

INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL EN LA CUENCA TOLOMOSA APLICANDO EL MODELO DE EVALUACIÓN Y PLANIFICACIÓN DEL AGUA “WEAP”

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vulnerable y finito, esencial para la conservación de la vida, el desarrollo y el medio ambiente, con gran valor social y económico en todos sus usos, los que pueden ser diferentes ya sea para la agricultura, los ecosistemas saludables o para los seres humanos y su sustento. La Reserva Biológica Cordillera de Sama (RBCS) es la principal fuente de agua del Valle Central de Tarija, presenta cuencas y micro-cuencas que proveen de agua, teniendo como principal beneficiario a la ciudad de Tarija, poblaciones aledañas y al altiplano tarijeño. Es por estas razones que en el presente estudio se pretende analizar los posibles efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos de la cuenca Tolomosa (perteneciente a la RBCS) mediante el modelo simulación y planificación WEAP.

El interés del presente trabajo es debido a que en los últimos años la región del Valle Central se ha visto afectada por la ocurrencia de eventos climatológicos que influye en la oferta hídrica superficial de las cuencas de la región. La cuenca del río Tolomosa es la más importante del Valle Central de Tarija, sus aguas alimentan el embalse de San Jacinto; fuente de agua y energía para el sector productivo agrícola y pecuario de la zona.

Debido al potencial hídrico que representa la cuenca el estudio permitirá analizar la respuesta hídrica ante los cambios que se pretendan realizar en ella, además el objeto de construir un modelo hidrológico con WEAP es obtener una herramienta que presente un enfoque de planificación que sumado a datos obtenidos de los modelos climáticos, nos permita analizar escenario futuros de los parámetros más influenciados sobre el recurso hídrico (precipitación - temperatura) y en función a esto poder desarrollar políticas de planificación para una mayor optimización de la distribución del agua de la cuenca.

1.1 ANTECEDENTES

El modelo WEAP en los últimos años se ha convertido en una herramienta para la planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático, actualmente el modelo es muy utilizado a nivel mundial, por su fácil manejo y ventajas que nos ofrece a la hora de tomar decisiones sobre el agua.

El año 2017 el Ministerio Medio Ambiente y Agua, publica el Balance Hídrico Superficial de Bolivia (BHSB), el trabajo se realizó usando el algoritmo hidrológico del software WEAP, lo interesante del estudio es que para alimentar de datos climáticos al software se generó una grilla climática diaria de precipitación y temperatura con la metodología GMET para el periodo 1980-2016. La grilla se encuentra en un formato NetCDF, y puede ser usada en diferentes aplicaciones, para las otras variables del modelo WEAP como ser humedad relativa, velocidad de vientos y horas sol, se ha generado una grilla solo para los promedios multimensuales con un método de interpolación tradicional como IDW. Adicionalmente también se generaron escenarios climáticos para el país, y el estimado del balance hídrico para condiciones futuras. Este estimado permite tener información referencial sobre condiciones posibles de la disponibilidad de agua del país. Los resultados indican una disminución en la escorrentía por efectos de aumento de la temperatura (4°C hasta 2099) y reducción de la precipitación.

A principios del mes de enero del 2016 el Ministerio de Medio Ambiente y Agua publicó el Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir, el balance fue realizado con el modelo Water Evaluation Analysis Planning (WEAP). En el estudio se realizó un análisis del efecto del cambio climático mediante modelos climáticos globales (GCMs) y técnicas de reducción de escala (Método no Paramétrico KNN), los Modelos climáticos Globales (GCMs) que se emplearon fueron: NorESM-M, CNRM-CM5, MPI-ESM-MR, MRI-ESM1 y CanESM2. Los modelos climáticos indican que la temperatura hasta 2099 podría incrementar 3°C y que la precipitación se reducirá en los meses más húmedos e incrementara en los meses de abril mayo, agosto, septiembre y octubre

Adicionalmente en el estudio se señala que en los meses húmedos (enero y marzo) el caudal de la cuenca podría reducir hasta 15%. La reducción del caudal en algunas subcuencas podría llegar a ser hasta de un 46%.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La influencia humana en el sistema climático es clara, con las emisiones antropogénicas de los gases del efecto invernadero debido a las diferentes actividades del hombre, a esto sumado una deforestación indiscriminada de los bosques, son las principales causas del cambio climático que afecta de manera directa a los recursos hídricos, la agricultura y producción alimentaria, la salud humana, nivel de los océanos y la biodiversidad, incluyendo bosques y selvas. De acuerdo a lo mencionado en su quinto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) el cambio climático es una realidad, inevitable e inequívoco.

En las últimas décadas en la región del Valle Central de Tarija se han presentado efectos del cambio climático como la variación temporal de las lluvias, el aumento de la temperatura media anual y la disminución de la precipitación anual. Además de forma recurrente han ocurrido eventos extremos como nevadas, granizadas, heladas entre otros fenómenos que afectan las actividades económicas de los pobladores de la región y principalmente influyen en la oferta hídrica superficial, en particular de la cuenca del río Tolomosa que es una de las más importantes para el Valle central de Tarija, principal fuente de alimentación del embalse San Jacinto, fuente de agua y energía para la región. El agua del embalse es usada para la generación de energía eléctrica para la ciudad de Tarija y para abastecer de riego a diversas comunidades campesinas dedicadas a la agricultura, apoyando la producción agrícola de la región.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo General

- Analizar los posibles efectos del cambio climático sobre la oferta hídrica superficial de la cuenca Tolomosa mediante la generación de escenarios futuros aplicando el modelo de evaluación y planificación del agua “WEAP”.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Efectuar un estudio detallado del modelo de simulación WEAP para su entendimiento, establecimiento de sus bases matemáticas y/o conceptuales.
- Analizar la información climatológica e hidrométrica para la cuenca Tolomosa.
- Definir las características físicas, geográficas e hidrológicas de la cuenca del río Tolomosa.
- Calibrar y validar en modelo WEAP para los periodos de información recolectada aplicando el método de modelación hidrológica de humedad del suelo.
- Aplicar escenarios futuros de precipitación y temperatura para analizar las posibles incidencias del cambio climático sobre la oferta hídrica de la cuenca para fines de planificación futura.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Debido a la importancia que representa la cuenca del río Tolomosa para la población de Tarija, es necesario desarrollar herramientas que permitan realizar una planificación del recurso hídrico en la cuenca, analizando los posibles efectos del cambio climático en la oferta hídrica superficial, y proyectarlos mediante escenarios futuros que permitan evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso (agua) en función a los posibles cambios en precipitación y temperatura.

La realización del estudio y la aplicación del modelo WEAP a la cuenca del río Tolomosa nos permitirá simular, calibrar y validar la situación actual en base a la información disponible, para que aplicando las leyes de frecuencia se pueda predecir la disponibilidad futura del agua debido a los posibles cambios climáticos que se proyectan a base de escenarios futuros tomando en cuenta variables meteorológicas de entrada (precipitación y temperatura), que posteriormente permitirán formular políticas de planificación del recurso hídrico en la cuenca y de esta manera contar con una herramienta que podrá ser usada como sustento técnico para la toma de decisiones y elaboración de proyectos destinados al aprovechamiento futuro del agua de la cuenca del río Tolomosa.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MARCO NORMATIVO

2.1.1 Guía metodológica para la elaboración balances superficiales.

El Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) y el Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego el año 2016 mediante un trabajo de consultoría a cargo del Ingeniero Freddy Soria Céspedes presentaron la “Guía metodológica para la elaboración balances superficiales - Análisis de variabilidad climática de oferta y demanda hídrica”. El presente trabajo se desarrolló siguiendo los lineamientos planteados por la guía, a continuación de describe algunos aspectos de la misma.

2.1.1.1 Justificación y alcances

El desarrollo y promoción de Planes Directores de Cuenca como eje principal de la política del Estado Plurinacional de Bolivia en el ámbito de los recursos hídricos, contempla el desafío de promover e implementar la gestión integral como instrumento de planificación, hacia un desarrollo sostenible en el marco de "vivir bien" (MMAyA, 2013).

Dentro de aquel desafío, el valor de un estudio de balance hídrico radica en su capacidad de generar información para la toma de decisiones, en función a la comprensión de la variabilidad espacial y las tendencias históricas observadas en el sistema hidrológico

2.1.1.2 Objetivo de la guía

El objetivo es desarrollar una guía metodológica aplicable a diversas escalas de cuenca, en base a experiencias previas y la literatura especializada. El provee un marco detallado, para la correcta interpretación y aplicación de los conceptos y procedimientos, en un moderno entorno multidisciplinario.

El presente trabajo se desarrolló siguiendo los lineamientos y recomendaciones de la Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales, así mismo se adoptaron valores de sus tablas para calibración del modelo.

2.2 MARCO REFERENCIAL

2.2.1 Fundamentos básicos de la hidrología

2.2.1.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un fenómeno global de circulación del agua entre la superficie terrestre y la atmósfera, provocado fundamentalmente por la energía solar y la energía gravitacional. El ciclo hidrológico es el conjunto de cambios que experimenta el agua en

la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.).

El ciclo hidrológico (ver figura 1) no es nada regular. Una muestra de ello son los periodos de sequías y de inundaciones, que ocurren.

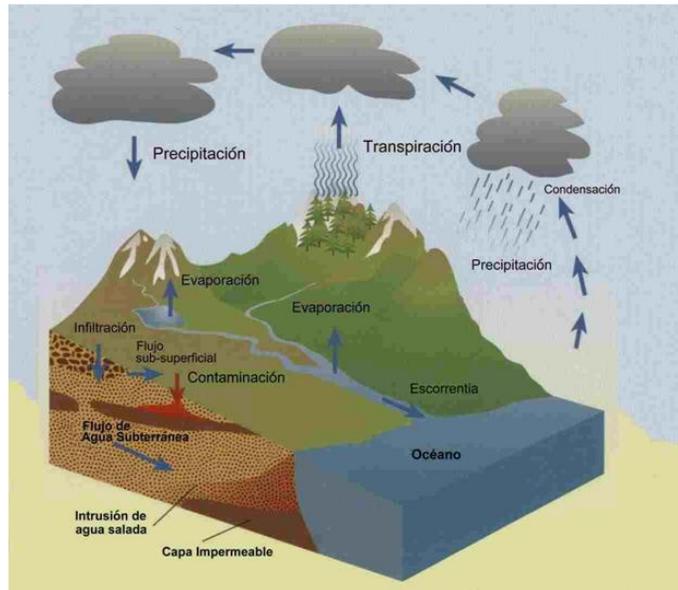


Figura N° 1: Ciclo hidrológico

Fuente: Cahuana & Weimar, 2009

Se puede suponer que el ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua en los océanos, el vapor de agua es transportado por el viento hacia los continentes. Bajo condiciones meteorológicas adecuadas, el vapor de agua se condensa para formar nubes, las cuales dan origen a las precipitaciones. (Cahuana & Weimar, 2009).

2.2.1.2 Componentes del balance hídrico

2.2.1.2.1 Precipitación

Son todas las aguas meteóricas que caen sobre la superficie de la tierra, tanto bajo la forma líquida como sólida (nieve, granizo).

Estos diversos tipos de precipitaciones son normalmente medidos sin efectuar su discriminación por medio de su equivalente en agua.

2.2.1.2.2 Escorrentía

La Escorrentía es la parte de la Precipitación que llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes, de una cuenca. Existen distintos tipos de

escorrentías dependiendo de su procedencia: escorrentía superficial o directa, escorrentía hipodérmica o subsuperficial y escorrentía subterránea.

2.2.1.2.3 Evaporación

Es el resultado del proceso físico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor, se puede producir a cualquier temperatura.

Se define como evaporación al proceso físico por el cual el agua pasa del estado líquido al gaseoso y representa la tasa neta de transporte de vapor hacia la atmósfera. También el agua en estado sólido como nieve o hielo puede pasar directamente a vapor y el fenómeno se llama sublimación.

El cambio de estado de líquido a vapor se debe a la radiación solar que brinda la energía necesaria para permitir a las moléculas del agua cambiar de estado y a los procesos de difusión molecular y turbulencia. (Cahuana & Weimar, 2009)

2.2.1.2.4 Evaporación del suelo.

La tasa de evaporación desde una superficie de suelo saturado es aproximadamente igual a la evaporación de una superficie de agua libre cercana y a la misma temperatura. Al comenzar a secarse el suelo, la evaporación disminuye y también su temperatura para mantener el balance energético.

Eventualmente, la evaporación cesará pues no existe un mecanismo efectivo para transportar el agua desde una profundidad apreciable. Por lo tanto, la tasa de evaporación desde superficie de suelo, está limitada por la disponibilidad de agua, o por las condiciones climática.

Cuando la superficie del suelo está húmeda, la evaporación es gobernada principalmente por las condiciones atmosféricas. Sin embargo, cuando esta capa se seca, la tasa de evaporación decrece muy rápidamente y es mayor la influencia de las propiedades del suelo tales como su humedad, el coeficiente de difusión, la conductividad capilar y la conductividad hidráulica de la capa superficial. Estas propiedades del suelo gobiernan la tasa a la que el agua en forma de líquido o vapor es transmitida en el perfil del suelo desde las capas profundas hasta la superficie. La evaporación es un parámetro muy importante en el ciclo del agua forma parte también de la evapotranspiración.

2.2.1.2.5 Transpiración.

Es el resultado del proceso físico–biológico por el cual el agua cambia del estado líquido al gaseoso, a través del metabolismo de los seres vivos, pasando a la atmósfera.

Entre ellos la vegetación constituye el principal agente de la transformación, ya que el volumen de agua que circula por el interior de las plantas, incluyendo la necesaria para su metabolismo, es de 100 a 300 litros por kilo de materia seca, gran parte de este volumen es transpirado y una muy pequeña fracción queda fijada químicamente en la producción de materia. Por su parte, la profundidad que alcanzan las raíces, variables de acuerdo al tipo de vegetal, le permiten explorar en profundidad un gran volumen de suelo, extrayendo el agua de las profundidades. (Cahuana & Weimar, 2009)

2.2.1.2.6 Evapotranspiración.

La evapotranspiración es el resultado del proceso por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso y directamente, o a través de las plantas, vuelve a la atmósfera en forma de vapor, es la combinación de las pérdidas por evaporación de la superficie del suelo y por transpiración de la superficie de la planta.

Evapotranspiración potencial. Máxima cantidad de agua que se puede perder en forma de vapor de agua en un clima en particular en un tramo continuo de vegetación que cubre todo el suelo y que tiene un suministro adecuado de agua. Por lo tanto, incluye la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación de una región específica en un intervalo de tiempo determinado.

Evapotranspiración de los cultivos. Se estima multiplicando la evapotranspiración potencial por un factor de cultivo K_c . (Cahuana & Weimar, 2009)

2.2.1.2.7 Balance de agua en el suelo

El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo.

El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro

(FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS).

Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y pueden no ser considerados. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) a lo largo de un periodo de tiempo:

$$ET = P + R - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$$

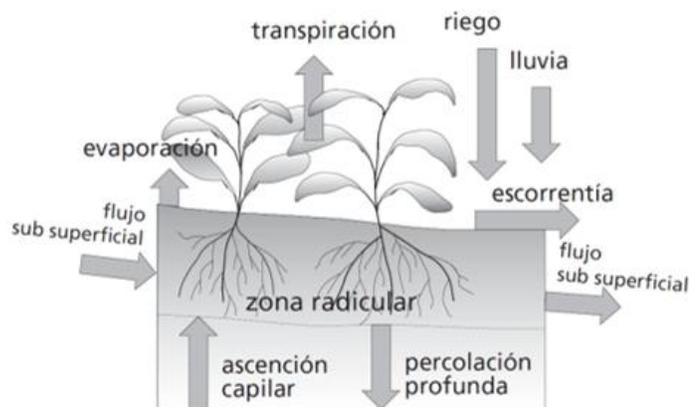


Figura N° 2: Balance de agua en el suelo en la zona radicular.

Fuente: CR PROAGRO/GTZ, 2011

2.2.2 Modelo matemático.

Un modelo matemático es una representación simplificada, a través de ecuaciones, funciones o fórmulas matemáticas, de un fenómeno o de la relación entre dos o más variables.

2.2.3 Modelo hidrológico.

El modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. En un modelo hidrológico el sistema físico real que generalmente representamos es la cuenca hidrográfica y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico, de esta manera un modelo matemático ayuda a tomar decisiones en materia de hidrología.

Un modelo hidrológico es una simplificación de la realidad, a partir del cual podemos estudiar la causa efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los

cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca.

El objetivo del análisis del sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Un modelo de sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas. Central a la estructura del modelo está el concepto de transformación del sistema.

2.2.4 Clasificación de los modelos

Los modelos que simulan fenómenos relacionados con recursos hídricos se pueden clasificar en tres grandes categorías: hidráulicos, que corresponden a aquellos que simulan el comportamiento de flujos en los cauces para distintos escenarios; hidrológicos, que simulan la relación entre las características meteorológicas y la escorrentía de una cuenca; y de planificación, que modelan la operación de los sistemas de recursos hídricos de una cuenca.

2.2.4.1 Modelación hidrológica.

La modelación hidrológica se define como el uso de modelos matemáticos conceptuales para la simulación de los procesos de transporte de agua que ocurren dentro de una cuenca. Estos modelos pueden estar basados en las ecuaciones físicas que rigen el comportamiento de las variables dentro de una cuenca o pueden ser de naturaleza conceptual, donde se representan los procesos que ocurren dentro de la cuenca a través de esquemas y algoritmos simplificados. (Chow, Mays, & Maidment, 1994)

2.2.5 Infiltración

La es el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del suelo y llega hasta sus capas inferiores; producto de la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares.

Percolación: Movimiento del agua dentro del suelo, la infiltración y la percolación están íntimamente relacionados, la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la percolación.

Flujo subsuperficial o interflujo: Es el desplazamiento del agua por debajo de la superficie del terreno.

Transmisión: Ocurre cuando la acción de la gravedad supera a la de la capilaridad y obliga al agua a deslizarse verticalmente hasta encontrar una capa impermeable.

Circulación: Se presenta cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad, obedeciendo las leyes del escurrimiento subterráneo.

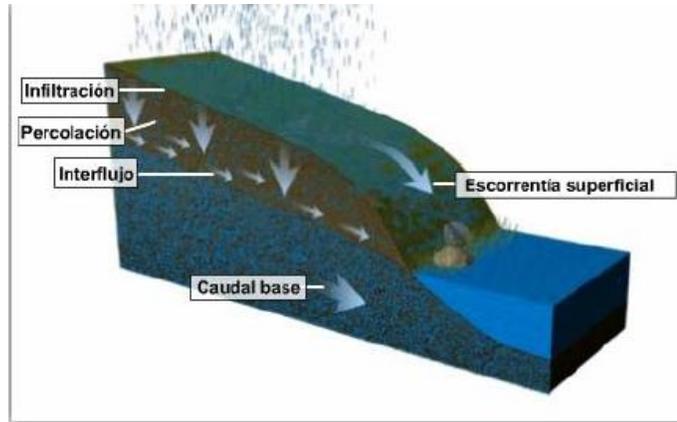


Figura N° 3: Infiltración y percolación.

Fuente: Cahuana & Weimar, 2009

La infiltración juega un papel de primer orden en la relación de lluvia y escurrimiento y por lo tanto en los problemas de diseño y predicción asociados a la dimensión y operación de obras hidráulicas.

2.2.5.1 Factores que afectan la capacidad de infiltración

La capacidad de infiltración depende de muchos factores, algunos de los factores que se describen a continuación influyen más en la intensidad de infiltración, al retardar la entrada del agua.

2.2.5.1.1 Condiciones de Superficie

Compacidad: Cuando un suelo se compacta disminuye la infiltración. Esta es una de las razones por las cuales campos cultivados que soportan el paso de tractores y maquinaria agrícola tienen menos infiltración, lo mismo sucede con los campos de pastoreo donde las pisadas del ganado van compactando el suelo.

Tipos de superficies: Las Superficies desnudas, tienen baja infiltración porque el suelo se halla expuesto al choque directo de las gotas de lluvia, lo que puede dar lugar a una compactación del mismo.

Los agregados de partículas son divididos por el agua, que arrastrará de este modo elementos más finos, con mayor posibilidad de penetrar hacia el interior y obturar los poros y grietas, impidiendo o retardando la infiltración.

Cobertura vegetal: La cobertura vegetal natural aumenta la capacidad de infiltración, una cobertura vegetal densa favorece la infiltración y dificulta el escurrimiento superficial del agua. Una vez que la lluvia cesa, la humedad del suelo es retirada a través de las raíces, aumentando la capacidad de infiltración para próximas precipitaciones.

Pendiente de la superficie: La pendiente del terreno influye porque puede mantener durante más o menos tiempo una lámina de agua de cierto espesor sobre él, de esto se concluye que a mayor pendiente menor infiltración, y viceversa.

Áreas urbanizadas: Las áreas urbanizadas reducen considerablemente la posibilidad de infiltración.



Figura N° 4: Áreas urbanizadas reduce la infiltración.

Fuente: Cahuana & Weimar, 2009

Afloramientos rocosos, en zonas con afloramientos rocosos, sin formación de suelo o siendo éste muy incipiente, la infiltración puede llegar a ser prácticamente nula.

2.2.5.1.2 Características del suelo

Textura del suelo: La textura del suelo influye en la estabilidad de la estructura, en tanto sea menor o mayor la proporción de materiales finos que contenga éste.

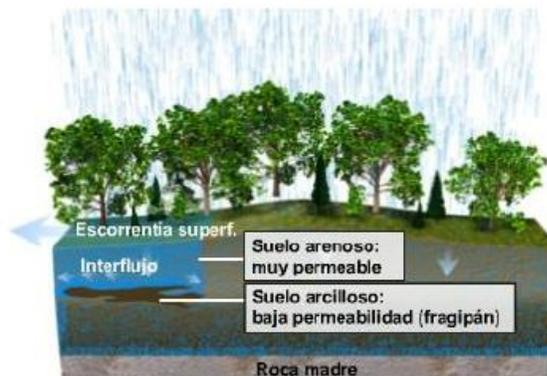


Figura N° 5: Variación de la infiltración por textura del suelo.

Fuente: Cahuana & Weimar, 2009

Un suelo con gran cantidad de limos y arcillas, está expuesto a la disgregación y arrastre de estos materiales por el agua, con el consiguiente llenado de poros más profundos.

Tamaño de los poros: La existencia de poros grandes reduce la tensión capilar, pero favorece directamente la entrada de agua.



Figura N° 6: Capacidad de infiltración en diferentes suelos
Fuente: Cahuana & Weimar, 2009

Entre mayor sea la porosidad, el tamaño de las partículas y el estado de fisuramiento del suelo, mayor será la capacidad de infiltración.

Acción del hombre y de los animales: Si el uso de la tierra tiene buen manejo y se aproxima a las condiciones iniciales (virgen), se favorecerá el proceso de la infiltración, en caso contrario, cuando la tierra está sometida a un uso intensivo por animales o sujeto al paso constante de vehículos, la superficie se compacta y se vuelve impermeable.

2.2.5.1.3 Condiciones Ambientales

Humedad inicial: La infiltración varía en proporción inversa a la humedad del suelo, un suelo húmedo presenta menor capacidad de infiltración que un suelo seco. A medida que el suelo se humedece, las arcillas y coloides se hinchan por hidratación, cerrando los vacíos y disminuyendo en consecuencia la capacidad de infiltración.

2.2.6 Escurrimiento

2.2.6.1 Definición y componentes del escurrimiento

El escurrimiento, se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El escurrimiento (gasto) de un cauce, normalmente se mide en las tres formas siguientes:

1) En unidades de gasto, volumen en la unidad de tiempo. (m^3/s) o ($Hm^3/año$).

2) En unidades de gasto unitario, ($m^3/s./km$) o ($Hm^3/km^2/año$).

3) En lámina equivalente sobre la cuenca, en $mm/día$, mm/mes o $mm/año$.

El escurrimiento total proveniente de una cuenca típica heterogénea tiene cuatro componentes: Precipitación en los cauces (Lluvia que cae sobre la superficie libre de agua) Escurrimiento superficial (flujo sobre el terreno), Escurrimiento hipodérmico (escurrimiento subsuperficial) y Escurrimiento subterráneo.

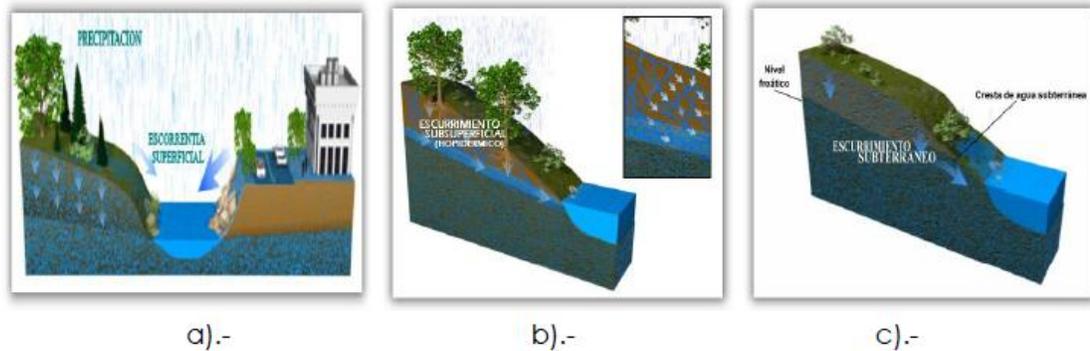


Figura N° 7: Componentes del escurrimiento

Fuente: Cahuana & Weimar, 2009

2.2.6.1.1 Escurrimiento superficial

Flujo sobre el terreno que proviene de la precipitación no infiltrada (precipitación en exceso, hp) y que escurre sobre la superficie del suelo y después por los cauces.

2.2.6.1.2 Escurrimiento Subsuperficial

Escurrimiento subsuperficial es aquél que luego de infiltrarse una determinada cantidad en el perfil del suelo, se manifiesta escurriendo en la primera capa del suelo, y en algunos casos, vuelve a aparecer en superficie, sumándose al superficial. El escurrimiento tiene una velocidad de conducción lento, una parte de este tipo de escurrimiento entra rápidamente a formar parte de las corrientes superficiales y la otra le toma bastante tiempo el unirse a ellas (ver figura 7).

2.2.6.1.3 Escurrimiento subterráneo

Es aquel que proviene del agua subterránea, la cual es recargada por la parte de la precipitación que se infiltra, una vez que el suelo se ha saturado (ver figura 7). El escurrimiento subterráneo y la parte retardada del escurrimiento subsuperficial

constituyen el escurrimiento base de los ríos. Es debido a una profunda percolación del agua infiltrada en el suelo, se lleva a cabo en los mantos subterráneos y que posteriormente, por lo general, descarga a las corrientes fluviales

2.2.6.2 Clasificación del escurrimiento

Con base en la forma en que contribuyen al escurrimiento total, el escurrimiento, se clasifica en escurrimiento directo, (cuando su efecto es inmediato), y escurrimiento base (cuando su efecto es retardado).

2.2.6.2.1 Escurrimiento directo

El escurrimiento directo está integrado por la precipitación en los cauces, flujo sobre el terreno y escurrimiento subsuperficial

2.2.6.2.2 Escurrimiento base

El escurrimiento base, está constituido por el escurrimiento subterráneo y el escurrimiento subsuperficial de lento drenaje.

El hecho de presentarse una precipitación, no implica necesariamente que haya escurrimiento subterráneo, esto depende de una serie de factores.

2.2.6.3 Factores que afectan el escurrimiento

Los factores que afectan al escurrimiento superficial son: factores climáticos (Meteorológicos) factores fisiográficos

2.2.6.3.1 Factores Climáticos (Meteorológicos)

Formas de precipitación, Tipos de precipitación, Duración de precipitación Intensidad de la precipitación, Dirección de la tormenta, Velocidad de la tormenta, Distribución de la lluvia en la cuenca.

2.2.6.3.2 Factores fisiográficos:

Características físicas de la cuenca:

- Superficie de la cuenca
- Forma de la cuenca
- Elevación de la cuenca
- Vegetación de la cuenca
- Pendiente de la cuenca. Tipo y uso del suelo, Humedad antecedente del mismo.

2.3 CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CONTEXTO ACTUAL

2.3.1 Quinto informe de IPCC

El documento técnico del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC según sus siglas en el idioma inglés) indica que el cambio climático podría afectar de manera notable al ciclo hidrológico, alterando la intensidad y la distribución temporal y espacial de la precipitación, de la escorrentía de superficial y de la recarga de agua, produciendo impactos diversos sobre diferentes ecosistemas naturales y actividades humanas.

En el quinto informe del IPCC se reporta los siguientes cambios en sistema climático: la temperatura media global se ha incrementado en 0,85°C (entre 0,65°C y 1,06°C) entre el periodo 1880-2012, la cantidad y extensión de las masas de hielo y nieve han disminuido, el nivel del mar ha aumentado y que las concentraciones de gases del efecto invernadero han aumentado, se estima que a mediados del presente siglo de continuar las emisiones de CO₂ como viene aconteciendo en la actualidad habrá un aumento adicional de temperatura de 1,4 a 2,6°C.

La principal conclusión del mencionado informe es que el calentamiento del sistema climático es inequívoco y desde 1950 se han observado cambios en los episodios extremos, por ejemplo, el número de días y noches frías han disminuido y el número de días y noches cálidas han aumentado a nivel global. El calentamiento global es fruto del aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, que a su vez son el resultado de las actividades humanas, lo que pone en evidencia nuestra inequívoca responsabilidad. Un cambio climático que supone impactos y riesgos que ya estamos sintiendo hoy en todo el mundo, y que van desde el aumento del nivel del mar a cambios en los patrones de lluvias, incremento de fenómenos climáticos extremos, entre otros.

2.3.2 Cambio climático en el futuro, riegos e impactos

Según el IPCC las proyecciones que realizaron muestran un aumento de las temperaturas a lo largo del siglo XXI, que las olas de calor se produzcan con más frecuencia y que sean de más duración, y que en los eventos extremos de precipitación sean más intensos y frecuentes en muchas regiones, el océano continuara calentándose y acidificándose y el nivel medio del mar continuara aumentando. Por otra parte, el cambio climático hará que se reduzcan los recursos de aguas superficiales y subterráneos.

El cambio climático pone en riesgo la producción de alimentos, con el aumento de la temperatura se prevén impactos negativos en las regiones tropicales y templadas sobre las cosechas de trigo, arroz y maíz. Los impactos derivados del cambio climático observados y proyectados a futuro, representan un serio riesgo tanto para los sistemas naturales como para los humanos. Especialmente afectados se verán los recursos hídricos, la agricultura y producción alimentaria, la salud humana, los océanos y la biodiversidad, incluyendo bosques y selvas.

2.3.3 Cambio climático en Bolivia

Bolivia se ha visto afectado por diferentes fenómenos climatológicos como ser el retroceso de los glaciares y su posible desaparición en el siglo XXI, además de la exacerbación de los desastres naturales como sequías e inundaciones que son producto de los efectos del cambio climático.

Las posibles implicaciones del cambio climático en Bolivia, son causa de preocupación tanto en el Gobierno como en la sociedad civil. Según una investigación del programa ND-GAIM Country Index, del proyecto Iniciativa de Adaptación Global de la Universidad de Notre Dame (Estados Unidos), Bolivia es el segundo país más vulnerable de Sudamérica y el quinto menos preparado para mitigar los daños del cambio climático (Venezuela, Surinam, Guayana Francesa y Guayana están peor capacitados).

El informe realizado en el año 2018 por el Observatorio de Desarrollo Sostenible y Cambio Climático de la Rábida “Cambio Climático y Desarrollo Sostenible en Iberoamérica” señaló que los recursos hídricos serán los elementos más vulnerables al cambio climático, representando un grave problema para los sectores altamente dependientes de su disponibilidad, como la agricultura o la generación de electricidad, además menciona que se observaron cambios en los caudales y la disponibilidad de agua en la cuenca del Río de la Plata, en gran parte de Argentina, así como en Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay debido a cambios en los patrones de las precipitaciones.

Estas variabilidades en las precipitaciones pueden llevar a una disminución de las represas y embalses de las centrales hidroeléctricas de la región entre un 29 a 32%, con los consecuentes problemas que podrían darse para satisfacer una cada vez más alta demanda energética. (Observatorio de Desarrollo Sostenible y Cambio Climático de la Rábida, 2018)

2.3.4 Cambio climático en Valle Centra de Tarija

En los últimos años en el valle central de Tarija han ocurrido diferentes anomalías climáticas que provocan condiciones de tiempo muy variables. La distribución temporal de la precipitación a lo largo del año ha cambiado en nuestra región, en algunos meses se tiene déficit de lluvias y en otros excesos de ella, de igual manera los focos de calor son más intensos debido al incremento de la temperatura.

De acuerdo a los registros de la estación meteorológica Aeropuerto la precipitación anual está disminuyendo y la temperatura media anual está incrementando (ver figura 8 y9)

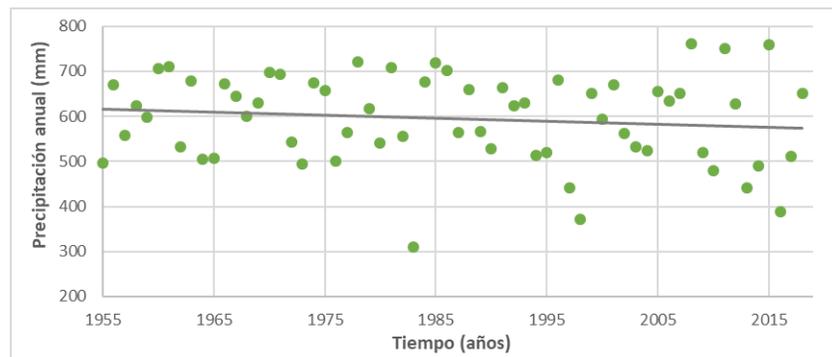


Figura N° 8: Precipitación anual (1955-2019)

Fuente: Elaboración propia

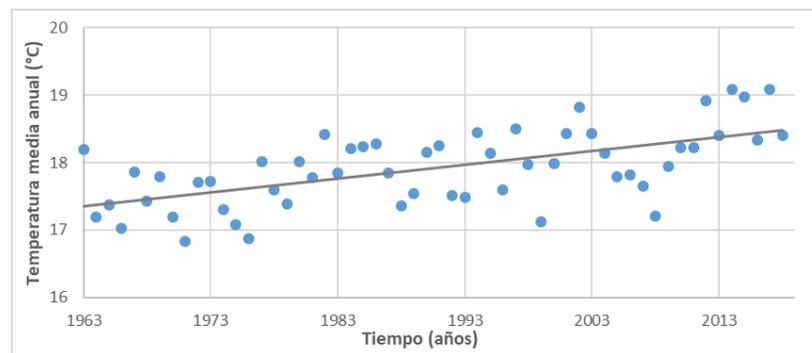


Figura N° 9: Temperatura media anual (1963-2019)

Fuente: Elaboración propia

2.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO WEAP

2.4.1 Características generales de WEAP.

El modelo WEAP, fue creado en 1988 por Jack Sieber, con el patrocinio de Stockholm Environment Institute (SEI). Es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua, que opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas. El modelo se distingue por integrar a la simulación componentes

naturales (demandas por escorrentía, flujo base) y componentes humanos (demanda humana, embalses).

WEAP permite la planificación de recursos hídricos balanceando la disponibilidad de agua y la demanda. La disponibilidad de agua es analizada a partir de módulos físicos hidrológicos a escala de subcuenca (ríos, arroyos, manantiales, embalses, aguas subterráneas, etc.) y la demanda es analizada a partir de la distribución espacial y temporal de los consumidores con diferentes niveles de prioridades (Sieber & Purkey, 2007).

2.4.2 Capacidades de un modelo WEAP.

- Los datos de entrada al modelo y los resultados generados en los procedimientos de cálculo, permiten contar con una base de datos de las demandas de agua, asignaciones del recurso y estado de las fuentes en un período histórico.
- WEAP permite optimizar y evaluar alternativas de la gestión del agua dentro de la cuenca, por solo citar algunos ejemplos: trasvases de agua, uso de fuentes alternativas, restricción de uso de fuentes o infraestructura de aprovechamiento en épocas del año, prácticas de ahorro, entre otros.
- WEAP permite confeccionar los balances de agua por usuarios, por cultivo agrícola y el balance general de la cuenca; identificando demanda neta y bruta, déficit en el suministro y nivel de cobertura de la demanda.
- La implementación del modelo permite evaluar y trazar las proyecciones de demanda teniendo información de cómo impactan en el estado de las fuentes, revisando su recuperación y analizando distintas variantes de manejo del agua disponible.
- En el modelo pueden evaluarse diferentes reglas de operación de los embalses, que permitan apoyar la adaptación y resiliencia ante situaciones de estrés hídrico como la sequía hidrológica. El análisis de los resultados de WEAP permiten la anticipación, seguimiento y evaluación de la sequía hidrológica
- En zonas agrícolas afectadas por baja disponibilidad, los resultados del modelo permitirían tomar decisiones como el aplazamiento del inicio de la siembra cultivo a la espera de una situación más favorable en la disponibilidad de los recursos hídricos, y en casos extremos decidir no sembrar o sembrar cultivos menos consumidores.

- Analizar calendarios de siembra de cultivos agrícolas y analizar estrategias de rotación de cultivos, todo en base a la sostenibilidad de éstos(as) en función de la disponibilidad de agua.
- Evaluar si los recursos hídricos disponibles en cualquier horizonte de planeación, permitirán sostener los niveles de demanda actual de la agricultura, su crecimiento e incluso cuestionar, en muchos casos, la permanencia de ciertos cultivos o en general de la agricultura como actividad económica a futuro.
- Las evaluaciones en WEAP permiten tener un estimado de los volúmenes de las fuentes en diferentes períodos de planeamiento y su relación con el gráfico de explotación; además permiten evaluar la efectividad para garantizar la entrega de agua a los usuarios.
- A partir de los datos de índices de pérdidas en los sistemas de conducción y de riego, pueden estimarse las pérdidas de agua por campaña de siembra, y al estar declaradas espacialmente puede conocerse donde se producen. Esta información resulta útil para trazar estrategias para reducción de pérdidas en sistemas de riego, evaluar la influencia de una nueva tecnología en el balance de agua e identificar donde resulta más conveniente acometer labores de mantenimiento en sistemas de conducción.
- El modelo permite estimar la disponibilidad del recurso agua actual y frente a escenarios climáticos diversos. (Hervis Granda, Geler Roffe, Díaz García, & Amestoy, 2018)

2.4.3 Métodos de simulación en procesos hidrológicos.

Actualmente WEAP permite escoger entre cinco métodos de simulación de procesos hidrológicos, la elección del modelo a utilizar estará condicionando con la finalidad del estudio y en algunos casos con la información que se tenga.

A continuación describen los 5 métodos de modelación en WEAP desde el más simple hasta el más complejo.

- 1. Escurrimiento de riego (método de coeficiente simplificado).** es el método más simple, utiliza los coeficientes de los cultivos para calcular la EP/demanda de riego de los cultivos en la cuenca. No simula procesos de escorrentía, infiltración o cambios en la humedad de suelo.

2. **Solo demandas de lluvia (método de coeficiente simplificado).** también usa los coeficientes de los cultivos, pero simula el resto de la precipitación como escorrentía hacia un río y/o hacia agua subterránea.
3. **Escurrimiento de Lluvia (método de la humedad del suelo).** Es más complejo, representa la cuenca con dos capas de suelo, además del potencial para la acumulación de nieve. En la capa superior simula la evapotranspiración, la escorrentía, el interflujo poco profundo y cambios en la humedad del suelo. En la capa inferior del suelo se simula el enrutamiento del caudal base al río y cambio en la humedad de suelo.
4. **MABIA.** El Método Mabilia es una simulación diaria de la transpiración, la evaporación, las necesidades de riego/la programación, el crecimiento del cultivo y los rendimientos.
5. **Desarrollo de Plantas (diario; CO₂, efectos de estrés por agua y temperatura).** Simula el crecimiento de las plantas, el uso del agua, y el rendimiento utilizando una etapa de tiempo diario.

2.4.4 Modelo escurrimiento de lluvia -Método de la humedad del suelo

Es un modelo unidimensional, el cual consiste en la noción de transferencia de agua entre dos contenedores un balde superior que representa la zona de raíces, y un balde inferior que representa la interacción con el acuífero, los cuales representan la dinámica entre la evapotranspiración, escurrimiento superficial, sub superficial, percolación, para un elemento de análisis o cuenca. (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005)

La influencia de embalses, la red de distribución y otras condiciones de operación, se asignan a los puntos de extracción de agua y se incorporan a los cálculos a través de criterios que maximizan la satisfacción de la demanda.

El modelo WEAP, permite dentro de cada unidad hidrológica denominada Catchment, calcular balances de agua de acuerdo a las características de dicha unidad. Para el cálculo de la evapotranspiración se usa la ecuación de Penman Montienth. La escorrentía superficial se representa a partir de parámetros de resistencia al flujo, inclinación, porosidad entre otras, a partir de ecuaciones empíricas. El flujo vertical entre diferentes capas de suelo se ajusta usando un parámetro de conductividad y parámetros de ajuste que permiten estimar que fracción pertenece al flujo horizontal. (ver figura 10)

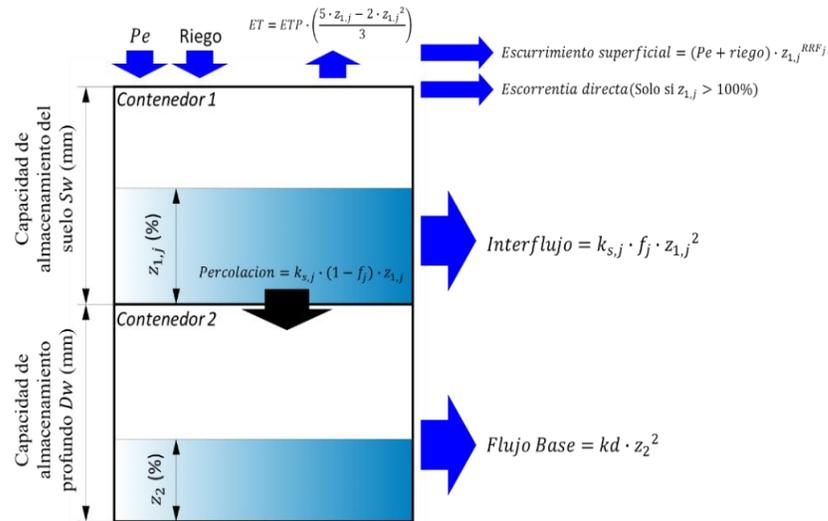


Figura N° 10: método humedad de suelo
Fuente: (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005)

2.4.4.1.1 Escorrentía superficial

Flujo sobre el terreno que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo y llega a la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno por la acción de la gravedad.

$$\text{Esc. superficial} = (\text{precipitación} + \text{irrigación}) \cdot z_1^{\text{factor de resistencia a la escorrentia}}$$

2.4.4.1.2 Escorrentía directa (solo si $z_1 > 100\%$)

Agua que fluye directamente cuando la humedad en la zona de raíces supera el 100%, su efecto es inmediato.

2.4.4.1.3 Escorrentía subsuperficial

Es aquél que luego de infiltrarse una determinada cantidad en el perfil del suelo, se manifiesta escurriendo en la primera capa del suelo, y en algunos casos, vuelve a aparecer en superficie, sumándose al superficial.

$$\text{Esc. subsuperficial} = (\text{cond. en la zona de raíces} * \text{Dirección de flujo}) z_1^2$$

2.4.4.1.4 Percolación

Se refiere al paso lento de fluidos a través de materiales porosos, el traspaso del agua superficial que se infiltra a las aguas subterráneas. La percolación está influenciada por la dirección del flujo (f).

$$\text{Percolación} = \text{cond. en la zona de raíces} (1 - \text{dir. de flujo}) z_1^2$$

2.4.4.1.5 Flujo base.

Caudal que circula en la parte profunda del suelo como acuíferos.

$$\text{flujo base} = \text{cond. en zona prof.} \cdot z_2^2$$

2.4.4.2 Ecuación del tanque superior

El modelo permite dividir la cuenca o sub cuencas (Catchments) en varios elementos N de acuerdo a una característica específica. El modelo realiza un balance en cada sub elemento j de N donde hay un balance hídrico en calculado para cada área fraccional. El clima es uniforme sobre cada área fraccional donde la ecuación de balance de masa continuo se escribe como:

Las ecuaciones del modelo representan el balance entre la entrada y salida del agua, donde la diferencia en cada uno de los contenedores representa los cambios de humedad del suelo. (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005)

El balance hídrico es calculado en cada fracción de uso o cobertura j de las i áreas fraccionales que forman parte de cada subcuenca. La ecuación del balance de masa se define asumiendo que las variables climáticas son homogéneas en cada j , de la manera siguiente

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = Pe(t) - PET(t) \cdot k_{c,j}(t) \cdot \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - Pe(t) \cdot z_{1,j}^2 \frac{RRF_j}{2} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$$

Tabla N°1: Definición de términos del balde superior

Termino	Ecuación
1er término: Cambio en la humedad en un suelo j .	$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$
2do término: Precipitación efectiva incluye riego y derretimiento de nieves	$Pe(t)$
3er termino: Evapotranspiración potencial.	$PET(t) \cdot k_{c,j}(t) \cdot \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right)$
4to termino: Escorrentía superficial.	$Pe(t) \cdot z_{1,j}^2 \frac{RRF_j}{2}$
5to término: Flujo intermedio	$f_j k_{s,j} z_{1,j}^2$
6to termino: Percolación	$(1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$

Fuente: Elaboración propia

El escurrimiento superficial y de inter flujo RT se define en la siguiente expresión:

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left(Pe(t) \cdot z_{1,j}^2 \frac{RRF_j}{2} + f_j \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 \right)$$

Tabla N° 2: Definición de parámetros del balde superior y descripción WEAP.

Variable	Definición	Descripción WEAP
$k_{c,j}(t)$	Coefficiente de cobertura vegetal en un suelo j .	Coefficiente de cultivo.
Sw_j	Capacidad de almacenamiento en zona de raíces.	Capacidad de agua de suelo
RRF_j	Es el factor de resistencia de escurrimiento para cada fracción de cobertura	Factor de resistencia a la escorrentía
$K_{s,j}(t)$	Estimación de la conductividad en la zona de raíces saturada (mm/paso de tiempo)	Conductividad en zona radicular.
f_j	Coefficiente de partición o división relacionado al suelo, tipo de cobertura, y la topografía que fraccionan el agua en dos componentes, vertical y horizontal	Dirección preferencial del flujo
$Z_{1,j}$	Almacenamiento relativo dado como fracción del almacenamiento total en la zona de raíz (inicial).	Z1 inicial

Fuente: Elaboración propia

2.4.5 Ecuación del tanque inferior.

El modelo permite definir escurrimiento dirigido hacia elementos como ríos y acuíferos. Para los casos en que no se tiene estas condiciones, el flujo base del segundo contenedor es estimado con la siguiente ecuación:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j)k_s z_{2,j}^2$$

Tabla N° 3: Definición de términos

Termino	Ecuación
1er término: Flujo de entrada en el balde inferior.	$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$
2do término: Flujo base	$k_d z_{1,j}^2$
3er termino: Percolación	$(1 - f_j)k_s z_{2,j}^2$

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4: Definición de variables del balde inferior.

Variable	Definición	Descripción WEAP
Dw_j	Capacidad de almacenamiento en zona profunda.	Capacidad agua profunda.
k_d	Tasa de conductividad de almacenamiento inferior	Conductividad profunda
Z_2	Almacenamiento relativo dado como fracción del almacenamiento total en la zona de profunda.	Z_2 inicial

Fuente: Elaboración propia

$$S_{\max} \frac{dz_2}{dt} = \left(\sum_{j=1}^N (1 - f_j) \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} \cdot z_2^2$$

Debido a que en el tanque superior hay una capacidad de almacenamiento y tiene una conductividad el tanque inferior también tiene una capacidad de almacenamiento en la zona profunda y a su vez tiene una conductividad que gobierna el flujo base.

Donde el flujo de entrada hacia este balde, S_{\max} es la percolación desde el balde superior dado en la ecuación de Sw_j , y k_d es la conductividad saturada en el balde inferior (mm/paso de tiempo de simulación), la cual está dada como un valor general para la cuenca (no lleva subíndice j). Las ecuaciones de Sw_j , y S_{\max} ser resueltas por medio de iteración para obtener valores coincidentes en ambos contenedores (WEAP utiliza el algoritmo predictor-corrector). Si se quisiese realizar una representación de acuíferos de forma separada y se estableciera un elemento para este tipo de estructura (acuífero aluvial), el segundo término de la ecuación de S_{\max} , es ignorado y la recarga R (volumen/paso de tiempo) hacia el acuífero es:

$$R = \sum_{j=1}^N A_j \cdot (1 - f_j) \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2$$

Donde R es la percolación A_j es el área de aporte del elemento j .

2.4.6 Parámetros del modelo hidrológico (SMM).

2.4.6.1 Sensibilidad esperada de los factores del modelo hidrológico

En la Guía para Elaboración de Balances Hídricos se detalla la sensibilidad de los parámetros en el modelo hidrológico de WEAP. En la Tabla 5 se presenta la sensibilidad de cada parámetro.

Tabla N° 5: Sensibilidad del modelo

Parámetro	(Amato, McKinney, Ingo-Blanco, y Teastey, 2006, CCGUC-SEI, 2009, Ingo-Blanco, 2009)	(Gozáles, 2016)	(Soria, 2016)
Sw (mm)	Media	Media	Media
Dw (mm)	Alta	Media	Alta
Kc	Alta	Media	Media
RRF	Alta	Media	Media-baja
ks (mm/mes)	Media	Media	Media
Ks2 (mm/mes)	Media	Media	Media
f	Media	Media	Baja
h1	Baja	Media	Baja
h2	Baja	Media	Baja

Fuente: MMAyA, VMRH, & Soria, 2016

Conocer la sensibilidad de los datos es muy importante porque nos permite saber cuál va ser la reacción del modelo ante las variaciones de cualquier parámetro, esto en la calibración es vital porque en función a la sensibilidad se hace las modificaciones.

2.4.6.2 Coeficiente de cultivo Kc

Se sugiere considerar coeficientes distintos para las coberturas y para los cultivos. Para coberturas, los valores se obtienen por trabajo de campo o mediante valores referenciales de la literatura. Por otro lado, es factible considerar que el Kc para cobertura vegetal nativa es invariable en el año. Para el caso de los cultivos, los Kc tienen variabilidad mensual (estacional). Su estimación a través de técnicas de teledetección. (MMAyA, VMRH, & Soria, 2016)

Tabla N° 6: Valores de Kc por unidad de cobertura vegetal y uso de suelo.

Unidad de cobertura y uso de suelo	Kc	Kc	Kc
	(Gonzales, 2016)	(Espejo, 2016)	(SNET, 2005)
Bosque denso (amazónico, andino, Chiquitano)	1,05	-	1,0
Bosque esclerófilo, bosque denso nublado	-	0,8	1,0
Bosque o monte ralo	0,9	-	1,0
Bosque ralo esclerófilo	-	0,8	1,0
Matorral, pajonal andino montaña semiárido	0,9	-	-
Matorral chiquitano sobre ondulaciones y llanuras, semiárido	0,9	-	0,95
Herbazal graminoide, llanura inundada estacionalmente o por periodos cortos	1,0	-	1,05
Herbazal graminoide, puna altoandina árida	1	-	-
Herbazal graminoide, puna altoandina árida	1	-	-
Herbácea graminoide	-	0,75	-
Vegetación dispersa en pedregales, Puna altoandina semiárida	0,7	-	0,7
Arbustos dispersos	-	0,75	0,7
Estructura urbana y rural, ciudades y pueblos	0,7	0,50	-
Depósitos de arena, playas y dunas	0,7	-	-
Superficie descubierta cárcavas, arena	-	0,6	-
Cuerpos y cursos de agua	1,05	0,4	1,1
Agricultura múltiple, Agricultura comercial	0,7	-	-
Cultivos plurianuales	-	0,8	-
Cultivos en rotación extensiva	-	0,7	-
Cultivos en rotación intensiva	-	0,85	-
Pastos cultivados y naturales	-	-	1,0
Zonas quemadas	-	-	1,0
Sistemas agroforestales	-	-	0,7
Ríos	-	-	1,15

Fuente: MMAyA, VMRH, & Soria, 2016

2.4.6.3 Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw)

Este parámetro hace referencia a la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo que en este caso corresponde al primer balde de SM. Este parámetro puede ser determinado en base a mapas temáticos e información fisiográfica disponible. En la literatura y según experiencias anteriores en Bolivia se sugiere estimar en base a la Capacidad de Retención de Humedad (CRH) y la profundidad de raíces en cada Tipo de Utilización de Tierra

(TUT). En el caso de CRH en la guía metodología de MDSP (2001) se propone una tabla empírica sistematizada de la literatura (ver tabla 8). Para el uso de esta tabla es necesario contar con datos de textura y pedregosidad del suelo. (MMAyA, VMRH, & Soria, 2016) La estructura del modelo WEAP permite que este parámetro caracterice los grupos de suelos dentro de una subcuenca. Típicamente en WEAP, valores de Sw son aplicados combinaciones de cobertura vegetal delineados dentro de cada subcuenca.

Tabla N° 7: Capacidad de retención de humedad (CRH).

Textura		Sin piedra ajustado a CRH (mm/mes)	CRH tropical Contenido de piedra y grava (% de reducción sin piedra con CRH tropical)			
			0%	0-5%	15-40%	40-80%
Codigo	Descripción					
Y	Arcilla	140	130	90	50	10
F	Franco	170	160	110	40	20
L	Limo	150	130	100	55	10
A	Arena	90	80	60	30	10
AF	Arena Francosa	110	100	70	40	10
YA	Arcilla arenosa	110	100	70	40	10
FYA	Franco arcillo-arenoso	150	140	100	55	10
FA	Franco arenoso	150	130	100	55	10
YL	Arcilla limosa	160	140	110	55	10
FYL	Franco arcillo limosa	170	150	110	65	20
FL	Franco limoso	190	170	130	70	20
FY	Franco arcilloso	150	130	100	55	10

Fuente: MMAyA, VMRH, & Soria, 2016

Ahora, la profundidad radicular indica hasta que profundidad las plantas pueden usar el agua que está almacenada en el suelo. El agua disponible a una profundidad mayor a la radicular no está disponible para las plantas, y por tanto no hace parte del balance hídrico del suelo. En la se muestran valores referenciales de profundidad máxima de raíces por tipo de utilización de tierra a escala 1:250.000 (MMAyA, BHSB, 2016).

Tabla N° 8: Profundidad máxima de raíces

Tipo de utilización de la tierra	Profundidad máxima de raíces
agricultura anual	100 cm
Agricultura perenne	150 cm
Pastos sembrados	100 cm
Pasturas naturales	100 cm
Bosques	150 cm

Fuente: ZONISIG, 2001

La Tabla 8 tiene limitaciones para los tipos de utilización de tierra definidos para este estudio de balance hídrico, ya que para este estudio se tiene un número mayor de clases.

La Tabla 9 nos proporciona información de la profundidad máxima de raíces. En la aplicación práctica en cada macrocuenca (Altiplano, La Plata, Amazonas) los valores pueden ser ajustados a valores más pequeños dependiendo de las características fisiográficas y con el apoyo de la distribución espacial de las calicatas.

Tabla N° 9: Profundidad máxima de raíces.

Tipo de utilización del suelo	Profundidad máxima de raíces (m)	Fuente
Agricultura (Agriculture)	1,5	Con la base de datos de calicatas de suelo del Proyecto ZONISIG
Bosque (Forest)	2	
Herbácea (Grassland)	1	
Bosque con inundación (Wetland)	2	
Centros poblados y urbanos (Settlement)	0,1	
Matorrales (Shrubland)	1,5	
Vegetación dispersa o aislada de arbustos y gramíneas (Other/Bare)	1	

Fuente: MMAyA, BHSB, 2016

2.4.6.4 Conductividad en la zona de raíces (Ks)

El parámetro de conductividad en la zona de raíces (Ks) representa el flujo máximo de agua en el suelo cuando está a capacidad de campo. Este parámetro caracteriza la capacidad del suelo para transmitir agua, y tiene como unidad común cm/s.

Tabla N° 10: Valores de Ks para diferentes clases texturales

Textura	Promedio (cm/d)	Mínimo (cm/d)	máximo (cm/d)
Arena	727,2	403,2	1520,64
Arena francosa	1025,28	25,92	1897,92
Franco arenoso	239,04	16,56	430,56
Franco	70,56	5,04	60,48
Franco limoso	27,36	6,48	61,92
Franco arcillo arenoso	64,8	23,472	118,08
Franco arcilloso	38,88	1,008	92,16
Franco arcillo limoso	18,72	1,44	28,8
Arcilla arenosa	30,24	7,2	61,92
Arcilla limosa	21,6	1,296	56,16
Arcilla	14,4	3,456	28,8

Fuente: MMAyA, BHSB, 2016

Dada su relación a un parámetro físico y medible del suelo, el valor de Ks en el método SM del modelo WEAP se puede estimar inicialmente con valores referenciales elaborados en la literatura de fuentes empíricas o experimentales. (MMAyA, BHSB, 2016).

Es el máximo flujo posible cuando el reservorio "1" está a capacidad de campo. Al referirse en teoría a un parámetro físico, estos valores se estiman a través de referencias generales de la literatura reduciendo de esta manera los parámetros a calibrar, en cuyo caso las unidades del parámetro deberían ser [mm/día o mm/mes]. Tal como ocurre con la estimación de la conductividad de la zona profunda, la conceptualización del autor difiere de la aparente interpretación física sugerida por el nombre del parámetro. (MMAyA, VMRH, & Soria,2016)

2.4.6.5 Factor de resistencia a la escorrentía (RRF)

Inicialmente el parámetro estaba concebido como Índice de Área Foliar (LAI) (Purkey, y otros, 2008). Pero este parámetro tal como su nombre lo indica ahora se refiere más a un factor de resistencia a la escorrentía que está en función de algunas características fisiográficas como la vegetación, pendiente, pedregosidad, etc. El rango de este parámetro varía entre 0,1 hasta 10, cuando los valores están cerca de 10 existe mayor resistencia a la escorrentía, mientras que valores próximos a 0,1 indican menor resistencia. Para el presente estudio, este parámetro se ha definido en función de la utilización de la tierra, y además haciendo consideración indirecta de otras características fisiográficas. En la Tabla 11 se presentan algunos criterios fisiográficos usados para la parametrización de RRF en cada macro cuenca o cuenca. Los rangos numéricos asociados a estos criterios están presentados en la sección de parametrización específica de cada macro cuenca Controla la respuesta de la escorrentía superficial. Valores altos implican tasas bajas de escorrentía y viceversa.

Tabla N° 11: Valores de RRF para diferentes lugares (adm)

Tipo de utilización del suelo	RRF Altiplano	RRF Oriental S. Andino	RRF Montaña	RRF llanura	RRF (Espejo, 2016)
Agricultura (Agriculture)	6	5	4	5	4
Bosque (Forest)	8	6	6	9	5
Herbácea (Grassland)	6	4	4	6	4.5
Centros poblados y urbanos	2	2	2	2	2
Matorrales (Shrubland)	6	5	5	7	4.5
Vegetación dispersa o aislada de arbustos y gramíneas (Other/Bare)	5	3	3	3	-

Fuente: MMAyA, VMRH, & Soria,2016

Valores estimados en base a calibración del modelo varían en el rango de 0,1 a 10. El RRF se lo relaciona teóricamente con el LAI (Purkey, y otros, 2008), a su vez estimado a partir

de técnicas de teledetección o a partir de referencias en la literatura. La tabla 12 provee los valores estimados. (MMAyA, VMRH, & Soria,2016)

Tabla N° 12: Índice de área foliar (LAI) para distintos tipos de cobertura (adm)

Cobertura	LAI		
	Promedio	Mínimo	Máximo
Desiertos (sin cobertura vegetal)	1,31	0,59	2,84
Pastura (zonas templadas y tropicales)	1,71	0,29	5
Patzizales altos, arbustos)	2,08		
Otra vegetación	2,08		
Pastizales para la actividad ganaderas	2,5		
Pastizales	2,5		
Cultivos (zonas templadas y tropicales)	3,62	0,2	8,7
Cultivos (agricultura intensiva; extensiva)	4,22		
Humedales	6,34	2,5	8,4
Áreas urbanas	8		
Plantación forestal	8,72	1,55	18

Fuente: MMAyA, VMRH, & Soria,2016

2.4.6.6 Dirección preferencial del flujo (f)

El parámetro de dirección de flujo preferente se utiliza para la partición de flujo de la zona de raíz al estrato inferior de la capa de suelo o aguas subterráneas. Puede variar según la clasificación de cobertura vegetal y su rango es de 0 a 1, donde 1 indica que la dirección de flujo horizontal es el 100% y 0 indica que la dirección de flujo vertical es 100%. En las cuencas donde existe predominancia de depósitos cuaternarios los valores de f están en el rango de 0,25 y 0,45; mientras que en cuencas con relieve complejo el valor está en 0.6. (MMAyA, BHSB, 2016).

Tabla N° 13: Estimaciones de f para diferentes clases de cobertura vegetal (adm).

Unidad de cobertura y uso de suelo	f (Espejo, 2016)	f (González, 2016)	f (Soria,2016)
Bosque denso y ralo	0,55	0,15	-
Bosque denso andino montano	-	0,9	-
Matorral pajonal andino montaña semiárido	-	0,9	-
Matorral chiquitano sobre ondulaciones y llanuras,	-	0,15	-
Herbazal graminoide, llanura inundada estacionalmente o por periodos cortos	-	0,15	-
Herbazal graminoide, puna altoandina árida	-	0,9	-
Herbácea graminoide	0,65	-	-
Vegetación dispersa en pedregales, Puna altoandina semiárida	-	0,9	-
Arbustos dispersos	0,65	-	-
Arbustos con pajonal	-	-	0,15(<3000msn 0,50(>3000msn)
Cultivos	0,65	0,50	0,5
Estructura urbana y rural ciudades y pueblos,	0,9	0,9	-
Cuerpos y cursos de agua	0,50	0,50	-

Fuente: MMAyA, VMRH, & Soria,2016

2.4.6.7 Conductividad en la zona profunda (Kd)

El parámetro de conductividad profunda representa la tasa de conductividad para el segundo cubo, en milímetros por día. Controla la transmisión de caudal base y WEAP aplica un solo valor de Kd para todo el catchment.

Es un valor único para toda la cuenca y no se considera cuando el nodo de demanda recarga el acuífero local. Controla el flujo subterráneo a través de una relación directamente proporcional. Una posibilidad para estimar valores iniciales es a través de la geología local. (MMAyA, VMRH, & Soria,2016).

2.4.6.8 Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda Dw [mm]

Se estima como un valor único para toda la cuenca, asumiendo un solo reservorio horizontal subterráneo. El valor se ignora cuando el sitio de la demanda recarga el acuífero local (SEI, 2015). Se infiere por calibración del modelo, debido a que su estimación es compleja a través de información física (Purkey, y otros, 2008). La capacidad de agua profunda es la capacidad de almacenamiento efectivo de agua, en milímetros, del estrato más profundo de la capa de suelo, o del segundo cubo del método de humedad del suelo.

Tabla N° 14: Parámetros de uso de cobertura de suelos balde superior

Variable	Descripción WEAP
Kc: Coeficiente de cultivo [-]	Coeficiente del cultivo, en relación al cultivo de referencia..
Sw: Capacidad de almacenamiento de agua en zona de raíces [mm]	Capacidad efectiva de retención del agua de la capa superior del suelo (Parte superior "Balde")
Ks: Conductividad de la zona de raíces [mm/mes].	Zona Radicular ("Recipiente" superior) tasa de conductividad hidráulica a saturación plena (cuando el almacenamiento relativo z1=1.0), que será fraccionado de acuerdo a dirección preferida de flujo, entre Interflujo y flujo hacia capas inferiores del suelo.
RRF: Factor de resistencia a la escorrentía [-]	Usado para controlar la respuesta de la escorrentía superficial. Relacionado a factores como índice de área foliar y pendiente de suelo. La escorrentía tenderá a decrecer con los valores más altos del Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF) (Rango 0.1 a 10).
f: Dirección preferente del flujo [-].	Dirección del flujo preferencial: 1.0 = 100% flujo horizontal, 0 = 100% flujo vertical. Usado para la partición del caudal de salida de la capa de la zona de raíces (Superior "balde") entre el interflujo y caudal de la capa más baja del suelo (Inferior "balde").
Z1: Nivel de humedad en la zona de raíces [%].	El valor inicial Z1 al inicio de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua en la zona de raíz.

Fuente: Elaboración propia

En las tablas 14 y 15 se muestra un resumen de todos los parámetros del modelo. La capacidad de almacenamiento en la zona profunda es un parámetro que se debe calibrar y se encuentra en la parte inferior del balde, es decir este parámetro no se lo puede estimar o aproximar mediante características físicas de la cuenca

Tabla N° 15: Parámetros de uso de cobertura de suelos balde inferior

Variable	Descripción WEAP
Kd: Conductividad profunda [mm/mes].	Tasa de Conductividad (Longitud/Tiempo) de la capa profunda (fondo "Balde") a saturación total (cuando el almacenamiento relativo $z2= 1.0$), el cual controla la transmisión del flujo base. El flujo base incrementa a medida que este parámetro aumenta.
Dw: Capacidad agua profunda [mm].	Profundidad de la capa inferior del suelo (fondo "Balde"). Este valor es ignorado si el sitio de demanda tiene un escurrimiento/infiltración en conexión a un nodo de aguas subterráneas.
Z2: Nivel de humedad en la zona profunda [%].	El valor inicial Z2 al inicio de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua profunda. Este parámetro es ignorado si el sitio de la demanda tiene un vínculo de escurrimiento/infiltración al nodo de agua subterránea. Esta tasa no puede variar entre los tipos de uso.

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros del balde inferior en WEAP se lo aplica a todo el catchment por lo que no puede ser caracterizado por el área de suelo o cobertura vegetal. La zona profunda además de tener una capacidad de almacenamiento (Dw), tiene una conductividad que gobierna el flujo base.

El modelo hidrológico tiene 9 parámetros que influyen en cada uno de los procesos del ciclo del agua, conceptualmente lo que hace el modelo hidrológico es convertir las entradas de precipitación en flujos de salidas que alimentan los ríos.

Es importante tener en cuenta que a cada combinación suelo-cobertura en cada subcuenca le corresponde un tanque 1 mientras que para la zona profunda hay un tanque 2 para toda la subcuenca.

Por otro lado, como en todo modelo es necesario fijar las fronteras o condiciones iniciales, en ese sentido debemos fijar el nivel de humedad inicial en la zona de raíces (Z1) y el nivel de humedad en la zona profunda (Z2).

Las ecuaciones del modelo representan un balance de agua entre entradas y salidas, en donde la diferencia entre la entrada y salidas en cada uno de los tanques, representan los cambios en la humedad del tanque 1 y el tanque 2 en la zona de raíces y en la zona profunda respectivamente.

2.4.6.9 Valores referenciales considerados en la literatura

La literatura reporta aplicaciones del modelo hidrológico en distintos ambientes geográfico-climáticos. La síntesis presentada en las tablas siguientes compara los criterios para la selección de valores representativos para cada parámetro; las dos últimas referencias difieren en sus percepciones respecto a los coeficientes de conductividad hidráulica por razones explicadas en los dos subtítulos precedentes. (MMAyA, VMRH, & Soria, Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos, 2016).

Tabla N° 16: Parámetros del modelo de humedad en el suelo

Parámetro		(Amato, McKinney, Ingol-Blanco, & Teasley, 2006)	(CCGUC-SEI, 2009)	(Ingol-Blanco, 2009)	(SEI, 2015b)	(SEI, 2014)	(Escobar, Purkey, Pouget, Suarez, Condom, & Ramos, 2008)	(Espejo A., 2016)	(González, 2016)	(Soria, 2016)
		Área [km ²]	Máx	18000	11600	18000	22171	2880	11634	1900
	Mín	106	512	106				33	500	60
D _w [mm]	Máx	25	7500	300000	1200	800	1000	500	300	320
	Mín	1	300	12000						70
k _{s2} [L T ⁻¹]	Máx	1080 mm/día	600 mm/mes 250 mm/semana	45 mm/mes	500 mm/mes	80 mm/mes	600 mm/mes	200 mm/mes	20 mm/mes	816 mm/día/mes
	Mín	96 mm/día	140 mm/mes	3 mm/mes						492 mm/día/mes

Fuente: MMAyA, VMRH, & Soria, 2016

Tabla N° 17: Parámetros del modelo de humedad en el suelo

Parámetro		(Amato, McKinney, Ingol-Blanco, & Teasley, 2006)	(CCGUC-SEI, 2009)	(Ingol-Blanco, 2009)	(SEI, 2015b)	(SEI, 2014)	(Escobar, Purkey, Pouget, Suarez, Condom, & Ramos, 2008)	(Espejo A., 2016)	(González, 2016)	(Soria, 2016)
					4 mm/semana					
h ₁ [%]	Máx	50	---	30	20	30	35	80		30
	Mín			5	10				---	
h ₂ [%]	Máx	50	---	20	40	30	35	15		30
	Mín			5	30					
S _w [mm]	Máx	25	4320	600	1300	800	713	155	1800	180
	Mín	5	80	250	600	400		210	100	31
K _c	Máx	1.00	---	---	1.00	1.10	1.1	0.85	1.05	1.05
	Mín	0.34			0.60	0.75		0.40	0.70	0.50
RRF	Máx	8.0	250	---	4.0	6.5	3.2	6.0	7.0	4.2
	Mín	0.1	0.8		0.5	3.0	1.6	3.0	1.0	1.3
k _z [L T ⁻¹]	Máx	624 mm/día	500 mm/mes	180 mm/mes	1050 mm/mes	190 mm/mes	600 mm/mes	80 mm/mes	50 mm/mes	10 239 mm/día/mes
	Mín	7 mm/día		45 mm/mes	80 mm/mes	80 mm/mes		40 mm/mes	20 mm/mes	141 mm/día/mes
f	Máx	---	1.00	0.2	0.9	0.80	0.68	0.90	0.90	0.50
	Mín		0.20		0.4	0.30		0.55	0.15	0.15

Fuente: MMAyA, VMRH, & Soria, 2016

Tabla N° 18: Parámetros del modelo de humedad en el suelo

Cobertura	Sw (mm)			RRF			f		
	Espejo 2016	González 2016	Soria 2016	Espejo 2016	González 2016	Soria 2016	Espejo 2016	González 2016	Soria 2016
Bosque denso	200	1800		5	3,3		0,55	0,15	
Bosque denso andino montano semihúmedo		350			1,9			0,9	
Bosque ralo succulentas	200	350		5	1,9		0,55		
Bosque ralo esclerófilo	190	350		5	1,9		0,55		
Bosque o monte ralo		350			1,9			0,9	
Matorral pajonal andino montano semárido		350			1,9			0,9	
Matorral chiquitano sobre ondulaciones y llanuras		1800			3,3			0,15	
Herbazal graminoide, llanura inundada estacionalmente por periodos cortos		1800			3,3			0,15	
Herbazales graminoide, puna altoandina árida		350			1,9			0,9	
Herbácea graminoide	155	350		4,5	1,9		0,65		
Gramadal camefital			90			2,5			0,15(<3000msnm) 0,5(>3000msnm)
Vegetación dispersa en pedregales puna altoandina semárida		350			1,9			0,9	
Arbustos dispersos	150			4,5			0,65		
Arbustos con pajonal			90			2,1			0,15(<3000msnm) 0,5(>3000msnm)
Arbustos con pajonal/pastos			140			2,1			0,15(<3000msnm) 0,5(>3000msnm)
Pajonal			130			2,5			0,15(<3000msnm) 0,5(>3000msnm)
Tholar			180			2,1			0,15(<3000msnm) 0,5(>3000msnm)
Cultivos	210	800	150	4	4	4,2	0,65	0,5	0,5
Estructura urbana y rural, ciudades y pueblos	150	100		2	1		0,9	0,9	
Cuerpos de agua	180	1000		6	7		0,5	0,5	0,5
Superficie descubierta cárcavas	180			3			0,85		
Superficie descubierta arenas	170	1000		3	2		0,85	0,5	
Superficie descubierta, suelos muy poco profundos y afloramientos rocosos			28			1,3			

Fuente: MMAyA, VMRH, & Soria,2016

2.4.7 Calibración del Modelo

En la etapa de calibración del modelo se busca lograr un set de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una representación de caudales y de operación de obras de infraestructura que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible. Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca observadas versus simuladas, así como comparar los datos de niveles de reservorios observados versus simulados, así como otras variables que representen la operación de los recursos hídricos en una cuenca. Con base en estas comparaciones se realizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas. A continuación, se presentan aspectos metodológicos y prácticos de la etapa de calibración del modelo.

2.4.7.1 Aspectos Metodológicos de la Calibración del Modelo

El proceso de calibración del modelo desarrollado de acuerdo al análisis de oferta y demanda de agua descrito con anterioridad se realiza en tres etapas consecutivas. Estas etapas permiten revisar el comportamiento del modelo primero en las cuencas aportantes que corresponden a zonas de régimen natural, luego en las cuencas intermedias y

finalmente en las cuencas bajas. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009, pág. 62)

2.4.7.2 Calibración de cuencas aportantes o en zonas de régimen natural

Una primera etapa consiste en una calibración hidrológica de las subcuencas aportantes. Se espera que la influencia humana en estas subcuencas sea baja y por lo tanto los caudales no son afectados por el uso o manejo del recurso.

De suma importancia en esta etapa del proceso de calibración es el análisis de las características hidrológicas particulares asociadas a los ecosistemas que sean relevantes en la cuenca en estudio.

En una primera aproximación es una buena práctica establecer factores de calibración generales para toda el área mencionada, los cuales modifican los parámetros de uso de suelo incluyendo, principalmente:

- K_c : coeficiente de cultivo
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, S_w
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, D_w
- Factor de resistencia a la escorrentía, RRF
- Conductividad de zona de raíces, K_s
- Conductividad de zona profunda, K_d
- Dirección preferencial de flujo, f

Generalmente se busca ajustar caudales pico y caudales base, por ejemplo, si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escorrentía superficial la cual es directamente afectada por el RRF y K_s , los cuales afectan la reactividad de los catchments. Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar f y K_d . Nótese que la relación entre los diferentes términos de la ecuación es no-lineal y por lo tanto al afectar un término, se afectan los otros de forma indirecta. Por ejemplo, otro factor de calibración como la conductividad hidráulica de la zona profunda, K_d , puede ser incrementado, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, y el consecuente aumento en los caudales base. Por otro lado, si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior, S_w , se logra un mayor flujo sub-superficial, y por tanto un aumento de los caudales máximos. Finalmente para el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo (D_w), regula la transmisión de los flujos a los

caudales base. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009, pág. 69)

2.4.7.3 Calibración de cuencas intermedias

La metodología de calibración considerada tanto en la zona media y baja de la cuenca corresponde a una calibración subcuenca por subcuenca, similar al procedimiento de calibración de cuencas aportantes. En la figura 11 se presenta un ejemplo de estaciones hidrométricas localizadas en cuencas intermedias donde existen datos observados en la cuenca. Al igual que en la zona alta, se obtiene la distribución mensual calibrada para todas las estaciones, así como también la relación entre los caudales modelados y observados utilizando las estadísticas para cada una de las estaciones consideradas y para todo el periodo de modelación.

En el proceso de calibración de las cuencas intermedias y bajas se deben considerar la demanda de agua de los diferentes usuarios en estas secciones de la cuenca. Por ejemplo, si se tiene información con respecto a la descarga de agua de fuentes superficiales para ciudades y para riego se debe comparar con los valores simulados por el modelo. Si estos no son comparables se deben ajustar los parámetros que condicionan estas acciones. En el caso de la demanda de riego hay que modificar los umbrales de riego que determinan las necesidades de riego en un catchment y cultivo determinado.

En el caso de la demanda de ciudades se deben contemplar los parámetros que corresponden a las tasas de demanda per cápita y factores de pérdidas y reutilización del agua al interior de las ciudades. Una vez completada la etapa de calibración hidrológica se procede a calibrar la operación de los embalses y otras obras de infraestructura que se encuentren en la cuenca. En algunos casos los embalses se encuentran ubicados en la zona de cierre de las cuencas lo que permite que se realice la calibración hidrológica y operacional de manera independiente.

Si es que la ubicación de un embalse u obra de infraestructura relevante se encontrara en un punto superior al punto de cierre de la cuenca se debe realizar la calibración operacional de manera asociada a la calibración hidrológica. En la cuenca Tolomosa no existen subcuencas intermedias que cuenten con mediciones de caudal por los que se considera una sola cuenca definida a partir del cierre de la Presa San Jacinto, se realizara solo una calibración hidrológica.



Figura N° 11: Estaciones de aforo para calibración (Zona Media)

Fuente: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute

2.4.7.4 Medidas de bondad de ajuste

La calibración de modelos usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este fin, se hace uso de diferentes “medidas de bondad de ajuste”, entre las cuales podemos mencionar:

2.4.7.4.1 Coeficiente de Nash - Sutcliffe

El criterio de Nash–Sutcliffe es uno de los más usados en hidrología. Esta medida propuesta por Nash y Sutcliffe 1970, busca establecer la eficiencia del modelo para predecir los caudales en comparación con la utilización de la media como predictor de la variable. Un coeficiente de NS = 0 implica que el modelo pronostica los caudales de igual forma a como lo haría la media de los datos observados, un NS negativo implica que la media es mejor predictor y un NS mayor a 0 implica que el modelo es mejor predictor que la media.

$$NC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$$

Variable	Descripción
$Q_{s,i}$	Caudal simulado en el paso de tiempo i
$Q_{o,i}$	Caudal observado en el paso de tiempo i
\bar{Q}_o	Promedio de los caudales observados
n, i	Número total de pasos de tiempo

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $NC=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla 19.

Tabla N° 19: Valores referenciales del criterio de Nash – Sutcliffe

NC	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2 a 0,4	Satisfactorio
0,4 a 0,6	Bueno
0,6 a 0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

Fuente: Molnar, 2011

Cuando los valores de la variable simulada son demasiado grandes, se suele utilizar la “eficiencia logarítmica de Nash-Sutcliffe”

$$NC_{\log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{s,i} - \log Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{o,i} - \bar{\log Q}_o)^2}$$

2.4.7.4.2 Coeficiente de BIAS

El “BIAS” o sesgo estadístico es la diferencia entre el promedio de los valores medidos y los valores estimados. Sirve para evaluar la existencia de errores sistemáticos de sub o sobreestimación de la variable modelada.

La tendencia de los datos simulados debe ser mayores o menores a los datos observados, El sesgo porcentual de BIAS debe estar entre el $\pm 25\%$.

$$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100$$

Variable	Descripción
<i>Bias</i>	Coeficiente de BIAS
\bar{Q}_s	Promedio de los caudales simulados
\bar{Q}_o	Promedio de los caudales observados

Bias: entre menor el porcentaje de *Bias*, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un *Bias* positivo indica sobre estimación y un *Bias* negativo indica sub-estimación de caudales.

2.4.8 Uso del modelo, creación de escenarios

Una vez que se cuente con el modelo para la cuenca completamente calibrado se pueden realizar una serie de estudios específicos. Una clase de estos estudios corresponde a la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros. Los escenarios futuros pueden ser de diferentes tipos:

- Escenarios de crecimiento o cambio en la población
- Escenarios de uso de suelo
- Escenarios de clima

2.4.8.1 Escenarios de crecimiento o cambio en la población

En general, los escenarios de crecimiento o cambio de población pueden diseñarse considerando las tasas de crecimiento de población proyectadas hacia futuro, así como el cambio en la proporción de población rural y urbana, o el aumento de población dada por un evento específico dentro del modelo como la construcción de una represa.

2.4.8.2 Escenarios de uso de suelo

Los escenarios de uso de suelo pueden considerar aspectos de cambio en la cobertura vegetal dada por tendencias futuras como por ejemplo disminución o aumento de zonas forestales, o cambio en tipos de cultivos por tendencias económicas. Todas estas consideraciones deben estudiarse de forma que al implementar el escenario se sepa con claridad que variables y funciones se van a tener en cuenta al definir el escenario.

2.4.8.3 Escenarios de clima

Los escenarios de clima constituyen uno de los aspectos de mayor uso en un modelo agregado como WEAP. Existen diferentes maneras de implementar proyecciones climáticas dentro de un modelo, incluyendo:

- Incorporación de deltas de temperatura y/o precipitación con base en proyecciones de modelos climáticos: en este caso, se ha realizado un estudio preliminar para determinar el valor de los deltas a aplicar.

Este estudio puede realizarse a partir de la literatura disponible sobre posibles cambios climáticos en la región, o a partir de un procedimiento de análisis de los datos disponibles en bases de datos. Al final de este análisis, se utilizan los deltas para afectar los valores climáticos y se corre el modelo para observar los efectos en la hidrología.

- Uso de datos escalados a la región: si se tiene capacidad técnica, se pueden utilizar los modelos de circulación global para realizar un cambio de escala de forma que se obtengan datos de clima futuro a la escala de la cuenca y con resolución suficiente de forma que se pueda obtener datos climáticos de entrada de precipitación y temperatura al nivel de cada catchment.

2.5 MARCO METODOLÓGICO

2.5.1 Proceso de aplicación del Modelo

El desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

2.5.1.1 Definición del estudio

En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.

2.5.1.2 Búsqueda y análisis de información

En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.

2.5.1.3 Desarrollo del modelo

En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.

2.5.1.4 Calibración

Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.

2.5.1.5 Uso del modelo, generación de escenarios

Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009.

3. DESARROLLO DEL MODELO

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 Ubicación y superficie de cuenca en estudio

La cuenca del río Tolomosa se encuentra ubicada al Sur de Bolivia, en el departamento de Tarija, específicamente entre los municipios de Cercado en la provincia del mismo nombre y Uriondo en la provincia de Avilés, ocupando una superficie de 469,1 km² hasta la confluencia con el río Guadalquivir; cuenta con importantes recursos hídricos y áreas de cultivo bajo riego, están inmersas las principales comunidades de: Tolomosa, San Andrés, Bella Vista, Pinos Norte, Pinos Sur, Lazareto, Guerra Huayco, Tablada Grande. Es una de las cuatro cuencas que forman parte de la cuenca del río Guadalquivir o Valle Central de Tarija. Es la cuenca de mayor importancia y mayor potencial y por tanto soporta la mayor presión antrópica que tiene relación con el municipio de Tarija. En la figura 12 se muestra la ubicación de la cuenca Tolomosa.

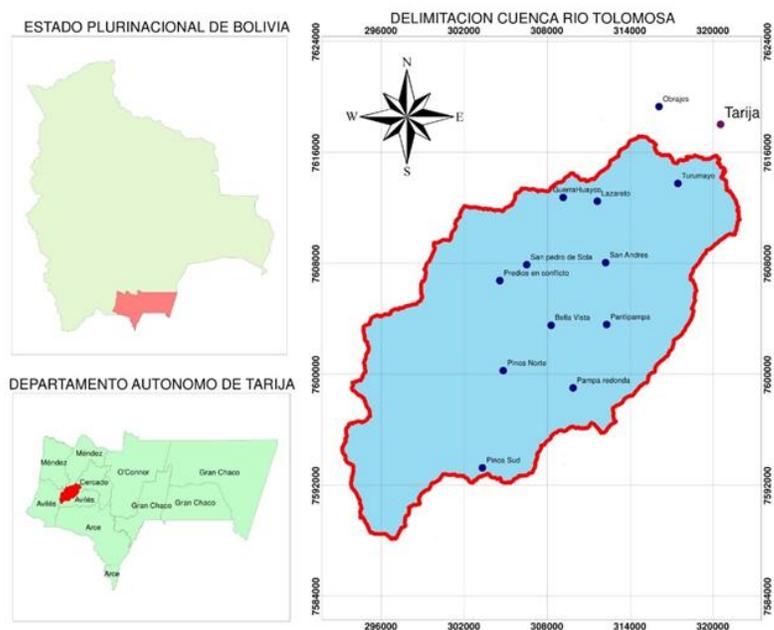


Figura N° 12: Ubicación de la cuenca Tolomosa

Fuente: Elaboración propia

La cuenca en estudio se definió a partir del cierre de la Presa San Jacinto, el área de aporte hasta este punto es de 436,72 km² y se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud	Longitud	Fuente
21°36'7,06''S	64°43'35,28''O	Google Earth
21°35'53,2''S	64°43'10,03''O	Carta IGM

A partir de este punto se realizará la calibración del modelo, la estación hidrométrica San Jacinto Sud se encuentra a 200m aguas abajo de la presa.
 Para fines del presente estudio se definieron tres subcuencas: las del río Sola, San Andrés y Mena (ver figura .13)

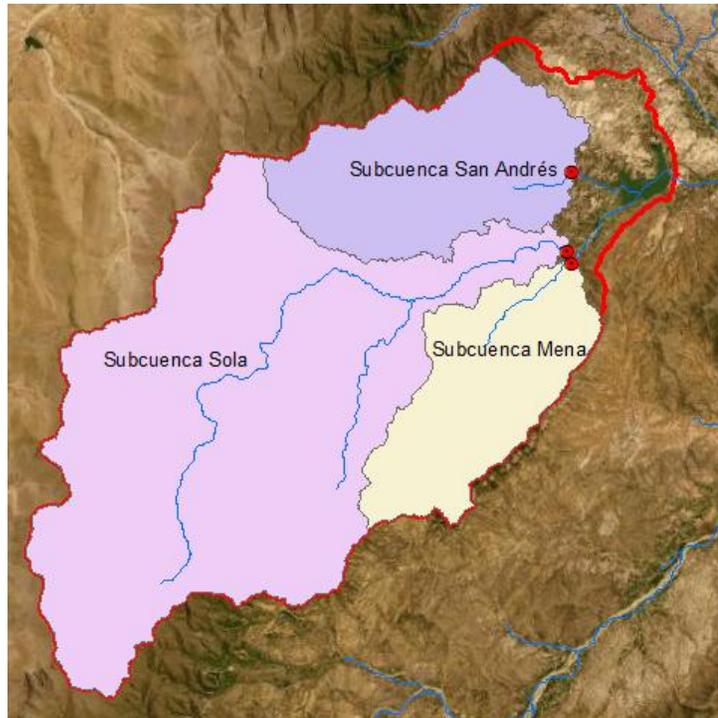


Figura N° 13: Subcuencas de estudio
 Fuente: Elaboración propia

Subcuenca	Area (km ²)	Latitud	Longitud
Sola	259,3	64°50'10,75" S	21°38'30,12" O
San Andrés	78,72	64°45'45,67" S	21°35'39,45" O
Mena	64,68	64°46'0,24" S	21°37'44,47" O

3.1.2 Características generales de la cuenca del río Tolomosa

El relieve montañoso de cuenca varia de 4614 msnm en la cima del cerro Negro del Chiquiro hasta los 1884 msnm del embalse San Jacinto, determinando un gradiente altitudinal de 2730 msnm que influye en los procesos geomorfológicos y climáticos, en la tipología de la vegetación y calidad de suelos.

En las serranías del sector oeste, el clima es frio y húmedo, con precipitaciones medias anuales del orden de 800 a 1200 mm. En el sector noroeste y sector central, el clima es frio subhúmedo con precipitaciones de 800 a 1000 mm y el sector. Este presenta un clima

templado semiárido con precipitaciones medias de 700 a 800 mm y una temperatura media anual de 7 a 16.5 C (ZONISIG,2000).

La cuenca se encuentra localizada en la cordillera oriental, con un paisaje de montaña estructural alta con orientación norte-sur con un relieve muy disectado, presentando además paisajes de serranía y colinas bajas denutativas moderadamente disectadas a muy disectadas, llanuras de piedemonte con valles estrechos, abanicos y terrazas ligeramente inclinadas a muy inclinadas. La llanura fluvio-lacustre conformado por terrazas moderadamente disectadas a muy disectadas representa en 25 % de la superficie de la cuenca. Todo el paisaje montañoso es parte de la Reserva Biológica Cordillera de Sama, situación que facilita las acciones de protección y conservación, del agua, la biodiversidad y los recursos naturales en general.

La red de drenaje es moderada a densa, conformado por varias sub cuencas con recursos hídricos superficiales importantes y de calidad que alimentan el embalse de San Jacinto. (INIBREH, 2007). De igual manera, las nacientes del río Tolomosa que alimentan el embalse de San Jacinto, fuente de agua y energía para el sector productivo agrícola y pecuario del Valle Central de Tarija, están protegidas por la Reserva de Sama. (OTN-PB, 2018) En la cuenca de Tolomosa, de acuerdo con el estudio de Jijena R. (201519, pág., 178), habitan 20 comunidades campesinas dedicadas principalmente a la actividad agrícola y ganadera, de las cuales 13 (Bella Vista, Calderilla Chica, Calderilla Grande, Pinos Norte, Pinos Sud, Guerrahuayco, Lazareto, Pampa Redonda, Patipampa, San Andrés, Tolomosa Grande, Turumayo, San Pedro de Sola), forman parte de RBCS y once atraviesan transversalmente la ZAE.

3.1.3 Caracterización climática de la cuenca.

De acuerdo al estudio “Atlas Ecotematico de la Cuenca del Río Tolomosa” realizado por el Instituto Interuniversitario de Bolivia de Recursos Hídricos (INIBREH), la cuenca del río Tolomosa presenta una importante variabilidad climática determinada por la variación altitudinal del relieve (1884 a 4614msnm) que tiene una influencia determinante en la variación de la temperatura y la distribución de la precipitación y por tanto del clima.

En general las características climáticas de la cuenca del río Toloma en función de la humedad y la temperatura presentan una gradiente de variación en sentido de la dirección y altitud de las estaciones de la serranía de sama.

En el extremo sudoeste, donde el paisaje montañoso presenta mayor altitud, se tiene mayor concentración de humedad en forma de neblina, lloviznas y lluvias orográficas lo que no ocurre en el paisaje de valle en el extremo noreste de cuya altitud va descendiendo hasta los 1890 msnm. (INIBREH, 2007, pág. 18).

3.1.3.1 Templado Semiárido



Este tipo de clima se presenta en extremo noreste de la cuenca, en la zona bajo o de valle; corresponde a los paisajes de piedemonte y llanuras fluvio-lacustre, desde la comunidad de la Tablada hasta la Comunidad de Pinos Norte, incluyendo los cerros del extremo este Huayco Grande y Mendoza y las colinas ubicadas entre Pampa Redonda y Pinos Sud. Ocupa el 43 % de la superficie total de la cuenca.

La temperatura media anual es de 17°C, mientras que la precipitación media anual varía del 800 mm en el sector norte hasta 900 mm en el sector de Pinos Sud. La Evapotranspiración potencial es de 1.186 mm presentando un déficit hídrico de abril hasta noviembre aproximadamente. En el sector norte, este tipo de clima tiene mucha influencia en la degradación de los paisajes a través de las características de la cobertura vegetal, generalmente rala, xerofílica, que ofrece poca protección al suelo. Esta situación asociada a la susceptibilidad de los suelos, originan intensos procesos de erosión hídrica en diferentes formas y grados, como en el caso de la llanura fluvio-lacustre formada por terrazas disecadas a muy disecadas.

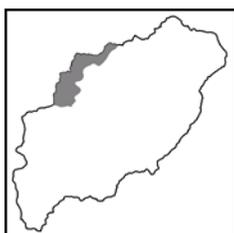
3.1.3.2 Frio Semihúmedo



Se presenta en el sector central de la cuenca y ocupa el 32 % de la superficie total, desde aproximadamente 2000 msnm hasta los 3000 msnm a media ladera de la serranía de Sama.

La lluvia media anual es aproximadamente 880 a 1000 mm; la temperatura media anual es de 14°C. La evapotranspiración potencial es de 1.161 mm presentando un déficit hídrico de abril a noviembre aproximadamente. Este tipo de clima es de transición entre el clima de la zona de valle (templado semiárido) con el clima de la zona más alta (muy frío semihúmedo) de la serranía de Sama. En este clima frío semihúmedo, se presenta los pequeños bosques andinos de pino del cerro, aliso y queuña.

3.1.3.3 Muy frío semihúmedo



Se ubica en el sector noreste, desde la pendiente media localizada aproximadamente a los 3000 msnm hasta la cima del cerro Chismuri, de la serranía de Sama, con una altura promedio de 3800 msnm. Ocupa el 5% de la superficie total de la cuenca.

Este tipo de clima presenta una temperatura media anual de 9°C, y una precipitación promedio anual de 715 mm; la evapotranspiración potencial es de 1040 msnm, presentando un déficit hídrico durante seis meses del año.

3.1.3.4 Muy frío húmedo



Caracteriza el sector más alto del ambiente morfogenico montañoso de la cuenca y ocupa el extremo sudoeste aproximadamente a partir de la cota 3000 msnm, hasta la cima de los cerros (4614 msnm). Ocupa el 19 % de la superficie total.

Presenta una temperatura media anual de 8°C y cerca de los 1250 mm de lluvia media anual. Tanto como precipitación como la humedad local disminuyen hacia la parte norte debido a la influencia orográfica. Este tipo de clima se presenta en las cabeceras de las cuencas que nacen en la serranía de Sama.

Por su altitud superior a 3000 msnm, existen mayor intercepción de las masas de aire cargadas de humedad, provocando nubosidad, neblina y lloviznas, contribuyendo la principal fuente de los recursos hídricos superficiales de la cuenca. (INIBREH, 2007).

En la tabla 20 se muestra la clasificación climática de la cuenca Tolomosa, el clima predominante en la cuenca es el templado semiárido, seguido por un clima frío semihúmedo, se observa que la cuenca presenta un clima variado, de un sector de la cuenca a otro el clima es diferente predominando un clima húmedo.

Tabla N° 20: Clasificación climática de la cuenca Tolomosa

Tipo Climático	Superficie	
	(ha)	(%)
Templado semiárido	18.749	43
Frío semihúmedo	14.008	32
Muy frío semihúmedo	2.319	5
Muy frío húmedo	8.136	19
Otro	0,46	1
Total	43.672	100

Fuente: INIBREH, 2007

3.1.4 Grupos hidrológicos de la cuenca

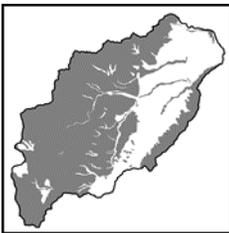
Grupo A: (Bajo potencial de escurrimiento).

Este grupo está compuesto por pequeñas superficies que equivalen solo al 2% (998 ha) de la superficie de la cuenca. Se localizan en el sector central y extremo Oeste de la cuenca,



comprende paisajes de ladera y de piedemonte formado por valles estrechos formados por quebradas y ríos que emergen de la montaña, los suelos de estas unidades geomorfológicas presentan una buena velocidad de infiltración debido principalmente que son suelos moderadamente profundos, con abundante fragmentos gruesos y una buena cobertura vegetal lo que sugiere un importante contenido de materia orgánica, la cual favorece la porosidad de los suelos, aspectos que condicionan una buena infiltración, consiguientemente un bajo potencial de escurrimiento.

Grupo B (moderado potencial de escurrimiento)



Este grupo se localiza en el sector centro-oeste y extremo Este de la cuenca, es el más extenso, caracteriza aproximadamente al 69 % (29.668 ha) del territorio de la cuenca.

Los suelos se caracterizan por presentar texturas medias, con un drenaje interno moderadamente rápido a moderadamente lento, generalmente superficiales a moderadamente profundos, con una cobertura vegetal herbácea (pastizales y pajonales) mezclada con arbustos, mayormente semidensa a densa, en algunos sitios también es rala, algunos matorrales y bosques densos a ralos; esta vegetación mientras menos alterada se encuentra por el pastoreo extensivo, favorece la incorporación de materia orgánica y el desarrollo de estructuras generalmente migajosas y granulares.

Estas características favorecen condiciones moderadas de infiltración, que determinan el Grupo Hidrológico B, que son los que predominan en la cuenca del río Tolomosa.

Grupo C. (Moderadamente alto potencial de escurrimiento)



Las principales referencias de ubicación de los suelos de este grupo hidrológico, son las comunidades de Pampa Redonda, Churquis, Pantipampa, Tolomosa Grande, Tolomosa Norte, las proximidades del Embalse San Jacinto y Calderilla Grande.

Se extienden en 6.658 ha, lo que representa el 15% del territorio de la cuenca y se caracterizan los paisajes de llanura fluvio-lacustre formados por terrazas no disectadas a disectadas, valles estrechos sobre depósitos fluvio-lacustres, y laderas en arcilitas y tobas. La característica principal de los suelos de estos paisajes es la textura generalmente fina, la cual determina un drenaje generalmente lento, a esta situación hay que añadir, la poca cobertura vegetal (cultivos y vegetación rala de sustitución) que condiciona un bajo nivel de materia orgánica en el suelo, por tanto, un moderado a alto potencial de escurrimiento.

Grupo D. (Alto potencia] de escurrimiento).



Las principales referencias de ubicación son el cerro Abra del Viento, las comunidades de Pinos Sud, Churquis, Tolomosa Grande, Tolomosa Norte y Tablada. Se extiende en una superficie de 4.998 ha, lo que representa el 12 % respecto a la superficie de la cuenca.

Del punto de vista del paisaje geomorfológico, este grupo se presenta en terrazas fluvio-lacustres muy disecadas, laderas de serranía baja en limonitas, lutitas y diamictitas muy disectadas, es decir, se presenta en los paisajes más afectados y degradados por la erosión hídrica, por las características intrínsecas del suelo en términos de texturas finas, muy poca o ninguna materia orgánica, lo cual determina una muy baja infiltración y transmisión del agua, consiguientemente un alto potencial de escurrimiento. (INIBREH, 2007).

3.1.5 Características de relieve

De acuerdo a la tabla 21, el territorio de la cuenca del río Tolomosa presenta 4 grandes clases de relieves contrastantes en términos de pendientes según superficie: El 48 % del territorio de la cuenca presenta un relieve con pendientes muy escarpadas (> 60 %) caracterizando aproximadamente a 20.839 ha, que corresponde al paisaje de montañas altas conocido tradicionalmente como serranía de Sama. En segundo lugar, se tiene el relieve con pendientes moderadamente escarpadas (15 – 30 %) que caracteriza aproximadamente al 15 % (6.387 ha) del territorio de la cuenca, corresponde principalmente el paisaje de montaña.

A continuación, se tiene el relieve con pendientes escarpadas (30 – 60 %) que caracteriza aproximadamente al 13 % (5.513 ha) del territorio de la cuenca, corresponde principalmente el paisaje de serranías y colinas bajas.

Le sigue el relieve con pendientes ligeramente inclinado o ligeramente ondulado (2 – 5%), caracterizan aproximadamente a 5.253 ha (12 % del total) que corresponde a paisajes de valle, terrazas y piedemontes aluviales. (INIBREH, 2007)

Tabla N° 21: Clases de pendientes de la cuenca del río Tolomosa

CLASES DE PENDIENTES			GEOMORFOLOGICA DOMINANTE	PRINCIPALES REFERENCIAS DE UBICACIÓN	SUPERFICIE	
SIMB	RANGO %	DESCRIPCIÓN			ha	%
P1	0 - 2	Plano a casi plano	Valles	Río Tolomosa y los demás ríos de la cuenca	1.914	4
P2	2-may	Ligeramente inclinado, o ligeramente ondulado	Valles	Sector central y Norte, comunidad de Guerrahuayco y al Sur Pinos Sud	5.253	12
P3	5 – 10	Inclinado u ondulado	Valles	Comunidades de Pantipampa, Pampa redonda	1.921	4
P4	10 – 15	Fuertemente inclinado, o fuertemente ondulado	Colinas	Comunidad Lazareto y Bella vista	1.379	3
P5	15 – 30	Moderadamente escarpado	Montaña	Comunidad Calderilla Grande	6387	15
P6	30 – 60	Escarpado	Montaña	Sector Este de la cuenca	5513	13
			Serranía			
P7	> 60	Muy escarpado	Montaña	Sector oeste de cuenca.	20.839	48
			Serranía			
E. S. J.					469	1
T O T A L					43.672	100

Fuente: INIBREH, 2007

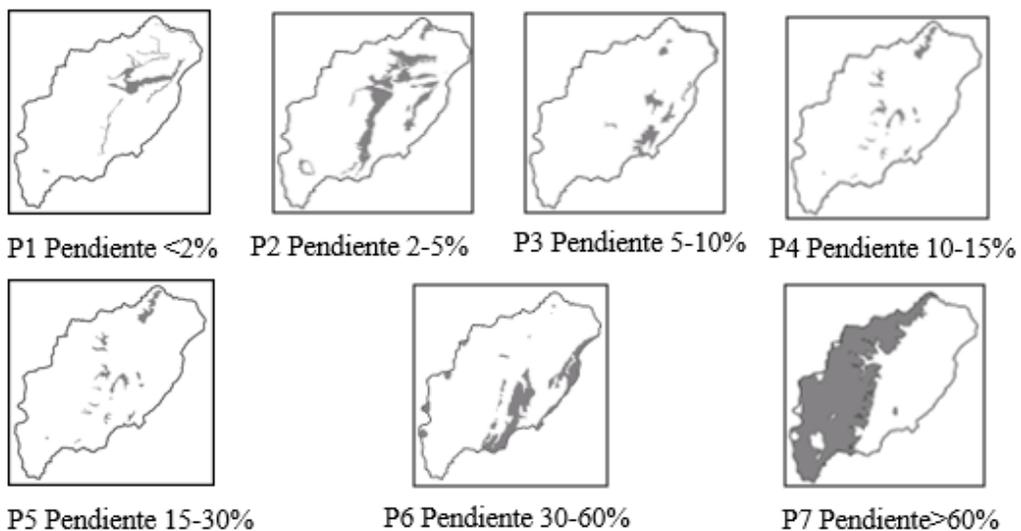


Figura N° 14: Clases de pendientes de la cuenca del río Tolomosa

Fuente: INIBREH, 2007

3.1.6 Contexto demográfico

Los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2012, realizado el 21 de noviembre por el Instituto Nacional de Estadística (INE), el departamento de Tarija cuenta con 483.518 habitantes y es el tercer departamento en registrar la mayor tasa de crecimiento anual 1.9%.

Según los resultados del censo 2012, el 65% de la población del departamento en encuentra en el área urbana y el 35% en el área rural.

La provincia con mayor población es Cercado con 205.375 habitantes y una tasa de crecimiento anual de 2.6%.

3.1.6.1 Demografía en el ámbito regional

En el contexto regional la cuenca Tolomosa se encuentra ubicada en la provincia de Cercado. En la tabla 22 detalla la población por área urbana y rural de la provincia de acuerdo a los últimos censos realizados.

Tabla N° 22: Población total urbana y rural del municipio de Cercado-Tarija

Censo	Población		Total
	Área urbana	Área rural	
1976	38916	18559	57475
1992	90113	18128	108241
2001	135783	17674	153457
2012	179528	25818	205346

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE.

En la figura 15 muestra el comportamiento en los últimos años de la población urbana y rural. La población urbana en los últimos 40 años presente un crecimiento constante, sin embargo, en el último censo realizado el año 2012 los resultados muestran que la tasa anual de crecimiento disminuyo (ver tabla 23).

La población rural fue disminuyendo desde el año 1976 a 2001 (ver figura 15), los resultados obtenidos determinan una tasa de crecimiento intercensal de la población de -0.15% en el periodo 1976-1992, mientras que la tasa de crecimiento para 1992-2001 fue de -0.28%.

En el último periodo intercensal 2001-2012 la tasa de crecimiento anual alcanza a 3.5%, mostrando un crecimiento de la población rural (ver tabla 23), esto es un indicativo de que las comunidades periurbanas están creciendo como Turumayo y Guerra Huayco.

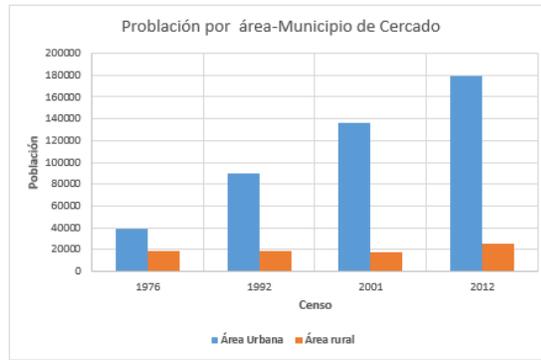


Figura N° 15: Población urbana y rural.

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 23: Tasa anual de crecimiento intercensal provincia Cercado-Tarija

Censo	Tasa anual de crecimiento (%)	
	Área urbana	Área rural
1976	-	-
1992	5,3	-0,15
2001	4,6	-0,28
2012	2,5	3,5

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE

3.1.6.2 Demografía de la cuenca Tolomosa

El estudio Plan de Desarrollo Integral San Jacinto “Agua segura para la producción”, desarrollado por el Proyecto Múltiple San Jacinto (PMSJ), realizó la caracterización de los centros poblados y comunidades correspondiente al área de influencia del PMSJ, dividiendo el área en 3 zonas tal como se muestra en la tabla 24, la cual presenta las siguientes características:

- De los 17.348 habitantes que alberga y se distribuyen en 31 comunidades, un 59% se encuentra en la Zona de Cuenca, un 35% en la Zona de Riego y un 6% en la Zona de la Cuenca.

Tabla N° 24: Distribución espacial de la población

Zona	Población, 2012	%	Extensión	%	Densidad	Población, 2020
Cuenca	10.367	59%	414	79%	25	13.651
Lago	981	6%	18	3%	54	1.292
Riego	6.065	35%	94	18%	65	7.986
TOTAL	17.413	100%	526	100%	33	22.930

Fuente: PMSJ, 2017

Tomando en cuenta los límites de la cuenca, corresponde a la zona de la cuenca y del lago (ver tabla 24) haciendo un total de 19 comunidades que encuentran dentro de los límites en estudio, en la tabla 25 se detalla la población de estas comunidades de acuerdo al censo 2001 y 2012. Considerando la tasa de crecimiento poblacional del área rural es 3.5 % de acuerdo último periodo intercensal (ver tabla 23), utilizando el método geométrico para el crecimiento se poblacional se estima la población para el año 2020.

Tabla N° 25: Población de la cuenca Tolomosa

N°	Ciudad / Comunidad	Censo 2001	Censo 2012	Población 2020	% Población
1	Churquis	461	640	843	5,6
2	Panti Pampa	228	313	413	2,8
3	Pampa Redonda	431	637	839	5,6
4	Bella Vista	688	794	1046	7
5	Pinos Norte	310	373	492	3,3
6	Pinos Sur	385	370	488	3,3
7	Guerra Huayco	950	1496	1970	13,2
8	San Andrés	1.239	1.593	2.098	14
9	San Pedro de Sola	259	309	407	2,7
10	Turumayo	572	1.450	1910	12,8
11	Lazareto	48	795	1047	7
12	Calderillas	235	156	206	1,4
13	Calderilla Chica	0	45	60	0,4
14	Tablada Grande	0	94	124	0,8
15	Tolomosa grande	820	936	1233	8,2
16	Tolomosita oeste	265	366	482	3,2
Subtotal zona de Cuenca		6.891	10.367	13.658	91,4
17	Tolomosita centro	238	243	320	2,1
18	Tolomosa norte	253	460	606	4,1
19	Tolomosita sur	183	278	367	2,5
Subtotal zona de Lago		674	981	1.293	8,6
TOTAL		7.565	11.348	14.951	100

Fuente: Elaboración propia en base al INE (Censo 2001-2012).

El 91,4 % de la población se encuentra en la zona de la cuenca y el restante 8,6% en la zona del lago. Las comunidades con mayor población es San Andrés (14%), Guerra Huayco (13,2%), Turumayu (12,8%) y Tolomosa Grande (8,2%).

La caracterización demográfica se la estimo con la finalidad de obtener un dato representativo sobre la población de la cuenca y de esta manera estimar y proyectar la demanda de agua potable en el modelo.



Figura N° 16: Comunidades Cuenca Tolomosa
Fuente: Elaboración propia

3.1.6.3 Radios urbanos

Dentro de la cuenca no existen áreas urbanas consolidadas, sin embargo, hay algunas comunidades como San Andrés, Guerra Huayco, Turumayo y Tolomosa Grande que presentan características urbanas (ver figura 17).

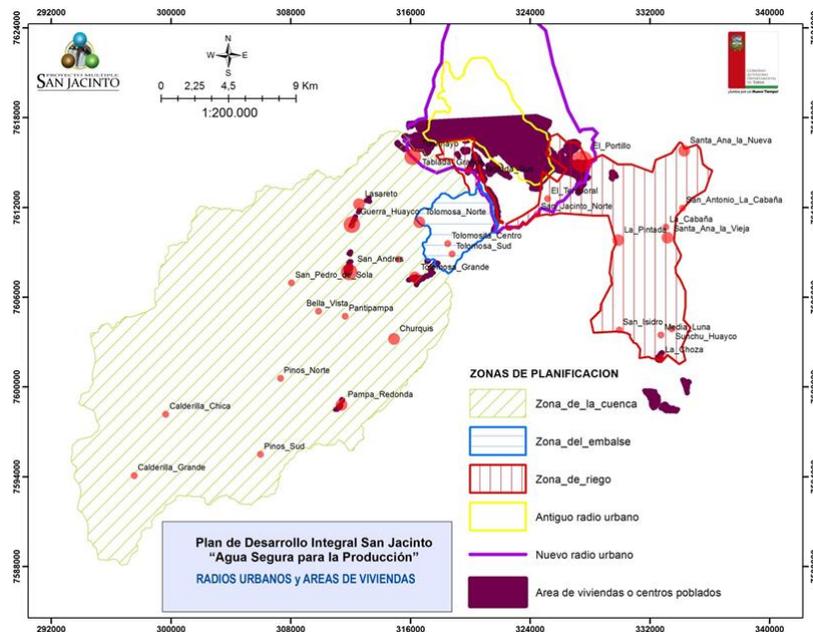


Figura N° 17: Radios urbanos de cuenca Tolomosa
Fuente: PMSJ, 2017

3.1.7 Aspectos económicos-productivos

La cuenca del río Tolomosa es la cuenca de mayor importancia, de mayor potencial y por tanto soporta la mayor presión antrópica que tiene relación con el municipio de Tarija, cuenta con importantes recursos hídricos y áreas de cultivo bajo riego, están inmersas las principales comunidades de: las Tolomasas, San Andrés, Bella Vista, Pinos Norte, Pinos Sur, Lazareto, Guerra Huayco, Tablada Grande, y en la parte baja de esta cuenca se encuentra la represa del proyecto multipropósito de San Jacinto. (OTN-PB, 2018).

En la cuenca de Tolomosa, de acuerdo con el estudio de Jijena Orellano (2015, pág. 178), habitan 20 comunidades campesinas dedicadas principalmente a la actividad agrícola y ganadera, de las cuales 13 (Bella Vista, Calderilla Chica, Calderilla Grande, Pinos Norte, Pinos Sud, Guerrahuayco, Lazareto, Pampa Redonda, Patipampa, San Andrés, Tolomosa Grande, Turumayo, San Pedro de Sola).

3.1.7.1 Uso actual de la tierra

De acuerdo al estudio INIBREH (2012) en el cual se hizo levantamiento de datos, la cuenca del río Tolomosa tiene una superficie total de 43.672 has, de las cuales 5.540 has (12,7%), se destinan a la actividad agrícola intensiva y extensiva de cultivos anuales y perennes, 33.091 has(75,7%) se emplean en prácticas de pastoreo extensivo, aproximadamente el 6,1% de la tierra se emplean practicas silvopastoriles, el 1,7% corresponde a tierras con afloramiento rocosos, y en el 0,4% se observan asentamiento humanos.

El uso agrícola intencivo con un porcentaje de 8.4% (3675 ha) del área de la cuenca, se caracteriza por la producción de cultivos anuales que cuentan con riego. Se encuentra principalmente en el área perteneciente a comunidades de Bella Vista, San Andrés, San Pedro de Sola, Tolomosa y Guerra Huayco.

Se destaca que el 12,7 % de tierras empleadas en usos agrícolas (5.540 Has.) y el 8,4% de uso agrícola intensivo, son porcentajes que superan el porcentaje de uso agrícola de tierras en otras provincias y el departamento.

3.1.7.2 Calendario agrícola

De una manera general en la cuenca, destaca la posibilidad de realizar tres siembras durante el año agrícola, en cada una de ellas se tiene diferentes características de cultivos, a continuación, se describe cada época de siembra:

- La siembra grande o siembra MISCA, cuyas labores agrícolas se inician en el periodo Julio – Agosto y se extienden hasta fines de diciembre, siendo esta la práctica agrícola de mayor repercusión productiva, de acuerdo a la superficie sembrada los principales cultivos son: papa, maíz, arveja, avena forrajera y algunas hortalizas (San Andrés, Sola, Guerrahuayco y Pantipampa); papa, maíz, maní, arveja, cebolla, repollo, zanahoria, haba y otras hortalizas (sector Tolomosa).
- La siembra de TEMPORAL, cuyas labores agrícolas se inician en noviembre – diciembre, los principales cultivos son: maíz y maní.
- La siembra TARDÍA, cuyas labores agrícolas se extiende desde fines de enero y principios de febrero hasta marzo y abril, los cultivos son los mismos de las anteriores siembras, pero con predominio de la papa. (Jijena Orellano, 2015)

La aplicación de riego parcelario es por surcos en los cultivos de papa, maíz, maní, cebolla, camote, por melga en los cultivos de arveja y avena y por medio de pozas en el caso de los frutales, que se reducen en algunas hileras de durazneros y guindos en el contorno de los cultivos. No existe asistencia técnica, tanto para el riego como para los aspectos agronómicos.

3.1.7.3 Principales cultivos

Considerando las variables: volumen de producción, superficie cultivada y generación de excedente, los principales cultivos de la cuenca en orden de importancia son:

- Papa, Maíz, y otros. (Jijena Orellano, 2015)

El mayor abastecedor de papa de la Cuenca del Tolomosa es la Comunidad de San Andrés y según Jijena Orellano (2015) el 80,4 % de las parcelas son destinadas a la producción papa.

En los meses de julio y agosto, los principales cultivos según la superficie sembrada son: papa, maíz, arveja, avena forraje, y algunas hortalizas (San Andrés, Sola, Guerrahuayco y Pantipampa); papa, maíz, maní, arveja, cebolla, repollo, zanahoria, haba y otras hortalizas (Sector Tolomosa).

En la zona que comprende la comunidad de Calderillas Grande, los principales cultivos de invierno son papa lisa, papa oca, papa y haba. (INIBREH, 2011)

Estos aspecto sobre la produccion agricola de la cuenca son importates para la elaboracion de cedula de cultivos con el fin de estimar demandas de riego para la cuenca Tolomosa y obtener un modelo en WEAP mas representativo.

3.1.7.4 Infraestructura de riego

La provincia Cercado, donde se encuentra la Cuenca del Río Tolomosa, tiene 98 sistemas de riego que comprenden el 18% del total del departamento, con 4.209 familias usuarias que representan el 26 %, y ocupa un área de 12.248 has. que representan el 34%.

El Sistema de Riego de San Jacinto es el único que tiene como fuente de agua un embalse, que se ubica más propiamente dentro la Provincia Cercado, al pie de la Cuenca del Río Tolomosa, categorizado como grande.

En lo que respecta a obras de captación, se tiene 6 galerías filtrantes, 12 presas derivadoras, 247 toma directas, que son obras ubicadas en todas las categorías, sobresaliendo las pequeñas; un 32% se encuentran en buen estado de mantenimiento, el 67% en regular estado y el 1% en mal estado.

3.1.8 Escurrimiento superficial

La cuenca del río Tolomosa, aguas arriba del embalse San Jacinto, está formada por un total de 8 subcuencas. Los cursos o causes principales que desembocan en el embalse San Jacinto son el río Tolomosa, el río el Molino y la quebrada de la Tablada. En el siguiente cuadro, se resumen las principales características por subcuenca (INIBREH, 2007).

Tabla N° 26: Características de subcuencas

CUENCA	SUBCUENCA	SUPERFICIE (ha)	%	AFLUENTES PRINCIPALES	Longitud de cause (m)	Afluente al embalse San Jacinto	CAUDAL	
							PERIODO (año)	m³/s
T O L O M O S A	Río Sola	15.276	35	Río Turcamarca	6.958		1989-2003	1.37
				Río Potrero del Corral	5.454			
				Río Caña	5.513			
				Río Calderilla	12.977			
				Río Sola	16.630			
	Río Seco	3.119	7	Río Seco	7.035			
	Río Mena	6.553	15	Río Mena	18.353			
	Río Pinos	8.424	19	Río Pino	10.703		2000-2002	1.16
				Río del Hueco	8.062			
	Río Molino	4.168	10	Río el Molino,	18.177	Río Molino	1989-2003	0.93
Río San Andrés				11.485				
Qda. Pajcha	1.108	3	Qda. Pajcha	9.100				
Qda. Tablada	1.101	3	Qda. Tablada	10.790				
Aguas arriba E.S.J.	3.463	8	Río Tolomosa	10.200	Río Tolomosa	1989-2003	2.70	
E.S.J.	460	1						
	Total	43.672	100					

Fuente: INIBREH

3.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PARA EL MODELO.

WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y características fisiográficas de la cuenca (cobertura vegetal, tipo de suelo, geología, etc) para poder estimar los componentes del balance hídrico. Adicionalmente durante el proceso de calibración del modelo, es necesario contar con series de tiempo de caudales aforados.

En tabla 27 se muestra la prioridad y el formato preferido de los datos que requieren para construir un Modelo en WEAP.

Tabla N° 27: Resumen de Datos Requeridos

Datos requeridos para alimentar el modelo y durante el proceso de calibración	Prioridad	Formato preferido
Datos de Entrada-Demandas		
Uso de suelo		
DEM (Modelo de Elevación Digital)	1	GIS
Cobertura de Vegetación	1	GIS
Tipo de suelo	2	GIS
Geología	2	GIS
Áreas de agricultura irrigada	1	GIS, Excel, tecto o csv
Tecnología de irrigación	2	GIS, Excel, tecto o csv
Clima		
Precipitación	1	Excel, texto, o csv
Temperatura	1	Excel, texto, o csv
Humedad Relativa	1	Excel, texto, o csv
Viento	1	Excel, texto, o csv
Cobertura de nubes	2	Excel, texto, o csv
Latitud	1	Excel, texto, o csv
Sitios de demanda		
Número de usuarios	1	No hay formato preferido
Consumo per cápita	1	No hay formato preferido
Variación Mensual	1	No hay formato preferido
Porcentaje de retorno	1	No hay formato preferido
Datos para Calibración del Modelo		
Ríos		
Serie de tiempo de caudales	1	Excel, texto, o csv
Nieve		
Series de tiempo de profundidad de nieve	2	Excel, texto, o csv
Estimados de volumen de nieve	2	Excel, texto, o csv
Glaciares		
Área de cobertura de glaciares	2	GIS o Excel
Escorrentía de agua desde glaciares		Excel, texto, o csv

Fuente: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009.

3.2.1 Información climática GMET

En mayo del 2016 se presentó el Balance Hídrico Superficial de Bolivia, la elaboración de este documento fue realizada por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) y contó con el apoyo de la Cooperación Sueca y Alemana, a través del Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable (PROAGRO), implementado en Bolivia por la GIZ, el balance hídrico se lo realizó con el software WEAP.

En este estudio se ha generado una grilla climática diaria basada en la metodología GMET para el periodo 1980-2016 para precipitación y temperatura. Para las otras variables como humedad relativa, velocidad de vientos y horas sol, se ha generado una grilla solo para los promedios multimensuales con un método de interpolación tradicional como IDW.

Una de las conclusiones del informe del Balance Hídrico Superficial de Bolivia es aplicar grillas GMET a una escala regional a nivel de cuenca, con el fin de poder evaluar y validar el desempeño de las mismas para estudios hidrológicos.

3.2.1.1 Precipitación y temperatura

Para el caso de la temperatura y precipitación las grillas fueron generadas a partir 384 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera del territorio boliviano (ver figura 18). Los datos de estas estaciones fueron tratados y rellenados a una escala de tiempo diario para un periodo de 1980 a 2016. La grilla se encuentra en un formato NetCDF con una resolución espacial de 0.05° (5km), las mismas ya fueron empleadas en diferentes cuencas de Bolivia por ejemplo en la cuenca del Rio Rocha-Cochabamba.

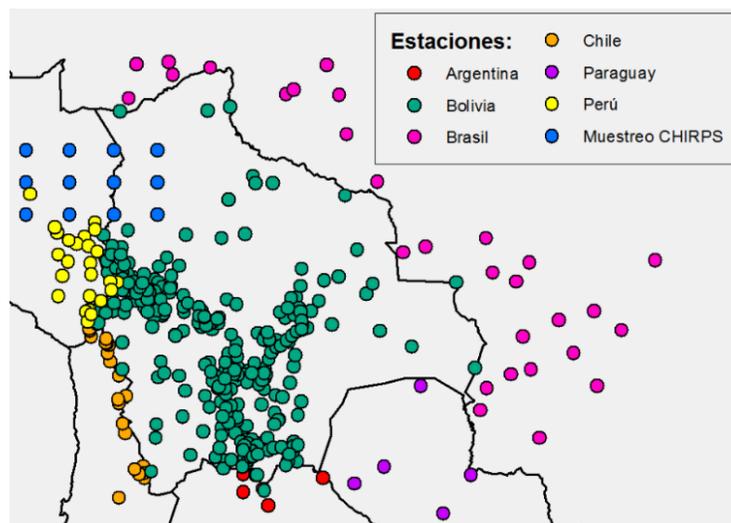


Figura N° 18: Estaciones incluidas en la corrida GMET

Fuente: MMAyA, BHSB, 2016

De acuerdo a la figura 19 las estaciones más cercanas a la cuenca Tolomosa son San Jacinto Sud, Chocloca, Juntas, El Tejar, Tarija Aeropuerto, Coimata, Sama Cumbre, Campanario y la única estación que se encuentra dentro la cuenca es Calderillas.



Figura N° 19: Estaciones empleadas en las grillas.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al polígono de Thiessen (ver figura 20) las estaciones que tiene influencia sobre la cuenca son El Tejar Tarija, San Jacinto Sud, Chocloca y Calderillas.

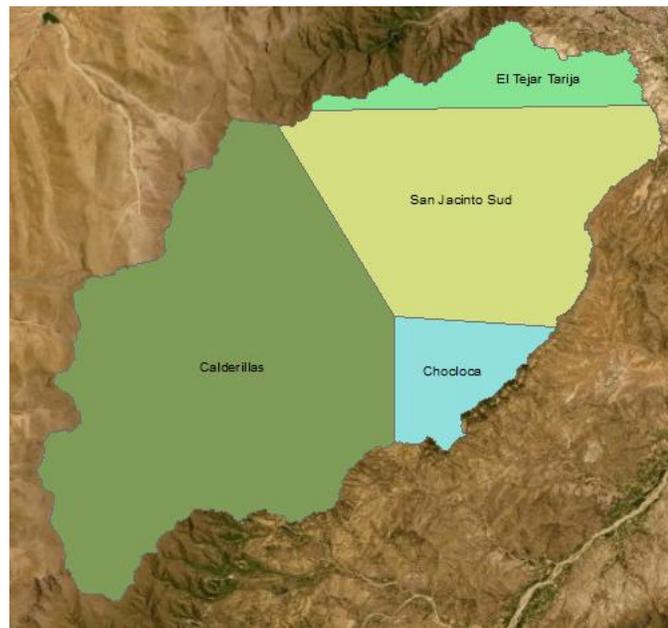


Figura N° 20: Polígono de Thiessen (Estaciones GMET)

Fuente: Elaboración propia

Del polígono de Thiessen de los datos grillados, correspondientes a la cuenca Tolomosa estarían representados por estas estaciones, es decir los datos de precipitación y temperatura de las grillas deberían correlacionarse con los datos de las estaciones tierra. Se hace la observación que en la elaboración de las grillas meteorológicas no se consideraron las estaciones de San Andrés, Pinos Sud y Turumayo, mismas que se encuentran dentro de la cuenca.

3.2.1.2 Humedad Relativa, Velocidad de Viento y Nubosidad.

Las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca Tolomosa que se emplearon en la elaboración de las grillas IDW de humedad relativa y velocidad de viento fueron Aeropuerto Tarija y el Tejar "U" Tarija y para la grilla de nubosidad se empleó la estación de Tejar "U" Tarija.

3.2.2 Información climática del SENAMHI

Se recopiló toda la información hidrometeorológica referente a la cuenca del río Tolomosa la cual fue promocionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), institución encargada del monitoreo de las estaciones meteorológicas e hidrométricas en la ciudad de Tarija. En el caso de la información meteorológica se recopiló a partir del año 1980 hasta el 2019.

Cabe mencionar que las estaciones de Pinos Sud, San Andrés y Turumayo no fueron consideradas en la elaboración de las grillas GMET.

Tabla N° 28: Estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca

N°	Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (m.s.n.m)	Parámetros de medición	Periodo con datos
1	Juntas	21°48'37"	64°47'51"	1882	P,T,H,E,V	1975-2018
2	San Andrés	21°37'24"	64°48'54"	1978	P,T,H,E,V	1975-2018
3	San Jacinto Sud	21°36'37"	64°43'12"	1820	P,T,H,E,V	1975-2018
4	Turumayo	21°33'24"	64°46'42"	1978	P,T,H,V	1999-2018
5	Aeropuerto	21°32'48"	64°42'39"	1849	P,T,H,E,V	1944-2018
6	Pinos Sud	21°44'00"	64°53'00"	2100	P,T,V	1965-2018
7	Chocloca	21°45'00"	64°44'00"	1800	P,T,H,E,V	1975-2012
8	Calderillas	21°45'00"	64°57'00"	2800	P	1975-2003
9	Ce.Na.Vit	21°43'31"	64°39'29"	1730	P,T,H,E,V	1989-2018
10	El Tejar "U"	21°32'35"	64°43'16"	1859	P,T,H,E,V	1970-2018
11	Estación Hidrometrica San Jacinto	21°36'00"	64°43'00"	1860	Caudal	1978-1984

Fuente: SENAMHI



Figura N° 21: Ubicación espacial de estaciones meteorológicas (SENAMHI).
Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Información hidrométrica

Para realizar la calibración del modelo a través del ajuste de los parámetros hidrológicos, es indispensable contar con información de caudales medidos.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología proporciona información sobre aforos, lecturas de escala medias diarias y caudales diarios, del periodo 1978 – 1984. (Anexos I). En figura 21 se muestra la ubicación geográfica y espacial respectivamente de la estación de aforo San Jacinto Sud. La estación hidrométrica San Jacinto cuenca con registro de 6 años de aforos (1978-1980) en la tabla se muestra caudales mensuales.

Tabla N° 29: Caudales medios mensuales (m³/s)

AÑO	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.
1978-1979	2,37	4,37	21,75	23,42	37,45	27,83	13,63	5,80	3,46	2,63	2,13	1,34
1979-1980	1,41	2,67	13,92	38,14	25,75	41,38	10,00	4,21	2,54	1,75	1,27	0,85
1980-1981	1,22	1,51	2,55	14,15	26,95	15,31	8,64	4,33	2,66	1,91	1,40	1,10
1981-1982	1,05	5,62	11,98	29,59	27,09	51,54	13,89	5,64	3,11	2,06	1,64	1,58
1982-1983	1,53	3,78	10,57	11,96	8,85	4,12	2,64	1,90	1,46	1,23	0,94	0,74
1983-1984	0,59	1,72	3,06	32,86	120,07	124,97	21,08	5,14	2,96	2,03	1,63	1,26

Fuente: Elaboración propia en base a la información proporcionada por el SENAMHI

3.2.4 Información cartográfica

La información cartográfica se extrajo de diferentes fuentes, para la cuenca Tolomosa se obtuvo los tres tipos de DEM (Modelo de elevación digital del terreno), RSTM, ASTER y ALOS-1 PALSAR.

3.2.5 Información de Cobertura de vegetación, uso y tipo de suelo

El Instituto Interuniversitario Boliviano de Recursos Hídricos (INIBREH) el 23 de agosto del 2001, a través de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, mandó al Viceministerio de Relaciones Exteriores de Bolivia el proyecto:

- Estudio de la Cuenca del Río Tolomosa: Tasa de Erosión, Valoración del Recurso Hídrico y Sedimentación del Embalse de San Jacinto

El proyecto lo realizó Universidad Autónoma Juan Misael Saracho con la colaboración de instituciones internacionales de Bélgica (FUSAG, SHER, REGION WALLONNE), el resultado fue la elaboración de una “Atlas Ecotemático de la Cuenca del Río Tolomosa”, que fue presentado el año 2007 en su primera edición y el año 2011 su segunda edición. Esta información fue indispensable para la parametrización del modelo, es por esta razón que esta información debe ser detallada y sobre todo representativa de la cuenca.

3.2.6 Información de demanda de agua de la cuenca

En la cuenca Tolomosa existen dos tipos de demanda, de riego y de agua potable, en el caso de la demanda de riego es importante contar información de sistemas de riego existentes en la cuenca, áreas agrícolas bajo riego, tipos de cultivos, etc. De igual forma para la demanda de agua potable, información de los sistemas de captación, demográfica, datos consumo, etc. Esta información se obtuvo de diferentes estudios que se realizaron en la zona, el año 2016 el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) en coordinación con el Plan Nacional de Cuentas (PNC) y la Cooperación Suiza (HELVETAS Swiss Intercooperation) publicaron el estudio: “Balance integral para la cuenca del río Guadalquivir”, en donde se realizó un inventariado de todos los sistemas de riego y agua potable de la cuenca Guadalquivir, del estudio se extrajo toda la información referente a la cuenca Tolomosa. La Oficina Técnica del río Pilcomayo y Bermejo (OTN-PB) el año 2018 financió el “Estudio Ambiental de la Zona de Amortiguamiento externo de la Reserva Biológica Cordillera de Sama”, del cual se obtuvo información sobre sistemas de riego y agua potable, datos de demografía, tipos de cultivos regionales, etc. Otra fuente fue el Instituto Nacional de Estadística (INE), tanto del censo poblacional como del agropecuario se recopiló información demográfica e información agrícola de la zona de estudio. Esta información es de vital importancia para la estimación de la demanda de riego y agua potable de la cuenca.

3.2.7 Escala Temporal

La elección de esta escala está definida por la complejidad del estudio y la disponibilidad de información. Con el objetivo de generar herramientas para la gestión y planificación de los recursos, proveer asesoramiento en cuanto a cambios en el clima, cambios en la cobertura y uso de tierra y proveer medios para la construcción de series de caudal para el diseño de infraestructura básica, para el aprovechamiento de recursos hídricos, se adopta una resolución mensual donde la información es media. (MMAyA, VMRH, & Soria, 2016).

Según la guía metodológica para la elaboración de balances hídrico, nos indica que para un estudio de balance hídrico en una cuenca 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, diaria), cuando aquello se considera importante.
Aquello determinará una demanda de información a mayor detalle a nivel de 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 decadal para el estudio de detección de cambios de uso de suelo.

Para el presente estudio se consideró las siguientes escalas temporales, en función de la información que se pudo obtener:

- Escala media mensual, para datos de **precipitación, temperatura e hidrométricos.**
- Escala media mensual multianual, para datos de **humedad relativa, nubosidad y velocidad de viento.** Estas variables son las que menos se monitorean en nuestro medio y es por eso que es complicado obtenerlas.

3.2.7.1 Periodo histórico

Se definió como periodo histórico de modelación a partir del año 1980 hasta 2016, se trabajó con la información meteorológicas recolectada para este periodo.

3.2.7.2 Periodo de calibración y validación del modelo

De acuerdo a la información de la estación hidrométrica San Jacinto, la cual cuenta con un registro de caudales aforados de 6 años (1978-1984), observado que el periodo de modelación es a partir del 1980 al 2016, los registros de caudales de los años 1978-1979 no son considerados para la calibración. Bajo esta aclaración se realizará la calibración del modelo con 2 años (1980-1981) y la validación con 3 años igual (1982, 1983 y 1984). Lo ideal sería realizar la calibración y validación del modelo con más años, sin embargo, existe poca información hidrométrica de la cuenca, obligando a que se ajuste el estudio a la información que se tiene.

3.2.7.3 Periodo de simulación

Para el análisis de escenarios futuros se define un periodo de simulación de 30 años del año 2020 al 2050, este periodo será comparado con el histórico (1980-2016) y se analizará la posible influencia del cambio climático.

3.3 SELECCIÓN DE ESCALA Y PERIODO DE ESTUDIO

Debido a que los procesos hidrológicos ocurren a distintas escalas, como ser el estudio del comportamiento de una cuenca que abarca varias regiones hasta terminar en su punto de aforo o descarga, a este estudio se lo denomina “**escala espacial**” y el estudio que persiste por varios años como es el caso de la precipitación se lo denomina “**escala temporal**”.

3.3.1 Escala Espacial

En este caso en particular la delimitación espacial o esquema se refiere a la identificación de los límites de la extensión del modelo. En una cuenca específica, esto implica la identificación del punto límite de interés aguas abajo en el río a partir del cual se delinearán la cuenca a modelar. Adicionalmente, se requiere la identificación de puntos de manejo a partir de los cuales se delinearán puntos de cierre de las subcuencas. Puntos de manejo típicos incluyen:

- Confluencia de ríos importantes (siempre que la subcuenca que agrupa a ambas posea condiciones climatológicas heterogéneas)
- Estación de monitoreo de caudal

- Represa (existente o proyectada)
- Localización de canales de extracción de agua

Para el presente estudio se definen los siguientes puntos de modelación o de interés:

1. Presa San Jacinto: Punto a partir del cual se define la cuenca a modelar (Cuenca Tolomosa). Cabe mencionar que a unos 200 m próximamente de la presa se encuentra el punto correspondiente a la estación hidrométrica San Jacinto.
2. Río Tolomosa, el cual está formado por la confluencia de los ríos Pinos y Sola. A partir de este punto se define la subcuenta Sola.
3. Río San Andrés, a partir de este punto se define la Subcuenta San Andrés.
4. Río Mena. A partir de este punto se define la subcuenta Mena

En la figura 22 se muestra la delimitación espacial de la cuenca Tolomosa cuya área es de 436,72 km², además se muestra las subcuencas San Andrés, Sola y Mena. Definir la escala espacial de un estudio hidrológico es limitar nuestra área de trabajo tanto territorialmente como temporalmente.

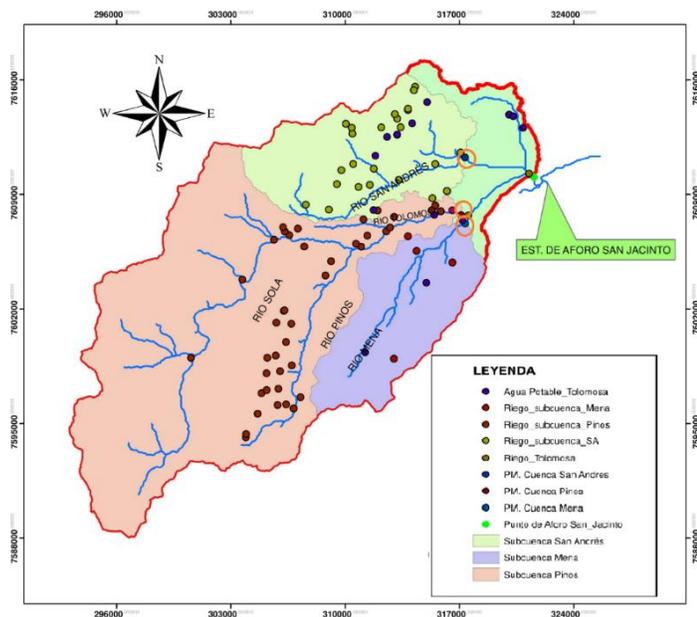


Figura N° 22: Delimitación espacial y puntos de modelación.

Fuente: Elaboración propia

3.4 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

La información pluviométrica antes de ser estudiada en su comportamiento debe ser revisada y analizada en tres aspectos importante: si la estación es completa, si es consistente y si es de extensión suficiente.

3.4.1 Selección de estaciones meteorológicas (SENAMHI)

Los datos de las estaciones obtenidas del SENAMHI, mediante polígonos de Thiessen se definió el área de influencia de cada estación meteorológica sobre la cuenca. En figura 23 se muestra la ubicación espacial de cada estación.

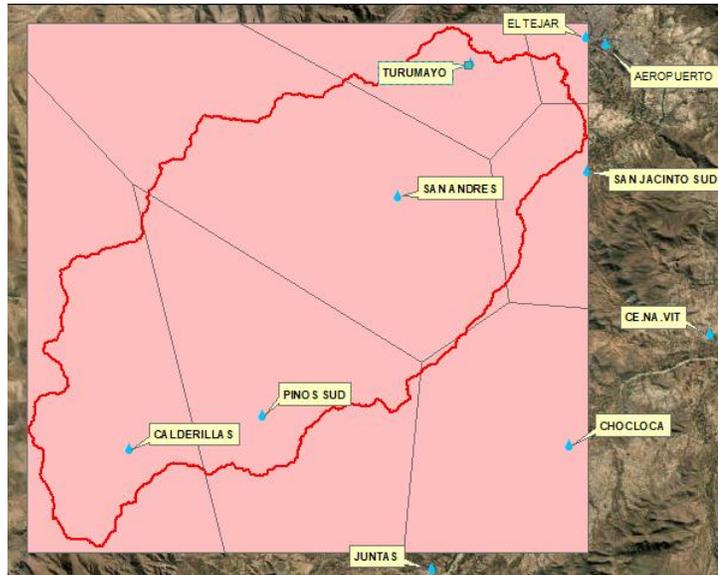


Figura N° 23: Polígono Thiessen estaciones SENAMHI.

Fuente: Elaboración propia

Las estaciones que tiene mayor área de influencia sobre la cuenca son San Andrés, Calderillas, Turumayu, San Jacinto, el Tejar y Chocloca, esta última no se contempla para el estudio debido a que su incidencia en la cuenca es prácticamente nula. En la tabla 30 se detalla la información climática disponible en las estaciones para el periodo histórico de simulación 1980-2016. Las celdas sombreadas representan los años que se cuenta con información completa, las celdas que contienen número representa los meses que contienen información durante el año y las celdas de blanco los años que no se registraron datos. Se descarta la estación de Turumayu para el estudio, debido a que no se cuenta con datos durante el periodo de calibración del modelo, la estación de Calderillas solo contiene registros hasta el año 2003 (23 años de registro), esta estación se la toma en cuenta por tener alta representatividad en el régimen climática en especial de zona alta de la cuenca. Las estaciones con influencia sobre la cuenca son: San Andrés. Pinos Sud, Calderillas, San Jacinto Sud y El Tejar obteniendo así una distribución de las estaciones sobre la cuenca. En la figura 24 se muestra la distribución final de la estación de acuerdo al polígono de Thiessen.

Tabla N° 30: Información climática disponible (precipitación)

Estación	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
San Andrés					11								
Pinos Sud											7	8	
Calderillas													
Turumayu													
El Teja													
Aeropuerto													
San Jacinto Sud													
Estación	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
San Andrés													
Pinos Sud													
Calderillas											8		
Turumayu													
El Teja											6		
Aeropuerto													
San Jacinto Sud													
Estación	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
San Andrés											10		
Pinos Sud													
Calderillas													
Turumayu													
El Teja													
Aeropuerto													
San Jacinto Sud													

Fuente: Elaboración propia en base a la información proporcionada por el SENAMHI

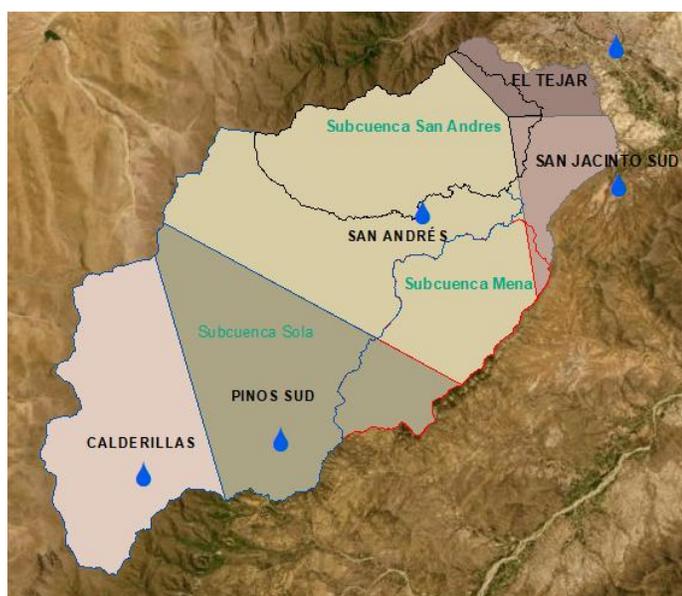


Figura N° 24: Polígono de Thiessen - Estaciones Meteorológicas SENAMHI.

Fuente: Elaboración propia

Se estimó el área de influencia de las estaciones meteorológicas para cada subcuenta a modelar y de esta forma comparar los datos con los de las grillas (ver tablas 31, 32 y 33).

Tabla N° 31: Polígono de Thiessen subcuenca Mena

N°	Estación	Área de influencia	
		Km	%
1	Pinos sud	19,69	30,44
2	San Jacinto sud	2,03	3,14
3	San Andrés	42,96	66,42
TOTAL		64,68	100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 32: Polígono de Thiessen subcuenca Sola

N°	Estación	Área de influencia	
		Km	%
1	Pinos Sud	90,576	34,94
2	Calderillas	92,102	35,53
3	San Andrés	76,576	29,54
TOTAL		259,254	100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 33: Polígono de Thiessen subcuenca San Andrés

N°	Estación	Área de influencia	
		Km	%
1	San Jacinto Sud	2,50	3,18
2	San Andrés	71,18	90,44
3	El Tejar	5,02	6,38
TORAL		78,71	100

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de la precipitación para las estaciones meteorológicas seleccionadas no se realizó la estimación de datos faltantes, y se optó por trabajar con la información disponible con el objeto de menguar la incertidumbre del modelo. El análisis de consistencia de los datos se lo realizó mediante la curva doble masa, se empleó como estación patrón la estación meteorológica Aeropuerto.

Del análisis de la curva doble masa (véase figura 25) se visualiza que las estaciones fueron bien observadas, los puntos se alinean a una recta y no se presentan quiebres o cambio de pendiente, además los coeficientes de determinación (R^2) nos indican que existe una proporcionalidad directa de los datos, por tanto, se concluye que las estaciones son consistentes. Este análisis de la información de la precipitación nos permite confiar en la información recolectada.

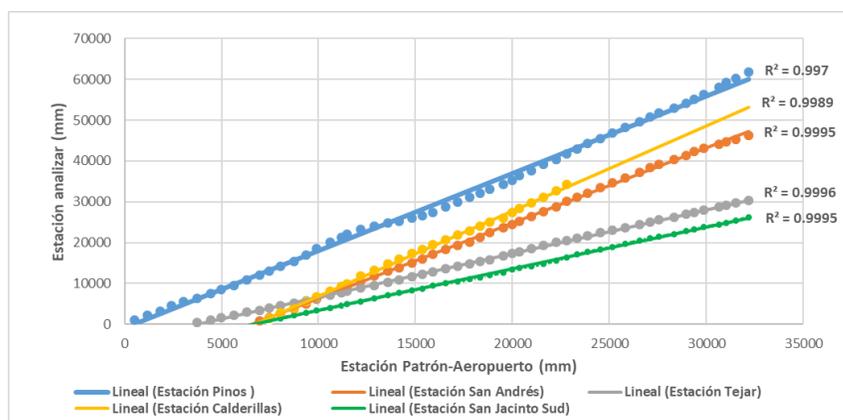


Figura N° 25: Análisis de consistencia - Curva doble masa

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Procesamiento de información climática

3.4.2.1 Análisis de las grillas GMET de precipitación.

Las grillas meteorológicas de precipitación y temperatura generadas en el Balance Hídrico Superficial de Bolivia deben ser validada antes de emplearse en el estudio. Los datos de precipitación extraídas de las grillas GMET se compararon con los datos las estaciones meteorológicas más representativa de cada subcuenca, en la figura 23 se observa que la estación San Andrés es la más influyente para las subcuenca Mena y San Andrés; mientras que para la subcuenca Sola las estaciones Pinos, Calderillas y San Andrés son la que tiene mayor predominancia. El periodo que se analizo es del año 1980 hasta 2016.

En la tabla 34 y 35 se muestra las precipitaciones medias mensuales extraída de la grilla y de las estaciones más predominante de cada subcuenca.

Se observar una variación significativa de la precipitación con relación a datos medidos de las estaciones meteorológicas, en algunos casos hasta con el doble de precipitación, una de las razones principales es que no se consideró la estación de Pinos y San Andrés en la elaboración de las grillas y de acuerdo al polígono de Thiessen (figura 24) se visualiza que estas estaciones son las que mayor área de influencia tienen sobre la cuenca.

Tabla N° 34: Precipitación media mensual de las grillas GMET (mm)

Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tolomosa	135	114,1	93,5	20,5	2,4	0,4	0,3	2,2	7,1	36,5	63,6	115,2
Mena	148,2	122,1	101,1	21,6	2,3	0,4	0,3	1,9	7,1	37,5	68,1	120,3
San Andrés	144,2	122,3	100,9	23,2	2,7	0,5	0,5	2,8	7,7	38,9	68,1	122
Sola	164,8	135,8	110,9	24,7	2,6	0,5	0,6	3,2	7,7	37,4	71,1	127,6

Fuente: Elaboración propio

Los datos grillados presentan una buena correlación con las estaciones de San Jacinto y el Tejar las cuales fueron consideradas en las grillas. Se debe validar la información de las grillas GMET antes de ser utilizadas.

Tabla N° 35: Precipitación media mensual de estaciones meteorológicas (mm)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Calderillas	320	290,8	222,7	43,3	5,8	1	1,6	8,4	14,3	51,7	117,1	218
San Andrés	209,5	194,4	170	42,8	8,5	2	2,2	7,2	15,5	79	131,6	200,6
Pinos Sud	231,6	242,7	183,8	55,6	8,6	3,2	1,9	7,2	16	57,9	127,8	202
San Jacinto sud	120,8	111,6	91	20,5	2,4	0,3	0,7	2,8	8,7	45,1	76,5	113,1
El Tejar	135,2	114,8	92,5	20,4	2,6	0,7	0,8	2,5	6,7	39,6	74,5	130,4

Fuente: Elaboración propia

Las grillas presentan datos representativos de precipitación en zonas donde existen estaciones que fueron consideradas en la elaboración de las misma. En el caso particular de la cuenca Tolomosa que presenta un relieve montañoso que influye en los procesos climáticos, no se puede emplear los datos de precipitación de las grillas para construir el modelo debido a que no es representativa del área de estudio para esto se plante otra metodología para la obtener la precipitación en la cuenca.

3.4.2.1.1 Obtención de la precipitación para la cuenca Tolomosa

Para generar una distribución espacial de la precipitación a lo largo de toda la cuenca y para todo el periodo de modelación, se aplicó el método de Polígonos de Thiessen. La distribución espacial de la precipitación se la realizo para cada subcuenca a modelar, de acuerdo al polígono de Thiessen (ver figura 24), se realizó la distribución espacial de la precipitación para cada mes y para todos los años del periodo histórico de modelación (1980-2016) véase anexo III.

Los resultados obtenidos de la distribución se compararon con los datos de las grillas GMET (véase figura 26), se observa una significativa variación de la precipitación respecto a los datos grillados, se hace notar que la variación se presenta solo en la intensidad de la precipitación y no así en la distribución temporal y espacial.

De acuerdo al diagrama de dispersión (ver figura 27) se verifica lo mencionado anteriormente, existe una correlación positiva de manera que la que la relación entre variables es directa con un comportamiento lineal. Sin embargo, la precipitación obtenidos con la grilla GMET presentan una variación de hasta el 55% con respecto a datos registrados por las estaciones que se encuentran cerca y dentro de la cuenca. Estas

variaciones como se comentó anteriormente se deben a que no se consideraron dos estaciones durante la elaboración de las grillas. Para el estudio no se consideraron los datos grillados de precipitación por no ser coherentes con el comportamiento hidrológico de la cuenca y se decidió emplear los datos de precipitación registrados por las estaciones meteorológicas.

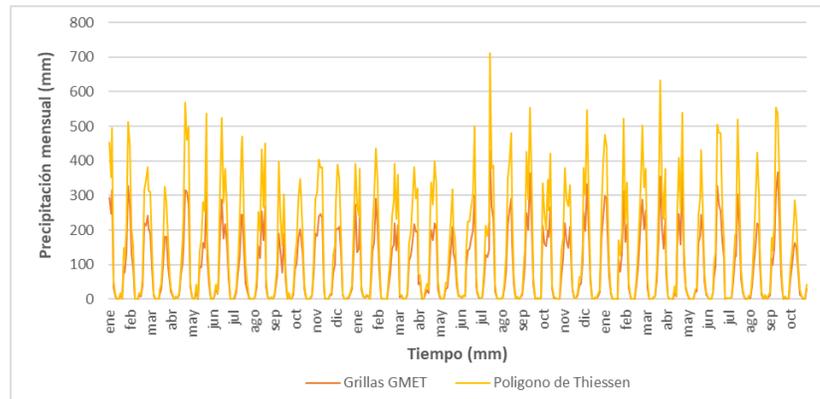


Figura N° 26: Precipitación ménsula – Cuenca Tolomosa
Fuente: Elaboración propia

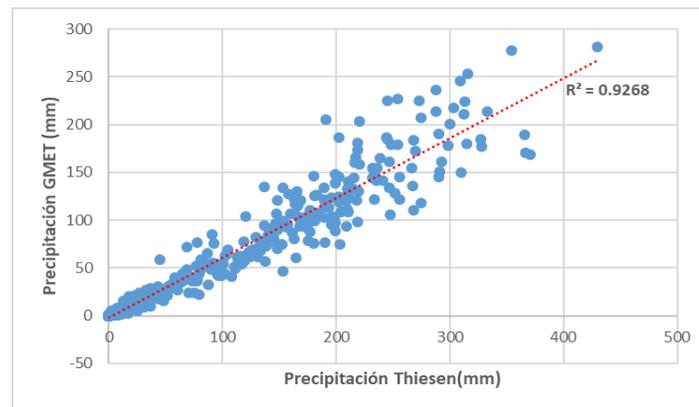


Figura N° 27: Diagrama de dispersión de variables
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 36 se muestra la precipitación media mensual para cuenca Tolomosa y subcuencas a modelar.

Tabla N° 36: Precipitación media mensual polígonos de Thiessen (mm)

Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tolomosa	231,2	219,5	181,4	41,5	7,1	1,9	1,5	6	13,5	66,6	123,7	195,2
Mena	215,8	206,6	177	43,6	8,2	2,4	1,8	6,2	14,3	74,9	129,9	198,9
San Andrés	206,1	187,9	165,2	39,2	7,5	2	1,8	6,3	14,1	80	127	196,1
Sola	256	245,7	198,8	44,6	7,3	2	1,5	6,4	13,8	63,4	127,1	204,1

Fuente: Elaboración propia

En la figura 28 se visualiza con mayor claridad la variación de la precipitación entre los registrados por las estaciones meteorológicas y los obtenidos por las grillas GMET. No se observa una variación en la escala temporal.

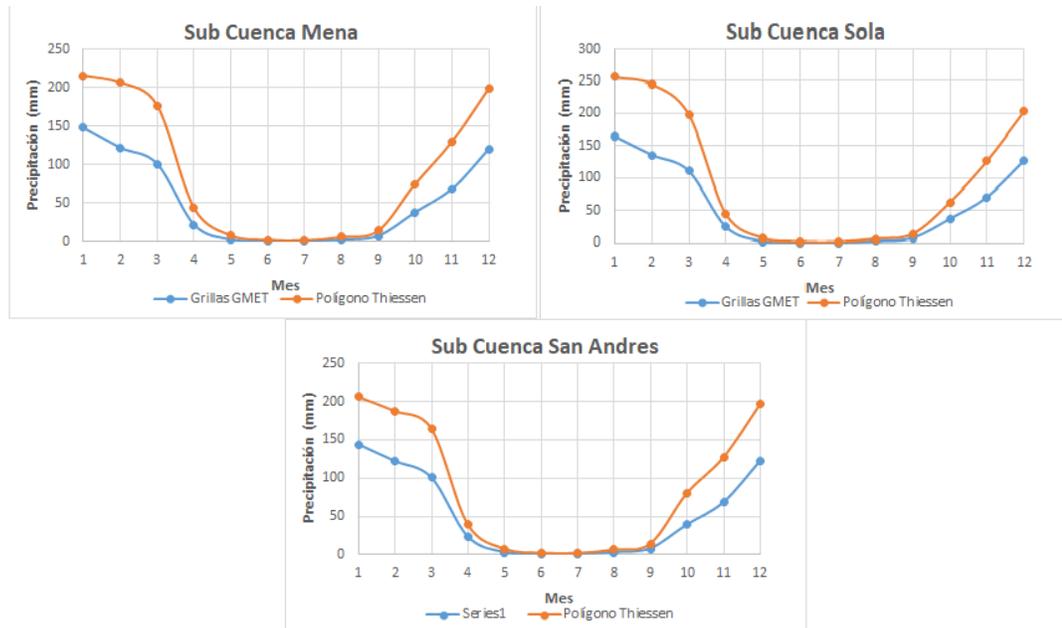


Figura N° 28: Comparación de la precipitación media mensual (mm).
Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2 Análisis de la grilla GMET de temperatura

Para la validación de las grillas GMET de temperatura se comparó los datos obtenidos con los datos de las estaciones más cercanas a cada subcuenca. En la tabla 37 se muestra los valores de la temperatura para cada Subcuenca.

Se comparó los datos de la subcuenca San Andrés con los datos estación meteorológica San Andrés (ver tabla 38). Se observa que la variación promedio es de 0,16°C, de manera que la grilla GMET de temperatura presenta correlación a los datos medidos de la estación San Andrés.

Tabla N° 37: Temperatura media mensual (°C)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Subcuenca Mena	19,69	19,28	18,89	17,37	14,62	12,80	12,47	14,37	15,56	17,94	18,52	19,17
Subcuenca San Andrés	20,01	19,59	19,22	17,79	15,13	13,89	13,86	14,95	16,08	18,40	18,93	19,52
Subcuenca Sola	17,93	17,51	17,15	15,66	13,01	11,28	10,96	12,81	14,40	16,76	17,38	17,97

Fuente: Elaboración propia

En la figura 29 se visualiza que la variación de los datos es baja y que no se presenta ninguna alteración temporal de la temperatura, lo que nos lleva a concluir que la grillas GMET de temperatura son válidas para la cuenca Tolomosa.

Tabla N° 38: Comparación de la temperatura media mensual (°C)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Est. San Andrés	20	19,6	19	17,9	15,3	14,1	14,1	15,1	16,1	18,2	19,1	19,8	17,35
Subcuenca San Andres (GMET)	20	19,6	19,2	17,8	15,1	13,9	13,9	14,9	16,1	18,4	18,9	19,5	17,28
Variación	0,05	0,03	0,21	0,11	0,21	0,22	0,21	0,11	0,03	0,24	0,21	0,29	0,16

Fuente: Elaboración propia

La estación más cercana al subcuenca Sola es la estación San Andrés, existe una variación de la temperatura, los datos de la grilla son menores lo cual es lógico porque la subcuenta Sola se encuentra a una mayor altura que la estación San Andrés, debido a que la temperatura varía de forma inversa a la altura (ver figura 30).

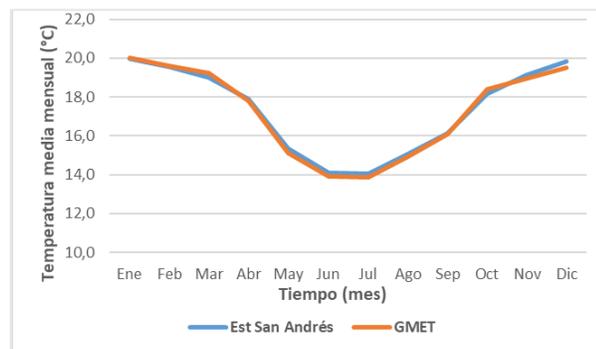


Figura N° 29: Temperatura media mensual-Subcuenca San Andrés

Fuente: Elaboración propia

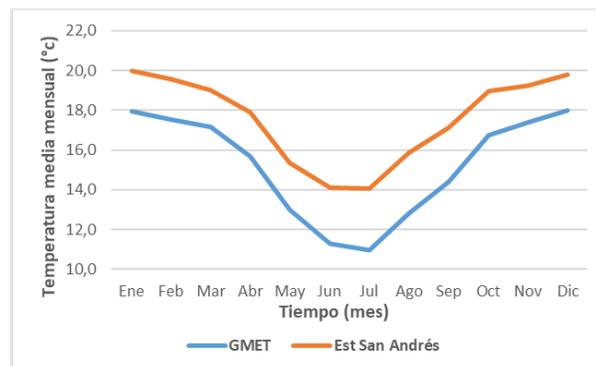


Figura N° 30: Temperatura media mensual-Subcuenca Sola

Fuente: Elaboración propia

En la figura 31 se compara los datos de la subcuenca Mena y los datos de estaciones San Andrés y San Jacinto Sud, de igual manera no se observa una variación significativos ni alteraciones temporales.

Los datos de la grilla GMET (1980 hasta 2016) de temperatura se emplearon en el estudio, debido a que no existe variación significativa y por efecto son válidas para la cuenca Tolomosa. En el anexo II se muestra la distribución espacial de la temperatura.

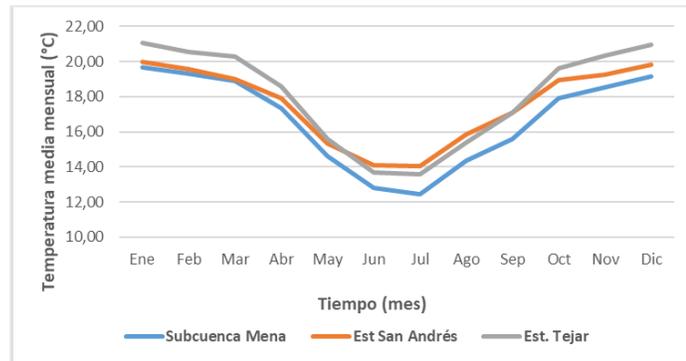


Figura N° 31: Temperatura media mensual-Subcuenca Mena

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.3 Humedad relativa, Velocidad del viento y Nubosidad

Las grillas multimensuales de humedad relativa, velocidad de viento y horas sol, se encuentra en un formato RASTER para todo el territorio boliviano.

Con los softwares QGIS y el ArcGis se regionalizo los datos climáticos para la cuenca. La información se extrajo para para cada subcuenca a modelar. (ver tabla 39, 40 y 41).

Tabla N° 39: Datos extraídos de velocidad de viento a 2 metros de altura (m/s)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Subcuenca San Andrés	1,26	1,22	1,21	1,29	1,32	1,19	1,49	1,62	1,75	1,70	1,52	1,43
Subcuenca Sola	1,17	1,06	1,07	1,20	1,33	1,40	1,68	1,68	1,79	1,53	1,51	1,34
Subcuenca Mena	1,17	1,06	1,06	1,11	1,12	1,05	1,34	1,46	1,72	1,60	1,52	1,35

Fuente: Elaboración propia en base a la información GMET

Tabla N° 40: Datos extraídos de Nubosidad (fracción de nubosidad)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Subcuenca San Andrés	0,66	0,64	0,59	0,50	0,41	0,39	0,38	0,36	0,42	0,49	0,55	0,62
Subcuenca Sola	0,62	0,59	0,55	0,45	0,35	0,32	0,32	0,31	0,38	0,46	0,50	0,57
Subcuenca Mena	0,61	0,58	0,55	0,47	0,36	0,34	0,33	0,32	0,38	0,46	0,52	0,57

Fuente: Elaboración propia en base a la información GMET

Tabla N° 41: Datos extraídos de humedad relativa (%)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Subcuenca San Andrés	71,0	72,8	72,4	68,8	61,7	55,4	51,9	51,7	53,5	58,8	63,2	67,5
Subcuenca Sola	70,8	72,6	72,2	68,8	61,7	55,7	52,5	52,3	53,9	58,9	63,1	67,4
Subcuenca Mena	70,4	72,3	71,9	68,5	61,5	55,6	52,7	52,4	54,0	58,8	62,8	67,1

Fuente: Elaboración propia en base a la información GMET

El procedimiento de extracción de las variables climáticas para la cuenca Tolomosa se detalla en el anexo VII.

3.4.3 Análisis de la información hidrométrica

Al igual que los registros pluviométricos, los caudales deben ser analizados en su consistencia antes de utilizarlos en cualquier estudio. En la actualidad la estación hidrométrica San Jacinto Sud no se encuentra en funcionamiento, la estación estaba ubicada a 200 m de la presa San Jacinto.

Tabla N° 42: Caudales medios mensuales aforados (m³/s)

Año	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
1978-1979	2,37	4,37	21,75	23,42	37,45	27,83	13,63	5,80	3,46	2,63	2,13	1,34
1979-1980	1,41	2,67	13,92	38,14	25,75	41,38	10,00	4,21	2,54	1,75	1,27	0,85
1980-1981	1,22	1,51	2,55	14,15	26,95	15,31	8,64	4,33	2,66	1,91	1,40	1,10
1981-1982	1,05	5,62	11,98	29,59	27,09	51,54	13,89	5,64	3,11	2,06	1,64	1,58
1982-1983	1,53	3,78	10,57	11,96	8,85	4,12	2,64	1,90	1,46	1,23	0,94	0,74
1983-1984	0,59	1,72	3,06	32,86	120,07	124,97	21,08	5,14	2,96	2,03	1,63	1,26

Fuente: Elaboración propia en base la información proporcionado por el SENAMHI.

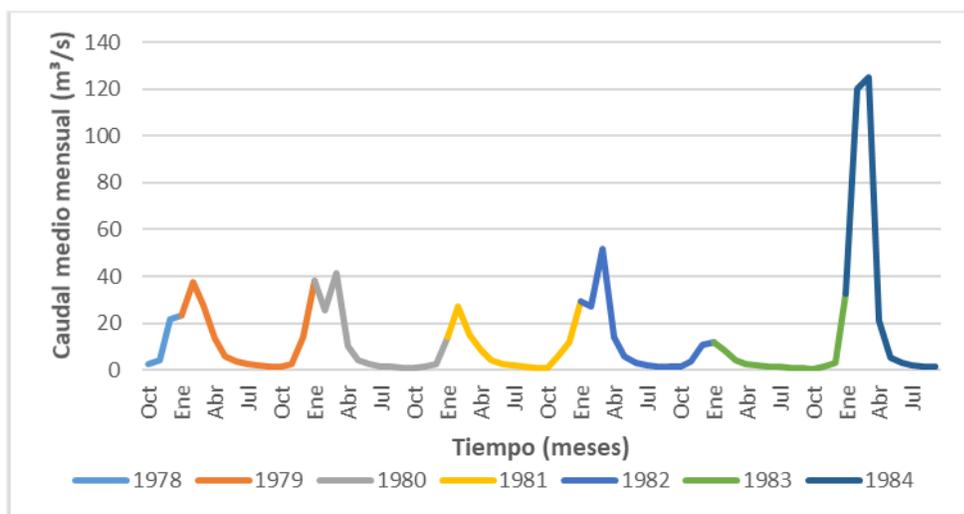


Figura N° 32: Caudales medios mensuales aforados (m³/s)

Fuente: Elaboración propia.

En un análisis visual gráfico de la información se observa una consistencia de los datos en los años 1978 al 1983, no se presentan picos altos, saltos ni cambios de tendencia. En el último periodo de medición el año 1984 se observan dos picos muy elevados en los meses de febrero y marzo 120,07 m³/s y 124,97 m³/s respectivamente, lo cual llama la atención, debido a que en los demás años los picos oscilan entre 26 m³/s (ver figura 32). En una comparación entre el caudal medido en la estación hidrométrica San Jacinto, la precipitación efectiva de la cuenca y la estación hidrométrica de Obrajes (ver figura 33) presentan una correlación en la escala temporal. Se observa además que lamina de precipitación efectiva en los años 1980, 1981 y 1984 es casi la misma, no obstante, el hidrograma de caudal del año 1984 es mucho mayor.

Se aclara que la precipitación efectiva se la estimo mediante el número de la curva, para la cuenca Tolomosa se obtuvo un CN de 69.7 (véase anexo IV). Además, mencionar que la estación hidrométrica de Obrajes (Cuenca Alta del Guadalquivir) es la más cercana a la estación San Jacinto, las mismas pertenecen a una misma región sin embargo las condiciones hidrológicas son distintas.

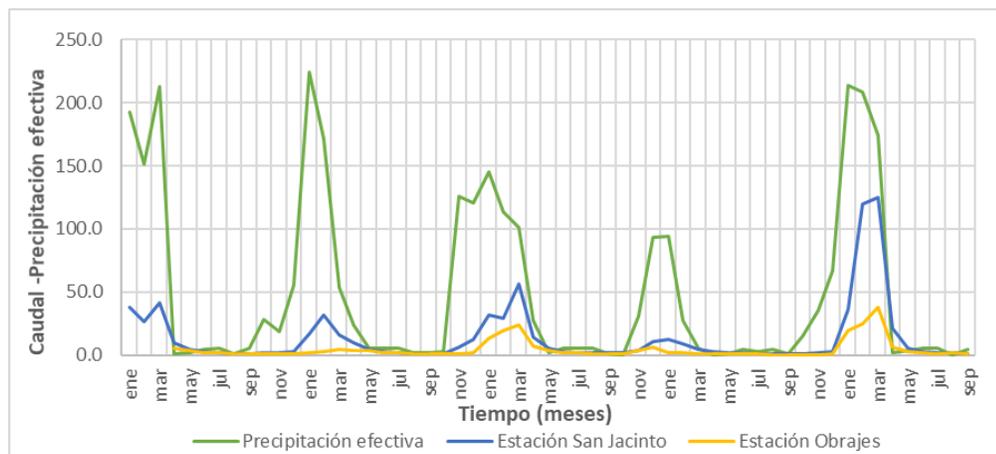


Figura N° 33: Precipitación efectiva vs caudal (1980-1984)

Fuente: Elaboración propia.

En diagrama de dispersión del caudal medio mensual vs precipitación efectiva (figura 34) se observa que los dos picos identificados se salen del comportamiento de los demás datos. Durante este periodo ocurrieron lluvias mayores que no produjeron picos tan elevados, esta dispersión puede deberse a un error sistemático a la hora de toma, o en el procesamiento de los datos de caudales o en las lecturas de las escalas limnométricas debido a que estos valores provienen de una media diaria.

En las figuras 34 y 35 se visualizan los diagramas de dispersión entre las escalas medias diarias y el caudal diaria aforado, correspondiente a los meses de febrero y marzo. En ambos diagramas se observar datos dispersos que no se correlacionan entre sí, y se salen del comportamiento del resto de los datos.

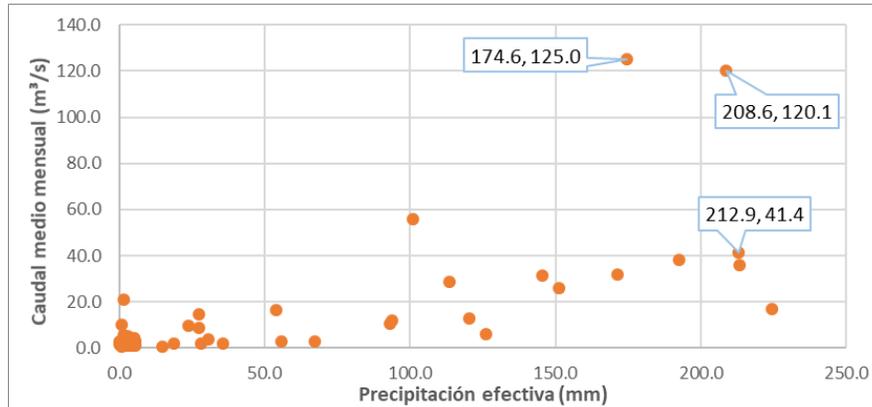


Figura N° 34:Diagrama de dispersión

Fuente: Elaboración propia.

En el mes de febrero del 1984 se observan cinco datos dispersos, dos de ellos, los más dispersos no existe una correlación entre las escalas realizadas y los aforos tomando en cuenta los registros de los demás datos. Se observa caudales de orden de 650 m³/s correspondientes a escalas de 3,1 m lo cual es llamativo porque también existen lecturas similares que no corresponde a un caudal tan elevado.

En el mes de marzo se observa un dato totalmente disperso de los demás, un caudal cerca de los 800m³/s, estos valores afectan en la estadística de los caudales y por eso se obtiene una media mensual con caudales elevados en estos meses.

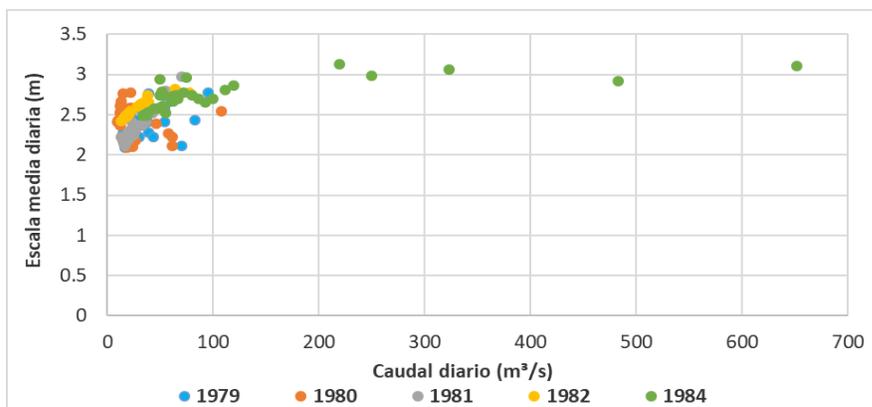


Figura N° 35: Diagrama de dispersión mes de febrero

Fuente: Elaboración propia.

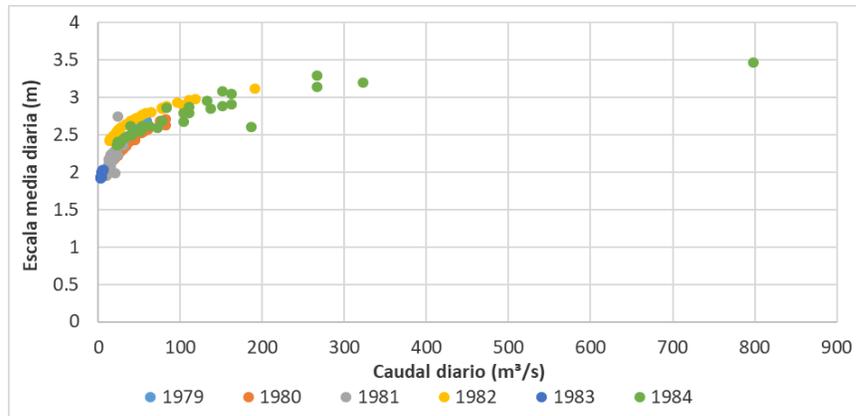


Figura N° 36: Diagrama de dispersión mes de marzo

Fuente: Elaboración propia.

Se desconfió de la obtención de los datos de las escalas medias diarias y del caudal diario aforado en el año 1984 en los meses de febrero y marzo, se observó que estos meses existen datos dispersos que no se correlacionan y se encuentran fuera del comportamiento de los demás datos, por estas razones para el presente estudio se decidió no considerar los caudales de febrero y marzo del año 1984 para la calibración del modelo.

3.4.4 Análisis de la demanda

3.4.4.1 Demanda de agua para Riego

El método que se empleó para estimar la demanda de riego en WEAP de la cuenca Tolomosa es el Ecurrimiento de Lluvia (método del coeficiente simplificado) el cual se encuentra inherente en el Software.

Los datos de entrada del método para la estimación de la demanda de riego del cultivo son precipitación efectiva, coeficiente de cultivo (kc) y evapotranspiración de referencia (ET_o), con estos el modelo realiza el balance del agua para estimar la demanda. El método solo simula demandas de riego y no procesos de escorrentía, infiltración o cambios de humedad de suelo.

Su formulación matemática y conceptual se basa en el reporte de Riego y Drenaje de la FAO (Guía para la determinación de requerimiento de agua de cultivos), el cual estima las necesidades de riego en base a la evapotranspiración (Penman-Monteith)

Los datos que se requeridos para la estimación del requerimiento de agua de cultivos son:

- Proyectos de riego existentes en las cuencas del río Tolomosa.
- Superficie regada en hectáreas.

- Datos agronómicos representativos de las áreas regadas: tipo de suelo, clase y ciclo vegetativo de cultivos, y estimaciones de requerimientos de agua por cultivos.

Esta información se obtuvo de diferentes estudios que se realizaron en la zona, el año 2016 el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) en coordinación con el Plan Nacional de Cuentas (PNC) y la Cooperación Suiza (HELVETAS Swiss Intercooperation) publicaron el estudio: “Balance integral para la cuenca del río Guadalquivir”, en donde se realizó un inventariado de todos los sistemas de riego y agua potable de la cuenca Guadalquivir, del estudio se extrajo toda la información referente a la cuenca Tolomosa, en la figura 37 se detalla los sistemas de riego que aprovechan aguas de la cuenca.

La demanda de riego se la estimó en función a los sistemas de riego que se encuentran dentro de cada subcuenca, en el anexo V se detallan todos sistemas de riego.

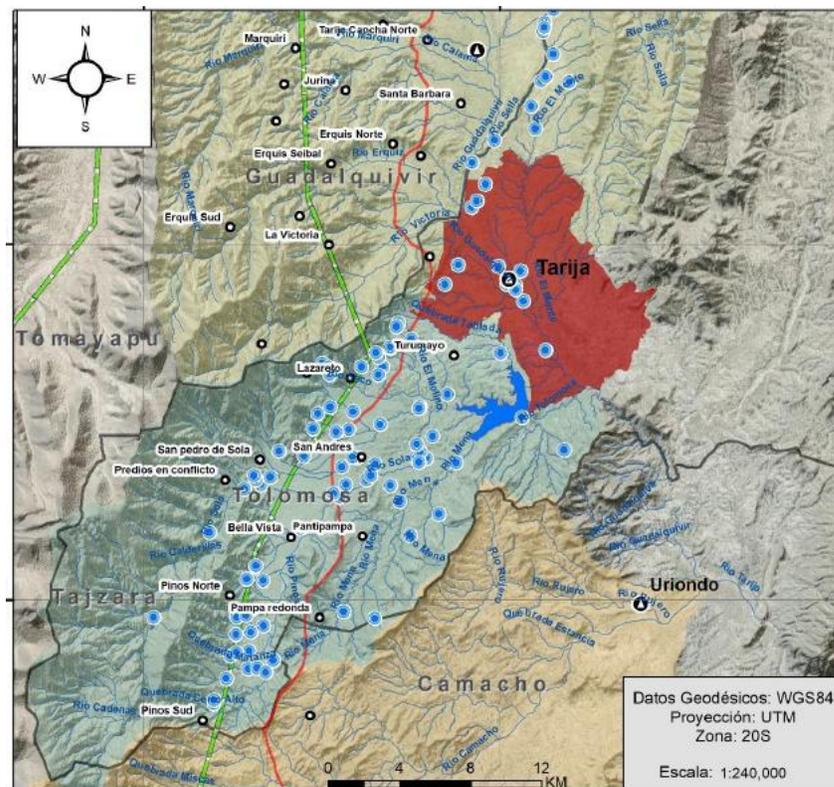


Figura N° 37: Sistemas de riego de la cuenca Tolomosa.

Fuente: Balance Hídrico de la cuenca Guadalquivir

3.4.4.1.1 Cedula de cultivos

De acuerdo a los estudios realizados por Jijena Orellano (2015), Molina, Herbas, & Mendoza (2002) y la información generada en el Atlas Ecotematico de la Cuenca

Tolomosa (INIBREH, 2007), los cultivos principales que se practican en la cuenca son la papa y el maíz seguidamente por la cebolla, arveja y en una menor porcentaje se cultivan hortalizas, tomate, avena de forraje y alfalfa.

De una manera general en la cuenca, destaca la posibilidad de realizar tres siembras durante el año agrícola:

- La siembra grande o siembra MISCA (Julio – Agosto)
- La siembra de TEMPORAL (noviembre – diciembre).
- La siembra TARDÍA (enero-febrero).

En base a los estudios mencionadas se definió la cedula de cultivo (ver tabla 43) para la cuenca Tolomosa, los porcentajes de cultivos es variable para cada subcuenca.

Tabla N° 43: Cedula de cultivo para la cuenca Tolomosa

Cultivo	Mes de siembra
Papa misca	junio
Papa tardía	marzo
Maíz choclo	agosto
Maíz grano	marzo
Cebolla	junio
Hortalizas	julio
Arveja Verde	julio
Alfalfa	agosto
Avena forraje	agosto
Tomate	agosto

Fuente: Elaboración propia

3.4.4.1.2 Estimación del Área de riego

De acuerdo al estudio realizado por el INIBREH (2007), 3.675 ha son empleadas para uso agrícola intensivo (superficie bajo riego), sin embargo en el inventario de sistemas de riego reflejan en la cuenca Tolomosa al año se riegan 8.787 ha.

Cabe mencionar que el área que se riega al año no es el área física del terreno, el área de riego anual toma en cuenta el número de siembras que se realiza durante el año agrícola.

Del inventario de los sistemas de riego se obtuvo información del área regada de cada sistema y el caudal empleado, se extrajo la información necesaria para las subcuencas San Andrés, Sola y Mena.

En base al área de riego anual y a los porcentajes de cultivos que se definieron, se calcularon las áreas de cada cultivo en cada subcuenca, estos fueron representados en el

modelo WEAP. En la tabla 44 y 45 se muestran los porcentajes de cada cultivo y las áreas de los mismos.

Tabla N° 44: Porcentajes de cultivos de la cuenca Tolomosa (%)

Cultivo	Subcuenca		
	Río San Andrés	Río Sola	Río Mena
Papa misca	18%	18%	18%
Papa tardía	7%	7%	7%
Maíz choclo	15%	15%	12%
Maíz grano	5%	5%	6%
Cebolla	13%	13%	10%
Hortalizas	12%	10%	15%
Arveja Verde	10%	12%	10%
Alfalfa	6%	6%	7%
Avena forraje	6%	6%	6%
Tomate	8%	8%	9%
Total	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 45: Superficie de cultivos de la cuenca Tolomosa (ha)

Cultivo	Subcuenca		
	Río San Andrés	Río Sola	Río Mena
Papa misca	518,76	976,68	86,22
Papa tardía	201,74	379,82	33,53
Maíz choclo	432,3	813,9	57,48
Maíz grano	144,1	271,3	28,74
Cebolla	374,66	705,38	47,9
Hortalizas	345,84	542,6	71,85
Arveja Verde	288,2	651,12	47,9
Alfalfa	172,92	325,56	33,53
Avena forraje	172,92	325,56	28,74
Tomate	230,56	434,08	43,11
Total	2882	5426	479

Fuente: Elaboración propia

3.4.4.1.3 Precipitación efectiva

Se define como la proporción de agua retenida en la capa radicular con relación a la cantidad de lluvia caída. Su magnitud depende, por un lado, de las características del terreno y por otra de las características de precipitación. El Programa Nacional de Riego, en función a las características agroecológicas de las regiones de altiplano, valles y chaco; considera que no son efectivas las precipitaciones menores a 12, 15 y 20 mm respectivamente. Las lluvias mensuales, resultantes de la diferencia, son efectivas al 70, 75 y 80%. Se adoptadas las siguientes expresiones para el cálculo de la precipitación.

Tabla N° 46: Precipitación efectiva para cada región.

Región	Precipitación efectiva	Variables
Altiplano	$Pe = (P - 12) \cdot 0.70$	Pe: precipitación efectiva. P: precipitación media mensual [mm].
Valles	$Pe = (P - 15) \cdot 0.75$	
Chaco	$Pe = (P - 20) \cdot 0.80$	

Fuente: Elaboración propia.

La precipitación efectiva que corresponde al área de estudios es la región valles. Para ingresar la precipitación efectiva en el modelo WEAP, se debe considerar que la unidad de la precipitación efectiva es porcentual, es decir la precipitación efectiva en WEAP es la razón que existe entre la precipitación efectiva y la precipitación media mensual multiplicada por cien, para tal efecto se emplea la siguiente función, siendo P la precipitación media de la cuenca.

if(prueba logica, valor si verdadero, Valor si falso)

$$\text{If}(P < 15, 0, \frac{(P - 15) \cdot 0.75}{P} 100)$$

3.4.4.1.4 Precipitación

Se ingresa los datos de precipitación media mensual correspondiente al catchment (subcuenta), que contiene el área de riego con el objeto de calcular la precipitación efectiva.

3.4.4.1.5 Calculo de la Evapotranspiración de referencia

Para el estudio se estima la evapotranspiración mediante el programa oficial y vigente a nivel nacional que es el ABRO (área bajo riego optimo). Para la estimación de la evapotranspiración potencial (ET_o), la base de datos empleadas deriva del Balance Hídrico nacional, a continuación, se describe el procedimiento para la obtención de todas las variables, las variables requeridas en el ABRO son temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), humedad relativa, horas sol y velocidad del viento (m/s).

3.4.4.1.6 Horas sol

Del Balance Hídrico Superficial de Bolivia se extrajo los valores de nubosidad relativa, estos valores fueron llevados a horas sol de acuerdo al método de la FAO para la estimación de la evapotranspiración de referencia (Perman Monteith). Esta metodología

se mencionado en Guía para Elaboración de Balances Hídricos. Las variables ingresadas en el ABRO para estimar la evapotranspiración potencial se muestran en las siguientes tablas 47, 48 y 49. El objeto de esto es determinar la evapotranspiración de referencia (ET_o) es para poder estimar la demanda de riego dentro del modelo WEAP. La velocidad de viento es medida por las estaciones a 2 metros de altura.

Tabla N° 47: Datos para la estimación de la ET_o - Subcuenca Mena.

Variable	Unidad	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.
Temp. Min. Media	°C	2,2	1,8	4,1	6,8	10,6	12,1	13,2	13,6	13,2	12,6	10,2	5,4
Temp. Max. Media	°C	23,4	23,2	24,7	25,2	26,3	26	26,2	25,7	25,4	25,1	24,5	23,8
Humedad relativa (HR)	%	55,6	52,6	52,4	54	58,8	62,8	67,1	70,4	72,3	71,9	68,5	61,5
Insolación máxima h	hrs	10,7	10,8	11,2	11,9	12,5	13,1	13,3	13,2	12,7	12,1	11,5	10,9
Nubosidad	fracción	0,34	0,33	0,32	0,38	0,46	0,52	0,57	0,61	0,58	0,55	0,47	0,36
Horas sol	hrs	3,58	3,54	3,54	4,58	5,74	6,84	7,56	8,02	7,35	6,65	5,38	3,92
Velocidad del viento	m/s	1,05	1,34	1,46	1,72	1,6	1,52	1,35	1,17	1,06	1,06	1,11	1,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 48: Datos para la estimación de la ET_o - subcuenca San Andrés.

Variable	Unidad	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.
Temp. Min. Media	°C	2,8	2,4	4,7	7,3	11	12,4	13,5	13,9	13,4	12,9	10,6	5,9
Temp. Max. Media	°C	24	23,7	25,2	25,8	26,8	26,5	26,6	26,1	25,7	25,5	25	24,3
Humedad relativa (HR)	%	55,4	51,9	51,7	53,5	58,8	63,2	67,5	71	72,8	72,4	68,9	61,7
Insolación máxima h	hrs	10,7	10,8	11,2	11,9	12,5	13,1	13,3	13,2	12,7	12,1	11,5	10,9
Nubosidad	fracción	0,39	0,38	0,36	0,42	0,49	0,55	0,62	0,66	0,64	0,59	0,5	0,41
Horas sol	hrs	4,16	4,09	4,09	5,03	6,14	7,18	8,21	8,77	8,12	7,1	5,79	4,51
Velocidad del viento	m/s	1,19	1,49	1,62	1,75	1,7	1,52	1,43	1,26	1,22	1,21	1,29	1,32

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 49: Datos para la estimación de la ET_o - subcuenca Sola.

Variable	Unidad	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.
Temp. Min. Media	°C	2,8	2,4	4,7	7,3	11	12,4	13,5	13,9	13,4	12,9	10,6	5,9
Temp. Max. Media	°C	24	23,7	25,2	25,8	26,8	26,5	26,6	26,1	25,7	25,5	25	24,3
Humedad relativa (HR)	%	55,4	51,9	51,7	53,5	58,8	63,2	67,5	71	72,8	72,4	68,9	61,7
Insolación máxima h	hrs	10,7	10,8	11,2	11,9	12,5	13,1	13,3	13,2	12,7	12,1	11,5	10,9
Nubosidad	fracción	0,39	0,38	0,36	0,42	0,49	0,55	0,62	0,66	0,64	0,59	0,5	0,41
Horas sol	hrs	4,16	4,09	4,09	5,03	6,14	7,18	8,21	8,77	8,12	7,1	5,79	4,51
Velocidad del viento	m/s	1,19	1,49	1,62	1,75	1,7	1,52	1,43	1,26	1,22	1,21	1,29	1,32

Fuente: Elaboración propia

Se aclara que la nubosidad representa la fracción de nubes en un mes. Finalmente, la evapotranspiración potencial estimada con el ABRO se detalla en la tabla 50.

Tabla N° 50: Evapotranspiración de referencia ET_o (mm).

Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
San Andrés	119,8	103,8	106,5	92,72	84,43	73,68	83,96	102	116,7	130,6	129,5	130,5
Mena	118,9	102,5	105,7	91,75	83,28	72,51	82,53	100,3	114,9	128,9	128	129,3
Sola	115	99,04	102	88,23	79,76	69,21	78,67	95,89	110,3	124,2	123,7	124,8

Fuente: Elaboración propia

3.4.4.1.7 Coeficiente de cultivo

Los coeficientes de cultivo se obtuvieron de la base de datos del ABRO, en base a la cedula de cultivo. En la tabla 51 se muestran los coeficientes de cultivo durante la fase fenológica del mismo.

Tabla N° 51: Coeficientes y fase fenológico de cultivos

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Papa misca	0	0	0	0	0	0,24	0,74	1,02	0,48	0	0	0
Papa tardía	0	0	0,24	0,74	1,02	0,75	0,61	0,48	0	0	0	0
Maiz choclo	0	0	0	0	0	0	0	0,24	0,41	0,8	1,08	1,03
Maiz grano	0	0	0,24	0,41	0,8	1,08	1,03	0,8	0	0	0	0
Cebolla	0	0	0	0	0	0,78	0,91	1,05	1,02	1	0	0
Hortalizas	0	0	0	0	0	0	0,38	1	0,9	0	0	0
Arveja verde	0	0	0	0	0	0	0,41	0,78	1,15	1,05	0	0
Alfalfa	1,15	0,66	0,83	1,07	0,66	0,82	0,67	0,71	1,09	1,13	0,7	1,14
Avena forraje	0	0	0	0	0	0	0	0,38	0,76	1,15	0,6	0
Tomate	0	0	0	0	0	0	0	0,42	0,81	1,2	0,92	0

Fuente: ABRO

La ETO y los coeficientes de cultivo fueron obtenidos del ABRO en base a la cedula de cultivo, los mismos serán conceptualizados dentro del modelo.

3.4.4.2 Demanda de agua potable

La demanda de agua potable se determinó de acuerdo a lo establecido en la NB-689 de Instalaciones de Agua-Diseños para Sistemas de Agua Potable y los Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, la cual se basa en la estimación de la dotación futura y la población futura.

Los parámetros que requiere WEAP para la estimación de la demanda de agua.

- **Nivel de actividad anual:** Este parámetro está relacionado con la población que consume agua ya sea para fines domésticos o industriales.
- **Tasa Anual de Uso de Agua:** Se refiere al consumo promedio anual de agua por unidad de actividad.
- **Variación mensual:** Es el porcentaje de agua anual utilizada en cada mes.
- **Consumo:** Se refiere al agua que se pierde en el sistema.

En la actualidad de acuerdo el inventariado de sistemas de regío y de agua potable en el valle central de Tarija realizado por La Oficina Técnica del rio Pilcomayo y Bermejo (OTN-PB) estableció que la cuenca Tolomosa cuenta con 14 sistemas de agua potable (ver figura 38), la mayor parte de los sistemas se encuentran en la subcuenca de San Andrés.

De acuerdo al estudio OTN-PB (2018), en los últimos años la mancha urbana se ha ido extendiendo por las comunidades de Turumayo, Lazareto, Guerra Huarco y San Andrés.

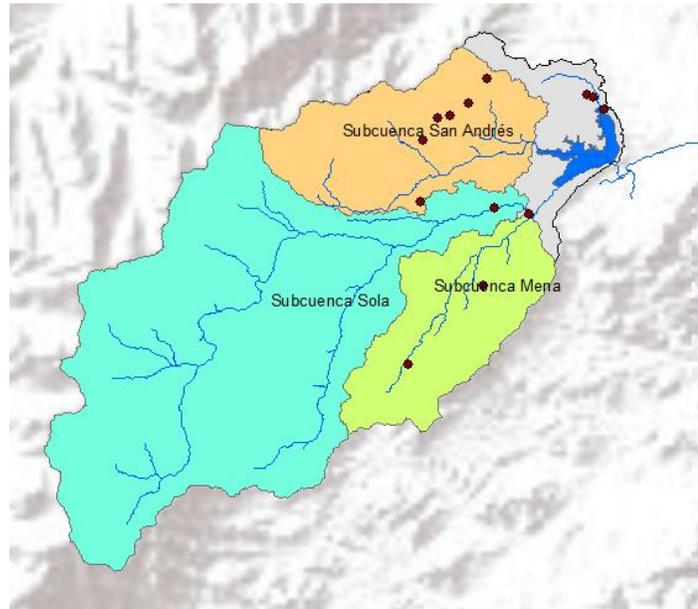


Figura N° 38: Sistemas de agua potable en la cuenca Tolomosa.

Fuente: Elaboración propia

3.4.4.2.1 Proyección de la demanda de agua potable

La demanda de agua potable será proyectada para el periodo de modelación 2020-2050. De acuerdo a norma boliviana (NB-689) establece que la población futura, referida a un número de habitantes dentro el área de proyecto que debe ser estimada en base a la población inicial, el índice de crecimiento poblacional y el periodo de diseño en caso para el cada año del periodo de modelación.

La guía metodológica para elaboración de balances hídricos (MMAyA, VRHR,2016), establece que para la estimación de la población futura se utilice el metodo geometrico, este metodo es el que se empleara.

$$P_f = P_o \left(1 + \frac{i}{100} \right)^t$$

Variable	Definición
P_f	Población futura en habitantes
P_o	Población inicial en habitantes
t	Número de años de la proyección.
i	Índice de crecimiento poblacional en porcentaje.

Fuente: MMAyA, VRHR,2016

De acuerdo a los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2012, la población de la cuenca Tolomosa es de 11.348 habitantes, la tasa anual de crecimiento en el último periodo intercensal correspondiente al municipio de cercado en la zona rural es de 3,5%. (ver tabla 52)

Tabla N° 52: Tasa anual de crecimiento municipio de Cercado

Censo	Tasa anual de crecimiento (%)	
	Área urbana	Área rural
1976	-	-
1992	5,3	-0,15
2001	4,6	-0,28
2012	2,5	3,5

Fuente: Elaboración propia a base de datos del INE

En la tabla 53 se muestra la proyección de la población de la cuenca Tolomosa hasta el año 2020 en base a los resultados del censo 2012, considerando 3,5% de crecimiento anual, así mismo se detalla las comunidades que pertenecen a cada sub cuenca.

Tabla N° 53: Población de la cuenca Tolomosa

Comunidad	Población	Población
	2012	2020
Subcuenca Mena	1590	2095
Churquis	640	843
Panti Pampa	313	413
Pampa Redonda	637	839
Subcuenca Sola	3721	4905
Pinos Norte	373	492
Pinos Sud	370	488
Calderillas	156	206
Calderillas Chica	45	60
Bellas Vista	794	1046
San Pedro de Sola	309	407
Tolomosa Norte	460	606
Tolomosa Grande	936	1233
Tolomosa Sud	278	367
Subcuenca San Andrés	6037	7951
San Andrés	1593	2098
Turumayo	1450	1910
Guerra Huayco	1496	1970
Tolomosa Oeste	366	482
Lazareto	795	1047
Tablada Grande	94	124
Tolomosa Centro	243	320
Total	11348	14951

Fuente: Elaboración propia.

Con las tres subcuencas a modelar se proyectó la población para todo el periodo de modelación (2020-2050), estos datos serán cargados en el modelo (ver tabla 54).

Tabla N° 54: Población futura para el periodo de simulación (2020-2050).

Año	Subcuenca Sola	Subcuenca San Andrés	Subcuenca Mena	Total
2020	4905	7951	2095	14951
2021	5077	8230	2169	15476
2022	5255	8518	2245	16018
2023	5439	8816	2323	16578
2024	5629	9124	2405	17158
2025	5826	9444	2489	17759
2026	6030	9774	2576	18380
2027	6241	10116	2666	19023
2028	6459	10470	2759	19688
2029	6686	10837	2856	20379
2030	6919	11216	2956	21091
2031	7162	11609	3059	21830
2032	7412	12015	3166	22593
2033	7672	12436	3277	23385
2034	7940	12871	3392	24203
2035	8218	13321	3510	25049
2036	8506	13787	3633	25926
2037	8803	14270	3760	26833
2038	9111	14769	3892	27772
2039	9430	15286	4028	28744
2040	9760	15821	4169	29750
2041	10102	16375	4315	30792
2042	10456	16948	4466	31870
2043	10821	17541	4622	32984
2044	11200	18155	4784	34139
2045	11592	18791	4951	35334
2046	11998	19448	5125	36571
2047	12418	20129	5304	37851
2048	12852	20833	5490	39175
2049	13302	21563	5682	40547
2050	13768	22317	5881	41966

Fuente: Elaboración propia.

La tasa anual de uso de agua se refiere al consumo de agua o dotación, según la norma (NB-689) para el caso de sistemas nuevos de agua potable, con conexiones domiciliarias, la dotación media diaria puede ser obtenida sobre la base de la población y la zona geográfica dada, según lo especificado en la tabla 55.

Tabla N° 55: Dotación media diaria (l/had-d)

Zona	Población (habitantes)					
	Hasta 500	De 501 a 2 000	De 2 001 a 5 000	De 5 001 a 20 000	De 20 001 a 100 000	Más de 100 000
Del Altiplano	30 - 50	30 - 70	50 - 80	80 - 100	100 - 150	150 - 200
De los Valles	50 - 70	50 - 90	70 - 100	100 - 140	150 - 200	200 - 250
De los Llanos	70 -90	70 - 110	90 - 120	120 - 180	200 - 250	250 - 350
Notas:	1			2		

(1) Justificar a través de un estudio social

(2) Justificar a través de un estudio socio-económico

Fuente: NB-689

De acuerdo a la guía para elaboración de balances hídricos la dotación futura debe ser determinada a través del método de crecimiento geométrico, con concordancia con el método para la estimación de la población futura.

$$D_f = D_o \left(1 + \frac{d}{100} \right)^t$$

Variable	Definición
D_f	Dotación futura en lt/hab-día
D_o	Dotación inicial lt/hab-día
t	Número de años de la proyección.
d	Variación anual de la dotación en porcentaje

Fuente: MMAyA, VRHR,2016

La dotación futura se debe estimar con un incremento anual entre el 0,50% y el 2% de la dotación media diaria, aplicando la fórmula del método geométrico. En este caso tomando en cuenta los fines del estudio se asume una variación anual de 2%.

De acuerdo a la tabla 55 la población de la cuenca (14.951 habitantes año 2020) se encuentra entre 5000 a 20000 habitantes, y considerando que el Valle Central de Tarija pertenece a una zona de valle, la dotación media diaria debe ser de 100-140 lt/hab-día. tomando en cuenta la finalidad del estudio se asume una dotación de 140 lt/hab-día.

El modelo requiere de la tasa o dotación anual, además debe estar expresada en m³/persona. En la tabla 56 se muestra los valores de la dotación futura de agua para todo el periodo de modelación y para cada subcuenca estos valores serán ingresados al modelo. WEAP representa las demandas mediante nodos, la característica más importante de un sitio de demanda es la prioridad que se le asigna, en función de la prioridad WEAP hace la distribución del agua, en el caso de agua potable tiene una prioridad de 1, lo que significa que el modelo WEAP va satisfacer primero la demanda de agua potable.

Tabla N° 56: Tasa anual de agua-periodo de simulación 2020-2050 (m³/hab-año).

Año	Subcuenca Sola	Subcuenca San Andrés	Subcuenca Mena
2020	51	51	51
2021	52	52	52
2022	53	53	53
2023	54	54	54
2024	55	55	55
2025	57	57	57
2026	58	58	58
2027	59	59	59
2028	60	60	60
2029	61	61	61
2030	62	62	62
2031	64	64	64
2032	65	65	65
2033	66	66	66
2034	68	68	68
2035	69	69	69
2036	70	70	70
2037	72	72	72
2038	73	73	73
2039	74	74	74
2040	76	76	76
2041	78	78	78
2042	79	79	79
2043	81	81	81
2044	82	82	82
2045	84	84	84
2046	86	86	86
2047	87	87	87
2048	89	89	89
2049	91	91	91
2050	93	93	93

Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Análisis fisiográfico de la cuenca

Para realizar la parametrización del modelo hidrológico en WEAP de una manera más física, se debe realizar una combinación entre suelo (textura) y cobertura vegetal de la cuenca.

3.4.5.1 Caracterización de la Cobertura vegetal

Para el análisis de la cobertura vegetal de la cuenca Tolomosa se hizo uso de la información generada por el estudio que llevo a cabo el Instituto Interuniversitario

Boliviano de Recursos Hídricos (INIBREB 2007), dando como resultado la elaboración de un Atlas Ecotemático de la Cuenca del Río Tolomosa en donde se realizaron diferentes mapas temáticos de la cuenca que se encuentran en formato shapefile que es compatible con el ArcGis. (ver figura 39).

Tabla N° 57: Cubertura vegetal de la cuenca Tolomosa

N°	Descripción	Área (km ²)	(%)
0	Bosque denso a ralo mayormente siempre verde, semidecuido, montano	9,01	2,06
1	Matorral ralo a semidenso, xeromórfico, mayormente espinoso, montano	30,17	6,9
2	Vegetación herbácea semidensa, graminoide intermedia con sinusia arbustiva, montano	24,21	5,54
3	Vegetación herbácea semidensa, graminoide intermedia, con sinusia, arbustiva, subalpino	25,45	5,82
4	Vegetación herbácea densa, graminoide intermedia, sin sinusia, arbustiva, montano	1,54	0,35
5	Vegetación herbácea densa, graminoide intermedia, sin sinusia, arbustiva, montano,	9,41	2,15
6	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, con sinusia arbustiva, montano	25,46	5,82
7	Vegetación herbácea rala a semidensa, graminoide, baja sin sinusia baja arbustiva, montano	14,57	3,33
8	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, mixto, montano	39,1	8,94
9	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, con sinusia arbustiva, subalpino	12,32	2,82
10	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, subalpino	64,84	14,83
11	Bosque ralo a semidenso, mayormente siempre verde, semidecuido mantano	0,99	0,23
12	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, cespitoso, subalpino	1,98	0,45
13	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, alpino	13,14	3
14	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja, hidromófica, montano	1,68	0,39
15	Bosque implantado	0,84	0,19
16	Bosque ralo a semidenso, mayormente caducifolio, semidecuido, montano	0,67	0,15
17	Matorral semidenso, medio, mayormente siempre verde, semidecuido, montano	23,13	5,29
18	Matorral semidenso, medio mayormente siempre verde, deciduo por sequía, montano	3,22	0,74
19	Matorral denso a ralo, medio mayormente caducifolio, semidecuido, montano	6,41	1,47
20	Matorral ralo, bajo a medio, mayormente caducifolio, deciduo por sequía, montano	17,49	4
21	Matorral denso, medio, mayormente caducifolio, deciduo por sequía, subalpino	1,24	0,28
22	Matorral denso a semidenso, xeromórfico, deciduo por sequía, montano	32,71	7,48
23	Áreas antrópicas (Cultivos agrícolas a secano, matorrales, pastizales y cultivo a riego)	62,57	14,31
24	Caserío (poblaciones)	0,68	0,15
25	Embalse San Jacinto	4,58	1,05
26	Llanura de inundación	9,86	2,26
	TOTAL	437,3	100

Fuente: INIBREH, 2007

Según la Guía Metodológica de Modelación hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP (2009), recomienda agrupar los tipos de vegetación cuando se dispone de información de cobertura muy detallada, esto debido a que la escala del modelo no requiere de una clasificación de cobertura vegetal tan específica. Por otro lado, al realizar esta agrupación, se logra mejorar los tiempos de procesamiento durante las corridas del modelo.

Mediante el software SIG (Arcgis) se realizó la sub clasificación de la cobertura vegetal de la cuenca Tolomosa, el criterio que se optó para la agrupación de las categorías fue la similitud de las características física de vegetación, clima y altitud, finalmente se

renombraron las leyendas que resultaron de la agrupación de manera que puedan identificarse de forma más simple en el modelo WEAP. En tabla 58 se muestra la agrupación de la cobertura, la vegetación predominante y la leyenda que se utilizara para la modelación en WEAP.

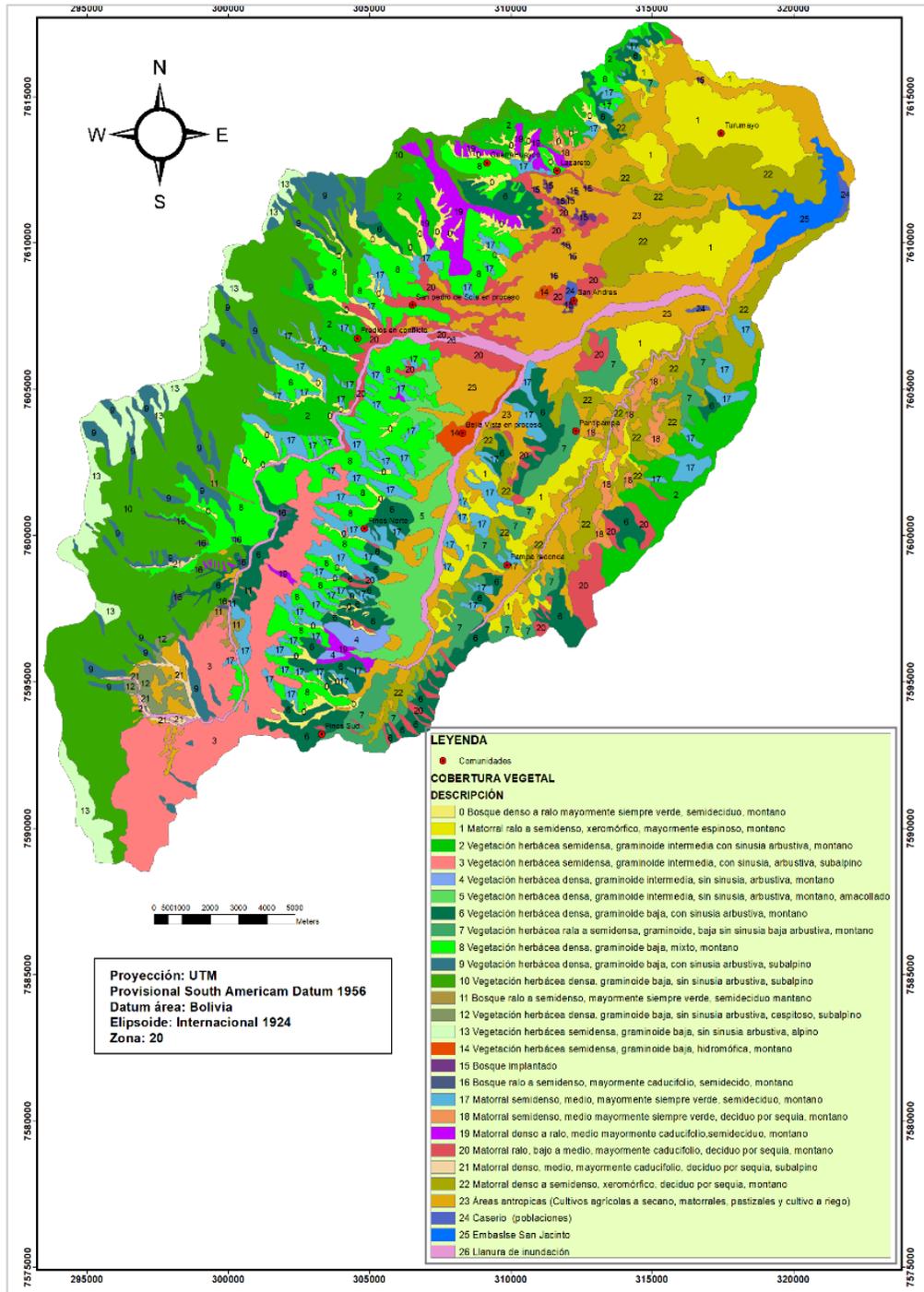


Figura N° 39: Mapa de cobertura vegetal de la cuenca Tolomosa

Fuente: INIBREH, 2007

Tabla N° 58: Agrupación Cobertura vegetal de la cuenca Tolomosa

N°	Cobertura Vegetal (INIBREH)	Vegetación Predominante	Vegetación (WEAP)
1	Bosque denso a ralo mayormente siempre verde, semidecuido, montano	Bosque ralo a semidenso, mayormente caducifolio, semidecuido, montano	Bosque denso
	Bosque ralo a semidenso, mayormente siempre verde, semidecuido, montano		
	Bosque ralo a semidenso, mayormente caducifolio, semidecuido, montano		
2	Matorral ralo, bajo a medio, mayormente caducifolio, decuido por sequía, montano	Matorral denso a semidenso, xeromórfico, decuido por sequía, montano	Matorrales xeromórficos
	Matorral denso a semidenso, xeromórfico, decuido por sequía, montano		
3	Matorral ralo a medio, mayormente siempre verde, semidecuido, montano	Matorral semidenso, medio, mayormente siempre verde, semidecuido, montano	Matorrales denso
	Matorral semidenso, medio mayormente siempre verde, decuido por sequía, montano		
	Matorral denso a ralo, medio mayormente caducifolio, semidecuido, montano		
	Matorral denso, medio, mayormente caducifolio, decuido por sequía, subalpino		
4	Vegetación herbácea semidensa, graminoide intermedia con sinusia arbustiva, montano	Vegetación herbácea semidensa a densa. Graminoide mixta arbustiva, montano	Pastizales
	Vegetación herbácea densa, graminoide intermedia, sin sinusia, arbustiva, montano		
	Vegetación herbácea densa, graminoide intermedia, sin sinusia, arbustiva, montano,		
	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, con sinusia arbustiva, montano		
	Vegetación herbácea rala a semidensa, graminoide, baja sin sinusia baja arbustiva, montano		
5	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, mixto, montano	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, con y sin sinusia arbustiva, subalpino-alpino	Vegetación húmeda
	Vegetación herbácea semidensa, graminoide intermedia, con sinusia, arbustiva, subalpino		
	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, con sinusia arbustiva, subalpino		
	Vegetación herbácea densa, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, cespitoso, subalpino		
	Vegetación herbácea semidensa, graminoide baja, sin sinusia arbustiva, alpino		
6	Áreas antrópicas (Cultivos agrícolas a secano, matorrales, pastizales y cultivo a riego)	Agricultura múltiple	Agricultura
7	Caserío (poblaciones)	Caseríos	Poblaciones
8	Embalse San Jacinto	Embalse San Jacinto	Embalse
9	Llanura de inundación	Llanura de inundación	Lecho del río

Fuente: Elaboración propia

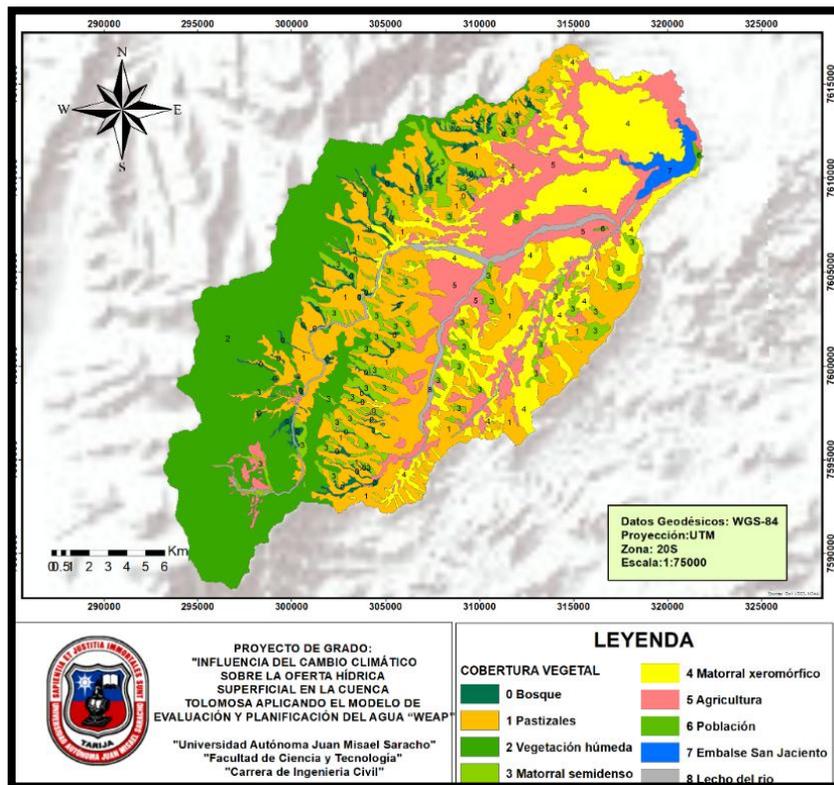


Figura N° 40: Cobertura vegetal de la cuenca Tolomosa empleada en WEAP.

Fuente: Elaboración propia a base de INIBREH, 2007

3.4.6 Análisis de textura

Para el análisis de la textura se utilizó el mapa de grupos hidrológico de suelos que se elaboraron en el estudio INIBREB, la metodología que se empleó en ese estudio para la definición de los grupos hidrológicos fue la siguiente: se tomó como unidad de análisis la unidad geomorfológica desarrollada en el estudio, se optó utilizar esta información por tener homogeneidad en el relieve, geología, suelos, cobertura vegetal y además por ser una unidad especial estable e identificable en el territorio de la cuenca. Los parámetros que se considerados para la estimación de los grupos hidrológicos (GH) de los suelos son: textura, profundidad, permeabilidad, materia orgánica superficial y la cobertura vegetal.

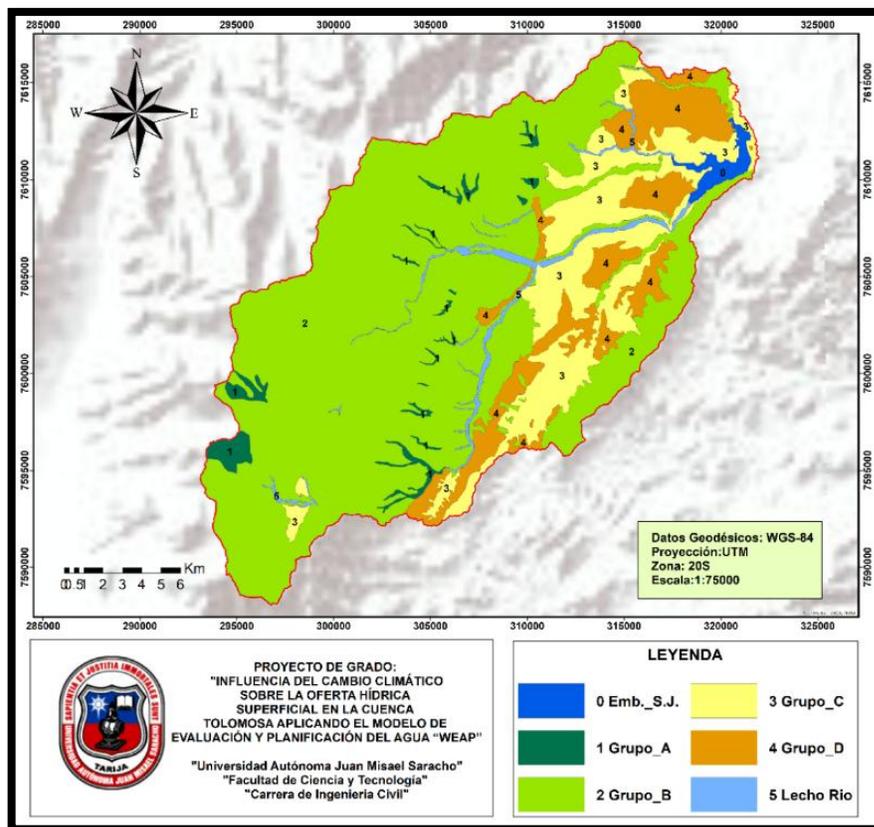


Figura N° 41: Grupo hidrológico de suelos de la cuenca Tolomosa.

Fuente: INIBREH, 2007

A diferencia de la cobertura vegetal, no fue necesario agrupar los tipos de grupos hidrológicos de suelos, debido a que se encuentran a una escala adecuada para el modelo, se mantuvo la clasificación y leyendas definidas en el estudio. En la tabla 59 se muestra la textura que fue establecida de acuerdo al grupo hidrológico, también se establece la simbología que se empleara en el modelo.

Tabla N° 59: Textura de la cuenca Tolomosa

Grupo hidrológico	Textura	Simbología Weap
GRUPO A	Franco arenosos grueso	A
GRUPO B	Franco arenosos	B
GRUPO C	Franco arcillosos	C
GRUPO D	Arcillosos	D
Lecho de río	Lecho de río	LR
Represa San Jacinto	Embalse San Jacinto	ESJ

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, las clases de cobertura vegetal y tipo de suelos definidas para el modelo se muestran en la tabla 60.

Tabla N° 60: Nomenclatura empleada en el modelo WEAP.

N°	Cobertura	Textura	Nomenclatura en WEAP
1	Bosque	Embalse_S.J.	ESJ
2	Pastizales	Grupo A	A
3	Vegetación húmeda	Grupo B	B
4	Matorral semidenso	Grupo C	C
5	Matorral xeromórfico	Grupo D	D
6	Agricultura	Lecho del río	LR
7	Población		
8	Embalse San Jacinto		
9	Lecho del río		

Fuente: Elaboración propia

3.4.7 Combinación Cobertura vegetal-textura

Las combinaciones obtenidas por el ArcGis fueron analizadas y validadas, el criterio que se empleó para la validación fue que para un cierto tipo de suelo y en función de sus características de textura se presenta ciertos tipos de cobertura vegetal, este análisis se realizó para cada combinación descartando aquellas combinaciones que no era posible de acuerdo sus características de textura y cobertura (ver figura 42). El resumen de todas las combinaciones se muestra en el anexo VI. El proceso de validación se realizó en el software ArcGis mediante técnicas de teledetección y la ayuda de otros softwares como Google Earth, también se empleó imágenes satelitales Landsat TM, se realizaron diferentes combinaciones de bandas espectrales con el objeto de identificar propiedades físicas de la cobertura y poder validar la combinación.

El resultado del análisis fueron las combinaciones que se emplearan dentro del modelo, en la tabla 61 se muestran las clases definitivas.

Tabla N° 61: Combinación de Cobertura y textura

N°	Combinación	Área	
		km ²	%
0	Bosque_A	11,44	2,62
1	Pastizales_B	92,03	21,04
2	Pastizales_D	19,7	4,5
3	Vegetación húmeda_B	119,57	27,34
4	Matorral semidenso_B	33,51	7,66
5	Matorral xeromórfico_B	24,08	5,5
6	Matorral xeromórfico_C	26,92	6,15
7	Matorral xeromórfico_D	28,59	6,54
8	Agricultura_B	29,88	6,83
9	Agricultura_C	26,25	6
10	Agricultura_D	7,13	1,63
11	Población_D	0,72	0,16
12	Emb. San Jacinto_ESJ	4,79	1,1
13	echo del rio_LR	12,8	2,93
	TOTAL	437,4	100

Fuente: Elaboración propia

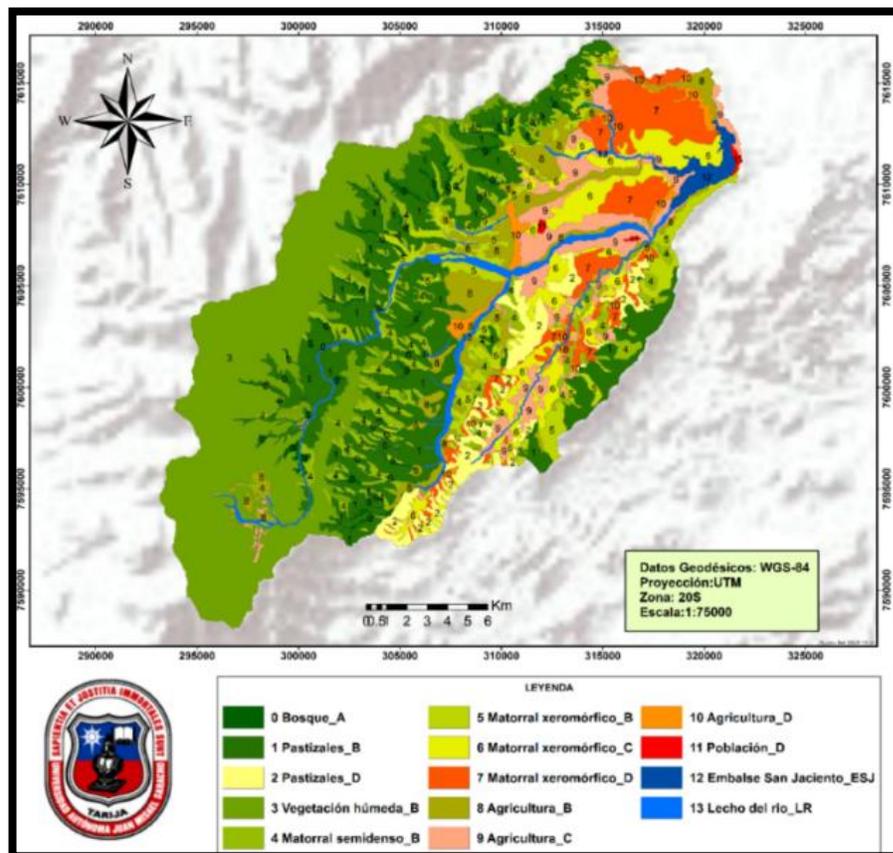


Figura N° 42: Combinación de cobertura vegetal y textura.

Fuente: Elaboración propia

Para poder cargar la información dentro del modelo en WEAP, la combinación de cobertura y textura se convertido a un archivo NetCDF, este tipo de archivo es compatible con el WEAP y es la forma más fácil de introducir la información.

La conversión se realizó en el Qgis, la combinación se encontraba en formato shapefile se lo llevo a un formato raster con una resolución de 90 metros (3s), el raster debe estar referenciado al sistema de coordenadas geográfica (WGS-84), que corresponde al sistema que maneja el WEAP. En la figura 43 se muestra el resultado de la rasterización.

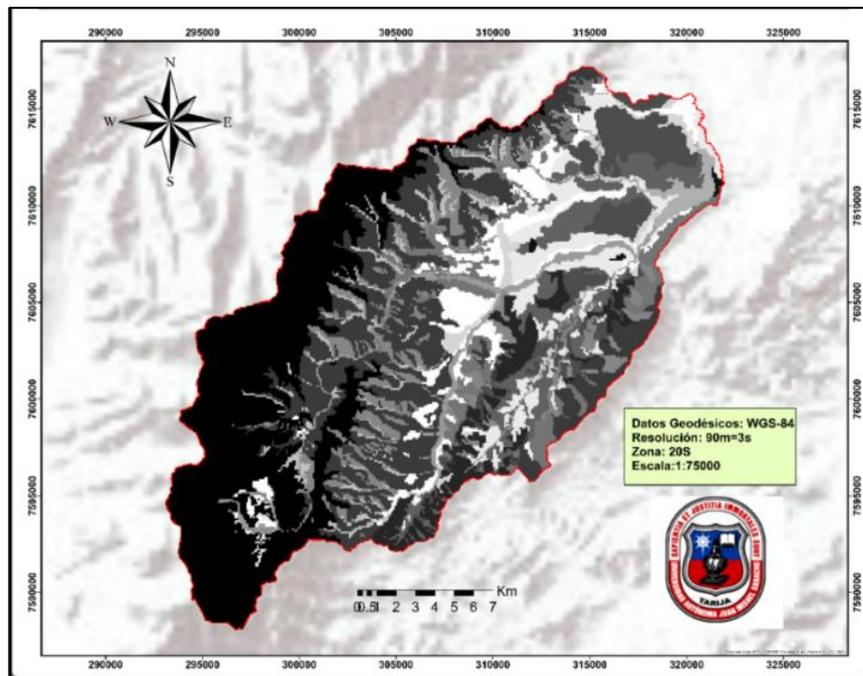


Figura N° 43: Rasterización de la combinación cobertura vegetal-textura.
Fuente: Elaboración propia

Finalmente se transformó de raster a un formato NetCDF, el cual contiene la información de la combinación de cobertura y textura.

3.5 ESQUEMATIZACIÓN E INCORPORACIÓN DE INFORMACIÓN AL MODELO

Hasta este punto toda la información necesaria para construir el modelo ha sido analizada y procesada de acuerdo a los formatos compatibles con el WEAP, el siguiente paso es la incorporar la información y esquematizar el modelo.

Es aquí donde radica la importancia de la información SIG para poder realizar la esquematización del modelo en la figura 44 se muestra el esquema que será representado en WEAP.

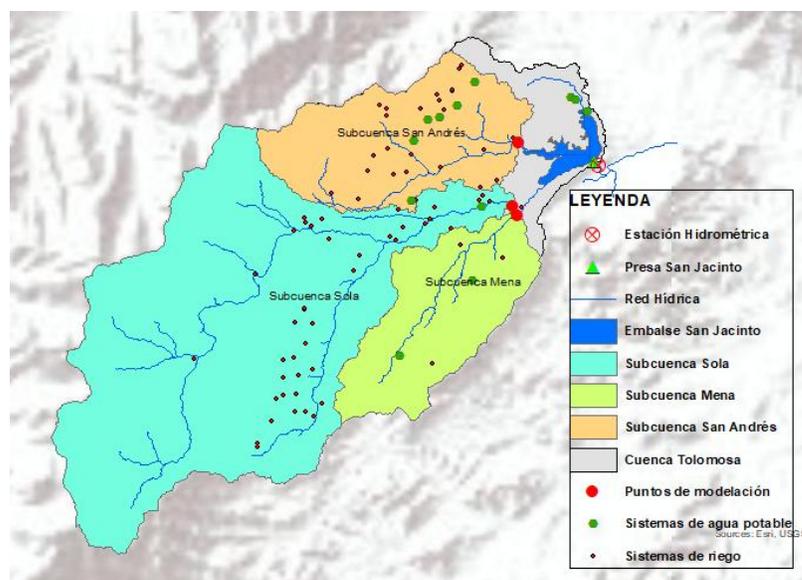


Figura N° 44: Esquema de la cuenca Tolomosa en base a capas SIG.

Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Delimitación de Catchments (subcuencas)

Estos catchments constituyen las unidades hidrológicas sobre los cuales WEAP aplica las rutinas para estimar evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas, y flujo base.

Los catchments además se pueden subdividir dependiendo de su cobertura vegetal para lograr una mejor representación de los procesos hidrológicos en diferentes tipos de cultivo y suelos. Una vez obtenidos los catchments, sus áreas y su distribución de cobertura vegetal, se puede generar el esquema base dentro de WEAP. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009)

Las cuencas y subcuencas (catchments) se deben delimitar en ciertos puntos de interés hidrológico donde se desea conocer exactamente el valor del caudal en un momento determinado durante el uso del modelo, ya sea para la calibración o la simulación de escenarios futuros. Estos puntos pueden ser:

- Confluencia de ríos
- Puntos de aforo de caudales
- Reservorios existentes (y proyectados)
- Puntos de inicio y de terminación de canales de derivación de agua

Para el estudio se definieron cuatro puntos de modelación, tres puntos corresponden a partir del cual se delimitaron las Subcuencas Sola, San Andrés y Mena (puntos rojos de la

figura 44) y otro punto fue el lugar de emplazamiento de la presa San Jacinto a partir del cual se delimito la cuenta Tolomosa

Existen dos maneras de crear un modelo hidrológico en WEAP, una forma es hacerlo de forma manual, en base a las capas SIG, se hace la representación de la cuenca en estudio donde los elementos y características de los catchments (unidades hidrológicas) como ser el área de las combinaciones cobertura-textura y variables climáticas se las introduce de forma manual. El año 2018 en la nueva versión del software aparece la opción de Delimitación Automática de Catchments (DAC), en donde los datos se introducen de forma automática, con un tratamiento previo de los mismo, el cual se lo realizo anteriormente. Para presente trabajo se empleó la opción Delimitación Automática de Catchments, el proceso de delimitación de la cuenca Tolomosa en el WEAP se detalla en el anexo VII. Previa a la delimitación de la cuenca se debe fijar el periodo de modelación en WEAP. En la figura 45 de muestra la fijación de periodo de modelación de la cuenca Tolomosa para un paso de tiempo mensual, cabe mencionar que se definió un periodo histórico (1980-2016) y un periodo de simulación (2020-2050).

#	Titulo	Abreviar	Longitud	Inicio	Final
1	Enero	Ene	31	1 Ene	31 Ene
2	Febrero	Feb	29	1 Feb	29 Feb
3	Marzo	Mar	31	1 Mar	31 Mar
4	Abril	Abr	30	1 Abr	30 Abr
5	May	May	31	1 May	31 May
6	Junio	Jun	30	1 Jun	30 Jun
7	Julio	Jul	31	1 Jul	31 Jul
8	Agosto	Ago	31	1 Ago	31 Ago
9	Septiembre	Set	30	1 Set	30 Set

Figura N° 45: Fijación del periodo de modelación.

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Incorporación de información al modelo

Con los catchments (subcuenecacas) delimitados en el modelo, se procedió a incorporar la información climatología, cobertura vegetal y demanda de agua de la cueca.

3.5.2.1 Incorporación de información climática

Los datos grillados de precipitación y temperatura los cuales se encuentran en un formato netCDF (formato de datos comunes en red), fueron incorporados al modelo por la opción Delimitación Automática de Catchments, las demás variables de humedad relativa, velocidad de viento y nubosidad se incorporaron mediante planillas Excel (formato texto delimitado por comas - CSV).

3.5.2.2 Incorporación de información de cobertura vegetal

La combinación de cobertura vegetal y textura para la cuenca Tolomosa al igual que la precipitación y temperatura se encuentra en un archivo netCDF, la información fue incorporada por la opción de Delimitación Automática de Catchments.

3.5.2.3 Incorporación de información de demanda de agua.

Para complementar el balance hidrológico realizado por el modelo en sus componentes naturales e intervenidos es importante realizar un análisis de la demanda de agua. La demanda de riego y de agua potable fueron representado mediante elementos específico del modelo (sitios de demanda).

En el caso de la demanda de riego WEAP la calcula mediante el “Método de Escurrimiento de lluvia”.

3.5.2.4 Generación de esquema base en WEAP

De manera general los pasos para crear un esquema base en WEAP incluyen:

1. Crear un área nueva
2. Incorporación de shapefiles (coberturas SIG).
3. Delimitación de catchments en base a las coberturas o capas SIG (Modo delimitación automática de catchments).
4. Incorporación de datos climatológicos e hidrométricos.
5. Incorporación de datos de cobertura vegetal.
6. Incorporación de datos de demanda de agua.

En la figura 46 se muestra el esquema de la cuenca en el modelo WEAP con los datos ya incorporados. En el anexo VII se detalla todo el proceso de cargado y esquematización del modelo en base a los pasos mencionados.

En el caso de la demanda de agua para el periodo histórico 1980-2016 solo se conceptualiza la demanda de riego y no así la demanda de agua potable.

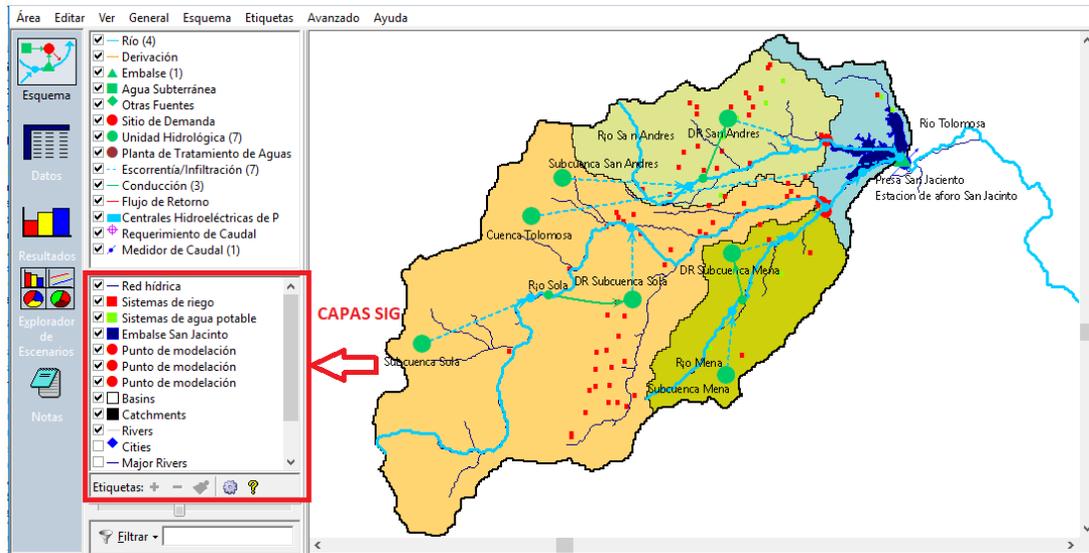


Figura N° 46: Esquemización de la cuenca Tolomosa en el modelo WEAP.

Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Estructura de datos en el interior de los catchments

Una vez creado el esquema base en WEAP se procedió a crear la estructura de datos dentro de la vista de datos (Data view). Esto se refiere a la vinculación de los parámetros del modelo hidrológico con las características fisiográficas de la cuenca (cobertura vegetal-textura), este proceso se denomina parametrización del modelo, dentro de WEAP se lo realiza mediante la opción de supuestos claves.

3.5.3.1 Supuestos claves

Los supuestos claves constituyen una de las herramientas básicas en WEAP. Estas pueden ser usadas con diferentes propósitos dentro de la construcción del modelo. Por ejemplo, en los supuestos claves se pueden incorporar los parámetros de uso de suelo usados en la calibración del modelo. Los supuestos claves también pueden ser usadas para la creación de funciones para obtener series de tiempo de precipitación y temperatura en todos los catchments del modelo a partir de las estaciones base. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009)

Al pegar la estructura de datos queda dentro del nuevo catchment (subcuenca). Este procedimiento se realiza sucesivamente en todos los catchments

Parámetros del modelo hidrológico de uso de suelo en supuestos claves

- Kc: coeficiente de cultivo
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, Sw

- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, Dw
- Factor de resistencia a la escorrentía, RRF
- Conductividad de zona de raíces, Ks
- Conductividad de zona profunda, Kd
- Dirección preferencial de flujo, f
- Nivel de humedad en la zona de raíces (Z1) inicial
- Nivel de humedad en la zona profunda (Z2) inicial

Todos estos factores se incluyeron dentro de los supuestos claves y luego se vincularon con su respectivo parámetro de uso de suelo. Estos sets de parámetros permiten realizar la calibración del modelo y fueron vinculados a cada subcuenca. En figura 47 se muestran los parámetros del modelo que fueron creados en supuestos claves y a su vez asociados a cada combinación de cobertura y textura, es en esta opción donde se asigna los valores a cada parámetro. Finalmente, los parámetros creados en supuestos fueron vinculados a cada subcuenca. En la figura 48 se muestra un ejemplo de la vinculación del parámetro Kc (coeficiente de cobertura) para cada combinación de cobertura y textura de la subcuenca San Andrés, se debe vincular cada parámetro con cada combinación y para cada subcuenca a modelar.

The screenshot shows the WEAP software interface. On the left, a tree view under 'Supuestos Clave' lists various parameters such as 'Kc_Coeficiente de cobertura', 'RRF_Factor de resistencia a la escorrentia', and 'Ks_Conductividad zona de raices', each with sub-items for different land cover types (Bosque, Pastizales, etc.). On the right, a data entry table is displayed for 'Cuentas Corrientes (1980)'. The table has columns for 'Sitios de demanda y Cuenca', '1980', 'Escala', and 'Unidad'. An arrow labeled 'PARAMETROS DEL MODELO' points to the table.

Sitios de demanda y Cuenca	1980	Escala	Unidad
Subcuenca Mena			N/D
Pastizales_B	1052		ha
Pastizales_D	1245		ha
Matorral semidenso_B	582		ha
Matorral xeromórfico_B	578		ha
Matorral xeromórfico_C	1028		ha
Matorral xeromórfico_D	785		ha
Agricultura_B	110		ha
Agricultura_C	800		ha
Agricultura_D	122		ha
Población_D	5		ha
Lecho del río_LR	124		ha

Figura N° 47: Parámetros del modelo en supuestos claves.

Fuente: Elaboración propia

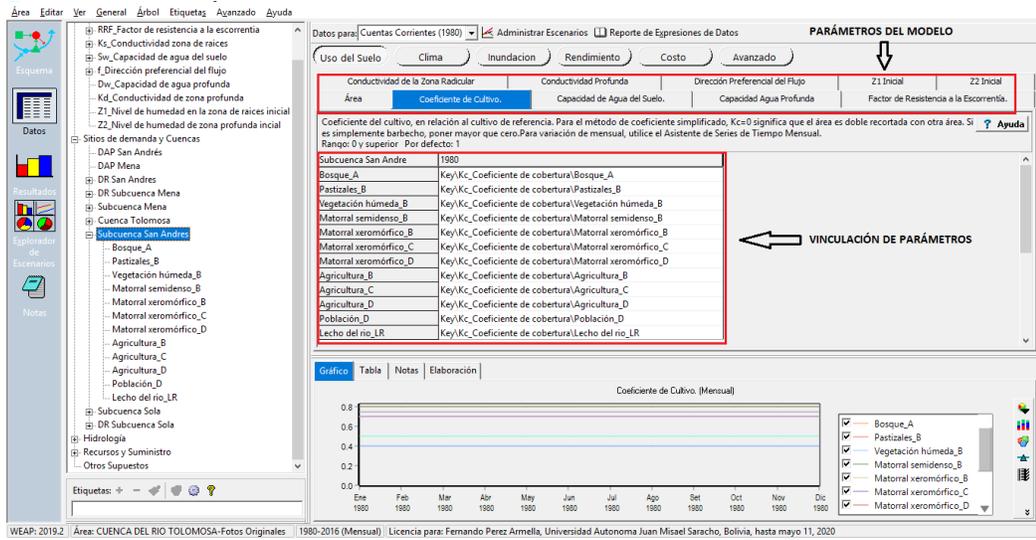


Figura N° 48: Vinculación de parámetros a cada catchments.

Fuente: Elaboración propia

Hasta este punto el modelo se encuentra listo para pasar a la etapa de calibración.

4. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

4.1 Criterios de calibración.

- Generalmente se busca ajustar caudales pico y caudales base. Por ejemplo, si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escurriencia superficial la cual es directamente afectada por el RRF y K_s , los cuales afectan la reactividad de los catchments.
- Si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar f y K_d . Por ejemplo, otro factor de calibración como la conductividad hidráulica de la zona profunda, K_d , puede ser incrementado, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, y el consecuente aumento en los caudales base.
- Si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior, Sw , se logra un mayor flujo sub-superficial, y por tanto un aumento de los caudales máximos. Finalmente, para el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo (Dw), regula la transmisión de los flujos a los caudales base.
- Los parámetros del segundo balde se deben ajustar en el proceso de calibración, es recomendable que se realice de manera manual para comprender el comportamiento hídrico de la cuenca, se considera elementos como pendiente y comportamiento del flujo base para la parametrización, y el almacenamiento relativo en el tanque inferior Z2.
- Cada modelo hidrológico que se crea en WEAP requiere de una estructura específica que depende de la caracterización cobertura de la tierra y textura del suelo que se haya seleccionado o decidido utilizar. De acuerdo al método de Escurrimiento de lluvia (Método de humedad del suelo) son nueve los parámetros del modelo, seis de ellos tienen influencia tanto en las primeras capas del suelo como en la cobertura de la tierra (tanque 1) y tres tienen influencia en las capas profundas (tanque 2).

En WEAP los parámetros del tanque 1 deben asignarse a cada combinación de suelo y cobertura de la tierra mientras que los parámetros del tanque 2 se asignan un único valor para cada catchment o cuenca.

En la tabla 62 se muestra la estructura de los parámetros para la calibración del modelo en la cuenca Tolomosa.

Tabla 62: Estructura de parámetros para la calibración del modelo

Tanque 1	Kc	Coefficiente de cobertura.	En WEAP se debe asignar un parametro a cada combinación Cobertura de la Tierra - Textura	Kc	Clasificación de cobertura de la tierra
	RRF	Factor de Resistencia a la Escorrentía.		RRF	Combinación de Cobertura de la Tierra - Textura
	Sw	Capacidad de Agua del Suelo.		Sw	Combinación de Cobertura de la Tierra - Textura
	Z1	Z1 Inicial		Z1	Combinación de Cobertura de la Tierra - Textura
	F	Dirección Preferencial del Flujo		F	Clasificación de textura
	Ks	Conductividad de la Zona Radicular		Ks	Clasificación de textura
Tanque 2	Z2	Z2 Inicial	En WEAP se asiga un unico parametro por catchment o cuenca	Z2	Global en el modelo
	Kd	Conductividad Profunda		Kd	Global por Zona-clasificación de textura
	Dw	Capacidad Agua Profunda		Dw	Global por Zona-clasificación de textura

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla 63 de detalla la incidencia de cada parámetro sobre los componentes del balance hídrico que realiza el modelo.

Tabla N° 63: Descripción de parámetros del modelo SMM

Parámetro	Incidencia con el flujo superficial
Kc: Coeficiente de cobertura [-]	El kc afecta a la evapotranspiración potencial se elige un coeficiente que represente a la unidad hidrográfica, cuando se eleva el kc el caudal simulado se reduce.
f: Dirección preferente del flujo.	El f incide en el interflujo o flujo subsuperficial en la zona de raíces, al aumentar el valor de f existe un incremento en el escurrimiento superficial. f indica la cantidad de agua que ingresa al contenedor inferior por medio de la percolación, cuando este valor es 0 indica que el flujo es vertical, cuando el valor es 1 señala que el flujo es horizontal y que no existe aporte al contenedor inferior.
Sw: Capacidad de almacenamiento de agua en zona de raíces [mm]	Sw es un parámetro que depende de la textura, la profundidad de la zona de raíces que se relaciona con el tipo de cobertura vegetal presente, para este valor se ajusta por medio de un factor regional.
Ks: Conductividad de la zona de raíces [mm/mes].	Ks incide en el interflujo al elevar dicho valor se reduce es escurrimiento superficial. El parámetro influye en la percolación al aumentar el ingreso de agua en el balde inferior.
RRF: Factor de resistencia a la escorrentía [-]	El RRF afecta el escurrimiento superficial y el interflujo del modelo al elevar dicho valor se incrementa el caudal en el punto de aforo, este parámetro mantiene según las tablas y valores recomendados en las bibliografía.
Z1: Nivel de humedad en la zona de raíces [%].	Z1 , la fracción inicial de almacenamiento en la zona de raíces, se obtiene mediante un proceso iterativo de ensayo y error. Una vez que ajustado Kc, f, Sw, Ks, RRF , se dirige a resultados humedad relativa del suelo (1%), y se obtiene el valor promedio de Z1 para todas las combinaciones cobertura textura, como valor representativo se obtiene el promedio del mes inicial.
Kd: Conductividad profunda [mm/mes].	Kd se obtiene en el proceso de calibración, este parámetro incide en el flujo base, e interflujo al disminuir el valor reduce el escurrimiento en época de estiaje, es importante el valor para ajustar el modelo.
Dw: Capacidad agua profunda [mm].	Dw , es un parámetro que se debe calibrar y se encuentra en la parte inferior del balde.
Z2: Nivel de humedad en la zona profunda [%].	Al igual que el parámetro Z1 se obtiene el porcentaje de Z2 mediante un proceso iterativo. Este es un aspecto interesante su comportamiento debe ser cíclico aumentar en época de lluvia y disminuir en época de estiaje, sin seguir tendencia alguna, se obtiene al promediar los diversos valores obtenidos del mes inicial Z2 .

Fuente: (MMAyA, BHSB, 2016)

4.2 Calibración.

En esta etapa de calibración del modelo se busca lograr un set de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una representación de caudales de manera que se asemeje los datos históricos medidos de la forma más cercana posible. Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca observadas versus simuladas. Con base en estas comparaciones se realizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas.

La calibración y validación del modelo fue desarrollada utilizando los caudales aforados en el punto de aforo San Jacinto. Para la calibración se tomó en cuenta los caudales observados en los años 1980-1981.

En las tablas 64 y 65 se muestran los valores de los parámetros que se asumieron en Balance Hídrico Superficial de Bolivia y el Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir, estos fueron tomados como referencia durante la calibración.

Tabla N° 64: Parámetros calibrados para cuenca Guadalquivir

Cobertura Suelo	kc (adm)	Sw (mm)	RRF	ks (mm/mes)	Dw (mm)	f (adm)	Z1 (%)	Kd (mm/mes)	Z2 (%)
Bosque denso nublado	0,8	200	5	207,36	500	0,55	80	200	15
Bosque ralo suculentas	0,8	200	5	207,36	500	0,55	80	200	15
Bosque ralo esclerofilo	0,8	190	2	207,36	500	0,55	80	200	15
Ciudades	0,5	180	6	207,36	500	0,9	80	200	15
Cuerpos de agua	0,4	180	4,8	207,36	500	0,5	80	200	15
Cultivos plurianuales	0,8	210	4,8	207,36	500	0,65	80	200	15
Cultivos en rotacion extensiva	0,7	210	4,8	207,36	500	0,65	80	200	15
Cultivos en rotacion intensiva	0,85	210	4,5	764,928	500	0,65	80	200	15
Arbustos dispersos	0,75	150	4,5	764,928	500	0,65	80	200	15
Superficie descubierta carcavas	0,6	150	3	764,928	500	0,65	80	200	15
Superficie descubierta arena	0,6	170	3	764,928	500	0,85	80	200	15
Herbacea graminoide	0,75	170	5	764,928	500	0,85	80	200	15

Fuente: MMAyA, Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir, 2016

En la mayoría de los estudios hidrológico para poder sacar conclusiones con relación a una temática en particular se trabajan con modelos, estos nos permiten simular el comportamiento de un sistema real (prototipo) y obtener mediante la operación del mismo, las respuestas o salidas a un determinado impulso o entradas al sistema. Un ejemplo clásico es la construcción de un modelo del ciclo hidrológico de una cuenca, es aquí en donde radica la importancia de la calibración de un modelo, mientras sean construidos de la manera más aproximada a la realidad, se podrá sacar conclusiones importantes.

Tabla N° 65: Parámetros calibrados del BHSB (cuena de la Plata)

Parámetro	Balance hídrico nacional (cuena de la plata)	Valor adoptado
Kc: Coeficiente de cultivo (adm)	1,2	1,2
f: Dirección preferente del flujo (adm)	F_Pendiente	0,2
	F_NoPend	0,75
	F_medio	0,45
	F_Bermejo	0,9
Sw: Capacidad de almacenamiento de agua en zona de raíces [mm]	Sandy Clay Loam_Agriculture	154
	Sandy Clay Loam_Forest	231
	Sandy Clay Loam_Grassland	115,5
	Sandy Clay Loam_Other/Bare	115,5
	Sandy Clay Loam_Settlement	15,4
	Sandy Clay Loam_Shrubland	115,5
Ks: Conductividad de la zona de raíces [mm/mes]	NoSoil (sin suelo)	35
	Sandy Clay Loam (franco arcillo arenoso)	259
	Sandy Loam (Franco arenoso)	956
	Loam (Limo)	282
	Clay Loam (Limo arcilloso)	86
	Clay (Arcilla)	58
	Sandy (Arena)	2909
	Sandy Clay (Franco arcilloso)	121
RRF: Factor de resistencia a la escorrentía (adm)	Agricultura (Agriculture)	4,8
	Bosque (Forest)	6,4
	Herbácea (Grassland)	4,8
	Bosque con inundación (Wetland)	6,4
	Centros poblados y urbanos (Settlement)	0,5
	Matorrales (Shrubland)	4,8
	Vegetación dispersa o aislada de arbustos y gramíneas (Other/Bare)	4
	Water	1
Ice_Snow	1	
Z1: Nivel de humedad en la zona de raíces (%)	Z1 valor se obtiene en el proceso de calibración	30%
Kd: Conductividad profunda (mm/mes)	Kd valor se obtiene en el proceso de calibración	20
Dw: Capacidad agua profunda (mm)	1200	1200
Z2: Nivel de humedad en la zona profunda (%)	Z2 valor se obtiene en el proceso de calibración	44,30%

Fuente: MMAyA, BHSB, 2016

4.2.1 Análisis de parámetros asumidos

Combinación bosque_A: Se trata de bosques densos, semidensos a ralos mayormente siempre verde, los suelos presentan una buena velocidad de infiltración debido a que son moderadamente profundos con buena cobertura vegetal lo que sugiere un importante contenido de materia orgánica, la cual favorece la porosidad de los suelos, aspectos que condicionan una buena infiltración, consiguientemente un bajo potencial de escurrimiento. Según las características de cobertura el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) debe ser bajo. En consecuencia, de la buena condición de infiltración que tiene el suelo el parámetro factor de dirección de flujo (f) debe ser bajo aludiendo que el flujo se mueve verticalmente en favor a la infiltración.



Figura N° 49: Combinación bosque_A

Fuente: Elaboración propia

Combinación vegetación húmeda_B: Se extiende por laderas altas y cimas de los cerros con pendientes fuertes mayores al 60% (muy escapado), los suelos se caracterizan por presentar texturas medias, con un drenaje interno moderadamente rápido a moderadamente lento, con una cobertura vegetal herbácea-graminoide-subalpina (pastizales y pajonales). Estas características favorecen a condiciones moderadas de infiltración y a un moderado potencial de escurrimiento. Las características de cobertura y pendiente favorecen al escurrimiento superficial por lo que el valor de RRF debe ser bajo. La textura y la fuerte pendiente del terreno hacen que la infiltración del agua hacia las capas inferiores se baja de manera que los valores f deben ser altos favoreciendo al escurrimiento superficial. Los valores de K_s y S_w son definidos según la textura de suelo (franco arenoso). Los valores de K_c y RRF, f , K_s y S_w fueron asumidos según a los valores mostrados por bibliografía tomando como referencia una cobertura herbácea graminoide



Figura N° 50: Combinación vegetación húmeda_B

Fuente: Elaboración propia

Combinación Pastizales_B: Se extiende por laderas y pie de montes con pendientes de 30-60%, el clima es frío semihúmedo a templado semiárido, con una vegetación herbácea, especies arbustivas raras, pajas, pastizales bajos, praderas gramíneas densas. Las características de textura son iguales las de la combinación vegetación húmeda_B, suelos con moderado potencial de escurrimiento y moderadas condiciones de infiltración. Los parámetros se asumieron bajo criterios de la anterior combinación tomando en cuenta la variación de la pendiente la cobertura de referencia es herbácea graminoide.



Figura N° 51: Combinación Pastizales_B

Fuente: Elaboración propia

Combinación Pastizales_D: Presenta las mismas características de cobertura que la combinación pastizales _B, de manera que los parámetros relacionados a la cobertura (K_s , S_w y RRF) tienen el mismo valor.

La pendiente del terreno es moderadamente escarpada (15-30%). Las características de textura del suelo varía respecto a la anterior combinación, este grupo se presenta texturas finas, muy poca o ninguna materia orgánica, lo cual determina una muy baja infiltración y transmisión del agua, consiguientemente un alto potencial de escurrimiento.

Esto influye en los parámetros relacionados con la textura (K_s y f), por ejemplo, el parámetro de dirección de flujo (f) del ser cercano a 1 por la muy baja infiltración que tiene el terreno.

Combinación matorral semidensa_B: Se ubican en sitios de ladera con características de exposición y altitud similares a los sitios donde se ubican los bosques de pino de cerro puesto que son continuación de estos (combinación bosque_A). Presenta matorrales de cobertura semidensa a densa, árboles emergentes aislados de aliso, espinillo y thola. Presenta una pendiente muy escarpada (mayor >60%). Los suelos se caracterizan por

presentar texturas medias (franco arenosas), con moderado potencial de escurrimiento y condiciones moderadas de infiltración. De acuerdo a las características de cobertura, pendiente y textura y según la bibliografía se asumen los valores de los parámetros (K_c , RRF, Sw , K_s y f) tomando como referencia una cobertura “Arbustos dispersos”.



Figura N° 52: Combinación Pastizales_D

Fuente: Elaboración propia



Figura N° 53: Combinación matorral semidenso_B

Fuente: Elaboración propia

Combinación matorral xeromórfico_B: Matorrales xeromórficos ralos, denso a semidenso especies como arbustos de taquillos con espinosas, tipa, molle algarrobos, churqui negro. La pendiente varia de fuertemente inclinadas a moderadamente escarpado (10-30%), clima templado semiárido. Suelos se caracterizan por texturas medias con moderado potencial de escurrimiento y condiciones moderadas de infiltración. Bajo estas condiciones de cobertura los valores de RRF son bajos, los valores de f cercanos a 1. Los demás parámetros se asumen de acuerdo a las características de textura y cobertura.

Combinación matorral xeromórfico_C: Mismas características de cobertura que la anterior combinación, con pendientes ligeramente inclinadas de 2-10%, los suelos

presentan texturas generalmente finas, la cual determina un drenaje lento (moderadamente alto potencial escurrimiento). Según las características de textura y cobertura existe baja resistencia a la esorrentía (RRF).

La infiltración es lenta por lo que la dirección del flujo (f) debe tener valores cercanos a uno aludiendo un flujo horizontal. La conductividad e zona de raíces (Ks) es baja, sus valores se fijan según su textura y de acuerdo a las recomendaciones de la bibliografía.



Figura N° 54: Combinación matorral xeromórfico_B

Fuente: Elaboración propia



Figura N° 55: Combinación matorral xeromórfico_C

Fuente: Elaboración propia

Combinación matorral xeromórfico_D: Pendientes de 2-10%, suelos con textura fina, muy poca o ninguna materia orgánica, lo cual determina una muy baja infiltración y transmisión del agua, consiguientemente un alto potencial de escurrimiento. Los valores de RRF son bajos la cobertura y textura no ofrecen resistencia a la esorrentía, la dirección del flujo (f) cercana a 1 tomando en cuenta que la pendiente es ligeramente baja, la conductividad en zonas de raíces (Ks) es baja por la textura del suelo. Los valores de los demás parámetros (Sw y Kc) son asumidos de acuerdo a las recomendaciones de la

bibliografía, la cobertura de referencia para los matorrales xeromórfico es “Arbustos dispersos”.



Figura N° 56: matorral xeromórfico_D

Fuente: Elaboración propia

Combinación agricultura_B_C_D: Se localizan en el piedemonte y terrazas aluviales ligeramente inclinadas a onduladas con pendientes de 2-5% y en algunos lugares menores al 2%. Se practica también agricultura a riego y secado con cultivos de maíz, papa, arveja, haba, avena, hortalizas y algunos frutales.

Las actividades agrícolas diarias favorecen a la compactación de la tierra, de manera que no existe una resistencia considerable a la escorrentía, además de acuerdo a las condiciones de pendiente la infiltración es moderada.

Tomando en cuenta estas características los valores de los parámetros fueron asumidos de las tablas de la bibliografía tomando como referencia una cobertura “cultivos”.



Figura N° 57: Agricultura_B

Fuente: Elaboración propia

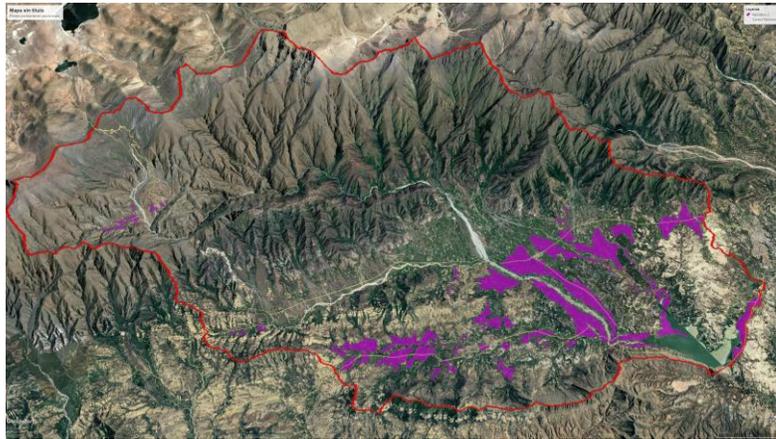


Figura N° 58: Agricultura_C

Fuente: Elaboración propia



Figura N° 59: Agricultura_D

Fuente: Elaboración propia

Combinación población_D: Dentro de la cuenca no existen áreas urbanas consolidadas, sin embargo, hay algunas comunidades como San Andrés, Guerra Huayco, Turumayo, San Jacinto y Tolomosa Grande que presentan características urbanas. En estos lugares las condiciones de cobertura favorecen el escurrimiento superficial lo cual determina una muy baja infiltración y transmisión del agua.

Los valores de los parámetros para esta combinación se asumieron de acuerdo la bibliografía tomando como referencia una cobertura “Estructura urbana y rural, ciudades y pueblo”.

Combinación lecho del río_LR: Corresponde el lecho de los ríos principales de la cuenca, los valores asumidos para este tipo de cobertura se asumieron de acuerdo a las

recomendaciones de la bibliografía, la cobertura de referencia para asumir los valores de las tablas es de “cuerpos y cursos de agua”.



Figura N° 60: Combinación Población_D

Fuente: Elaboración propia



Figura N° 61: Combinación lecho del río_LR

Fuente: Elaboración propia

Los valores de los parámetros para la cuenca Tolomosa fueron asumidos de acuerdo a las tablas de la Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales y tomando como referencia los valores del Balance Hídrico Superficial de Bolivia y el Balance Hídrico de la Cuenca Guadalquivir. En el caso de los parámetros nivel de humedad en la zona de raíces (Z1), nivel de humedad en la zona profunda (Z2) y la conductividad en la zona profunda (Kd) se optaron del Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir. El proceso de calibración se logró obtener los valores de los parámetros que más se ajustan al comportamiento hidrológico de la cuenca Tolomosa (ver tabla 66) Estos parámetros fueron vinculados a cada combinación de cobertura y textura.

Tabla N°66: Parámetros calibrados para la cuenca Tolomosa

Cobertura-Textura	kc (adm)	Sw (mm)	RRF (adm)	ks (mm/mes)	f (adm)	Dw (mm)	Z1 (%)	Kd (mm/mes)	Z2 (%)
Bosque_A	0,8	200	5	180	0,55	300	83,5	200	15
Pastizales_B	0,75	155	3,5	180	0,65	300	83,5	200	15
Pastizales_D	0,75	155	3,5	100	0,9	300	83,5	200	15
Vegetación húmeda_B	0,75	350	3,5	180	0,9	300	83,5	200	15
Matorral semidenso_B	0,8	150	4,5	150	0,9	300	83,5	200	15
Matorral xeromórfico_B	0,7	150	4,5	150	0,9	300	83,5	200	15
Matorral xeromórfico_C	0,7	150	2,5	150	0,9	300	83,5	200	15
Matorral xeromórfico_D	0,7	150	2	100	0,65	300	83,5	200	15
Agricultura_B	0,7	210	4	150	0,65	300	83,5	200	15
Agricultura_C	0,7	210	4	150	0,65	300	83,5	200	15
Agricultura_D	0,7	210	4	150	0,65	300	83,5	200	15
Población_D	0,5	10	2	100	0,9	300	83,5	200	15
Lecho del río_LR	0,4	10	1	150	0,9	300	83,5	200	15

Fuente: Elaboración propia

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados se procedió a estimar sus estadísticas para evaluar el desempeño del modelo. Se utilizó el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo. (ver tabla 67)

Tabla N° 67: Medidas de bondad de ajuste para el modelo calibrado.

Medidas de bondad de ajuste	Fórmulas	Valor obtenido	Descripción
Nash- Sutcliffe	$NC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$	0,89	Ajuste EXCELENTE
Bias	$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100$	17%	Sobre estimación

Fuente: Elaboración propia

Los caudales generados en WEAP se ajustan a los caudales observados a nivel mensual y anual (ver figuras 62 y 63).

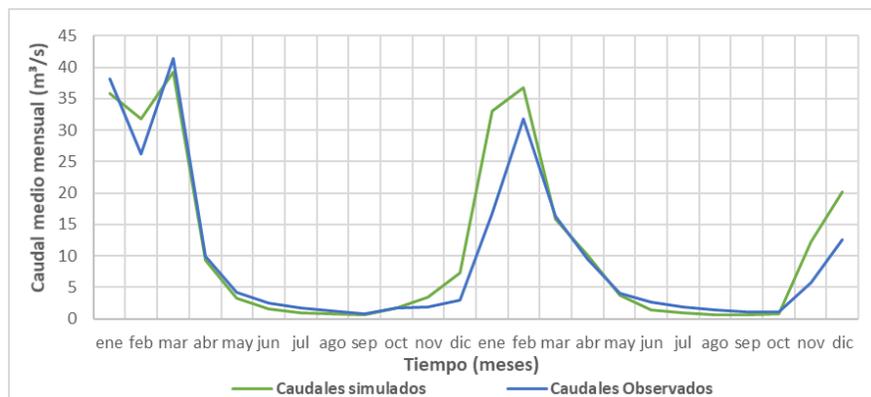


Figura N° 62: Caudales medios mensuales calibrados.

Fuente: Elaboración propia

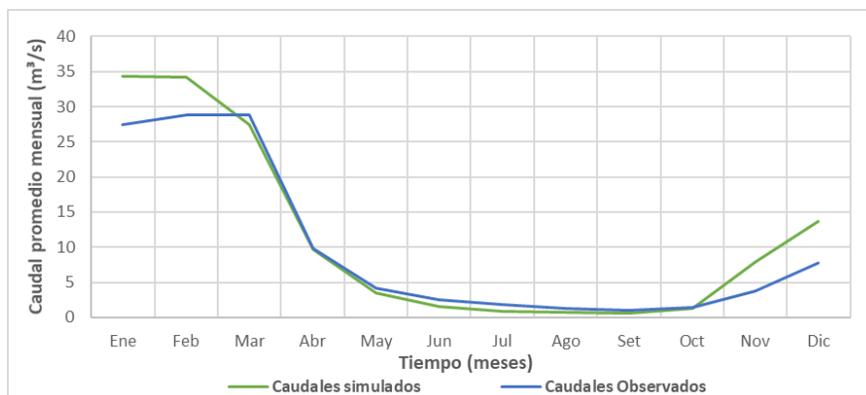


Figura N° 63: Caudales promedios mensuales calibrados.

Fuente: Elaboración propia

4.3 Validación

En la práctica la validación verifica si el modelo calibrado tiene un desempeño adecuado en referencia a la predicción de caudales. Se aplica considerando datos de un periodo distinto al utilizado durante la calibración.

Para el proceso de validación lo ideal es tener un registro lo suficientemente extenso, la estación hidrométrica de San Jacinto no cuenta con un amplio registro de caudales por lo que se tuvo que ajustar a la información disponible.

La validación del modelo efectuó con los años 1982-1983, con los parámetros adoptados en el proceso de calibración se realiza el proceso de validación del modelo.

Luego de obtener un ajuste visual de los caudales medios mensuales simulados y observadores durante el periodo de validación se calcularon sus estadísticas (ver tabla 68)

Tabla N° 68: Medidas de bondad de ajuste

Medidas de bondad de ajuste	Fórmulas	Valor obtenido	Descripción
Nash- Sutcliffe	$NC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$	0,65	Ajuste MUY BUENO
Bias	$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100$	16 %	Sobre estimación

Fuente: Elaboración propia

En la figura 64 se muestran los caudales medios mensuales simulados versus observados, estos presentan un ajuste aceptable que valida el modelo, en los caudales promedios mensuales el ajuste es muy bueno, solo en el mes de marzo se presenta una variación.

De los resultados obtenidos de la validación concluimos que el modelo construido es representativo de la cuenca.

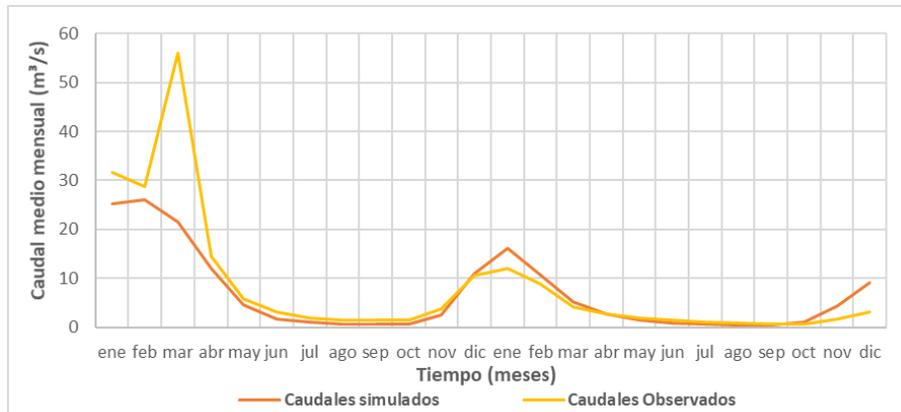


Figura N° 64: Caudal medio mensuales validados.

Fuente: Elaboración propia

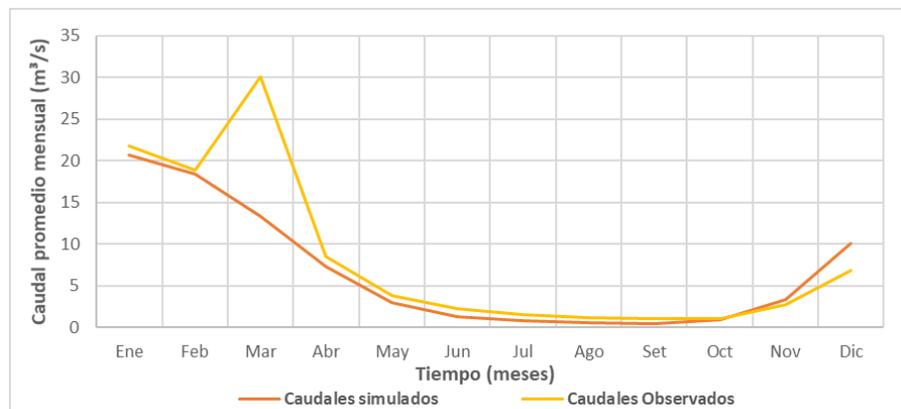


Figura N° 65: Caudal promedio mensual validado.

Fuente: Elaboración propia

Considerando toda la serie de caudales observados y simulados se visualiza una aceptable correlación con los caudales modelados, de acuerdo a los estadísticos calculados corresponde a un ajuste muy bueno con un índice de Nash-Sutcliffe de 0,72 y una subestimación de 5,28%. De acuerdo al índice de NC obtenido el ajuste corresponde a un desempeño catalogado como muy bueno, de esta manera se observa que el modelo es representativo de la cuenca.

Tabla N° 69: Medidas de bondad de ajuste

Medidas de bondad de ajuste	Fórmulas	Valor obtenido	Descripción
Nash- Sutcliffe	$NC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$	0,72	Ajuste MUY BUENO
Bias	$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100$	-5,28 %	subestimación

Fuente: Elaboración propia

En la figura 66 se muestra los caudales medios mensuales modelados versus los observados, de acuerdo a los valores asumidos para los parámetros, corresponde al mejor ajuste que se pudo obtener durante el periodo de calibración y validación (1980-1984). Los caudales del mes de febrero y marzo del 1984 no fueron considerados en la calibración y validación del modelo debido a que se desconfía de información en estos meses.

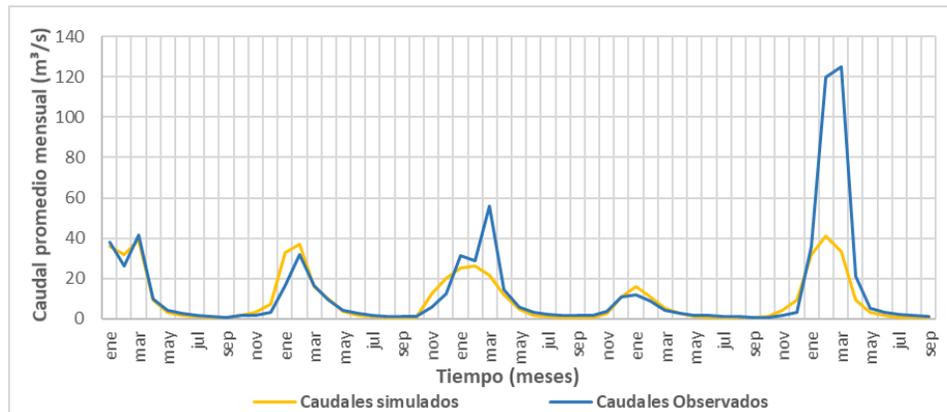


Figura N° 66: Caudales medios mensuales

Fuente: Elaboración propia

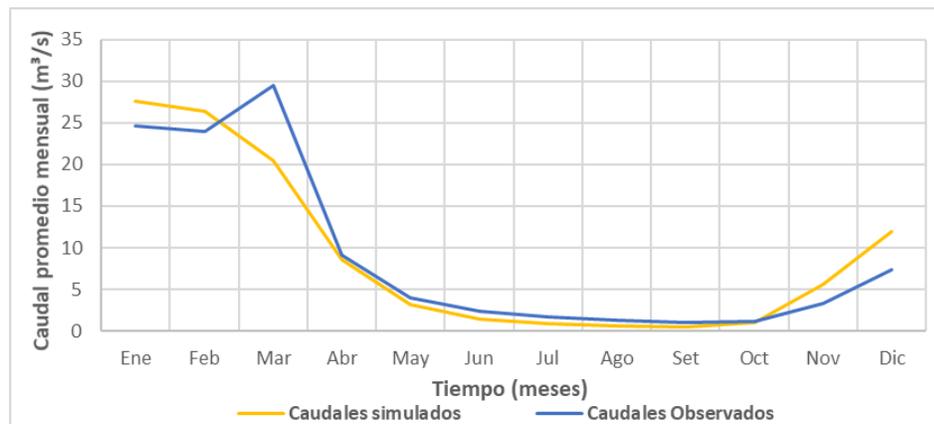


Figura N° 67: Caudal promedio mensual

Fuente: Elaboración propia

En la figura 69 se muestra el ajuste de la curva duración de caudales medios mensuales simulada por WEAP y la curva de duración de los caudales medios mensuales de la cuenca obtenida a partir de los datos observados del periodo 1980-1984, los resultados indican que el modelo representa correctamente las probabilidades de excedencia de la serie de caudales estudiada. A nivel anual se muestra un ajuste aceptable, se visualiza una mayor variación de los caudales en el año 1982 (ver figura 68).

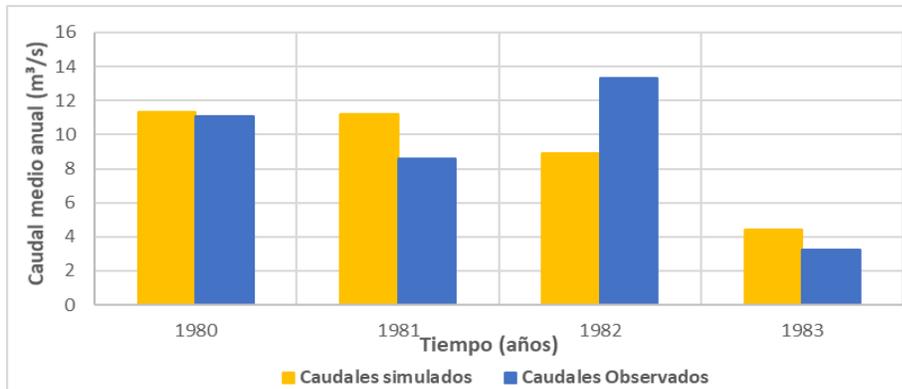


Figura N° 68: Caudales medios anuales calibrados
Fuente: Elaboración propia

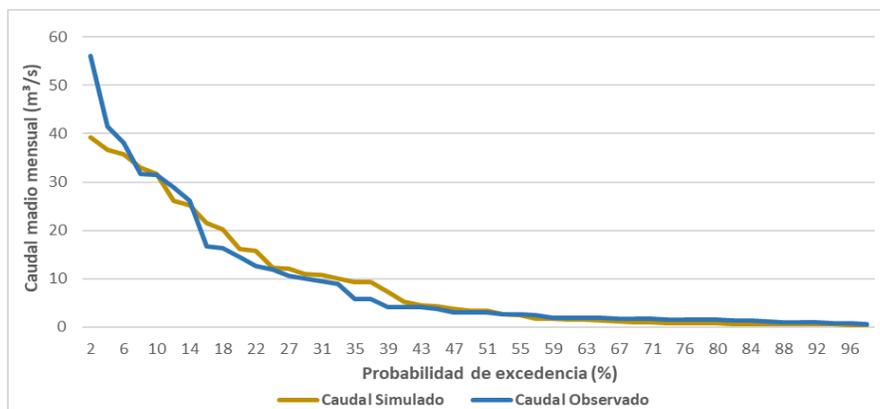


Figura N° 69: Curva de duración de caudales medios mensuales
Fuente: Elaboración propia

En el diagrama de dispersión de toda la serie (ver figura 70) de los caudales observados y simulados se visualiza una correlación de los datos, no se observa valores dispersos y el comportamiento es lineal, lo que nos indica que el ajuste es bueno.

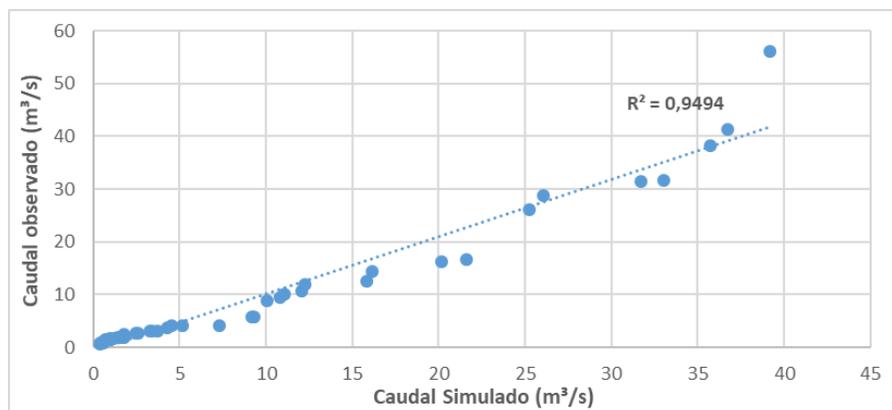


Figura N° 70: Correlación caudales medios mensuales observados y simulados
Fuente: Elaboración propia

4.4 Comparación con información de estudios anteriores

Con el objeto de poder comparar y validar los resultados obtenidos con el modelo WEAP, se identificaron otros estudios aplicados en la cuenca Tolomosa en donde se estimaron caudales mensuales, entre los más destacados tenemos (ver tabla 70):

- Calibración y aplicación del modelo Temes para la estimación de caudales medios mensuales en la cuenca del río Tolomosa
- Valoración hidrológica de cuenca de los ríos Tolomosa y la Vitoria
- Calibración del modelo hidrológico Thomas (abcd) para la estimación de caudales medios mensuales en la cuenca del río Tolomosa

Tabla N° 70: Caudales simulados en la cuenca Tolomosa (m³/s)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Q sim WEAP	23,2	27,4	20,8	7,81	2,95	1,37	0,84	0,63	0,58	1,47	5,63	14,6	107,2
Qsim Temez	33,9	33,3	37,7	15,99	7,74	3,66	1,73	0,82	0,39	0,54	4,6	19,2	159,5
Qsim CHAC	28,9	24,4	21,8	7,26	3,45	1,94	1,12	0,75	0,66	2,65	8,97	19,8	121,7
Qsim Thomas	25	31,8	33,3	11,65	4,5	2,7	1,93	1,5	1,14	1,36	3,28	10,6	128,8

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al hidrograma salida (ver figura 71) los caudales simulados con WEAP respecto a los demás modelos no presentan una variación en la distribución temporal de los mismos, esto es importante porque nos indica que los caudales obtenidos con el modelo WEAP son válidos para la cuenca Tolomosa.

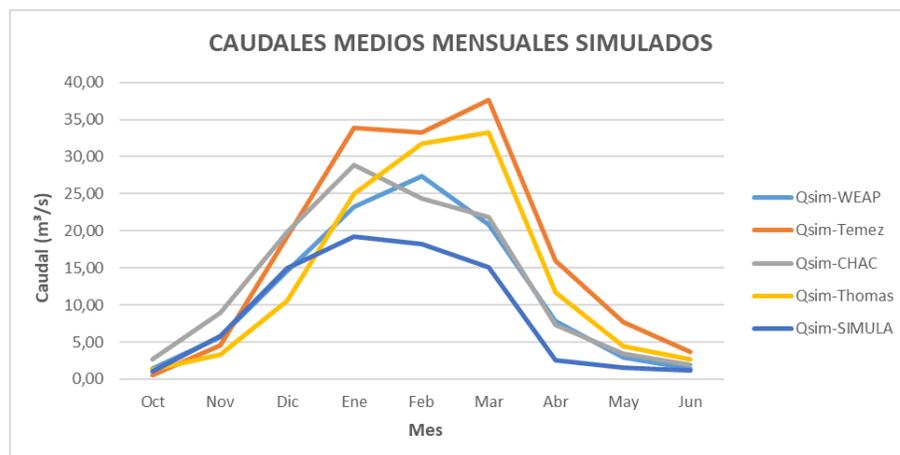


Figura N° 71: Comparación de modelos aplicados en la cuenca Tolomosa.

Fuentes: Elaboración propia

4.5 Patrones históricos de caudales simulados

Durante el periodo histórico 1980-2016 se observa cambios sobre la oferta hídrica, respecto a los caudales aforados (1980-1984). En una comparación de las curvas de duración de los caudales observados y los caudales simulados de los últimos cuatro años se visualiza una disminución en la oferta hídrica (ver figura 72), esto es un indicativo de efectivamente los caudales se está viendo afectados por los cambios climáticos. Los caudales modelados en WEAP para el periodo histórico (1980-2016) se detallan en el anexo VIII.

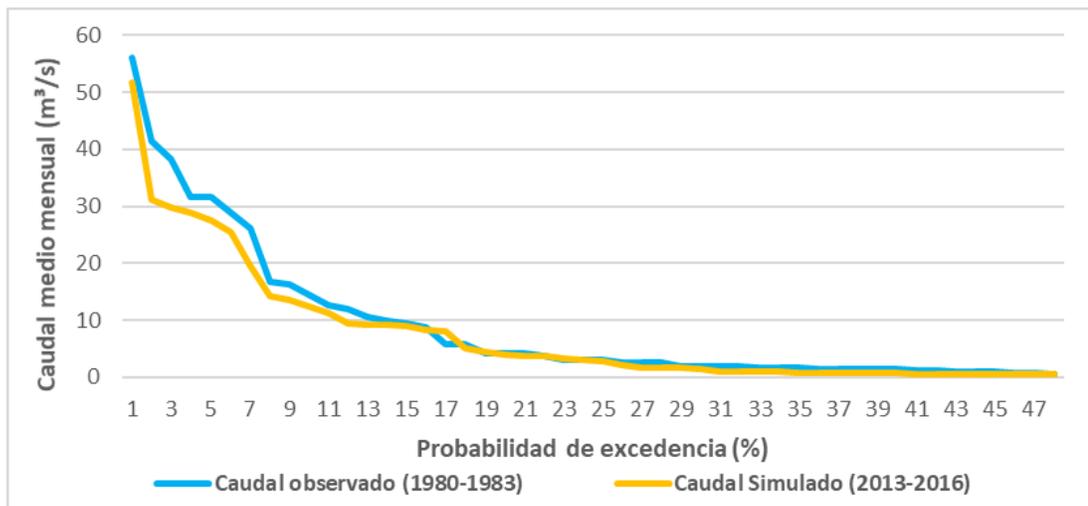


Figura N° 72: Variación de caudales medios mensuales

Fuentes: Elaboración propia

5. APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO

5.1 Contexto de los Modelo Climático Global

El análisis de escenarios de cambio climático en el balance hidrológico de una cuenca busca establecer como, a diferentes escalas espaciales y temporales, los cambios en los atributos del clima pueden modificar la oferta de agua. Se busca determinar cómo las magnitudes de cambio en precipitación, temperatura, etc., modificaran los procesos del ciclo hidrológico en el escurrimiento, evaporación, transpiración, y humedad del suelo. Pero más importante es conocer cuáles podrían ser las implicaciones de los cambios en el ciclo hidrológico en el suministro de agua a los usuarios que dependen de la cuenca. Realizar un estudio para conocer lo mencionado con anterioridad supone recopilar y estudiar los atributos del clima histórico, realizar el balance hídrico que incluya oferta y demanda de agua, y finalmente desarrollar escenarios climáticos a la escala de cuenca.

Desde la década de los 1960 varias instituciones de investigación científicas en el mundo han desarrollado modelos para simular el sistema climático terrestre y predecir los cambios esperados en el futuro debido a los cambios naturales y antrópicas.

Dichos esfuerzos han sido coordinados desde la década 90s por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas de las Naciones Unidas (WCRP, World Climate Research Programme), que desarrolla cada 5 a 7 años las proyecciones climáticas globales a través de su Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP, Coupled Modeling InterComparison Project).

5.1.1 El Proyecto CMIP 5 y Downscaling

El proyecto CMIP5 pretende proveer una herramienta basada en múltiples modelos y escenarios. Los modelos del CMIP5 son la fuente principal de información disponible actualmente para proyectar el clima en horizontes de largo plazo, y pueden informar sobre posibles cambios del clima terrestre frente a diferentes cambios naturales o antrópicos. Además, puede informar los modelos hidrológicos utilizados para representar las condiciones locales en las cuencas y los efectos esperados por los cambios en el clima. Sin embargo, la aplicación de los resultados del CMIP5 en la estimación del efecto del cambio climático global sobre los sistemas hidrológicos, presenta varias limitaciones específicamente por el nivel de detalle espacial alcanzado por los modelos globales no es

suficiente para representar los atributos del clima local. Esto significa que los modelos solamente proporcionan información “promedio” del clima de la atmósfera libre en grandes áreas de la superficie, y no alcanzan a representar atributos locales que dependen de las condiciones físicas o bióticas, por ejemplo, por características orográficas, patrones de circulación local asociados a la precipitación convectiva. Por esta razón, para apoyar la evaluación de los impactos locales en los recursos hídricos existe la necesidad de desarrollar proyecciones climáticas a escala reducida. Las técnicas de Reducción de escala – ó Downscaling – consisten en asociar las propiedades de la atmósfera libre obtenidas a partir de las salidas de los GCM, a las condiciones meteorológicas locales, ya sea mediante modelos matemáticos de base física (downscaling dinámico) o modelos estadísticos (downscaling estadístico). Tales métodos recurren a los registros meteorológicos locales para establecer los modelos óptimos.

En la actualidad existen diferentes enfoques metodológicos (véase figura 73) para generar escenarios de cambio climático desde las más sencillas, como los análisis de sensibilidad basados en incrementos constantes (Δ -Delta), hasta los métodos dinámicos. Los métodos estadísticos por su parte, ocupan una posición intermedia y comprenden métodos paramétricos y no paramétricos. Los primeros se basan en modelos, por ejemplo, regresiones lineales de tipo $Y=mX+b$, que utilizan como predictores atributos de las series de un GCM (X) para predecir los atributos del clima local (Y).

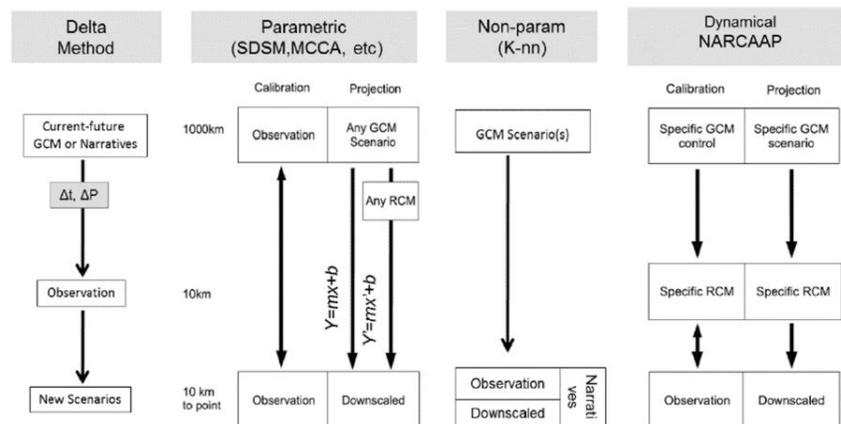


Figura N° 73: Metodología para la generación de escenarios de cambio climático.

Fuente: (MMAyA, Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir, 2016)

Por su parte, los métodos no paramétricos, como los métodos de reordenamiento o bootstrapping construyen series sintéticas como secuencias de observaciones históricas,

utilizando reglas probabilísticas que buscan preservar algunos atributos presentes en las series históricas, como la estacionalidad, la variabilidad, la correlación espacial y que, a su vez, se modifican en función de los cambios predichos por la señal del modelo climático. (MMAyA, Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir, 2016)

5.1.2 Base de datos para Downscaling (reducción de escala)

El método KNN requiere datos observados a paso de tiempo diario tanto en precipitación como temperatura. Además, coincide con la base de datos de los GCM del CMIP 5 los cuales también están a paso de tiempo diario. Los modelos del CMIP 5 trabajan para un periodo estándar histórico 1850-2005 y periodo futuro 2006-2100, al igual que el formato en NetCDF (.nc).

En el Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir es empleo esta metodología para análisis de escenarios de cambio climático, los Modelos climáticos Globales (GCMs) que se emplearon fueron: NorESM-M, CNRM-CM5, MPI-ESM-MR, MRI-ESM1 y CanESM2.

Se consideraron 31 estaciones para precipitación y 2 para temperatura, en ambos casos para un horizonte de tiempo 1980-2010. El horizonte de tiempo considerado para las condiciones futuras fue 2015-2099.

5.1.2.1 Resultados de Downscaling para la cuenca Guadalquivir

En la tabla 71 se muestran los posibles cambios en el futuro de los atributos de clima respecto al periodo 1980-2010. Los escenarios para temperatura indican que hasta el año 2050 se incrementaría en 1,98°C, según el modelo MRI-ESM1 el incremento sería 1,02°C, recordemos que es el modelo con mejor desempeño. Hasta el año 2099 los modelos CanESM2 y MPI-ESM-MR indican que la temperatura podría incrementarse en más de 3°C, siendo los escenarios más pesimistas. El escenario con el modelo MRI-ESM1 es más conservador.

En la Tabla 71 se puede observar que la precipitación en el periodo 2015-2050 se reduciría hasta en un 35%, sin embargo, el modelo MRI-ESM1 indica que se incrementaría en un 4,56%. Estos resultados ayudan a concluir que es más adecuado analizar los cambios a nivel estacional.

El modelo MRI-ESM1, genera un escenario con años muy húmedo y muy seco en comparación con otros modelos. En precipitación el modelo con mejor desempeño

respecto a otros es MRI-ESM1. (MMAyA, Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir, 2016).

Tabla N° 71: Cambio en Precipitación y Temperatura

Modelo	Cambio en Precipitación [mm]		Cambio en Temperatura [°C]	
	2015-2050	2015-2099	2015-2050	2015-2099
CanESM2	-26,76	-26,41	1,98	3,59
CNRM-CM5	-34,74	-26,11	1,13	2,2
MPI-ESM-MR	-21,32	-21,37	1,7	3,24
MRI-ESM1	4,56	-2,54	1,02	1,93
NorESM-M	-29,37	-27,76	1,29	2,39

Fuente: Balance hídrico de la cuenca Guadalquivir.

Para la estimación de la posible influencia del cambio climático en la cuenca Tolomosa se utilizó los resultados y la base de datos generada en el Balance Hídrico de la cuenca Guadalquivir.

5.2 Construcción de escenarios climatológicos en la cuenca Tolomosa

Tomado como referencia el desempeño de los modelos climáticos globales que se empleados para el análisis del cambio climático en la cuenca Guadalquivir y de acuerdo la técnica de reducción de escala Downscaling (Método no Paramétrico KNN), los modelos que más se ajustan son: MPI-ESM1 (Max Planck Intitute) y CNRM-CM5 (National Center for Meteorological Research).

En el caso de la cuenca Tolomosa se analizarán los datos de los dos modelos con el objeto de cumplir con los objetivos planteados. De las 31 estaciones empleadas en el Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir se seleccionaron las estaciones que se encuentran dentro y cerca de la cuenca Tolomosa (ver tabla 72).

Tabla N° 72: Estaciones meteorológicas cercanas a la Cuenca Tolomosa

N°	Estación	X	Y	altura
1	El Tejar Tarija	321762,2	7616765,8	1859
2	Pinos Sud	305213,8	7595503,1	2100
3	San Andrés	312140,4	7607767,1	1987
4	San Jacinto Sud	321959,5	7609324,4	1820
5	Tarija Aeropuerto	322210,8	7617847,3	1875

Fuente: Balance Hídrico Integral de la Cuenca Guadalquivir

Para cada estación se aplicaron los modelos climáticos y se realizaron proyecciones futuras de precipitación y temperatura a nivel diario en base a los registros históricos de cada estación, las proyecciones se realizaron hasta el año 2099.

Considerando que el balance hídrico se realizó a paso de tiempo mensual, los datos diarios se llevaron a mensuales para integrar al modelo WEAP.

5.2.1 Precipitación proyectada para el periodo 2020-2050

Para general la distribución espacial de la precipitación sobre la cuenca Tolomosa se empleó el método de polígonos de Thyssen. De acuerdo a la metodología las estaciones que tiene influencia sobre la cuenca son: San Andrés, Pinos Sud, el Tejar y San Jacinto Sud, de estas estaciones se extrajeron los datos de proyectados de precipitación y temperatura para el periodo 2020-2050.

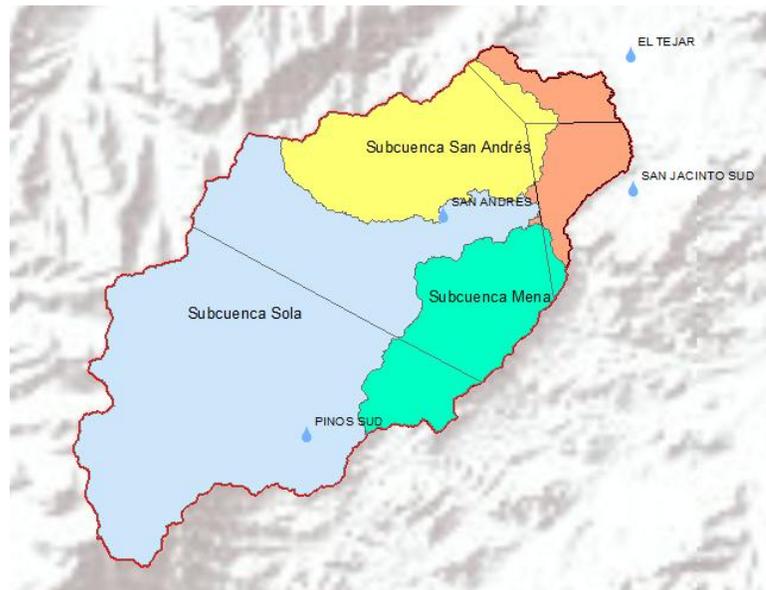


Figura N° 74: Polígono de Thyssen (escenario futuro).

Fuente: Elaboración propia

Tomado en cuenta el área de influencia de cada estación se realizó la distribución espacial de la precipitación para la cuenca y subcuenca considerando los dos modelos MPI-ESM1 y CNRM-CM5 (anexo IX y X).

5.2.1.1 Cuenca Tolomosa

Tal como lo señaló el IPCC en su quinto informe el cual indicaba que el cambio climático afectaría de manera notable al ciclo hidrológico, alterando la intensidad, la distribución temporal y espacial de la precipitación. Los resultados de los modelos climáticos globales CRNM-CM5 y MRI-ESM1 muestran la disminución de la precipitación en la cuenca Tolomosa respecto periodo histórico (ver figura 75). A nivel anual no se observa una disminución significativa de la precipitación respecto a los datos históricos, de acuerdo a

los modelos climáticos CRNM-CM5 y MRI-ESM1 la disminución es de 20,12% y del 12,62 % respectivamente (véase tabla 73).

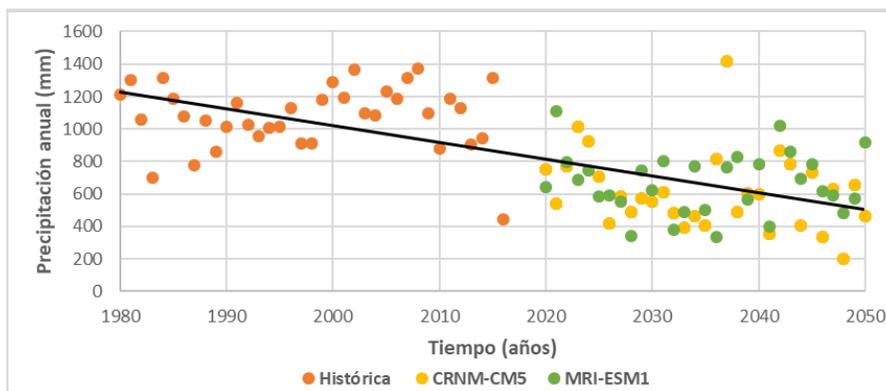


Figura N° 75: Precipitación anual 1980-2050

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 73: Comparación de la precipitación histórica y proyectada (mm)

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Suma	%
Historico 1980-2016	66,65	123,73	195,18	231,20	219,47	181,44	41,55	7,10	1,93	1,52	6,04	13,46	1089,27	
CRNM-CM5 2020-2050	86,09	120,69	127,64	154,32	127,70	109,37	61,15	25,57	0,87	1,44	5,44	49,88	870,16	20,12
MRI-ESM1 2020-2050	93,26	109,76	122,09	175,81	156,36	133,49	75,90	22,64	0,73	1,05	8,13	52,60	951,81	12,62

Fuente: Elaboración propia

La precipitación sufre una significativa alteración en la distribución temporal. En las tablas 74 y 75 se muestra la variación de la precipitación histórica respecto a los modelos climáticos CRMN-CM5 y MRI-ESNM1, los valores positivos nos indican una disminución de la precipitación y valores negativos incremento.

Tabla N° 74: Variación de la precipitación-CRNM-CM5(mm)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Histórico	231,2	219,5	181,4	41,55	7,1	1,93	1,52	6,04	13,46	66,65	123,7	195,2
CRNM-CM5	154,3	127,7	109,4	61,15	25,57	0,87	1,44	5,44	49,88	86,09	120,7	127,6
Variación	76,89	91,77	72,07	-19,6	-18,5	1,05	0,07	0,6	-36,4	-19,4	3,04	67,54

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 75: Variación de la precipitación MRI-ESM1(mm)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Histórico	231,2	219,5	181,4	41,55	7,1	1,93	1,52	6,04	13,46	66,65	123,7	195,2
MRI-ESM1	175,8	156,4	133,5	75,9	22,64	0,73	1,05	8,13	52,6	93,26	109,8	122,1
Variación	55,4	63,11	47,94	-34,4	-15,5	1,2	0,46	-2,09	-39,1	-26,6	13,97	73,09

Fuente: Elaboración propia

De ambos modelos climáticos estudiados el modelo CRNM-CM5 presenta un escenario más crítico.

En la figura 76 se puede observar que los dos modelos indican una reducción en la precipitación en los meses más húmedos e incremento en los meses abril, mayo, agosto, septiembre y octubre. Estos resultados reflejan claramente una alteración en la intensidad, distribución temporal y espacial de la precipitación en la cuenca.

La disminución probable de la precipitación de acuerdo a los datos del modelo CRNM-CM5 en los meses más lluviosos (diciembre, enero, febrero y marzo) podría ser de 77,1 mm (59,4%) y el incremento promedio en los meses (abril, mayo, septiembre y octubre) de 23,48 mm (42,2 %).

En el caso del modelo MRI-ESM1 la precipitación en los meses lluviosos disminuiría 60 mm (40,7 %) y el incremento promedio en los meses (abril, mayo, septiembre y octubre) es de 28,9mm (47,3 %). Se observa además un adelanto de las lluvias donde el periodo de lluvia comienza en el mes septiembre.

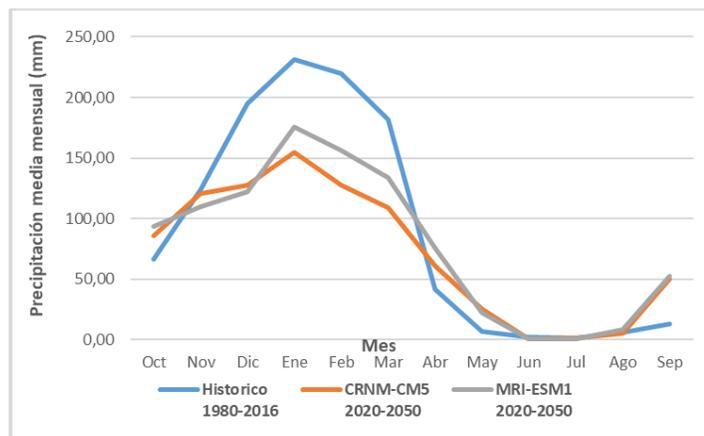


Figura N° 76: Comparación de la precipitación histórica y proyectada (mm)

Fuente: Elaboración propia

5.2.1.2 Subcuenca Sola

La disminución probable en los meses húmedos podría ser de 96,7mm y el aumento en los meses secos es de 20,5 mm, en cuanto a distribución temporal de la precipitación presenta una alteración tal como se señaló anteriormente.

Tabla N° 76: Comparación de la precipitación histórica y proyectada (mm)

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Suma	%
Historico 1980-2016	62,98	131,76	208,26	244,53	238,53	194,80	48,00	8,06	2,23	1,68	6,18	13,94	1160,96	
CRNM-CM5 2020-2050	83,32	112,83	122,75	146,17	124,04	106,42	59,67	22,81	0,77	1,41	4,93	49,34	834,46	28,12
MRI-ESM1 2020-2050	90,11	104,65	116,81	168,70	150,62	131,12	76,98	19,61	0,65	0,94	6,97	52,81	919,99	20,76

Fuente: Elaboración propio

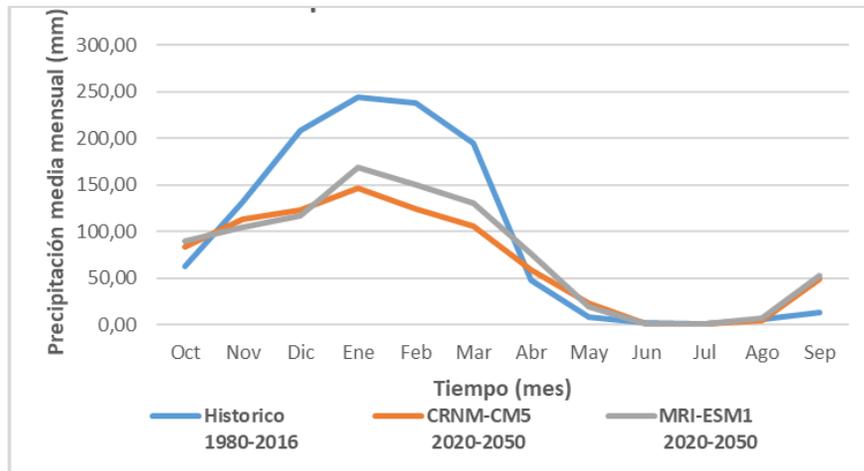


Figura N° 77: Comparación de la precipitación histórica y proyectada (mm)
Fuente: Elaboración propia

5.2.1.3 Subcuenca San Andrés

La disminución probable en los meses húmedos es de 39,7mm y el aumento promedio en los meses secos es de 29,43mm. De igual manera se observa una alteración en la intensidad y la distribución temporal de la precipitación (ver figura 78).

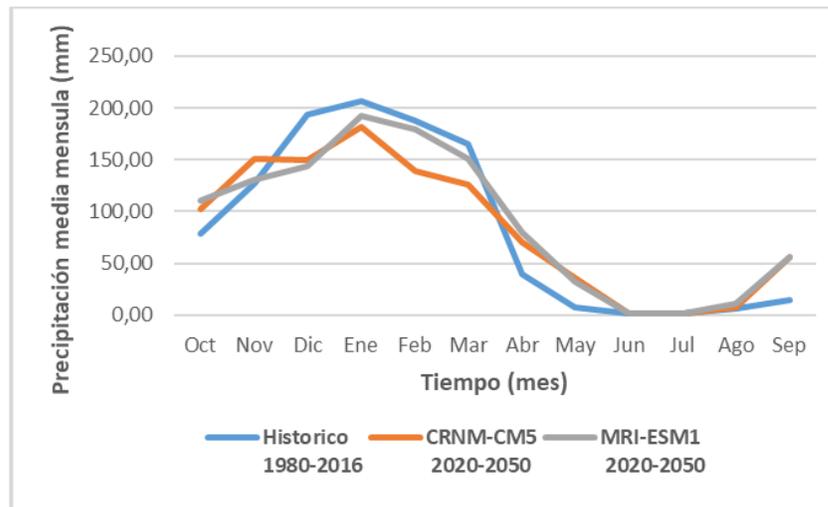


Figura N° 78: Comparación de la precipitación histórica y proyectada (mm)
Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 77: Comparación de la precipitación histórica y proyectada (mm)

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Suma	%
Historico 1980-2016	79,09	126,99	193,48	206,06	187,93	165,22	39,21	7,53	2,03	1,76	6,27	14,04	1029,62	
CRNM-CM5 2020-2050	101,92	150,70	149,20	181,05	138,42	125,37	69,76	35,72	1,32	1,89	7,56	55,89	1018,81	1,05
MRI-ESM1 2020-2050	110,46	130,77	143,30	192,83	179,06	150,42	79,56	32,28	1,10	1,56	11,55	56,53	1089,43	5,81

Fuente: Elaboración propia

5.2.1.4 Subcuenca Mena

La disminución probable de la precipitación en los meses húmedos es de 109,2mm, en la figura 79 se visualiza que el compartimiento espacial de la precipitación se mantiene, por lo que en los meses secos no se presenta una variación de la precipitación.

Tabla N° 78: Comparación de la precipitación histórica y proyectada (mm)

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Suma	%
Historico 1980-2016	74,09	130,33	198,03	215,79	206,64	177,00	43,60	8,23	2,36	1,79	6,20	14,45	1078,51	
CRNM-CM5 2020-2050	61,53	88,03	89,96	108,33	86,19	76,39	42,68	19,93	0,72	1,12	4,22	34,90	614,00	43,07
MRI-ESM1 2020-2050	66,60	78,22	86,07	118,71	108,82	92,95	51,21	17,75	0,60	0,86	6,30	36,00	664,10	38,42

Fuente: Elaboración propi

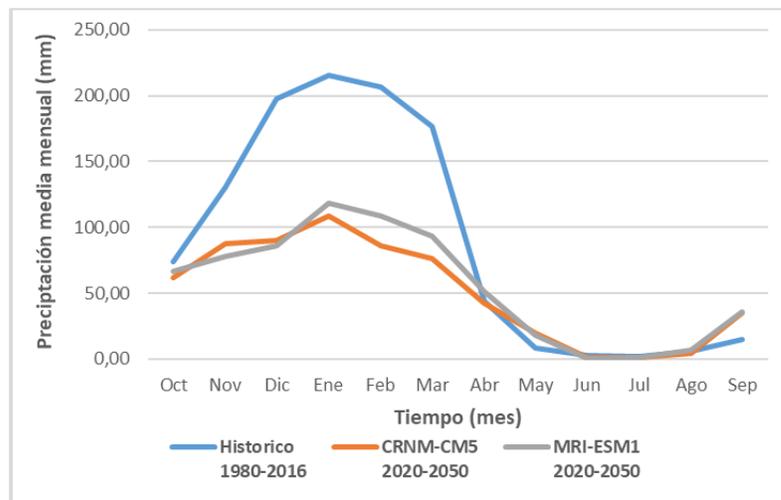


Figura N° 79: Comparación de la precipitación histórica y proyectada (mm)

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Temperatura proyectada para el periodo 2020-2050

Se extrajo la distribución temporal y espacial de la temperatura para la cuenca Tolomosa del modelo climático CNRM-CM5 y MRI-ESNM1, el cual trabajo con las estaciones tierra de: El Tejar, San Jacinto Sud, San Andrés y Aeropuerto, los datos se encuentran en los anexos IX y X.

5.2.2.1 Cuenca Tolomosa

De acuerdo al quinto informe de IPCC señala que la temperatura media global incrementara entre 1,4 a 2,6°C. Según los modelos climáticos CRNM-CM5 y MRI-ESNM1 la temperatura media anual va a incrementar a medida que pasan los años (ver figura 80). Los resultados obtenidos con los modelos CRNM-CM5 y MRI-ENM1 se

observa que la temperatura aumentara en todos los meses. Los meses en donde existen un mayor incremento son junio, julio y agosto.

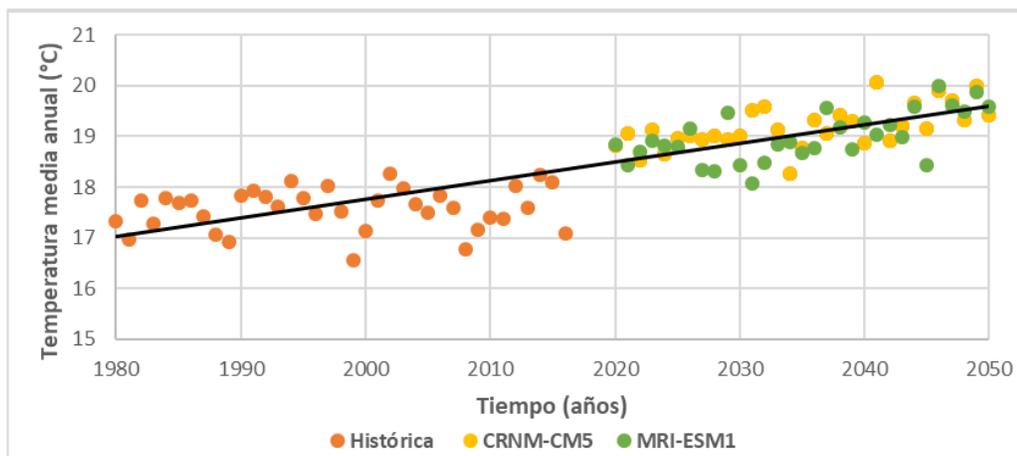


Figura N° 80: Temperatura media anual 1980-2050

Fuente: Elaboración propia

El incremento anual promedio de la temperatura en la cuenca es de 1,6°C y 1,4°C de acuerdo a los modelos (véase tablas 79-80).

Tabla N° 79: Variación de la temperatura en la cuenca Tolomosa (°C)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Historico 1980-2016	20,33	19,91	19,53	18,07	15,36	13,53	13,20	15,10	16,73	19,14	19,73	20,39	17,59
CRNM-CM5 2020-2050	21,85	21,41	21,29	19,52	16,62	15,72	15,19	17,20	18,47	20,41	20,70	21,80	19,18
Variación	1,51	1,49	1,77	1,45	1,26	2,19	1,99	2,10	1,74	1,27	0,97	1,41	1,60

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 80: Variación de la temperatura en la cuenca Tolomosa (°C)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Historico 1980-2016	20,33	19,91	19,53	18,07	15,36	13,53	13,20	15,10	16,73	19,14	19,73	20,39	17,59
MRI-ESM1 2020-2050	21,94	21,22	21,30	19,13	16,06	15,87	14,97	17,38	17,81	20,33	20,29	21,49	18,98
Variación	1,60	1,31	1,77	1,06	0,71	2,34	1,77	2,28	1,09	1,19	0,56	1,10	1,40

Fuente: Elaboración propia

En la figura 81 se visualiza de forma más clara el incremento de la temperatura, los resultados de los modelos CRNM-CM5 y MRI-ESM1 son muy similares donde el patrón de la temperatura es prácticamente el mismo al largo de todo el año.

El incremento de la temperatura se debe principalmente al calentamiento de la tierra debido a los gases del efecto invernadero.

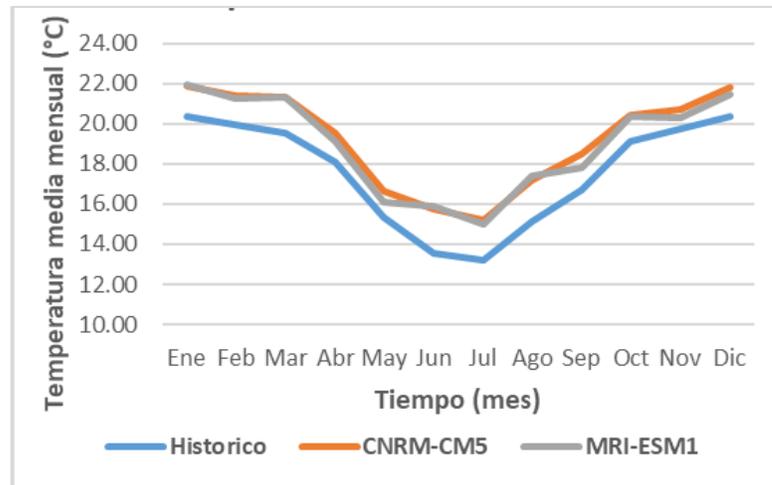


Figura N° 81: Comparación de la temperatura histórica y proyectada (°C)

Fuente: Elaboración propia

5.3 Consideraciones previas.

Los variables de precipitación y temperatura fueron introducida en el modelo bajo las siguientes consideraciones:

- Los parámetros del suelo calibrados y ajustados en el intervalo histórico han sido asumidos válidos para la evaluación del efecto de cambio climático. Para poder analizar el efecto de Cambio climático, se ha decidido mantener las condiciones de la misma en términos de cobertura y uso de suelos en la cuenca.
- Las áreas de cultivo fueron incrementadas de acuerdo al área potencial de riego que existen en la cuenca, de manera que se evalué el caso más crítico el cual sería cuando toda el área potencial este bajo riego. Esta información se obtuvo del Plan de Desarrollo Integral San Jacinto “Agua Segura para la Producción”. En el anexo XI se detalla el incremento de las áreas de riego para cada cultivo en cada subcuenca a modelar.

Tabla N° 81: Área potencial de riego

Sub cuenca	Área bajo riego (ha)	Área Potencial (ha)	Incremento 2020-2050 (ha)
Sola	5426,0	6841,9	1415,9
Mena	479,0	604,0	125,0
San Andrés	2882,0	3634,1	752,1
Total	8787,0	11080,0	2293,0

Fuente: CR PROAGRO/GTZ, 2011

Esta estimación del área potencial de riego se la efectuó tomando en cuenta información de estudios que se realizaron anteriormente, sin embargo, se recomienda efectuar un análisis más a detalle sobre las áreas de riego.

- Las características de siembra y la cedula de cultivo han sido asumidas constantes en el escenario de proyección, esto en lo referido al sector de riego tanto en la cuenca.
- Para la estimación de la demanda de agua potable en la cuenca, se lo realizó de acuerdo a lo establecido en NB-689 de “Instalaciones de Agua-Diseño para sistemas de Agua Potable”, se empleó el método geométrico para la estimación de la población y dotación futura.
- Los registros de humedad, velocidad de viento, nubosidad han sido repetidos de manera cíclica para el intervalo proyectado, debido a escasa información histórica en el área de estudio y los tiempos de complicación y procesamiento de los modelos climáticos globales (GCMs).

Estas consideraciones fueron conceptualizadas en el modelo y se introdujeron las variables climáticas (precipitación y temperatura) obtenidas del modelo climático global CRNM-CM5 y MRI-ESNM1 para el periodo 2020-2050.

Se aumentaron las áreas de riego y se proyectó la demanda de agua potable la esquematización de la cuenca en el modelo WEAP se muestra en la figura 82. Las series de datos futuros de precipitación y temperatura para el periodo 2020-2050 que se obtuvieron con los modelos climáticos CRNM-CM5 y MRI-ESNM1 fueron introducidos al modelo ya calibrado, posteriormente se hizo correr el mismo. Para efectuar el análisis de los resultados se establecieron dos periodos con la finalidad de poder compararlos, a continuación, se detallan los periodos definidos:

- Periodo histórico 1980-2016
- Periodo futuro 2020-2050 (afectado por el posible cambio climático)

Los componentes del balance hídrico modelados en WEAP son la evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo base. Para obtener un modelo más representativo de la realidad se estimó la demanda de agua para cada subcuenca, en los apartados anteriores se conceptualizó y analizó las demandas de riego y de agua potable para el periodo futuro de simulación.

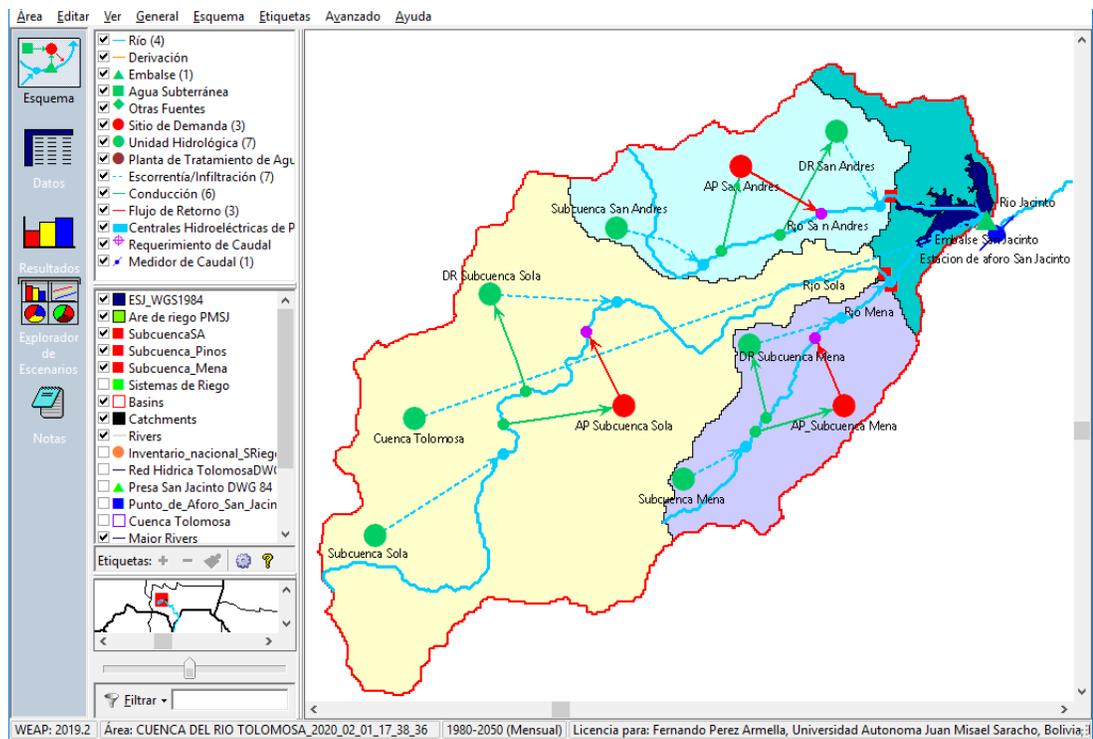


Figura N° 82: Esquematzación de la cuenca Tolomosa.

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar posible influencia del cambio climático sobre la oferta hídrica y con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados se realizó la modelación y análisis de la escorrentía superficial para la cuenca Tolomosa. Como complemento del estudio se efectuó un análisis adicional de la oferta y demanda (riego y agua potable) para las tres subcuencas (San Andrés, Sola y Mena) definidas dentro de la cuenca.

En los anexos XV, XVI y XVII se muestra las demandas de agua para cada subcuenca es decir las demandas de riego y agua potable de todo el periodo futuro.

5.4 Análisis de la oferta hídrica de la cuenca Tolomosa

Los resultados dan la razón a lo señalado en el quinto informe del IPCC, anteriormente se vio que los modelos climáticos muestran una variación en la precipitación y temperatura en la cuenca Tolomosa afectando su intensidad, distribución temporal y espacial.

La disminución de la precipitación y aumento de la temperatura tiene su efecto directo en escorrentía superficial tal como lo señala IPCC en su quinto informe. Con las series de caudales medios futuros simulados con WEAP con la finalidad de realizar un análisis de persistencia de los caudales mensuales se determinó la curva duración o curva de persistencia de caudales.

Los resultados se presentan gráficamente en la figura 83 acompañados de los valores simulados en el periodo de 1980-2016 y los generados para el periodo 2020-2050.

Comparando las curvas de duración, se observa la existencia de un decaimiento en la persistencia de los caudales medios mensuales en el periodo futuro que se reflejaría como una baja en la cantidad de agua.

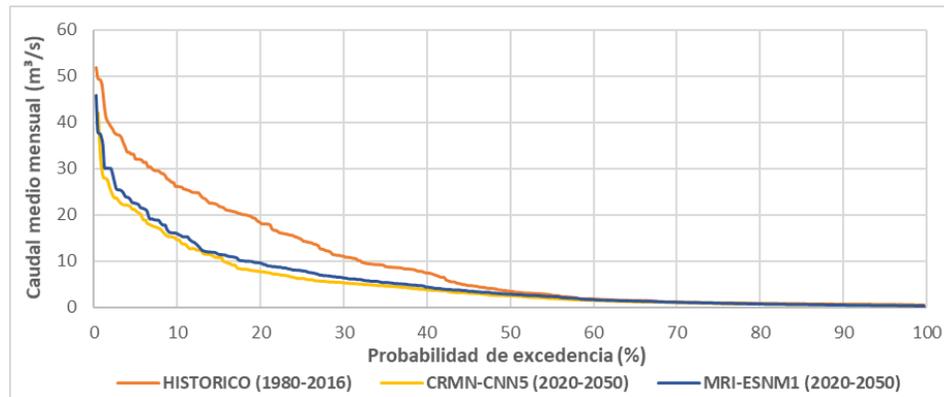


Figura N° 83: Curva de duración o persistencia de caudales

Fuente: Elaboración propia

Con las curvas de duración de caudales medios mensuales simulados con WEAP se determinó para diferentes probabilidades de excedencia el porcentaje de tiempo en cual el caudal es igualado o excedido. En la tabla 82 se indican los valores límites obtenidos de las curvas de duración con el fin de determinar la variación de los caudales entre los periodos analizados (ver figura 83)

Tabla N° 82: Caudales medios mensuales simulados con WEAP (m³/s)

Probabilidad de Exedencia	Historico (1980-2016)	MRI-ESNM1 (2020-2050)	CRNM-CM5 (2020-2050)
10	26,08	15,99	14,45
25	14,65	7,97	6,16
50	3,39	2,87	2,38
75	0,87	0,91	0,76
90	0,59	0,52	0,45

Fuente: Elaboración propia

Tomando toda la serie de tiempo los resultados nos muestran que la ocurrencia de caudales máximos mensuales es donde mayor variación va existir sin embargo estos son poco probables de ocurrir, en cuanto a los caudales medios y mínimos la disminución es menor, la variación es mayor para el modelo climático CRNM-CM5.

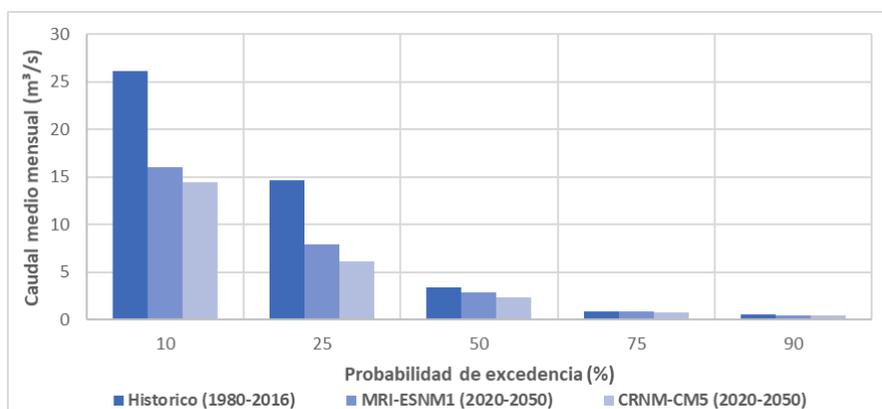


Figura N° 84: Caudales simulados para diferentes probabilidades de excedencia

Fuente: Elaboración propia

Con datos de ambos modelos climáticos se observan una mayor variación en la frecuencia de caudales cuya probabilidad de ser igualados excedidos es superior al 50%, mientras que para probabilidades de excedencia iguales o inferiores al 50% el porcentaje de disminución de los caudales es menor (ver figura 83). Según los modelos climáticos para una probabilidad excedencia de 10% la disminución del caudal podría ser de un 39% hasta 45%, de igual manera para probabilidades del 50% los caudales disminuirían un 16% hasta 30% y para una probabilidad del 90% la disminución posible es de un 13% hasta un 25% respectivamente (ver tabla 83).

Tabla N° 83: Porcentaje de variación de caudales

Probabilidad de excedencia (%)	MRI-ESNM1 (2020-2050) (%)	CRNM-CM5 (2020-2050) (%)
10	38,67	44,59
25	45,63	57,98
50	15,50	29,91
75	4,58	12,81
90	12,98	24,79
Media	21,64	34,02

Fuente: Elaboración propia

Algo importante de aclarar es que la curva de duración no presenta el escurrimiento en secuencia natural del río, es decir no toma en cuenta el periodo de años en donde se producen los caudales. Para analizar la disponibilidad hídrica y dar respuesta a los objetivos planteados se calcularon los percentiles de los caudales de cada mes para el período 1980-2016 y 2020-2050, definiendo el caudal correspondiente a una probabilidad

del 10% de ser superado o igualado como un año húmedo, probabilidad de 50% de ser superado o excedido como un año medio y una probabilidad 90% de ser superado o igualado como un año seco.

La tabla 84 muestra los resultados de esta aplicación y las curvas de persistencia para cada mes se muestran en el anexo XII

Tabla N° 84: Probabilidades de caudales mensuales (m³/s)

Mes	Historicos (1980-2016)			MRI-ESNM1 (2020-2050)			CRNM-CM5 (2020-2050)		
	10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%
Ene	33,07	20,53	14,11	36,32	8,81	2,55	21,66	6,84	3,56
Feb	44,66	25,69	15,43	30,17	11,56	5,18	27,87	7,73	3,03
Mar	31,27	21,65	10,20	22,49	9,85	5,35	18,89	6,37	3,00
Abr	11,34	8,44	3,78	12,51	6,50	3,07	11,10	5,04	1,23
May	4,57	2,97	1,59	5,62	2,97	1,32	5,51	2,41	1,01
Jun	1,77	1,39	0,92	2,04	1,26	0,75	2,04	1,05	0,67
Jul	1,02	0,87	0,62	1,00	0,66	0,48	1,04	0,58	0,39
Ago	0,76	0,64	0,52	0,73	0,50	0,37	0,71	0,43	0,27
Sep	0,79	0,56	0,46	2,57	0,86	0,41	2,63	0,73	0,35
Oct	2,32	1,07	0,57	11,72	1,69	0,70	12,53	1,52	0,50
Nov	10,98	4,93	2,53	15,20	4,02	1,10	20,09	4,61	0,86
Dic	26,26	12,07	7,40	21,20	5,22	1,59	21,09	5,58	1,36
Anual	14,07	8,40	4,84	13,46	4,49	1,91	12,10	3,57	1,35

Fuente: Elaboración propia

Para un año húmedo el caudal medio anual podría disminuir un 5% (MRI-ESNM1) y 14% (CRNM-CM5), en un año medio de acuerdo a los dos modelos climáticos el caudal anual podría disminuir un 46% hasta 58% y para un año seco el caudal podría disminuir un 61% hasta 70%. Del análisis de la precipitación de los modelos climáticos se vio que existe una alteración en la intensidad, en las distribución espacial y temporal, se observó un adelanto de las lluvias donde el periodo comienza en el mes septiembre. Estas alteraciones de la precipitación se ven reflejadas en los caudales más específicamente si se considera un año húmedo (ver figura 85).

De acuerdo a los datos de los dos modelos climático evaluados en WEAP existe un incremento probable del 65% de los caudales en los meses de septiembre, octubre y noviembre, de igual manera en los meses de abril, mayo y junio se observa un leve incremento del caudal que podría ser de un 14% hasta 16%, en los meses de enero, febrero y marzo la disminución de los caudales podría ser de 31% hasta 41%. Es necesario aclarar que los caudales para un año húmedo son poco frecuentes de ocurrir mientras que los

caudales para un año medio y seco tienen una mayor probabilidad de ocurrencia y es en estos años en donde mayor disminución se presenta.

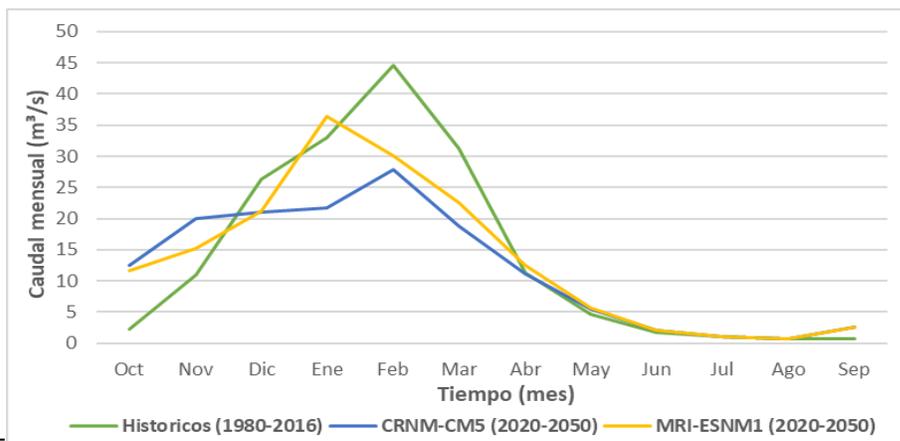


Figura N° 85: Hidrograma de caudales para un año húmedo

Fuente: Elaboración propia

En un año medio en los meses de crecidas (enero, febrero y marzo) el caudal podría disminuir un 56% hasta 69%, en los meses más críticos o de estiaje (mayo, junio, julio y agosto) la disminución de los caudales podría ser del 18% hasta un 28% y debido a las alteraciones en la distribución temporal de la precipitación en los meses de septiembre y octubre los caudales podrían incrementar un 27% hasta un 36%. (ver figura 86)

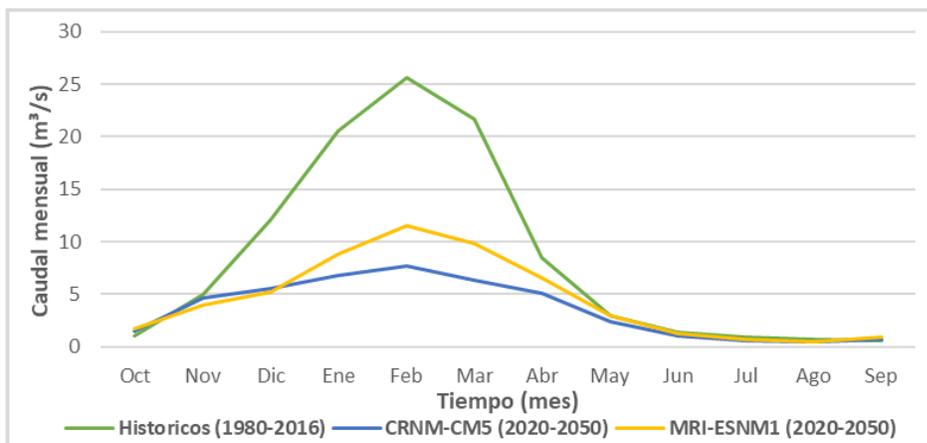


Figura N° 86: Hidrograma de caudales para un año medio

Fuente: Elaboración propia

La disminución de los caudales para un año crítico o seco respecto a los históricos es aún más grande, para el periodo de crecidas en los meses de enero, febrero y marzo disminución podría ser de 65% hasta un 75%, mientras que en los meses de mayo, junio, julio y agosto la disminución podría ser del 22% hasta un 37% y en los meses de inicio de

las lluvias es decir desde septiembre hasta diciembre la disminución promedio de los caudales es de un 46% hasta 49%. (ver figura 87)

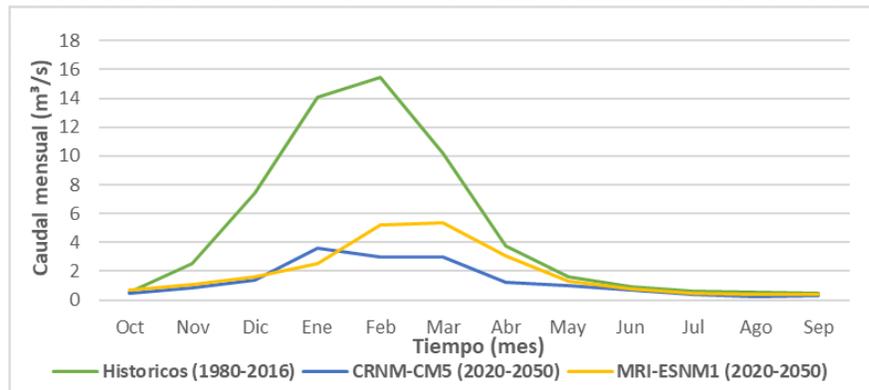


Figura N° 87: Hidrograma de caudales para un año seco

Fuente: Elaboración propia

De las curvas de duración de caudales estimadas para cada mes (ver anexo XII) se observa que en los meses de enero, febrero y marzo es donde se presenta la mayor disminución de caudal con relación a los históricos, en estos meses según su curva de duración la disminución es tanto para la ocurrencia caudales máximos, medios y mínimos. En los meses de abril hasta agosto es donde menor disminución del caudal se tiene, de acuerdo a las curvas de duración en los meses de abril, mayo e incluso junio los caudales medios y mínimos no disminuyen significativamente, sin embargo, se observa una probabilidad del 20% al 25% de que se presenten valores mayores a los históricos. En los meses de julio y agosto se presenta una mayor disminución en la ocurrencia de caudales medios y mínimos. En septiembre y octubre son los meses en donde más alteración del régimen del caudal se presenta, según las curvas de duración para estos meses existe una probabilidad del 50% al 60% de que ocurran caudales superiores a los históricos. Por otro lado, en el mes de noviembre la probabilidad de que ocurran caudales superiores a los históricos podría ser de 20% aproximadamente, por último, en el mes de diciembre los caudales disminuyen en todo el tiempo en relación a los históricos. La figura 88 se presentan las series de caudales medios anuales del periodo analizado, con ambos modelos climáticos se aprecia una clara tendencia hacia la baja de los caudales para los periodos futuros.

En ambos modelos los resultados obtenidos con el WEAP muestran que el posible cambio climático afectara la intensidad, distribución temporal y espacial de la escorrentía superficial de la cuenca Tolomosa. Esta baja se atribuiría a la disminución de la

precipitación sobre la cuenca y al aumento de la temperatura que generaría una mayor evapotranspiración.

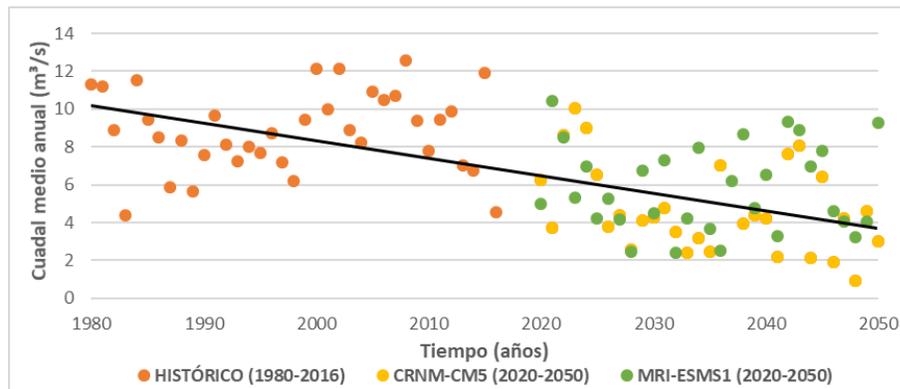


Figura N° 88: Caudal medio anual

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 85 se muestran los caudales medios mensuales simulados con WEAP para el periodo histórico y futuro. Los caudales simulados para el periodo 2020-2050 se detallan en los anexos XIII y XIV.

Tabla N° 85: Caudales medios mensuales de la cuenca Tolomosa (m³/s)

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Media
Histórico (1980-2016)	1,47	5,63	14,58	23,17	27,38	20,82	7,81	2,95	1,37	0,84	0,63	0,58	8,94
CRNM-CM5 (2020-2050)	3,16	6,34	7,95	11,17	11,90	8,77	5,76	2,73	1,17	0,63	0,45	0,95	5,08
MRI-ESNM1 (2020-2050)	3,56	5,89	7,42	12,98	14,39	11,43	7,56	3,35	1,33	0,71	0,52	1,08	5,85

Fuente: Elaboración propia

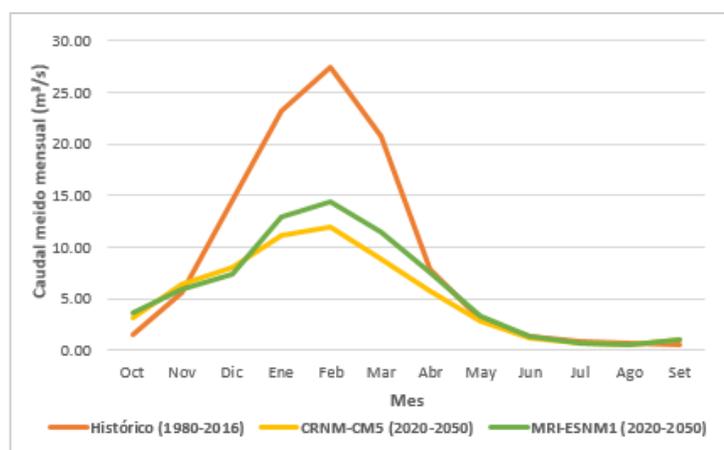


Figura N° 89: Hidrograma de caudales medios mensuales.

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la pendiente de la rama ascendente del hidrograma durante el periodo 2020-2050 ha decrecido (ver figura 89), esta parte del hidrograma está influenciada sobre todo por características de precipitación y se debe a la disminución de la misma en este periodo, mientras que la rama descendente o de recisión es bastante independiente de ello y más bien depende de las características morfológicas de la cuenca.

5.4.1 Análisis de la oferta y demanda de la cuenca

En el modelo se conceptualizó la de agua potable y riego, en el caso de la demanda de riego se estimó asumiendo el caso más desfavorable considerando que toda el área potencial se encuentra bajo riego, en el caso de la demanda de agua potable se apreció de acuerdo a lo establecido en la NB-689, la cual se basa en la estimación de la dotación futura y la población futura. Las demandas de agua en WEAP son representadas por nodos, la característica más importante de un sitio de demanda es la prioridad que se le asigna. WEAP en función a prioridad hace la distribución del agua. En caso de demanda de agua potable se le asignó una prioridad de 1 y para la de riego una prioridad 2. Bajo estas consideraciones y en función a la disponibilidad hídrica de cada subcuenca, WEAP realiza el balance entre la oferta y demanda de agua priorizando satisfacer primero la demanda de agua potable y posteriormente la de riego.

Se adoptó como prioridad 1 a la demanda de agua potable por tratarse del abastecimiento del líquido vida para el consumo humano, con esto estamos logrando que los recursos hídricos que nos ofrece la cuenca sean para beneficio de las personas, una vez satisfechas estas necesidades recién se utilizara el agua para otras actividades.

5.4.1.1 Subcuenca Sola

Los resultados obtenidos el caudal medio anual de la subcuenca podría disminuir entre un 37% hasta 46% (ver tabla 86), los caudales medios mensuales disminuyen en la mayoría de los meses excepto en septiembre, octubre y noviembre (ver figura 90).

Tabla N° 86: Caudales medios mensuales de la subcuenca Sola (m³/s)

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Media	
Histórico (1980-2016)	1,06	3,64	9,25	15,44	18,43	13,71	5,16	2,09	1,13	0,70	0,53	0,49	5,97	%
CRNM-CM5 (2020-2050)	2,19	3,92	5,00	6,73	7,46	5,44	3,71	1,88	0,95	0,52	0,38	0,80	3,25	45,60
MRI-ESNM1 (2020-2050)	2,43	3,78	4,66	8,05	8,86	7,06	4,90	2,27	1,08	0,59	0,44	0,90	3,75	37,18

Fuente: Elaboración Propia

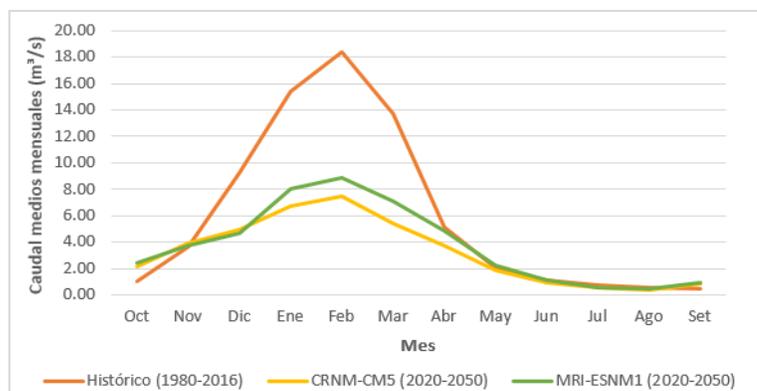


Figura N° 90: Hidrograma de salida de la subcuenca Sola.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 87 se muestran la demanda estimada en WEAP a base a las metodologías mencionadas, se observa que la demanda de riego es mucho mayor que la de agua potable, en el caso del riego los meses de mayor requerimiento son julio, agosto y septiembre.

Tabla N° 87: Demanda de agua subcuenca Sola (m³/s)

Demanda	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Agua potable	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,242
Riego	0,261	0,105	0,171	0,600	0,914	1,829	3,169	5,860	4,678	4,054	1,476	1,079	24,195
Total	0,281	0,125	0,191	0,620	0,934	1,849	3,189	5,880	4,698	4,074	1,496	1,099	24,436

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 88 se muestra los resultados obtenidos del balance, para el periodo 2020-2050 se logra cubrir la demanda de agua potable en todos los meses, en el caso del riego solo se cubre en un 100% en los meses de enero hasta marzo, en el resto de los meses no se cubre la demanda en su totalidad, los meses más críticos son julio, agosto y septiembre.

Tabla N° 88: Cobertura de la demanda (%) – Subcuenca Sola

Demanda	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Agua Potable	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Riego	100	100	100	96	94	51	16	6	24	40	81	90

Fuente: Elaboración propia

5.4.1.2 Subcuenca San Andrés

La oferta hídrica de la subcuenca no presenta variaciones significativas, sin embargo, se muestran alteraciones en su distribución temporal con incrementos del caudal en varios meses tal como se señaló anteriormente. De acuerdo a los modelos climáticos en la época de crecidas (enero, febrero y marzo) los caudales podrían disminuir un 11% hasta un 26%,

en los meses de abril hasta noviembre es probable un incremento del caudal de un 46% hasta 49% (ver figura 91). La disminución anual del caudal podría ser de un 8%.

Tabla N° 89: Caudales medios mensuales de la subcuenta San Andrés (m³/s)

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Media	%
Histórico (1980-2016)	0,43	1,08	2,53	3,44	3,83	3,11	1,37	0,62	0,37	0,24	0,18	0,16	1,45	
CRNM-CM5 (2020-2050)	0,94	1,86	2,15	2,88	2,71	2,10	1,44	0,81	0,45	0,25	0,18	0,31	1,34	7,46
MRI-ESNM1 (2020-2050)	1,02	1,63	2,02	3,08	3,39	2,70	1,72	0,90	0,48	0,27	0,20	0,34	1,48	2,02

Fuente: Elaboración propia

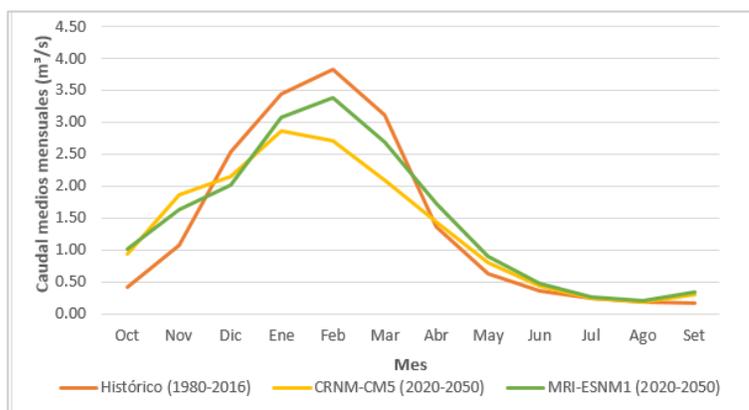


Figura N° 91: Hidrograma de salida de la subcuenta San Andrés.

Fuente: Elaboración propia

La demanda de agua de la subcuenta se detalla en la tabla 90, del resultado del balance de agua se observa que la demanda de agua potable es cubierta en todos los meses en un 100%, mientras que la de riego solo es cubierta en los meses de enero hasta marzo, los meses más críticos son julio, agosto y septiembre (ver tabla 91).

Tabla N° 90: Demanda de agua subcuenta San Andrés (m³/s)

Demanda	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Agua potable	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,392
Riego	0,119	0,025	0,065	0,276	0,452	1,034	1,788	3,207	2,484	1,822	0,778	0,572	12,622
Total	0,151	0,058	0,097	0,309	0,485	1,067	1,821	3,240	2,516	1,855	0,810	0,605	13,013

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 91: Cobertura de la demanda (%) - Subcuenta San Andrés

Demanda	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Agua Potable	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Riego	100	100	100	94	91	40	12	5	20	35	78	87

Fuente: Elaboración propia

5.4.1.3 Subcuenca Mena

La disminución del caudal a nivel anual podría ser de un 56% y 62% (ver tabla 92), en la figura 92 se observa con más claridad esta disminución. La oferta hídrica de la subcuenca disminuye en todos los meses, en la temporada de crecidas el caudal medio mensual podría reducir un 63% a 70% y en la temporada de estiaje el caudal podría disminuir un 36%. El caudal medio anual podría disminuir un 56% hasta 62% (ver tabla 92).

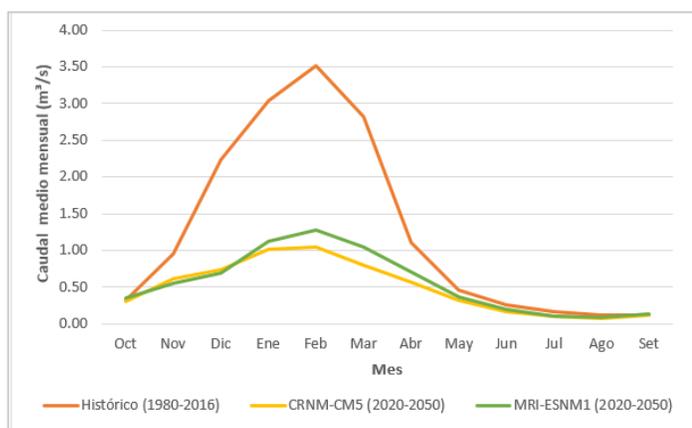


Figura N° 92: Hidrograma de salida de la subcuenca Mena.

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 92: Caudales medios mensuales de la Subcuenca Mena (m³/s)

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Media	%
Histórico (1980-2016)	0,32	0,95	2,23	3,04	3,52	2,81	1,10	0,46	0,26	0,16	0,12	0,11	1,26	
CRNM-CM5 (2020-2050)	0,31	0,61	0,74	1,01	1,05	0,80	0,56	0,31	0,17	0,10	0,07	0,12	0,49	61,25
MRI-ESNM1 (2020-2050)	0,34	0,56	0,69	1,12	1,27	1,04	0,71	0,37	0,19	0,11	0,08	0,13	0,55	56,21

Fuente: Elaboración propia

La demanda de agua se detalla en la tabla 93, de igual forma se logra cubrir en su totalidad la demanda de agua potable y no así la de riego.

Tabla N° 93: Demanda de agua subcuenca Mena (m³/s)

Demanda	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Agua potable	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,10
Riego	0,038	0,016	0,027	0,075	0,095	0,167	0,294	0,554	0,499	0,397	0,163	0,118	2,44
Total	0,047	0,024	0,035	0,084	0,104	0,175	0,302	0,562	0,507	0,406	0,172	0,127	2,55

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 94: Cobertura de la demanda (%) - Subcuenca Mena

Demanda	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Agua Potable	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Riego	100	100	100	98	96	79	30	11	26	47	86	95

Fuente: Elaboración propia

5.5 Análisis y discusión de resultados

Con la aplicación del modelo WEAP a la cuenca Tolomosa con la finalidad de analizar la posible influencia del cambio climático sobre la oferta hídrica superficial, se obtuvo resultados que reflejan que los caudales en la cuenca podrían verse alterados en la magnitud, distribución temporal y espacial, tal como lo señalo Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) en su quinto informe donde se mencionan que cambio climático a nivel global es inequívoco y que los principales riesgos e impactos será la reducción de los recurso de aguas superficiales y subterráneas.

Ambos modelos climáticos (CRNM-CM5 y MRI-ESNM1) muestran un probable adelanto de las lluvias en la cuenca, las cuales empezaran en el mes de septiembre. La precipitación reduciría en los meses húmedos (enero febrero y marzo) e incrementarían en los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto. En el caso de la temperatura en todos los meses va incrementar, especialmente en los meses de invierno (junio, julio y agosto). Estas variaciones en la precipitación y temperatura tendrían efectos directos sobre la escorrentía superficial de la cuenca.

Los resultados obtenidos del análisis de persistencia o curva duración de caudales con datos de ambos modelos climáticos se observa que para probabilidades de ocurrencia del 10% (año húmedo) se presenta la menor disminución del caudal, sin embargo, para este año ocurre la mayor alteración temporal del régimen con respecto a los histórico, con incrementos probables del 65% en los meses de septiembre hasta noviembre e incluso en los meses abril a junio el caudal podría aumentar entre un 14% a 16%. Para probabilidades de ocurrencia del 50% (año medio) se tiene disminuciones considerables en casi todos los meses excepto en los meses de septiembre y octubre en donde el caudal podría incrementar un 27% hasta 36%, en la época de crecidas de enero hasta marzo la disminución del caudal podría ser del 56% hasta 69%, ya en los meses más críticos o de estiaje de mayo hasta agosto la disminución probable del caudal es de 18% a 28%. Para una probabilidad del 90% (año seco) la disminución del caudal es mucho mayor en todos los meses, en enero hasta marzo el caudal podría disminuir un 65% a 75%, en los meses de mayo hasta junio un 22% hasta 37% y en los meses de septiembre hasta diciembre un 46% a 49%. Los caudales para un año medio y seco son los más probable de ocurrir por ende están

disponibles o pueden ser aprovechados a lo largo del año y según los resultados obtenidos son los que mayor disminución presentan.

Según el análisis de las curvas de persistencia para cada mes se observó que en los meses en donde mayor disminución podría presentarse es en enero, febrero y marzo, en los meses de junio, julio, agosto y diciembre los caudales se estabilizan y la disminución respecto a los históricos es menor. En los meses de abril, mayo, septiembre, octubre, y noviembre es donde se presenta una alteración en la distribución temporal de los caudales en relación a los históricos. Los meses de transición de fin y comienzo de la época de crecidas son abril y diciembre respectivamente, ahora según los resultados obtenidos de la modelación para el periodo 2020-2050 se muestra un incremento del caudal a partir del mes de septiembre el cual obedece a una alteración de la distribución temporal y adelanto de las lluvias. Como consecuencia de las variaciones de la precipitación y temperatura en el periodo 2020-2050 es probable que los caudales medios mensuales se verán afectados en su magnitud y en su distribución temporal como espacial.

El análisis de oferta y demanda hace un balance del agua disponible en la cuenca, en este caso se estimó la demanda de riego y agua potable para las tres subcuencas definidas en el modelo. La demanda de agua potable en WEAP fue asignada con una prioridad 1 por tratarse del abastecimiento de agua o consumo para personas. Para el periodo 2020-2050 se observa que la demanda de agua potable será cubierta en un 100% en todos los meses en las tres subcuencas, la mayor demanda se concentra en la subcuenca San Andrés, esta zona tiene características urbanas donde la población está incrementando de manera exponencial. La demanda de riego se estimó para la situación más desfavorable considerando que toda el área potencial de las subcuencas se encuentra bajo riego, en el modelo la demanda de riego se le asignó una prioridad 2, la demanda máxima se presenta en la subcuenca Sola, debido a que presenta una mayor área potencial de riego, este tipo de demanda solo es cubierta en un 100% en los meses de enero, febrero y marzo, en el resto de los meses no se cubre en su totalidad siendo los meses más críticos julio, agosto y septiembre. Como conclusión del análisis de la oferta y demanda, se logra cubrir la demanda de agua de la cuenca en un 100% en los meses de enero, febrero y marzo, en el resto de los meses se cubre solo la de agua potable y no la de riego. De acuerdo a los resultados obtenidos el siguiente paso sería realizar una planificación de la demanda de

riego considerando la oferta hídrica disponible, este análisis se encuentra fuera del alcance del presente estudio.

Estos resultados obtenidos en el estudio son una alarma para las autoridades que no pueden ser indiferentes algo que es inevitable, el cambio climático es una realidad a nivel mundial y ya no podemos revertirlo. La adaptación y el apoyarnos de herramientas tecnológicas que nos permitan desarrollar planes a corto, mediano y largo plazo que se basen en un fundamento técnico es la mejor contingencia que podemos tomar ante el cambio climático y de esta manera cuidar y usar eficientemente nuestro recurso vida. El modelo conceptualizado con WEAP es una herramienta para la planificación sostenible de la cuenca Tolomosa, que nos permite tomar decisiones y desarrollar políticas para un manejo eficiente del recurso hídrico de la cuenca y preservarlo para las generaciones futuras.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

6.1.1 Posible influencia del cambio climático en la escorrentía superficial

- Los resultados obtenidos en WEAP con los datos de ambos modelos climáticos MRI-ESMN1 y CRNM-CM5 muestran que el posible cambio climático afectará la intensidad, distribución temporal y espacial de la escorrentía superficial de la cuenca Tolomosa. Esta baja se atribuiría a la disminución de la precipitación sobre la cuenca y al aumento de la temperatura que generaría una mayor evapotranspiración. Las variaciones en la precipitación y temperatura tienen efectos directos sobre la escorrentía superficial de la cuenca
- Para probabilidades de ocurrencia del 10% (año húmedo) durante el periodo 2020-2050 se presenta la menor disminución de la oferta hídrica, sin embargo, para este año ocurre la mayor alteración temporal del régimen con respecto a los histórico (1980-2016), con incrementos probables del 65% en los meses de septiembre hasta noviembre e incluso en los meses abril a junio el caudal podría aumentar entre un 14% a 16%.
- En un año medio con una probabilidad de ocurrencia del 50% se tiene disminuciones considerables en casi todos los meses excepto en los meses de septiembre y octubre en donde el caudal podría incrementar un 27% hasta 36%, en la época de crecidas de enero hasta marzo la disminución del caudal podría ser del 56% hasta 69%, ya en los meses más críticos o de estiaje de mayo hasta agosto la disminución probable del caudal es de 18% a 28%.
- Para una probabilidad del 90% (año seco) la disminución de la oferta hídrica es mucho mayor en todos los meses, en enero hasta marzo el caudal podría disminuir un 65% a 75%, en los meses de mayo hasta junio un 22% hasta 37% y en los meses de septiembre hasta diciembre un 46% a 49%.
- En un año húmedo el caudal medio anual podría disminuir un 5% (MRI-ESNM1) y 14% (CRNM-CM5), en un año medio el caudal anual podría disminuir un 46% hasta 58% y para un año seco el caudal podría disminuir un 61% hasta 70%. Los caudales para un año húmedo son poco frecuentes, mientras que para un año medio y seco son más probable de ocurrir por ende estos caudales son los que están

disponibles y pueden ser aprovechados a lo largo del año y según los resultados obtenidos son los que mayor disminución presentan.

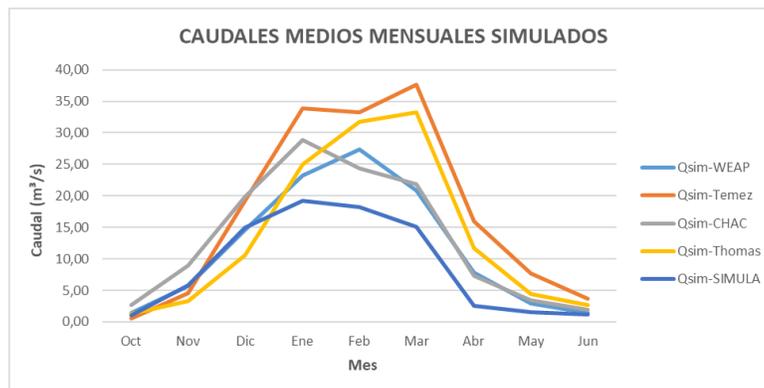
- De acuerdo al análisis de las curvas de persistencia mensual se concluye que en los meses de enero, febrero y marzo es donde mayor disminución del caudal podría presentarse, en los meses de junio, julio, agosto y diciembre los caudales se estabilizan y la disminución respecto a los históricos es menor. Los meses de abril, mayo, septiembre, octubre, y noviembre presentaran una alteración en la distribución temporal con incrementos del caudal, en el mes de abril y mayo existe una probabilidad del 20% al 25% que ocurran caudales superiores a los históricos, en el mes de septiembre y octubre una probabilidad del 50% al 60%. Por otro lado, en el mes de noviembre la probabilidad de que ocurran caudales superiores a los históricos podría ser de 20% aproximadamente.
- En lo referente al balance de la oferta y demanda se concluye que la demanda de agua de la cuenca es cubierta en un 100% en los meses de enero, febrero y marzo, en el resto de los meses se cubre solo la de agua potable y no la de riego siendo los meses más críticos julio, agosto y septiembre. En la subcuenca San Andrés se presenta la mayor demanda de agua potable y en la subcuenca Sola la mayor demanda de riego.
- Se confirma lo señalado por Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) en su quinto informe publicado el año 2014 en donde se mencionan que cambio climático a nivel global es inequívoco y que los principales riesgos e impactos será la reducción del recurso de aguas superficiales y subterráneas. Es gran relevancia que las autoridades locales tomen acciones y trabajen en la formulación de políticas y estrategias para manejo sostenible del agua en la cuenca Tolomosa, considerando al modelo WEAP como una herramienta para la planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático.
- Los resultados obtenidos en el estudio son una alarma para las autoridades que no pueden ser indiferentes algo que es real, el cambio climático es una realidad a nivel mundial y no se puede revertirlo. La adaptación y el uso de herramientas tecnológicas que nos permitan desarrollar planes a corto, mediano y largo plazo y además que estén basados en fundamentos técnicos es la mejor contingencia que

podemos tomar ante el cambio climático y de esta manera cuidar y usar eficientemente nuestro recurso vida.

6.1.2 Sobre la calibración y validación del modelo WEAP

- En base la información disponible se desarrolló un modelo en WEAP para las condiciones históricas del periodo 1980-2016, se ha identificado una estación hidrométrica en la cuenca, debido a la calidad y confiabilidad de los registros se ha utilizado la misma para realizar el proceso de calibración del modelo. La estación hidrométrica utilizada para la calibración es la de San Jacinto.
- Para parametrizar un modelo hidrológico en WEAP de una forma más física de tal forma que represente los componentes del ciclo hidrológico de una cuenca se debe efectuar una combinación de cobertura vegetal y textura con la ayuda de un software SIG.
- De acuerdo a los datos de la estación hidrométrica San Jacinto en el año 1984 en los meses de febrero y marzo se registraron caudales medios mensuales de 120,07 m³/s y 124,97 m³/s, el orden de los picos de caudales de los demás años es de 26 m³/s. en un análisis de la información de las escalas medias diarias y del caudal diario aforado en los meses de febrero y marzo, se observó que estos meses existen datos dispersos que no se correlacionan y se encuentran fuera del comportamiento del resto de mediciones por lo que se obtuvo caudales medios mensuales elevados.
- Durante la calibración los picos registrados en el año 1984 (febrero y marzo) no pudieron ser representados en el modelo y no se los consideraron en la validación del mismo.
Se desconfía de la obtención de los datos de las escalas medias diarias y del caudal diario aforado en estos meses, por esta razón se decidió no tomarlos en cuenta para la calibración y validación del modelo.
- Independiente de la desconfianza que se tiene los picos registrados en el año 1984, surge la incertidumbre del desempeño del modelo WEAP ante la ocurrencia de eventos extremos (picos de caudales). En el presente trabajo no se pudo concluir sobre la eficacia del modelo ante picos elevados porque se desconfía de la información en estos meses (febrero y marzo del 1984) y por esto no se puede sacar conclusiones al respecto.

- El modelo fue calibrado para el periodo 1980 a 1981 utilizando un set de parámetros para cada combinación de cobertura y textura de la cuenca Tolomosa. El modelo WEAP fue calibrado satisfactoriamente mediante el método de prueba y error, alcanzando un coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe de 0,89 correspondiente a un ajuste excelente. La validación del modelo se realizó para el periodo 1982-1984 alcanzando un coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe de 0,65 siendo un ajuste muy bueno. Considerando toda la serie de caudales aforados (1980-1984) se obtuvo un Nash-Sutcliffe de 0,72 con una subestimación de 5,28%.
- Para el periodo de calibración y validación 1980-1983, según la curva de duración o persistencia de los caudales medios mensuales simulados en WEAP representan correctamente las probabilidades de excedencia de los caudales medios mensuales observados.
- De la comparación con estudios anteriores realizados en la cuenca Tolomosa los caudales obtenidos con el modelo WEAP son válidos, los cuales muestran ser consistentes a lo largo del tiempo sin presentar una alteración temporal. Los valores asumidos de los parámetros de calibración del modelo representan el comportamiento hidrológico de la cuenca sobre todo la escorrentía superficial.



- El modelo WEAP se ajusta adecuadamente a las características hidrogeológicas de la cuenca y nos permite obtener resultados aceptables para estudiar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca. A partir de esta modelación se podrán crear escenarios para el análisis de distintas suposiciones en la cuenca.

6.1.3 Sobre las grillas climáticas generadas en el BHSB

- Las grillas climáticas generadas en el BHSB no presentan un buen desempeño en lugares donde no se cuenta con estaciones meteorológicas que fueron consideradas para la elaboración de la grilla.
- Los datos de precipitación obtenidos con la grilla GMET para la cuenca Tolomosa presentan una variación de hasta 55% con respecto a datos registrados por las estaciones que se encuentran cerca y dentro de la cuenca.
- Las grillas climáticas de las variables de temperatura, humedad relativa, velocidad de vientos y horas sol no presentan variaciones significativas respecto a los valores registrados por las estaciones tierra cercanas a la cuenca Tolomosa.

6.1.4 Sobre los modelos climáticos globales CRNM-CM5 y MRI-ESM1

- Los resultados arrojados por los modelos climáticos MPI-ESM1 Y CNRM-CM5 reflejan que hasta el año 2050 es posible que hay una alteración en la intensidad, distribución temporal y espacial de la precipitación de la cuenca Tolomosa, esto debido al posible cambio climático.
- Los valores de precipitación obtenido con el modelo climático CNRM-CM5 en el periodo 2020-2050 respecto al periodo histórico (1980-2016) presentan una reducción en los meses húmedos e incremento en los meses secos abril, mayo, agosto, septiembre y octubre. La disminución promedio de la precipitación en los meses húmedos (diciembre, enero, febrero y marzo) podría ser de hasta 77,1mm y el incremento promedio en los meses secos (abril, mayo, septiembre y octubre) de 23,48mm. De acuerdo al modelo MRI-ESNM1 la disminución de la precipitación en los meses húmedos podría ser de 60mm y el aumento en los meses secos de 29 mm.
- A nivel espacial las subcuencas del río Mena, San Andrés y Sola presentarían variaciones en la intensidad y distribución temporal de la precipitación. La subcuenca San Andrés sería la menos afectada y la sub cuenca Sola en la que se sentirá más los efectos del cambio climático.
- En relación a la temperatura y de acuerdo a los resultados del modelo CRNM-CM5 el incremento de la temperatura promedio anual en la cuenca Tolomosa sería 1,6°C para el periodo 2020-2050. La temperatura media mensual aumentara en

todos los meses, no obstante, en los meses de invierno (junio, julio y agosto) es donde hay un mayor incremento. En el modelo MRI-ESNM1 la temperatura promedio anual podría incrementar 1,4°C

6.1.5 Sobre el modelo WEAP

- La modelación hidrológica del río Tolomosa, en el departamento de Tarija, mediante el uso de la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos WEAP, aporta el conocimiento de la oferta hídrica bajo escenarios de cambios de uso y crecimiento poblacional de la zona y mejora el apoyo a la toma de decisiones, especialmente en instrumentos de planeación regional e integral del recurso hídrico.
- El modelo de la cuenca Tolomosa presentado en este documento constituye una herramienta para analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca dentro del contexto del cambio climático. Sin duda la principal ventaja de la utilización del modelo WEAP es la facilidad para desarrollar escenarios que exploran posibilidades en el manejo de los recursos hídricos, permitiendo la elección del nivel de complejidad según la habilidad del modelador o la accesibilidad a los datos requeridos.
- El modelo conceptualizado con WEAP es una herramienta para la planificación sostenible de la cuenca Tolomosa, que nos permite tomar decisiones y desarrollar políticas para un manejo eficiente del recurso hídrico de la cuenca y preservarlo para las generaciones futuras.

6.2 RECOMENDACIONES

1. Aplicar el modelo hidrológico WEAP construido para de la cuenca Tolomosa en planificación del aprovechamiento de las aguas del embalse San Jacinto con fines de establecer nuevas reglas de operación considerando las demandas actuales y proyectadas tanto de riego como de generación de energía eléctrica.
2. Realizar la calibración de modelo WEAP para la cuenca Tolomosa utilizando las mediciones de los niveles del embalse San Jacinto (periodo de medición de niveles 1989-2019). Adicionalmente se plantea tomar en cuenta las batimetrías realizadas del embalse.
3. Se exhorta al lector utilizar el modelo de la cuenca para realizar estudios de adaptación al cambio climático y a un manejo sostenible del recurso hídrico de la cuenca Tolomosa mediante simulación de escenarios tales como el cambio de cobertura en caso de que se manejen políticas de reforestación, cambio de cultivos, escenarios de crecimiento o cambio en la población de tal forma que se evalué su influencia sobre la escorrentía superficial.
4. Aplicar otros modelos climáticos globales de manera específica en la cuenca Tolomosa considerando las estaciones meteorológicas más cercanas con el objeto de validar los resultados obtenidos en el presente trabajo. Adicionalmente se sugiere utilizar los modelos climáticos empleados en el Balance Hídrico Superficial de Bolivia (BHSB).
5. Antes de utilizar las grillas climáticas GMET (precipitación y temperatura) en un estudio sea cual sea su fin, recomiendo revisar que las estaciones meteorológicas cercanas o dentro del área de estudio hayan sido consideradas para la elaboración de la grilla, debido a que solo tienen un buen desempeño en lugares en donde están ubicadas estaciones que fueron consideradas para la elaboración de la misma.
6. Se insita al lector actualizar el presente estudio y establecer un seguimiento del cambio de coberturas por medio de imágenes satelitales, con el fin de enriquecer la información histórica, y así poder establecer una tendencia clara en cambio y uso del suelo.
7. Al momento de comenzar cualquier estudio de modelación hidrológica de una cuenca, previamente se requiere recopilar toda la información disponible, referente

al lugar en el que se pretende aplicar el modelo, este paso es muy importante para poder construir un modelo que efectivamente represente lo que está sucediendo en la cuenca.

8. Como medidas de adaptación al cambio climático, se proponen las siguientes:
 - La correcta planificación territorial que puede evitar asentamientos humanos en los lugares más vulnerables.
 - Control de deforestación y reforestación puede reducir la severidad de las inundaciones.
 - Mejorar la eficiencia de las infraestructuras de captación de agua
 - La implementación de sistemas de riego, pueden reducir los impactos sobre la agricultura en áreas con precipitación, baja y/o irregular.
9. Analizar la información hidrométrica y meteorológica antes de ser empleada en cualquier tipo de estudio. La calidad de la información es determinante en los resultados que se obtengan en especial cuando se pretenda realizar proyecciones mediante modelaciones hidrológicas.
10. Evaluar el desempeño del modelo WEAP ante picos de caudales mensuales previo análisis y validación de la información hidrométrica.
11. En función a los resultados obtenidos del balance de agua entre la oferta y demanda se recomienda realizar una planificación sostenible de la demanda de riego y agua potable considerando la oferta hídrica disponible, con reglas de operación de los sistemas de riego y un saneamiento adecuado de las áreas potenciales de riego.
12. Del análisis de la demanda de riego y agua potable se recomienda realizar un estudio más a detalle, en el estudio se trató de recopilar la mayor cantidad de información referente a la demanda de agua de la cuenca, sin embargo, por fines del presente trabajo se enfatizó más sobre la oferta hídrica de la cuenca.