetros requeridos por el GWLF se acoplan en una base de datos para cada cuenca de la AHD, incluyendo el área de captación y la longitud del arroyo. Los parámetros principales del GWLF se describen en la Tabla 2 (Moreda et al., 2014).

Tabla 2: Principales parámetros del GWLF que están relacionados con la generación de flujos

Parámetros	Descripción	Método de Estimación
Capacidad disponible de agua del suelo (U)	Este parámetro activa el inicio de la percolación	Puede ser estimado por las características del suelo
Numero de Curva (CN)	Controla la cantidad inicial de la abstracción y usada para calcular la detención	Se escoge usando el uso del suelo y el tipo de clasificación del suelo
Coeficiente de la Curva de Evaporación (CV)	Representa la variación de la evaporación debido al crecimiento de la vegetación	Se estima mensualmente
Coeficiente de Recesión de aguas Subterráneas	Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde la zona saturada	En estaciones de aforo en las cuencas, el parámetro de recesión puede ser estimado usando técnicas de separación hidrográfica.
Parámetros de Percolación (s)	Controla la tasa de percolación hacia el acuífero de aguas subterráneas profundas	Dependiendo de la formación geológica, los valores de la percolación pueden ser muy variables

Fuente: Tomada y adaptada de HydroBID: Un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos.

2.6.3.1.Número de Curva

La Tabla 3 es la tabla de consulta del número de curva. Se requieren dos conjuntos de datos

para establecer una tabla para ver números de curva: el uso del suelo y los datos del suelo. Para determinar el número de curva para una cuenca en la tabla de consulta (Tabla 3), se deben identificar el uso de tierra/suelo y el grupo hidrológico dominante de suelo, tal como se muestra en la Figura 8.

Tabla 3: Tabla de consulta del número de curva (Adaptada del U.S. Department of Agriculture [USDA],1986)

Tipo de uso de suelo	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierras Urbanas y asentamiento humanas	82	88	92	93
Tierras agrícolas secas y pastizales	64	75	82	85
Tierras agrícolas irrigadas y pastizales	64	75	82	85
Tierras agrícolas mixtas secas/ irrigadas y pastizales	40	64	75	81
agricultura/ Mosaico de Pastizales	40	64	75	81
Agricultura/ Mosaicos de bosques claros	40	64	75	81
Pastizales	49	70	80	87
Bosques de Arbustos	45	57	68	74
Bosque mixtos de Arbustos/ Pastizales	45	57	68	74
Sabana	49	70	80	87
Bosque Deciduo de hoja ancha	36	60	73	79
Bosque Deciduo de hoja acicular	36	60	73	79
Bosque Siempreverde de hoja ancha	36	60	73	79
Bosque Siempreverde de hoja acicular	36	60	73	79
Bosque Mixto	36	60	73	79
Cuerpos de agua	100	100	100	100
Humedales Herbáceos	49	70	80	87
Humedales Arbolados	49	70	80	87
Infértil o de poca vegetación	77	86	91	94
Tundra Herbácea	45	57	68	74
Tundra Arbolada	45	57	68	74
Tundra Mixta	45	57	68	74
Tundra sin Vegetación	77	86	91	94
Nieve o Hilo	100	100	100	100

Fuente: Tomada y adaptada de HydroBID: Un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos.

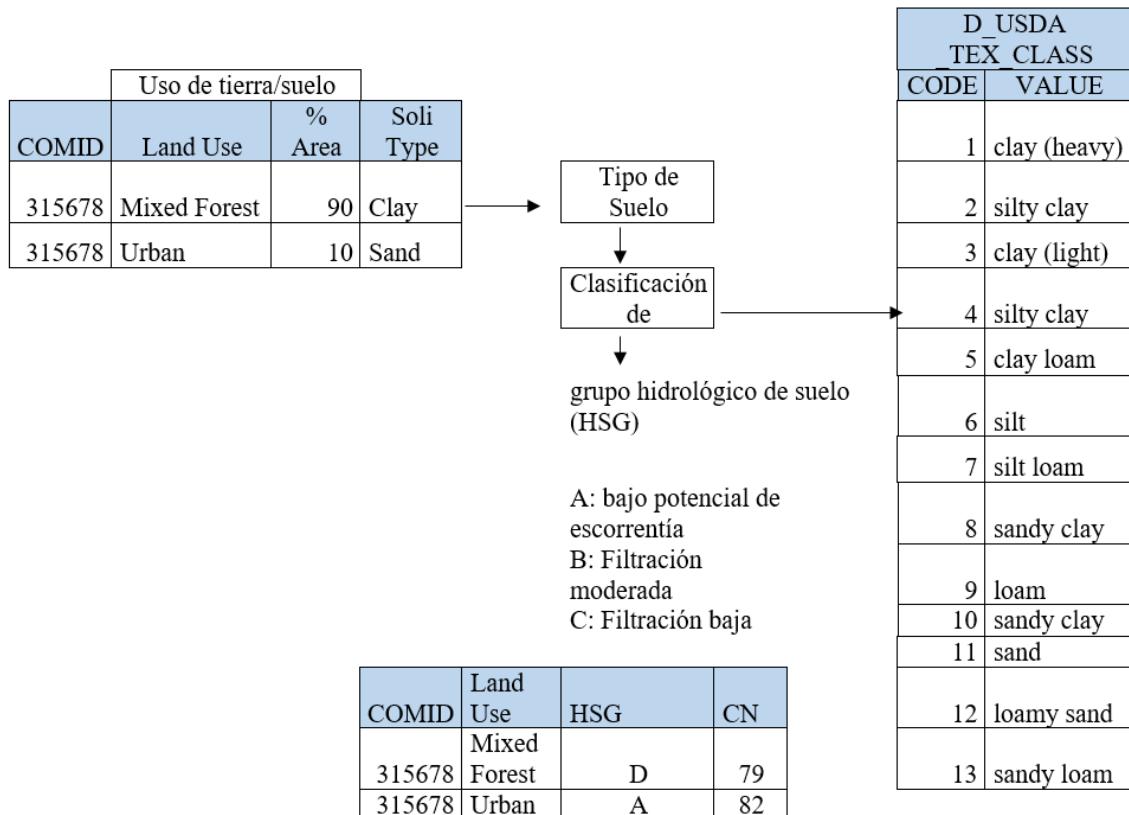


Figura 8: Representación esquemática de la estimación del número de curva. El ejemplo aquí dado es para una sola Cuenca de la AHD COMID=315678 que tiene dos tipos de usos de tierras (Bosque mixto y Urbano) y cada uso de tierra tiene un solo tipo de suelo dominante.

Fuente: Tomada y adaptada de HydroBID: Un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos.

2.6.4. Calibración y validación en HydroBID

La base de datos de HydroBID se encuentra parametrizada y pre-calibrada utilizando valores provenientes de bases de datos regionales, por esta razón el proceso de calibración y validación es necesario para garantizar que el modelo represente lo más correctamente posible a la realidad. Durante la calibración se utilizan los valores de caudales medidos que se encuentran en los archivos de flujo localizados en la carpeta “Flow” para compararlos a los caudales simulados por HydroBID (BID, 2020).

HydroBID provee un número de parámetros iniciales para simulaciones hidrológicas; sin embargo, como en todos los modelos, los parámetros necesitan ser calibrados para simular los caudales deseados con precisión. Para permitir la

calibración dentro del sistema, HydroBID tiene una opción para agregar las series de tiempo de flujos observados. Actualmente, el sistema requiere una calibración manual en la cual el usuario selecciona y cambia los parámetros en el montaje (set up) y repite la corrida del modelo.

Los parámetros hidrológicos que pueden ser cambiados se muestran en la Figura 9. Cabe destacar que todos los parámetros provistos aquí aplican para la cuenca entera identificada como la cuenca más aguas abajo. En una versión futura, esperamos que se permita el montaje (set up) de parámetros regionalizados. También, se identifican dos conjuntos de parámetros de calibración: valor único o multiplicador. Un parámetro de un valor único será utilizado en todas las cuencas de captación dentro de la cuenca hidrológica. Los parámetros de un multiplicador son parámetros que tienen estimados iniciales derivados del nivel de cuenca de la AHD (AHD catchment level). El valor del multiplicador es utilizado para llevar a escala hacia arriba o hacia abajo los parámetros variados espacialmente al retener la variabilidad (Moreda et al., 2014).

Hydro Model Parameters:			
Stream velocity (m/s):	<input type="text" value=".5"/>		
Latitude (degrees):	<input type="text" value="-30"/>		
Start of growing season (day of year):	<input type="text" value="115"/>		
End of growing season (day of year):	<input type="text" value="210"/>		
	Single Value	Multiplier	
Curve Number:	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="0.85"/>
AWC:	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="0.85"/>
R Coefficient:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text" value=".005"/>
Seepage:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text" value="0.02"/>
Grow season ET factor:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>
Dormant season ET factor:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>
Impervious cover percent:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text" value="2"/>

Figura 9: Parámetros hidrológicos

Fuente: HydroBID: Un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos.

Para evaluar el desempeño de los parámetros, las salidas (output) de las series de tiempo de flujos de cada corrida se trazan contra las series de tiempo de flujos observados. Hay trazados de series de tiempo diario y mensual (Moreda et al., 2014).

2.6.4.1. Parámetros de calibración en HydroBID

Los parámetros a calibrar son los siguientes:

- **Numero de Curva (NC):** Parámetro usado para caracterizar el tipo de uso de suelo y representar la hidrología en el suelo. Un numero de curva es asignado a cada sub-Cuenca en la base de datos. Este valor oscila entre 0 y 1. En donde un valor de 1 representa que toda el agua que llueve se convierte en escorrentía y 0 que se genera una completa infiltración.
- **Contenido Disponible de Agua (AWC):** Estima el monto de agua que se puede almacenar en el suelo para ser usado por las plantas, afectando la infiltración hacia las aguas subterráneas. Al valor es asignado para cada sub-Cuenca en la base de datos AHD, se lo altera mediante un multiplicador; un valor ingresado de forma directa.
- **Coeficiente de Recesión (R):** El coeficiente R caracteriza como el agua subterránea cerca de la superficie contribuye a los caudales en los ríos después de un evento de grandes caudales. En la interfaz se ingresa el valor como multiplicador que altera el valor asignado en la AHD, se puede ingresar de forma directa como resultado de una medición en campo.
- **Perdidas (Seepage):** Representa el intercambio entre agua subterráneas cerca de la superficie y las más profundas, en donde el volumen de agua que se le atribuye a este parámetro se considera como una salida en la modelación. Al igual que el anterior se puede ingresar como un multiplicador o como un valor directo.
- **Factor ET de la estación de cultivo:** Representa al factor de la evapotranspiración de las plantas durante la etapa de cultivo. Se puede ingresar como un valor multiplicador o como valor directo.
- **Factor ET de la estación de latencia:** corresponde al factor de evapotranspiración en la etapa de latencia o en la etapa en la que no se cultiva en la zona, en el software se puede ingresar este valor como un multiplicador que altera al valor asignado en la AHD o como un valor de la medición directa en campo.

- **Porcentaje de la cobertura:** Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca y está disponible en algunas versiones de HydroBID (BID, 2020).

2.6.4.2. Métricas de control de desempeño de la calibración

Las siguientes son las variables utilizadas para la determinación estadística de los errores en las simulaciones de Hydro-BID:

- **Overall Volume Error:** indica la media del porcentaje de error entre los valores simulados y los valores observados. Valor óptimo cercano al % de error máximo permitido.
- **Correlation, (r):** analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas. Valor óptimo cercano a 1.
- **Modified Correlation Coefficient (rmod):** analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas, aplicando un factor que relaciona los valores mínimos y los máximos. Valor óptimo cercano a 1.
- **Nash-Sutcliffe Efficiency Index (R2):** analiza la magnitud de la relación entre las varianzas de los flujos simulados y las varianzas de los flujos observados. Valor óptimo cercano a 1 (Nalessio & Coli, 2017).

2.6.5. Proyecciones de cambio climático en HydroBID

HydroBID permite las siguientes proyecciones de escenarios de cambio climático:

- Uso directo de la precipitación y la temperatura diaria dentro de un solo archivo;
- Uso de datos de referencia climática con la habilidad de perturbar los datos mediante datos mensuales climáticos futuros.
- Incremento/disminución global de precipitación/temperatura por un factor.
- Factores de incremento o disminución mensual.

Las primeras dos opciones se aplican a un solo archivo de entrada (input) de series de tiempo, mientras que las dos últimas se aplican a la base de datos para todas las cuencas en el dominio del modelo (Moreira et al., 2014).

2.6.5.1. Uso directo de la precipitación y temperatura diaria dentro de un solo archivo

HydroBID tiene una opción de usar las series de tiempo diarias de precipitación y temperatura. Las proyecciones de clima obtenidas de modelos de circulación general pueden ser usadas directamente si los valores diarios se consideran precisos. Sin embargo, los valores diarios de modelos de circulación global basados en resoluciones bajas no son usualmente confiables. Por lo tanto, recomendamos usar datos de precipitación y temperatura mensual o anual para proyecciones futuras generando valores diarios usando series de tiempo diaria históricas, tal como se explica a continuación (Moreda et al., 2014).

2.6.5.2. Uso de datos de referencia climática y perturbación por datos climáticos mensuales futuros.

Las proyecciones comúnmente más utilizadas son la precipitación y temperatura mensual y anual. HydroBID usa una serie de tiempo mensual de datos de proyección futura con datos climáticos históricos diarios para llegar a proyectar datos climáticos diarios. En este método se asume que la variación diaria de los datos históricos está sujeta al incremento o disminución proporcional de las proyecciones futuras. Este método también asume que las secuencias diarias representadas en los datos históricos climáticos se repetirán en el futuro (Moreda et al., 2014).

2.6.5.3. Permitir el incremento/disminución global de la precipitación/temperatura

En ausencia de datos climáticos proyectados a futuro, los análisis de sensibilidad de los impactos de un cambio climático a nivel de cuenca completa se pueden estudiar. HydroBID permite un incremento o una disminución de la precipitación mediante un valor en porcentaje y un incremento o disminución de la temperatura mediante un valor absoluto. Este incremento/disminución puede aplicarse tanto a los datos climáticos en celdas como a los datos de aforos (Moreda et al., 2014).

2.6.5.4. Permitir factores de incremento o disminución mensual

También HydroBID permite capturar la variabilidad estacional del clima proyectado. Por ejemplo, si los modelos de proyección de clima muestran un cambio diferente de precipitación en el verano comparado con el invierno, o una variación

mensual de los cambios de precipitación/clima, el sistema puede perturbar dicho clima mediante el uso de unos factores mensuales específicos (Moreda et al., 2014).

2.6.6. Módulo de gestión de embalses

Los embalses se modelan como objetos discretos situados a la salida de una cuenca. HydroBID dirige el caudal a la cuenca que contiene el embalse y calcula las descargas del embalse de acuerdo a un conjunto de algoritmos.

El procedimiento general utilizado en HydroBID consiste de:

- Un embalse es identificado por las cuencas (COMID) ubicadas en la salida del embalse.
- HydroBID se corre y se generan las series de tiempo del caudal en la salida del COMID.
- Las series de tiempo generadas se usarán como entradas (inputs) al módulo del embalse.
- Se corre la subrutina del modelo de embalse con las entradas (inputs): series de tiempo del flujo del caudal entrante, la demanda, la evaporación y la filtración y producirá el caudal saliente modificado (descargas del embalse) y el volumen del embalse para el COMID.
- HydroBID continúa corriendo para las corrientes de aguas abajo asumiendo al COMID como una estructura de control y utiliza el caudal saliente modificado del embalse como caudal entrante a la cuenca inmediatamente aguas abajo.
- La configuración (set-up) trabajará para uno o varios embalses dentro de la cuenca.
- Las series de tiempo de volumen de almacenamiento del embalse serán utilizadas para generar la confiabilidad del embalse (Moreda F., Señor, Nalessio, Coli Valdes D., & Corrales, 2016).

2.6.6.1. Parametrización del módulo del embalse

Todos los embalses requieren de los siguientes parámetros a ser definidos en la interfaz de la Base de Datos del Embalse principal:

a) Etiquetas

El COMID es la Identificación (ID) de la cuenca AHD para la cuenca de captación que contiene la salida del embalse. HydroBID simula todas las operaciones del embalse, incluyendo la infiltración de aguas subterráneas y la evaporación, en esta cuenca de captación. Esto se puede encontrar utilizando una herramienta de QSIG. Además, se le debe dar un Nombre al embalse para la organización de los datos (Moreda F. et al., 2016).

b) Parámetros físicos

Los Parámetros de forma (shape) son utilizados para determinar la relación entre el volumen del embalse y el área de superficie, que a su vez se utiliza para estimar las pérdidas por evaporación. Se requiere de dos parámetros, **a** y **b**, para establecer la relación, tal como se muestra en la Ecuación 1:

$$\text{Área de superficie} = b^* (\text{Volumen})^{ea} \quad (1)$$

Si se desconocen estos valores, se sugiere utilizar por defecto los valores de -1 para **a** y -2 para **b**.

Donde:

e: Coeficiente de Evaporación, se utiliza para modificar la escala de la evaporación potencial para todo un embalse. La evaporación potencial se determina a partir de una función empírica de variables meteorológicas en un paso de tiempo diario. Si se desconoce un coeficiente de evaporación, se sugiere un valor predeterminado de 1,2 (Moreda F. et al., 2016).

c) La Conductividad Hidráulica

Representa la facilidad con la cual el agua fluye a través del suelo debajo del embalse y se utiliza para calcular las pérdidas por filtración del embalse. Éste valor es una propiedad intrínseca del suelo (Moreda F. et al., 2016).

d) La Capacidad de Almacenamiento

En HydroBID, el almacenamiento del embalse se clasifica en dos categorías: Volumen Principal y Volumen de Inundación. Se puede decir que el Volumen Principal es el volumen accesible en un embalse; generalmente es el volumen de agua correspondiente cuando el nivel de agua está en el fondo del vertedero principal.

El Volumen de Inundación puede ser considerado como el volumen máximo de almacenamiento normal en un embalse. Este es típicamente el volumen cuando el nivel de agua está en el fondo del vertedero. Los dos volúmenes y su relación con la zona de almacenamiento del embalse se ilustran en la Figura 10 (Moreda F. et al., 2016).

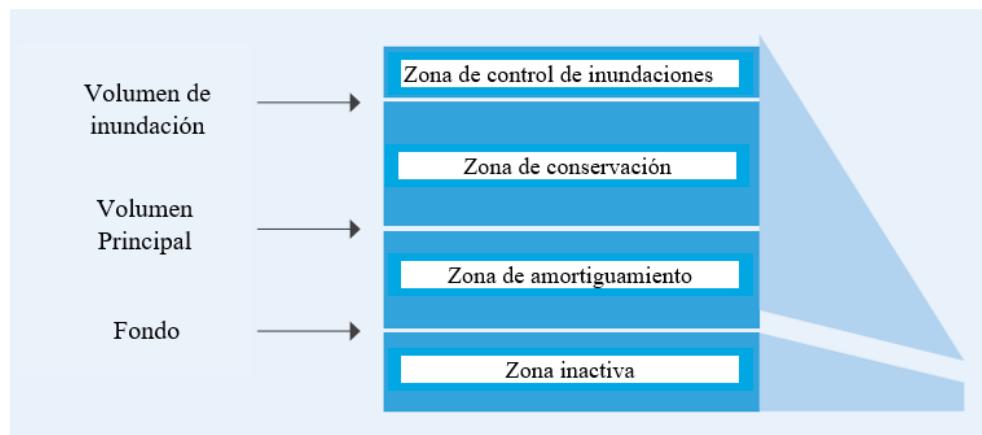


Figura 10: Zonas de almacenamiento del Embalse

Fuente: Tomada y adaptada de HydroBID: Nuevas funcionalidades (módulos de simulación de embalses, transporte de sedimentos y de aguas subterráneas).

e) Definición de Descargas

HydroBID tiene dos modalidades para simular las operaciones del embalse, conocidos como “opciones” en la interfaz de usuario. Cada opción tiene un conjunto único de parámetros utilizados para modelar las operaciones deseadas. Antes de la implementación de un embalse de HydroBID, se debe decidir cuáles son las metas operacionales. Las siguientes secciones describen las dos opciones disponibles (Moreda F. et al., 2016).

Si los embalses no aparecen cuando el módulo es activado, el usuario tendrá que agregarlos manualmente en la interfaz. La Tabla 4 describe cada parámetro con los valores necesarios subrayados. Como así la Tabla 5 describe los parámetros mensuales con los que trabaja en la simulación HydroBID.

Tabla 4: Parámetros de embalses a escala de tiempo anual

Nombre del Campo	Alias/Descripción (unidades)	Descripción	Valor Predeterminado Recomendado
comid	COMID	ID de la cuenca de salida	N/A
name	Nombre del embalse	Etiqueta para los resultados del embalse	N/A
shapeparameter_a	Parámetro Shape a	Define la relación volumen-área de superficie	-1
shapeparameter_b	Parámetro Shape b	Define la relación volumen-área de superficie	-2
option_number	Número de opción	Especifica el conjunto de reglas que gobiernan las tasas de descargas	2
evap_coeff	Coeficiente de Evaporación	Coeficiente de evaporación empírico	1.1
hydraulic_conductivity	Conductividad Hidráulica (cm/día)	Define las pérdidas de aguas subterráneas	0.1
nonflood_season_begin	Inicio de la temporada sin inundación	Número del mes del inicio de la temporada sin inundación	10
nonflood_season_end	Fin de la temporada sin inundación	Número del mes del fin de la temporada sin inundación	12
number_day_target	Número de días para alcanzar la meta	Número de días disponibles para que el embalse alcance la meta de almacenamiento mensual	15
principal_vol	Volumen principal (millón m ³)	Volumen mínimo utilizable del embalse	N/A

flood_vol	Volumen de inundación (millón m ³)	Volumen máximo del embalse	N/A
max_surface_area	Extensión máxima de superficie (km ²)	Área de superficie del embalse en volumen de inundación	N/A
avg_daily_release	Descarga promedio diaria (m ³ /día)	Promedio anual de descarga diaria	N/A
initial_vol	Volumen inicial (m ³)	Volumen al inicio de la simulación de Hydro-BID	N/A
type	Variable del tipo de embalse	Variable interna utilizada por Hydro-BID	2

Fuente: Tomada y adaptada de HydroBID: Nuevas funcionalidades (Modulo de simulación de embalses).

Tabla 5: Parámetros mensuales de embalse

Nombre del Campo	Alias/Descripción (unidades)	Descripción
Month	Valor numérico de cada mes	Valor numérico de cada mes
min_daily_flow	Caudal diario mínimo (m ³ /día)	Descarga mínima necesaria. Puede ser utilizado para especificar la demanda aguas abajo o los requerimientos ambientales.
max_daily_flow	Caudal diario máximo (m ³ /día)	Descarga máxima necesaria. Se usa generalmente para prevenir inundación accidental.
target_storage	Meta de almacenamiento (millón m ³)	Almacenamiento óptimo deseado del embalse.
demand	Uso para consumo	Demandta total para extracciones desde el embalse con fines de consumo.

Fuente: Tomada y adaptada de HydroBID: Nuevas funcionalidades (Modulo de simulación de embalses).

2.7.Seguridad hídrica en cuencas

La seguridad hídrica es la capacidad de un sistema hidrológico para garantizar la disponibilidad y el acceso al agua en cantidad y calidad suficiente para satisfacer las necesidades humanas, ecosistémicas y económicas, incluso frente a fenómenos

extremos como sequías o el cambio climático (UNESCO, 2012). En el contexto de cuencas andinas como la del río Tolomosa, esta seguridad depende del régimen hidrológico, la regulación del embalse San Jacinto, la variabilidad climática y la demanda creciente de agua.

Bolivia, a través del MMAyA, ha establecido políticas para la gestión integrada de los recursos hídricos, aunque no existe una norma específica que defina indicadores estándar para evaluar la seguridad hídrica. Sin embargo, diversos estudios, planes de cuenca y estrategias del Plan Nacional de Cuencas (PNC) incorporan conceptos como regulación, vulnerabilidad, disponibilidad y balance hídrico (MMAyA, 2023).

Para evaluar cuantitativamente la seguridad hídrica en el sistema embalse-cuenca, se consideran los siguientes indicadores:

2.7.1. Disponibilidad de volúmenes de agua almacenados

La disponibilidad de agua en un embalse se refiere al volumen de agua almacenado que puede ser utilizado para satisfacer diversas demandas. Este volumen está influenciado por factores como las entradas (precipitaciones, escorrentías), salidas (consumo, evaporación) y las características propias del embalse. Una gestión adecuada de estos volúmenes es esencial para garantizar la seguridad hídrica (Ummah, 2019).

2.7.2. Fiabilidad de cumplimiento del volumen mínimo operacional

La fiabilidad en la gestión de embalses se refiere a la capacidad del sistema para cumplir con las demandas de agua establecidas, manteniendo al menos el volumen mínimo operacional necesario. Este concepto es fundamental para evaluar la seguridad hídrica, ya que indica la frecuencia con la que el sistema puede satisfacer las necesidades sin incurrir en déficits (Hashimoto, Stedinger, & Loucks, 1982).

2.7.3. Frecuencia de períodos de déficit hídrico en el embalse

El déficit hídrico ocurre cuando la demanda de agua supera la disponibilidad en el embalse. Analizar la frecuencia y tendencia de estos períodos críticos permite identificar patrones estacionales o interanuales que pueden afectar la seguridad hídrica (Ministerio del Medio Ambiente, 2019).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Marco Metodológico

3.1.1. Metodología

Está basada en la aplicación del modelo hidrológico Hydro-BID, el mismo requiere como base para trabajar: información diaria de precipitaciones, temperatura y caudales para su respectiva calibración y validación. Para posterior a ellos obtener la serie de caudales en función a la parametrización del software.

De igual manera la metodología de este trabajo está dividida en 3 fases principales, detallada y esquematizada a continuación:

- Fase I, se recolecta la información necesaria para correr el modelo, esta información debe representar de manera conforme las características climáticas de la cuenca para posteriormente calibrar y validar Hydro-BID en la cuenca.
- Fase II, se corre el modelo HydroBID a partir de la calibración y validación para su posterior implementación de la modelación de caudales futuros en sus módulos de cambio climático y gestión de embalse.
- Fase III, se realiza el análisis de la seguridad del recurso hídrico en la cuenca e impactos de cambio climático.

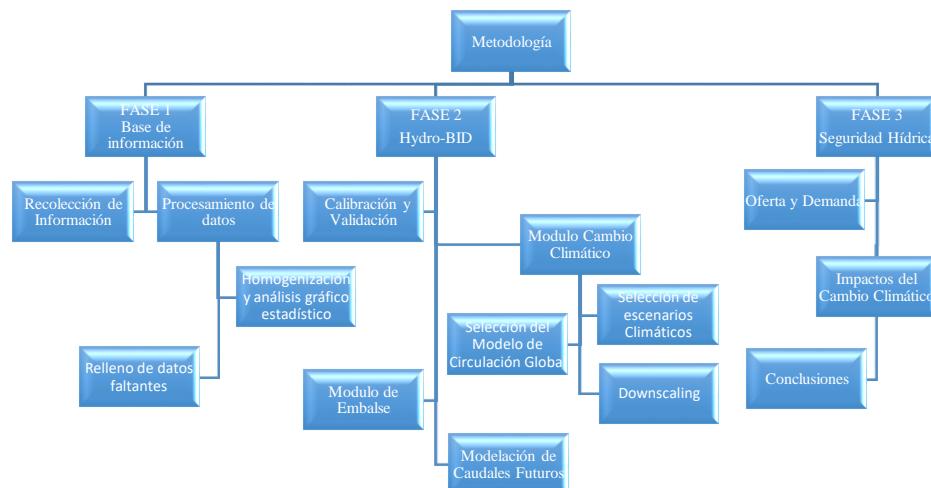


Figura 11: Estructura de la metodología

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Tipo de investigación

Es explicativa aplicada, porque pretende comprender las relaciones causales entre variables climáticas (precipitación, temperatura) y los impactos sobre los caudales y volúmenes almacenados y cómo el cambio climático afecta. Y aplicada porque se usa una herramienta práctica (HydroBID) con el objetivo de resolver y responder la interrogante del problema.

3.1.3. Enfoque

El presente trabajo tiene un enfoque cuantitativo; toma como centro de su proceso las mediciones de datos de las estaciones hidrometeorológicas (caudal, precipitación, temperatura), valores de variaciones climáticas, escenarios climáticos, y de la base de datos de hidrografía analítica de HydroBID, para poder analizarlos en el proceso de modelación y simulación de escenarios, y lograr responder las preguntas planteadas previamente en este trabajo y cuantificarlas por medio de los resultados de las mismas.

3.1.4. Método

El presente trabajo se enmarca en el método No Experimental, porque no se interviene ni manipulan las variables en estudio dentro de su entorno real, sino que se emplea la modelación hidrológica como método técnico-práctico, mediante el uso del software HydroBID en sus módulos de cambio climático y embalse, para representar y analizar el comportamiento de los recursos hídricos bajo distintas condiciones climáticas.

3.1.5. Técnica

En el presente trabajo, se aplicaron diversas técnicas orientadas a la recolección, procesamiento y análisis de datos hidrológicos y climáticos, con el objetivo de analizar la aplicabilidad de HydroBID y los impactos del cambio climático sobre la seguridad de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Tolomosa. A continuación, se describen las principales técnicas utilizadas:

- Recolección de datos
- Análisis estadístico y relleno de datos hidrometeorológicas
- Delimitación de unidades de análisis (catchments)
- Calibración y validación del modelo hidrológico

- Modelación hidrológica con escenarios de cambio climático y módulo de embalses

Estas técnicas en conjunto permiten generar resultados sólidos y técnicamente sustentados, orientados a la prospectiva del trabajo en la cuenca de estudio.

3.2. La cuenca del río Tolomosa

Ubicada geográficamente al sur de la ciudad de Tarija, provincia Cercado, Tarija, Bolivia, entre los paralelos 21°47'48" y 21°32'18" de latitud sur y meridianos 64°59'57" y 64°41'00" de longitud oeste.

La delimitación del área de aporte y procesamiento de la cuenca está caracterizada según la base de datos hidrográfica analítica (AHD) del modelo HydroBID. El área de aporte de la cuenca es de 467.56 km², cuenta con 35 subcuenca o Catchments, la red de flujo abarca un total de 126 km hasta su confluencia con el río Guadalquivir y el punto de aforo corresponde a la subcuenca identificada por el COMID 313344202 ubicado a 21°34'39.21" de latitud sur y 64°41'29.53" de longitud oeste.

Es una de las cuencas de mayor importancia y potencial de la zona, con recursos hídricos que aportan al desarrollo de las comunidades y sus áreas de cultivo bajo riego, algunas de estas comunidades son:

- San Jacinto
- San Andrés
- Lazareto
- Turumayo
- San Pedro de Sola
- Pantipampa
- Bella Vista
- Pino Norte y Sur
- Tolomosa Sur, Oeste, Centro y Grande
- Pampa Redonda, etc.

Las mismas que generan una presión antrópica relacionada junto al municipio de Tarija, otorgándole a la cuenca ese grado de importancia. En la Figura 12 podemos apreciar la ubicación de la cuenca del río Tolomosa

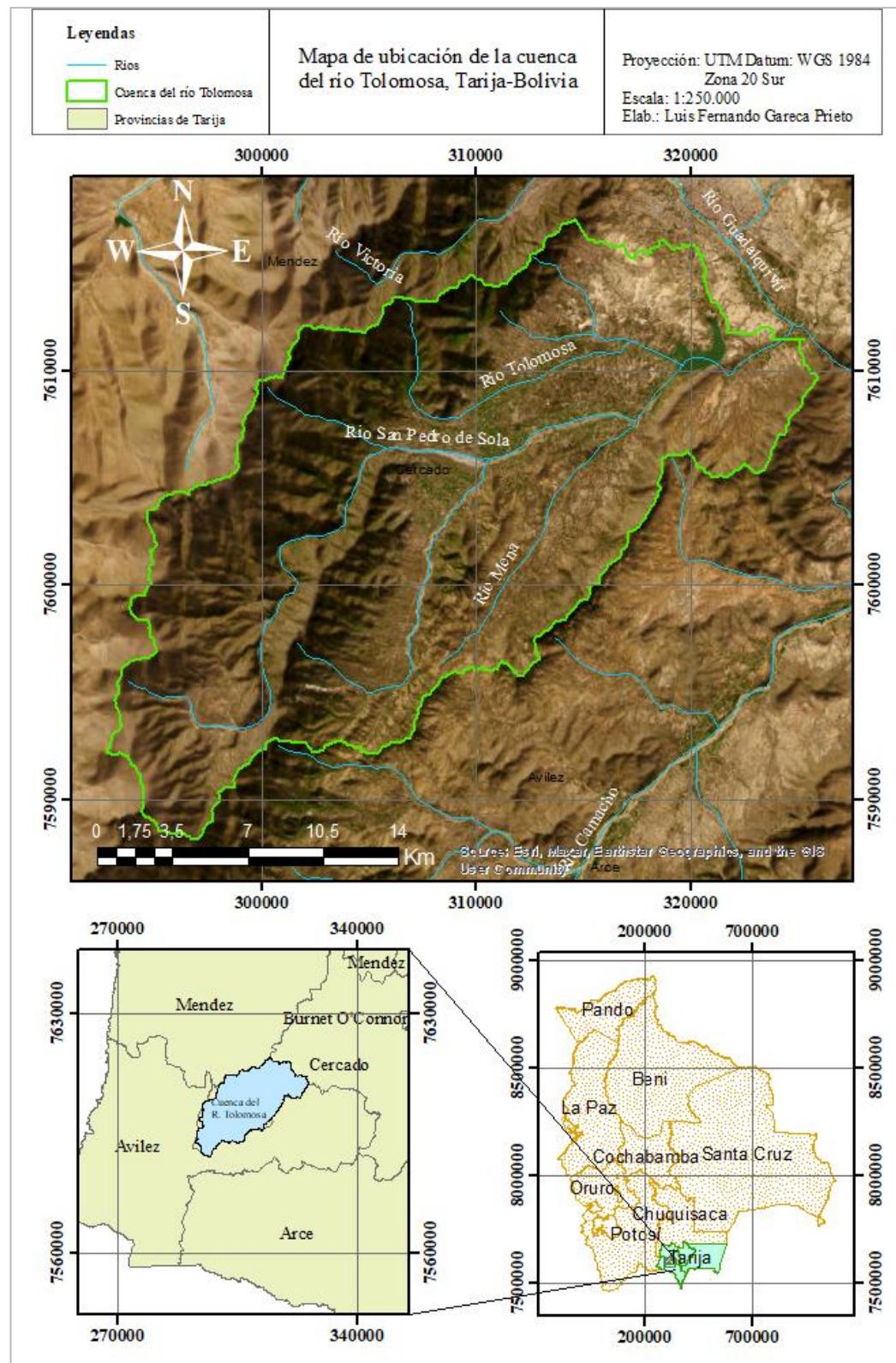


Figura 12: Ubicación de la Cuenca del río Tolomosa

Fuente: Elaboración propia

3.2.1. Geomorfología

La cuenca presenta un relieve montañoso que varía aproximadamente entre los 1.827 m.s.n.m. en su punto bajo de convergencia con el río Guadalquivir, hasta los 4.610 m.s.n.m. ubicado en la cresta del cerro Negro del Chiquirio, obteniendo un gradiente altitudinal cerca de 2.783 m. un aspecto que influye en los procesos geomorfológicos, distribución espacial de las precipitaciones, humedad, cobertura vegetal, tipo, uso y calidad de suelo, entre otros procesos hidrológicos.

3.2.2. Geología, topografía y suelo

Según el estudio del PERTT (2022), la cuenca geológicamente presenta areniscas, conglomerados, limolitas y lutitas, un valle formado mayormente por llanuras aluviales y abanicos de origen fluvial, llanuras aluviales y pie de cerros compuestos por arcillas, linos, arenas y gravas cuaternario.

El terreno se desenvuelve entre un complejo de serranías y laderas, con profundos surcos que dan vida a los flujos de quebradas y con la presencia de mesetas de origen fluvio lacustre, aluvial y fluvial.

Esta área se caracteriza por presentar suelos formados a partir de terrazas aluviales, coluviales y coluvio aluviales depositados durante el periodo terciario y cuaternario respectivamente, con diferentes niveles de terrazas, como consecuencia de la acumulación y posterior entallamiento.

La subcuenca, alimenta al embalse San Jacinto que se encuentra afectado por un fuerte proceso de erosión y el arrastre de sedimentos de los diferentes afluentes que desembocan en el mismo.

3.2.3. Clima

La subcuenca del río Tolomosa, se caracteriza por tener un clima semiárido fresco, meso termal, donde la temperatura media es de 18°C con oscilaciones entre 13,8 °C a 20 °C. Así mismo, presenta temperaturas máximas extremas que llegan a los 40°C y mínimas extremas en invierno oscilan hasta los -9°C.

La precipitación media anual en la subcuenca alcanza valores de 1083 mm. siendo una zona con una de las mayores precipitaciones en el valle central de Tarija.

3.2.4. Antropología de la cuenca

El estudio “Agua segura para la población” del Proyecto Múltiple San Jacinto (PMSJ, 2017), realizó la caracterización demográfica de las comunidades y demás centros poblados correspondientes al área de cobertura del PMSJ, la cual está seccionada en tres zonas como se muestra en la tabla 3.

Tabla 6: Población en la zona de estudio

Zona	Población, 2012	%	Extensión	%	Densidad	Población, 2022
Cuenca	10.367	59%	414	79%	25	14.624
Lago	981	6%	18	3%	54	1.384
Riego	6.065	35%	94	18%	65	8.555
TOTAL	17.413	100%	526	100%	33	24.563

Fuente: Adaptada del PMSJ

La población total beneficiaria total es de 24.563 habitantes para el año 2022, proyección que fue realizada a partir de los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), para una tasa de crecimiento anual del 3,5% según el último periodo intercensal (2001-2012) de la población rural del INE, aplicando el método geométrico para estimar el crecimiento poblacional.

El valor total de la población beneficiaria abarca 31 comunidades, de las cuales un 59% se encuentra en la cuenca, un 6% en la zona del embalse y un 35% en la zona de riego, de las cuales en total son 19 comunidades que se encuentran bajo la zona de estudio del presente proyecto, detalladas en la siguiente Tabla 7:

Tabla 7: Población por comunidades de la cuenca del río Tolomosa

Nº	Comunidad	Censo 2001	Censo 2012	Población 2022	% Población
1	Churquis	461	640	903	5,6
2	Panti Pampa	228	313	442	2,8
3	Pampa Redonda	431	637	899	5,6
4	Bella Vista	688	794	1.120	7,0
5	Pinos Norte	310	373	526	3,3
6	Pinos Sur	385	370	522	3,3
7	Guerra Huayco	950	1.496	2.110	13,2
8	San Andrés	1.239	1.593	2.247	14,0
9	San Pedro de Sola	259	309	436	2,7
10	Turumayo	572	1.450	2.045	12,8

11	Lazareto	48	795	1.121	7,0
12	Calderillas	235	156	220	1,4
13	Calderilla Chica	0	45	64	0,4
14	Tablada Grande	0	94	133	0,8
15	Tolomosa grande	820	936	1.320	8,2
16	Tolomosita oeste	265	366	516	3,2
Subtotal zona de Cuenca		6.891	10.367	14.624	91,4
17	Tolomosita centro	238	243	343	2,1
18	Tolomosa norte	253	460	649	4,1
19	Tolomosita sur	183	278	392	2,4
Subtotal zona de Lago		674	981	1.384	8,6
TOTAL		7.565	11.348	16.008	100,0

Fuente: Adaptada del INE

3.3.Escalas y periodos de estudio

El desarrollo de procesos hidrológicos ocurre a diferentes escalas, desde el flujo que abarca pequeñas o grandes extensiones de kilómetros, de una o varias cuencas denominado escala espacial, hasta flujos repentinos o de respuesta lenta, o el estudio de la precipitación por períodos cortos o extensos es denominado escala temporal.

3.3.1. Escala temporal

La definición de la escala temporal está definida principalmente por la disponibilidad de la información y la complejidad del trabajo a desarrollar. Según el MMAyA & VRHR (2016), en su guía metodológica nos señala que para un estudio de balance hídrico superficial se debe considerar las siguientes escalas temporales:

- Escalas diarias (horarias), mensuales y anuales, para el análisis y procesamiento de la información hidrometeorológica.
- Escala media mensual para las principales variables del sistema (P, ET, Q). Se elegirá una escala mayor (semanal, diurna), cuando aquello se considera importante. Aquello determinará una demanda de información a mayor detalle a nivel con respecto a los parámetros meteorológicos, hidrológicos, suelos y otros.
- Escala media mensual (medias históricas) para la demanda de agua para los distintos usos.

- Escala media mensual para series de variables que describen los escenarios climáticos.
- Escala estacional, interanual o década para el estudio de detección de cambios de uso de suelo.

En el caso de estudio del presente trabajo, en función a la disponibilidad de la información se consideró una escala temporal diaria, para los datos de precipitación, temperatura y caudales.

3.3.2. Escala espacial

La unidad básica para la definición de esta escala es la cuenca. Adaptado del Plan Nacional de Cuencas (PNC), el MMAyA & VRHR⁴, (2016) distingue las siguientes categorías:

- Macrocuena (superficie mayor a 500.000 Km²)
- Gran cuenca (100.000 a 500.000 Km²)
- Cuenca (10.000 a 100.000 Km²)
- Subcuenca (2.000 a 10.000 Km²)
- Mesocuenca (150 a 2.000 Km²)
- Microcuenca (superficie menor a 150 Km²).

El área de estudio de la cuenca del río Tolomosa igual a 467,56 km², adaptando dicho valor en las categorías previamente mencionadas, espacialmente se clasifica como una mesocuenca.

3.3.3. Periodo de estudio

Para la definición del periodo de estudio se consideró criterios como: el periodo en común de datos de la información meteorológica, número de estaciones en funcionamiento, y el periodo de información hidrométrica disponible para cuenca. Posterior al análisis de los criterios previamente mencionados se determinó un periodo de estudio desde enero de 1979 a diciembre de 2022. Adicional a esto una proyección de análisis de impacto climático desde enero del 2023 a diciembre de 2040.

⁴ VRHR: Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego

3.4. Información hidrometeorológica

Fue obtenida del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI), para las diferentes estaciones consideradas en el presente trabajo.

3.4.1. Información meteorológica

La información recopilada a utilizar en el presente trabajo comprende precipitación diaria y temperaturas máximas y mínimas diarias de todas las estaciones ubicadas dentro y sus alrededores más próximos a la cuenca, datos necesarios para poder correr el modelo hidrológico.

La preselección de las estaciones está delimitada a 13 estaciones meteorológicas: 5 en el área de la cuenca y 7 en sus alrededores. Las mismas que fueron seleccionadas por estar dentro de la cuenca, y las próximas por su cercanía, influencia, y características similares a las ubicadas dentro de la cuenca. De las 13 estaciones se subdividen en dos grupos: 11 meteorológicas y 2 pluviométricas, detalladas a continuación.

Tabla 8: Estaciones meteorológicas preseleccionadas

Nº	ESTACIÓN	TIPO	P	Tmax	Tmin	ESTADO
1	Aeropuerto	meteorológica	x	x	x	activa
2	Calderillas	pluviométrica	x	--	--	inactiva
3	Cañas	meteorológica	x	x	x	activa
4	Cenavit	meteorológica	x	x	x	inactiva
5	Chocloca	meteorológica	x	x	x	inactiva
6	Coimata	meteorológica	x	x	x	activa
7	El Tejar	meteorológica	x	x	x	activa
8	Juntas	meteorológica	x	x	x	activa
9	Pinos Sud	pluviométrica	x	--	--	activa
10	San Andrés	meteorológica	x	x	x	activa
11	San Jacinto Sud	meteorológica	x	x	x	activa
12	Tucumillas	meteorológica	x	x	x	activa
13	Turumayo	meteorológica	x	x	x	activa

Fuente: Elaboración propia

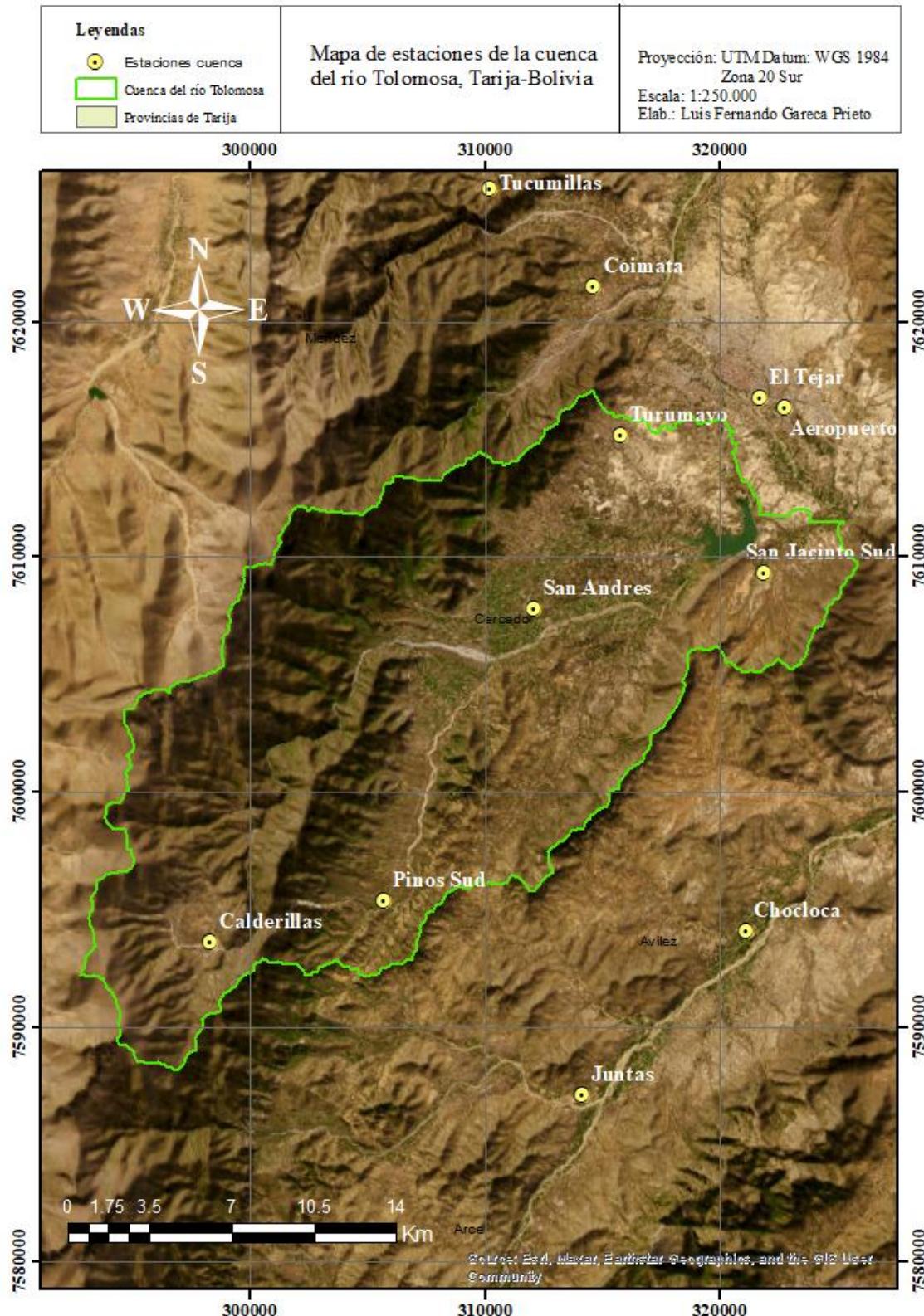


Figura 13: Estaciones de la Cuenca del río Tolomosa

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9 Ubicación y periodo de registro precipitación

Nº	ESTACIÓN	LATITUD S (°)	LONGITUD W (°)	ALTITUD (m.s.n.m)	INICIO	FINAL
1	Aeropuerto	21° 32' 48"	64° 42' 39"	1849	01/01/1979	31/12/2022
2	Calderillas	21° 45' 00"	64° 57' 00"	2800	01/01/1979	31/07/2003
3	Cañas	21° 54' 08"	64° 51' 03"	2078	01/01/1979	31/12/2022
4	Cenavit	21° 41' 31"	64° 39' 29"	1730	01/11/1989	31/08/2021
5	Chocloca	21° 45' 00"	64° 44' 00"	1800	01/01/1979	31/03/2012
6	Coimata	21° 29' 00"	64° 47' 00"	2000	01/01/1980	31/12/2022
7	El Tejar	21° 32' 35"	64° 43' 16"	1859	01/01/1979	31/12/2022
8	Juntas	21° 48' 37"	64° 47' 51"	1882	01/01/1979	31/12/2022
9	Pinos Sud	21° 44' 00"	64° 53' 00"	2100	01/01/1979	31/12/2022
10	San Andrés	21° 37' 24"	64° 48' 54"	1987	01/01/1979	31/12/2022
11	San Jacinto	21° 36' 37"	64° 43' 12"	1800	01/01/1979	31/12/2022
12	Tucumillas	21° 27' 40"	64° 49' 52"	2557	01/01/1979	31/12/2022
13	Turumayo	21° 33' 24"	64° 46' 42"	1978	01/01/1999	31/12/2022

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Ubicación y periodo de registro temperatura

Nº	ESTACIÓN	LATITUD S (°)	LONGITUD W (°)	ALTITUD (m.s.n.m)	INICIO	FINAL
1	Aeropuerto	21° 32' 48"	64° 42' 39"	1849	01/01/1979	31/12/2022
3	Cañas	21° 54' 08"	64° 51' 03"	2078	01/01/1992	31/12/2022
4	Cenavit	21° 41' 31"	64° 39' 29"	1730	01/10/1989	31/07/2020
5	Chocloca	21° 45' 00"	64° 44' 00"	1800	01/11/1992	31/03/2012
6	Coimata	21° 29' 00"	64° 47' 00"	2000	01/02/1980	31/12/2022
7	El Tejar	21° 32' 35"	64° 43' 16"	1859	01/01/1979	31/12/2022
8	Juntas	21° 48' 37"	64° 47' 51"	1882	01/04/1987	30/11/2012
10	San Andrés	21° 37' 24"	64° 48' 54"	1987	01/12/1995	31/12/2022
11	San Jacinto	21° 36' 37"	64° 43' 12"	1800	01/01/1979	31/12/2022
12	Tucumillas	21° 27' 40"	64° 49' 52"	2557	01/02/1999	31/12/2022
13	Turumayo	21° 33' 24"	64° 46' 42"	1978	01/01/1999	31/12/2022

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.1. Precipitación

En la Figura 14 se puede apreciar la información diaria disponible de precipitación para cada una de las estaciones activas e inactivas preseleccionadas. Las mismas cuentan con discontinuidades en sus registros, que son inevitables cuando se estudian amplios períodos, la mayoría de ellas originadas por inconvenientes administrativos, cambios del observador o del aparato de registro, entre otros.

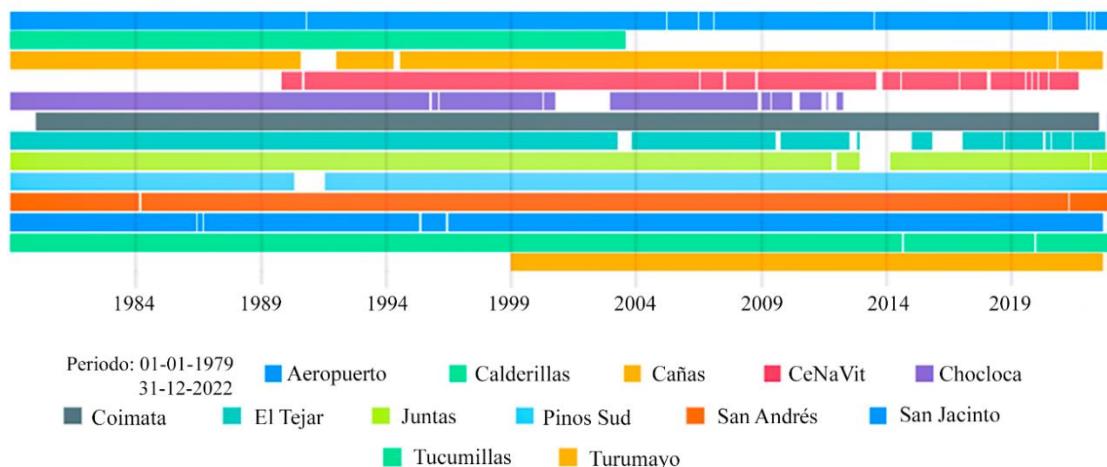


Figura 14: Calendario de datos de precipitación

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.2. Temperatura máxima y mínima

Del total de las estaciones solo 11 cuentan con registros de temperatura máxima y mínima diaria, en la Figura 15 y Figura 16 se puede apreciar la información disponible para una de ellas en cada estación. Se presenta esta información en dos figuras debido a discontinuidades diferidas en el registro según sus períodos de registros.

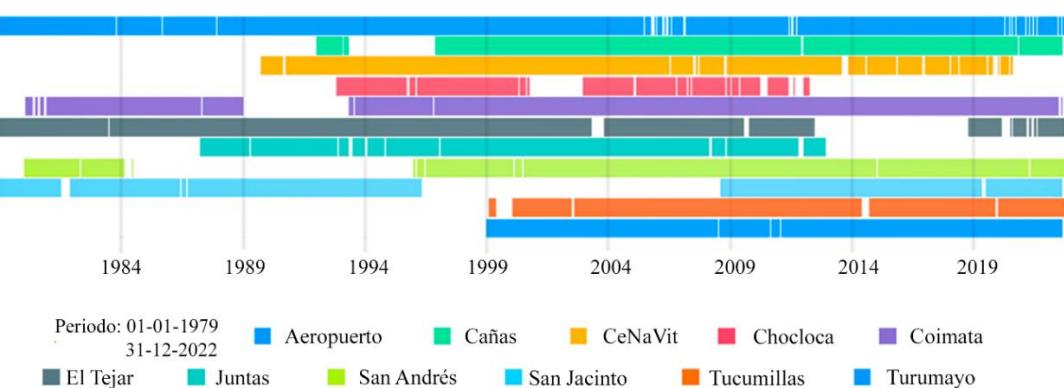


Figura 15: Calendario de datos de temperatura máxima

Fuente: Elaboración propia

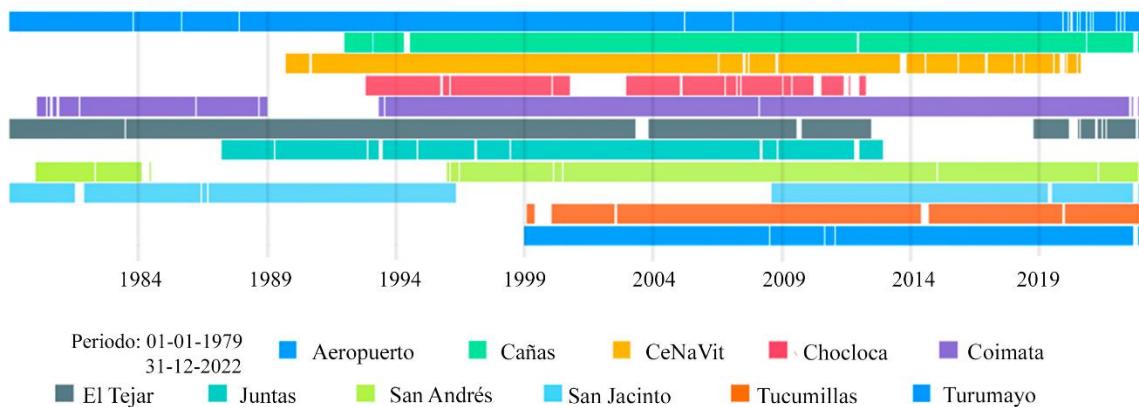


Figura 16: Calendario de datos de temperatura mínima

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Información hidrométrica

Es la información más importante en la aplicación del modelo, con ella se pretende calibrar y validar el mismo. Estos fueron obtenidos de la serie de datos del SENAMHI para la estación San Jacinto, el periodo de información de caudales medidos a nivel diario por la institución y para uso en la ejecución de la calibración y validación del modelo inicia el 01/01/1979 hasta el 31/01/1984.

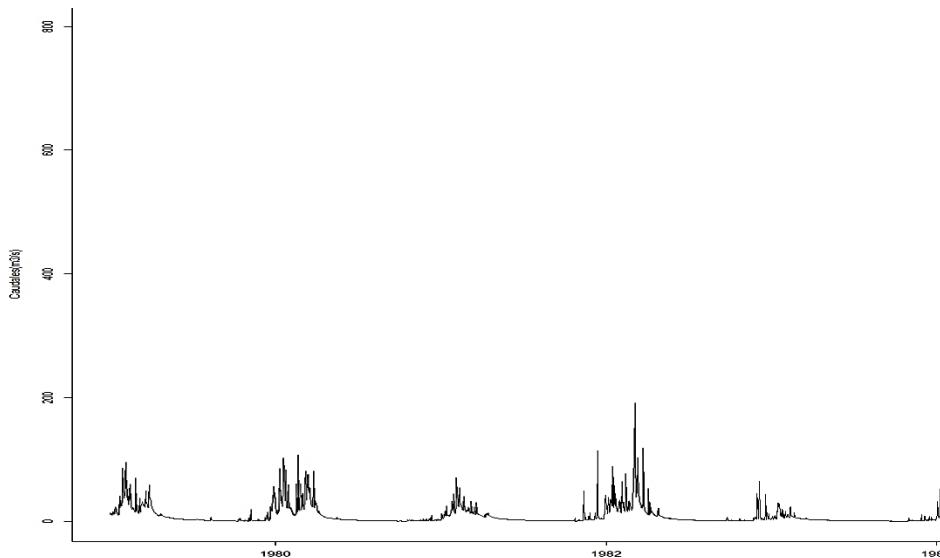


Figura 17: Hidrograma de Caudales diarios de la estación San Jacinto

Fuente: Elaboración propia

Dado a que el único registro continuo de caudales a nivel diario en mayor extensión de la cuenca del río Tolomosa es de 1851 días, lo cual es fundamental para la

calibración y validación del modelo hidrológico HydroBID, que requiere información a escala diaria para una simulación más realista del comportamiento hidrológico en la cuenca. Estos procesos generalmente requieren series continuas y confiables más robustas a la serie de años con los que se cuenta para este trabajo, que no son limitantes pues es el único registro de serie de caudales diarios medidos.

Sin embargo, el PMSJ en su labor institucional a gestiones anteriores trabajaba con una serie de caudales medios mensuales generados para el periodo 1979 a 2015 por la Compañía Boliviana de Energía Eléctrica (COBEE S.A.), estos valores podrían constituirse como un complemento crítico para reforzar el proceso de calibración y validación de los datos medidos en HydroBID, y así extender el análisis del modelo. La representación de estos valores se encuentran el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en la Figura 18.

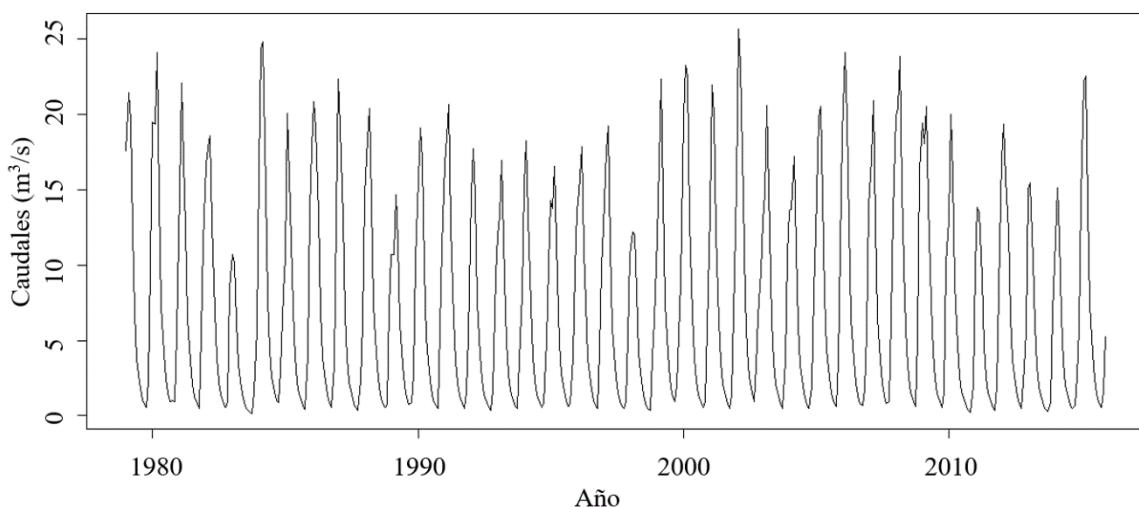


Figura 18: Hidrograma de caudales medios mensuales para la cuenca del embalse San Jacinto, elaborado por COBEE S.A.

Fuente: Elaboración propia

3.5. Análisis exploratorio de datos

Según Salvador Figueras y Gargallo (2003), el análisis exploratorio de datos (AED) es un conjunto de técnicas estadísticas cuya finalidad es organizar y preparar los datos, detectar fallos en el diseño y recogida de los mismos, tratamiento y evaluación de datos ausentes, identificación de casos atípicos y comprobación de los supuestos subyacentes en la mayor parte de las técnicas multivariantes (normalidad, linealidad, homocedasticidad).

3.5.1. Series de tiempos

3.5.1.1. Precipitación

Para selección de las estaciones pluviométricas a ser aplicadas en el modelo para la cuenca, estas deben ser revisadas y analizada en su porcentaje de datos disponibles, extensión y su consistencia.

A partir del periodo de estudio elegido cada una de las estaciones debe contar con un total de 16.071 datos de precipitación diaria registrada. En la Tabla 11 se presenta la información del número y porcentaje de datos registrados de cada estación.

Tabla 11: Disponibilidad de datos de precipitación por estación

Estación	% Completos	% Incompletos	Cant. Datos medidos	Cant. Datos incompletos
Aeropuerto	99,04	0,96	15.917	154
Calderillas	55,83	44,17	8.972	7.099
Cañas	95,74	4,26	15.386	685
Cenavit	69,80	30,20	11.217	4.854
Chocloca	67,78	32,22	10.893	5.178
Coimata	96,93	3,07	15.578	493
El Tejar	89,30	10,70	14.351	1.720
Juntas	96,72	3,28	15.544	527
Pinos Sud	97,15	2,85	15.613	458
San Andrés	99,34	0,66	15.965	106
San Jacinto	98,69	1,31	15.861	210
Tucumillas	99,50	0,50	15.991	80
Turumayo	54,10	45,90	8.694	7.377

Fuente: Elaboración propia

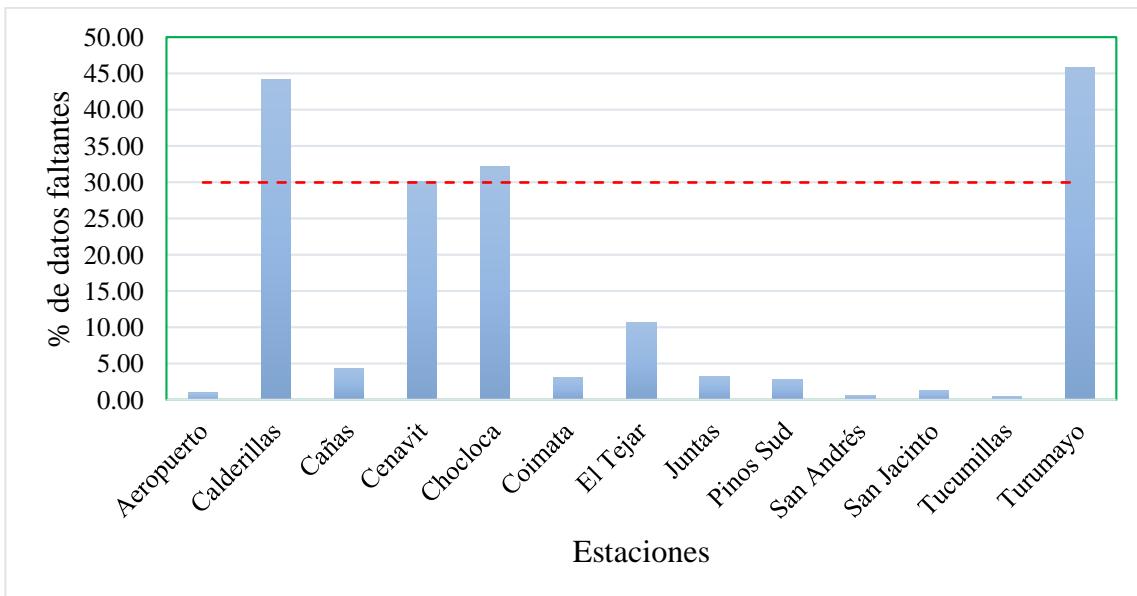


Figura 19: Porcentaje de datos faltantes de precipitación

Fuente: Elaboración propia

En el presente trabajo solo se emplearán la información de las estaciones con un porcentaje de datos faltantes menor al 30%, bajo este lineamiento las estaciones Calderillas, CeNaVit, Chocloca y Turumayo son desestimadas para su uso por contar con un porcentaje de datos faltantes mayor al 30% como se puede observar en la Tabla 11 y Figura 19.

3.5.1.2.Temperatura

Para la modelación hidrología en HydroBID no solo es necesario la información de precipitación, sino también la de temperatura. Por ende, cada una de las 11 estaciones seleccionadas deberá contar con 16.071 datos registrados, para el periodo de estudio. En la Tabla 12 se presenta la información del número y porcentaje de datos registrados de cada estación, para la variable de temperatura máxima. Y de igual manera la Tabla 13 para los registros de temperatura mínima

Tabla 12: Disponibilidad de datos de temperatura máxima por estación

Estación	% Completos	% Incompletos	Cant. Datos medidos	Cant. Datos incompletos
Aeropuerto	96,71	3,3	15.543	528
Cañas	61,48	38,5	9.881	6.190
CeNaVit	66,87	33,1	10.746	5.325
Chocloca	36,08	63,9	5.799	10.272
Coimata	86,17	13,8	13.849	2.222
El Tejar	82,38	17,6	13.239	2.832
Juntas	56,90	43,1	9.144	6.927
San Andrés	69,70	30,3	11.202	4.869
San Jacinto	70,08	29,9	11.263	4.808
Tucumillas	51,76	48,2	8.318	7.753
Turumayo	53,84	46,2	8.652	7.419

Fuente: Elaboración propia

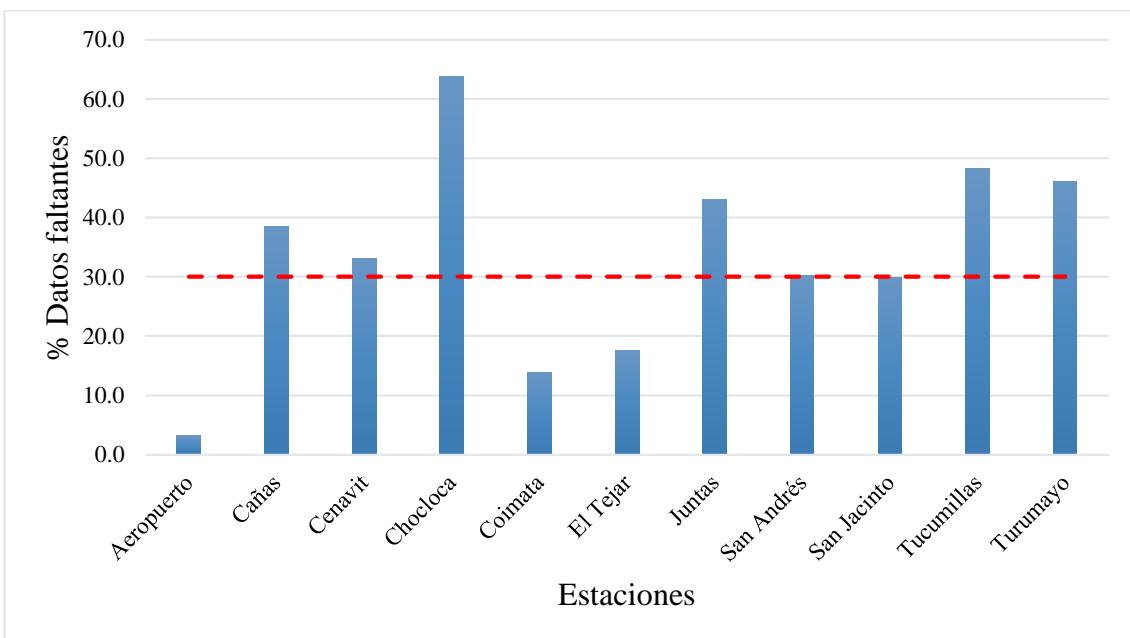


Figura 20: Porcentaje de datos faltantes de Temperatura máxima

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13: Disponibilidad de datos de temperatura mínima por estación

Estación	% Completos	% Incompletos	Cant. Datos medidos	Cant. Datos incompletos
Aeropuerto	98,10	1,9	15766	305
Cañas	69,04	31,0	11095	4976
CeNaVit	66,88	33,1	10749	5322
Chocloca	36,14	63,9	5808	10263
Coimata	86,06	13,9	13831	2240
El Tejar	82,41	17,6	13244	2827
Juntas	57,07	42,9	9172	6899
San Andrés	69,93	30,1	11238	4833
San Jacinto	70,07	29,9	11261	4810
Tucumillas	51,76	48,2	8319	7752
Turumayo	53,86	46,1	8656	7415

Fuente: Elaboración propia

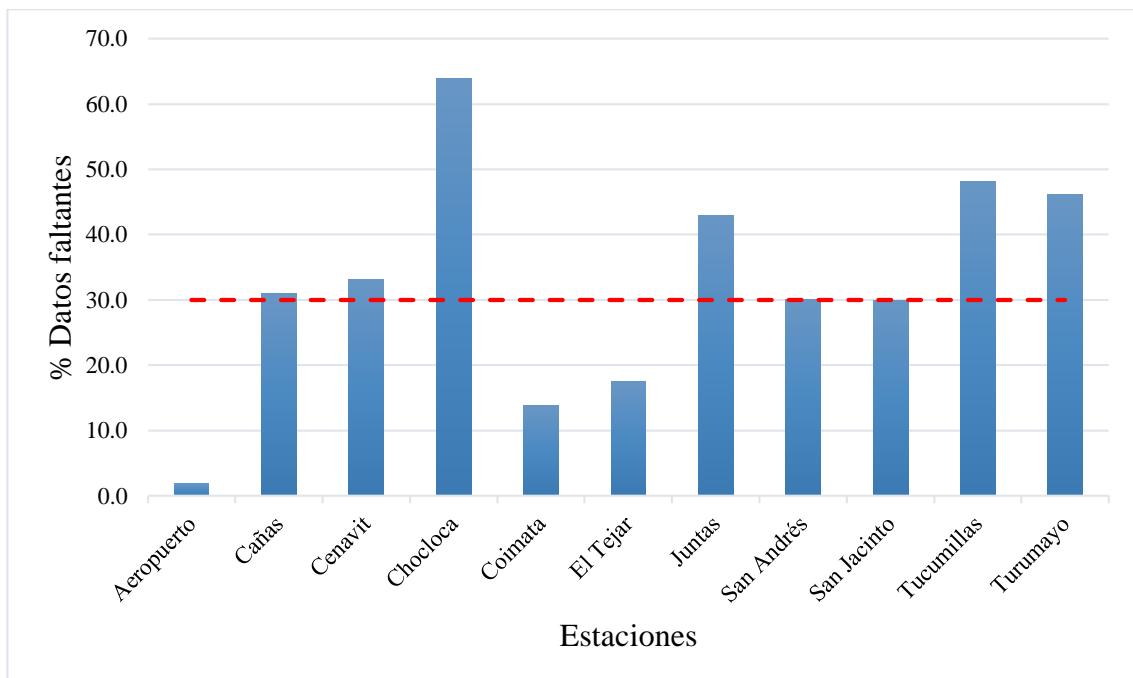


Figura 21: Porcentaje de datos faltantes de Temperatura mínima

Fuente: Elaboración propia

Del total de la información base de temperatura de las estaciones, se obtiene que la mayoría de las estaciones presentan datos faltantes superiores al 30%, por ejemplo, la estación Chocloca presenta el mayor porcentaje de datos faltantes con 10.263 datos sin registro. Sin embargo, a diferencia de la precipitación, la temperatura es una variable más uniforme espacialmente, depende de factores locales de la zona de estudio, de la altura sobre el nivel del mar respecto a su ubicación, esta última influenciada por el gradiente de temperatura presente en la troposfera que disminuye la temperatura en 0,6°C por cada 100 m de ascenso.

3.5.1.3. Estaciones seleccionadas

Previamente filtradas las estaciones ubicadas dentro y fuera de la cuenca en función al porcentaje de datos faltantes, se procedió a analizar la incidencia e influencia de las estaciones en factores como: cercanía geográfica a la cuenca, porcentaje de datos registrados, semejanza entre estaciones, influencia espacial sobre el área de la cuenca, semejanza de elevación con referencia a la cuenca, entre otros factores relevantes.

Así mismo, con las nueve estaciones seleccionadas, se realizó la interpolación por medio de los polígonos de Thiessen y así determinar la influencia de las estaciones sobre el área de estudio de la cuenca, como una medida para el análisis y decisión final en la selección de las estaciones a ser aplicadas para el presente trabajo.

En la Tabla 14 se puede identificar los el área de influencia de cada estación sobre la cuenca el río Tolomosa, referidas a la Figura 22.

Tabla 14: Influencia de las estaciones sobre el área de la cuenca

Número	Estación	Área de influencia (km ²)	Porcentaje de influencia (%)
1	Pinos Sud	202,42	43,29
2	San Andres	188,30	40,27
3	San Jacinto	55,72	11,92
4	El Tejar	14,22	3,04
5	Coimata	5,53	1,18
6	Juntas	0,98	0,21
7	Cañas	0,33	0,07
8	Aeropuerto	0,06	0,01
9	Tucumillas	0,00	0,00
Total		467,56	100,00

Fuente: Elaboración propia

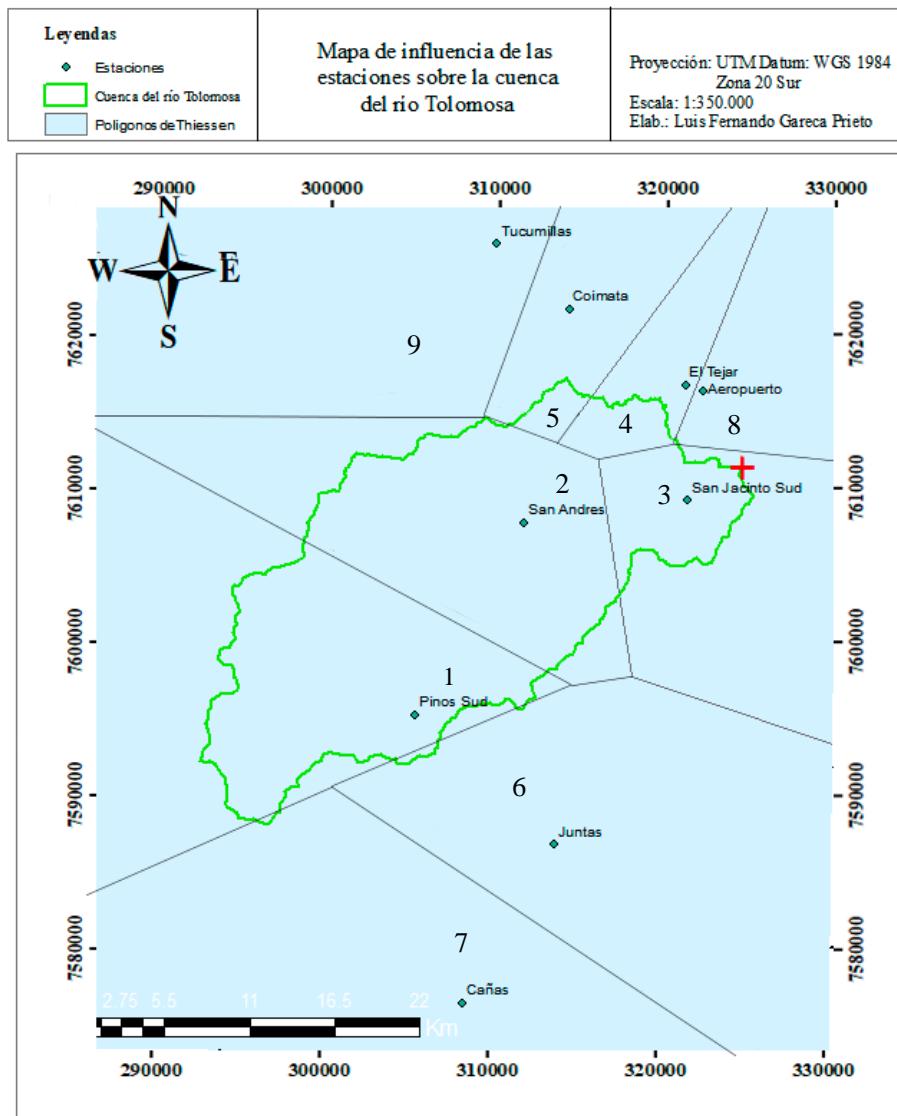


Figura 22: Polígonos de Thiessen de las estaciones

Fuente: Elaboración propia h

En la Figura 22, se puede observar 3 estaciones dentro y 6 fuera de la cuenca, así mismo para considerar si todas o algunas serán de uso en el presente trabajo, se realiza el siguiente análisis:

- Estaciones Pinos Sud, San Andres y San Jacinto; por contener la mayor influencia e incidencia al encontrarse dentro del área de la cuenca y contener un registro de datos que alcanza el 97,15 %, 99,34 % y 98,69 % respectivamente.
- Estaciones El Tejar, Coimata, Juntas y Cañas; si bien son estaciones que se encuentran fuera de la cuenca, presentan un mayor porcentaje de influencia

en la interpolación por medio de los polígonos de Thiessen igual a 3,04 %, 1,18 %, 0,21 % y 0,07 % respectivamente de grado de influencia de las estaciones fuera de la cuenca. Así mismo, por presentar un registro de precipitación y temperatura similar a las estaciones cercanas dentro del área de la cuenca, por su semejanza en altitud y por el porcentaje en su registro de datos se las considera para ser utilizadas en el presente trabajo.

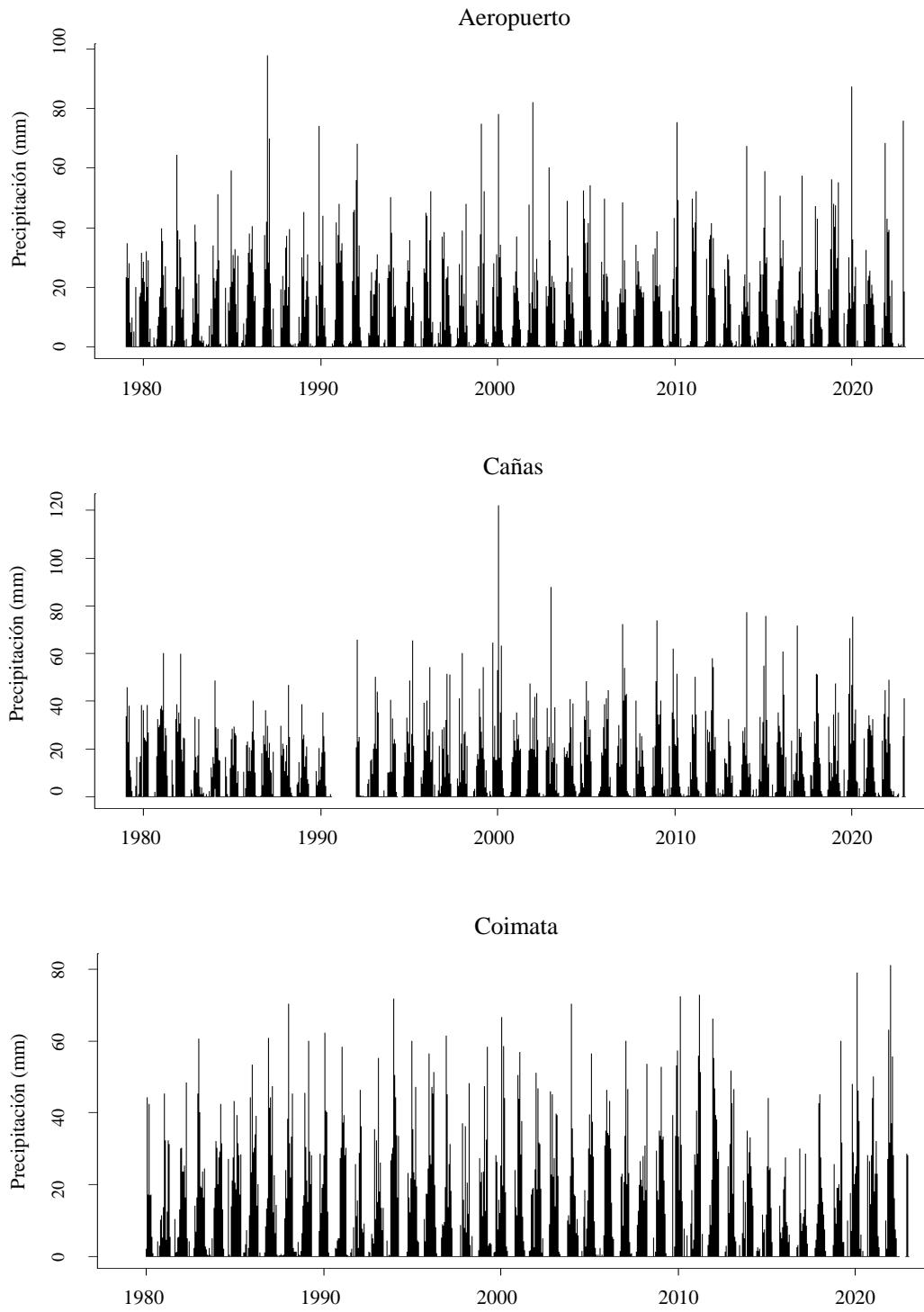
- Estación Aeropuerto; si bien su porcentaje de influencia sobre la cuenca es bajo (0,01%) al estar muy próxima a la estación El Tejar, se considera a ser utilizada por ser una de las estaciones con mayor registro de datos igual al 99,04 % y tener mayor semejanza a la estación el Tejar, estar próxima a los límites de la cuenca y tener semejanza en altitud a la cuenca.
- Estación Tucumillas; si bien su porcentaje de influencia sobre la cuenca es prácticamente nulo, se la considera para ser utilizada por ser una de las estaciones con mayor registro de datos igual al 99,50 %, tener una semejanza altitudinal a la zona alta de la cuenca, ser próxima a la estación Coimata, por lo que se estima tenga mayor grado de correlación con la misma para el procedimiento de relleno de datos y por ser cercana a los límites del área de la cuenca.

Por lo anteriormente expuesto, se definen las nueve estaciones seleccionadas en la Tabla 14 para ser utilizadas en HydroBID, previo análisis de datos y relleno de los datos faltantes.

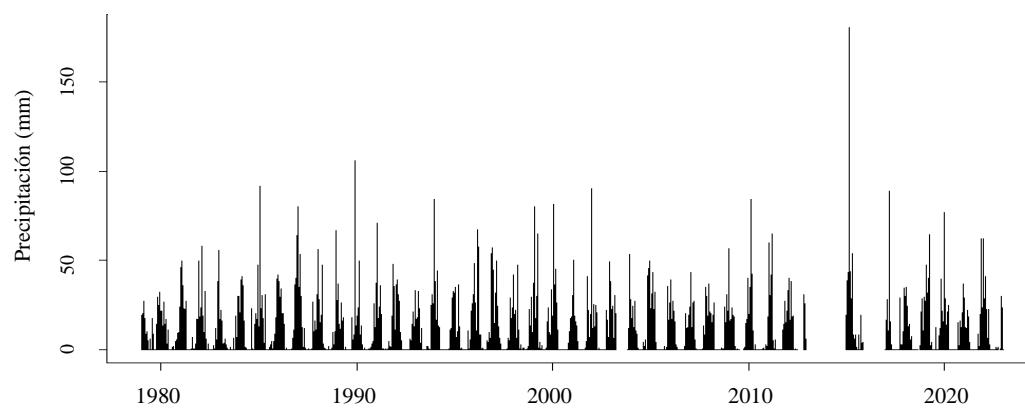
3.5.2. Hidrogramas

3.5.2.1. Precipitación

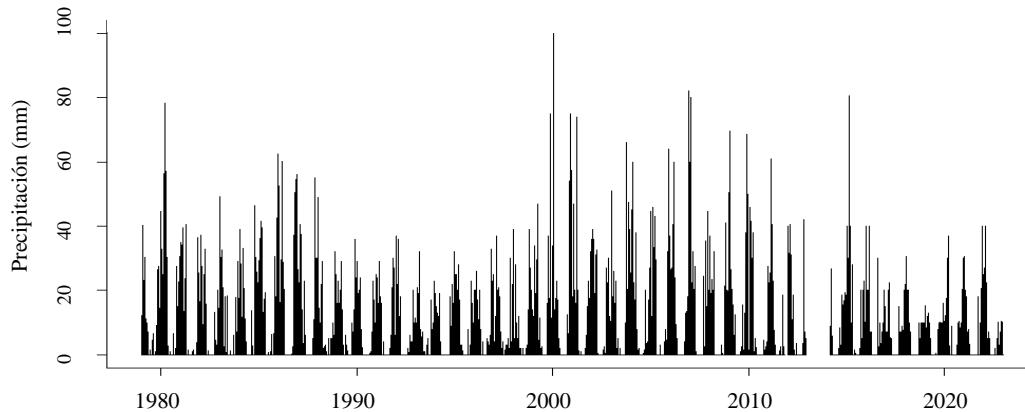
En la Figura 23 se presentan los hidrogramas de precipitación diaria para cada estación como objetivo de un reconocimiento preliminar de las irregularidades en la distribución de la data para la zona de estudio, analizar de manera visual la presencia o sospecha de valores atípicos o asociados a eventos extremos en su distribución. En consecuencia, las estaciones muestran un comportamiento regular, con la presencia de saltos que sobresalen ante la magnitud de las series en las estaciones Cañas, EL Tejar, Juntas y Pinos Sud, valores sobresalientes que podrían considerarse atípicos que serán evaluados más adelante.



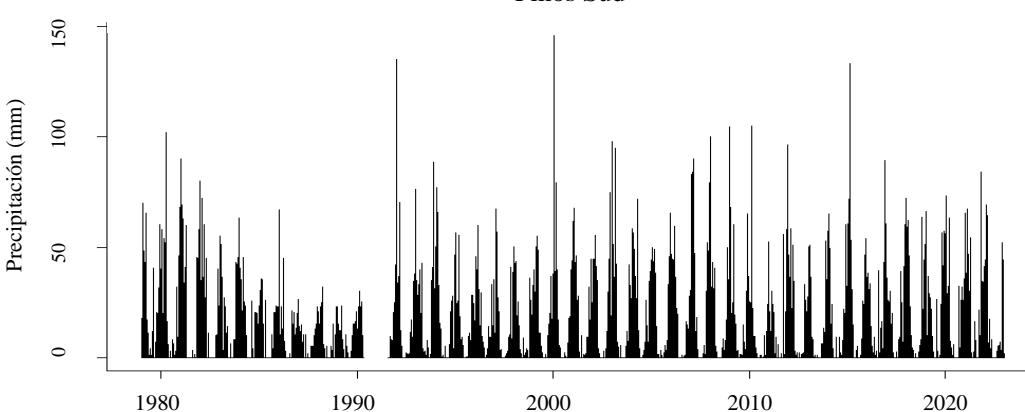
El Tejar



Juntas



Pinos Sud



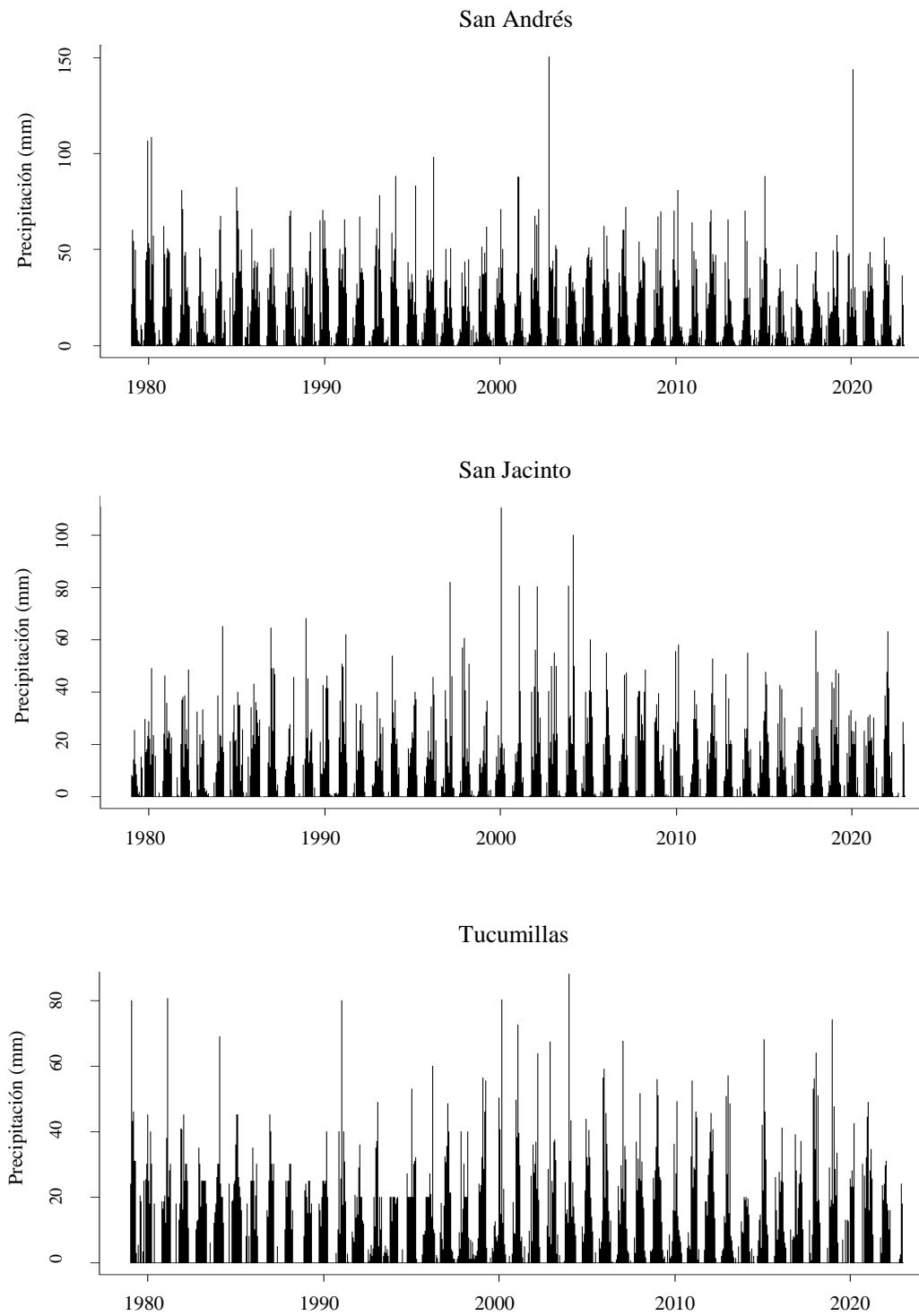
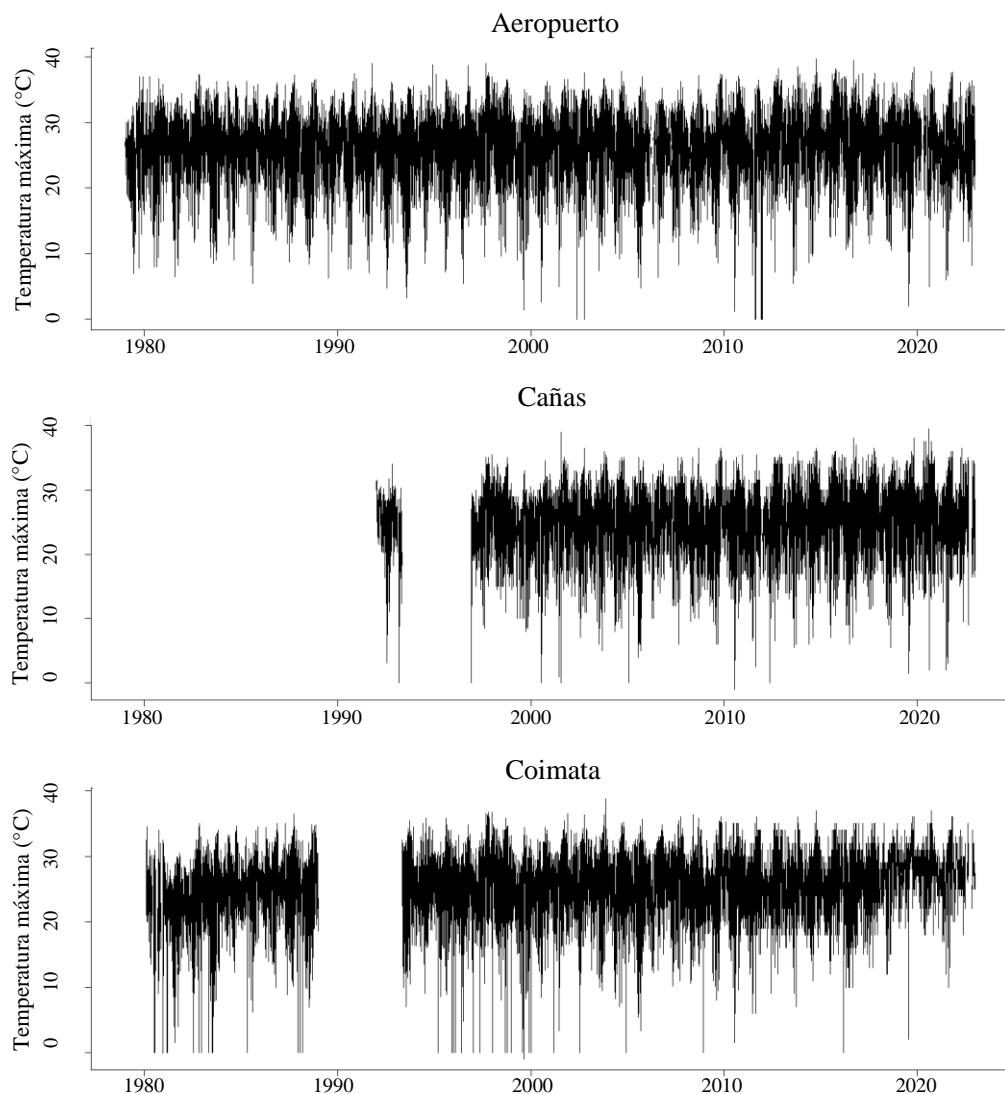


Figura 23: Hidrogramas de precipitación para cada estación

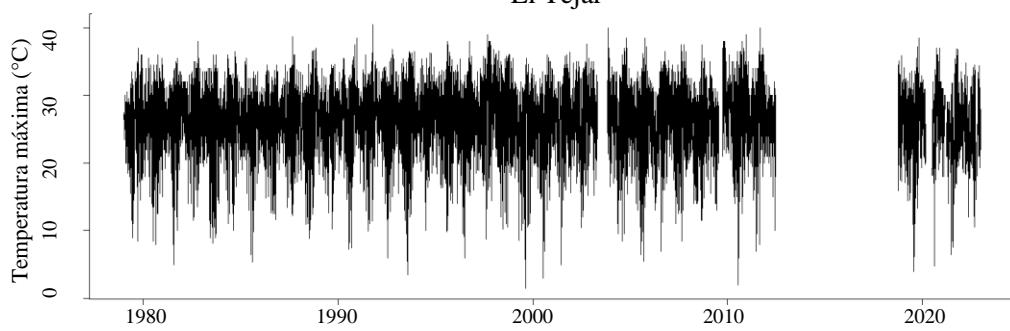
Fuente: Elaboración propia en Rstudio

3.5.2.2. Temperatura máxima

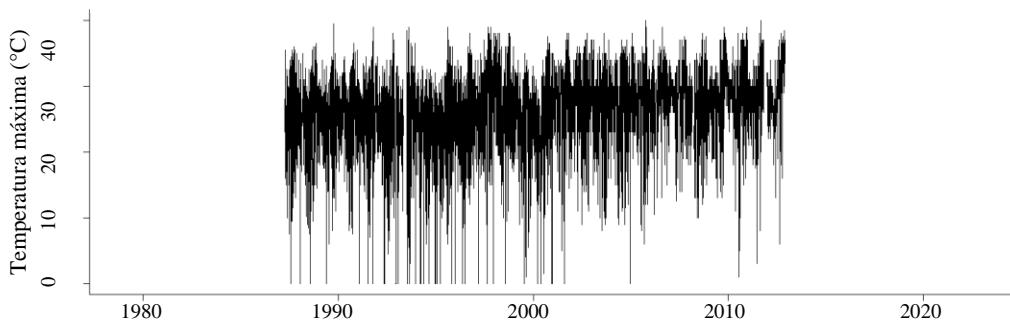
Al igual que en la precipitación, en la Figura 24 se presentan los hidrogramas de temperatura máxima a nivel diario para cada estación como objetivo de un reconocimiento preliminar de las irregularidades en la distribución de la data para la zona de estudio, analizar de manera visual la presencia o sospecha de valores atípicos o asociados a eventos extremos en su distribución. En consecuencia, las estaciones muestran un comportamiento bastante regular en su distribución para los tiempos con registros. Sin embargo, se observa la presencia de saltos que sobresalen ante la magnitud de las series en todas las estaciones, se presentan valores muy bajos sobresalientes, como en la estación Coimata o Juntas, que podrían considerarse atípicos y que serán evaluados más adelante.



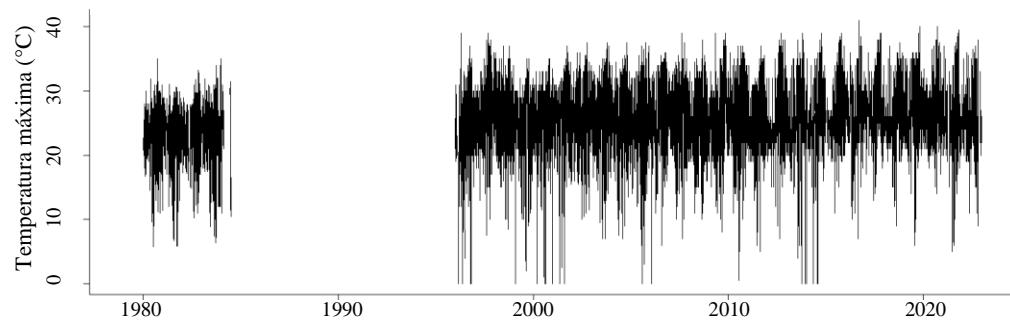
El Tejar



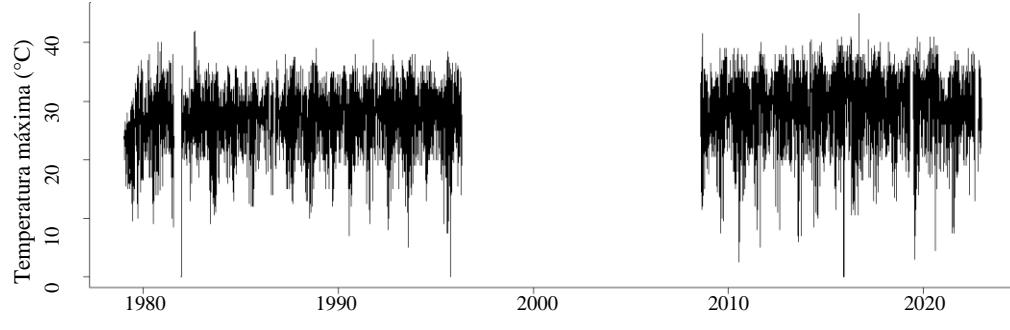
Juntas



San Andrés



Coimata



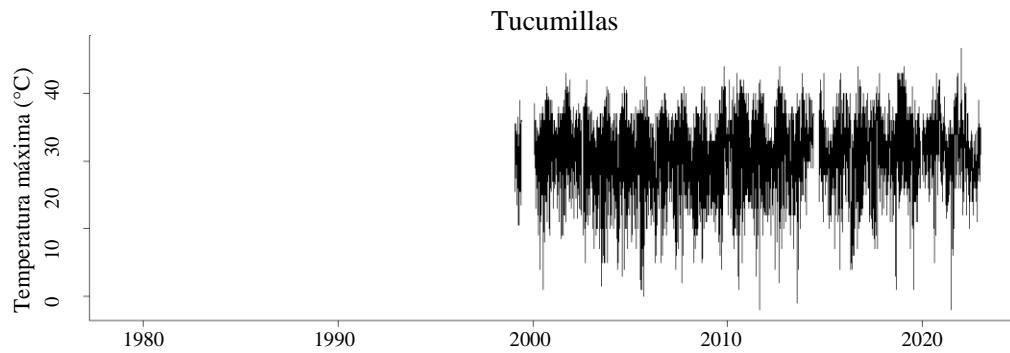
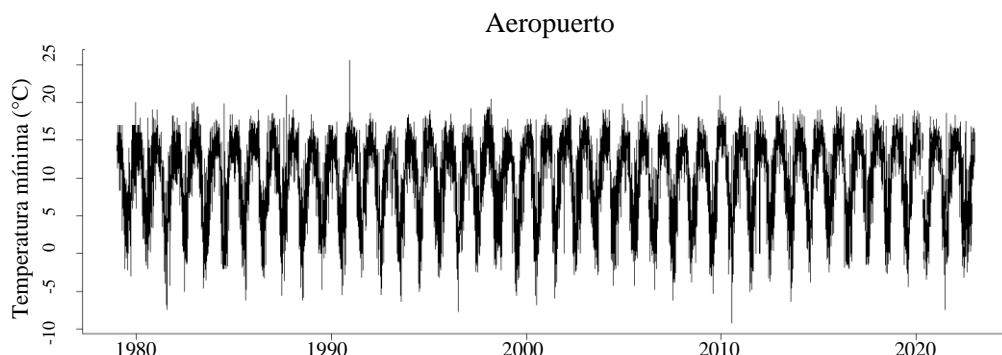


Figura 24: Hidrogramas de temperatura máxima para cada estación

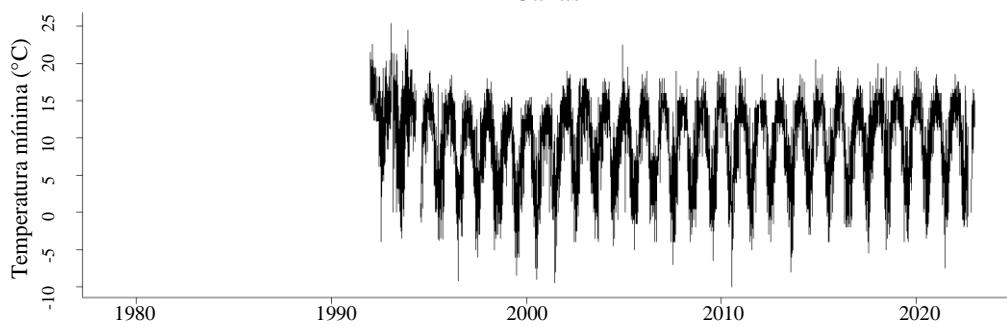
Fuente: elaboración propia en Rstudio

3.5.2.3. Temperatura mínima

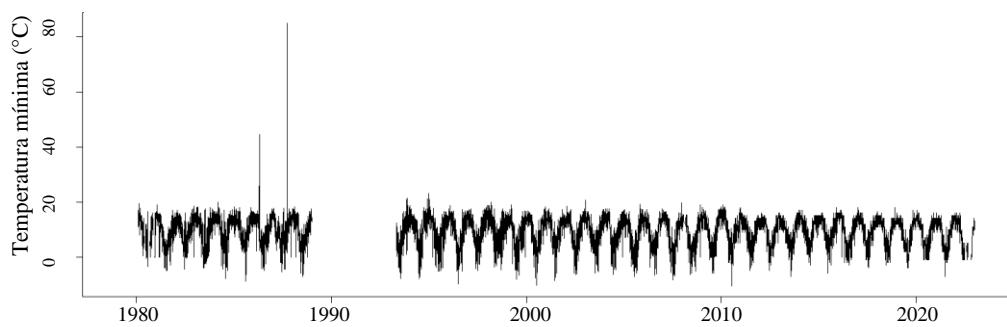
Igual al caso de la temperatura máxima, en la Figura 25 se presentan los hidrogramas para la temperatura mínima a nivel diario para cada estación como objetivo de un reconocimiento preliminar de las irregularidades en la distribución de la data para la zona de estudio, analizar de manera visual la presencia o sospecha de valores atípicos o asociados a eventos extremos en su distribución. En consecuencia, las estaciones muestran un comportamiento bastante regular en su distribución para los tiempos con registros. Sin embargo, se observa la presencia de saltos que sobresalen ante la magnitud de las series en la mayoría de las estaciones, se presentan valores muy altos y sobresalientes como el caso de las estaciones Coimata, Juntas y San Jacinto que podrían considerarse atípicos y que serán evaluados más adelante.



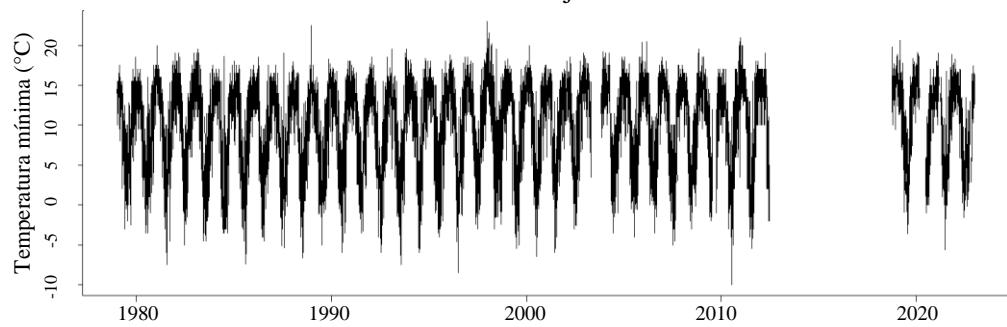
Cañas



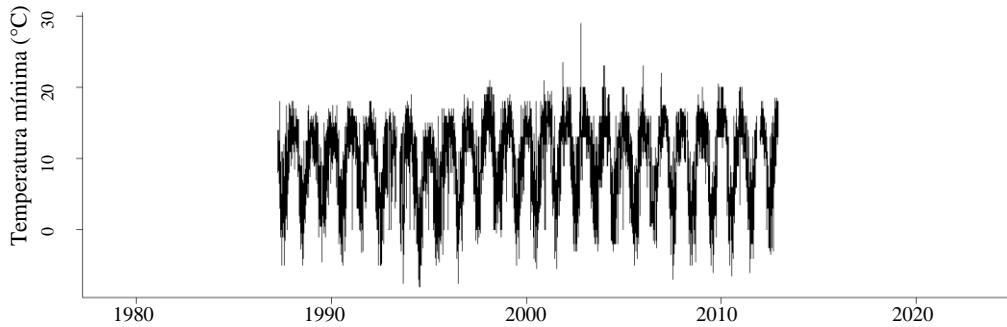
Coimata



El Tejar



Juntas



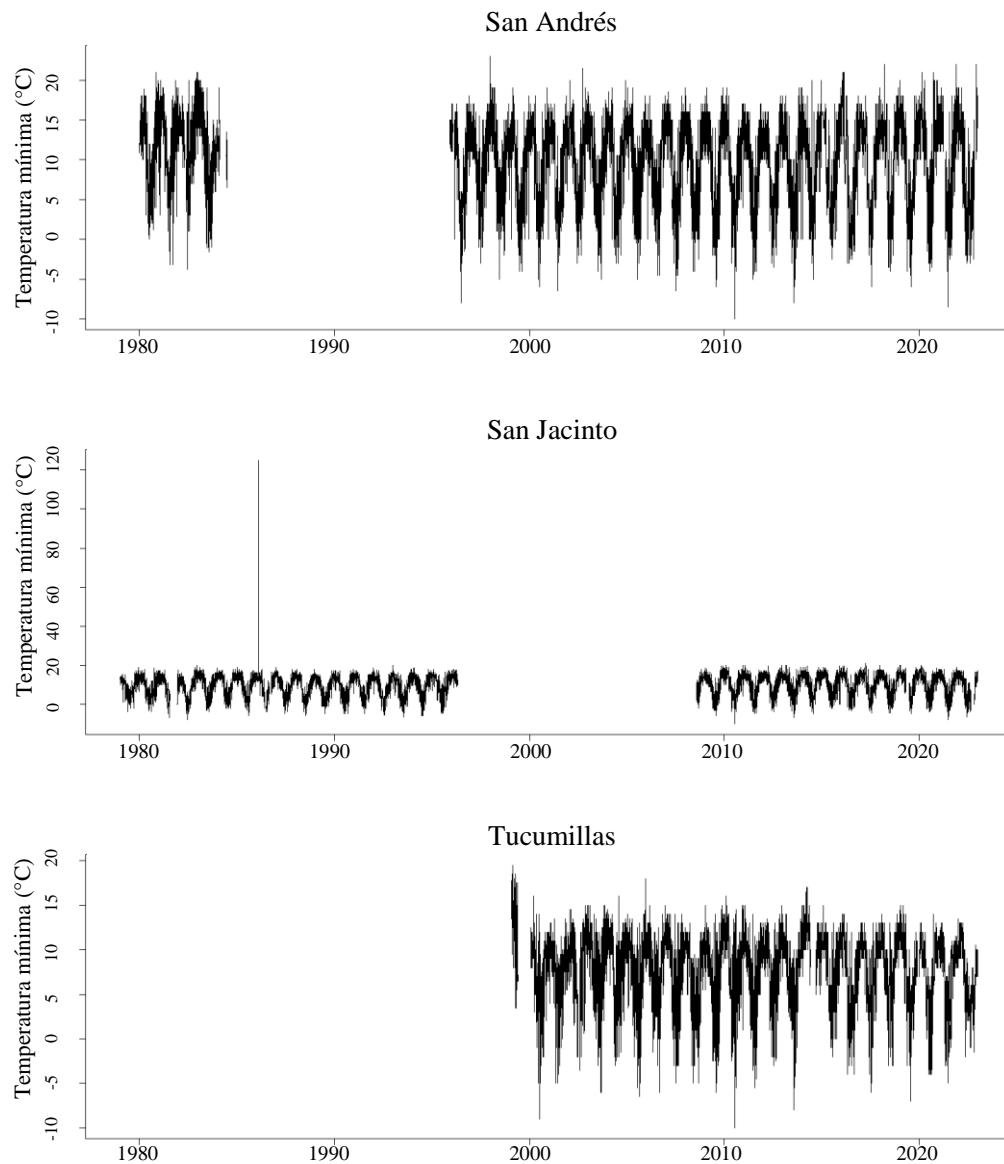


Figura 25: Hidrogramas de temperatura mínima para cada estación

Fuente: elaboración propia en Rstudio

3.5.3. Homogenización de la información climática

El registro de las series de datos meteorológicos observados, es de gran importancia por su uso y aplicación en el estudio de la variabilidad climática. No obstante, muchas de estas series se ven contaminadas a causa de eventos que difieren de la variabilidad, algunos de ellos son: errores en la toma de medidas o en su transmisión, cambios en el instrumental utilizado, en la ubicación, o en su entorno. Para Guijarro (2018), estas alteraciones de las series, son denominadas inhomogeneidades que enmascaran los

verdaderos cambios del clima y hacen que el estudio de las series conduzca a conclusiones erróneas en los trabajos.

Para la detección y análisis individualizado de los valores atípicos en la información original de las series registradas de precipitación y temperatura de las estaciones, se empleó el paquete Climatol 4.0 y su librería “homogen” disponible en R:

El paquete de R Climatol contiene funciones para el control de calidad, homogeneización y relleno de los datos faltantes en un conjunto de series de cualquier variable climática (Guíjarro, 2018). En nuestro caso en particular, aplicaremos la librería “homogen” para generar los reportes, y gráficas para su análisis y posterior depuración o disolución de posibles inhomogeneidades no asociadas a eventos extremos.

3.5.3.1.Prueba de la Homogeneidad Normal Estándar

La SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) o en español: Prueba de la homogeneidad normal estándar, es un método estadístico de monitoreo indirecto de la información climática. Es un test muy difundido y del cual se han desarrollado versiones para analizar cambios en la media, la varianza y la tendencia de la serie. Además, es un test aplicado a una gran variedad de variables.

- La hipótesis nula será la homogeneidad de la serie.
- El método trabaja con la serie normalizada.
- La SNHT considera como estadístico un valor $T(d)$ compara el promedio de los primeros d años registrados con los últimos $(n - d)$; este valor se obtiene con la expresión:

$$T_d = \frac{d\bar{z}_1 + (n-d)\bar{z}_2}{s} \text{ para } d = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

donde:

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d (y_i - \bar{y}) \quad \text{y} \quad \bar{z}_2 = \frac{1}{n-d} \sum_{i=d+1}^n (y_i - \bar{y}) \quad (3)$$

Un valor alto de T en un año d indica una variación “brusca”. El estadístico de prueba T_0 se define como:

$$T_0 = \max_{1 \leq d \leq 0} T(d) \quad (4)$$

Por consiguiente, hace una evaluación que parte el registro en un antes y después del punto de evaluación, es una verificación del comportamiento del valor en referencia a una medida de tendencia central que va movilizando el punto de evaluación a lo largo de todo el registro para poder establecer puntos en los cuales hay un cambio o diferencia relativa entre el valor y una medida de tendencia central. Este test va identificando puntos o quiebres en la tendencia natural de los registros y así poder detectar si hay alguna inconsistencia en términos de homogeneidad.

En la Figura 26 podemos ver los resultados de la prueba SNHT y sus valores para la serie de datos de precipitación, y en la Figura 27 para el caso de la temperatura máxima y mínima.

SNHT: Standard normal homogeneity test (on anomaly series)
Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.
16,2 20,6 22,0 45,0 32,8 204,4
RMSE: Root mean squared error of the estimated data
Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.
4,339 4,719 5,184 5,427 5,652 7,782
POD: Percentage of original data
Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.
89,00 96,00 97,00 96,44 99,00 99,00

Figura 26: Resultados de la prueba SNHT para las series de precipitaciones

Fuente: Reporte de homogen-Climatol disponible en Rstudio

SNHT – Temperatura máxima					
SNHT: Standard normal homogeneity test (on anomaly series)					
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
157,8	217,0	464,9	576,8	897,4	1161,8
RMSE: Root mean squared error of the estimated data					
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
1,861	2,594	2,892	2,879	3,184	4,142
POD: Percentage of original data					
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
51,00	59,75	69,50	71,38	83,00	96,00
SNHT – Temperatura mínima					
SNHT: Standard normal homogeneity test (on anomaly series)					
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
226,8	327,4	500,7	867,0	1065,0	2626,6
RMSE: Root mean squared error of the estimated data					
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
1,641	2,045	2,333	2,199	2,419	2,546
POD: Percentage of original data					
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
51,00	66,00	69,50	72,75	83,00	98,00

Figura 27: Resultados de la prueba SNHT para las series de temperatura máxima y mínima.

Fuente: Reporte de homogen-Climatol disponible en Rstudio

3.5.3.2. Control de la calidad de las series y anomalías en la precipitación

Para las series de datos de precipitación, en los reportes expuestos en el ¡Error!

No se encuentra el origen de la referencia.

después de la ejecución del paquete; no se presentaron valores atípicos que sobrepasen el valor del 3er cuartil en más cinco veces el rango intercuartil en las estaciones, por lo que se entiende que los mayores valores que se muestran en la Figura 26 representan eventos extremos.

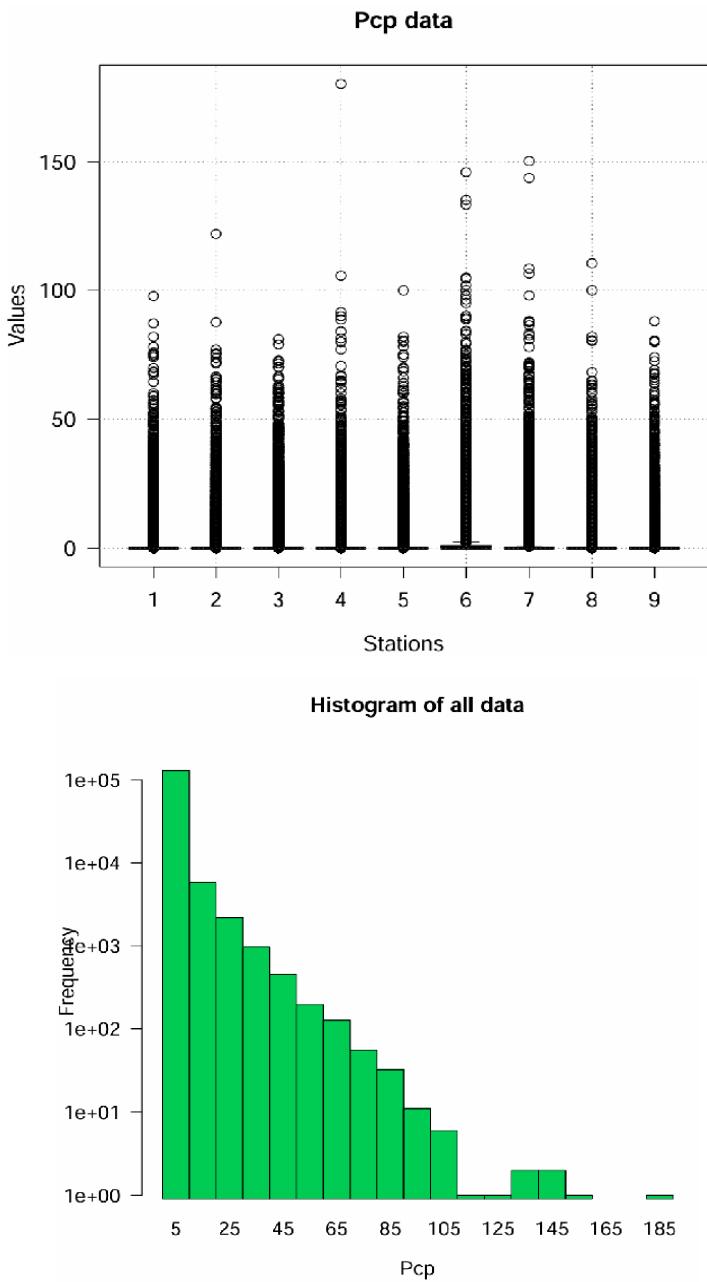


Figura 28: Graficas reportadas del análisis de series de precipitación en homogén

Fuente: Reporte de homogen-Climatol disponible en Rstudio

3.5.3.3. Control de la calidad de las series y anomalías en la temperatura

Para la temperatura máxima y mínima, los reportes gráficos y tabulares, mismos que se encuentran en los **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, lograron identificar valores atípicos mayores y menores asociados y no unos a otros, por lo que al aplicar la comparación se logró depurar la información no homogénea al comportamiento de la

serie de las estaciones en análisis. En la Tabla 15 se puede apreciar el reporte de datos observados y la sugerencia que realiza la librería de Climatol.

En el caso de temperatura máxima, la mayoría de las anomalías son valores iguales a 0°C, y en la temperatura mínima valores igual a 0°C en las fechas que coinciden con la T. máxima, y valores extremos como: 44,5 °C, 85°C (estación Coimata) y 125°C (estación San Jacinto), lo que nos hace entender un error sistemático en el almacenamiento de la información, algún ejemplo parcial de lo anterior se aprecia en la Tabla 15, el reporte completo se encuentra en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 15: Reporte parcial de registros anómalos de temperatura máxima y mínima

		Temperatura máxima		Temperatura mínima	
Estación	Fecha	Valor Observado	Sugerencia	Valor Observado	Sugerencia
Aeropuerto	06/12/1990	--	--	25.5	depurar
Aeropuerto	24/05/2002	0	depurar	0	depurar
Aeropuerto	16/08/2011	0	depurar	0	depurar
Aeropuerto	21/08/2011	0	depurar	0	depurar
Cañas	27/07/2001	0	depurar	0	depurar
Coimata	03/12/1980	0	depurar	0	depurar
Coimata	02/05/1983	0	depurar	0	depurar
Coimata	02/05/1985	0	depurar	--	--
Coimata	21/04/1986	--	--	44.5	depurar
Coimata	26/09/1987	--	--	85	depurar
San Jacinto	03/12/1981	0	depurar	0	depurar
San Jacinto	04/12/1981	0	depurar	0	depurar
San Jacinto	05/12/1981	0	depurar	0	depurar
San Jacinto	06/12/1981	0	depurar	0	depurar
San Jacinto	09/12/1981	0	depurar	0	depurar
San Jacinto	12/02/1986	--	--	125	depurar
San Jacinto	06/10/1995	0	depurar	0	depurar

Fuente: Adaptado del reporte de homogen-Climatool disponible en Rstudio

3.5.4. Análisis gráfico de la información filtrada

Después de depurar las anomalías en las series de datos originales, se realizó un nuevo análisis para las series de información climática de cada una de las estaciones utilizando el paquete HydroTSM disponible en R para la versión RStudio 2023.

HydroTSM es un paquete desarrollado para el modelado de series hidrológicas a nivel anual, mensual, diario y subdiario. Con el cual se puede analizar, manejar y plotear las series temporales de las distintas variables climáticas.

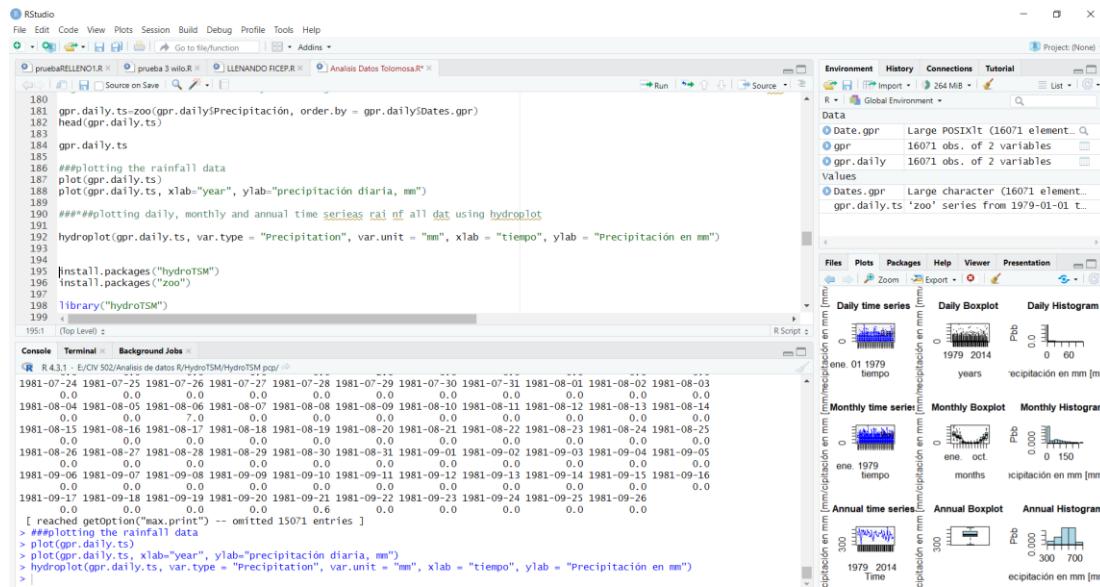


Figura 29: Captura de la ejecución del paquete HydroTSM

Fuente: Elaboración propia

Los reportes gráficos desde la Figura 30 a la Figura 38, resumen los hidrogramas, diagramas de cajas e histogramas mensuales para las series de datos de precipitación, temperatura máxima y mínima de las estaciones en estudio, en las cuales se observan la distribución de los datos y cuan cercano están a una distribución normal.

1. Estación Aeropuerto

La estación presenta una serie de precipitación con una tendencia creciente de los meses de septiembre a enero y decreciente de febrero a abril, y una disminución continua en los meses de mayo a agosto, entendiendo esta última como una época seca. La serie presenta un comportamiento regular sin registro de anomalías. La mediana de temperatura máxima oscila entre los 25 a 28 °C y para la temperatura mínima entre época húmeda entre 12 y 15 °C y en época seca entre los 2 a 5 °C.

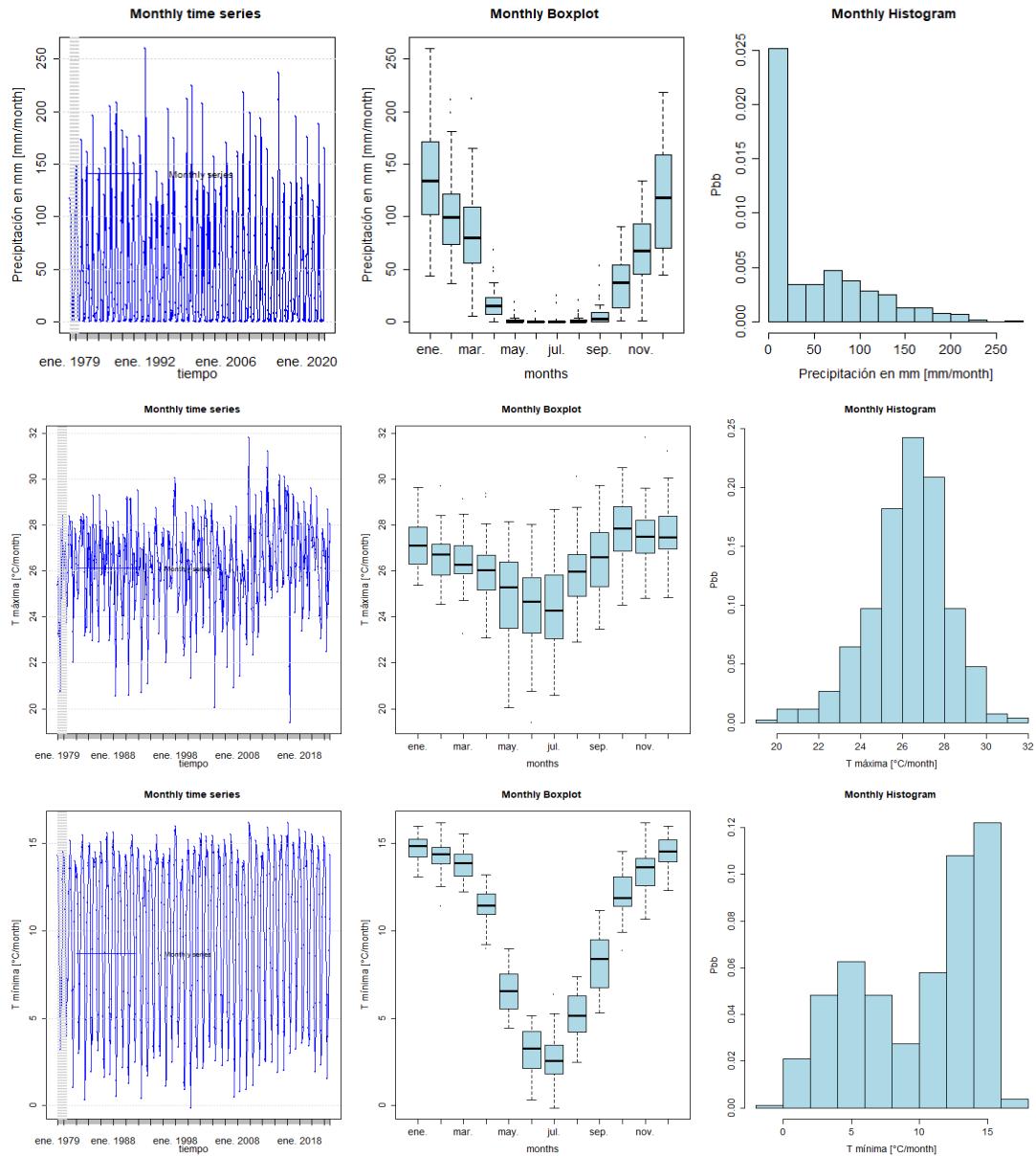


Figura 30: Series temporales de la estación Aeropuerto, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

Fuente: Adaptado de reportes gráficos de HydroTSM, disponible en R

2. Estación Cañas

Presenta una serie de precipitación con una tendencia creciente de los meses de octubre a enero y decreciente de febrero a marzo, y una disminución continua en los meses de mayo a agosto; época seca y una transición en el mes de abril y septiembre. La serie presenta un comportamiento regular sin registro de anomalías.

La mediana de temperatura máxima oscila entre los 25 a 26 °C y para la temperatura mínima entre época húmeda entre 12 y 15 °C y en época seca entre los 3 a 5 °C.

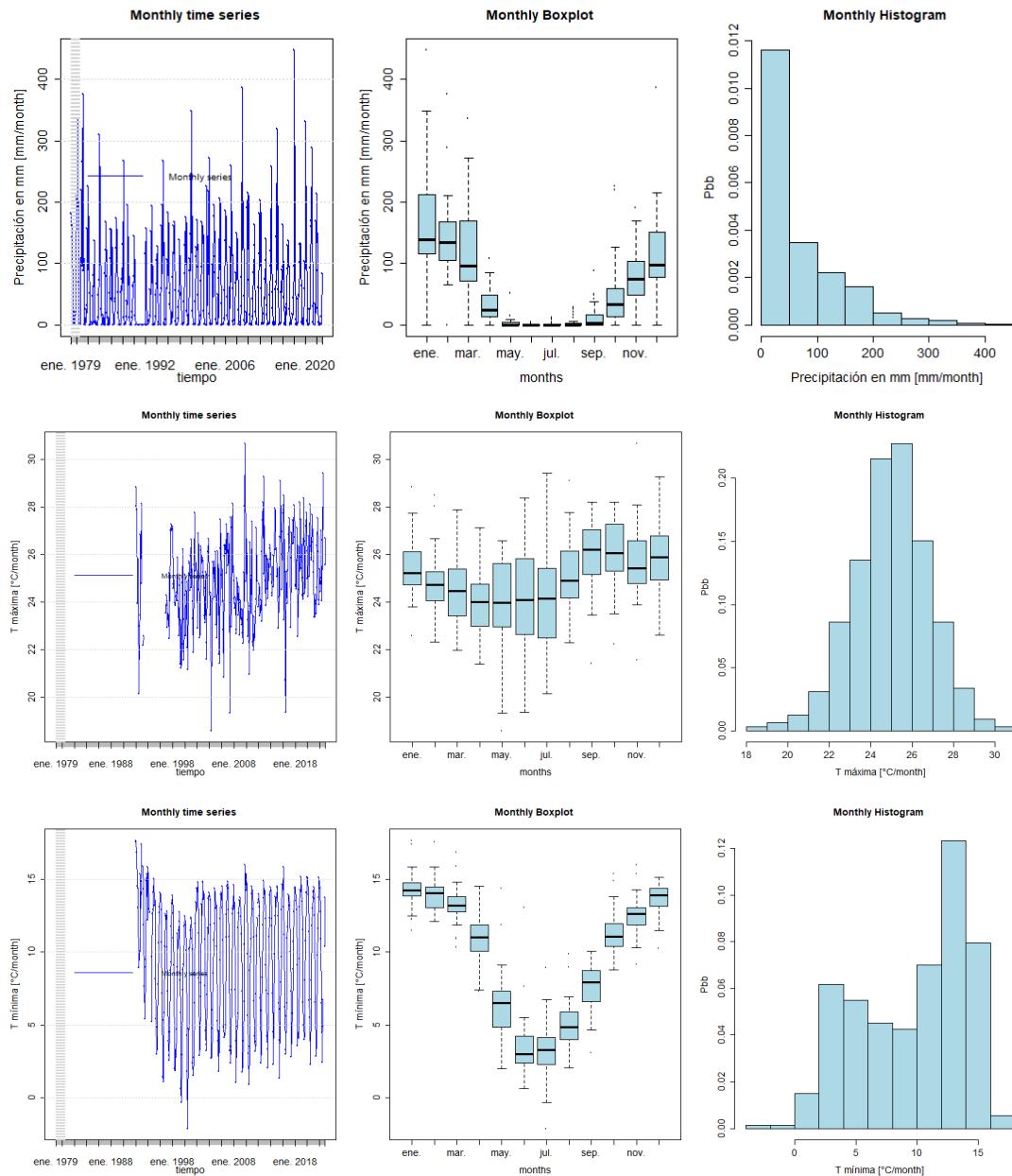


Figura 31: Series temporales de la estación Cañas, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

Fuente: Adaptado de reportes gráficos de HydroTSM, disponible en R

3. Estación Coimata

Presenta una serie de precipitación con una tendencia creciente de los meses de octubre a diciembre y decreciente de enero a marzo, y una disminución continua en

los meses de mayo a agosto; época seca y una transición en el mes de abril, mayo y septiembre. La serie presenta un comportamiento regular sin registro de anomalías.

La mediana de temperatura máxima oscila entre los 24 a 26 °C y para la temperatura mínima entre los 5 a 14 °C.

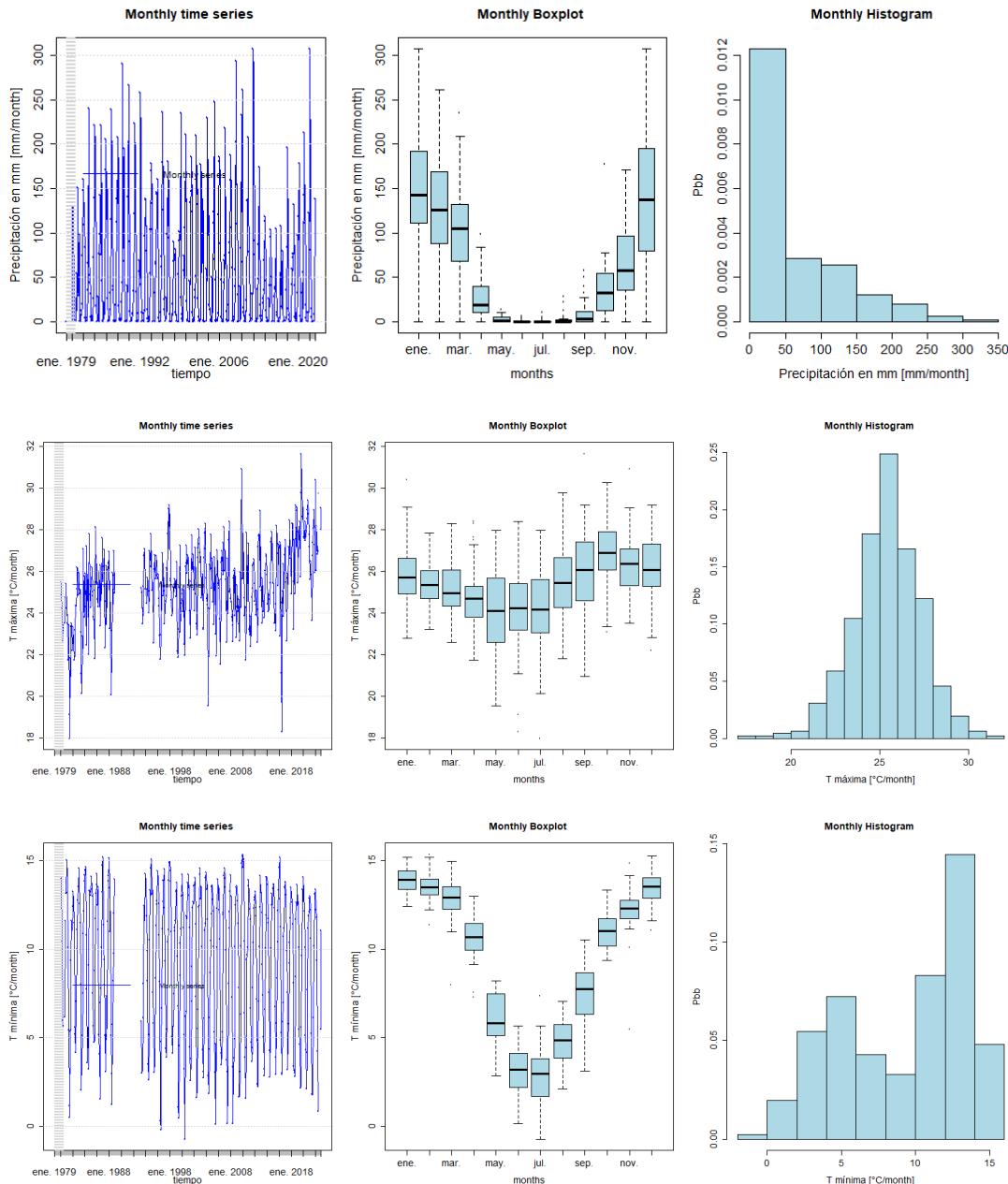


Figura 32: Series temporales de la estación Coimata, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

Fuente: Adaptado de reportes gráficos de HydroTSM, disponible en R

4. Estación Pinos Sud

Presenta una serie de precipitación con una tendencia creciente de los meses de noviembre a febrero y decreciente en marzo, y una disminución continua en los meses de mayo a agosto; época seca y una transición en el mes de abril y septiembre a octubre. La serie presenta un comportamiento regular sin registro de anomalías.

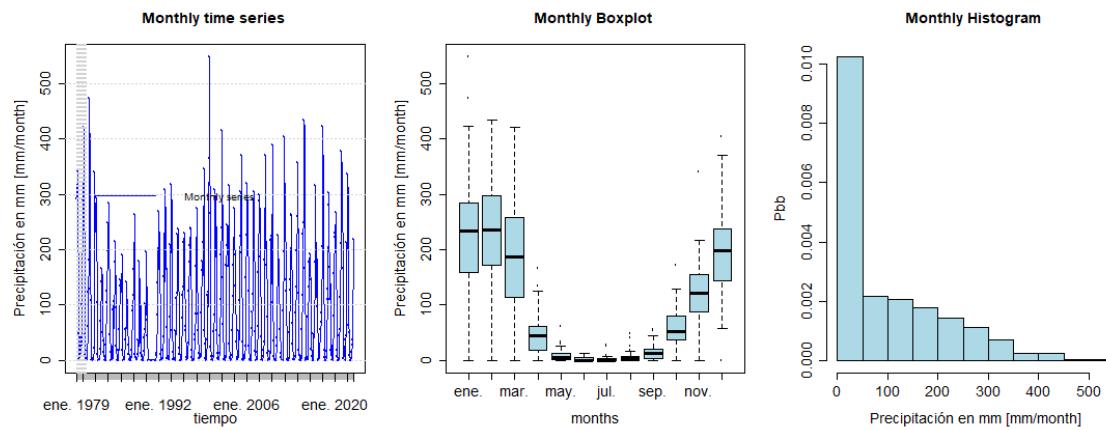


Figura 33: Series temporales de la estación Pinos Sud, a) Precipitación.

Fuente: Adaptado de reportes gráficos de HydroTSM, disponible en R

5. Estación El Tejar

Presenta una serie de precipitación con una tendencia creciente de los meses de octubre a enero y decreciente de febrero a marzo, y una disminución continua en los meses de mayo a agosto; época seca y una transición en el mes de abril y septiembre. La serie presenta un comportamiento regular sin registro de anomalías.

La mediana de temperatura máxima oscila entre los 26 a 28 °C y para la temperatura mínima entre los 4 a 15 °C.

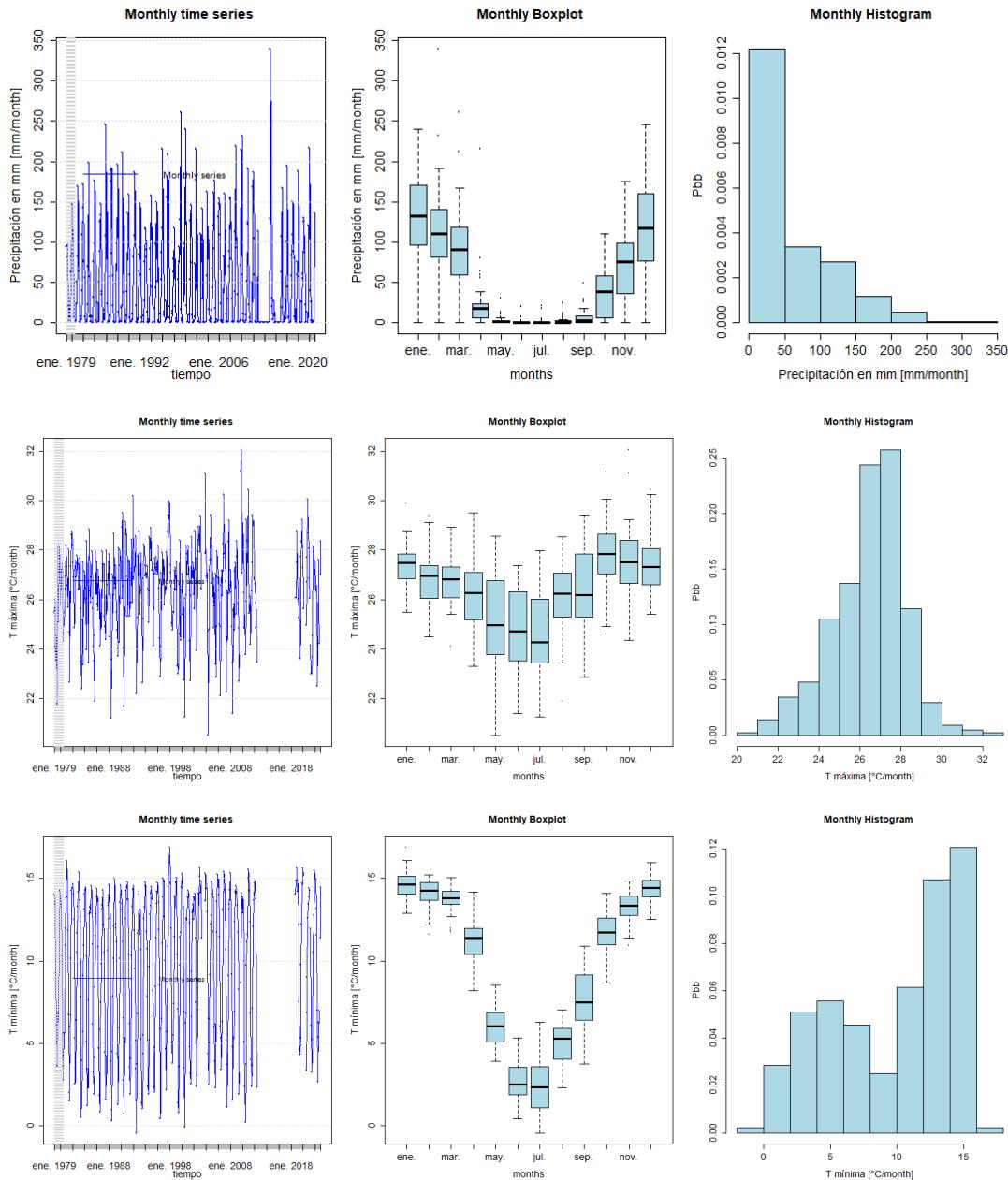


Figura 34: Series temporales de la estación El Tejar, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

Fuente: Adaptado de reportes gráficos de HydroTSM, disponible en R

6. Estación Juntas

Presenta una serie de precipitación con una tendencia creciente de los meses de octubre a enero y decreciente de febrero a marzo, y una disminución continua en los meses de mayo a agosto; época seca y una transición en el mes de abril y septiembre. La serie presenta un comportamiento regular sin registro de anomalías.

La mediana de temperatura máxima oscila entre los 26 a 28 °C y para la temperatura mínima entre los 5 a 14°C.

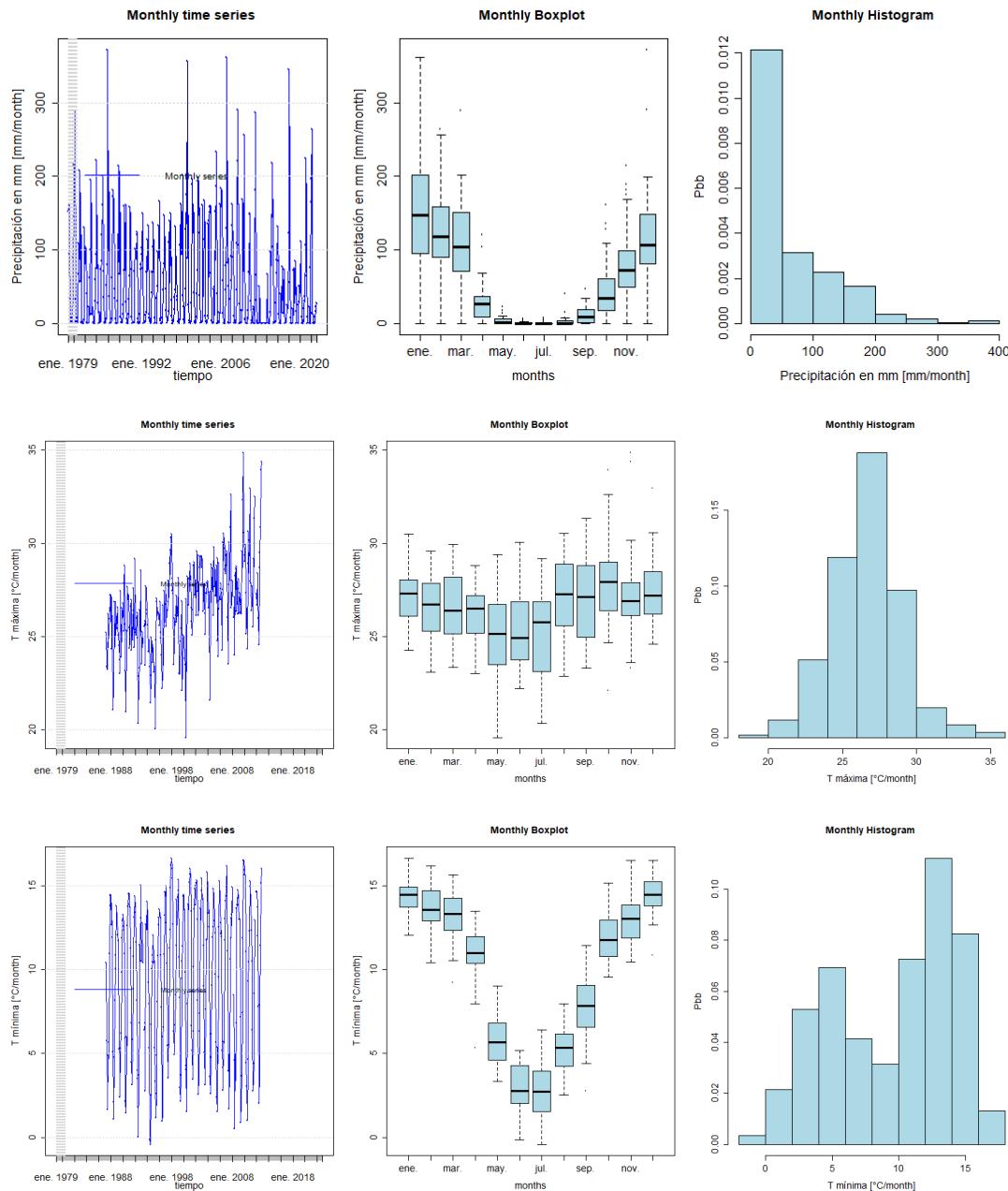


Figura 35: Series temporales de la estación Juntas, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

Fuente: Adaptado de reportes gráficos de HydroTSM, disponible en R

7. Estación San Andrés

Presenta una serie de precipitación con una tendencia creciente de los meses de noviembre a enero y decreciente de febrero a marzo, y una disminución continua en

los meses de mayo a agosto; época seca y una transición en el mes de abril y septiembre-octubre. La serie presenta un comportamiento regular sin registro de anomalías. La mediana de temperatura máxima oscila entre los 25 a 27 °C y para la temperatura mínima entre los 5 a 14°C.

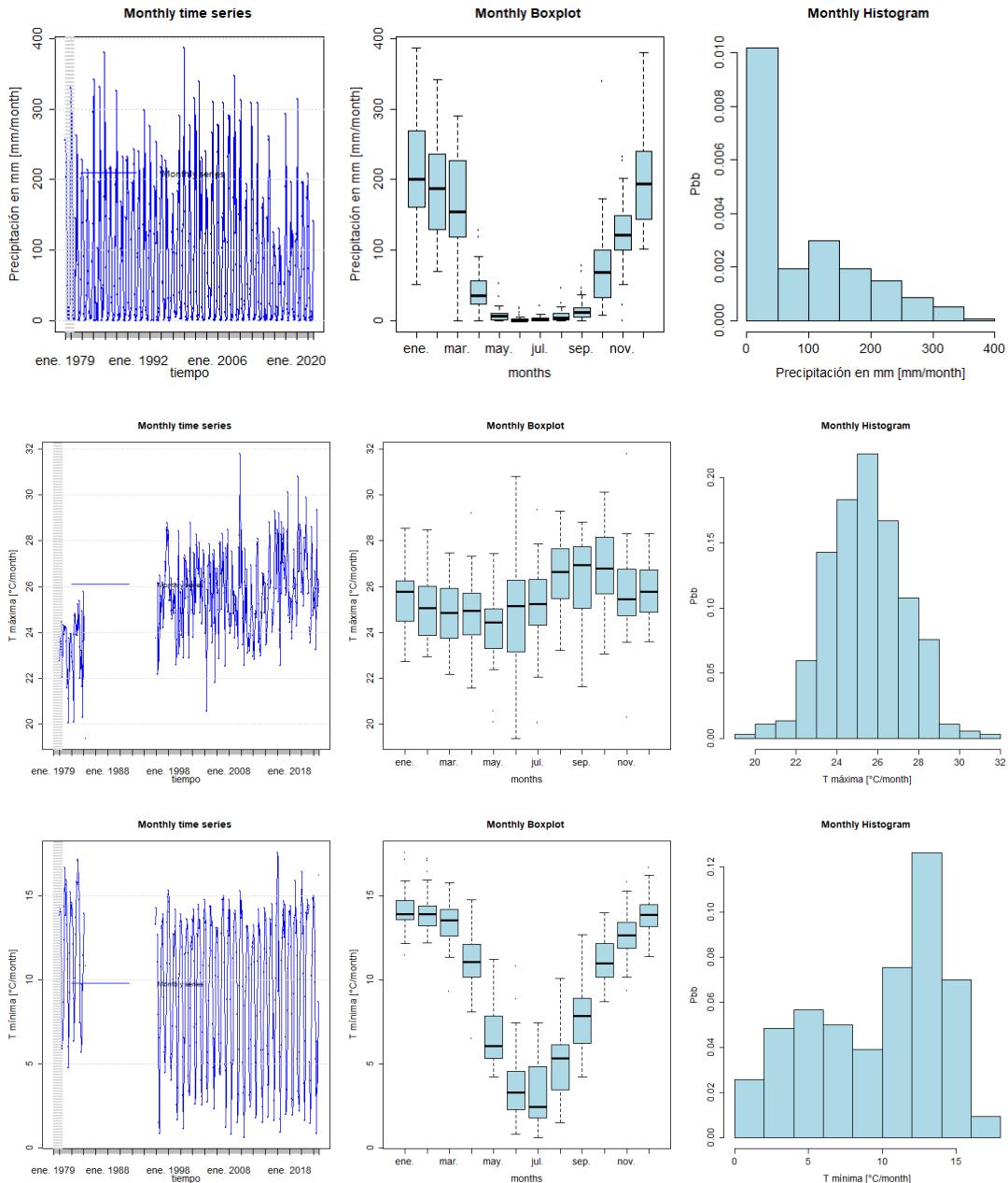


Figura 36: Series temporales de la estación San Andrés, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

Fuente: Adaptado de reportes gráficos de HydroTSM, disponible en R

8. Estación San Jacinto

Presenta una serie de precipitación con tendencia creciente en los meses de noviembre a enero y decreciente de febrero a marzo, una disminución continua en los meses de mayo a agosto; época seca y una transición en el mes de abril y septiembre-octubre. La serie presenta un comportamiento regular.

La mediana de temperatura máxima oscila entre los 26 a 29 °C y para la temperatura mínima entre los 5 a 14°C.

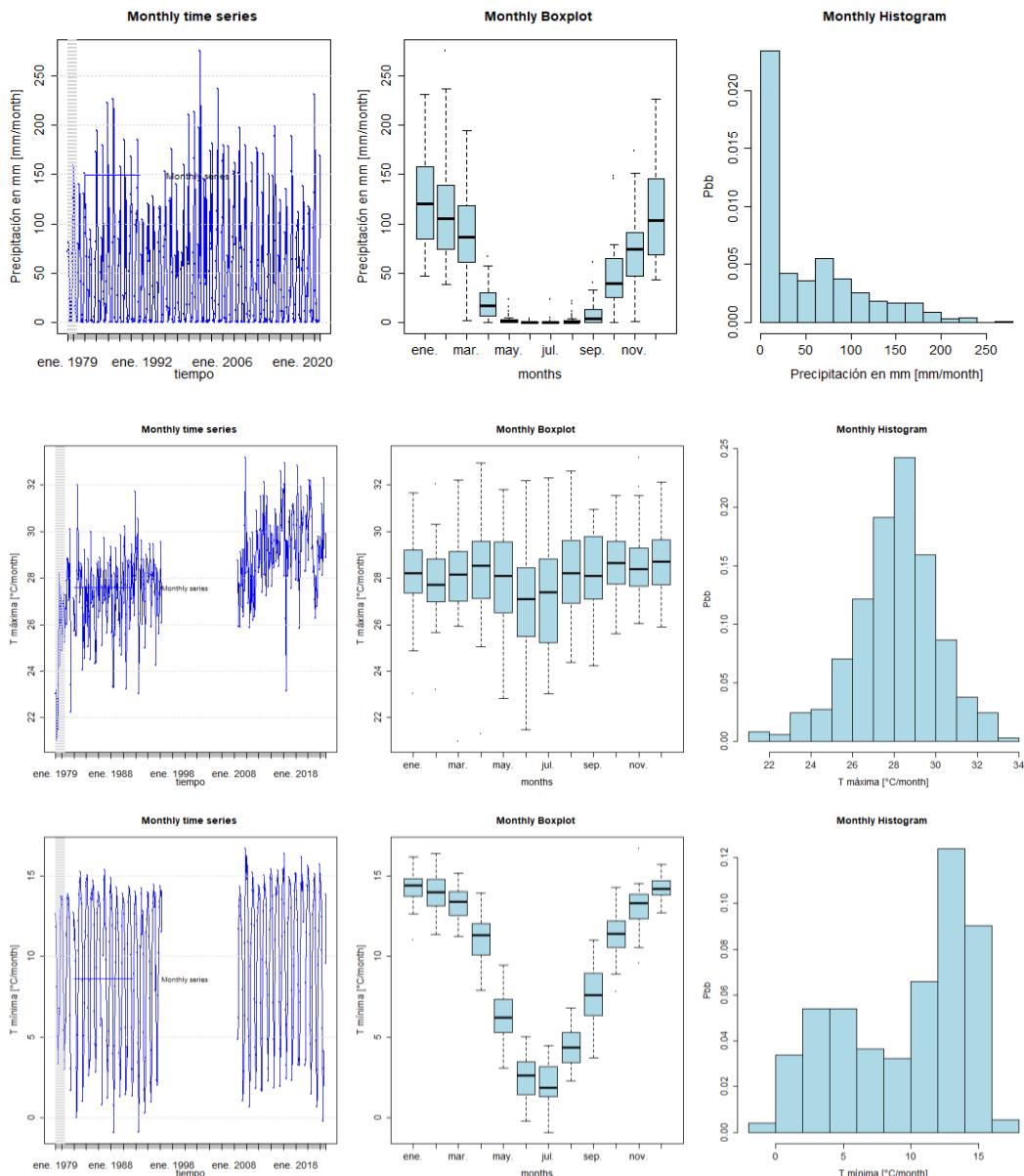


Figura 37: Series temporales de la estación San Jacinto, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

Fuente: Adaptado de reportes gráficos de HydroTSM, disponible en R

9. Estación Tucumillas

Presenta una serie de precipitación con una tendencia creciente de los meses de noviembre a enero y decreciente de febrero a marzo, y una disminución continua en los meses de mayo a agosto; época seca y una transición en el mes de abril y septiembre-octubre. La serie presenta un comportamiento regular sin registro de anomalías. La mediana de temperatura máxima oscila entre los 18 a 24 °C y para la temperatura mínima entre los 3 a 11°C.

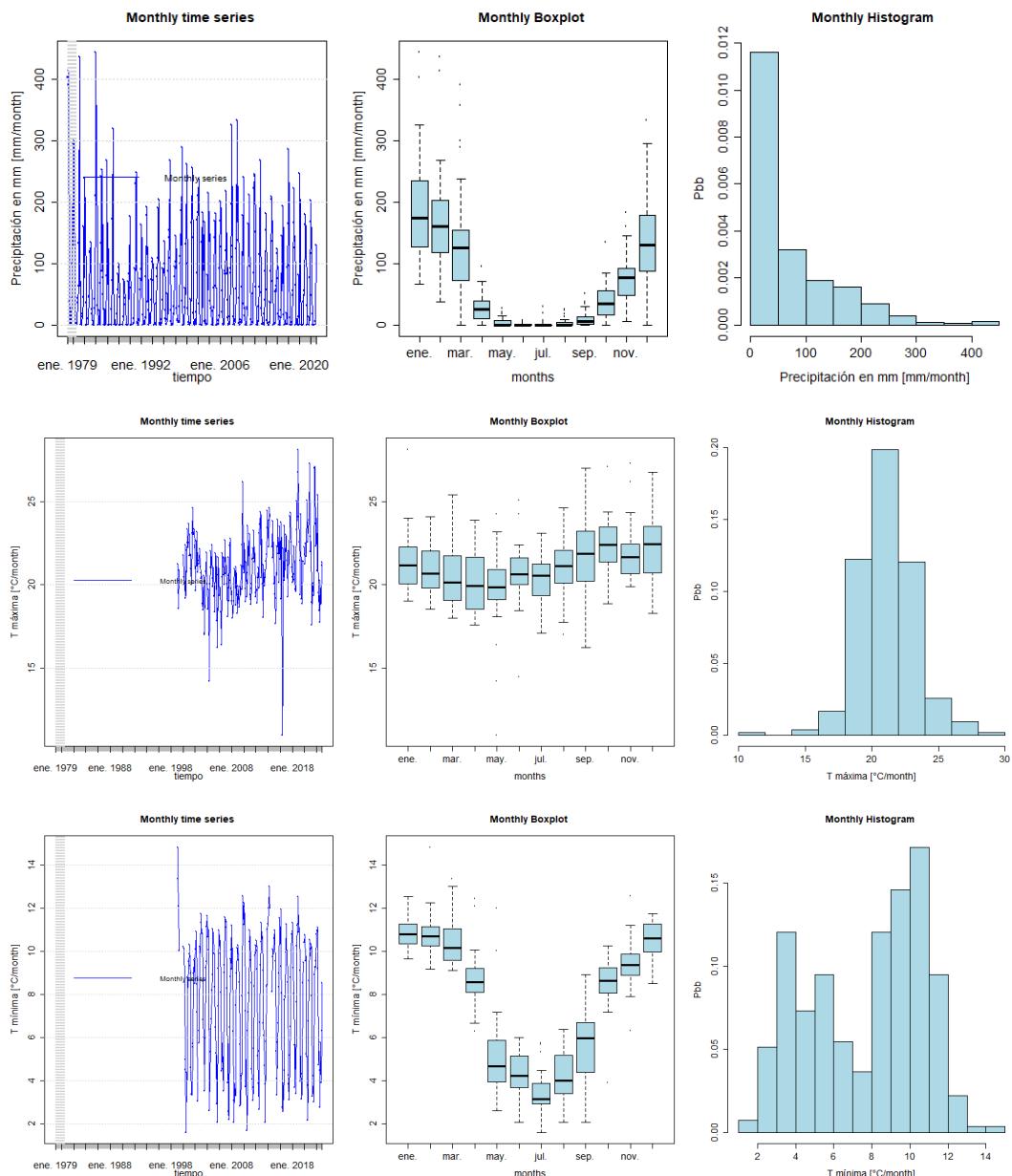


Figura 38: Series temporales de la estación Juntas, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

Fuente: Adaptado de reportes gráficos de HydroTSM, disponible en R

3.5.5. Relleno de datos a las series incompletas

Después del análisis de las series de precipitación y temperaturas, se procedió al relleno de las series de las 9 estaciones para el periodo 01/01/1979 – 31/12/2022 con el programa *Filldata*; desarrollado por el SENAMHI, este programa permite el relleno de lagunas o vacíos en los datos medidos de las series históricas meteorológicas e hidrológicas, aplica métodos recomendados por la OMM; cuatro univariados y nueve multivariados.

En el presente caso de estudio se aplicó el método multivariado, Razón o ratio normal (Paulhus y Kohler) a las 9 estaciones en estudio, es un método que determina el valor de un dato incompleto en una serie de tiempo, $x(t)$, a partir de las series de estaciones vecinas que tengan un alto grado de correlación respecto a la serie analizada.

3.5.5.1. Método Razón o Ratio Normal

Para los procesos de relleno de datos se aplicó el método de Razón Normal (NR), propuesto por (Paulhus y Kohler, 1952) y modificado por (Young, 1992). Los pesos para las estaciones circundantes son estimados con la siguiente ecuación:

$$W_i = \frac{r_i^2(n_i-2)}{1-r_i^2} \quad (5)$$

Donde r es el coeficiente de correlación, n el número de estaciones usado para la correlación y W_i es el peso resultante. El peso de cada estación permite identificar las estaciones potenciales para aplicar el método *NR*. Y la ecuación de *NR* está definida de la siguiente manera:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \left(\frac{N_x}{N_3} \right) P_3 \right] \quad (6)$$

Donde P_x es la precipitación estimada para un paso de tiempo sin datos, N_x la precipitación pro medio de la estación con datos faltantes, $N1, \dots, N3$ la precipitación promedio de las estaciones circundantes, y $P1, \dots, P3$ la precipitación observada en las estaciones circundantes en el mismo paso de tiempo que la estación sin datos. Las tres estaciones circundantes son seleccionados con el peso, Wi , estimado (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2021).

En la Figura 39 se observa los coeficientes de correlación diario para las estaciones en estudio.

	<i>Aeropuerto</i>	<i>Canas</i>	<i>Coimata</i>	<i>El Tejar</i>	<i>Juntas</i>	<i>Pinos Sud</i>	<i>San Andres</i>	<i>San Jacinto</i>	<i>Tucumillas</i>
<i>Aeropuerto</i>	1								
<i>Canas</i>	0.3162	1							
<i>Coimata</i>	0.3655	0.3913	1						
<i>El Tejar</i>	0.5037	0.4148	0.5986	1					
<i>Juntas</i>	0.2665	0.4523	0.3773	0.3972	1				
<i>Pinos Sud</i>	0.2939	0.4492	0.3902	0.4006	0.4019	1			
<i>San Andres</i>	0.3545	0.4100	0.5220	0.5138	0.4302	0.4585	1		
<i>San Jacinto</i>	0.4106	0.3948	0.5155	0.6194	0.3974	0.3947	0.5136	1	
<i>Tucumillas</i>	0.3095	0.3976	0.4939	0.3890	0.3283	0.4115	0.4183	0.3913	1

Figura 39: Coeficientes de correlación diario, para datos sin relleno

Fuente: Elaboración propia.

	<i>Aeropuerto</i>	<i>Canas</i>	<i>Coimata</i>	<i>El Tejar</i>	<i>Juntas</i>	<i>Pinos Sud</i>	<i>San Andres</i>	<i>San Jacinto</i>	<i>Tucumillas</i>
<i>Aeropuerto</i>	1								
<i>Canas</i>	0.7904	1							
<i>Coimata</i>	0.8805	0.7367	1						
<i>El Tejar</i>	0.9116	0.7509	0.8566	1					
<i>Juntas</i>	0.7973	0.7987	0.7859	0.8128	1				
<i>Pinos Sud</i>	0.7788	0.8477	0.7336	0.7539	0.7652	1			
<i>San Andres</i>	0.8809	0.8129	0.8527	0.8454	0.8509	0.8300	1		
<i>San Jacinto</i>	0.9105	0.7995	0.8525	0.8620	0.8116	0.7963	0.8830	1	
<i>Tucumillas</i>	0.8139	0.8031	0.7627	0.7766	0.7609	0.8110	0.8309	0.8122	1

Figura 40: Coeficiente de correlación mensual, para datos sin relleno.

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, para culminar el proceso se realizó un análisis de consistencia para cada estación en estudio por el método de la curva doble masa, con la finalidad de poder detectar cambios en la pendiente que logren reflejar algún error sistemático en la medición de las series.

3.5.5.2. Resultados de las series completas

A continuación, se observan los gráficos con las series completas, con resultados aceptados para correr el modelo HydroBID.

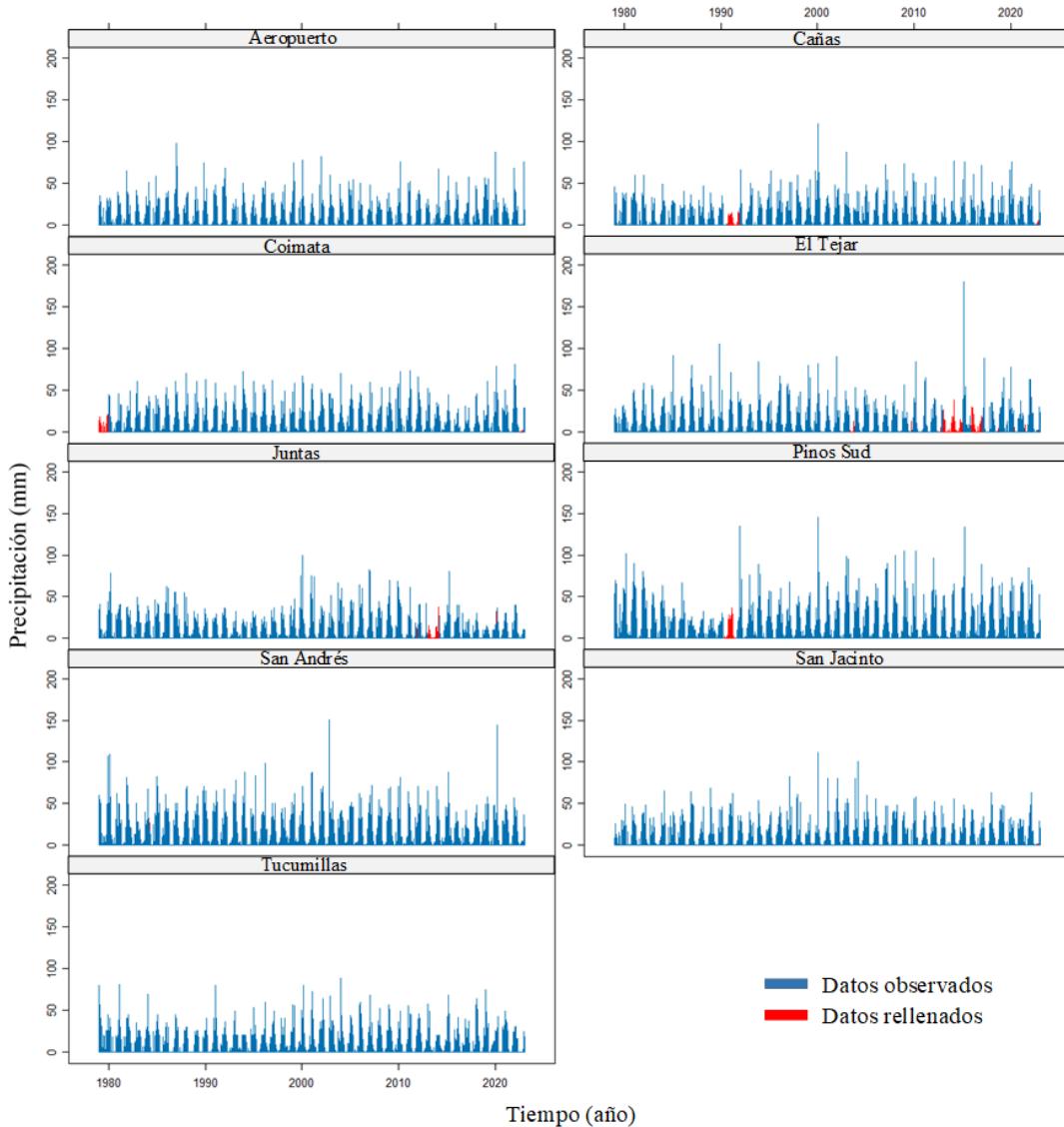


Figura 41: Serie de precipitaciones diarias completas

Fuente: Elaboración propia.

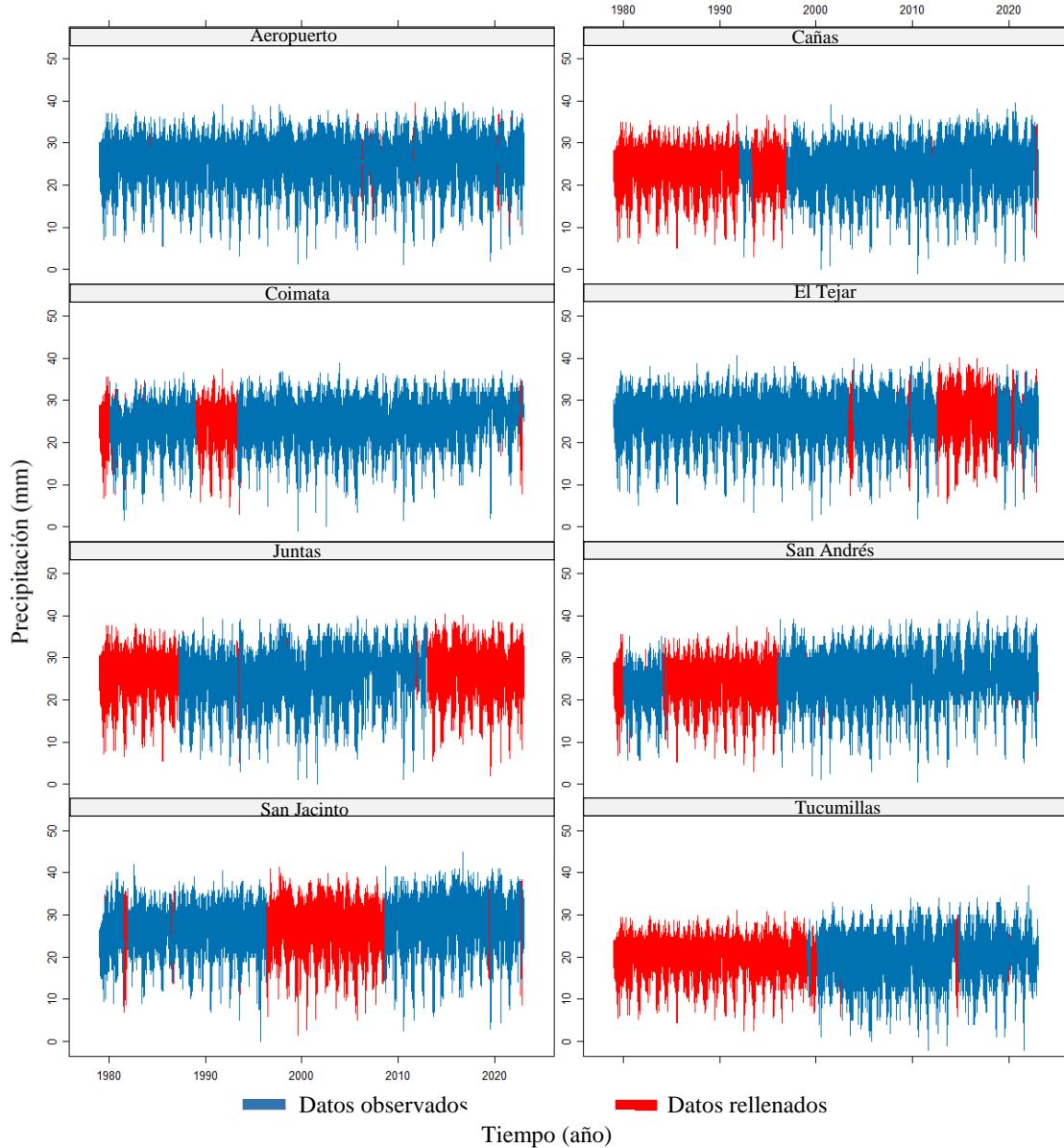


Figura 42: Serie de temperaturas máximas diarias completas

Fuente: Elaboración propia en RStudio.

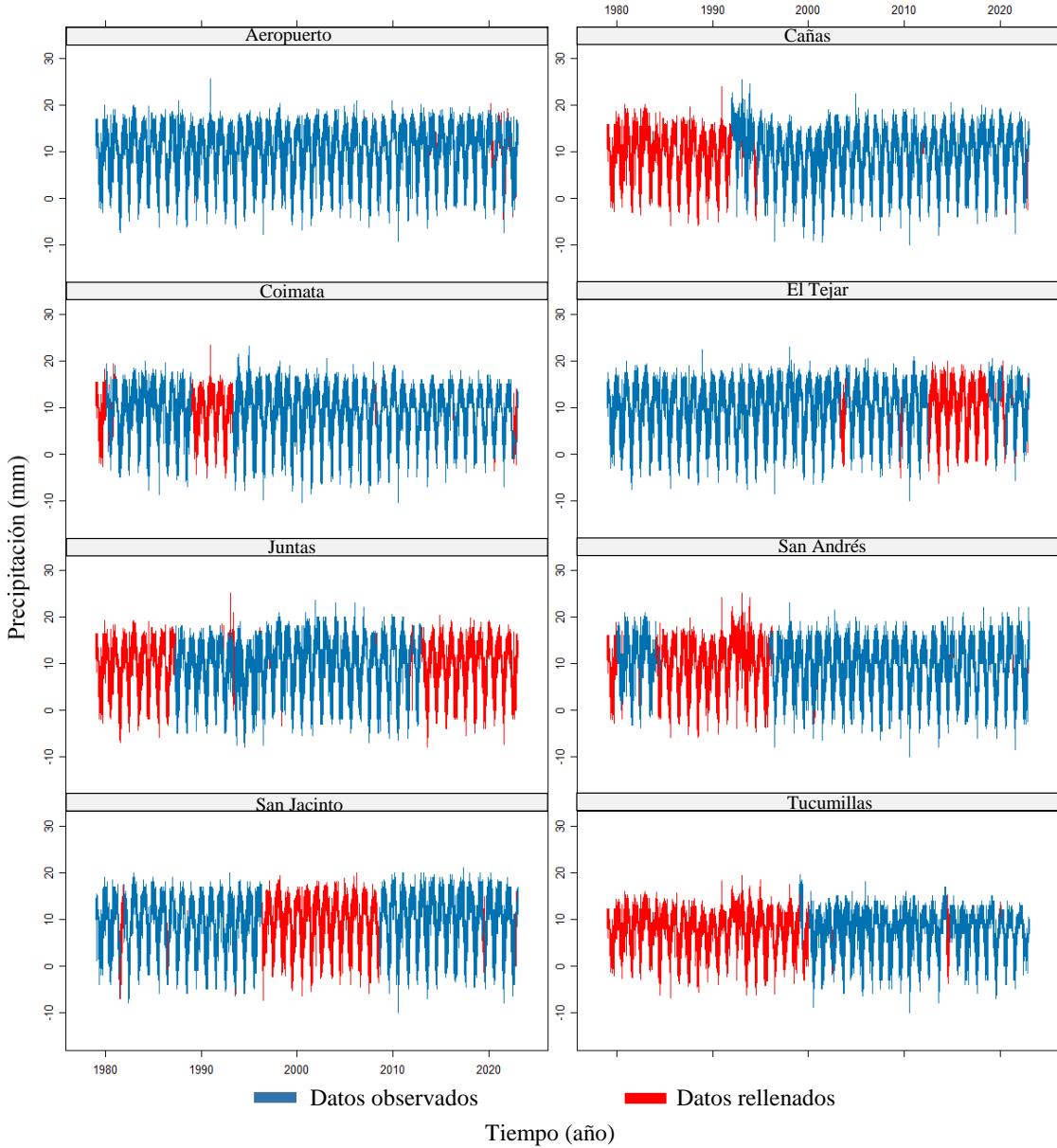


Figura 43: Serie de temperaturas mínimas diarias completas

Fuente: Elaboración propia en RStudio.

3.6. Modelación en HydroBID

Estimar el escurrimiento superficial en HydroBID es posible ajustando los parámetros de una modelación hidrológica a la serie de caudales observados para un periodo de registro.

3.6.1. Etapa previa QGIS e HydroBID

Antes de correr el modelo HydroBID es necesario identificar, aislar y crear la información necesaria de la cuenca para su uso en el modelo a partir de la base de datos AHD, con apoyo del programa QGIS. Los pasos son primero el alistamiento de datos necesarios que genera QGIS, donde se aísla la cuenca de estudio, las líneas de flujos, se establece los catchments o microcuenca (COMID) que componen la cuenca en estudio, se determina el COMID para el punto de aforo de la cuenca y para el embalse, como así, la generación de resultados de los centroides para cada catchment de la cuenca.

3.6.1.1. Carga de archivos, ficheros en QGIS.

Al crear los nombres de los archivos se recomienda no usar caracteres o símbolos especiales en los nombres de los archivos, tales como tilde, diéresis (ü), ñ, guion alto (-) o símbolos matemáticos (+, -, /, etc.), ya que el módulo de programación de base de HydroBID no los reconoce y puede generar errores.

De la unidad que contiene la información base de HydroBID, en nuestro caso la carpeta de nombre ADH; se debe cargar en QGIS los archivos:

- Catchment, que contiene la información de las delimitaciones de las microcuenca.
- AHDFlowline, que es el archivo que contiene la información de la delineación de la red de flujos superficiales u arroyos de las microcuenca.
- AHDFlow, el archivo que contiene la información de la interconectividad y distribución de la red de flujos.

El sistema de referencia de coordenadas para su aplicación en QGIS e HydroBID está establecido para WGS 84 EPSG: 4326, según las guías y tutoriales de aplicación del modelo.

La base de datos con la información previamente mencionada, la cual será utilizada en la ejecución del presente trabajo en HydroBID se encuentra almacenada con el nombre: **SouthAmericaComplete_hi_res_no_met_obs.sqlite** (en su última versión 2.020), la misma contiene la tabla de conectividad entre cuencas **catchment_navigation (fromCOMIDtoCOMID)**, al igual que una tabla con datos para América del Sur sobre la cobertura del suelo (tipo y uso de suelo) según la

recopilación y clasificación de la National Land Cover Database, U.S.A. nombrada como **catchment_nlcd_soils**.

3.6.1.2. Generación de datos en QGIS

Una vez cargada toda la base de datos, se ubica el punto de salida de la cuenca y se selecciona a la microcuenca que pertenece para posteriormente delimitar y agrupar los catchments aguas arriba, y se recorta la información solo para nuestra área de estudio.

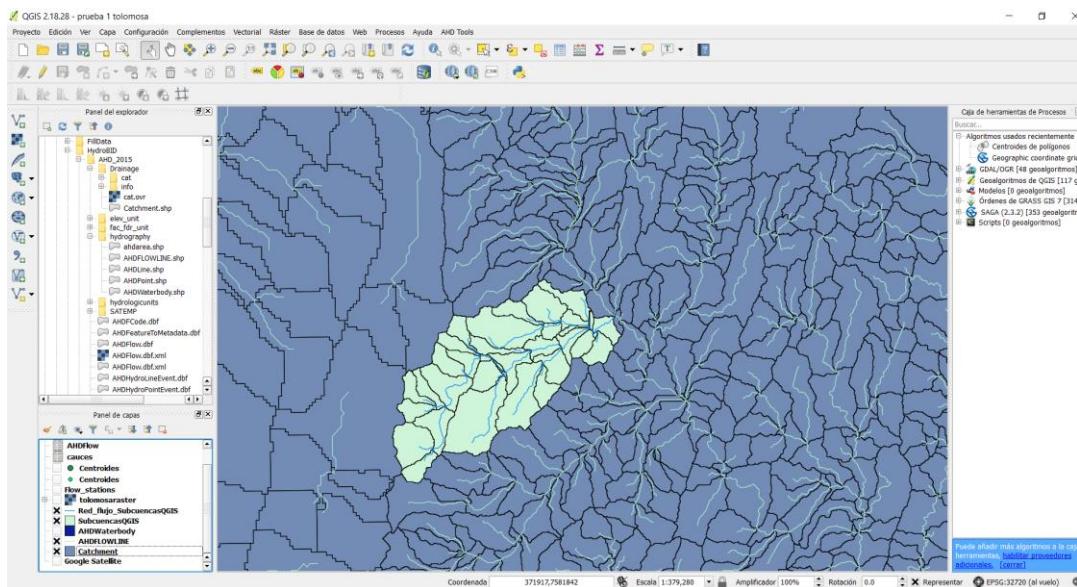


Figura 44: Base de datos AHD importada en QGIS – Delimitación de la cuenca del río Tolomosa

Fuente: Elaboración propia [capturado de QGIS]

Una vez ubicada nuestra zona de estudio y sus respectivos catchments se generan los siguientes resultados:

Tabla 16: Información de la base de dato AHD para la cuenca del río Tolomosa

Descripción	Valor	Unidad
COMID de inicio o cierre de captación	313344202	-
Número de Catchments o microcuenca	35	-
Área mínima	0,02	km ²
Área máxima	61,29	km ²
Área total	467,56	km ²
Longitud total de red de flujo	126,00	km

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, como requisito de entrada para HydroBID, se procede a determinar los centroides de cada uno de los COMID que hacen parte del área de estudio, los cuales

deben ser exportados en un archivo de formato Valores Separados por Coma, el cual debe contener como datos: COMID, Longitud X (en grados) y Latitud Y (en grados). La información obtenida en este procedimiento es la base para la creación del archivo **Catchment_centroids.csv**.

Tabla 17: Latitud y longitud para cada centroides por catchment

COMID	centroid_x	centroid_y
313342401	-64,7888393	-21,5723281
313382501	-64,9129304	-21,6190401
313342403	-64,7796849	-21,6036497
313342404	-64,7505400	-21,5909444
313382504	-64,8632811	-21,6416936
313382502	-64,8775000	-21,6354167
313382506	-64,8970854	-21,6416943
313342406	-64,8463697	-21,6016252
313342405	-64,7513674	-21,6017223
313352402	-64,7537866	-21,6181206
313344203	-64,7241220	-21,5920551
313382511	-64,9722814	-21,7460372
313357603	-64,8223918	-21,6909627
313382513	-64,9630807	-21,7779609
313357602	-64,7897653	-21,6780890
313344205	-64,7147568	-21,6297190
313344204	-64,7194271	-21,6098090
313382505	-64,9231280	-21,6427796
313352401	-64,7365623	-21,6224012
313360903	-64,8471574	-21,6562500
313382503	-64,9038265	-21,6025431
313382507	-64,9242742	-21,6721077
313382508	-64,9684729	-21,6779971
313371701	-64,8696497	-21,6612006
313371702	-64,8845768	-21,7172908
313344201	-64,7531444	-21,5647684
313360901	-64,7926570	-21,6240046
313344202	-64,7030586	-21,6017248
313342407	-64,8625804	-21,6241758
313342402	-64,8293492	-21,5784336
313357601	-64,7751228	-21,6498358
313382509	-64,9511457	-21,6773327
313360902	-64,8344168	-21,6486045
313382510	-64,9686633	-21,7029639
313382512	-64,9383680	-21,7242697

Fuente: Adaptado del reporte de QGIS

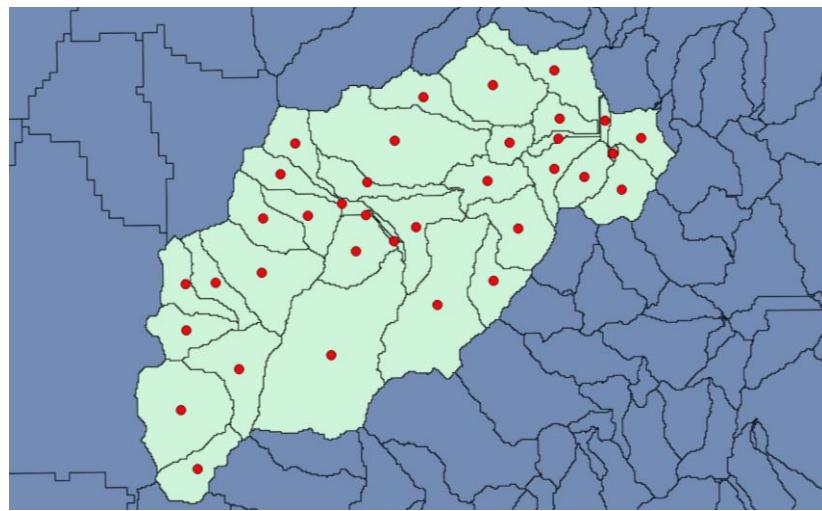


Figura 45: Centroides generados por catchment para la Cuenca del río Tolomosa

Fuente: Elaboración propia, [capturado de QGIS]

3.6.2. Interpolación de datos climáticos

El modelo hidrológico HydroBID estima el escurrimiento superficial para las subcuenca definidas en su base de datos AHD, en nuestro caso de estudio para los 467,56 km² de área total de las 35 subcuenca o Catchments que forman y aportan a la cuenca del río Tolomosa.

Para realizar la interpolación de la información climática y la generación de la base de datos de interpolación meteorológica para su uso posterior en la calibración, validación y generación de estimaciones de flujos superficiales futuros en el modelo, se requiere la ubicación de las estaciones de temperatura y precipitación (ver Tabla 18), los centroides de cada una de las 35 subcuenca (ver Tabla 17), la información diaria de precipitación en centímetros (cm), como de temperatura en °C.

Tabla 18: Coordenadas de las estaciones hidrometeorológicas

Estación	Latitud	Longitud
Aeropuerto	-21,549238	-64,707591
Cañas	-21,902200	-64,850889
Coimata	-21,499053	-64,788945
El Tejar	-21,545599	-64,721868
Juntas	-21,810167	-64,797876
Pinos Sud	-21,734722	-64,878333
San Andrés	-21,623333	-64,815000
San Jacinto	-21,610278	-64,720000
Tucumillas	-21,461111	-64,831111

Fuente: Elaboración propia

Para la interpolación de los datos climáticos de precipitación y temperatura se creó una base de datos denominada **met_Tolomosa**, esta base de datos es la que se aplicara en el desarrollo del trabajo.

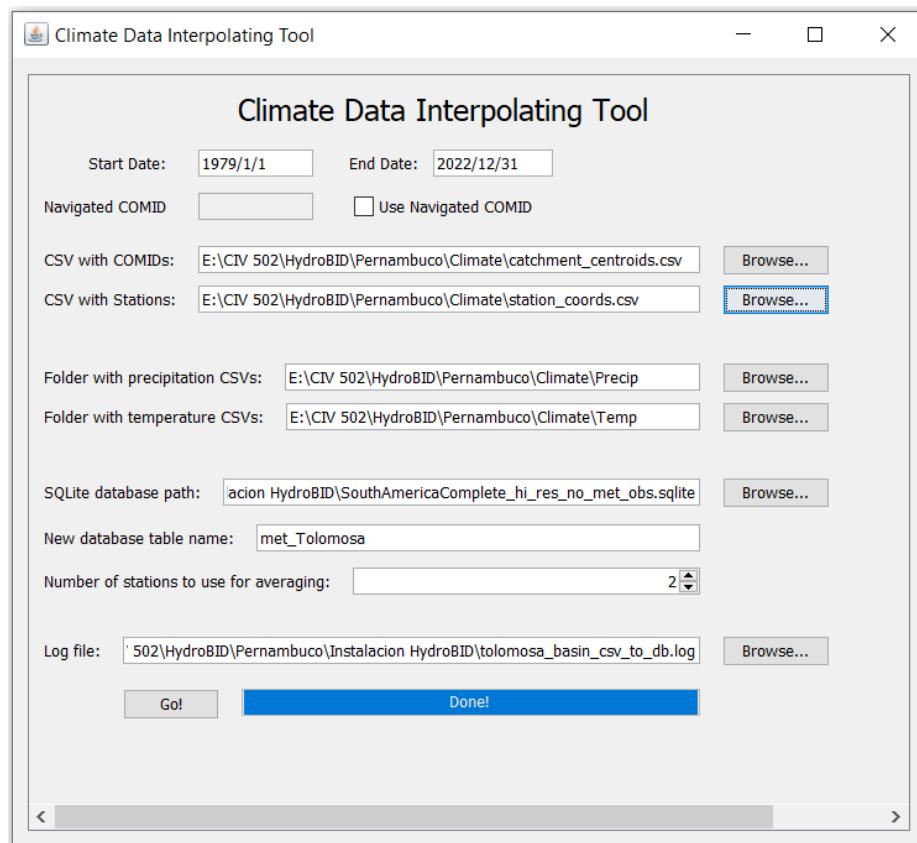


Figura 46: Herramienta de interpolación de datos Climáticos de HydroBID

Fuente: HydroBID II, Climate Data Interpolating Tool.

The screenshot shows a software application titled "Database Editor" with a window titled "met_observations...". The window contains a table with four columns: "comid", "measure...", "avg_temp", and "avg_precip". The data consists of 31 rows, each representing a measurement for a specific date. The "comid" column contains the value 313342401 for all rows. The "measure..." column contains dates ranging from 19790101 to 19790126. The "avg_temp" column contains values such as 19.565, 19.955, 19.562, etc. The "avg_precip" column contains values such as 0, 0.429, 0.017, 0.19, 0.314, etc. The table has scroll bars on the right and bottom.

comid	measure...	avg_temp	avg_precip
313342401	19790101	19.565	0
313342401	19790102	19.955	0.429
313342401	19790103	19.562	0.017
313342401	19790104	18.527	0.19
313342401	19790105	18.749	0.314
313342401	19790106	17.568	0
313342401	19790107	18.908	0
313342401	19790108	18.299	0.041
313342401	19790109	19.157	0.058
313342401	19790110	19.727	0.017
313342401	19790111	19.299	1.593
313342401	19790112	19.455	0
313342401	19790113	20.692	0.223
313342401	19790114	17.876	0.124
313342401	19790115	19.36	0.017
313342401	19790116	19.682	0
313342401	19790117	19.792	0
313342401	19790118	19.894	0
313342401	19790119	19.394	0.083
313342401	19790120	19.304	0.314
313342401	19790121	20.541	0
313342401	19790122	19.689	0.685
313342401	19790123	20.636	0.396
313342401	19790124	19.92	0
313342401	19790125	20.519	0.058
313342401	19790126	19.874	0

Figura 47: Interpolación de datos climáticos de la cuenca del río Tolomosa

Fuente: HydroBID II, Climate Data Interpolating Tool.

3.6.3. Calibración y validación

Como se mencionó con anterioridad, para la implementación de modelo en HydroBID, se requiere de datos climatológico, en formato CSV, datos como temperatura en grados centígrados (°C), precipitación en centímetros (cm) y caudales en metros cúbicos por segundo (m³/s). El periodo de calibración corresponde a 2/3 de la información base de caudales y el periodo de calibración a 1/3 del mismo, para los cuales se ajustó los parámetros del modelo HydroBID a la serie de caudales de la estación San Jacinto del periodo 01/01/1979 al 31/01/1984.

Para la simulación en Hydro-BID se requiere de la definición de ciertos parámetros, que caracterizan la cuenca de estudio, acoplados en la base de datos LAC-AHD y que podrían ser afectados por un factor multiplicador para mejorar la precisión en la

simulación. Los parámetros iniciales de calibración del modelo se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19: Parámetros para la calibración del modelo HydroBID

Parámetro	Definición	Valor por defecto
Velocity	Velocidad promedia estimada de los segmentos fluviales	0.5 m/s
CN	Número de curva, controla la cantidad inicial de abstracción utilizada para calcular la escorrentía	1
AWC	Capacidad disponible del agua en el suelo. Activa el inicio de la percolación	1
R coefficient	Coeficiente de recessión. Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde el almacenamiento saturado	0,01
Seepage	Coeficiente de percolación. Coeficiente que controla la tasa de filtración en el acuífero subterráneo	0,005
Grow season ET factor	Factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo	1
Dormant season ET factor	Factor de evapotranspiración durante la estación latente	1
Impervious cover percent	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca	2%

Fuente: Adaptada de “Nota técnica Hydro-BID”, Moreda et al. (2014)

3.6.3.1. Calibración

Durante el proceso de calibración, se ajustó los parámetros del modelo HydroBID para una calibración ajustada a un periodo de 2/3 de la información observada; desde 01/01/1979 al 28/02/1982. Así mismo, una vez organizada la información de entrada con los datos hidrometeorológicos para la cuenca del río Tolomosa, se ejecuta HydroBID y se cargan los archivos en cada uno de los campos establecidos tal y como se indica en la Figura 48.

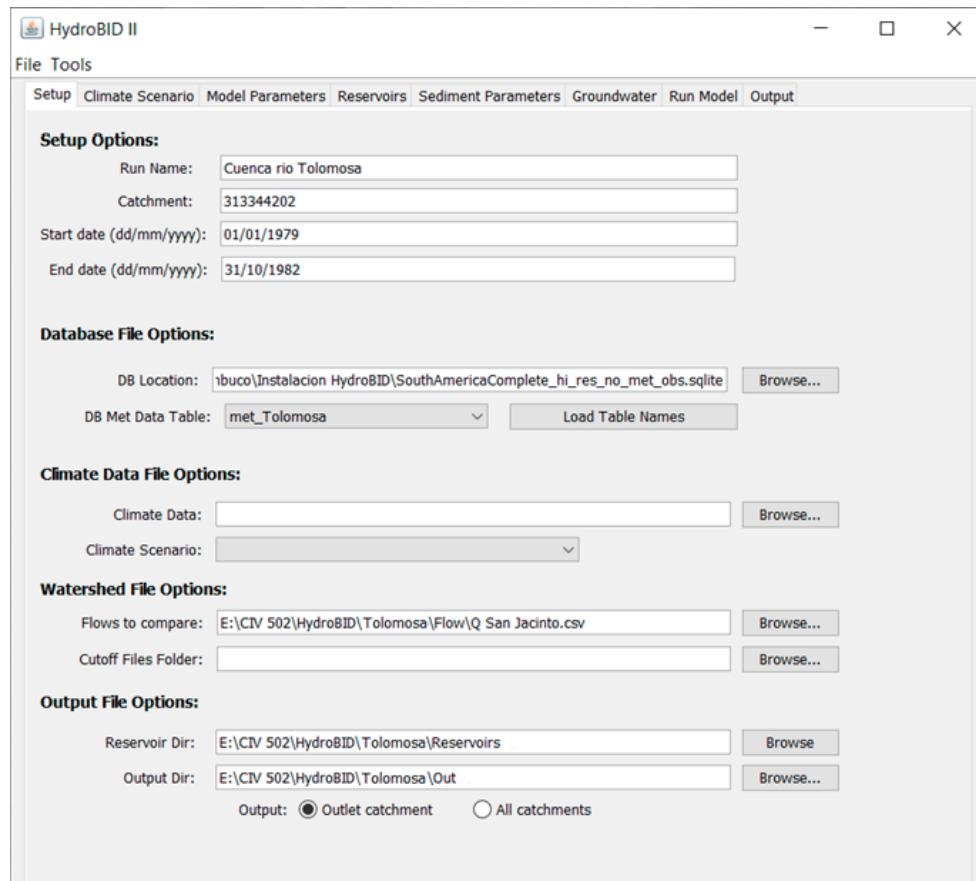


Figura 48: Ventana principal de interacción de HydroBID

Fuente: HydroBID II

La calibración de los datos se realizó evaluando diferentes combinaciones en los parámetros del modelo, variando los mismos hasta conseguir los porcentajes de error más cercano a los recomendados (*Tabla 20*) y hasta lograr la mayor similitud entre las gráficas de valores observados y simulados arrojadas por el modelo.

Tabla 20: Valores óptimos de las métricas de calibración

Métrica	Valor óptimo
Volumen del error general	más cercano a 0
Correlación (R)	0 - 1
Correlación modificada	0 - 1
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	0 – 0,10 insatisfactorio
	0,20 - 0,40 satisfactorio
	0,41 - 0,60 bueno
	0,61 - 0,80 muy bueno
	>0,80 excelente

Fuente: Adaptada de “Nota técnica Hydro-BID”, Moreda et al. (2014)

Al momento de ejecutar la calibración de los datos para el periodo que engloba la misma, se realizaron más de 40 pruebas que dieron como resultados los siguientes parámetros ajustados a la cuenca del río Tolomosa, presentes en la Tabla 21.

Tabla 21: Parámetros de calibración para la cuenca del río Tolomosa

Parámetro	Valor ajustado
Curve Number	0,7
AWC	0,075
R Coefficient	0,045
Seepage	0,00005
Grow season ET	1
Dormant season ET	0,65

Fuente: Elaboración propia

Al aplicar estos parámetros se obtuvieron las métricas de desempeño como se muestran en la Figura 49.

Overall Statistics		Reservoir Statistics
Statistic	Value	
Overall volume ...	16.41	
Correlation, r(-)	0.72	
Modified Correl...	0.61	
Nash-Sutcliffe E...	0.49	

Figura 49: Métricas de desempeño de la calibración para la cuenca del río Tolomosa

Fuente: HydroBID II

- En la Figura 49 se puede observar que la media del porcentaje de error entre los valores simulados y los observados “Overall volumen error” es igual al 16,41%, un valor cercano a 0, aceptado entre el rango recomendado.
- Un coeficiente r , que analiza la correlación entre las series de flujos simulados y observados, que tiene un valor igual a 0,72 lo más cercano a 1 en equilibrio con los otros estadísticos.
- Una correlación modificada R_{mod} , que analiza y cuantifica la relación entre la serie simulada y observada, bajo un factor de relación entre los valores máximos y mínimos de la serie. Su valor es igual 0,61, aceptable siendo el más próximo en equilibrio con los otros estadísticos.

- Finalmente, un valor de eficiencia Nash-Sutcliffe igual a 0,49, clasificado como bueno según las métricas de optimo desempeño para los rangos de los estadísticos recomendados para la calibración en HydroBID.

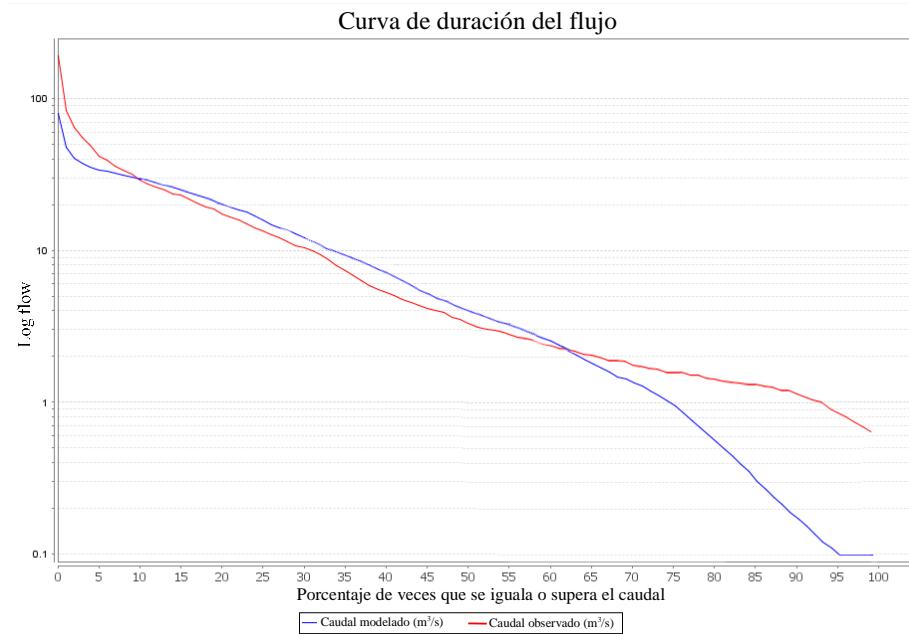


Figura 50: Curva de calibración de la cuenca el río Tolomosa

Fuente: HydroBID II

En la Figura 50 se puede observar las curvas finales de duración, del proceso de calibración para la serie de caudales simulados y observados, las mismas que son generadas por HydroBID, donde se observa resultados aceptables en la serie de tiempo.

De igual manera, en la Figura 51 se observa una variación de los valores de volúmenes observado y simulados, y con mayor presencia de esta variación en los picos de los caudales del hidrograma medio mensual generado por el modelo.

Caudales observados y simulados en el periodo de calibración

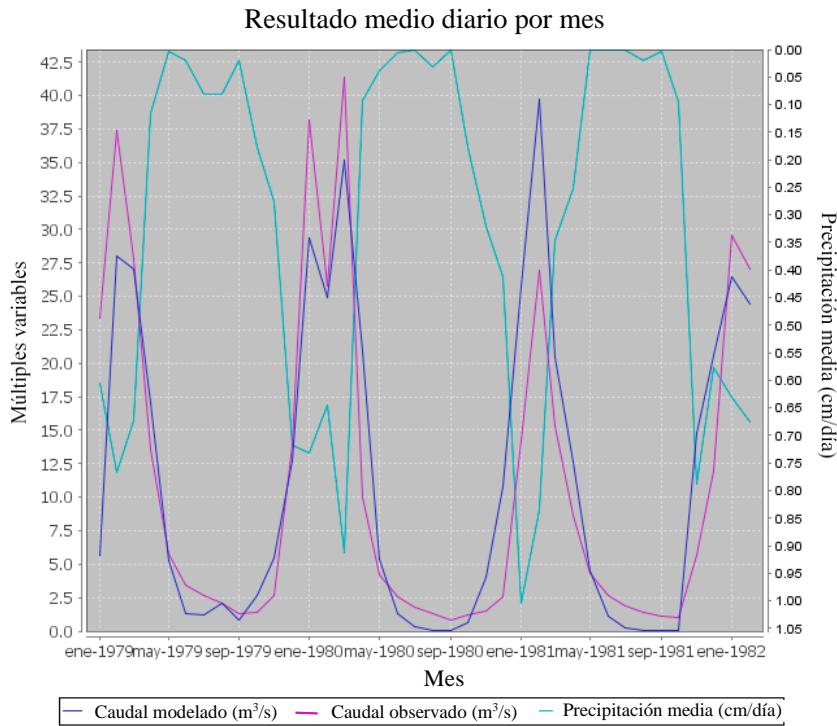


Figura 51: Hidrograma de caudales simulados y observados para la cuenca el río Tolomosa (Calibración)

Fuente: HydroBID II

3.6.3.2. Validación

En el proceso de validación de los parámetros calibrados, se ajustó al 1/3 final de la serie de datos hidrométricos observados correspondiendo al periodo de 01/03/1982 al 31/01/1984. Los parámetros obtenidos se encuentran dentro de los rangos recomendados por las guías de ejecución del modelo HydroBID, siendo los valores de las métricas de desempeño las que se aprecian en la Figura 52.

Overall Statistics		Reservoir Statistics
Statistic	Value	
Overall volume ...	-2.09	
Correlation, $r(-)$	0.58	
Modified Correl...	0.31	
Nash-Sutcliffe E...	0.34	

Figura 52: Métricas de desempeño del periodo de validación.

Fuente: HydroBID II

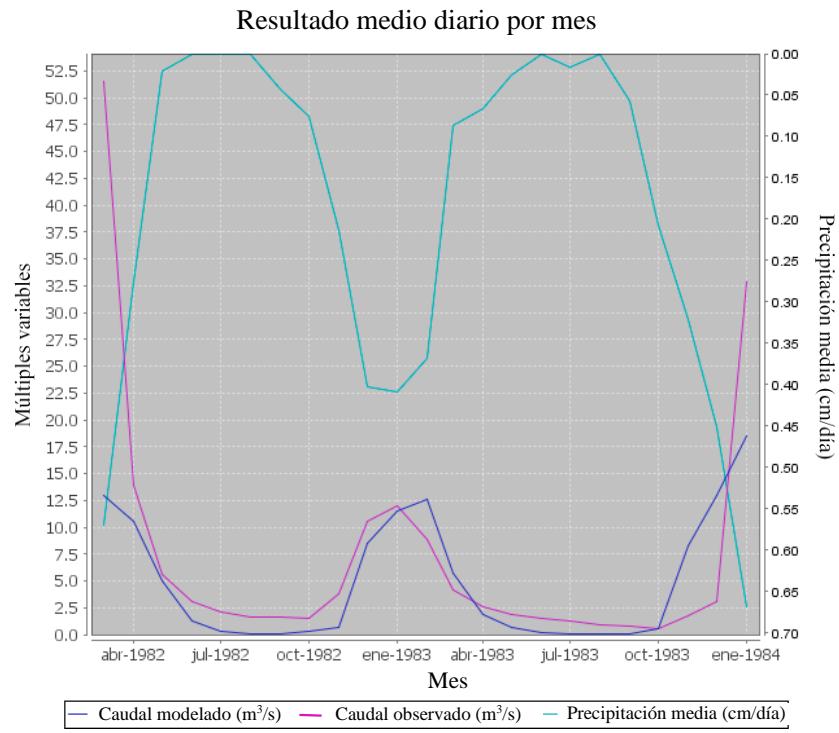


Figura 53: Hidrograma de caudales simulados y observados para la cuenca el río Tolomosa (validación)

Fuente: HydroBID II

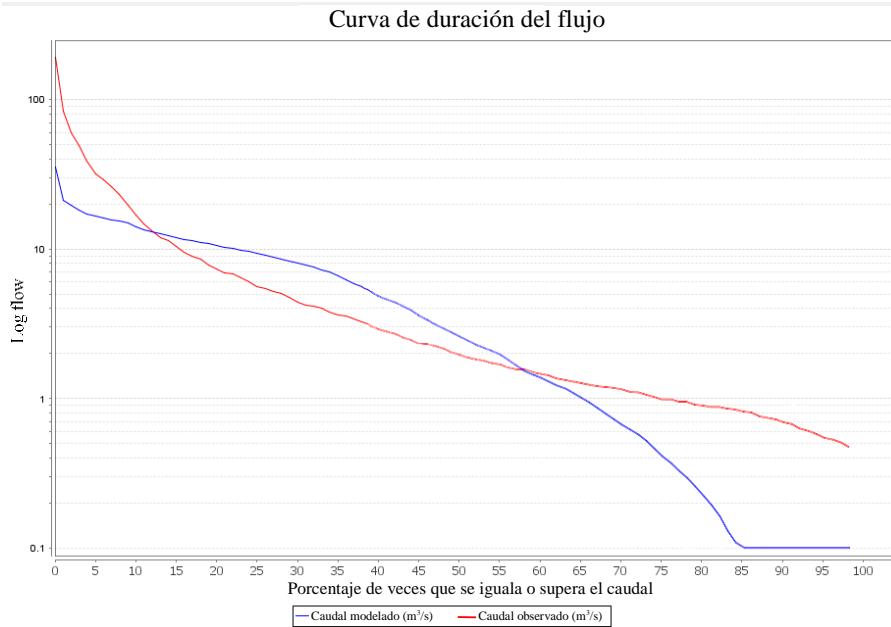


Figura 54: Curva de validación de la cuenca el río Tolomosa

Fuente: HydroBID II

Comportamiento de los parámetros de calibración para los caudales generado por COBEE S.A.

Como bien se mencionaba en el punto de Información hidrométrica, para proporcionar un marco más sólido para la validación del modelo hidrológico HydroBID dentro de la cuenca del río Tolomosa, y analizar si estos parámetro de calibración también se validan y adecuan a un periodo en el cual la cuenca ya cuenta con una estructura (embalse San Jacinto) y con el fin de aplicar el módulo de embalse, se escogió el periodo 01/01/2000 al 31/12/2015 tiempo en cual se encuentra data de volúmenes de salidas y parámetros del embalse asumidos del informe de las batimetrías entre el año 1995 y 2004, con los cuales se analizaran los resultados solo como objeto de refuerzo de la validación de los paramentos ya definidos en la calibración.

A continuación, se muestran las figuras donde se observan los resultados de métricas y parámetros que sustentan los valores de calibración, debido a que las métricas de control en HydroBID se encuentran dentro de los rangos permisibles por el software.

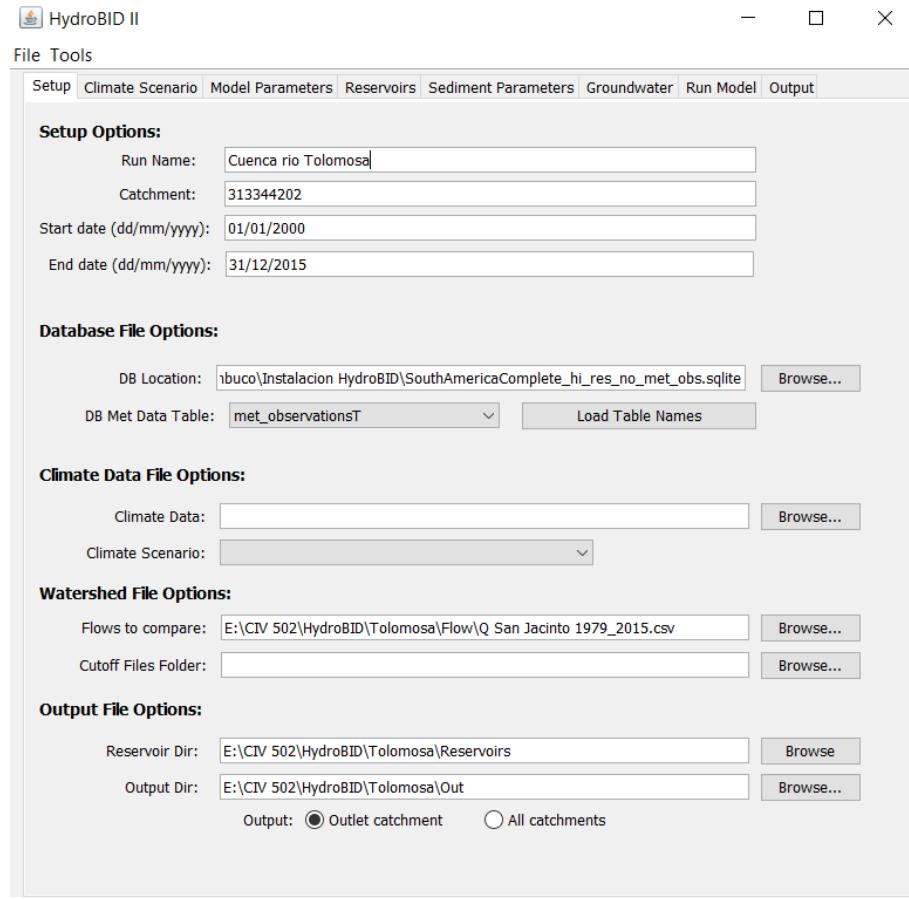


Figura 55: Ventana de importación de data y periodos del proceso de refuerzo a la validación en el periodo 2000-2015

Fuente: HydroBID II

En este proceso de refuerzo de la validación de los parámetros calibrados, se ajustó la serie de datos hidrométricos generados correspondiendo al periodo 01/01/2000 al 31/12/2015. Los parámetros obtenidos se encuentran dentro de los rangos recomendados por las guías de ejecución del modelo HydroBID, siendo los valores de las métricas de desempeño las que se aprecian en la Figura 56.

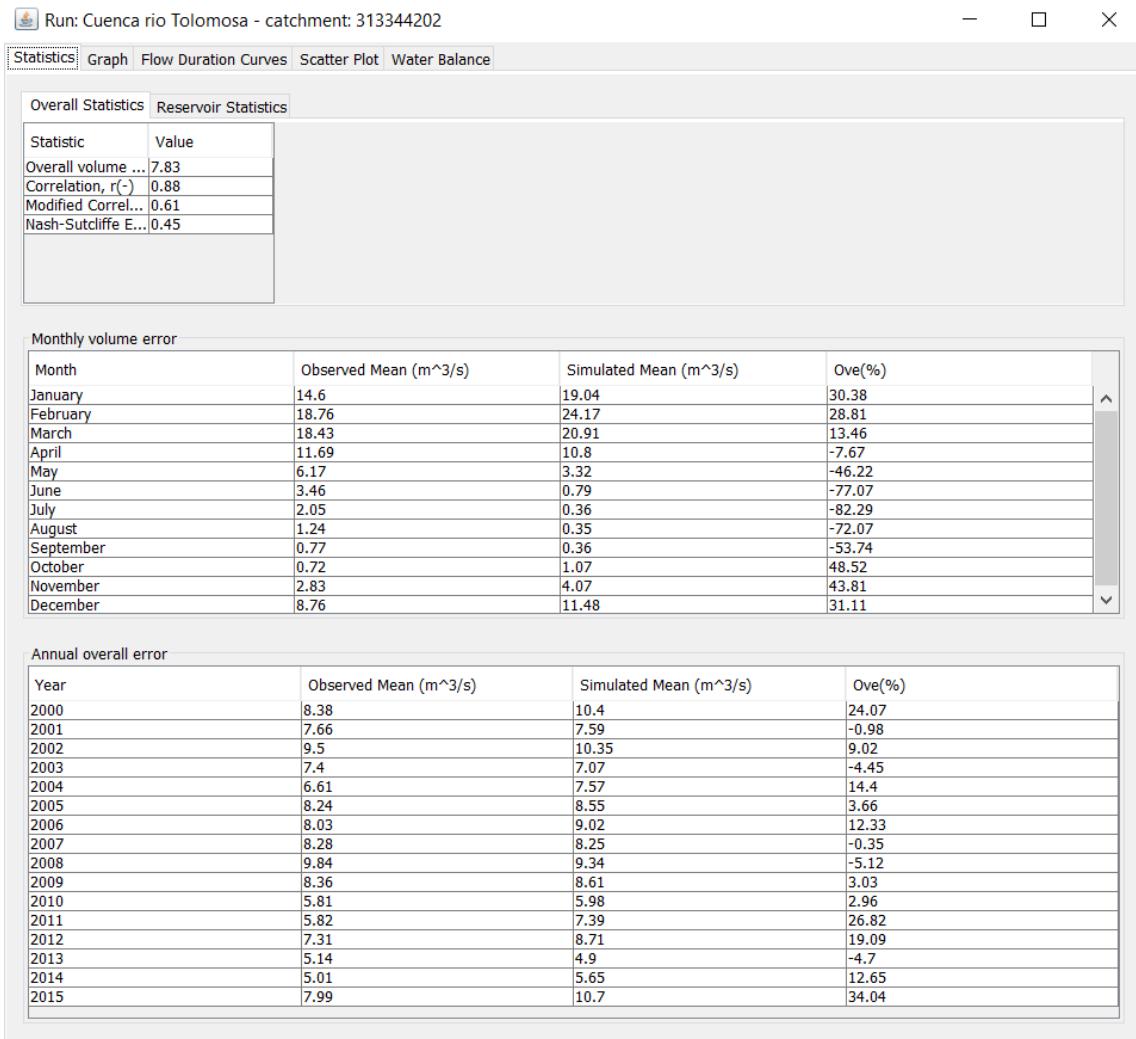


Figura 56: Métricas de desempeño del periodo de refuerzo de validación.

Fuente: HydroBID II

Resultado medio diario por mes

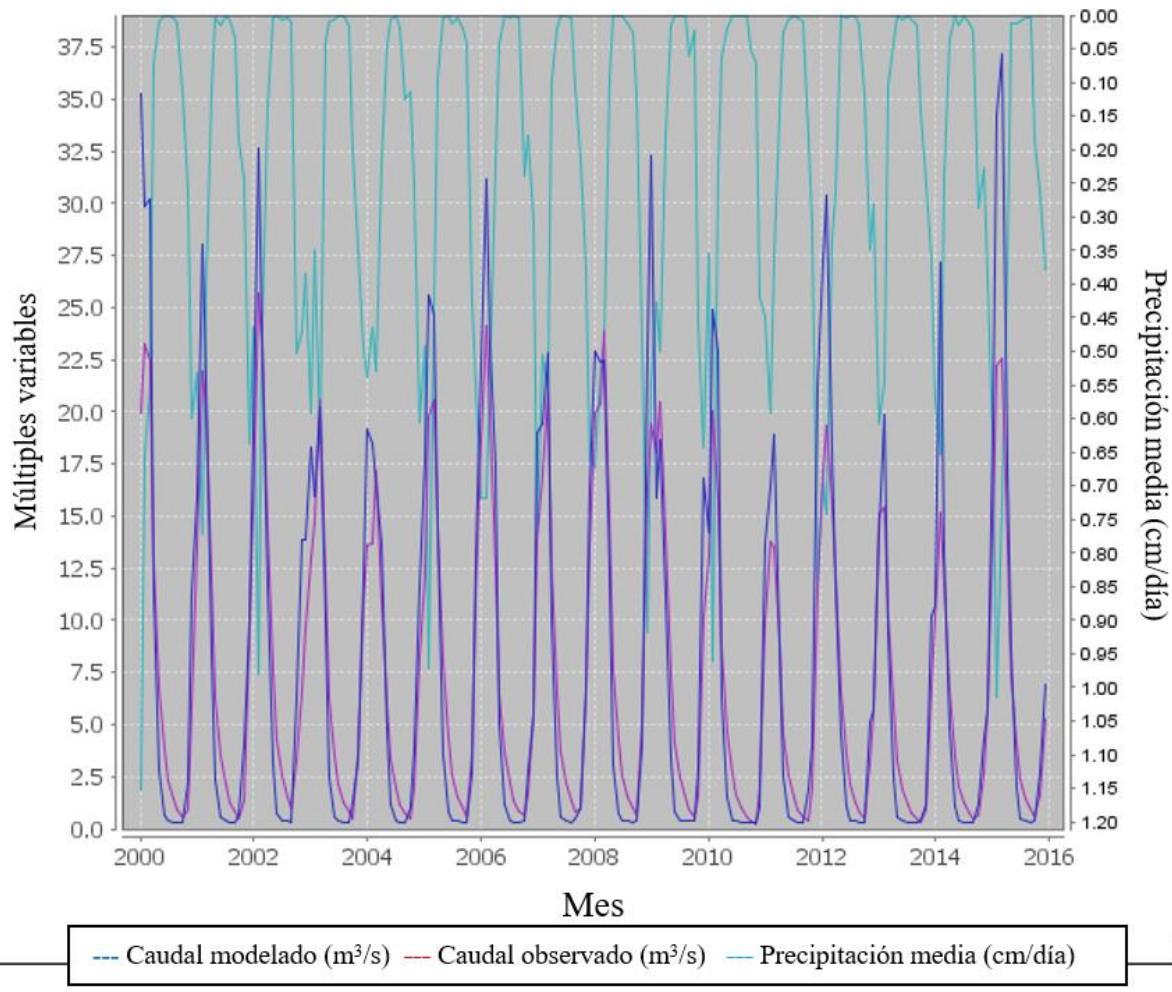


Figura 57: Hidrograma de caudales simulados y observados/generados para la cuenca el río Tolomosa (proceso refuerzo a la validación 2000-2015)

Fuente: HydroBID II

Curva de duración del flujo

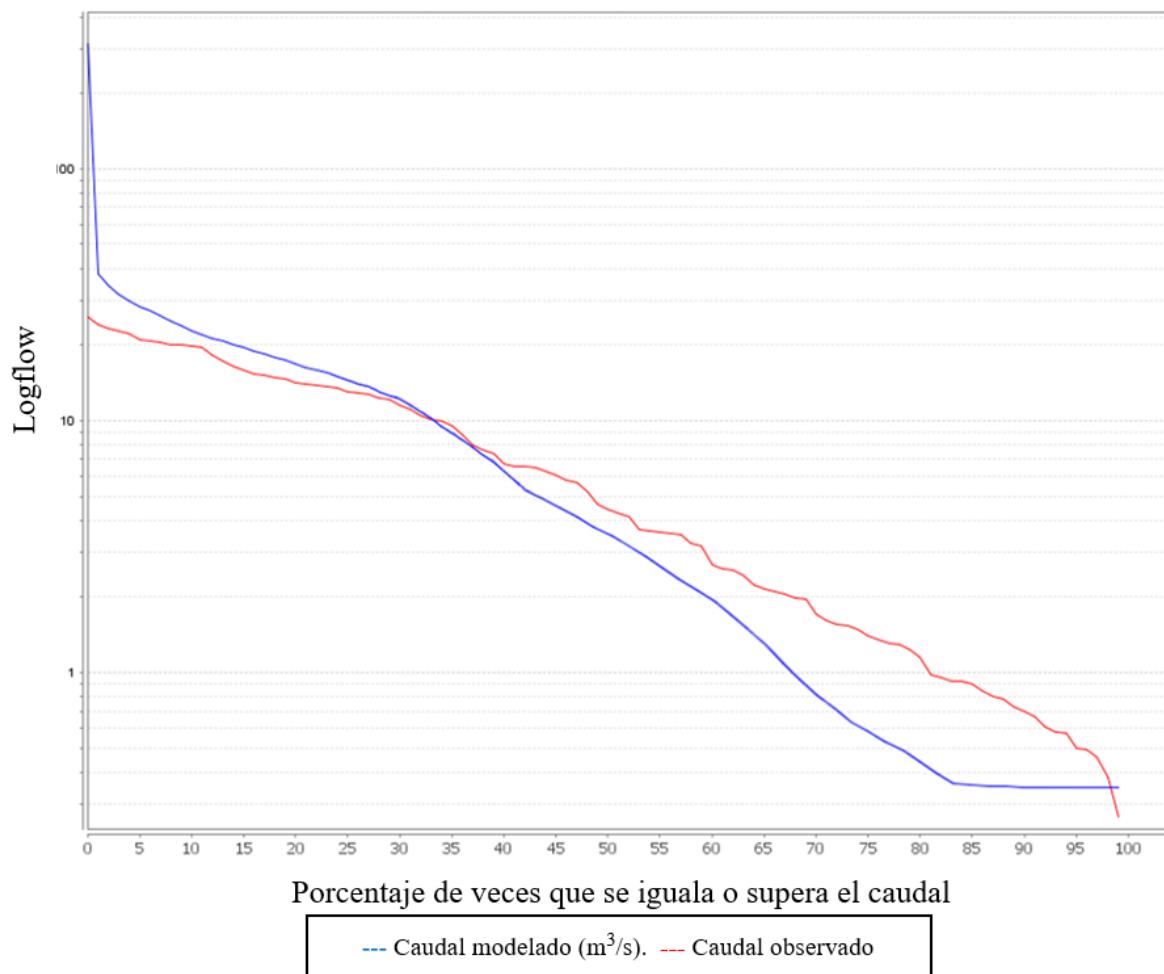


Figura 58: Curva de flujo del refuerzo de validación de la cuenca el río Tolomosa año 2000-2015

Fuente: HydroBID II

3.6.4. Módulo de cambio climático

El módulo de cambio climático e HydroBID permite incluir variaciones en la precipitación y temperatura de forma anual o mensual. A través del apartado “Climate Scenario”, permite realizar proyecciones de escenarios de cambio climático con diferentes resoluciones de datos, diarias, mensuales o con factores de incremento o disminución de los parámetros climáticos, dado a que los valores diarios de modelos de circulación globales no son usualmente confiables se recomienda usar datos de precipitación y temperatura mensual o anual para proyecciones futuras. En ausencia de datos climáticos proyectados a futuro, como es en el caso de estudio, Hydro-BID permite un incremento o disminución de la precipitación mediante un valor en porcentaje y un incremento o disminución de la temperatura media en valores absolutos (Moreda et al., 2014)

3.6.4.1. Selección del escenario climático

En el presente trabajo se consideran los escenarios:

- **SSP-126;** por representar el caso más favorable, con bajos niveles de desafío. Conforme a un escenario SSP1 (sustentable) con un forzante radiativo de 2,6 (W/m^2)⁵ en el tope de la atmósfera para fin de siglo XXI. Simboliza el mejor caso de vías de forzamiento futuras y es análogo al RCP2.6 usado en el IPCC AR5.

Al 2040 se prevé una estabilización del aumento de temperatura global en aproximadamente +1.3 °C respecto a la era preindustrial. Estudios del IPCC y de la base de datos CMIP6 indican que, bajo este escenario: las precipitaciones podrían aumentar levemente en regiones tropicales y disminuir en zonas subtropicales.

El cambio en el régimen hidrológico es moderado y relativamente estable, con menor impacto en el caudal medio anual y menor variabilidad interanual.

- **SSP-245;** por representar un caso intermedio. Conforme a un escenario SSP2 con un forzante radiativo de 4,5 W/m^2 en el tope de la atmósfera para fin de siglo XXI. Es un caso intermedio de uso de combustibles fósiles y

⁵ W/m^2 Valtios por metro cuadrado; unidad utilizada para medir la radiación solar.

es análogo al RCP4.5 usado en el IPCC AR5. Así mismo, proyecta un aumento de temperatura proyectado de +1.8 a +2.0 °C hacia 2040. Muestra una variabilidad hidrológica intermedia, con mayor frecuencia de eventos extremos moderados (sequías o lluvias intensas).

- SSP-585; por las condiciones de emisiones más desfavorables. Conforme a un escenario SSP5 con forzante radiativo de 8,5 W/m² en el tope de la atmósfera para fin de siglo XXI. Es el caso extremo de muy alto uso de combustibles fósiles considerado y es análogo al RCP8.5 usado en IPCC AR5 y un incremento de temperatura estimado de +2.4 a +2.7 °C hacia el año 2040.

Desde el punto de vista hidrológico, se proyectan cambios más drásticos en la disponibilidad hídrica: alteraciones marcadas en la estacionalidad, aumento de caudales extremos y disminución de flujos base. Alta probabilidad de eventos extremos intensificados, como sequías prolongadas o lluvias torrenciales, que afectan directamente la seguridad hídrica.

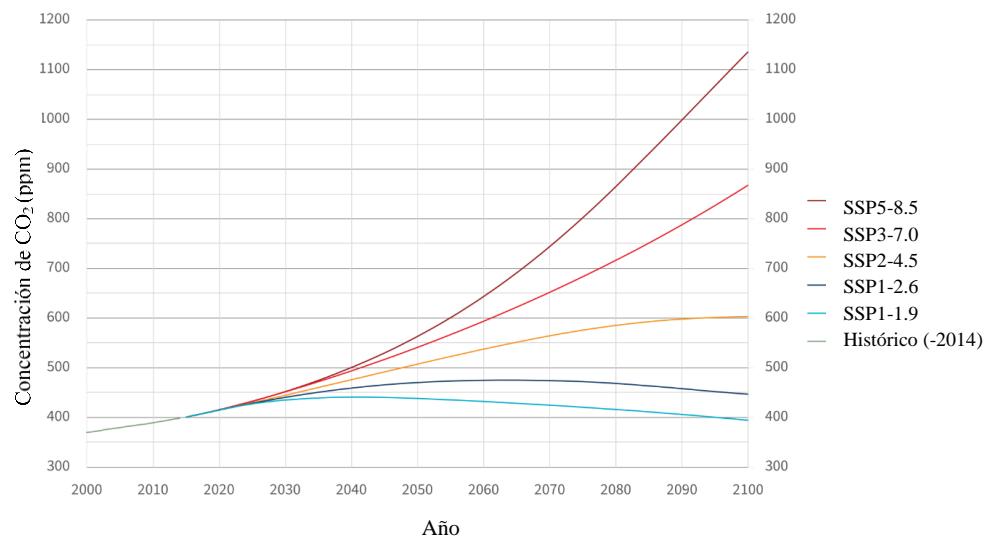


Figura 59: Concentraciones atmosféricas de CO₂ para cada escenario SSP

Fuente: Adaptada de “Vías Socioeconómicas Compartidas”, CarbonBrief, 2023, www.carbonbrief.org

3.6.4.2. Selección del Modelo de Circulación Global (GCM)

Definidos los escenarios climáticos a usas en el presente trabajo, se define el GCM a aplicar en el presente trabajo para obtener la proyección de las variables climáticas a futuro; precipitación y temperatura.

Según el MMAyA (2012), en su “anexo MetaDocumento” aplicando los sets de herramientas producidas en el Balance Hídrico Nacional les permitieron desarrollar narrativas específicas, ya sean de sequía; menor precipitación y mayor temperatura, o inundaciones; mayor precipitación. Forzando el balance hídrico con estos valores generados de forma sintética permite evaluar dichas condiciones y su efecto en riesgos asociados con el recurso hídrico. En sus conclusiones según el interés de estresar el sistema ya sea con condiciones secas o con condiciones húmedas, los modelos con mayor desempeño que seleccionaron son el MPI-ESM-MR y CESM1-CAM5 por sus condiciones de variabilidad con respecto a las observaciones históricas por sus condiciones de similitud con las observaciones históricas.

Por lo anteriormente mencionado, el presente trabajo aplica el modelo de cambio climático:

- MPI-ESM-MR; para condiciones secas. Situación más representativa por las condiciones geográficas y climáticas del área de estudio.

3.6.4.3. Downscaling

Definido el modelo de circulación global y los escenarios futuros se aplica el modelo de reducción de escala de la información climática futura, este se basó en la información de *WorldClim v2.1*.

WorldClim es una base de datos meteorológicos y climáticos mundiales de alta resolución espacial. Estos datos pueden utilizarse para cartografía y modelización espacial. Los datos se facilitan para su uso en investigación y actividades afines, y para utilizarlos se necesitan algunas habilidades y conocimientos especializados.

Los datos disponibles en WorldClim son proyecciones climáticas futuras de la CMIP6. Así mismo, El proceso de la reducción de escala y la calibración (corrección del sesgo) se realizaron con apoyo de los programas RStudio y sus librerías para las delimitaciones y procesamiento de la información en conjunto con WorldClim v2.1.

Los datos disponibles en la plataforma se elaboraron con un método sencillo y rápido, por lo que puede aplicarse fácilmente a todo el mundo y a muchos modelos. Comienza con el cambio previsto en una variable meteorológica (por ejemplo, la temperatura mínima en junio).

Se calcula como la diferencia (absoluta o relativa) entre el resultado de la ejecución del MCG para los años de referencia (normalmente 1960-1990 para los estudios sobre el clima futuro y "preindustrial" para los estudios sobre el clima pasado) y para los años objetivo (por ejemplo, 2021-2040). Estos cambios se interpolan en una cuadrícula de alta resolución (~ 1 km). Se supone que el cambio climático es relativamente estable en el espacio (alta autocorrelación espacial) (WorldClim, 2023).

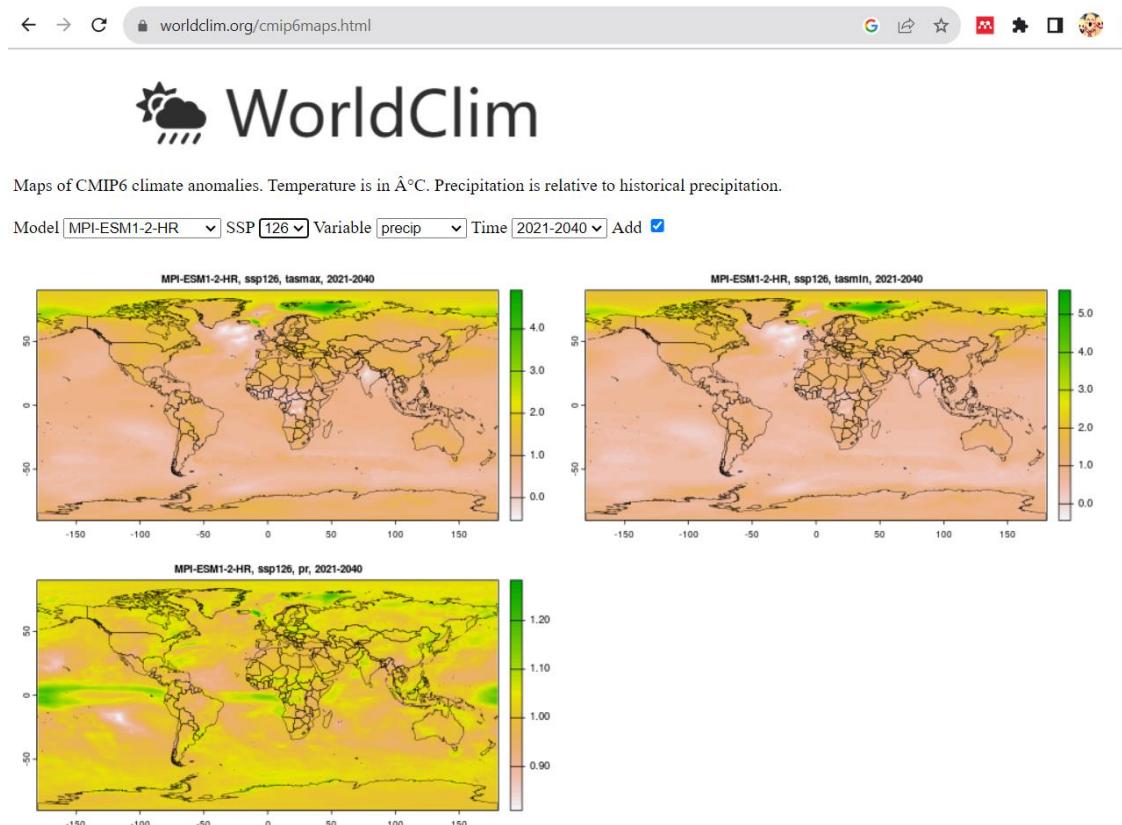


Figura 60: Vista de la plataforma para descargar los Modelos de Circulación Global, escenario y variables del clima futuro

Fuente: Tomada de “Mapas de anomalías climáticas de la CMIP6”, www.worldclim.org

Finalmente, teniendo las dos escalas de información de los archivos de clima, se bajó la escala de la información climática futura a nivel mensual, para cada escenario de cambio climático con ayuda del programa SAGA en su versión 9.2.0 como se muestra en la Figura 61, para finalmente bajar la resolución de la información climática cercana a 1 km².

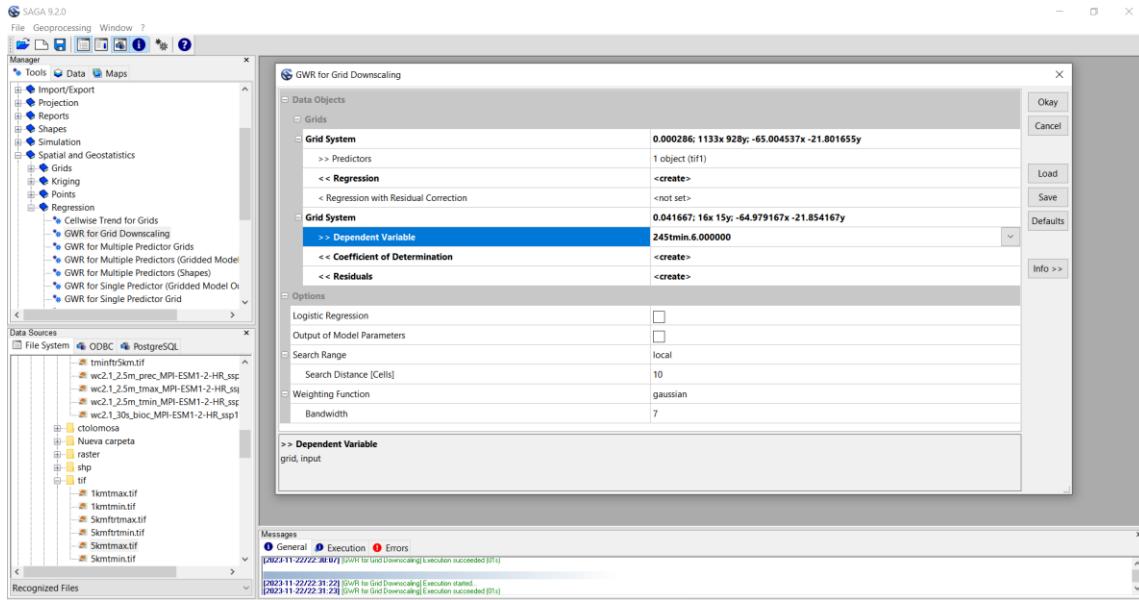


Figura 61: Proceso de downscaling en SAGA 9.2.0

Fuente: Tomado de la ejecución de SAGA 9.2.0

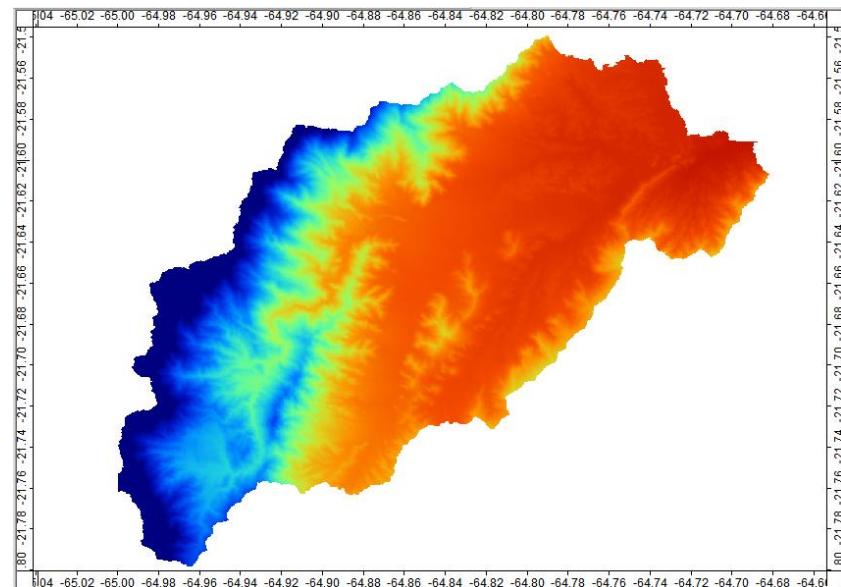


Figura 62: Resultado del downscaling de temperatura mínima para la cuenca del río Tolomosa, escenario de cambio climático: SSP585

Fuente: SAGA 9.2.0

3.6.4.4. Incremento y disminución mensual de precipitación y temperatura

En la Figura 63 se aprecia la comparación entre los valores de temperatura media mensual observada y de cada escenario climático, en los cuales se puede identificar que tiene un comportamiento similar a la serie observada.

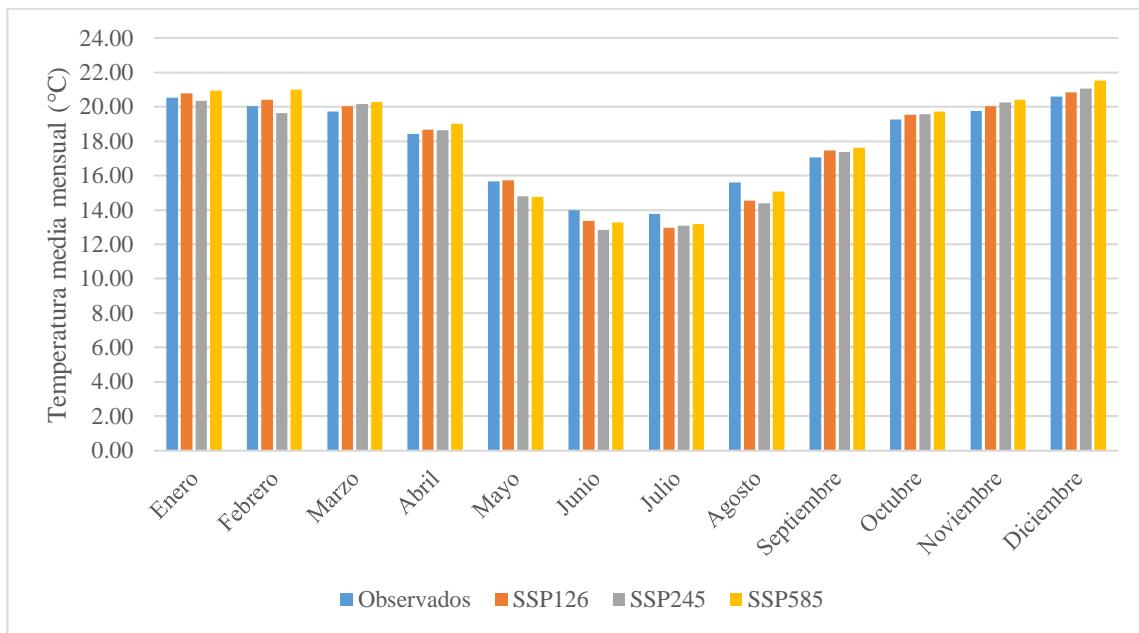


Figura 63: Temperatura media mensual de los escenarios climáticos y los datos observados

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 64 se aprecia la comparación entre los valores de precipitación media mensual observada y de cada escenario climático, en los cuales se puede identificar que tiene un comportamiento diferente a la serie observada.

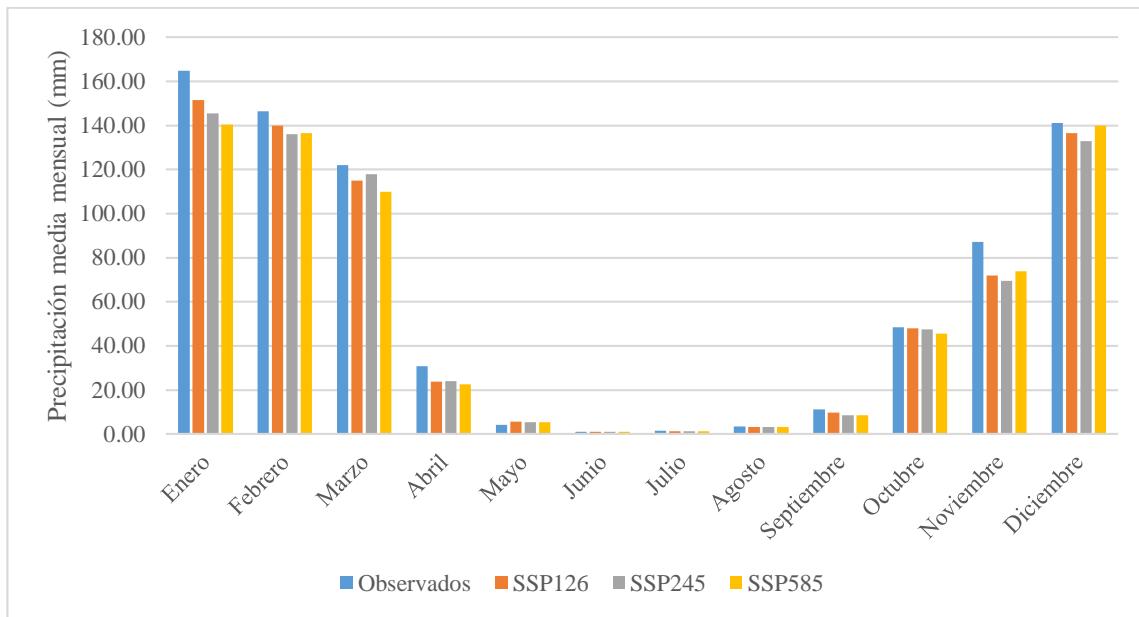


Figura 64: Precipitación media mensual de los escenarios climáticos y de los datos observados

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 22 se puede observar los valores de incremento y disminución de las variables en estudio de los escenarios de cambio climático, los mismos que serán aplicados en el módulo de cambio climático de la modelación hidrológica futura en HydroBID.

Tabla 22: Desviaciones mensuales de precipitación y temperatura por escenario de cambio climático

Mes/Escenario	SSP126		SSP245		SSP585	
	Temperatura +/-	Precipitación	Temperatura +/-	Precipitación	Temperatura +/-	Precipitación
Enero	0,26	0,92	0,19	0,88	0,41	0,85
Febrero	0,34	0,96	0,41	0,93	0,94	0,93
Marzo	0,31	0,94	0,43	0,97	0,58	0,90
Abril	0,25	0,77	0,22	0,78	0,60	0,73
Mayo	0,05	1,32	0,87	1,29	0,90	1,26
Junio	0,61	0,90	1,13	0,90	0,71	0,90
Julio	0,81	0,84	0,66	0,84	0,58	0,84
Agosto	1,05	0,91	1,20	0,91	0,53	0,91
Septiembre	0,41	0,87	0,31	0,75	0,56	0,75
Octubre	0,28	0,99	0,31	0,98	0,46	0,94
Noviembre	0,29	0,83	0,49	0,80	0,64	0,85
Diciembre	0,26	0,97	0,46	0,94	0,94	0,90

Fuente: Elaboración propia

3.6.5. Módulo de Reservorio

El módulo de reservorio o gestión de embalses en HydroBID, es una herramienta ser analizada en su aplicabilidad en este trabajo. La ubicación del embalse San Jacinto está especificada por el COMID de la salida del embalse: 313344203 para nuestro caso de estudio.

El caudal se dirige dentro de esta cuenca de captación utilizando el modelo de lluvia-escorrentía en HydroBID. El módulo del embalse en HydroBID calculará la descarga y el volumen de almacenamiento para cada paso de tiempo, según la opción de descarga del embalse especificada en la configuración.

3.6.5.1. Información de caudales y volúmenes del embalse

Para obtener una mayor precisión en el modelaje, las guías de HydroBID recomiendan aplicar valores mensuales. Para establecer estos parámetros mensuales del embalse San Jacinto, en la interfaz del embalse en HydroBID se selecciona la fila correspondiente al mismo y con un clic en “View Monthly” (vista por mes) se cargará una tabla, que permite la modificación de los parámetros como se muestra en la Figura 65.

month	min_daily_...	max_daily...	target_stor...	demand
1	0.321	0.346	18.09	0.903
2	0.321	1	18.09	1.092
3	0.321	0.03	18.09	1.094
4	0.321	0	18.09	0.412
5	0.321	0	18.09	0.273
6	0.321	0	18.09	0.226
7	0.321	0	18.09	0.161
8	0.321	0	18.09	0.173
9	0.321	0	18.09	0.192
10	0.321	0	18.09	0.183
11	0.321	0	18.09	0.14
12	0.321	0	18.09	0.078

Figura 65: Métricas mensuales de funcionamiento del embalse

Fuente: HydroBID II

Las columnas en la tabla de parámetros de embalse por mes están descritas en la Tabla 23.

Tabla 23: Parámetros necesarios a aplicar en el módulo de embalses

Nombre de campo [unidades]	Alias/Descripción (unidades)	Descripción
Month	Mes	Numero de mes 1 al 12 (enero a diciembre)
min_daily_flow	Caudal mínimo diario (m ³ /día).	Descarga mínima requerida. Puede utilizarse para especificar la demanda aguas abajo o los requerimientos de caudal ambiental.
max_daily_flow	Caudal máximo diario (m ³ /día).	Descarga máxima requerida Generalmente se usa para prevenir la irrupción accidental de agua.
target_storage	Meta de almacenamiento (millones de m ³).	Volumen de almacenamiento óptimo deseado.
demand	Uso para consumo	Total de la demanda de extracción de agua del embalse para el consumo.

Fuente: Adaptado de “HydroBID: Nuevas funcionalidades (simulación de embalses)”, Moreda F. et al., (2016)

3.6.5.2. Parámetros de modelación

Los valores de los parámetros a ser usados y definidos en el proceso de modelación para escenarios futuros, fueron tomados de la información compartida por el PMSJ a requerimiento de este trabajo, los mismos se detallan en la Tabla 24.

Tabla 24: Valores de los parámetros del módulo de embalses para el embalse San Jacinto

Field Name (Nombre variable)	Alias/Descripción (unidades)	Descripción	Valor
comid	COMID	ID de la salida/output de la cuenca de captación	313344203
name	Nombre del embalse	Etiqueta para los resultados del embalse	San Jacinto
shapeparameter_a	Parámetro de forma a	Define la relación de área de superficie-volumen	-1
shapeparameter_b	Parámetro de forma b	Define la relación de área de superficie-volumen	-2
option_number	Número de opción	Especifica el conjunto de reglas que rigen las tasas de descarga	2
evap_coeff	Coeficiente de evaporación	Coeficiente empírico de evaporación	4,89

hydraulic_conductivity	Conductividad hidráulica (cm/día).	Define las pérdidas de aguas subterráneas	0,1
nonflood_season_bein	Inicio de la temporada sin inundación	Número del mes para el inicio de la temporada sin inundación	10
nonflood_season_end	Fin de la temporada sin inundación	Número del mes para el final de la temporada sin inundación	12
number_day_target	Número de días para llegar a la meta	Número de días disponibles para satisfacer el requerimiento de almacenamiento mensual	15
principal_vol	Volumen principal (millones de m ³)	Volumen mínimo útil del embalse	18,09
flood_vol	Volumen de inundación (millones de m ³).	Volumen máximo del embalse	42,996
max_surface_area	Extensión del área de superficie máxima (km ²).	Superficie de inundación del embalse	5,351
avg_daily_release	Promedio diario de descarga (m ³ /día).	Descarga diaria (promedio anual)	0
initial_vol	Volumen inicial (m ³).	Volumen al inicio de la simulación en Hydro BID	18,09
type	Variable del tipo de embalse	Variable interna usada por Hydro-BID	2

Fuente: Elaboración propia

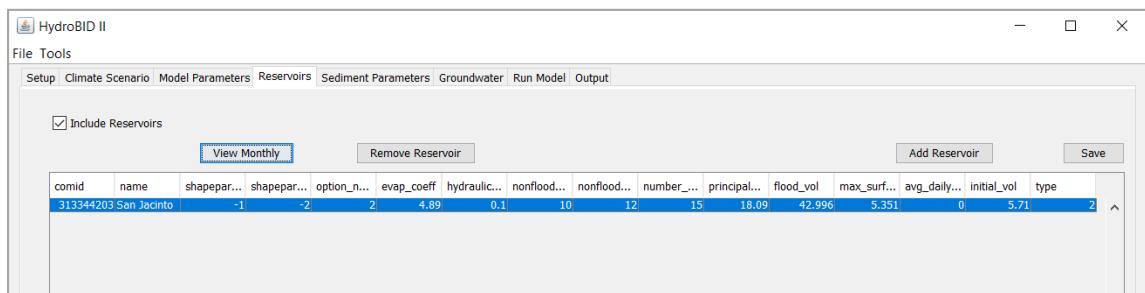


Figura 66: Parámetros del embalse San Jacinto para HydroBID

Fuente: HydroBID II

La salida de los resultados de los volúmenes el embalse simulados para la serie de tiempo de caudal de descarga, el almacenamiento y la demanda están disponibles en

la carpeta especificada como “Reservoir Dir”; en la página de configuración de Hydro-BID.

3.6.6. Modelación de caudales futuros bajo escenarios de cambio climático

Para la estimación de los caudales futuros, bajo cada escenario de cambio climático se realizó con la implementación de los factores de incremento o disminución mensual de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y el multiplicador de incremento o disminución de precipitación (%). Para realizar la proyección futura de los mismos, se correrá el modelo con la aplicación de los parámetros obtenidos y ajustados en la calibración de la cuenca.

Para cada escenario se realizó la modificación de los valores de incremento y disminución mensual en la ventana de “Climate Scenario” en HydroBID. Así mismo, se activa e incorpora el módulo de gestión de embalses para incorporarlo en la ejecución, para posteriormente correr el modelo y obtener las series de caudales para cada una de las condiciones futuras durante el periodo 01/01/2023 al 31/12/2040, en temporalidad mensual y modificada a partir de los cambios implementados con las desviaciones o variaciones mensuales de los escenarios climáticos SSP126, SSP245 y SSP585 que representa la escorrentía generada a lo largo de la cuenca del río Tolomosa.

En la Figura 67 se puede constatar la evolución de los caudales mensuales proyectados bajo escenario de cambio climático desde enero de 2023 a diciembre de 2040, donde se observa una disminución gradual de la disponibilidad hídrica y una representación más crítica la del escenario SSP585.

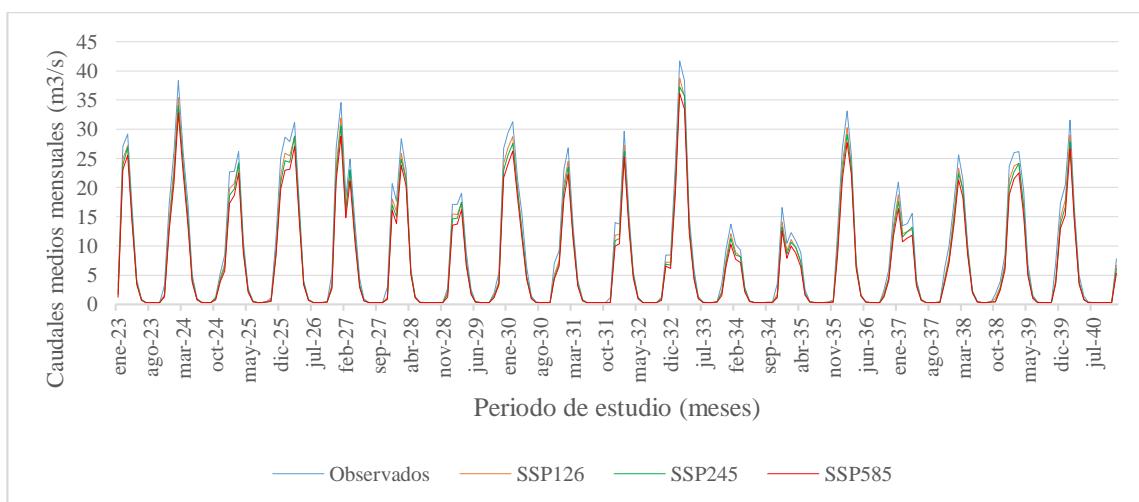


Figura 67: Caudales medios mensuales proyectados bajo escenarios climáticos

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se obtuvieron los porcentajes de variación de caudales anual, comparando los tres escenarios de cambio climático respecto a la continuidad del escenario actual. Los resultados se muestran en la **Tabla 25** donde se observa que el escenario SSP585 representa el mayor porcentaje de disminución interanual de un 20,41%.

Tabla 25: Variación media interanual del caudal por escenario climático proyectado

Escenario	Periodo	Caudal (m ³ /s)	Variación de volumen (%)
Actual	2023-2040	8,58	
SSP126	2023-2041	7,60	-11,59
SSP245	2023-2042	7,36	-14,54
SSP585	2023-2043	6,86	-20,41

Fuente: Elaboración propia

3.7. Análisis de oferta y demanda hídrica superficial en la cuenca.

El presente trabajo conceptualiza las demandas actuales de volúmenes de agua administradas por el PMSJ para: generación energía por la hidroeléctrica San Jacinto, riego por gravedad, bombeo para estación La Tablada, caudal ecológico, así mismo se consideran los volúmenes de perdidas estimados, para analizar la seguridad del recurso hídrico superficial de oferta futura bajo escenarios de cambio climático, considerando el embalse San Jacinto dentro de la modelación hidrológica de la cuenca.

Así mismo, se considera un análisis previo (01/01/2000 al 31/12/2015) al de modelación futura, sin influencia de los escenarios climáticos con la finalidad de comprender y analizar la aplicabilidad de HydroBID y su módulo de embalse en el procesamiento de datos climáticos medidos, generados y administrados para el estudio del embalse San Jacinto, ambos análisis se desarrollan en los siguientes puntos.

3.7.1. Operacionalidad del embalse San Jacinto para el periodo 2000-2015

Tal como se detalla en los apartados anteriores, así como en la en la Tabla 23 y Tabla 24, la determinación de los parámetros hidrológicos utilizados en la simulación del modelo para el periodo 2000–2015 se basa en los datos disponibles de demandas, niveles del embalse y volúmenes de salida registrados por el Proyecto Múltiple San Jacinto (PMSJ).

Para este análisis se considera información únicamente hasta el año 2015, debido a que los caudales medios mensuales medidos de manera directa no se encontraban disponibles para los años anteriores a 2022. En su lugar, se emplearon los valores de caudales generados por COBEE SA y previamente validados mediante simulaciones previas en conjunto con el embalse, los cuales han sido utilizados institucionalmente para la planificación y evaluación del sistema en gestiones anteriores. La elección de estos caudales generados responde a la falta de registros hidrométricos confiables previos a 2022, ya que en ese periodo solo se disponía de información parcial. Esta aproximación permite analizar la operacionalidad del embalse con base en información validada y utilizada oficialmente por el PMSJ, garantizando así coherencia metodológica en la simulación hidrológica.

En la **Tabla 26** se puede observar las demandas mensuales en hm^3 para los usos anteriormente mencionados.

Tabla 26: Volúmenes de agua administradas por el PMSJ para el periodo 2000-2015

Mes	Días	Generación hidroeléctrica (m^3)	Riego gravedad (m^3)	Bombeo tablada (m^3)	Compuertas de fondo (m^3)	Caudal ecológico (m^3)	Demanda (millones m^3)
Enero	30	27407571,4	89489,6	3291,8	15904,7	1071360,0	28,58
Febrero	28	34217307,3	74351,2	1196,6	58687,5	976320,0	35,33
Marzo	31	37104477,5	86856,5	3755,3	40500,0	1071360,0	38,30
Abril	30	23463003,9	123087,4	9107,3	0,0	1036800,0	24,62
Mayo	31	11933513,8	115703,9	8317,6	0,0	1071360,0	13,12
Junio	30	7764228,9	143837,1	6957,0	0,0	1036800,0	8,94
Julio	31	7037298,6	128571,5	8546,3	0,0	1071360,0	8,24
Agosto	31	7209723,9	117733,8	15698,7	0,0	1071360,0	8,40
Septiembre	30	6448869,2	169401,8	38805,1	0,0	1036800,0	7,66
Octubre	31	6579958,6	168508,3	50871,5	0,0	1071360,0	7,82
Noviembre	30	6034156,1	141130,4	43114,8	0,0	1036800,0	7,21
Diciembre	31	10513330,2	166063,3	14929,9	0,0	1071360,0	11,75

Fuente: Elaboración propia

La metodología empleada permite analizar la confiabilidad y vulnerabilidad del embalse en el cumplimiento de su volumen mínimo operacional, en base a la información de caudales, registro de niveles de cota y datos de demandas del embalse.

a) De la simulación hidrológica en HydroBID

. La simulación se realizó para todo el periodo 2000-2015, y se generaron series mensuales de volúmenes almacenados que fueron posteriormente comparados con los volúmenes medidos. Se adoptó un valor de 9,92 hm³ como volumen mínimo operacional, valor medido en la batimetría del periodo en estudio correspondiente a la cota 1972 m.s.n.m., definido a partir de las características técnicas del embalse, que representa el umbral de almacenamiento por debajo del cual se compromete el funcionamiento del sistema y la entrega de agua para los distintos usos.

Tabla 27: Sección de volumen mínimo operacionales y porcentajes de reducción para el periodo 2000-2015

Mes/Año	Volumen Simulado (hm ³)	Volumen medido (hm ³)	Diferencia (m ³)	Porcentaje de reducción (%)	Observación
ene-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
feb-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
mar-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
abr-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
may-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
jun-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
Jul-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
ago-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
sep-2000	9,70	9,92	-0,22	-2,18	Déficit
oct-2000	9,39	9,92	-0,53	-5,32	Déficit
nov-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
dic-2000	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
ene-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
feb-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
mar-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
abr-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
may-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
jun-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
Jul-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
ago-2015	9,91	9,92	-0,01	-0,12	Déficit
sep-2015	9,71	9,92	-0,21	-2,12	Déficit
oct-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
nov-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple
dic-2015	9,92	9,92	0,00	0,00	Cumple

Fuente: Elaboración propia

El reporte total de los volúmenes operacionales para el total del periodo a escala mensual se encuentra en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

En la Tabla 27 logramos entender parte del comportamiento de la simulación del embalse a escala mensual referido al volumen mínimo operacional controlado por el PMSJ en el embalse.

b) Indicadores de evaluación de seguridad hídrica

De igual manera para poder cuantificar la relación entre el volumen mínimo operacional y la seguridad hídrica se aplicarán indicadores técnicos como: la frecuencia de cumplimiento operacional (%), déficit mensual, porcentaje de reducción. Estos indicadores permiten evaluar el grado de confiabilidad del embalse como regulador hídrico y su capacidad para sostener el abastecimiento a lo largo del tiempo, incluso sin considerar aún escenarios de cambio climático.

3.7.2. Operacionalidad estimada del embalse San Jacinto para el periodo 2023-2040

En la modelación hidrológica de la cuenca del río Tolomosa considerando la estructura del embalse San Jacinto para el periodo de proyección futura, se tomó como base de datos los últimos registros medidos y administrados por el PMSJ a la gestión 2022 y los registros de la última batimetría de la gestión 2019. En la **Tabla 28** se puede observar las demandas mensuales en hm³ para los usos anteriormente mencionados.

Tabla 28: Volúmenes de demandas de agua administradas por el PMSJ al año 2022

Mes	Días	Hidroeléctrica San Jacinto	Riego por Gravedad PMSJ	Bombeo Estación Tablada	Caudal Ecológico	Total mensual (m ³)	Total mensual (hm ³)
Enero	31	26486567.8	1157646.1	19836.0	321408.0	27985457.9	27.99
Febrero	28	29676777.8	591885.8	8712.0	290304.0	30567679.6	30.57
Marzo	31	31917694.0	1648380.3	44928.0	321408.0	33932410.3	33.93
Abril	30	10332421.6	1656752.0	50580.0	311040.0	12350793.6	12.35
Mayo	31	6552504.8	1554695.6	42084.0	321408.0	8470692.4	8.47
Junio	30	5221199.7	1217428.1	50220.0	311040.0	6799887.8	6.80
Julio	31	3447025.2	1170087.0	65088.0	321408.0	5003608.2	5.00

Agosto	31	3306305.1	1657270.7	98100.0	321408.0	5383083.8	5.38
Septiembre	30	3690031.2	1680189.6	102744.0	311040.0	5784004.8	5.78
Octubre	31	3374928.8	1882530.4	118296.0	321408.0	5697163.2	5.70
Noviembre	30	1696458.6	1800226.4	142776.0	311040.0	3950501.0	3.95
Diciembre	31	1016092.7	1053432.0	14544.0	321408.0	2405476.7	2.41
Total Anual (m³)	365	126718007.3	17070524.0	757908.0	3784320.0	148330759.3	148.33

Fuente: Elaboración propia

En la cuenca del río Tolomosa, se considera como principal estructura para la operatividad de la misma al embalse San Jacinto, el cual tiene una capacidad máxima de almacenamiento igual a 42.995.997,95 m³ en su cota 1984 m.s.n.m, y un volumen mínimo de operación actual igual a 18,09 hm³ para la cota 1978 m.s.n.m.

De igual manera, se tomó la información proporcionada por el PMSJ como punto de partida, las ultimas condiciones monitoreadas con datos registrados al año 2022 para la modelación en conjunto de la cuenca en HydroBID en su proyección al periodo 2023 al 2040 (mencionado en los puntos anteriores). Así mismo, datos climáticos proyectados bajo los escenarios SSP126 (bajo), SSP245 (moderado) y SSP585 (alto), los cuales son definido en los apartados anteriores “Modulo de cambio climático”.

a) De la simulación hidrología en HydroBID

Se modeló la cuenca del río Tolomosa en HydroBID, integrando las condiciones actuales del embalse San Jacinto, proyecciones climáticas y parámetros calibrados. Se realizaron simulaciones para cada escenario (SSP126, SSP245 y SSP585) en el periodo 2023–2040.

La salida del modelo proporcionó el volumen disponible para operación a nivel mensual y anual. Estos valores fueron comparados con el volumen mínimo operacional para evaluar si el sistema cumple con las demandas y si mantiene o no la seguridad hídrica.

Tabla 29: Sección de la proyección de volúmenes mínimos operacionales bajo escenarios climáticos, diferencias y porcentajes de variación, para el año 2029

Volúmenes mínimos operacionales (hm ³)		Volúmenes mínimos Op. bajo escenarios de cambio (hm ³)			Diferencia de volúmenes (m ³)			Porcentaje de variación (%)		
	Simulado	SSP12 ₆	SSP24 ₅	SSP58 ₅	SSP12 ₆	SSP24 ₅	SSP58 ₅	SSP12 ₆	SSP24 ₅	SSP58 ₅
ene-29	18,10	18,09	18,09	18,09	0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,06	-0,06
feb-29	18,10	18,09	18,09	18,09	0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,06	-0,06
mar-29	18,10	18,09	18,09	18,09	0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,06	-0,06
abr-29	18,10	18,09	18,09	18,09	0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,06	-0,06
may-29	18,10	18,09	18,09	18,09	0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,06	-0,06
jun-29	18,07	18,02	18,03	18,00	0,05	0,05	0,07	-0,28	-0,25	-0,40
jul-29	17,52	17,34	17,36	17,26	0,19	0,17	0,26	-1,07	-0,95	-1,50
ago-29	16,30	16,09	16,11	15,99	0,22	0,19	0,32	-1,32	-1,18	-1,94
sep-29	14,89	14,68	14,71	14,57	0,21	0,18	0,32	-1,42	-1,24	-2,16
oct-29	17,25	17,07	17,00	16,86	0,18	0,25	0,39	-1,05	-1,45	-2,25
nov-29	18,10	18,09	18,09	18,09	0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,06	-0,06
dic-29	18,10	18,09	18,09	18,09	0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,06	-0,06

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 29 se aprecia el resultado de la metodología de modelación de HydroBID para el año 2029 y la tendencia periódica de reducción de volúmenes por estrés hídrico que varía por año oscilando en entre los mismos meses, que se desarrollaran en análisis dentro del capítulo 4: Análisis de Resultados.

En la Tabla 30 se muestra la disponibilidad promedio anual en hm³ bajo la influencia de escenarios de cambio climático de los volúmenes de mínimos de operación proyectados para el embalse San Jacinto, en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se aprecia los reportes completos de estos valores a nivel mensual en función a las proyecciones de las variables climáticas futuras bajo escenarios de cambio climático, en la cual se aprecia la variabilidad de la

disponibilidad hídrica en el embalse y la cuenca para satisfacer la demanda de agua a escala media mensual multianual y media anual.

Tabla 30: Proyección de la reducción de los volúmenes mínimos operacionales medios anuales (hm^3)

Proyección de volúmenes mínimos operacionales (hm^3)			
Año	SSP126	SSP245	SSP585
2023	17,071	17,069	17,035
2024	17,486	17,489	17,450
2025	17,378	17,349	17,306
2026	17,368	17,366	17,305
2027	16,985	16,986	16,936
2028	16,195	16,178	16,107
2029	17,485	17,486	17,442
2030	17,331	17,335	17,291
2031	16,640	16,624	16,528
2032	17,107	17,113	17,060
2033	17,387	17,386	17,323
2034	17,585	17,561	17,425
2035	17,096	16,983	16,874
2036	17,327	17,288	17,249
2037	17,443	17,446	17,387
2038	17,610	17,512	17,472
2039	17,446	17,391	17,353
2040	16,206	16,200	16,119

Fuente: Elaboración propia

Por los resultados expuesto en la Tabla 31, los volúmenes que fueron modelados bajo los parámetros actuales y de calibración, se obtuvo el porcentaje de variación de los volúmenes, donde se aprecia que ante los futuros escenarios se presenta un déficit porcentual en los volúmenes de disponibilidad para cumplir las demandas bajo condiciones actuales. De igual manera en el anexo 6 se aprecia estos resultados a nivel mensual.

Tabla 31: Porcentaje de variación media de las proyecciones de volúmenes operacionales del embalse a mediano plazo 2023-2040

Año	Porcentaje de variación (%)		
	SSP126	SSP245	SSP585
2023	-0.451	-0.469	-0.689
2024	-0.263	-0.245	-0.486
2025	-0.605	-0.796	-1.063
2026	-0.222	-0.232	-0.608
2027	-1.238	-1.233	-1.559
2028	-0.413	-0.522	-1.014
2029	-0.461	-0.455	-0.719
2030	-0.507	-0.481	-0.756
2031	-1.004	-1.105	-1.733
2032	-0.200	-0.165	-0.512
2033	-0.361	-0.365	-0.753
2034	-1.271	-1.408	-2.177
2035	-1.433	-2.098	-2.747
2036	-0.409	-0.654	-0.894
2037	-1.136	-1.118	-1.470
2038	-0.527	-1.083	-1.321
2039	-0.956	-1.291	-1.520
2040	-1.115	-1.151	-1.705

Fuente: Elaboración propia

b) Indicadores de evaluación de seguridad hídrica

Se analizó la capacidad del embalse para garantizar el suministro, priorizando usos estratégicos, la resiliencia del sistema ante la variabilidad climática, y la posible necesidad de adaptación en la gestión del agua, tomando en cuenta como indicadores el volumen diferencial, los porcentajes de variación de volúmenes, la frecuencia de incumplimiento en los meses de mayor vulnerabilidad.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

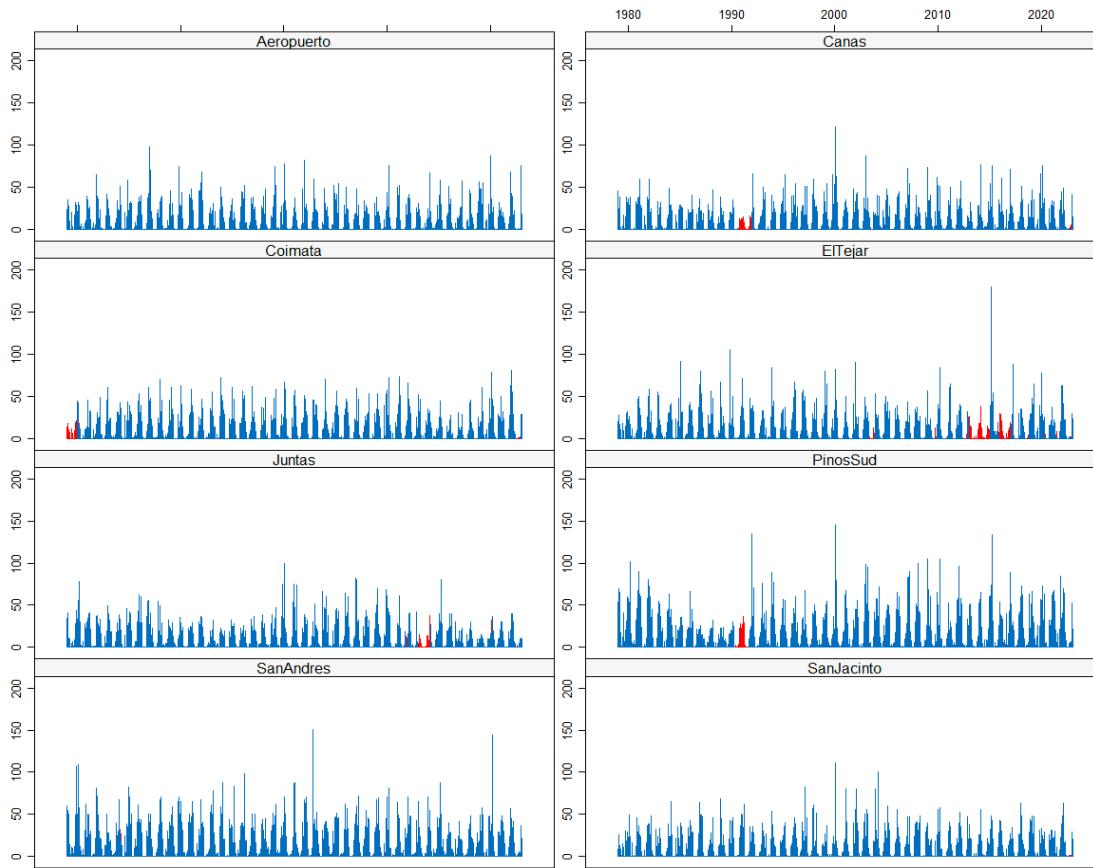
4.1. De la base de información

4.1.1. Discriminación de anomalías

Con el paquete de Climatool 4.0 y su librería *homogen*, se facilitó el análisis de homogenización por el método SNHT para la detección de inhomogeneidades o anomalías en las series de datos diarios de precipitaciones y temperatura máxima y mínima, debido a la gran magnitud de los mismos, se logró identificar, aislar y depurar los datos anómalos y atípicos, para posteriormente realizar los análisis estadísticos y gráficos para poner la serie homogénea para su posterior relleno de las series faltantes.

4.1.2. Relleno de series incompletas de precipitación

Para analizar el comportamiento de los valores rellenados de la serie incompleta de precipitación, inicialmente se realizó un análisis gráfico entre los valores observados incompletos y los rellenados, donde se aprecia un comportamiento homogéneo a los períodos de series completas.



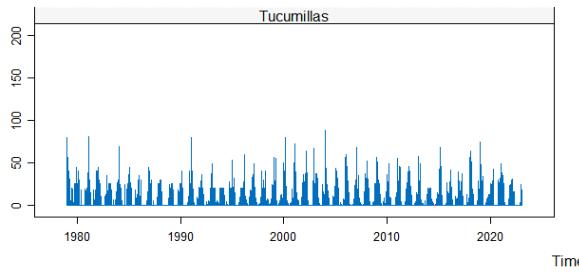


Figura 68: Precipitación diaria de datos completos

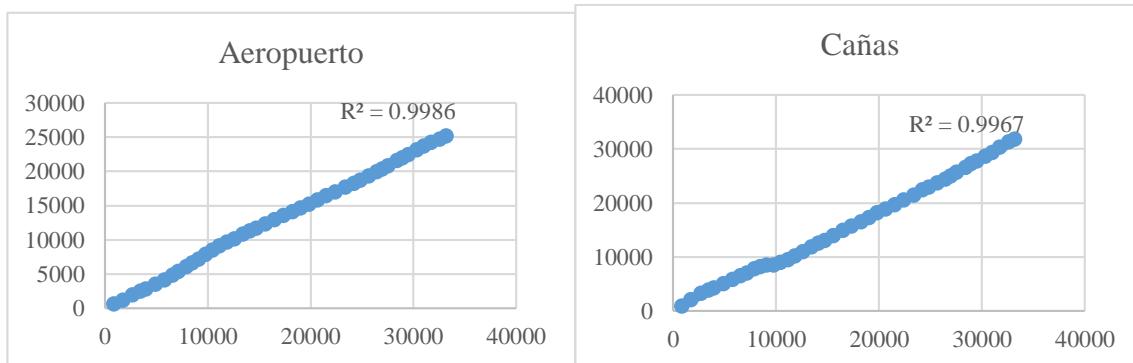
Fuente: Elaborado en RStudio (color azul serie observada y color rojo serie rellena)

Análisis doble masa de las series

El análisis de consistencia de doble masa se utilizó para relacionar la precipitación anual acumulada de una estación específica (llamada estación X) con el valor medio correspondiente de la precipitación anual acumulada de una serie de estaciones denominada la misma como estación patrón. Si la estación X ha sido correctamente observada, los puntos en el gráfico deberían alinearse en una línea recta. Sin embargo, si se observa algún quiebre o cambio de pendiente en la línea, esto indica que es necesario corregir la estadística de la estación analizada.

En el presente trabajo se utilizó el promedio de las estaciones de El Tejar y Aeropuerto, de la ciudad de Tarija como estación patrón para el análisis. Al observar los gráficos siguientes, se puede apreciar que la información de las estaciones seleccionadas es consistente y muestra una tendencia similar.

En las gráficas de la Figura 69 los resultados validan un ajuste óptimo entre las estaciones, con un parámetro de ajuste promedio entre todas las estaciones $R^2=0,9975$.



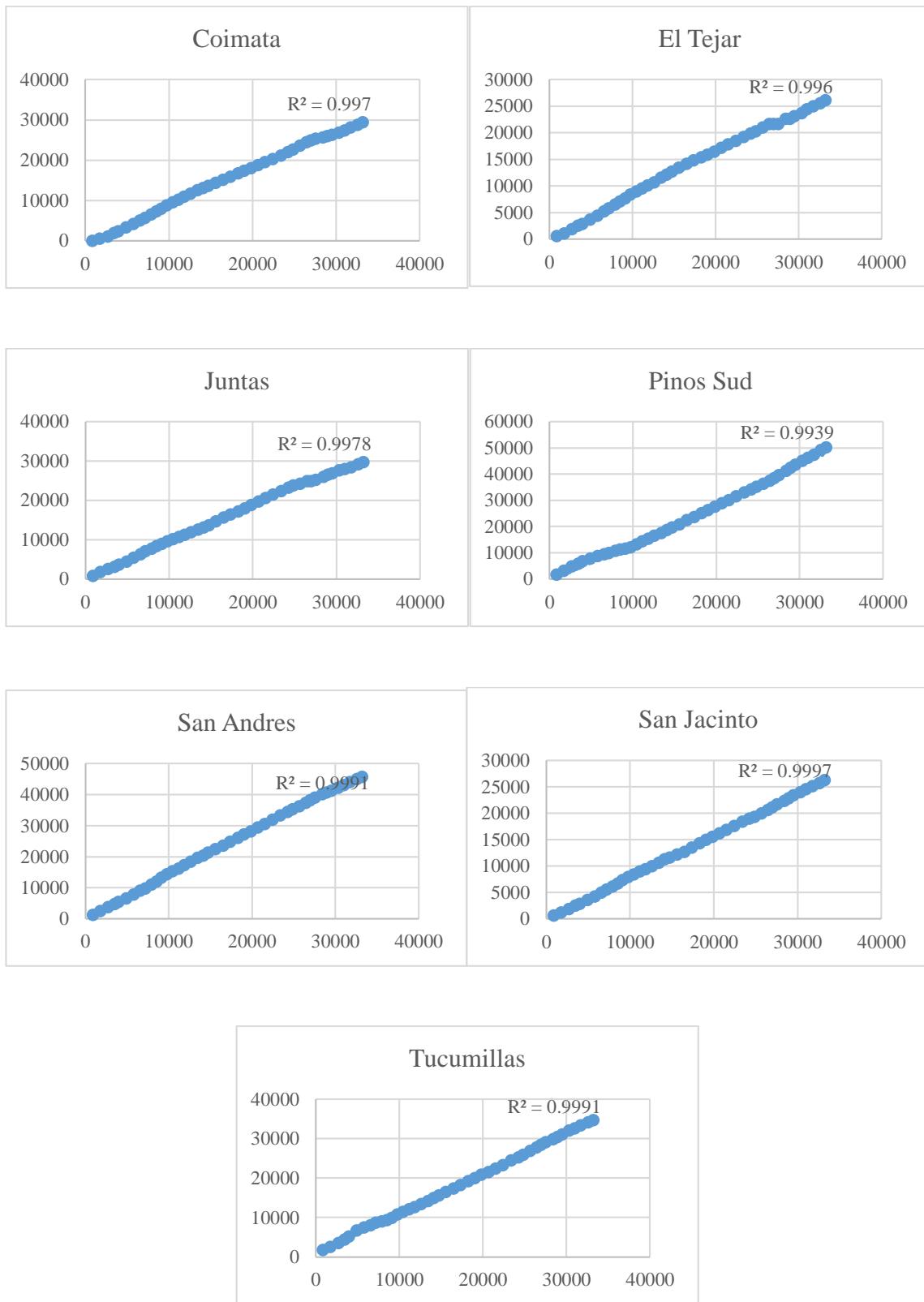


Figura 69: Curva doble masa para las estaciones pluviométricas.

Fuente: Elaboración propia

Matriz de correlación para la serie de precipitación

La matriz de correlación para las series cronológicas entre las estaciones nos indica que está presente una relación positiva relativamente moderada entre las estaciones para la base de datos diarias, estos valores no son cercanos a +/- 1 debido a la influencia del tamaño de la muestra, la presencia de eventos extremos en las series de datos y la variabilidad de la de precipitación a nivel diario.

Con la correlación determinada se llenó las series de datos faltantes en el programa *FillData*, aplicando el método razón normal, en función a la mejor correlación de las estaciones, obteniéndose valores aceptados para su aplicación en el trabajo

4.1.3. Del relleno de series incompletas de temperaturas máximas y mínimas

De igual manera que para el caso de la precipitación; para las variables de temperatura máxima y mínima se completó las series de datos faltantes con ayuda del programa *FillData*, se determinó el coeficiente de correlación de Pearson para estimar la correlación entre estaciones, obteniéndose valores que indican una correlación positiva moderada y posteriormente se aplicó el método de relleno *razón normal*, obteniendo las series completas para el periodo de la base de datos de cada estación.

En la Figura 70 y Figura 71 se aprecian los hidrogramas para las series de datos rellenados (color rojo) y observados (color azul), las mismas que señalan una tendencia semejante en el comportamiento de la variabilidad de la series rellenadas a las observadas, lo cual nos indica valores óptimos a ser empleados en el trabajo.

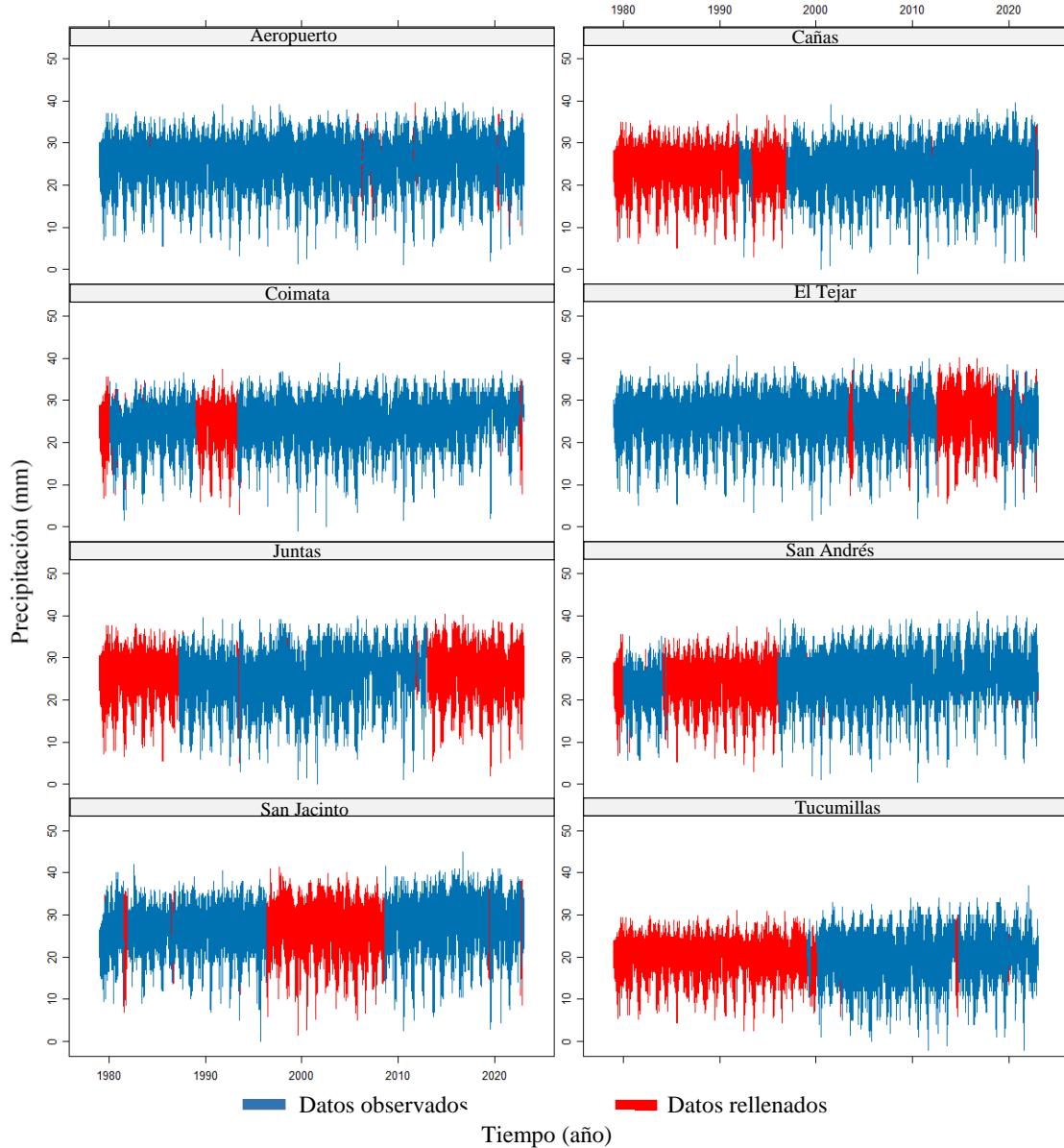


Figura 70: Serie de temperaturas máximas diarias completas

Fuente: Elaboración propia en RStudio.

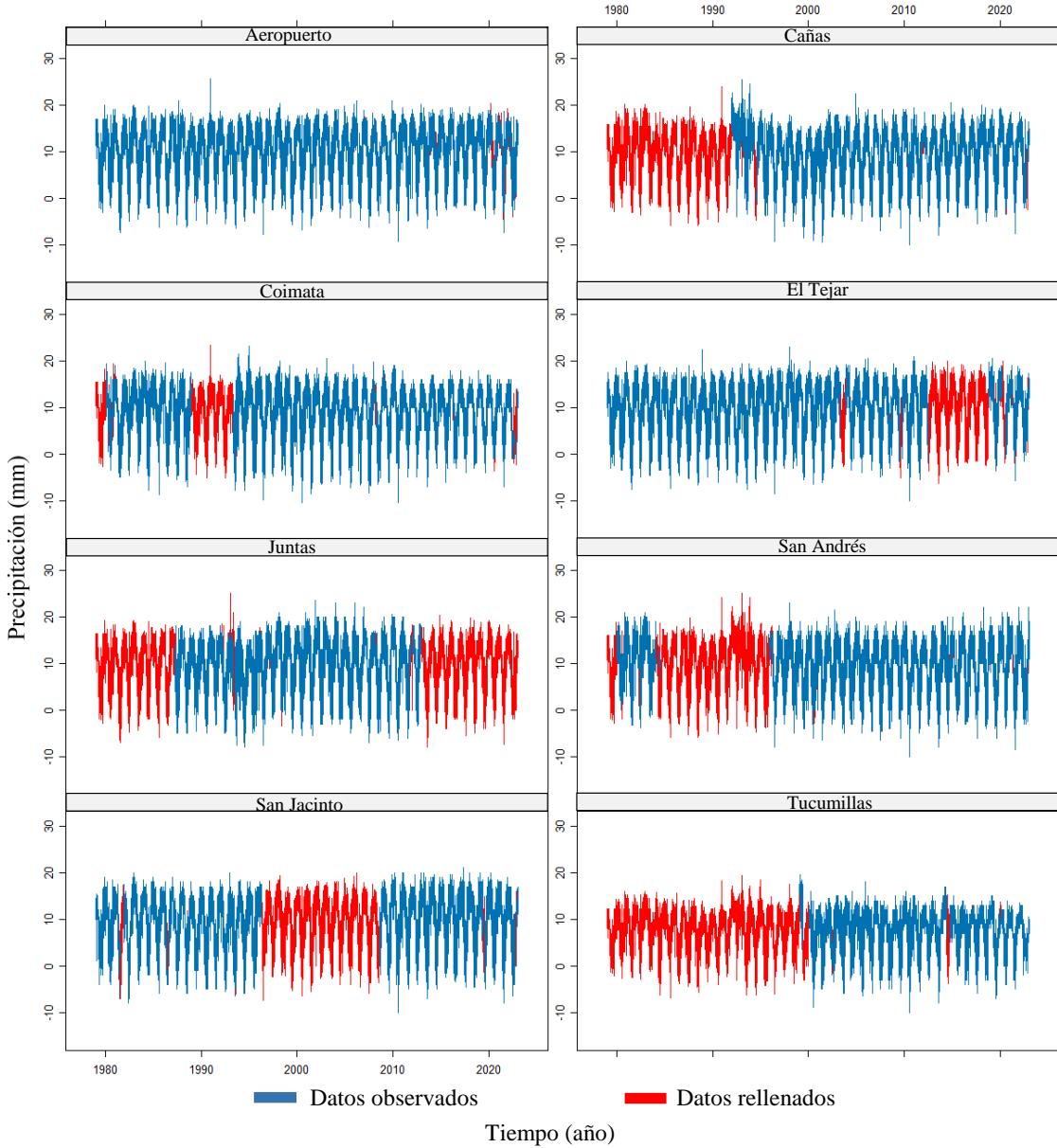


Figura 71: Serie de temperaturas mínimas diarias completas

Fuente: Elaboración propia en RStudio.

4.2. De HydroBID

4.2.1. De la calibración y validación

La escasez de información hidrométrica diaria en la zona de estudio dificulta la calibración del modelo. Sin embargo, se tomó en cuenta el periodo de datos disponibles en la estación hidrométrica San Jacinto para definir el periodo de años para calibrar y validar el modelo.

Calibración

La calibración empezó con la variación de la infiltración o seepage, este parámetro permite aumentar o disminuir el volumen de escorrentía ya que relaciona la cantidad de agua que pasa de la superficie hacia el suelo. Posteriormente, se realizó una modificación en el coeficiente de recesión para ajustar los eventos de alto caudal. En el caso de caudales elevados, se trabajó con una disminución del número de curva y se ajustó el contenido de agua disponible para tratar de manejar los caudales bajos. Esto se debe a que la disponibilidad de agua en el suelo está relacionada con la capacidad de la planta para extraer agua de un perfil de suelo. Además, se realizaron cambios en los factores de evapotranspiración en la temporada durmiente en caso de tener cultivos en la zona, así como en el porcentaje de superficie impermeable, que por defecto es 1.

Al trabajar la calibración de los parámetros se pudo constatar que es recomendable trabajar en conjunto el Coeficiente de recesión (R) junto a las perdidas por infiltración (seepage); disminuir el coeficiente de recesión influye en un mayor incremento de la escorrentía en los caudales bajos y de igual manera el seepage. Disminuir el número de Curva (NC) reduce los caudales altos, reducir el número el multiplicador del contenido de agua disponible influye en un incremento gradual de los caudales de época húmeda y así mismo se relaciona con el coeficiente de recesión, disminuir el valor del factor de evapotranspiración en temporada durmiente aumenta los caudales en temporada seca y gradualmente en temporada húmeda.

Es importante tener en cuenta que, en el caso de los parámetros de número de curva y contenido de agua disponible, el valor ingresado es un multiplicador. Esto significa que se utiliza para ajustar o escalar el valor base del parámetro. Por otro lado, para los otros parámetros, el valor ingresado es un valor de reemplazo. Esto implica que se utiliza directamente como el valor real del parámetro sin necesidad de aplicar ningún tipo de multiplicación o ajuste adicional.

Para obtener los resultados finales de calibración se realizaron más de 40 pruebas entre ajustes de los casos con métricas de desempeño muy bajas a altas, obteniendo los parámetros de la Tabla 32.

Tabla 32: Parámetros ajustados de calibración

Parámetro	Valor ajustado
Curve Number	0,7
AWC	0,075
R Coefficient	0,045
Seepage	0,00005
Grow season ET	1
Dormant season ET	0,65

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de calibración final se determinan en función de las métricas de desempeño obtenidas durante el proceso de calibración. Los valores obtenidos de las mismas (ver **Figura 72**), reflejan lo cercano que se encuentran los resultados de la simulación al rango óptimo, esto demuestra que los resultados finales de la simulación para la cuenca del río Tolomosa son confiables y que el modelo representa con buena precisión la realidad de la zona de estudio, teniendo en cuenta la gran variabilidad de las condiciones diarias.

Overall Statistics		Reservoir Statistics
Statistic	Value	
Overall volume ...	16.41	
Correlation, $r(-)$	0.72	
Modified Correl...	0.61	
Nash-Sutcliffe E...	0.49	

Figura 72: Métricas de desempeño de la Calibración

Fuente: Elaboración propia en HydroBID II

Adicional a las métricas de desempeño, un método para estimar una buena calibración es realizar un análisis gráfico del flujo simulado respecto al observado, estas graficas son indicadores de cómo ir manipulando los parámetros de calibración, para subir o bajar los picos o caudales bajos que es en lo que más se complicó en el presente trabajo. En las Figura 73 observamos la curva de duración de caudales e Hidrograma de caudales simulados respecto a los observados.

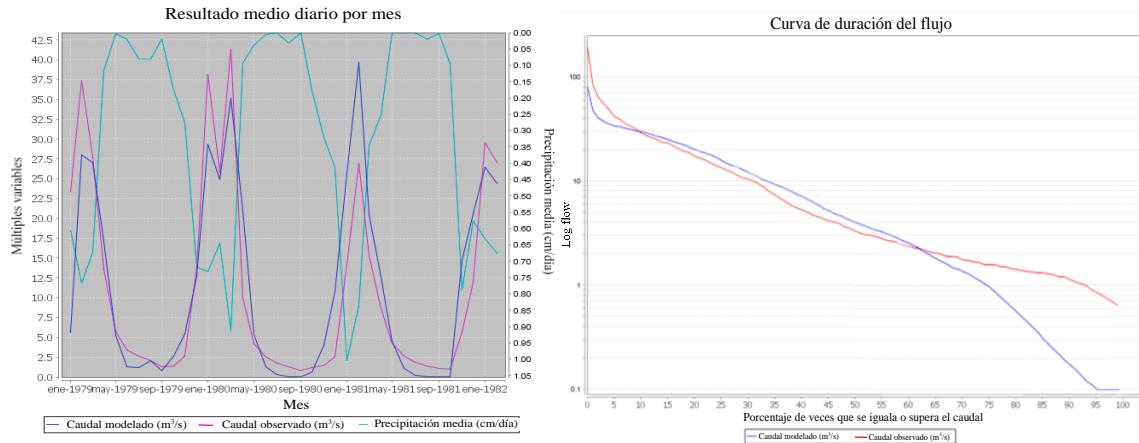


Figura 73: Hidrograma y curva de duración de flujo de calibración

Fuente: Elaboración propia en HydroBID II

Validación

Para certificar que el proceso de calibración y los parámetros obtenidos, se realizó la validación de los mismos para una serie de caudales de 01/03/1982 al 31/01/1984, es un periodo corto, pero por la poca información hidrométrica medida en la cuenca se procedió a trabajar con los mismos y validar los parámetros, obteniendo métricas de desempeño aceptadas por los rangos permisibles y recomendados en las guías para la ejecución de HydroBID.

Overall Statistics		Reservoir Statistics
Statistic	Value	
Overall volume ...	-2.09	
Correlation, r(-)	0.58	
Modified Correl...	0.31	
Nash-Sutcliffe E...	0.34	

Figura 74: Métricas de desempeño del proceso de validación

Fuente: Elaboración propia en HydroBID II

El resultado de las métricas de desempeño en la validación nos expone:

Como la media del error de la variación del volumen simulado respecto al observado es negativa e implica que el modelo subestimó ligeramente el volumen total observado en el periodo analizado.

Una correlación de 0,58 indica una correlación moderada. Es decir, hay cierta relación entre ambas series y una correlación modificada de 0,31 que indica una baja

relación entre los volúmenes extremos pero debido a la escasa información estos valores son aceptables pues se encuentran dentro de los rangos permisibles por HydroBID.

Y un coeficiente de Nash-Sutcliffe dentro del rango permisible que recomienda HydroBID, es aceptable y óptimo, pero no es completamente bueno. Sin embargo, por la escasa información del periodo diario nos permite aceptar este valor.

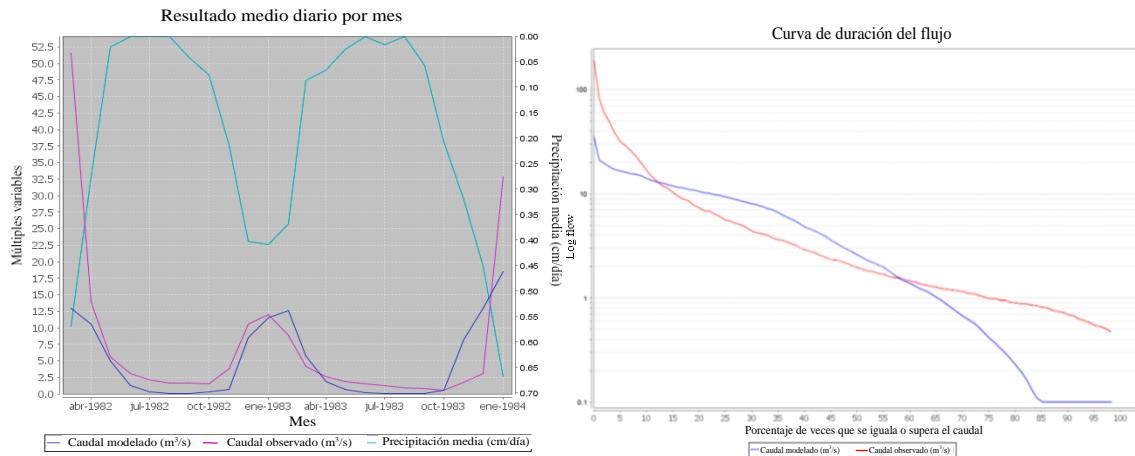


Figura 75: Hidrograma y curva de duración de flujo de la validación

Fuente: HydroBID II

En el Hidrograma de calibración de la Figura 75 se puede entender como al bajar los parámetros de calibración, también existe una disminución en los caudales bajos de los meses de época seca, y una disminución de los caudales altos o extremos.

Refuerzo a la validación

Para el periodo 01/01/2000 al 31/12/2015, para los caudales generados por COBEE S.A. y validados para la cuenca y de uso por el PMSJ anteriormente, se obtuvieron resultados favorables de las métricas de desempeño del modelo, los cuales se muestran en la siguiente figura:

Overall Statistics		Reservoir Statistics	
Statistic	Value		
Overall volume ...	7.83		
Correlation, $r(-)$	0.88		
Modified Correl...	0.61		
Nash-Sutcliffe E...	0.45		

Figura 76: Métricas de desempeño del proceso de refuerzo a la validación periodo 2000-2015

Fuente: HydroBID II

Estas métricas se encuentran dentro de los límites permisibles por HydroBID y sustentan la corrida del modelo y su comportamiento de los parámetros que ajustan la simulación de los caudales con los caudales medidos, lo que conlleva a validar los caudales y por ende los volúmenes que el modelo simule a escala futura. Estas métricas indican:

Un error general del volumen de 7,83 indica que el volumen total simulado se acerca bastante al observado, lo cual es aceptable en estudios hidrológicos. En general, se considera aceptable un error menor al 20%, por lo que este resultado sugiere una buena representación del volumen total de agua en la cuenca.

Una correlación lineal de 0,88 indica una correlación fuerte, lo que significa que el modelo simula bien la tendencia general de los caudales (picos, aumentos, descensos).

Una correlación modificada de 0,61 es moderada. Significa que, aunque la forma general del caudal está bien captada (como indica R), el modelo presenta algunas diferencias en la magnitud o dispersión respecto a los datos reales.

Una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0,45 indica un desempeño moderado, aceptable pero con margen de mejora. Es común en cuencas con alta variabilidad estacional o con escasa información. Esto significa que el modelo reproduce aceptablemente los valores.

4.2.2. Del módulo de cambio climático

Modelo de Circulación Global

En el presente trabajo, se seleccionó el modelo de circulación global MPI-ESM-MR; para condiciones secas, de los dos escenarios con un mayor desempeño para Bolivia, y por representar las condiciones con mayor probabilidad de ocurrencia debido a la data histórica en la cuenca del río Tolomosa, su geografía y comportamiento climático, es decir que se tiene escenarios históricos más próximo a situaciones de sequía que a inundaciones por exceso de precipitaciones.

Escenarios futuros de cambio climático

En la aplicación este trabajo, se consideraron tres escenarios climáticos futuros: **SSP126, SSP245 y SSP585**, por ser representativos de un amplio rango de posibles

condiciones futuras de emisiones de GEI y sus efectos en el clima. Se descartaron los escenarios **SSP119** y **SSP370** debido a que el primero representa un caso extremo de mitigación con probabilidad reducida de ocurrencia realista en la región, mientras que el segundo no refleja adecuadamente las tendencias socioeconómicas y climáticas históricas observadas en la cuenca del río Tolomosa

Downscaling

Aplicado la reducción de escala a la información climática para cada escenario de cambio climático se estimó las desviaciones de la variabilidad de precipitaciones y temperatura a escala temporal y espacial obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 33: Desviaciones mensuales de precipitación y temperatura

Mes/Escenario	SSP126		SSP245		SSP585	
	Temperatura +/-	Precipitación	Temperatura +/-	Precipitación	Temperatura +/-	Precipitación
Enero	0,26	0,92	0,19	0,88	0,41	0,85
Febrero	0,34	0,96	0,41	0,93	0,94	0,93
Marzo	0,31	0,94	0,43	0,97	0,58	0,90
Abril	0,25	0,77	0,22	0,78	0,60	0,73
Mayo	0,05	1,32	0,87	1,29	0,90	1,26
Junio	0,61	0,90	1,13	0,90	0,71	0,90
Julio	0,81	0,84	0,66	0,84	0,58	0,84
Agosto	1,05	0,91	1,20	0,91	0,53	0,89
Septiembre	0,41	0,87	0,31	0,75	0,56	0,75
Octubre	0,28	0,99	0,31	0,98	0,46	0,94
Noviembre	0,29	0,83	0,49	0,80	0,64	0,80
Diciembre	0,26	0,97	0,46	0,94	0,94	0,90

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la **Tabla 33** se puede entender los efectos del cambio climático son progresivos, siendo más bajos para el escenario SSP126 e incrementando para el escenario más crítico SSP585:

- Para el escenario SSP126 se observa una media en el incremento de la temperatura de 0,40 °C y una media de disminución de la precipitación del 7%.

- Para el escenario SSP245 se observa una media en el incremento de la temperatura de 0,55 °C y una media de disminución de la precipitación del 9%.
- Para el escenario SSP585 se observa una media en el incremento de la temperatura de 0,65 °C y una media de disminución de la precipitación del 11%.

4.2.3. Del módulo de embalses

4.2.3.1.Para el periodo 2000-2015

Tabla 34: Media de volúmenes mínimos operacionales mensual multianual periodo 2000-2015

Mes	Volumen Simulado (hm ³)	Volumen medido (hm ³)	Diferencia (hm ³)	Porcentaje de reducción (%)	Observación
Enero	9,920	9,920	0,00	0,00	Cumple
Febrero	9,920	9,920	0,00	0,00	Cumple
Marzo	9,920	9,920	0,00	0,00	Cumple
Abril	9,920	9,920	0,00	0,00	Cumple
Mayo	9,920	9,920	0,00	0,00	Cumple
Junio	9,920	9,920	0,00	0,00	Cumple
Julio	9,912	9,920	-0,01	-0,08	Déficit
Agosto	9,822	9,920	-0,10	-0,99	Déficit
Septiembre	9,604	9,920	-0,32	-3,19	Déficit
Octubre	9,751	9,920	-0,17	-1,71	Déficit
Noviembre	9,844	9,920	-0,08	-0,76	Déficit
Diciembre	9,920	9,920	0,00	0,00	Cumple

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35: Volúmenes mínimos operacionales promedio anual periodo 2000-2015

Año	Medido (hm ³)	Simulado (hm ³)	Volumen de reducción	Volumen de reducción anual acumulado	Porcentaje de reducción (%)
2000	9,920	9,858	-0,062	-0,744	0,625
2001	9,920	9,875	-0,045	-0,546	0,458
2002	9,920	9,881	-0,039	-0,465	0,390
2003	9,920	9,881	-0,039	-0,465	0,390
2004	9,920	9,894	-0,026	-0,316	0,265
2005	9,920	9,834	-0,086	-1,035	0,870
2006	9,920	9,896	-0,024	-0,294	0,247
2007	9,920	9,913	-0,007	-0,085	0,072
2008	9,920	9,886	-0,034	-0,411	0,345

2009	9,920	9,914	-0,006	-0,072	0,060
2010	9,920	9,700	-0,220	-2,639	2,217
2011	9,920	9,878	-0,042	-0,509	0,428
2012	9,920	9,831	-0,089	-1,071	0,899
2013	9,920	9,835	-0,085	-1,017	0,855
2014	9,920	9,854	-0,066	-0,791	0,665
2015	9,920	9,902	-0,018	-0,222	0,186

Fuente: Elaboración propia

Durante los meses de enero a junio, el volumen mínimo operacional simulado coincide completamente con los valores medidos ($9,920 \text{ hm}^3$), lo que demuestra un cumplimiento total y adecuado del modelo para la temporada húmeda y transición.

En cambio, entre julio y noviembre, se observa una leve subestimación del volumen simulado en comparación con el medido, con déficits que varían entre -0,001 y -0,32 hm^3 . Esto representa un porcentaje de reducción mensual entre 0,08% y 3,19%, siendo Julio y agosto los meses más críticos según la frecuencia de déficit en la simulación. Esta tendencia sugiere que el embalse experimenta mayor presión en el almacenamiento durante la estación seca, lo cual es coherente con la estacionalidad climática de la cuenca.

A nivel anual, los valores simulados muestran una reducción promedio menor al 1% en la mayoría de los años, lo que refleja una buena capacidad del modelo para mantener los volúmenes cercanos al mínimo requerido.

Sin embargo, se destacan algunos años con mayores desviaciones: en el año 2010 la reducción es de -0,22 hm^3 (2,22%), el año más crítico. En 2005, 2012 y 2013 reducciones superiores al 0,8%.

Así mismo podemos decir que la tendencia general muestra una alta concordancia entre datos simulados y medidos, especialmente en la temporada húmeda, lo cual valida la confiabilidad del modelo HydroBID a escala mensual y anual.

4.2.3.2. Para el periodo con proyecciones climáticas futuras 2023-2040

A partir de los volúmenes de demanda mensual proporcionados por el PMSJ, se proyectó los volúmenes de operación del embalse y bajo la aplicación de los escenarios de cambio climáticos, se obtuvieron resultados de los volúmenes operacionales del embalse exportados por el modelo HydroBID, presentes en la Tabla 36,

Tabla 36: Volúmenes mínimos de operación a escala mensual y multianual 2023-2040 del embalse San Jacinto (hm^3)

Volúmenes mínimos de operación a escala mensual multianual 2023-2040 (hm^3)						
Mes	Actual	Simulado	SSP126	SSP245	SSP585	Observación
Enero	18,09	18,09	17,62	17,61	17,60	No cumple
Febrero	18,09	18,10	18,09	18,09	18,09	Cumple
Marzo	18,09	18,10	18,09	18,09	18,09	Cumple
Abril	18,09	18,10	18,09	18,09	18,09	Cumple
Mayo	18,09	18,10	18,09	18,09	18,09	Cumple
Junio	18,09	18,02	17,98	17,99	17,96	No cumple
Julio	18,09	17,48	17,37	17,39	17,31	No cumple
Agosto	18,09	16,46	16,30	16,32	16,20	No cumple
Septiembre	18,09	15,33	15,11	15,11	14,97	No cumple
Octubre	18,09	15,10	14,69	14,53	14,36	No cumple
Noviembre	18,09	16,74	16,43	16,32	16,17	No cumple
Diciembre	18,09	17,83	17,77	17,74	17,69	No cumple

Fuente: Elaboración propia

El volumen mínimo operacional para satisfacer las demandas actuales es de 18,09 hm^3 dato proporcionado por el PMSJ. Una disminución de este valor en las proyecciones futuras son indicadores de un incremento en las perdidas en el embalse y no cumplimiento para las demandas, el aumento en la temperatura influye en el aumento de pérdidas por evaporación en el embalse. Esta proyección de reducción de los volúmenes operacionales el embalse es mayor para el escenario más crítico SSP585, entre el escenario SSP126 y el SSP245 la diferencia de los porcentajes de reducción de los volúmenes no representa un gran diferencial respecto al escenario SSP585.

Tabla 37: Volúmenes medios operacionales bajo escenarios climáticos del embalse San Jacinto periodo 2023-2040 en Hm^3

Volúmenes medios mínimos de operación (hm^3)				
Año	Actual	SSP126	SSP245	SSP585
2023	18,09	16,37	16,35	16,30
2024	18,09	17,49	17,49	17,45
2025	18,09	17,38	17,35	17,31
2026	18,09	17,37	17,37	17,30
2027	18,09	16,99	16,99	16,94
2028	18,09	16,19	16,18	16,11
2029	18,09	17,49	17,49	17,44
2030	18,09	17,33	17,33	17,29
2031	18,09	16,64	16,62	16,53

2032	18,09	17,11	17,11	17,06
2033	18,09	17,39	17,39	17,32
2034	18,09	17,59	17,56	17,42
2035	18,09	17,10	16,98	16,87
2036	18,09	17,33	17,29	17,25
2037	18,09	17,44	17,45	17,39
2038	18,09	17,61	17,51	17,47
2039	18,09	17,45	17,39	17,35
2040	18,09	16,21	16,20	16,12

Fuente: Elaboración propia

A partir de las simulaciones realizadas con HydroBID bajo los escenarios climáticos SSP126, SSP245 y SSP585, se observa una reducción progresiva en los volúmenes mínimos operacionales del embalse San Jacinto respecto al valor actual requerido de 18,09 hm³. Esta disminución es más pronunciada en el segundo semestre del año (junio–diciembre), con valores mínimos que bajan hasta 14,36 hm³ (SSP585 en octubre), comprometiendo la capacidad del embalse para satisfacer la demanda actual.

Solo los meses de febrero a mayo mantienen volúmenes adecuados, mientras que el resto del año presenta niveles insuficientes. A nivel multianual, los volúmenes proyectados tienden a descender, especialmente en el escenario SSP585, lo que evidencia un riesgo creciente de inseguridad hídrica.

Esta situación refleja un estrés hídrico sostenido, vinculado al aumento de temperaturas y evaporación. Los resultados muestran que el embalse estará operando por debajo del umbral mínimo durante más del 50% del año, indicando una necesidad urgente de medidas de adaptación y gestión eficiente del recurso.

El uso de HydroBID permitió estimar con detalle los impactos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica, evidenciando su utilidad como herramienta de planificación.

4.2.4. De la modelación bajo proyecciones futuras de cambio climático y la disponibilidad hídrica futura

Ajustados los parámetros de calibración, conocidas las desviaciones de temperatura y precipitación para cada escenario climático y ajustados los parámetros del módulo de embalses, se realizó la corrida del modelo para las proyecciones futuras

y estimar los caudales simulados en la cuenca para la escala temporal diaria de 2023 al 2040 y exportaos a escala mensual por la magnitud de la serie de datos.

Finalmente, ante la influencia de los escenarios de cambio climático se puede observar en la Tabla 40 una disminución porcentual de los volúmenes de caudal igual a 11,59 para el escenario SSP126 y 20,41 para el escenario SSP585, siendo los extremos con poca y mayor influencia de cambio climático respectivamente, que demuestra la influencia de los escenarios SSP126, SSP245 y SSP585 según lo proyectado por el IPCC.

Tabla 38: Caudales medios anuales proyectados bajo escenarios climáticos futuros periodo 2023-2040

Año	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal Simulado SSP126 (m ³ /s)	Caudal Simulado SSP245 (m ³ /s)	Caudal Simulado SSP585 (m ³ /s)
2023	8,50	7,86	7,64	7,22
2024	10,76	9,61	9,34	8,73
2025	10,29	9,10	8,80	8,22
2026	11,86	10,60	10,30	9,66
2027	10,20	8,96	8,75	8,12
2028	6,71	6,12	5,91	5,56
2029	8,32	7,34	7,08	6,58
2030	10,14	8,83	8,57	8,00
2031	7,02	6,19	5,91	5,53
2032	6,98	6,25	6,02	5,62
2033	11,53	10,32	10,09	9,45
2034	4,88	4,12	3,93	3,58
2035	4,94	4,25	4,10	3,71
2036	9,90	8,89	8,54	8,03
2037	7,17	6,14	5,97	5,47
2038	7,59	6,74	6,50	6,03
2039	10,70	9,29	9,03	8,40
2040	6,98	6,21	5,93	5,56
PROMEDIO	8,58	7,60	7,36	6,86

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39: Porcentajes de variación de caudales anual bajo escenarios climáticos periodo 202-2040

Año	Variación del Volumen del escenario SSP126 (%)	Variación del Volumen del escenario SSP245 (%)	Variación del Volumen del escenario SSP585 (%)
2023	-7,58	-10,16	-15,05
2024	-10,76	-13,25	-18,89
2025	-11,62	-14,51	-20,13
2026	-10,62	-13,12	-18,57
2027	-12,14	-14,26	-20,41
2028	-8,66	-11,87	-17,04
2029	-11,79	-14,90	-20,90
2030	-12,92	-15,48	-21,09
2031	-11,88	-15,81	-21,24
2032	-10,56	-13,75	-19,54
2033	-10,47	-12,54	-18,07
2034	-15,52	-19,47	-26,52
2035	-14,04	-16,99	-24,95
2036	-10,21	-13,74	-18,95
2037	-14,35	-16,72	-23,65
2038	-11,24	-14,43	-20,58
2039	-13,23	-15,68	-21,48
2040	-11,00	-15,00	-20,31
PROMEDIO	-11,59	-14,54	-20,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40: Reducción de volúmenes de caudales medios multianual bajo escenarios de cambio climático

Escenario	Periodo	Caudal (m ³ /s)	Variación de volumen multianual (%)
Actual	2023-2040	8,58	
SSP126	2023-2040	7,60	-11,59
SSP245	2023-2040	7,36	-14,54
SSP585	2023-2040	6,86	-20,41

Fuente: Elaboración propia

Para poder apreciar mejor los resultados anteriores en la Figura 77 se proyecta el comportamiento de los caudales dese 01/01/2023 a 31/12/2040, donde se observa la disminución de los mismos bajo influencia de los respectivos escenarios de cambio climático.

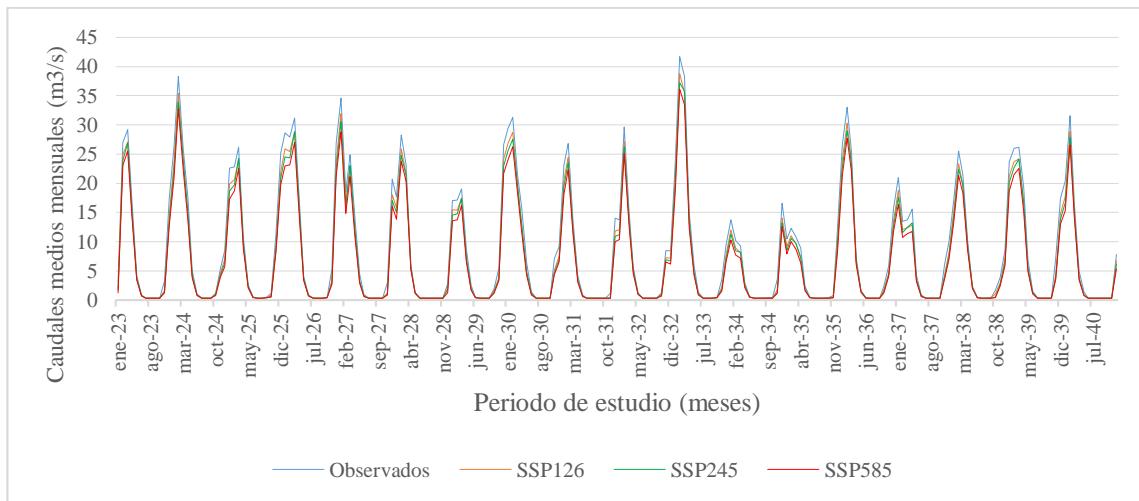


Figura 77: Caudales medios mensuales proyectados bajo escenarios climáticos.

Fuente: Elaboración propia

Las simulaciones realizadas con HydroBID para la cuenca del río Tolomosa, bajo los escenarios de cambio climático SSP126, SSP245 y SSP585, muestran una disminución progresiva de los caudales medios anuales respecto al valor actual de 8,58 m³/s. Los resultados indican caudales promedios de 7,60 m³/s para SSP126, 7,36 m³/s para SSP245 y 6,86 m³/s para SSP585, lo cual representa reducciones del 11,59%, 14,54% y 20,41%, respectivamente.

Esta tendencia descendente evidencia un impacto significativo del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica superficial. El escenario SSP585, considerado de altas emisiones, muestra la mayor disminución de caudales, especialmente notoria en años críticos como 2034 y 2035, con reducciones superiores al 25%. Estos resultados proyectan un escenario de estrés hídrico creciente, afectando directamente la sostenibilidad de las fuentes hídricas, la recarga del embalse San Jacinto y la capacidad de cobertura de la demanda.

La variabilidad interanual observada en las proyecciones también es importante, ya que sugiere años con eventos extremos más frecuentes (sequías más severas), lo que requiere estrategias de gestión adaptativa del agua.

HydroBID demostró ser una herramienta eficaz para evaluar estos impactos, permitiendo integrar cambios en temperatura, precipitación y parámetros del embalse, generando resultados a escala diaria y mensual. No obstante, estos hallazgos subrayan

la urgencia de incorporar medidas de adaptación hídrica y planificación integrada en la cuenca.

4.3. De la seguridad hídrica

Para poder estimar la seguridad el recurso hídrico en la cuenca, referida a la capacidad de mantener el acceso sostenible y equitativo al agua captada por la misma para todos los usos disponibles; riego por gravedad, estación de bombeo y central hidroeléctrica, lo cual implica asegurar una disponibilidad eficiente y justa ante las demandas en las gestiones futuras, dirigió es presente trabajo a realizar un análisis de la oferta futura de agua para satisfacer las demandas actuales de agua.

4.3.1. Comportamiento de la precipitación futura

Parte del proceso del análisis de la seguridad hídrica en la cuenca, anexa el análisis de las variables que se relacionan directamente a la misma, siendo la precipitación una de ellas. Se pudo evidenciar que las medias de los caudales en los escenarios futuros disminuyen respecto a los volúmenes actuales, por lo que se realiza un análisis de precipitación para saber la relación que tienen la misma.

La Figura 78 representa el comportamiento de la precipitación media acumulada para el registro histórico (1979-2022) en comparación con cada uno de los registros futuros (2023-2040) en los tres escenarios de cambio climático y sin el mismo. Donde para los tres escenarios se observa una proyección futura de disminución significativa de la precipitación respecto a la serie observada, donde se registra una disminución considerable entre los meses de noviembre a marzo de cada año, siendo el mes de noviembre el que es más afectado según las proyecciones climáticas, seguido por el mes de enero.

Se registran valores entre 1,05 mm a 164,79 mm de media acumulada de precipitación observada, de 0,95 mm a 151,50 mm para el escenario SSP126, de 0,95 a 145,50 mm para el escenario SSP245 y de 0,95 mm a 140,50 mm para el escenario SSP585, de los cuales el más afectado por la disminución de la precipitación es el último, que afirma sus características de ser el escenario más crítico para la cuenca con una reducción máxima del 17,18%, siendo la menor reducción al precipitación del escenario SSP126 con un porcentaje igual al 10,78 % y la del escenario SSP245 con un porcentaje máximo de reducción de la precipitación igual al 13,64% representado

condiciones intermedias de riesgo en la disponibilidad hídrica. La precipitación es un aporte directo al caudal del río y al cuerpo del reservorio, y también llega al sistema por medio de la infiltración a través del suelo.

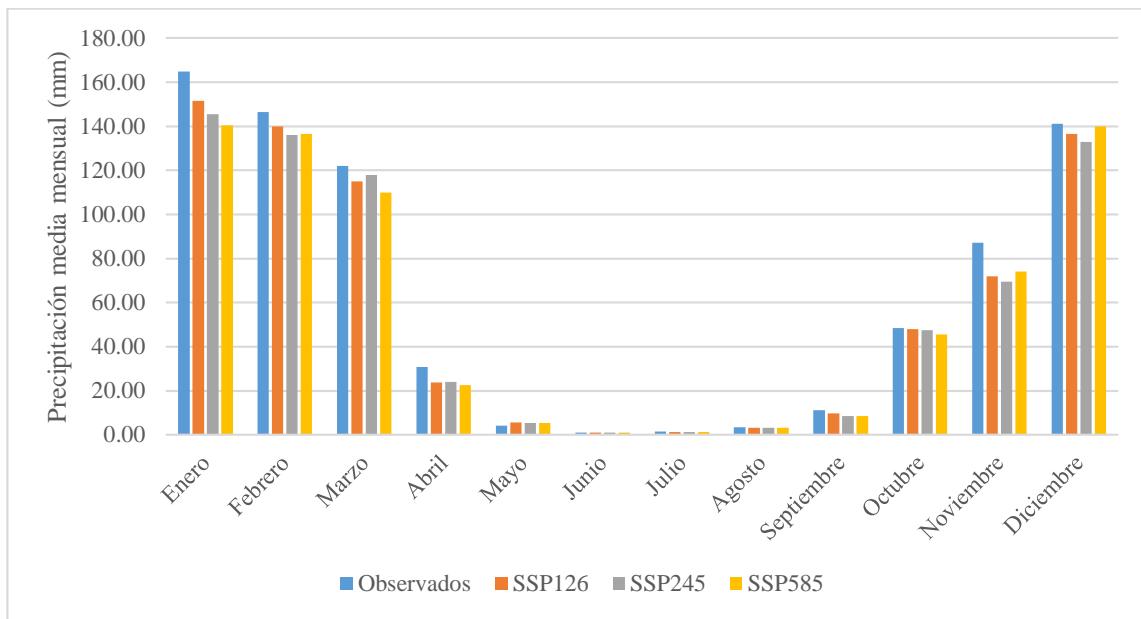


Figura 78: Media multianual de la precipitación acumulada para cada mes, para registro observado y futuro.

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Comportamiento de la temperatura futura

En la Figura 79 muestra el comportamiento de la temperatura en el cual no se ven grandes variaciones de los valores a simple observancia, ni en las tendencias, sin embargo eso no significa que no puedan generar grandes impactos, como es bien conocido según los informes del IPCC un ligero incremento en la temperatura puede generar grandes cambios en una región según las características climáticas propias de la zona. Es así, que no solo una disminución en la precipitación afecta los volúmenes de caudal en la cuenca si no también el ligero incremento en la precipitación para los escenarios futuros incrementan al volumen final de pérdidas por evaporación.

Se registran valores incrementales máximos de 0,41 °C para el escenario de cambio climático SSP126, +0,49 °C para el escenario SSP245 y +0,94 °C para el escenario SSP585, siendo el que influye en un mayor aporte a las perdidas este último coincidiendo en sus características del escenario más crítico. Dentro del periodo de

análisis futuro según las proyecciones observamos veranos más intensos con incrementos en la temperatura media entre los 0,25-0,94 °C, afectando directamente a la disponibilidad del agua en la cuenca por aportar en la generación de mayores pérdidas.

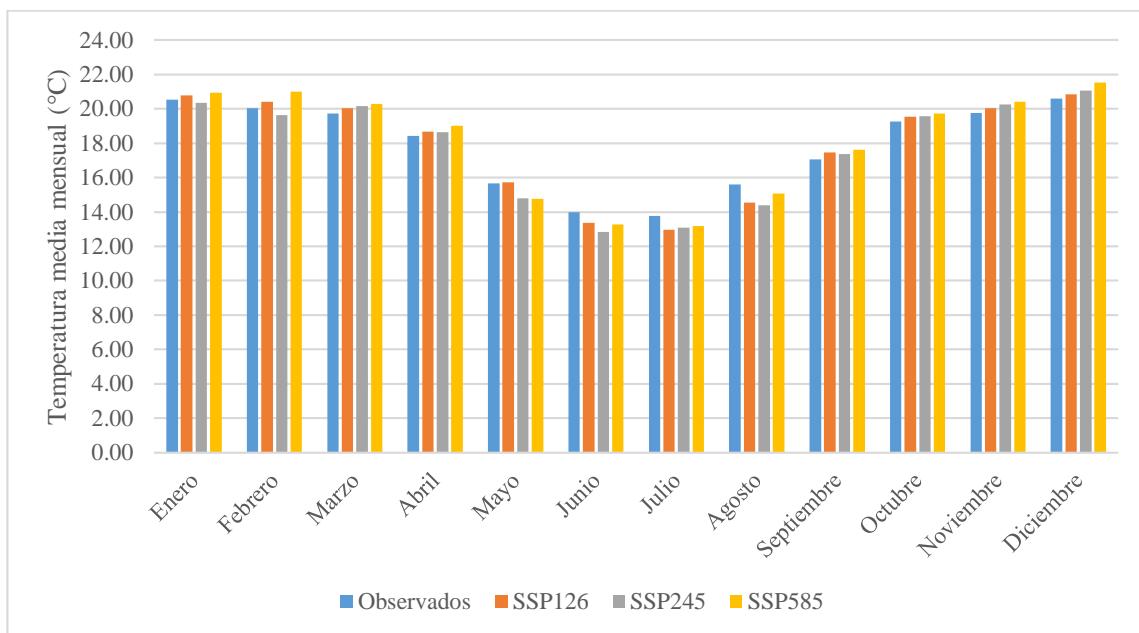


Figura 79: Media mensual multianual de la temperatura, para registro observado y futuro.

Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Disponibilidad hídrica futura en la cuenca

Se analiza la disponibilidad hídrica desde la perspectiva de volúmenes almacenados en el embalse para satisfacer las demandas sin necesidad de requerir variar su volumen operacional señalados en la siguiente tabla:

Tabla 41: Muestra de cumplimiento de volúmenes mínimos operacionales a escala mensual en Hm³ para el embalse San Jacinto bajo

Volúmenes mínimos operacionales (hm ³)		Volúmenes mínimos bajo escenarios de cambio (hm ³)			
fecha	Observado	SSP126	SSP245	SSP585	Disponibilidad
ene-23	18,09	9,71	9,49	9,23	Déficit
feb-23	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
mar-23	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
abr-23	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
may-23	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
jun-23	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
jul-23	18,09	17,75	17,75	17,71	Déficit

ago-23	18,09	16,65	16,67	16,59	Déficit
sep-23	18,09	15,32	15,34	15,24	Déficit
oct-23	18,09	13,84	13,85	13,75	Déficit
nov-23	18,09	14,67	14,59	14,5	Déficit
dic-23	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
ene-24	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
feb-24	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
mar-24	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
abr-24	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
may-24	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
jun-24	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
jul-24	18,09	17,79	17,8	17,74	Déficit
ago-24	18,09	16,73	16,75	16,64	Déficit
sep-24	18,09	15,4	15,41	15,29	Déficit
oct-24	18,09	15,18	15,19	15,01	Déficit
nov-24	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
dic-24	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
ene-25	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
feb-25	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
mar-25	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
abr-25	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
may-25	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
jun-25	18,09	18,05	18,06	18,04	Déficit
jul-25	18,09	17,46	17,48	17,4	Déficit
ago-25	18,09	16,31	16,33	16,22	Déficit
sep-25	18,09	15,15	15,06	14,93	Déficit
oct-25	18,09	14,93	14,63	14,44	Déficit
nov-25	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
dic-25	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible
ene-26	18,09	18,09	18,09	18,09	Disponible

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la disponibilidad hídrica en el embalse San Jacinto, para el periodo 2023–2040, revela un comportamiento altamente variable en los volúmenes almacenados, condicionado por los efectos del cambio climático. Se utilizó como referencia el volumen mínimo operacional de **18,09 hm³**, umbral que permite mantener el funcionamiento básico del sistema de almacenamiento y regulación.

Durante los 18 años evaluados, se identifican numerosos meses en los que el volumen mensual proyectado se encuentra por debajo del mínimo operacional, lo que representa un déficit hídrico y, por tanto, la necesidad de utilizar reservas para

satisfacer las demandas. Esta situación refleja una disminución en la seguridad hídrica y la posibilidad de que el embalse no pueda sostener sus funciones de forma continua.

De manera general se determina que la fiabilidad de cumplimiento del sistema para satisfacer las demandas, en promedio es de 7 meses de cumplimiento de variando entre noviembre a mayo y diciembre a junio, lo que implica mayores gestiones en el uso de embalse y control en la regulación del embalse ante las demandas y perdidas en el embalse.

Los años que presentan mayor cantidad de meses con déficit son 2023, 2028, 2031 y otros, siendo estos años particularmente críticos en cuanto a disponibilidad de agua. Por ejemplo, en 2031 se observa que más de la mitad del año (al menos 6 meses) presenta volúmenes inferiores a $18,09 \text{ hm}^3$, evidenciando una necesidad urgente de gestión de la demanda y priorización de usos del agua.

A nivel estacional, los meses de junio a octubre son sistemáticamente los más vulnerables, con niveles frecuentemente por debajo del umbral, lo cual coincide con la temporada seca. Esta recurrencia indica que en dichos meses será imprescindible aplicar estrategias de administración más estrictas, como restricciones temporales de uso o programas de uso eficiente del recurso. Así mismo la frecuencia de déficit o estrés hídrico al que se proyecta la cuenca y el embalse para los meses de incumplimiento es de 11 años con mayor déficit por mitad de año y 6 años con 5 meses de deficiencias en la disponibilidad, solo el año 2024 presenta el menor número de desabastecimiento en mes igual a 4.

En contraste, algunos años como 2033, 2034 y 2038 muestran menor frecuencia de déficit, y en ciertos meses se alcanzan volúmenes considerablemente por encima del umbral, lo que representa oportunidades para recargar el sistema y planificar reservas estratégicas.

En conclusión, el análisis evidencia que, bajo escenarios climáticos futuros, la seguridad hídrica del embalse San Jacinto se ve comprometida en múltiples años y estaciones, especialmente durante las épocas secas. La planificación debe enfocarse en gestionar mejor la demanda en años como 2028, 2029 y 2031, así como en desarrollar políticas de almacenamiento, reúso y eficiencia hídrica para mitigar los

impactos del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos en la cuenca del río Tolomosa.

Tabla 42: Porcentaje de variación de volúmenes del embalse bajo escenario climáticos

Porcentaje de variación (%)			
Año	SSP126	SSP245	SSP585
2023	-0,451	-0,469	-0,689
2024	-0,263	-0,245	-0,486
2025	-0,605	-0,796	-1,063
2026	-0,222	-0,232	-0,608
2027	-1,238	-1,233	-1,559
2028	-0,413	-0,522	-1,014
2029	-0,461	-0,455	-0,719
2030	-0,507	-0,481	-0,756
2031	-1,004	-1,105	-1,733
2032	-0,200	-0,165	-0,512
2033	-0,361	-0,365	-0,753
2034	-1,271	-1,408	-2,177
2035	-1,433	-2,098	-2,747
2036	-0,409	-0,654	-0,894
2037	-1,136	-1,118	-1,470
2038	-0,527	-1,083	-1,321
2039	-0,956	-1,291	-1,520
2040	-1,115	-1,151	-1,705

Fuente: Elaboración propia

De igual manera, estimados los volúmenes mínimos de operación del embalse se puede entender que en comparación a los niveles mínimos de operación actuales existe una reducción de los mismos, dando a entender que en promedio entre los meses de Julio a Noviembre el embalse no lograría satisfacer las demandas de agua actual, proyectando la necesidad de consumir más volumen del mínimo operacional actual corriendo el riesgo de generar efectos negativos en el ecosistema circundante y para las propias funcionalidades de la estructura del embalse.

Tabla 43: Volúmenes mínimos operacionales el embalse San Jacinto para un año de muestra

Muestra para el año proyectado 2030			
Mes	SSP126	SSP245	SSP585
Enero	18.090	18.090	18.090
Febrero	18.090	18.090	18.090
Marzo	18.090	18.090	18.090

Abril	18.090	18.090	18.090
Mayo	18.090	18.090	18.090
Junio	18.090	18.090	18.090
Julio	17.870	17.878	17.820
Agosto	16.838	16.855	16.742
Septiembre	15.429	15.451	15.317
Octubre	13.860	13.881	13.742
Noviembre	17.344	17.322	17.239
Diciembre	18.090	18.090	18.090

Fuente: Elaboración propia

Un ejemplo de lo expuesto anteriormente es el comportamiento de los niveles mínimos para cumplir los volúmenes de demanda agua, la **Tabla 43** muestra como en los meses de lluvia el embalse logra cumplir con las demandas de agua, pero va disminuyendo gradualmente durante la época seca, siendo los meses más críticos septiembre y octubre por tener los volúmenes más altos en demanda de riego, pidiendo es déficit lograr satisfacer esta demanda en proyecciones futuras.

Tabla 44: Volúmenes diferenciales para satisfacer la correcta regulación del embalse ante los efectos de cambio climático para el periodo 2023-2040 y sus porcentajes de variación

Año	Volumen diferencial anual para cumplir los volumen de demanda (hm ³)			Porcentaje de variación para cumplir los volumen de demanda actual (hm ³)		
	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585
2023	9,11	9,36	10,03	-4,28	-4,40	-4,74
2024	0,52	0,48	0,94	-0,26	-0,24	-0,49
2025	1,15	1,51	2,02	-0,60	-0,80	-1,06
2026	0,44	0,47	1,21	-0,22	-0,23	-0,61
2027	2,26	2,25	2,86	-1,24	-1,23	-1,56
2028	0,74	0,94	1,80	-0,41	-0,52	-1,01
2029	0,92	0,91	1,43	-0,46	-0,45	-0,72
2030	0,98	0,94	1,46	-0,51	-0,48	-0,76
2031	1,87	2,06	3,21	-1,00	-1,11	-1,73
2032	0,38	0,31	0,94	-0,20	-0,16	-0,51
2033	0,71	0,72	1,47	-0,36	-0,37	-0,75
2034	2,71	3,01	4,65	-1,27	-1,41	-2,18
2035	2,85	4,20	5,51	-1,43	-2,10	-2,75
2036	0,80	1,28	1,74	-0,41	-0,65	-0,89
2037	2,25	2,22	2,92	-1,14	-1,12	-1,47
2038	1,09	2,27	2,76	-0,53	-1,08	-1,32
2039	1,89	2,55	3,00	-0,96	-1,29	-1,52
2040	1,98	2,05	3,02	-1,12	-1,15	-1,70

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 44 muestra los volúmenes diferenciales anuales requeridos para cubrir la demanda hídrica bajo tres escenarios de cambio climático (SSP126, SSP245 y SSP585), así como el porcentaje de variación con respecto a la condición base actual. Estos volúmenes representan el déficit anual de agua que debe ser gestionado adicionalmente para mantener la operación eficiente del embalse San Jacinto ante condiciones climáticas cambiantes.

4.3.4. Tendencias generales y frecuencia de periodos de déficit hídrico en el embalse

A lo largo del periodo 2023–2040, se observa que todos los escenarios proyectan valores negativos, lo que indica un déficit hídrico sistemático, es decir, en ningún año la oferta natural resulta suficiente por sí sola para cubrir las demandas establecidas. El déficit se vuelve más acentuado en el escenario más pesimista (SSP585), lo cual es coherente con un aumento en las temperaturas y la reducción en la disponibilidad de escorrentía superficial.

Esto implica que 2034–2035 será el periodo más crítico, con necesidad urgente de estrategias de manejo de demanda, almacenamiento adicional o transferencia de agua desde fuentes alternas. En estos años, incluso los escenarios más optimistas (SSP126) presentan déficits mayores a 2,7 hm³.

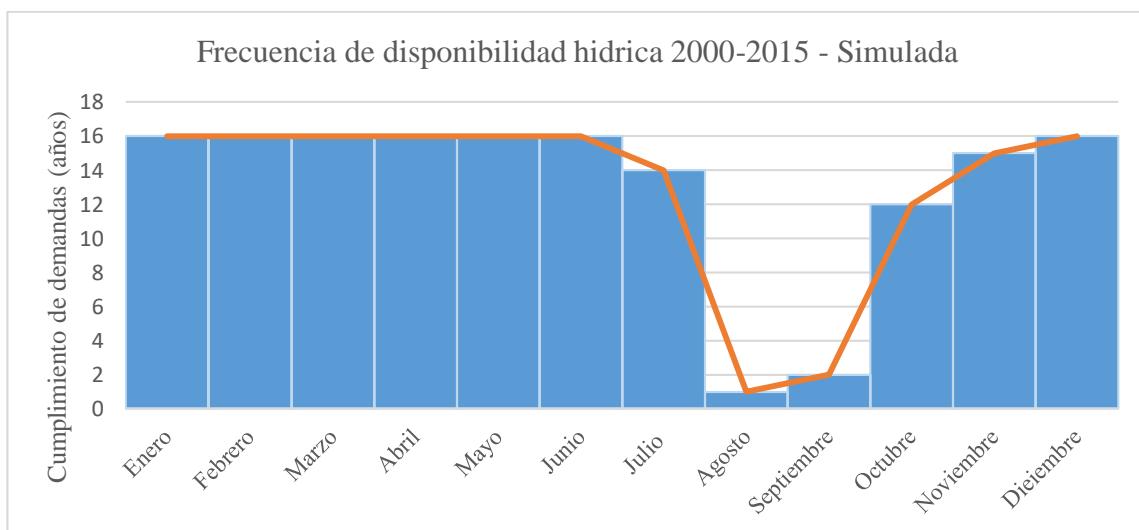


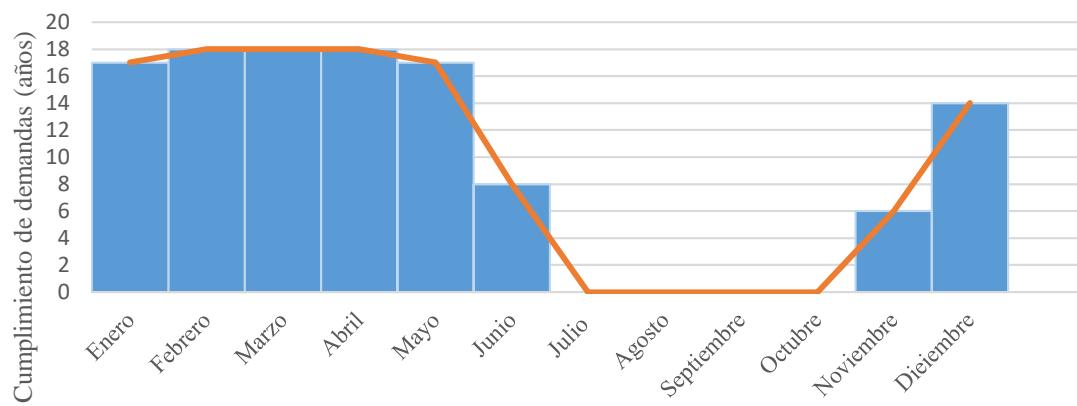
Figura 80: Frecuencia de la satisfacción del sistema para cumplir los volúmenes de demanda, periodo simulado 2000-2015

Fuente: Elaboración propia

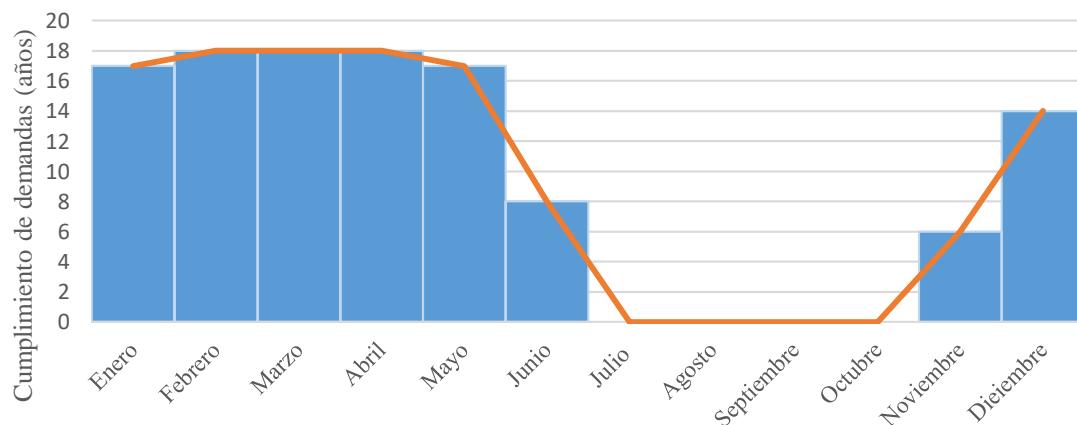
En la Figura 80 podemos apreciar como la simulación para el periodo actual se ajusta lo más cercano a la regulación y volúmenes mínimos operacionales ejecutados reales en dicho periodo por el PMSJ, alcanzando un porcentaje de 88,5% en promedio de cumplimiento mensual, siendo los meses de agosto y septiembre con mínimos históricos de cumplimiento

Así mismo, para los 16 años de análisis se aprecia el cumplimiento de los volúmenes de demandas en los meses latentes de lluvia a cabalidad lo que asocia un comportamiento predictivo ajustado a los parámetros simulados por HydroBID. Donde en los 16 años de diciembre a junio los volúmenes de agua almacenados en la cuenca y el embalse son suficientes para satisfacer las demandas, empezando un ajuste y mayor control de las salidas para los meses de julio y agosto en la mayoría de los años.

Frecuencia de disponibilidad hidrica 2023-2040
Escenario SSP126



Escenario SSP245



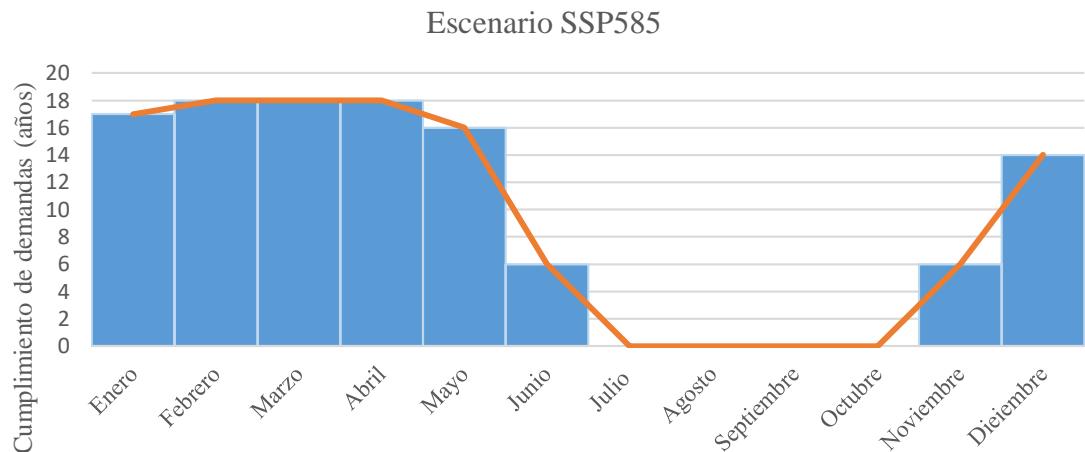


Figura 81: Frecuencia de la satisfacción del sistema para cumplir los volúmenes de demanda, bajo los escenarios futuros SSP126, SSP245 y SSP585

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 81 se aprecia una disminución drástica en el cumplimiento de los volúmenes para una operacionalidad correcta del embalse; julios, agosto, septiembre y octubre muestran un colapso en el cumplimiento, que quiere decir que son meses con déficit hídrico seguro que se relaciona directamente a las estación seca e inicio de periodo de cultivos. El desempeño es similar entre SSP126 y SSP245, pero SSP585 es ligeramente más crítico y la frecuencia anual baja a 53%, lo que implica riesgo estructural para la seguridad hídrica.

Los meses más críticos para las proyecciones futuras son de julio a Octubre; incapacidad total del sistema para cubrir al 100% los volúmenes de demandas poniendo consumiendo parte del volumen mínimo operacional. Noviembre y diciembre presenta una recuperación progresiva, aunque aún con cierto nivel de incumplimiento.

4.4. De las medidas de acción ante los impactos del cambio climático

Los efectos del cambio climático tienen un impacto en las características de las series de datos de aportaciones, como la media, desviación típica, estacionalidad y variación estacional. Los diferentes escenarios climáticos y modelos climáticos presentan una amplia variabilidad de resultados, lo que se traduce en incertidumbre.

Se puede representar en base a los resultados de las modelaciones bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2023 al 2040, los siguientes impactos futuros del cambio climático en la cuenca del río Tolomosa:

1. La cuenca tiene una vulnerabilidad presente durante este periodo de modelación futura de baja a alta, a partir de los tres escenarios climáticos futuros estudiados: SSP126, SSP245 y SSP585 respectivamente.
2. En las proyecciones de los caudales futuros se evidencia una disminución de los eventos históricos.
3. El aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación se sumarían para aumentar la frecuencia y gravedad de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Tolomosa.
4. El incremento de la demanda de evapotranspiración debido al calentamiento por incremento en la temperatura y disminución de la precipitación, resultará en una mayor cantidad de agua que regresa a la atmósfera, así como en condiciones de suelo, resultando en una disminución de la escorrentía superficial a lo largo de la cuenca.
5. Así mismo, los efectos del cambio climático para el periodo de proyección de los escenarios en el embalse San Jacinto, se pueden representar a partir de los resultados expuestos como la alteración de los volúmenes por la variabilidad de la precipitación y el escurrimiento en la cuenca.
6. La variabilidad el clima afecta el rendimiento del embalse, debido a las condiciones con las que fue diseñado, afectando su desempeño y de igual manera en los volúmenes de oferta.
7. El incremento de la temperatura y variabilidad de las precipitaciones genera un incremento en las perdidas por evaporación dentro del área de inundación del embalse
8. Por último, cabe señalar algunos posibles efectos indirectos del cambio climático sobre la generación de crecidas y la erosión de los suelos. En los escenarios climáticos proyectados, que resultan en una disminución de la precipitación generando un aumento de la sequía estival, se puede esperar una degradación de la cubierta vegetal y un aumento de la frecuencia de los

incendios forestales. Estas condiciones pueden representar un aumento de la frecuencia y severidad de las crecidas y de los fenómenos de erosión de los suelos de la cuenca.

4.4.1. Sobre las medidas de adaptación o mitigación

Son estrategias para la adaptación a los efectos del cambio climático, referidas al desarrollo de un plan o varios con acciones que deben implementarse a corto, mediano y largo plazo. Estas acciones deben estar basadas en políticas técnicas y sociales que puedan abordar temas específicos. Las medidas pueden ser tanto intervenciones individuales como una combinación de diferentes acciones relacionadas entre sí para hacer frente a los efectos del cambio climático en la cuenca y el ecosistema que depende de la misma.

4.4.1.1. Gestión de proyectos de aprovechamiento hídrico

El principal objetivo es incrementar la eficiencia en el uso del agua disponible de la cuenca, mejorando la gestión del uso del embalse San Jacinto para riego, consumo y generación de energía. Por lo cual se presentan las siguientes estrategias:

1. Disponibilidad de agua segura

La cuenca del río Tolomosa, ante la presencia del embalse San Jacinto tiene un mayor control de los volúmenes disponibles y generados a lo largo de cada gestión de recolección, siendo permisible un mayor control de la disponibilidad hídrica de la cuenca sobre las demandas de consumo. El déficit hídrico es un problema que se da nivel global y con mayor presencia en la época seca lo que limita la producción y uso del agua en las áreas bajo gestión del embalse.

La finalidad de mejorar la disponibilidad hídrica para las demandas de agua sin que afecten con gran impacto el funcionamiento óptimo del embalse, mejorando el proceso de regulación y control del correcto uso de agua en las áreas de riego.

2. Implementar nuevos proyectos de gestión de riego

Es evidente que la demanda de agua para riego en las zonas (comunidades) beneficiarias por el PMSJ, tienen demandas de incremento de sus parcelas

agrícolas, pero para las condiciones actuales el PMSJ no puede abastecer con un mayor caudal para incrementar estas parcelas porque pone en riesgo la disponibilidad hídrica para las épocas de mayor estrés hídrico.

Para poder mejorar el aprovechamiento de los volúmenes disponibles para riego y mejorar la eficiencia de los mismos, es necesario implementar proyectos de gestión de riego tecnificado, una forma de adaptabilidad mejorar la eficiencia del riego. Esto disminuiría las pérdidas y generaría la posibilidad de ampliar las zonas de riego.

3. Implementar estudios de aprovechamiento hídrico integral

Se recomienda realizar estudios integrales de aprovechamiento hídrico que consideren diversas tecnologías y sistemas para aprovechar diferentes fuentes de agua. Estas técnicas pueden incluir almacenamiento en embalses, sistemas de riego avanzados y el uso de aguas subterráneas, según las necesidades y capacidades de las comunidades beneficiarias. Además, es importante tener en cuenta los riesgos relacionados con el clima y el agua, así como los caudales y volúmenes ecológicos y las funciones hídricas de las microcuencas dentro de la cuenca del río Tolomosa.

4.4.1.2. Planes de gestión de sequias

Los planes de gestión de sequía (DMP) desempeñan un papel crucial en la gestión de los recursos hídricos durante períodos de sequía. Estos planes describen medidas adecuadas que se implementarán en base a indicadores nacionales coordinados de sequía y priorizan el uso del agua para proteger los ecosistemas acuáticos frente al estrés hídrico.

El objetivo principal de los DMP es garantizar la disponibilidad del agua necesaria para mantener la salud y vida de la población. Además, buscan evitar o minimizar los efectos negativos de la sequía en las masas de agua, especialmente en los caudales ambientales, con el fin de prevenir cualquier daño permanente y mitigar los impactos en el suministro público de agua y en las actividades económicas. Estos objetivos se basan en los usos prioritarios establecidos por las políticas del agua y los planes de gestión de las cuencas fluviales.

En resumen, los planes de gestión de sequía juegan un papel fundamental en la protección y gestión adecuada de los recursos hídricos durante períodos de sequía, con el objetivo de minimizar los impactos en el medio ambiente, en el suministro de agua y en la economía, según las prioridades establecidas por las políticas y los planes de gestión existentes.

Según la UNECE (2009), para preparar un Plan de Gestión de Sequía, se debe tener en cuenta una serie de consideraciones importantes. Algunas de estas son:

1. Incluir indicadores claros y concisos que permitan monitorear el estado de la sequía con suficiente antelación para tomar medidas anticipadas según las proyecciones del plan.
2. Proporcionar información detallada sobre los recursos hídricos del sistema y su vulnerabilidad frente a la sequía.
3. Evaluar y comprender el sistema de demanda de agua y su vulnerabilidad específica ante la sequía, estableciendo una jerarquía de prioridades.
4. Presentar una variedad de alternativas tanto estructurales como no estructurales para reducir los efectos de la sequía. Estas pueden incluir mejoras en la infraestructura de almacenamiento y distribución de agua, promoción de prácticas de uso eficiente del agua y programas de concienciación pública.
5. Estimar el costo de implementar las medidas propuestas, teniendo en cuenta tanto los aspectos económicos como los ambientales.
6. Adaptar la estructura administrativa para garantizar el seguimiento y la coordinación efectiva del DMP entre las diferentes entidades involucradas, como ministerios, gobiernos regionales y municipios.
7. Fomentar la participación y el diálogo con todas las partes interesadas, asegurando una participación plena del público. Esto ayuda a evitar conflictos sociales y garantiza que el plan se adapte a las necesidades y preocupaciones de la comunidad.

En resumen, para preparar un DMP efectivo, es fundamental considerar indicadores claros, evaluar la vulnerabilidad de los recursos hídricos y la demanda de agua, presentar diversas alternativas, determinar costos, adaptar la estructura administrativa y fomentar la participación de todas las partes interesadas. De esta manera, se pueden implementar medidas adecuadas para mitigar los efectos de la sequía y proteger los recursos hídricos de manera sostenible.

4.4.1.3. Adaptación Basada en Ecosistemas

La Adaptación Basada en Ecosistemas (ABE) implica utilizar la biodiversidad y los servicios que los ecosistemas proporcionan como parte de una estrategia global para adaptarse al cambio climático. Consiste en gestionar de manera sostenible los recursos naturales, conservar y restaurar los ecosistemas para asegurar y mantener los servicios ecosistémicos que facilitan la adaptación a las variaciones y cambios del clima. En comparación con las infraestructuras de ingeniería, la ABE presenta menos riesgos de adaptación deficiente, ya que se centra en mantener los ecosistemas, es más flexible y sensible a los cambios no anticipados en el entorno, puede contribuir a los objetivos de desarrollo sostenible y tiene beneficios adicionales para el medio ambiente, la sociedad y la economía a través de los bienes y servicios ofrecidos por los ecosistemas.

La implementación de la ABE puede ser compleja, ya que requiere la colaboración de diversos actores y organizaciones (instituciones, sectores y comunidades) y los beneficios se distribuyen entre un amplio rango de beneficiarios. Además, a menudo faltan protocolos estandarizados y metodologías comparables, que suelen estar presentes en otras opciones, como tecnologías e infraestructuras (Noble et al., 2015).

4.4.1.4. Medidas sociales

Fomentar la toma de conciencia en la población urbana y rural sobre los problemas del cambio climático mediante la realización de actividades y

campañas de comunicación y formación asociadas a los procesos de planificación ambiental y urbanística.

Es crucial que la población beneficiaria y circundante tome conciencia de la importancia de actuar frente al cambio climático, y se involucre directamente en la implementación de medidas para combatirlo, independientemente de su ámbito y escala de aplicación. Esta es una idea ampliamente aceptada tanto en el ámbito institucional como en la sociedad en general. Por lo tanto, las medidas para fomentar la participación de la población urbana y rural como beneficiarios de la cuenca y la concientización son esenciales para desarrollar políticas y estrategias coherentes para abordar el cambio climático y cualquier intervención relevante sobre el mismo en la cuenca.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.4. Conclusiones

- Aplicabilidad del modelo hidrológico HydroBID: El modelo HydroBID demostró ser una herramienta eficaz y versátil para la modelación hidrológica en la cuenca del río Tolomosa, al permitir integrar datos hidrometeorológicos, proyectar escenarios de cambio climático y evaluar la seguridad hídrica de manera técnica y confiable.
- Una de las grandes ventajas de HydroBID es su diseño para la región de América Latina y el Caribe, contando con su propia base datos AHD para la región, donde las fuentes e información son escasas y con gran incertidumbre, reemplazando en algunos casos la falta de información para las cuencas que se estudian, en sus parámetros como ser el Numero de Curva, red de Flujos entre otros.
- La recolección y análisis del comportamiento de las series de tiempo de precipitación y temperatura (máxima y mínima) a nivel diario, se identificó valores atípicos e inhomogeneidades en las series de datos para cada una de las estaciones, corrigiendo y validando las series homogéneas y consistentes para finalmente realizar el relleno de los datos faltantes por el método de Razón Normal en FillData.
- Del comportamiento de la calibración y validación para la cuenca el río Tolomosa, se logró ver que el parámetro que más variación tuvo fue el contenido de agua disponible; redujo un 92,50%. Durante el proceso se pudo evidenciar que al trabajar las variaciones de los parámetros para conseguir un ajuste óptimo en la calibración es mejor de manera agrupada con los parámetros que individualizada, por ejemplo; el contenido de agua disponible con el coeficiente de recesión R.
- La calibración y validación del modelo para el periodo 1979-1984 arrojó resultados satisfactorios, alcanzando un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) mayor a 0,7, lo cual respalda su utilidad para la simulación de caudales en la cuenca.
- Las métricas de desempeño tanto para la calibración: Volumen de error (16,41), Coeficiente de correlación R (0,72), Coeficiente de correlación modificado Rmod

(0,61) y Eficiencia de Nash-Sutcliffe (0,49) se encuentran dentro de una clasificación buena, según los rangos óptimos sugeridos por las guías de ejecución de HydroBID. De igual manera para la validación los valores de desempeño: Volumen de error (-2,09), Coeficiente de correlación R (0,58), Coeficiente de correlación modificado Rmod (0,31) y Eficiencia de Nash-Sutcliffe (0,34) se encuentran dentro de una clasificación satisfactoria. Cabe resaltar que dentro del proceso de apoyo a la validación con valores de flujo medios mensuales estas métricas mejoran substancialmente.

- El proceso de reducción de escala nos permitió bajar el error de las grillas de información climática a ~1000 m, y representar de manera más cercana las condiciones futuras del clima en la modelación futura e incrementar la correlación entre las series proyectadas del GCM y las observadas.
- El módulo de embalse en HydroBID es una interfaz poco estudiada, no se encuentra mucha bibliografía al respecto, pero permite estimar los volúmenes proyectados para las demandas o no, en función a la información de los parámetros que se contemplen del mismo. No considera en sí mismo el arrastre de sedimentos, es otra interfaz que debe ser analizada a detalle. Para nuestro caso partiendo de demandas y volumen máximo de almacenamiento actual y volumen mínimo de operación del mismo, sumado a los parámetros medidos y sugeridos por HydroBID se pudo proyectar cuales deberían ser los volúmenes mínimos de operación del embalse para lograr cumplir con las demandas del embalse San Jacinto.
- Disminución del caudal superficial como consecuencia de las alteraciones climáticas proyectadas, se estima una reducción del caudal media interanual de hasta un 20,41% durante el periodo de análisis, lo cual compromete la disponibilidad hídrica de la cuenca para usos actuales y futuros.
- El balance hídrico proyectado refleja desequilibrios crecientes entre la oferta y la demanda hídrica, destacando la urgencia de implementar estrategias de uso eficiente y gestión integrada del agua en la región.
- Sostenibilidad hídrica en riesgo, la combinación de menor oferta hídrica y aumento de la demanda implica un riesgo latente para la sostenibilidad del recurso,

especialmente bajo el marco de escenarios climáticos extremos como SSP585. Las proyecciones climáticas bajo los escenarios SSP126, SSP245 y SSP585 indican una disminución de hasta 14% en la precipitación anual y un incremento de 0,6 °C en la temperatura media anual y una caída del caudal medio anual de hasta 20,41% en el escenario SSP585. Esto implica una pérdida estructural de disponibilidad hídrica para el periodo 2023-2040,

- SSP126 presenta una mayor estabilidad en los caudales, con valores más cercanos a los registros históricos. Esto sugiere que, bajo políticas climáticas sostenidas y con bajas emisiones, la oferta hídrica en la cuenca se mantendría relativamente estable, permitiendo una gestión más predecible del embalse San Jacinto.
- SSP245 muestra una tendencia intermedia, con una ligera disminución en los caudales durante la estación seca en comparación con SSP126, lo cual podría representar desafíos moderados para el cumplimiento del volumen mínimo operacional del embalse.
- SSP585 evidencia una mayor variabilidad y reducción de caudales en los meses secos. En algunos años, los caudales caen por debajo de los 0,5 m³/s, lo que incrementa significativamente el riesgo de no alcanzar el volumen mínimo operacional del embalse. Esto compromete la seguridad hídrica de la cuenca, especialmente para el abastecimiento de agua durante el estiaje.
- El embalse San Jacinto enfrentará dificultades importantes para mantener su volumen mínimo operacional entre 2023 y 2040, especialmente en el escenario climático SSP585, desciende en promedio entre 4,5% (SSP126) y 8% (SSP585).
- Durante el periodo 2023–2040, se evidencia un déficit sostenido en los volúmenes requeridos para mantener la operación eficiente del embalse San Jacinto bajo todos los escenarios de cambio climático (SSP126, SSP245 y SSP585). Este déficit varía entre 0,3 y 5,5 hm³ anuales, siendo más crítico en los años 2034 y 2035, especialmente bajo el escenario SSP585. Esto confirma una tendencia creciente de estrés hídrico que compromete la seguridad hídrica de la cuenca y resalta la necesidad de una regulación operativa más estricta del embalse.
- El cumplimiento mensual del volumen mínimo en escenarios SSP126 y SSP245 se reduce a aproximadamente 60–65%, y a solo 53% en SSP585, reflejando un

riesgo hídrico estructural con fallas mensuales recurrentes entre julio y octubre, los cuales representan los meses más sensibles para el sistema agrícola y de abastecimiento.

- La magnitud y frecuencia de los déficits proyectados reflejan la urgencia de implementar estrategias de manejo adaptativo que incluyan la optimización del uso del agua, almacenamiento estratégico en años de mayor disponibilidad y priorización de demandas en los años más críticos. La planificación hídrica deberá considerar el comportamiento diferenciado de cada escenario climático, fortaleciendo así la resiliencia del sistema hídrico ante las condiciones futuras.
- Finalmente, HydroBID como herramienta de modelación, se adapta bien a nuestra zona de estudio. Si se contara con una mayor serie de datos de caudales, el presente trabajo hubiera proyectado métricas de desempeño superiores,

5.5. Recomendaciones

- Para trabajar con series de datos diarios, se recomienda que los mismos vengan de una fuente confiable como el SENAMHI, para garantizar que la incertidumbre en los resultados de la aplicación de los mismos sean suficientemente aceptable. Así mismo, realizar un minucioso control de la calidad de la serie de datos, detectar valores atípicos que no representen eventos extremos y así garantizar que los resultados alcanzados sean lo suficientemente robustos como para poder confiar en los mismos.
- Al ajustar los parámetros de calibración se recomienda empezar calibrando uno a la vez y finalmente trabajar en conjuntos en función al comportamiento de los parámetros para la serie de datos.
- Al realizar la calibración y validación en el modelo hidrológico HydroBID, se recomienda no solo regirse por las métricas de desempeño, si no realizar paralelamente un análisis gráfico de los hidrogramas de comportamiento de las series modeladas, la curva de duración del flujo y los valores de volúmenes simulados respecto los observados.
- Para futuros trabajos de investigación se recomienda validar la información hidrológica de la AHD, como el Número de Curva y Contenido de Agua Disponible, información importante que influye bastante en la determinación de la

escorrentía superficial a partir de las precipitaciones en la modelación en HydroBID.

- Se recomienda a las instituciones encargadas del monitoreo de la información hidrometeorológica y al PMSJ, instalar puntos de aforos a la entrada de los afluentes del embalse y a la salida de la cuenca para poder tener una base de datos actualizada para futuros estudios hidrológicos en la cuenca.
- Tener un control más detallado de los volúmenes disponibles y de demanda del embalse San Jacinto, la falta de información puede forzar a aislar la estructura del mismo en estudios hidrológicos de la cuenca o incrementar el grado de incertidumbre de los resultados.
- Se recomienda monitorear continuamente las variables climáticas locales, integrar modelos actualizados como CMIP7 y revisar cada 5 años la planificación hídrica de la cuenca según los escenarios SSP
- De acuerdo a los resultados obtenidos se recomienda seguir analizando la aplicabilidad de HydroBID en las cuencas del departamento como guía de planificación ante los futuros escenarios de cambio climático ya presentes.