



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE CAUDALES
OBTENIDOS MEDIANTE MODELACIÓN
HIDROLÓGICA (HydroBID, WEAP) APLICANDO
ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO, ZONA DE
ESTUDIO CUENCA KATARI Y LAGO MENOR DEL
TITICACA LA PAZ-BOLIVIA.**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF FLOWS OBTAINED
THROUGH HYDROLOGICAL MODELING (HydroBID,
WEAP) APPLYING CLIMATE CHANGE SCENARIO,
KATARI BASIN AND LAKE MINOR OF TITICACA
STUDY, LA PAZ-BOLIVIA.**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:
D. FRANZ DELGADILLO MONTAÑO**

**Dirigido por:
TUTOR: Dr. JUAN ANTONIO PASCUAL
COTUTOR: Dr. MAURICIO VILLAZON GOMEZ**

Alcalá de Henares, a 01 de junio de 2020

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme sabiduría y salud para cumplir un objetivo más de vida.

A mis padres Elizabeth y Wilson por su apoyo, confianza y paciencia durante el tiempo que duró preparar esta investigación.

A Carol Prado por su amor y apoyo incondicional durante el tiempo que duro preparar esta investigación.

A mi Tutor, PhD. Juan Antonio Pascual por su apoyo, colaboración, observaciones y consejos.

A mi tutor, PhD. MSc. Ing. Mauricio F. Villazón por su confianza, amistad, guía, interminable paciencia y por su invaluable aporte de ideas y conocimientos brindados.

Al profesor, PhD. MSc. Ing Mauro Nalesso coordinador del Centro de Soporte HydroBID, por su apoyo y colaboración.

A MSc. Ing. Virgilio Martínez., por su amistad, apoyo y colaboración.

A la Unidad y Gestión del Plan Director de la Cuenca Katari y Lago Menor del lago Titicaca junto al Ministerio de Medio Ambiente y Agua, por el apoyo y colaboración.

¡Muchas Gracias!

Franz Delgadillo Montaña

Madrid, junio del 2020.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. MARCO TEÓRICO	3
3.1. Zona de estudio.....	3
3.2. Disponibilidad de datos	6
3.2.1. Climáticos	6
3.2.2. Caudales.....	8
3.2.3. Tipo de suelo y cobertura vegetal	10
3.3. Modelo hidrológico WEAP.....	12
3.3.1. Modelo de humedad del suelo del Sistema de Evaluación y Planificación del Agua	12
3.3.2. Hidrología de superficie	12
3.4. Modelo hidrológico Hydro-BID.....	14
3.4.1. Cálculos del Modelo de GWLF.....	15
3.5. Cambio climático.....	20
4. METODOLOGÍA	22
4.1. Obtención y procesamientos de datos	23
4.2. Elaboración, calibración y validación de los modelos hidrológicos	26
4.3. Análisis de caudales modelados	26
4.4. Modelación de escenarios, cambio climático	29
5. Resultados.....	29

5.1. Calibración y validación de los modelos hidrológicos.....	29
5.2. Análisis de caudales modelados	32
5.3. Caudales modelados acumulados por cuencas	33
5.4. Factor de escurrimiento.....	36
5.5. Escenario de cambio climático 2019-2039	37
6. DISCUSIONES	40
7. CONCLUSIONES	42
8. BIBLIOGRAFIA	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la cuenca Katari y lago menor del lago Titicaca a nivel Nacional y Sudamérica	4
Figura 2 Ubicación de la cuenca Katari y lago menor del lago Titicaca. Fuente (MMyA, 2006).....	5
Figura 3 Descripción del lago mayor y menor del Titicaca, zona boliviana y peruana, (ALT, 2016)	6
Figura 4 Mapa de disponibilidad de datos climáticos (precipitación, temperatura media).....	7
Figura 5 Ubicación de las estaciones hidrométricas en las cuencas de estudio.	9
Figura 6 Caudales estación Achacachi en el periodo 1980-2016	10
Figura 7 Caudales estación Tambillo en el periodo 2010-2016	10
Figura 8 Visualización de la Interfase de descarga de los mapas de cobertura vegetal 2015 ESA.....	11
Figura 9 Esquema del modelo hidrológico para dos reservorios, 1 y 2. U y l son los límites superior e inferior de irrigación, respectivamente. Esquema a partir de (Yates, Sieber, Purkey, & Huber Lee, 2005).....	14
Figura 10 La representación esquemática del modelo de GWLF modificado de (Hait, Mandel, & Wu, Generalized Watershed Loading Functions, 1996).....	15
Figura 11 Los números de curva se seleccionan como funciones de la humedad antecedente, como se describe en (Hait, 1985).	18
Figura 12 Movimiento de los flujos a través de la red de Corrientes de la AHD (Moreda, Wilhelm, & Castillo, 2014).	20
Figura 13 Diagrama de la metodología de investigación	23
Figura 14 Cuenca delimitada por el modelo HydroBID.	24
Figura 15 Cuencas delimitadas por el modelo WEAP.....	25
Figura 16 Caudales acumulados estación Tambillo, periodo 2011-2016, calibración	31
Figura 17 Caudales acumulados estación Achacachi, periodo 2000-2004, calibración	31
Figura 18 Caudales acumulados estación Achacachi, periodo 2008-2012, validación	31
Figura 19 Serie de tiempo de caudales modelados de la cuenca Katari en el periodo	

1985-2018.....	32
Figura 20 Serie de tiempo de caudales modelados de la cuenca Achacachi en el periodo 1985-2018.....	32
Figura 21 Serie de tiempo de caudales modelados de la cuenca Khara Khota en el periodo 1985-2018.....	33
Figura 22 Serie de tiempo de caudales modelados de la cuenca Puente Internacional en el periodo 1985-2018.....	33
Figura 23 Caudales modelados acumulados cuenca Katari, en el periodo 1985-2018.....	34
Figura 24 Caudales modelados acumulados cuenca Achacachi, en el periodo 1985-2018.....	34
Figura 25 Caudales modelados acumulados cuenca Khara Khota, en el periodo 1985-2018.....	34
Figura 26 Caudales modelados acumulados cuenca Puente Internacional, en el periodo 1985-2018.....	35
Figura 27 Variaciones de precipitaciones mensuales en el periodo de proyección de 2046-2065.....	37
Figura 28 Variaciones de precipitaciones mensuales en el periodo de proyección de - 2046-2065.....	37
Figura 29 Análisis de volumen de agua a nivel mensual por cuencas.....	38
Figura 30 Análisis de caudales acumulados a nivel mensual, cuenca Katari.....	38
Figura 31 Análisis de caudales acumulados a nivel mensual, cuenca Achacachi.....	39
Figura 32 Análisis de caudales acumulados a nivel mensual, cuenca Khara Khota.....	39
Figura 33 Análisis de caudales acumulados a nivel mensual, cuenca Puente Internacional.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Identificación de las estaciones de precipitación y temperatura en la Cuenca Katari	7
Tabla 2 Disponibilidad de datos climáticos y hidrométricos	8
Tabla 3 Proyecciones del promedio mundial del calentamiento en superficie y del aumento del nivel del mar al final del siglo XXI	21
Tabla 4 Comparación de áreas por cuencas.....	26
Tabla 5 Disponibilidad de datos climáticos e hidrométricos	26
Tabla 6 Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe	27
Tabla 7 Estadísticas de las funciones objetivos modelo WEAP	30
Tabla 8 Estadísticas de las funciones objetivos modelo HydroBID	30
Tabla 9 Estadística de los caudales modelados con WEAP y HydroBID	35
Tabla 10 Factores de escurrimiento por cuenca	36
Tabla 11 Parámetros de clasificación de uso de suelo.....	36

RESUMEN

En el presente estudio se realizó el análisis de los caudales modelados por los modelos hidrólogos HydroBID y WEAP, en las cuencas Katari, Achacachi, Khara Khota y Puente internacional que desembocan en el lago menor del Titicaca. La metodología fue utilizar las herramientas delimitación de cuencas, sus mapas de coberturas y tipo de suelo de cada modelo. El periodo de análisis se realizó entre los años 1985-2018 a un paso mensual. También se implementó un escenario de cambio climático obteniendo incrementos y decrementos mensuales en la precipitación [mm] y temperatura [C] con un escenario B1 low, mediante un ensamble de 9 modelos de circulación globales. Los modelos hidrológicos presentaron resultados de sus eficiencias en su calibración y validación muy similares debido que los dos modelos manejan un cálculo similar de transformación de lluvia-escorrentía. En el análisis de todo el periodo, el modelo HydroBID subestimó caudales altos respecto a los caudales modelados con el modelo WEAP, produciendo un error volumétrico en el rango de 5.9% a 32.2%. También se obtuvieron los factores de escorrentía para cada cuenca notando que el modelo HydroBID tiende a generar mayores valores de escorrentía que el modelo WEAP. En el análisis del escenario de cambio climático con el modelo WEAP se obtuvo un aumento de volumen de agua en las cuencas en el rango 1% al 6% en los periodos de análisis 1985-2018 y 2019-2052, estos resultados se deben que en el escenario no se consideró la demanda de agua futura por el incremento poblacional como tampoco el derretimiento de algunos glaciares que son de mucha importancia a la hora de generar escorrentía por derretimiento de estos.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cuidado y la protección de los recursos hídricos, y en especial del agua dulce, se ha convertido en una tarea primordial no sólo para los países, sino también para los organismos intergubernamentales tales como la Organización de las Naciones Unidas, dado que se trata de un problema que está directamente relacionado con el desarrollo y la salud humana (UNESCO, 2004).

En el presente estudio, se estudiará la Cuenca Katari y lago menor del Titicaca, ubicada en La Paz - Bolivia, que presenta una problemática ambiental en el área. Esta presenta una gran preocupación para las autoridades y pobladores, debido a que la basura generada en la Cuenca Alta, en los ríos que cursan la ciudad de El Alto, Viacha, Laja y parte de Pucarani contamina suelos y fuentes de agua, especialmente en la Bahía de Cohana (Ibañez, 2019).

Conjunto a la Unidad de Gestión de la Cuenca Katari, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), con el propósito de definir acciones con miras a descontaminar la Cuenca Katari y lago Menor del Titicaca, se propuso realizar una modelación hidrológica para la obtención de un balance hídrico.

Percibimos una gran oferta de modelos hidrológicos disponibles, uno de los más usados en Bolivia, es el modelo hidrológico WEAP (Water Evaluation and Planning), usado en el Balance Hídrico Nacional 2018 (MMAyA, 2018), actualmente se está implementado el modelo hidrología HydroBID desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para dar soporte a la región de Latino América y el Caribe (LAC) en el manejo y planificación del recurso hídrico (Iagua, 2017).

En la presente investigación se llevará a cabo el análisis de los caudales realizado por los dos modelos para poder observar las debilidades y fortalezas de cada uno de ellos ante la transformación de lluvia-escorrentía, utilizando sus herramientas de autodelimitación de cuencas, sus propios mapas de uso de suelo y tipo de suelo incorporados en sus respectivas bases de datos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar los caudales modelados a nivel mensual, en el periodo 1985-2018, mediante los modelos hidrológicos WEAP e HydroBID y aplicar escenarios a futuro de cambio climático, en la cuenca Katari y lago menor del lago Titicaca, La Paz-Bolivia.

2.2. Objetivos específicos

- Obtención y procesamiento de datos climatológicos e hidrométricos
- Implementación, calibración y validación del modelo hidrológico WEAP
- Implementación, calibración y validación del modelo hidrológico HydroBID
- Análisis de caudales modelados
- Modelación de escenarios de cambio climático y análisis

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Zona de estudio

La zona de estudio (cuenca Katari) se encuentra ubicada en América del sur en el país de Bolivia (Figura 1), dentro del departamento de La Paz, a una altura entre los 3800 a 5200 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y cuenta con una superficie aproximada de 5423 km². Esta cuenca descarga sus aguas al Lago Titicaca donde la dirección del curso principal es al noroeste (Figura 2).

La zona oriental de la cuenca presenta una mayor densidad poblacional, en la que se localiza la ciudad de El Alto con 848452 habitantes (INE, 2012). Por otro lado, la zona Sur de la cuenca, presenta varias comunidades, cada una entre 1000 y 2000 habitantes (MMyA, Plan director de la cuenca Katari, 2006).

La demanda hídrica exigida por las diferentes poblaciones y sus respectivas actividades económicas, llega a 98 millones de metros cúbicos de agua aproximadamente. Los 2/3 de dicha cantidad de agua se emplea para el uso doméstico (MMyA, Plan director de la cuenca Katari, 2006).

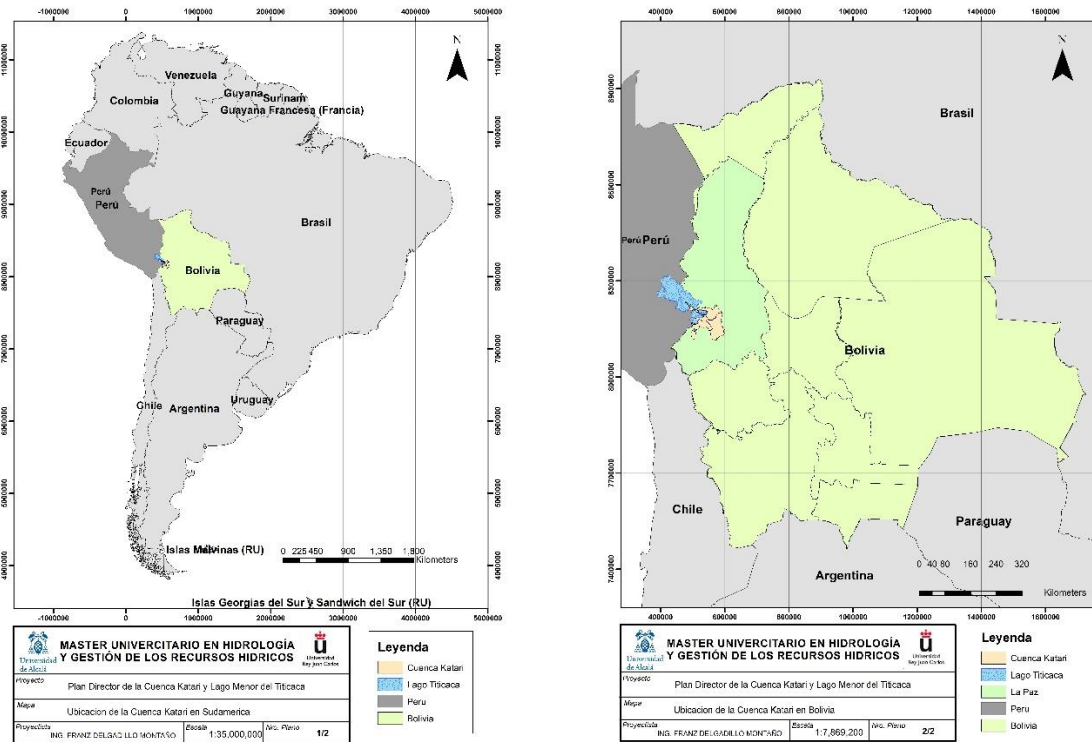


Figura 1 Ubicación de la cuenca Katari y lago menor del lago Titicaca a nivel Nacional y Sudamérica

La situación del agua, principalmente en la cuenca Katari presenta niveles de contaminación alta, resultado de la generación de basura por parte de poblados y la presencia de abono cerca de los lechos de los ríos. Otro problema que asola esta cuenca es las sequías que se desarrollan debido a escasez de precipitaciones, que son importantes para el desarrollo de la zona (OCHA, 2016).

Otro aspecto importante en la cuenca, son las inundaciones que se presentan en su parte baja durante temporadas de lluvias altas (MMyA, Plan director de la cuenca Katari, 2006).

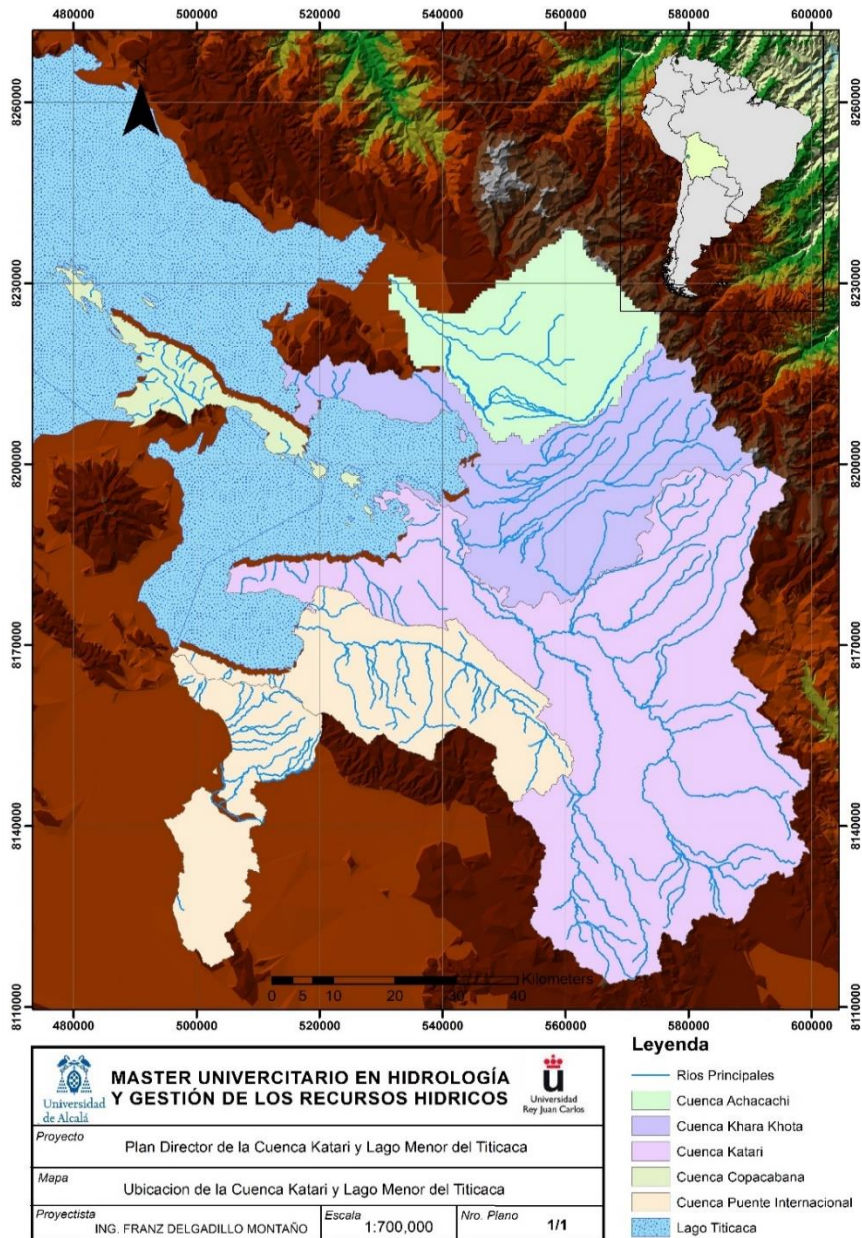


Figura 2 Ubicación de la cuenca Katari y lago menor del lago Titicaca. Fuente (MMyA, 2006)

Observamos en el mapa que el lago Titicaca se divide en dos masas de aguas Lago Mayor y Lago Menor (Figura 3), a su vez estas masas de aguas están restringidas por los límites nacionales de los países de Bolivia y Perú.

En el sector boliviano los principales ríos que desembocan en el Lago Titicaca son el Huaycho (727 Km²), el Suchez y el Keka de (883 Km²) al norte y este; el Katari (2022 Km²) con 10m³/s y el Tiahuanaco (452 Km²) al sur. El único efluente es el río Desaguadero, que comienza en el lago Titicaca y después de un recorrido de 398 km desemboca en el lago Poopó, con una diferencia de altura de 124 m (ALT, 2016).

Los principales centros urbanos son Puno y Juliaca en la parte peruana y El Alto y

Oruro en el sector boliviano. Las principales poblaciones bolivianas en la cuenca del lago Titicaca son: El Alto, Achacachi, Ancoraimes, Comanche, Puerto Acosta, Puerto Carabuco, Viacha, Guaqui, Tiahuanacu, Desaguadero, Pucarani, Laja, Batallas, Puerto Pérez, Copacabana, San Pedro de Tiquina y Tito Yupanqui. La población aproximada alcanza a 1.181.350 habitantes (ALT, 2016)



Figura 3 Descripción del lago mayor y menor del Titicaca, zona boliviana y peruana, (ALT, 2016)

3.2. Disponibilidad de datos

3.2.1. Climáticos

Los datos de precipitación y temperatura utilizados en la modelación provienen de la Unidad y Gestión de la Cuenca Katari, liderado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Los datos disponibles por esta unidad fueron precipitación, temperatura mínima y máxima en el periodo de 1985-2018, con un paso de tiempo diario, donde la unidad se encargó de realizar un rellenó de datos faltantes mediante regresiones múltiples, aplicando un control de calidad a las variables rellenadas como pruebas de homogeneidad y tendencias (Martinez, 2019).

Las variables de humedad relativa, velocidad de viento y fracción de nubosidad fueron obtenidas por el Balance Hídrico Nacional 2016, donde se recolectaron y procesaron estos datos para el cálculo de la evapotranspiración potencial según la ecuación de FAO Penman-Monteith.

La disponibilidad de las estaciones se muestra en la (Figura 4, Tabla 2) donde visualizamos 10 climáticas y 2 hidrométricas en las cuencas

de estudio (Tabla 1).

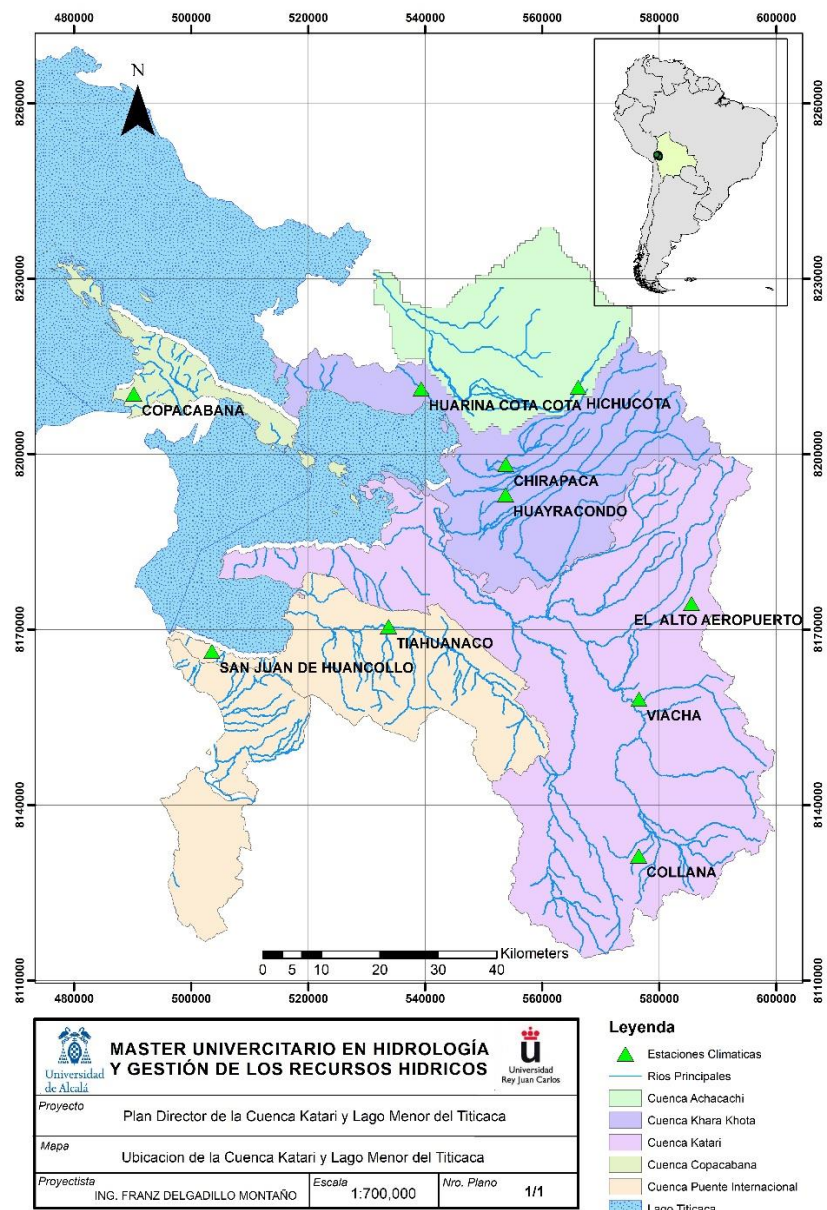


Figura 4 Mapa de disponibilidad de datos climáticos (precipitación, temperatura media).

Tabla 1 Identificación de las estaciones de precipitación y temperatura en la Cuenca Katari

Nro.	Estación
1	VIACHA
2	TIWANACU
3	COLLANA
4	EL ALTO AEROPUERTO
5	SAN JUAN DE HUANCOLLO
6	CHIRAPACA
7	HUAYRACONDO
8	HUARINA COTA COTA
9	HICHUCOTA
10	COPACABANA

3.2.2. Caudales

Los caudales fueron obtenidos mediante el Balance Hídrico Nacional 2016, donde se realizó una modelación por unidades hidrográficas en todo el país. Los caudales para este proyecto fueron procesados por el centro de investigación IHH (Instituto de Hidráulica e Hidrología) Universidad San Andrés, Bolivia. Este centro de investigación obtuvo datos a paso diarios de los caudales de las estaciones Tambillo y Achacachi (Figura 5).

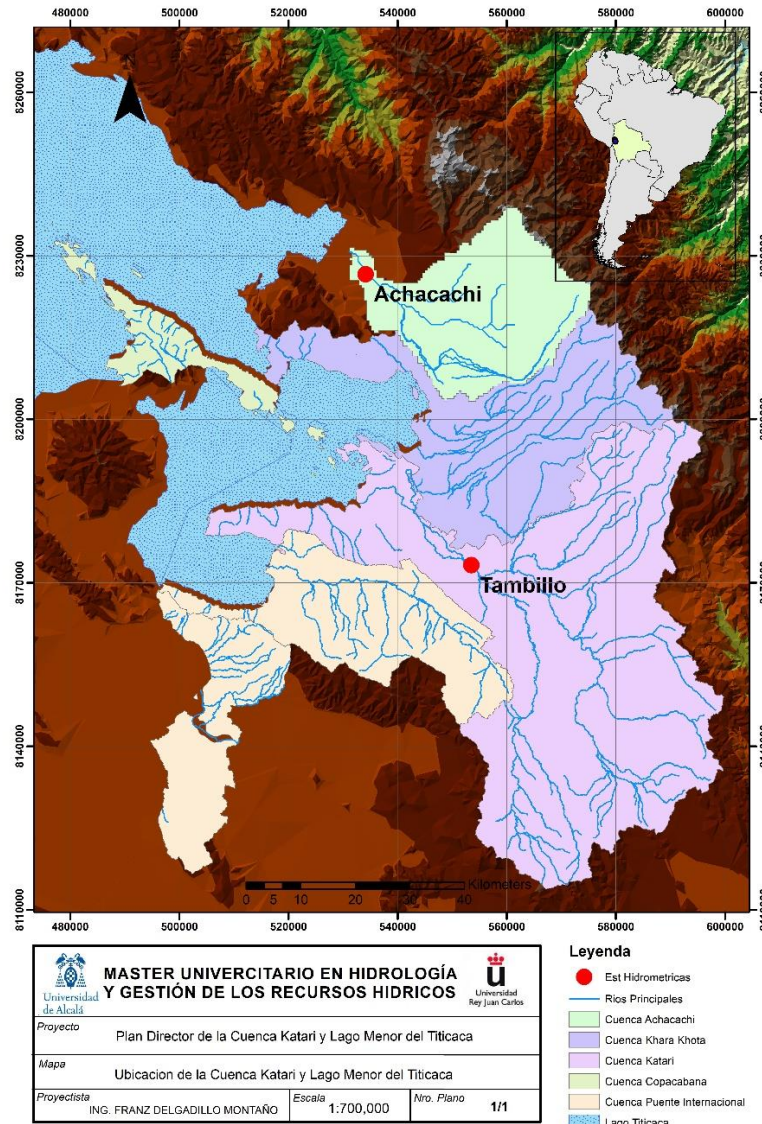


Figura 5 Ubicación de las estaciones hidrométricas en las cuencas de estudio.

Los periodos de caudales de las estaciones hidrométricas no se encuentran rellenas, varia su disponibilidad de datos entre el periodo 1980-2016, se puede observar en las siguientes (Figura 6, Figura 7) de las estaciones hidrométricas Achacachi y Tambillo, según el Balance Hídrico Nacional 2016.

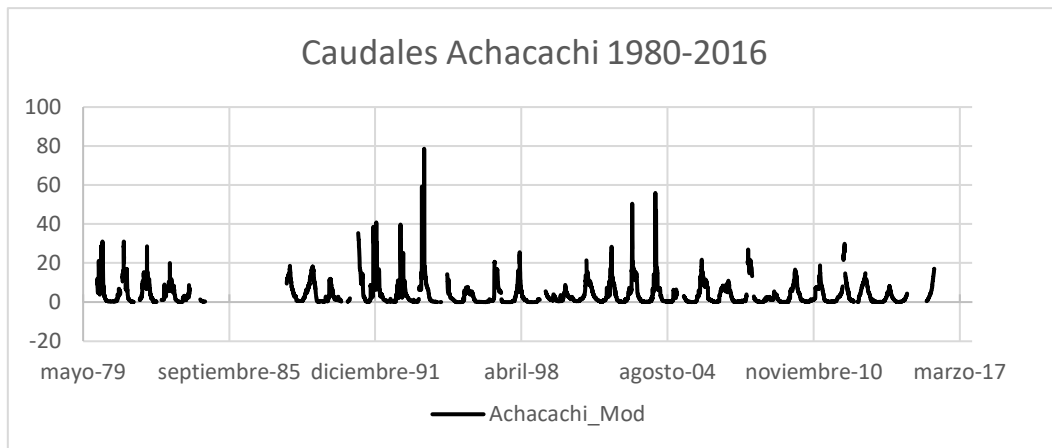


Figura 6 Caudales estación Achacachi en el periodo 1980-2016

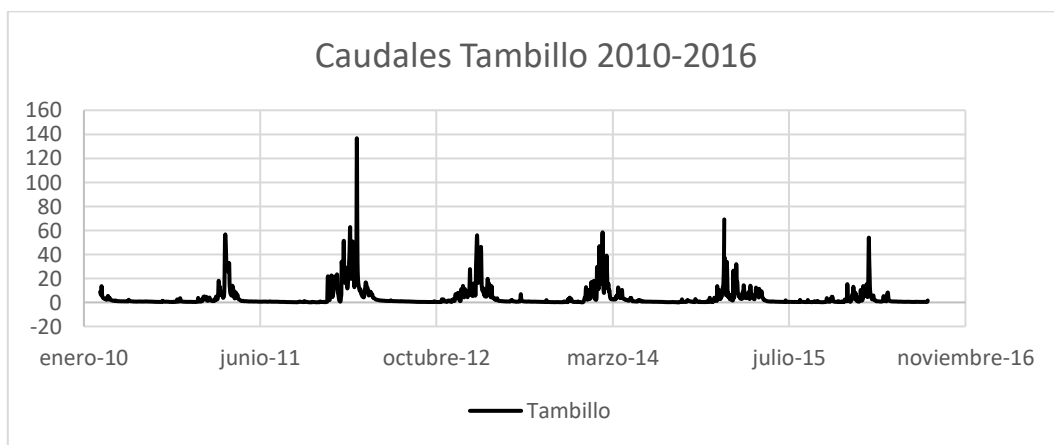


Figura 7 Caudales estación Tambillo en el periodo 2010-2016

3.2.3. Tipo de suelo y cobertura vegetal

Modelo HydroBID

Los datos de la cobertura terrestre dividen la superficie de la tierra en diferentes tipos de coberturas, incluyendo tierras adecuadas para agricultura, humedales y bosques; cuerpos de agua; y nieve y hielo permanentes. La cobertura terrestre en cada celda (grid) se indexa a las cuencas de la Analytical Hydrology Dataset (AHD) para proveer el área de cada una de los 24 tipos de cobertura que se encuentran en cada cuenca. Las celdas de la cobertura terrestre en cada cuenca se indexan a los tipos de suelo sobre los que yacen. Los datos de la cobertura terrestre usados para este estudio se obtuvieron del United States Geological Survey (USGS). La clasificación de uso de tierras se describe en <http://landcover.usgs.gov/pdf/anderson.pdf>. (Nalesso & Coli, 2017)

Los datos de suelos para el modelo HydroBID fueron según la Base de Datos Armonizada Mundial de Suelos (HWSD, por sus siglas en inglés)(<http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soildatabase/>). Puede ser usada para parametrizar números de curva para la región de Latino América y el Caribe (LAC). La HWSD tiene los parámetros de suelo necesarios para el modelo basado en el GWLF de cada uso de tierra dentro de cada cuenca de la AHD. La HWSD combina vastos volúmenes de actualizaciones de información de suelos, regionales y nacionales, con la escala 1:5.000.000 del Mapa Digital Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO. La capa de los datos del suelo se sobrepone a las cuencas de la AHD para determinar el tipo de suelo dominante en la cuenca. Hay cuatro tipos de grupos hidrológicos de suelos: A, B, C y D. El tipo A corresponde al suelo con alta filtración y el tipo D corresponde a suelos con pobre filtración y por lo tanto con tasas de filtración bajas. (Nalesso & Coli, 2017)

Modelo WEAP

La cobertura vegetal que utiliza el modelo WEAP está realizada por la Agencia Espacial de la Unión Europea (ESA) con una resolución 450 m (Figura 8), con 28 clases de coberturas terrestres, las cuales se agrupan en 9 categorías por defecto en WEAP.

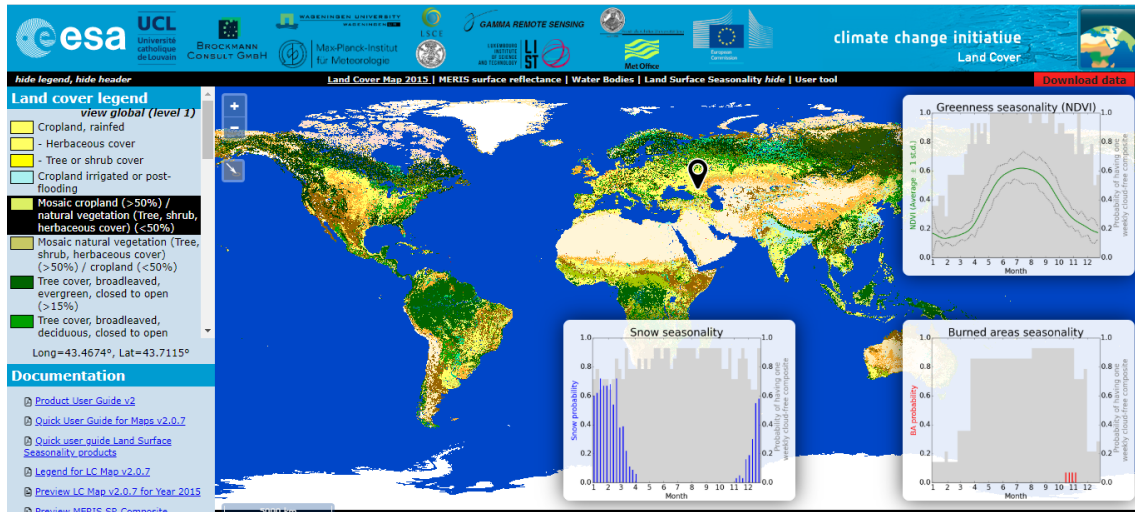


Figura 8 Visualización de la Interfase de descarga de los mapas de cobertura vegetal 2015 ESA.

3.3. Modelo hidrológico WEAP

3.3.1. Modelo de humedad del suelo del Sistema de Evaluación y Planificación del Agua

Se aplica el modelo hidrológico semidistribuido de humedad del suelo, del Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP). El esquema es unidimensional, con una estructura de balance hídrico desagregada a escala de subcuenca, en referencia a los procesos físicos, los datos de entrada (precipitación, evapotranspiración, topografía, cobertura/uso de suelo, áreas irrigadas, sitios de extracciones, datos físicos), y los resultados (Yates, Sieber, Purkey, & Huber Lee, 2005). La aplicación del modelo dentro la plataforma WEAP provee un ambiente para el posterior análisis de relaciones oferta-demanda (Soria, 2017)

El flujo total se cuantifica a través de dos reservorios (cubetas) verticales, mediante análisis del flujo superficial, las pérdidas por evaporación, la infiltración, la percolación y el flujo base. El modelo transmite la percolación profunda hacia un cuerpo de agua superficial o directamente hacia el acuífero subterráneo, de acuerdo a las características del sistema observado. 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 (CCGU-SEI, 2009). La representación de los procesos hidrológicos tiene un nivel de agrupamiento que hace válida la aplicación del modelo dentro de una escala temporal mensual (CCGU-SEI, 2009).

3.3.2. Hidrología de superficie

La estructura del modelo describe a través de representaciones empíricas los procesos de evapotranspiración, escorrentía superficial y subsuperficial, infiltración y percolación profunda, en una conceptualización basada en las ideas del modelo Watbal (Yates S. , 1994). El balance hídrico es calculado en cada fracción de uso o cobertura j de las X áreas fraccionales (reservorios horizontales) 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 (Yates, Sieber, Purkey, & Huber Lee, 2005):

$$Sw_j \frac{dh_{1,j}}{dt} = Pe(t) - ET(t) - Qs(t) - Qss(t) - Qp(t) \quad \text{Ec. 1}$$

donde Sw_j , j [L] es un estimado de la capacidad efectiva de almacenamiento de agua en el suelo para cada j . El almacenamiento relativo de agua en el suelo $h1, j$, representa

una fracción del total de almacenamiento efectivo en el reservorio "1"; $h_{1,j}$ varía entre 0 (punto de marchitez permanente) y 1 (capacidad de campo). Pe es la precipitación efectiva total acumulada en el paso de tiempo t , ET es la evapotranspiración, Q_s es la escorrentía superficial, Q_{ss} es la escorrentía subsuperficial, Q_p es la percolación profunda.

La ecuación siguiente presenta la expresión desarrollada por (Yates, Sieber, Purkey, & Huber Lee, 2005), donde RRF [adimensional] es el factor de resistencia al escurrimiento, con los valores más bajos relacionados a las tasas más altas de escorrentía superficial (suelos sin cobertura vegetal). En la formulación original, RRF era el índice de área foliar LAI . ks_j [L T] es un estimado de la conductividad saturada en el reservorio superficial. f_j [adimensional] es un parámetro de calibración relacionado al tipo de suelo, cobertura y topografía, que define la proporción que escurre horizontalmente (f_j) o verticalmente ($1 - f_j$):

$$Sw_j \frac{dh_{1,j}}{dt} = Pe(t) - ET_o(t) k_{c,j}(t) \left(\frac{5h_{1,j} - 2h_{1,j}^2}{3} \right) - Pe(t) h_{1,j}^{RRF_j} - f_j ks_j h_{1,j}^2 - (1 - f_j) ks_j h_{1,j}^2$$

Ec. 2

Para cuantificar la suma de los aportes de Q_s y Q_{ss} desde el reservorio "1" en cada subcuenca de área A_j , la expresión para la variable resultante Q_1 es:

$$Q_1(t) = \sum_{j=1}^N A_j [Pe(t) h_{1,j}^{RRF_j} + f_j ks_j h_{1,j}^2] \quad \text{Ec. 3}$$

En aplicaciones donde se asume que no existe recarga hacia el nodo del acuífero, con ks_2 [L T⁻¹] representando la conductividad hidráulica en el reservorio "2" (valor constante para toda la cuenca, por lo que no incluye el subíndice j), el caudal del reservorio subterráneo es (SEI, 2015):

$$Dw \frac{dh_2}{dt} = \sum_{j=1}^N (1 - f_j) ks_j h_{1,j}^2 - ks_2 h_2^2 \quad \text{Ec. 4}$$

donde Dw [L] es la percolación profunda desde el reservorio superficial. Luego, la aproximación a la descripción del flujo base Q_G se expresa:

$$Q_G(t) = \sum_{j=1}^N A_j (ks_2 h_2^2) \quad \text{Ec. 5}$$

Para el caso de la cuenca situada aguas abajo, con recarga hacia el reservorio aluvial (nodo del acuífero), se omite el flujo desde el reservorio subterráneo ($ks_2 h_2$) y la recarga expresada por la percolación (Perc) [L³ T⁻¹] es (Yates, Sieber, Purkey, &

Huber Lee, 2005):

$$\text{Perc} = \sum_{j=1}^N A_j (1-f_j) k_{s_j} z_{1,j}^2 \quad \text{Ec. 6}$$

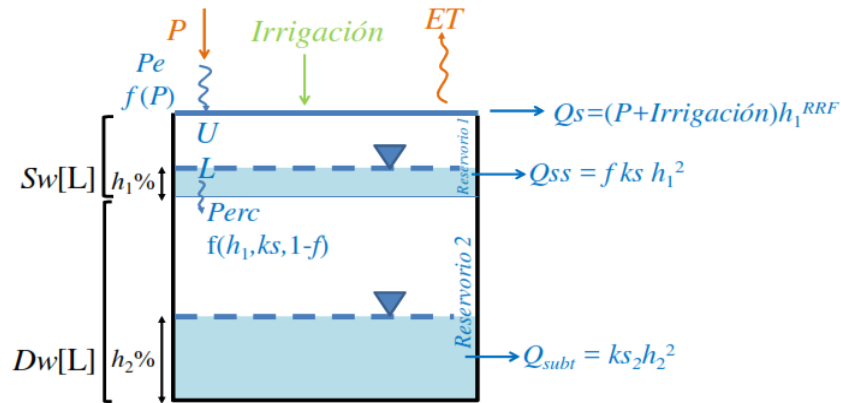


Figura 9 Esquema del modelo hidrológico para dos reservorios, 1 y 2. U y L son los límites superior e inferior de irrigación, respectivamente. Esquema a partir de (Yates, Sieber, Purkey, & Huber Lee, 2005)

3.4. Modelo hidrológico Hydro-BID

Hydro-BID está basado en el muy conocido modelo GWLF (Función de Carga de Cuenca Generalizada) (Hait, 1985) (Hait, Mandel, & Wu, 1996) y mejorado por la metodología de tiempo de retardo-enrutamiento RTI. El modelo de precipitación-escorrentía componente de GWLF se aplica a unidades de cuencas pequeñas al tomar en consideración los usos de tierras y las condiciones del suelo dentro de la cuenca (Moreda & Wilhelm, 2014).

El flujo que se genera de cada cuenca, incluyendo las contribuciones de aguas subterráneas poco profundas o flujo base, se dirige a través de las redes de corrientes definidas por la AHD. La arquitectura del modelo distribuido proporciona un alto nivel de escalabilidad. Los impactos del cambio climático en recursos hídricos pueden ser simulados en escalas tan pequeñas como una cuenca individual AHD o a través de todas las áreas de captación de una cuenca entera (Moreda & Wilhelm, 2014).

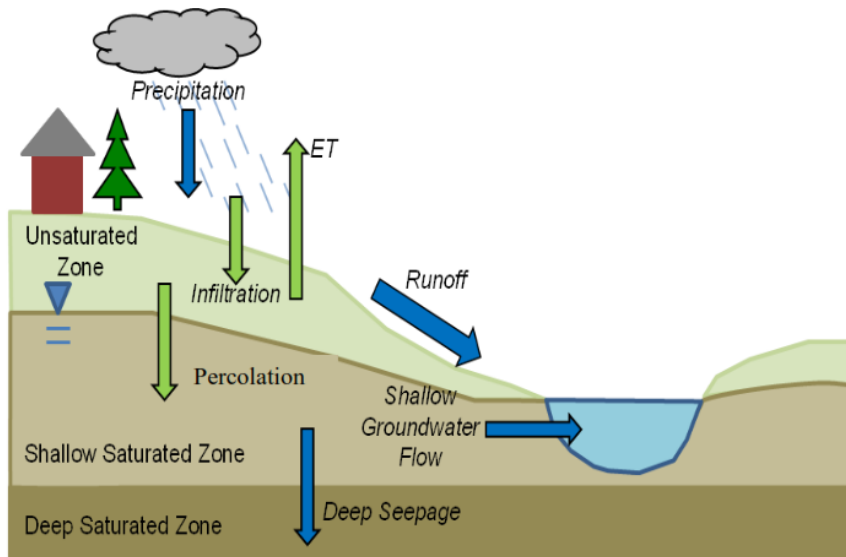


Figura 10 La representación esquemática del modelo de GWLF modificado de (Hait, Mandel, & Wu, Generalized Watershed Loading Functions, 1996)

La (Figura 10) es una representación conceptual de una cuenca de captación con capas de suelo saturadas y no saturadas tal como se utiliza en GWLF. El modelo calcula la escorrentía y los flujos base por cuenca de captación: la escorrentía se genera en forma de exceso de infiltración y el flujo base es una liberación gradual de la capa saturada. Tras tomar en cuenta la escorrentía proveniente de las precipitaciones, toda agua que excede un volumen calculado de evaporación se infiltra a la capa no saturada. Con el tiempo, el agua infiltrada se pasa desde la capa no saturada hacia abajo para reponer el volumen almacenado de la capa saturada. El agua de la capa saturada entra en el canal de corriente como flujo de base donde se combina con la escorrentía de la cuenca y otros flujos de entrada provenientes de las cuencas de aguas arriba para proporcionar el volumen de flujo de corriente para el día. Cabe destacar que la capa saturada, o agua disponible como flujo de base, puede agotarse por medio de la filtración a un acuífero subterráneo más profundo (Moreda & Wilhelm, 2014).

3.4.1. Cálculos del Modelo de GWLF

Esta sección describe las ecuaciones usadas para calcular cada componente del modelo deshielo, evapotranspiración potencial, escorrentía, percolación, flujo y tránsito / propagación como provisto por (Hait, Mandel, & Wu, 1996)

Deshielo

El paso inicial en el proceso de ablación de la nieve acumulada es clasificar la precipitación bien como lluvia líquida o lluvia congelada/nieve. Esta clasificación se realiza comparando la media de temperatura diaria, T_t , con un valor límite, usualmente

tomado como 0° C. El balance de la cobertura de nieve del área en estudio es dado como (Moreda & Wilhelm, 2014).

$$SNO_t = SNO_{t-1} + R_t - SNO_{mlt} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde SNO_t es el contenido de agua de la capa de nieve en un día dado

R_t es la cantidad de precipitación en un día

SNO_{mlt} es la cantidad de deshielo estimada como

$$SNO_{mlt} = 0.45T_t \quad \text{Ec. 8}$$

El agua de deshielo se trata como lluvia para generar la infiltración y también percolación al subsuelo. Para modelos basados en cuencas hidrográficas grandes, el cálculo del agua de deshielo se implementa en áreas subdivididas por delimitaciones de elevación para así tener en cuenta la cobertura de nieve no uniforme debido a las diferencias de elevaciones. Sin embargo, para la aplicación del modelo en un área pequeña, tales como cuencas de captación de la AHD, se espera una cobertura uniforme (Moreda & Wilhelm, 2014).

Evapotranspiración Potencial

El GWLF utiliza el método de estimación del potencial de evapotranspiración (PET, por sus siglas en inglés) desarrollado por (Hamon, 1961), el cual usa la temperatura media diaria y el número de horas de luz diurna para calcular PET:

$$PET_t = \frac{0.2H_t^2 e_t}{T_t + 273} \quad \text{Ec. 9}$$

En esta ecuación, H_t, es el número de horas de luz solar por día durante el mes que contenga el día t: e_t es la presión de vapor de agua en saturación en milibars en el día t y T_t es la temperatura en el día t (° C). Cuando T_t ≤ 0, PET_t está dispuesta a cero. La presión de vapor de agua saturada puede ser aproximada como en (Bosen, 1960):

$$e_t = 33.8639[(0.00738T_t + 0.8072)^2 - 0.000019(1.8T_t + 48) + 0.001316] \quad T_t > 0 \quad \text{Ec. 10}$$

El número total de horas de luz solar se calcula como (Forsythe, 1960):

$$H_t = \frac{2\text{Cos}[-\tan\delta \tan\phi]}{\omega} \quad \text{Ec. 11}$$

donde H_t= horas de luz solar

δ es la declinación solar en radianes

φ es la latitud geográfica en radianes

ω es la rotación angular de la tierra.

La PET se ajusta entonces en base al uso de tierras/suelos y condiciones de la cobertura

utilizando un factor de cobertura

$$PET_{adj(t)} = CV * PET_t \quad \text{Ec. 12}$$

Donde PETAdj(t) es la PET de cobertura ajustada, y CV es el factor de cobertura.

Los valores CV dependen de la cobertura vegetal y de cultivos. La evapotranspiración real es calculada de la PET de cobertura ajustada, pero está limitada por la disponibilidad de agua en la humedad del suelo (Moreda & Wilhelm, 2014).

Escorrentía

La escorrentía superficial generada tanto de la lluvia como del deshielo se calcula usando la ecuación del número de curva del U. S. Soil Conservation Service:

$$RO_t = \left(\frac{R_t - 0.2D_t}{R_t + 0.8D_t} \right) \quad \text{Ec. 13}$$

donde RO_t es la escorrentía (cm)

R_t es la suma de lluvia y deshielo

D_t es el parámetro de detención, calculado de la forma siguiente

$$D_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4 \quad \text{Ec. 14}$$

Donde CN_t es el número de curva asignado por uso de suelos y ajustado cada día.

Los números de curva son asignados a cada categoría individual de uso de suelos y al grupo hidrológico del suelo correspondiente considerado en el modelo. Por ejemplo, los usos de las tierras de áreas de selvas/bosques que yacen sobre suelos de buen drenaje tendrán un número de curva diferente que el mismo uso de tierras que las que yacen sobre suelos de pobre drenaje. Aunque los números de curva están establecidos dentro del modelo antes de correr el modelo, cada día el número de curva para un uso de tierras/grupo de suelos es modificado en base a la condición de humedad antecedente del suelo, tal como se muestra en la (Figura 11) siguiente:

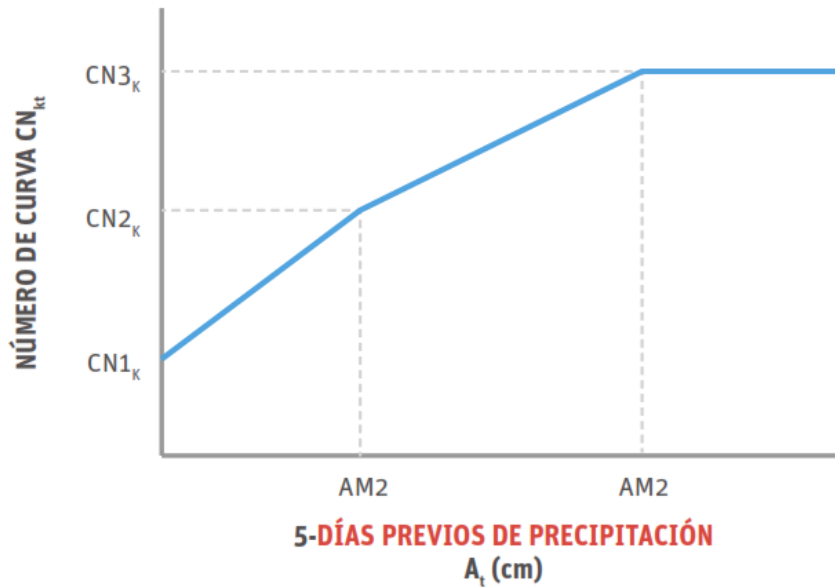


Figura 11 Los números de curva se seleccionan como funciones de la humedad antecedente, como se describe en (Hait, 1985).

Para calcular el número de curva para un día determinado, la humedad antecedente del suelo se calcula acumulando la lluvia y el deshielo de los últimos 5 días:

$$Amc5_t = \sum_{x=1}^5 R_{(t-x)} \quad \text{Ec. 15}$$

donde $Amc5_t$ es la precipitación antecedente de los últimos 5 días.

Los números de curva para condiciones de humedad antecedente secas, promedio y húmedas son $CN1_k$, $CN2_k$, y $CN3_k$, respectivamente. En base al número de curva real para el día t , $CN2_k$, es seleccionado como una función lineal de la precipitación antecedente de 5 días $Amc5_t$ dada en la Ecuación 15.

El modelo requiere especificar $CN2_k$. Los valores para $CN1_k$ y $CN3_k$ son calculados de las aproximaciones de (Hawkins, 1978):

$$CN1_k = \frac{CN2_k}{2.334 - 0.01334 CN2_k} \quad \text{Ec. 16}$$

$$CN3_k = \frac{CN2_k}{0.4036 - 0.0059 CN2_k} \quad \text{Ec. 17}$$

Percolación

Se calculan los balances diarios de agua dentro de ambos compartimientos del suelo. La ecuación para la capa no saturada es como sigue:

$$U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - P_t \quad \text{Ec. 18}$$

En forma similar, el balance de agua para el área saturada se calcula de la manera siguiente:

$$S_{s+1} = S_t + P_t - G_t - D_t \quad \text{Ec. 19}$$

En la ecuación anterior, U_t y S_t son las humedades del suelo de las zonas no saturada y la zona de poca profundidad en el comienzo del día t , y Q_t , E_t , P_t , G_t , R_t , M_t y D_t son la escorrentía de la cuenca, la evapotranspiración real, la percolación hacia la zona saturada poco profunda, el flujo/volumen de aguas subterráneas hacia el arroyo (i.e., flujo base), y la infiltración hacia la zona saturada profunda, respectivamente, en el día t (cm).

La percolación ocurre cuando el agua en la zona no saturada sobrepasa la capacidad disponible de agua del suelo U^* (cm):

$$P_t = \text{Max}(0, (U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t)) \quad \text{Ec. 20}$$

La capacidad de agua del suelo U^* tiene que ser definida como una característica de la capa de suelo no saturada. Este parámetro puede estimarse a partir de esta propiedad del suelo.

La evapotranspiración está limitada por la humedad disponible en la zona no saturada:

$$E_t = \text{Min}((CV_t * PET_t), (U_t + R_t + M_t - Q_t)) \quad \text{Ec. 21}$$

Tal como en (Haan, 1972), la zona saturada poca profunda es simulada como un embalse lineal simple. El flujo/volumen de agua subterránea y la infiltración profunda se calculan de la manera siguiente:

$$G_t = rS_t \quad \text{Ec. 22}$$

$$D_t = sS_t \quad \text{Ec. 23}$$

Donde r y s son las constantes de recesión de agua subterránea y de percolación, respectivamente (dia^{-1}).

Estos dos parámetros tienden a tener una alta correlación.

Flujo

El flujo total generado por la cuenca de captación, F_t , es la suma de la escorrentía (RO_t) y del flujo del agua subterránea (G_t):

$$F_t = RO_t + G_t \quad \text{Ec. 24}$$

Cálculo Hidráulico

Considere la red de cuencas hidrográficas mostradas en la (Figura 12 Movimiento de los

flujos a través de la red de Corrientes de la AHD (Figura 12). Los flujos que se generan para cada cuenca son dirigidos a lo largo de cada corriente hasta la salida de la cuenca o a alguna cuenca aguas abajo basados en un tiempo de retardo pre calculado. El tiempo de retardo se define como el tiempo tomado por el flujo generado en una determinada cuenca para alcanzar la cuenca aguas abajo y se calcula como un producto de la longitud del arroyo dividida por la velocidad promedio. Mientras que la longitud del arroyo se obtiene directamente de la red de corrientes (AHD), la velocidad promedio es un parámetro que puede ser especificado en el modelo. En los Estados Unidos se utiliza una ecuación empírica para derivar las velocidades promedio basada en el flujo y la pendiente (Jobson, 1996)). En la LAC, se establece un valor por defecto de (0.5 m/s), y el usuario puede cambiarlo por la velocidad promedio como un parámetro de calibración (Moreda & Wilhelm, 2014).

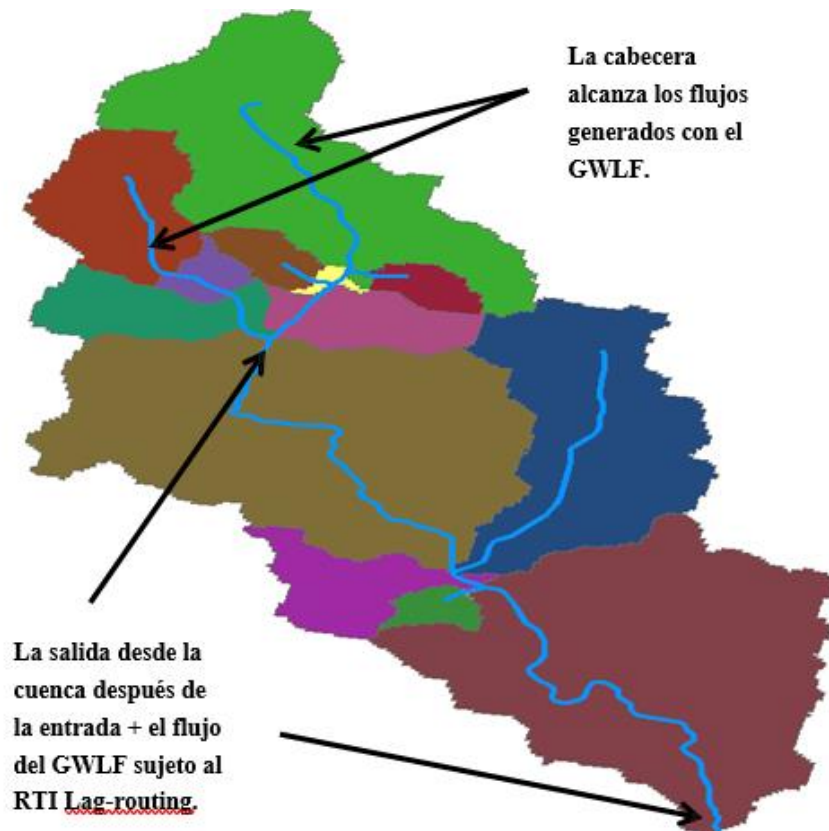


Figura 12 Movimiento de los flujos a través de la red de Corrientes de la AHD (Moreda & Wilhelm, 2014).

3.5. Cambio climático

Se entiende por cambio climático, el cambio del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones de su valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a

procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, en su Artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos (Pardo, 2018).

3.6. Escenarios del Clima Futuro.

Los escenarios de cambio climático son herramientas para facilitar nuestra comprensión sobre cómo los climas regionales pueden cambiar con un aumento de las concentraciones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) y para ayudarnos a entender y evaluar cómo los sistemas vulnerables pueden verse afectados por el cambio climático inducido por el ser humano. La información obtenida a partir de estos escenarios puede utilizarse en las políticas correspondientes, a modo de orientación para la toma de medidas adecuadas en materia de mitigación y adaptación. Es imprescindible recordar que los escenarios de cambio climático no son una predicción ni una previsión del cambio climático futuro (Pardo, 2018). En el cuarto informe de evaluación (AR4) del IPCC 2007 se ha definido 6 escenarios de emisión de GEI denominados (Tabla 3) “trayectorias representativas de concentración” RCP (Representative Concentration Path, por sus siglas en inglés), los cuales cubren un mayor rango de posibilidades que los escenarios considerados en los anteriores informes del IPCC.

Tabla 3 Proyecciones del promedio mundial del calentamiento en superficie y del aumento del nivel del mar al final del siglo XXI

Caso	Cambio de temperatura (°C en 2090-2099 respecto de 1980-1999)		Aumento del nivel del mar (m en 2090-2099 respecto de 1980-1999)
	Estimación óptima	Intervalo <i>probable</i>	Intervalo obtenido a partir de modelos, excluidos los cambios dinámicos rápidos futuros del flujo de hielo
Concentraciones en los niveles del año 2000b	0,6	0,3 – 0,9	No disponible
Escenario B1	1,8	1,1 – 2,9	0,18 – 0,38
Escenario A1T	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,45
Escenario B2	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,43
Escenario A1B	2,8	1,7 – 4,4	0,21 – 0,48
Escenario A2	3,4	2,0 – 5,4	0,23 – 0,51
Escenario A1FI	4,0	2,4 – 6,4	0,26 – 0,59

Notas:

a) Los valores de temperatura son estimaciones óptimas evaluadas, y los intervalos de

incertidumbre probables se han obtenido de una jerarquía de modelos de complejidad variable y de limitaciones observacionales.

b) La composición constante en valores del año 2000 se ha obtenido de modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO) únicamente.

c) Todos los escenarios precedentemente indicados son seis escenarios testimoniales IEEE. Las concentraciones aproximadas de dióxido de carbono equivalente correspondientes al forzamiento radiactivo computado por efecto de los GEI y aerosoles antropógenos en 2100 (véase la pág. 823 del TIE) para los escenarios testimoniales ilustrativos B1, AIT, B2, A1B, A2 y A1FI del IEEE son 600, 700, 800, 850, 1250 y 1550 ppm, respectivamente.

d) Los cambios de temperatura están expresados en términos de diferencias respecto del período 1980-1999. Para expresar el cambio respecto del período 1850-1899 hay que añadir 0,5°C.

4. METODOLOGÍA

Dado que el objetivo del estudio es la comparación de caudales modelados con los modelados hidrológicos WEAP y HydroBID, se recurrió a la elaboración de dos modelados matemáticos manteniendo un modelo conceptual y los datos ingresados a los modelos, utilizando su auto delimitación, coberturas y tipos de suelos pertenecientes a cada modelo.

La metodología utilizada fue según la (Figura 13):

- I. Obtención y procesamientos de datos
- II. Elaboración, calibración y validación de los modelos hidrológicos
- III. Modelación de escenarios, cambio climático
- IV. Análisis de caudales modelados

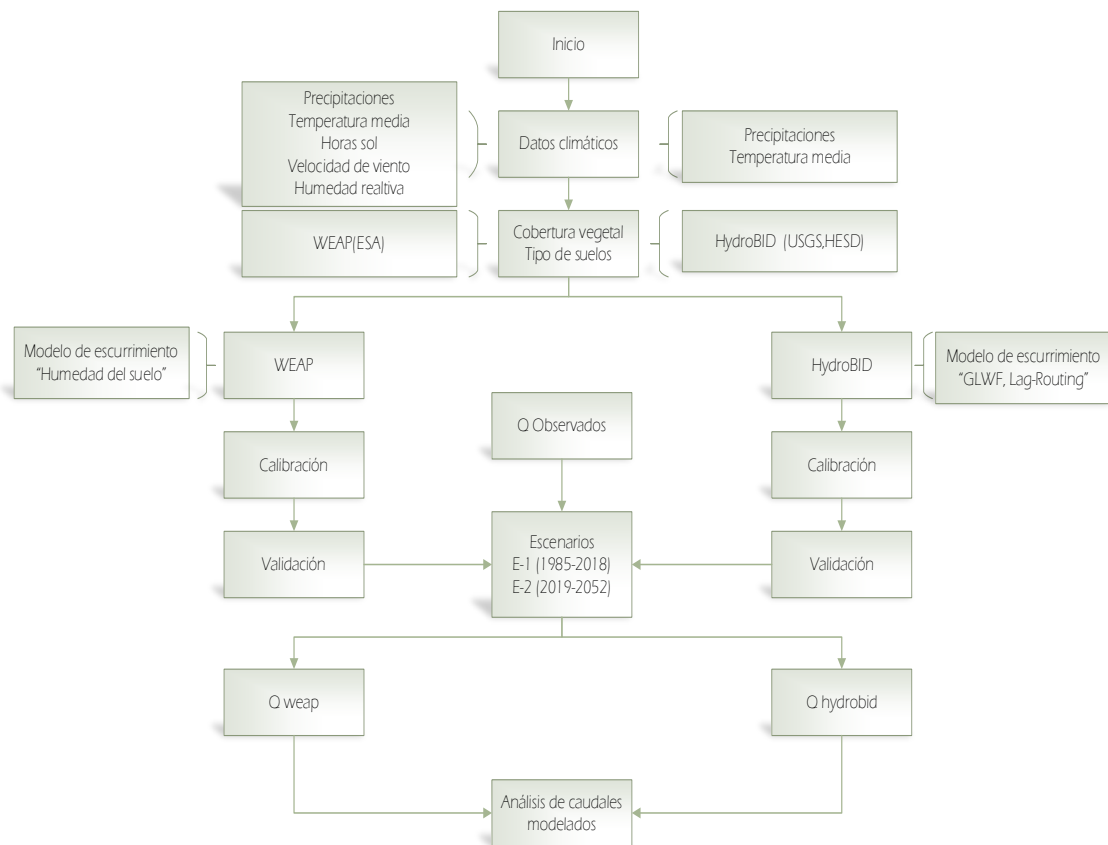


Figura 13 Diagrama de la metodología de investigación

4.1. Obtención y procesamientos de datos

Se recolectaron datos climáticos para el área de estudio, los cuales fueron procesados por la Unidad de Gestión de la Cuenca Katari, Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) quienes realizaron un control de calidad previa. Luego se realizaron un relleno de datos faltantes, donde aplicaron regresiones lineales y múltiples (Rodríguez & Martínez, 2019).

Para el modelo hidrológico WEAP se utilizó el método de polígonos de Thiessen para hacer la distribución espacial de la precipitación y temperatura media. El modelo hidrológico HydroBID cuenta con una herramienta de interpolación utilizando el método (IDW) la distancia inversa ponderada, tomando los centroides de las subcuencas pre definidas en el modelo.

Los mapas de cobertura y tipo de suelo se utilizaron por defecto, donde el modelo WEAP utiliza los mapas de ESA con una resolución 15 s, el modelo HydroBID utiliza los mapas de USGS y HWSO las cuales fueron parametrizadas por la AHD para obtener un numero de curva predominante por sub cueca (A, B, C, D).

Se trabajo con diferentes áreas generadas, por la autodelimitación de cada modelo y por el área generada por la unidad de manejo de la cuenca Katari. La unidad de la cuenca Katari utilizó un DEM con una resolución de 12 m de tamaño de pixel, el modelo WEAP y HydroBID utilizan un DEM de una resolución de 90 m2 de resolución de tamaño de pixel.

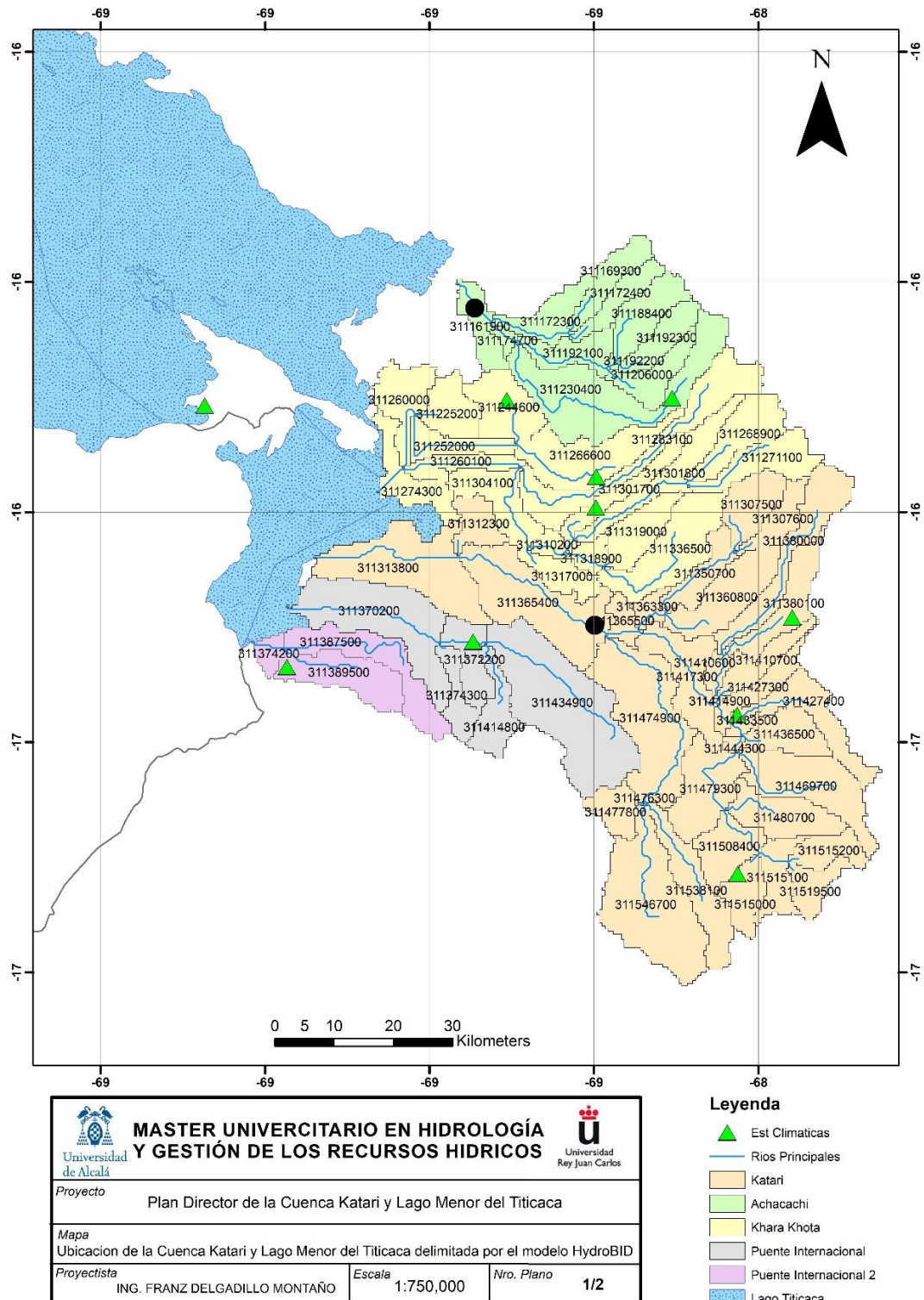


Figura 14 Cuenca delimitada por el modelo HydroBID.

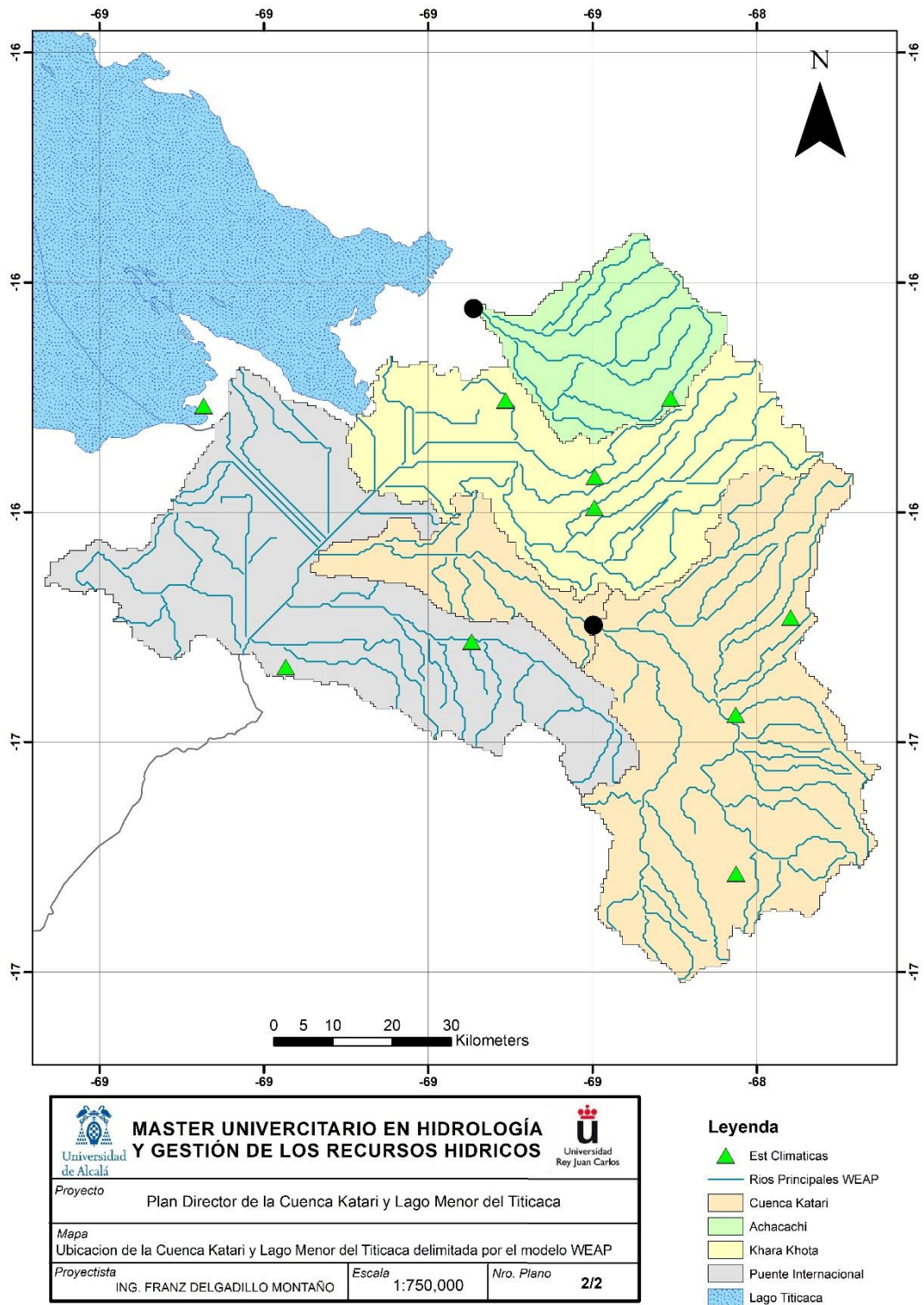


Figura 15 Cuencas delimitadas por el modelo WEAP.

En las (Figura 14, Figura 15) se observaron las diferentes áreas de las autodelimitaciones y en la (Tabla 4) se observa el análisis de las áreas que se evaluaron.

Tabla 4 Comparación de áreas por cuencas

Cuencas Área Km2	MMyA	WEAP	HydroBID
Tambillo	3100	3255	3114
Achacachi	835	835	854
Puente Internacional	862	2485	1140
Khara Khota	1461	1805	1672

Se observa que en la cuenca puente internacional existe un error de magnitud considerable entre modelo WEAP y HydroBID. En las cuencas Katari, Achacachi y Khara Khota la magnitud de error es baja.

4.2. Elaboración, calibración y validación de los modelos hidrológicos

Se definió el periodo de modelación con la disponibilidad de datos climáticos y caudales. Se adoptó el periodo de modelación desde 1985-2018, se calibró en la estación Tambillo entre el 01/2011 al 08/2016, en la estación Achacachi entre 01/2000 al 10/2004 y validó en la estación Achacachi entre 04/2008 al 02/2012 en un periodo donde disponíamos de datos continuos diarios, porque el modelo HydroBID al faltar un dato hidrométrico no consideraba el promedio mensual del mes, con lo que se utilizó los periodos de la (Tabla 5) en las estaciones Tambillo y Achacachi.

Mencionar que con la estación Tambillo solo se calibró y no se pudo validar por contar con pocos años de disponibilidad de datos, tomando todos los disponibles para poder captar la variabilidad climática en la calibración de los modelos.

Tabla 5 Disponibilidad de datos climáticos e hidrométricos

Tipo	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Pcp	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
TMax	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
TMin	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
QTambillo																																					
QAchacachi																																					
Nota																																					

4.3. Análisis de caudales modelados

Con la obtención de los modelos calibrados y validados se obtuvieron las series de caudales modelados en el periodo de 1985-2018 de las cuencas con los dos modelos WEAP e HydroBID.

Se realizó un análisis estadístico de las series de tiempo por cuenca y las funciones

objetivos utilizadas en la investigación fueron las siguientes: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), sesgo porcentual (BIAS), la raíz cuadrada de la varianza de los residuales (RMSE) y el coeficiente de determinación R², (Cabrera, 2006).

a) Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología. Se define como:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad \text{Ec. 25}$$

Dónde:

NSE = Eficiencia de Nash – Sutcliffe

n = Numero de datos simulados

Q_i = Caudal observado

Q_{sim,i} = Caudal simulado

Q̄ = Promedio caudales observados

La variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, E=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 6).

Tabla 6 Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: (Molnar, 2011)

b) Sesgo porcentual (BIAS)

Indica la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados (Gupta, 1999). Un BIAS positivo implica que la tendencia del modelo es simular valores a la izquierda de las observaciones, y viceversa cuando

es negativo. (Moriassi, 2007), menciona que el valor óptimo del BIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican modelos de simulación precisa.

$$BIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)}{\sum_{i=1}^N y_i} \right] * 100 \quad Ec. 26$$

Dónde:

$BIAS =$ Sesgo Porcentual

$\hat{y}_i =$ Varianza del valor a analizar

$y_i =$ Valor a analizar

c) Raíz cuadrada de la varianza de los residuales (RMSE)

La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Se formula como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{n}} \quad Ec. 27$$

Dónde:

$RMSE =$ Raíz del error cuadrático medio

$n =$ Numero de datos simulados

$Q_i =$ Caudal observado

$Q_{sim} =$ Caudal simulado

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

d) coeficiente de determinación R²

El coeficiente de determinación describe la proporción de la varianza en los datos observados que puede ser explicada por el modelo (Legates, 1999). El R² fue clasificado bajo los criterios de muy bueno >0.95, bueno de 0.85 – 0.95, satisfactorio de 0.65 - 0.85 e insatisfactorio <0.65.

Las expresiones matemáticas son:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{y})}{[\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2]^{0.5}} \right\}^2 \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

R^2 = Coeficiente de determinación

\hat{y}_i = Varianza del valor a analizar

\bar{y}_i = Promedio del valor a analizar

y_i = Valor a analizar

4.4. Modelación de escenarios, cambio climático

Se utilizó la herramienta climate wizard para poder generar modelos de circulación globales con un escenario de baja concentración de emisión de gases efecto invernadero, según el estudio realizado por (Dirk, 2016) en el periodo 2046-2065. Este modelo de ecuaciones diferenciales contaba con 9 métodos los cuales se utilizaron todos y se realizó un ensamble obteniendo un promedio, donde se obtuvo incrementos y decrementos mensuales en la temperatura, precipitación para todo el área de estudio.

Se contaba con periodo de 33 años los que se utilizaron para realizar las proyecciones de las variables de temperatura y precipitación en el periodo 2019-2052, volviendo a correr los modelos hidrológicos para observar su respuesta hídrica.

5. Resultados

5.1. Calibración y validación de los modelos hidrológicos

La calibración y validación se realizó en las dos estaciones hidrométricas Tambillo y Achacachi en los dos modelos hidrológicos WEAP e HydroBID. En la estación Tambillo se tomó el periodo 2011-2016 para la calibración y no se lo validó ya que no se contaba con datos disponibles. Con la estación Achacachi se tomó el periodo 2000-2005 para la calibración y 2008-2012 para la validación.

Se observa que en las (Tabla 7, Tabla 8) que las eficiencias de Nash Sutcliffe y el BIAS están en los rangos aceptables y se observa que son similares entre los modelos, demostrando que cada modelo de transformación de lluvia-escorrentía trabaja efectivamente, considerando que cada modelo tiene su propia base de datos de tipo de suelo y cobertura vegetal.

Tabla 7 Estadísticas de las funciones objetivos modelo WEAP

WEAP		
Abreviación	Valor	Descripción
NSE C Tambillo	0.55	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE C Tambillo	4.5	Error medio cuadrático
PBIAS C Tambillo	-3.4%	Sesgo relativo
R2 C Tambillo	0.69	Coefficiente de correlación
NSE C Achacachi	0.48	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE C Achacachi	3.6	Error cuadrático medio
PBIAS C Achacachi	-5.1%	Sesgo relativo
R2 C Achacachi	0.49	Coefficiente de correlación
NSE V Achacachi	0.79	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE V Achacachi	1.50	Error medio cuadrático
PBIAS V Achacachi	27.5%	Sesgo relativo
R2 V Achacachi	0.9	Coefficiente de correlación

Tabla 8 Estadísticas de las funciones objetivos modelo HydroBID

HydroBID		
Abreviación	Valor	Descripción
NSE C Tambillo	0.54	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE C Tambillo	4.8	Error medio cuadrático
PBIAS C Tambillo	1.8%	Sesgo relativo
R2 C Tambillo	0.51	Coefficiente de correlación
NSE C Achacachi	0.48	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE C Achacachi	3.7	Error medio cuadrático
PBIAS C Achacachi	-3.7%	Sesgo relativo
R2 C Achacachi	0.52	Coefficiente de correlación
NSE V Achacachi	0.78	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE V Achacachi	1.54	Error medio cuadrático
PBIAS V Achacachi	23.2%	Sesgo relativo
R2 V Achacachi	0.9	Coefficiente de correlación

Se elaboraron graficas de caudales acumulados (Figura 16, Figura 17, Figura 18) donde visualizamos el error volumétricos de los modelos hidrológicos WEAP e HydroBID. En la estación Tambillo donde se calibro únicamente, WEAP -3.4% y HydroBID 1.8% de error volumétrico respecto a los caudales acumulados observados, en la estación Achacachi en la calibración WEAP presenta -5.1%, HydroBID -3.7%, en la validación WEAP 27.5%, HydroBID 23.2% observando que en la validación tenemos un aumento del error volumétrico de los caudales acumulados.

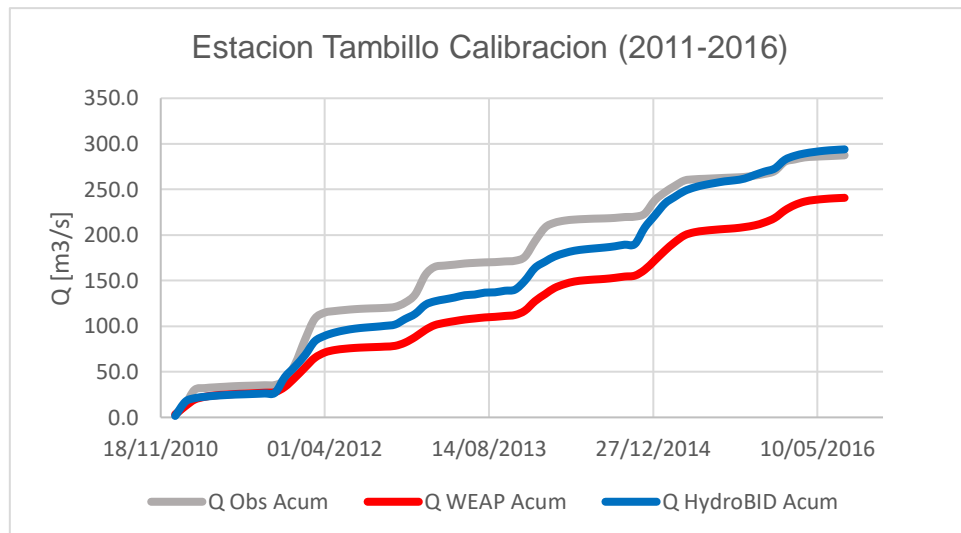


Figura 16 Caudales acumulados estación Tambillo, periodo 2011-2016, calibración

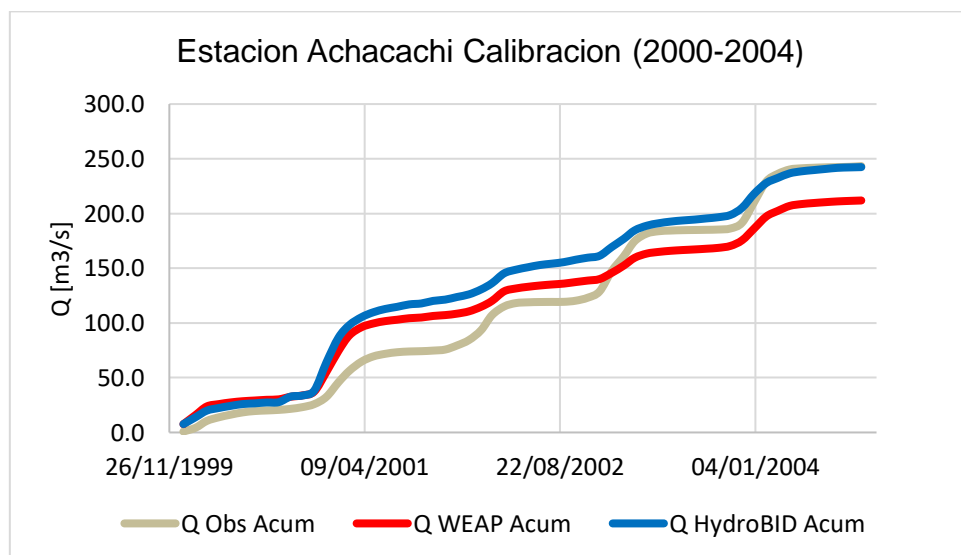


Figura 17 Caudales acumulados estación Achacachi, periodo 2000-2004, calibración

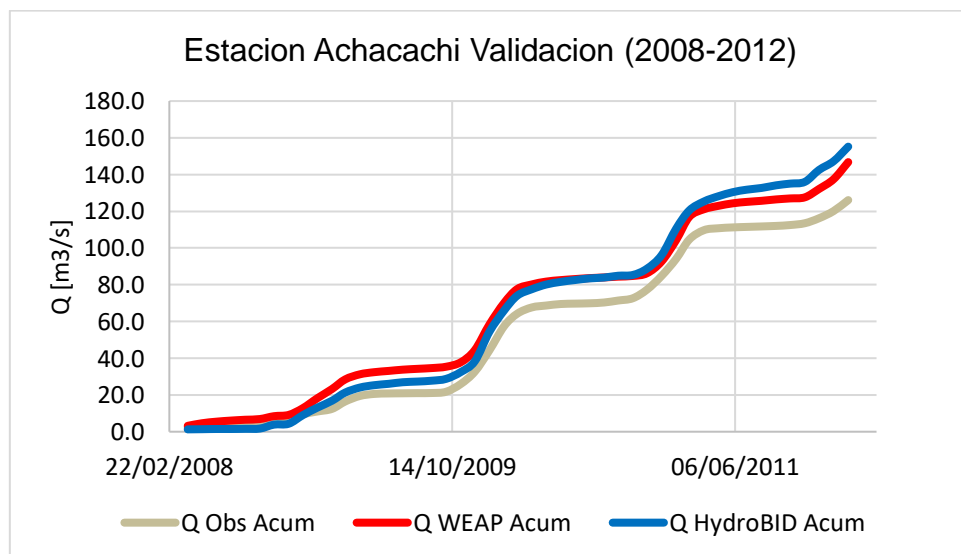


Figura 18 Caudales acumulados estación Achacachi, periodo 2008-2012, validación

5.2. Análisis de caudales modelados

Se realizó un análisis en las 4 cuencas (Katari, Achacachi, Khara Khota, Puente Internacional) todas desembocan en el lago menor del Titicaca. El periodo de análisis fue 1985-2018.

Se observa en la serie de tiempo que existe una subestimación de los picos de caudales modelo por el modelo HydroBID en las cuencas Katari, Achacachi y Khara Khota. En la sub cuenca Puente Internacional el modelo WEAP sobre estima el flujo base como los picos de los caudales modelo, esto se debe a la diferencia de áreas delimitadas por los modelos hidrológicos (Tabla 4).

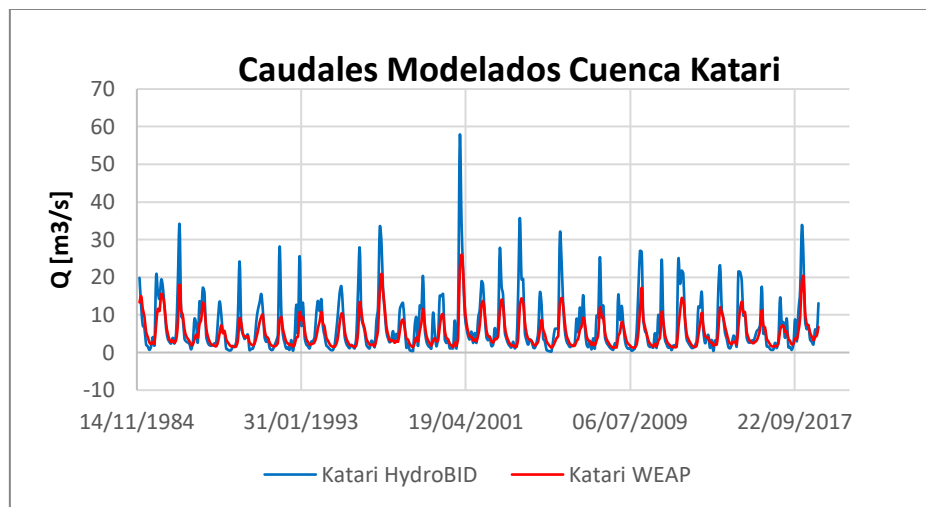


Figura 19 Serie de tiempo de caudales modelados de la cuenca Katari en el periodo 1985-2018

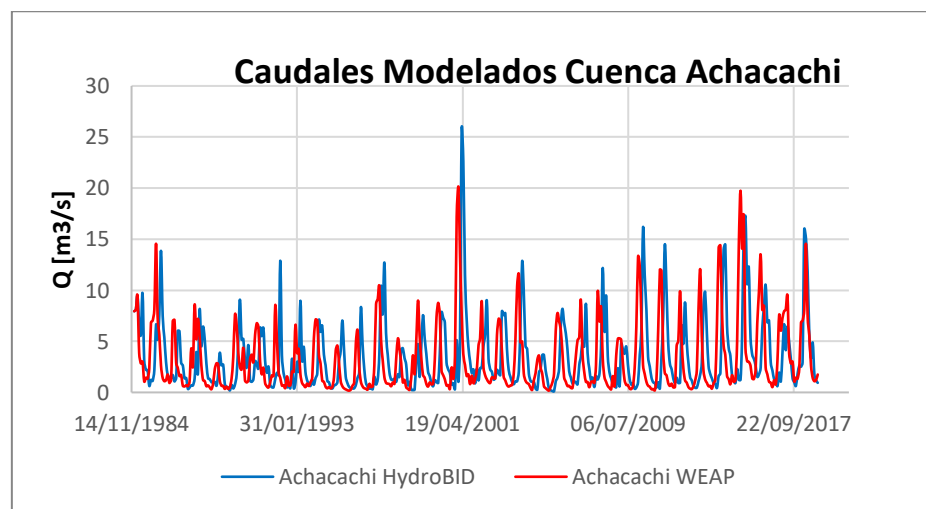


Figura 20 Serie de tiempo de caudales modelados de la cuenca Achacachi en el periodo 1985-2018

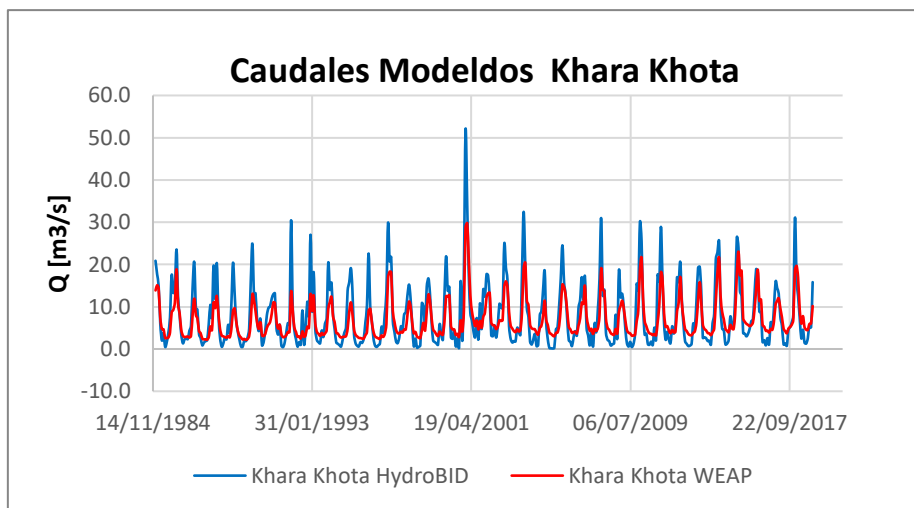


Figura 21 Serie de tiempo de caudales modelados de la cuenca Khara Khota en el periodo 1985-2018

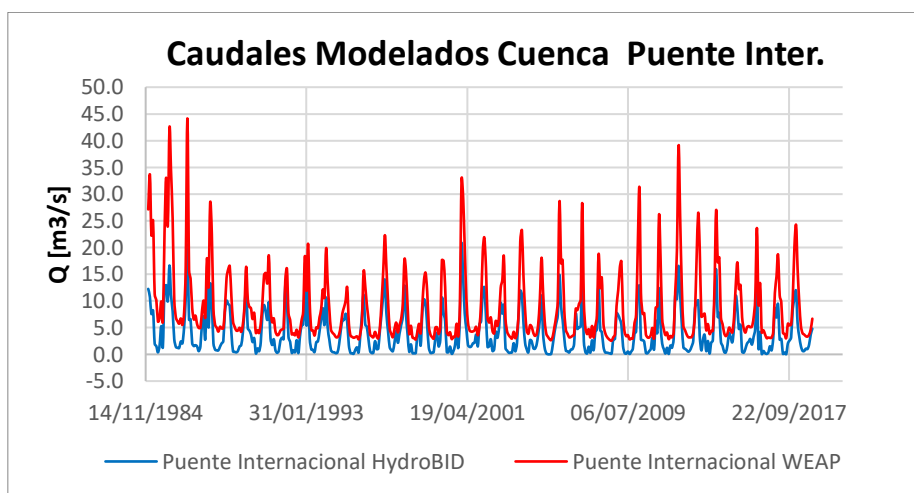


Figura 22 Serie de tiempo de caudales modelados de la cuenca Puente Internacional en el periodo 1985-2018

5.3. Caudales modelados acumulados por cuencas

Las gráficas de los caudales acumulados son una visualización del error volumétrico de los caudales modelos, se realizaron para el periodo 1985-2018 por cuencas.

Se observa que en la cuenca Puente Internacional presenta un error volumétrico significativo visual, debido a la diferencia de áreas adoptada por cada modelo.

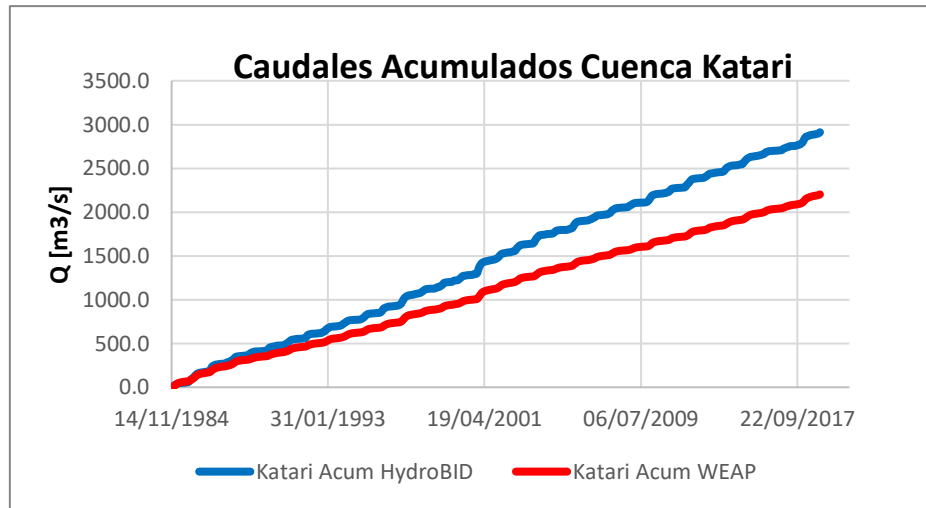


Figura 23 Caudales modelados acumulados cuenca Katari, en el periodo 1985-2018

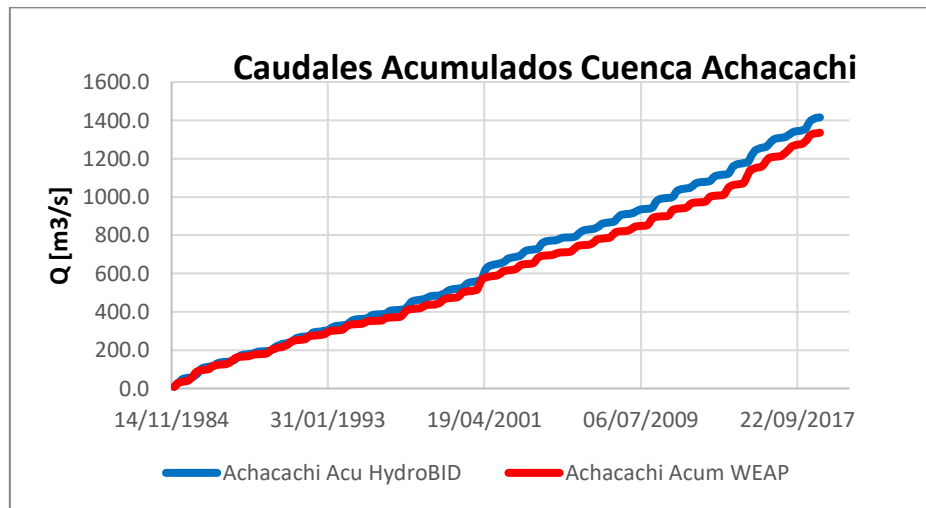


Figura 24 Caudales modelados acumulados cuenca Achacachi, en el periodo 1985-2018

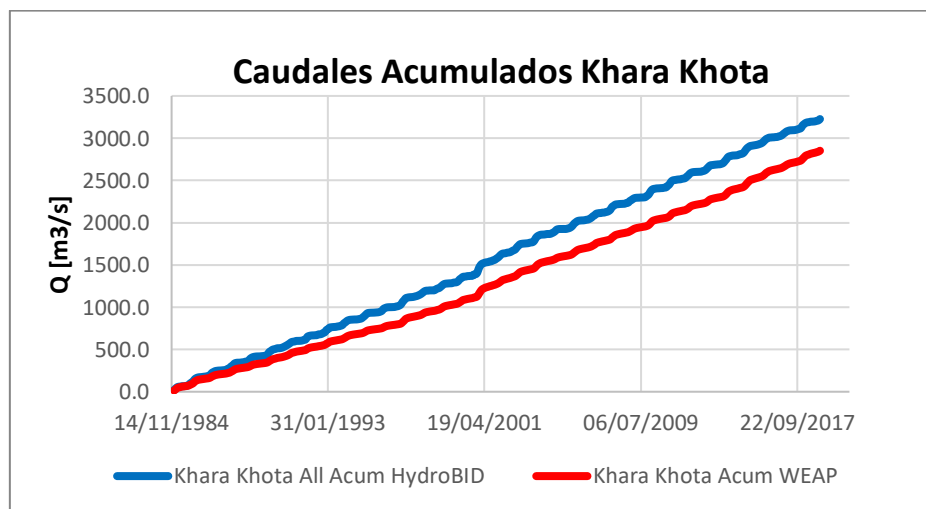


Figura 25 Caudales modelados acumulados cuenca Khara Khota, en el periodo 1985-2018

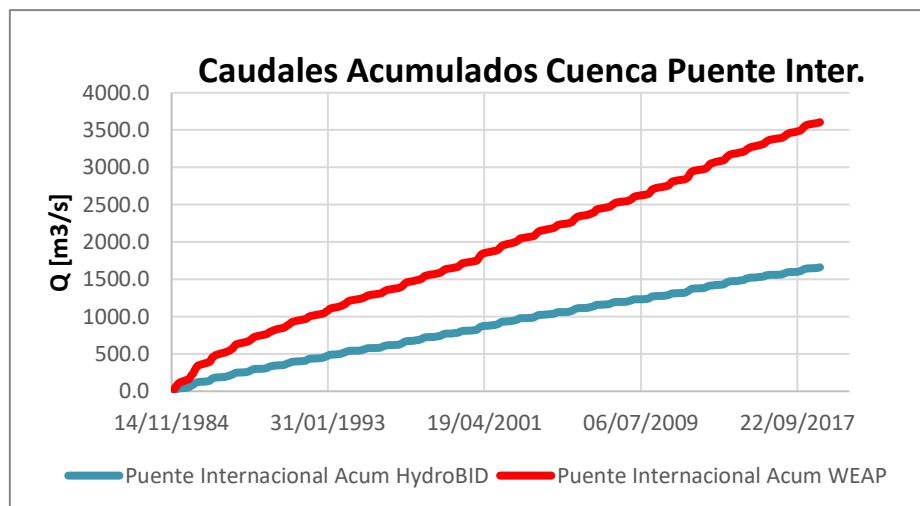


Figura 26 Caudales modelados acumulados cuenca Puente Internacional, en el periodo 1985-2018

En el siguiente análisis se realizó una estadística con los caudales modelados con el modelo WEAP respecto a los caudales modelados con el modelo HydroBID (Tabla 9), donde se observa que en la cuenca Katari el modelo HydroBID sobrestima con 31% los caudales de modelo WEAP, en la cuenca Achacachi sobrestima con 5.9% los caudales del modelo WEAP, en la cuenca Khara Khota subestima con 13% los caudales del modelo WEAP y en la cuenca Puente Internacional subestima 54 % de los caudales del modelo WEAP. Esto se debe a la diferencia notable de área entre autodelimitación por cada modelo.

Tabla 9 Estadística de los caudales modelados con WEAP y HydroBID

Estadística	Valor	Notas
NSE C Achacachi	-0.77	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE C Achacachi	1.1	Error cuadrático medio
PBIAS C Achacachi	5.9%	Sesgo relativo
R2 C Achacachi	0.00	Coefficiente de correlación
NSE V Katari	-0.48	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE V Katari	0.4	Error cuadrático medio
PBIAS V Katari	32.2%	Sesgo relativo
R2 V Katari	0.68	Coefficiente de correlación
NSE C Khara Khota	0.17	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE C Khara Khota	0.1	Error cuadrático medio
PBIAS C Khara Khota	13.2%	Sesgo relativo
R2 C Khara Khota	0.58	Coefficiente de correlación
NSE C Puente Int.	0.24	Eficiencia Nash Sutcliffe
RMSE C Puente Int.	0.0	Error cuadrático medio
PBIAS C Puente Int.	-53.9%	Sesgo relativo
R2 C Puente Int.	0.87	Coefficiente de correlación

Nota: el análisis se realizó los caudales modelados con WEAP respecto los caudales modelados con el modelo HydroBID.

5.4. Factor de escurrimiento

Para poder analizar de forma homogénea la transformación de lluvia-escurrimiento de cada modelo según su área auto delimitada. Se recurrió al cálculo del factor de escurrimiento por cada cuenca.

Este análisis es la relación entre la lámina de agua precipitada sobre una superficie y lámina de agua que escurre superficialmente, (ambas en mm). Podemos visualizar en la (Tabla 4) las áreas definidas por cada modelo y en la (Tabla 10) los factores de escurrimiento adimensionales.

Se observa que los factores de escurrimiento en las cuencas donde se presenta una diferencia de área con mayor magnitud de error hay una variación (Katari, Puente Internacional), en las áreas con mayor similitud de área tienden a tener una misma respuesta de escurrimiento (Achacachi, Khara Khota).

$$K = \frac{E_s}{p_r} \quad \text{Ec. 29}$$

K = Coeficiente de escurrimiento

E_s = Lámina escurrida [mm]

p_r = Precipitación [mm]

Tabla 10 Factores de escurrimiento por cuenca

Sub Cuencas	HydroBID	WEAP
Katari	0.13	0.05
Achacachi	0.21	0.19
Khara Khota	0.26	0.21
Puente Internacional	0.10	0.17

Según la clasificación de uso de suelo *de la (Tabla 11)*, estamos en el rango de parques, prados terrenos cultivados según nuestros valores de escurrimiento.

Tabla 11 Parámetros de clasificación de uso de suelo

Características del área	Valor de Fc
Residencial-Casas unifamiliares	0.3
Residencial Urbano- Apartamentos con jardines	0.5
Comercial e industrial	0.9
Forestada (Dependiendo del suelo)	0.05-0.2
Parques, prados terrenos cultivados	0.05-0.3
Pavimentadas con asfalto y hormigón	0.85-1
Terreno saturado por lluvias prolongadas	1

Fuente: (Linsley & Franzini, 2007)

5.5. Escenario de cambio climático 2019-2039

En la investigación se utilizó el programa de investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria CCAFS (por sus iniciales en inglés) del CGIAR, que tiene a disposición, a través de su página web <http://www.ccafs-climate.org/>, los resultados de cambio climático de 9 modelos de circulación regional con escala de 25x25 km y para todos los escenarios del AR4. Esta información ha sido procesada a partir de los resultados de modelos de WG1-AR4 disponibles en la página web del IPCC 2007. Tomando en cuenta el estudio Cambio Climático en Bolivia (Spickenbom & Quintanilla, 2016), donde se observa que en nuestra cuenca de estudio presentamos niveles bajos de cambio en la temperatura y precipitación. Se obtuvo un ensamble de todos los modelos de circulación global, con un escenario B1 que representa una baja concentración de gases invernaderos a las variables mensuales de precipitaciones [mm] y temperatura media [C°].

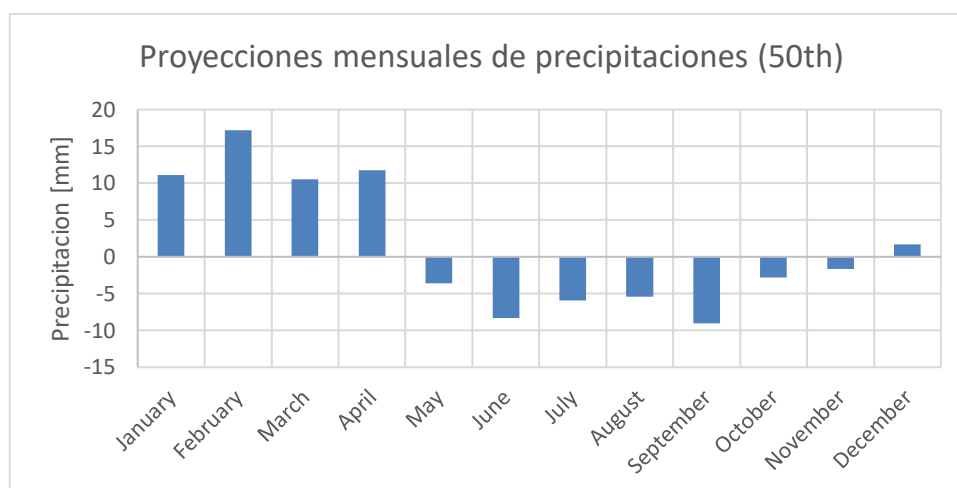


Figura 27 Variaciones de precipitaciones mensuales en el periodo de proyección de 2046-2065

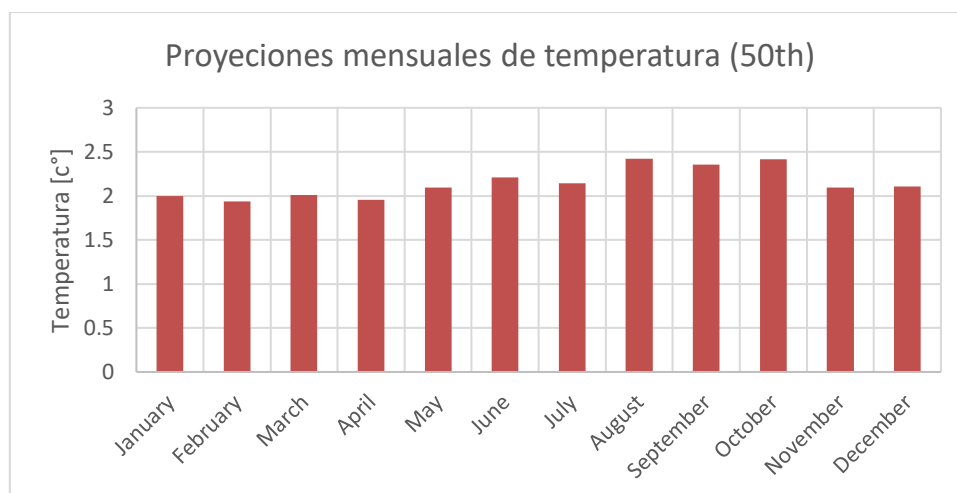


Figura 28 Variaciones de precipitaciones mensuales en el periodo de proyección de -2046-2065

En la (Figura 27) se observa que en los meses húmedos las precipitaciones incrementan un rango 1.6 [mm] a 17.21 [mm], en el periodo seco las precipitaciones sufren un decremento del rango -1.65 [mm] a -9 [mm] en la (Figura 28) la temperatura media tiene un constante incremento mensual de 2 [C°].

Con los valores perturbados a nivel mensual se procedió a correr el modelo WEAP y HydroBID. Con el modelo WEAP se obtuvieron que en las cuencas generaran un aumento del volumen de agua en periodo proyecto 2019-2052. El porcentaje de incrementos son para la cuenca Katari presenta 6 %, cuenca Achacachi 3.1 %, cuenca Khara Khota 1.6 % y en la cuenca Puente Internacional 1.9 %. Estos resultados de un mínimo aumento es algo preocupante ya que en este escenario no se tomó en cuenta el crecimiento poblacional y lo que implica la demanda de agua por habitante, como otro aspecto importante es el aumento de la temperaturas causando un derretimiento de los glaciares pequeños, que conlleva a una disminución de caudal de agua en los ríos, según el estudio realizado por Escobar y colaboradores (Escobar, 2013).

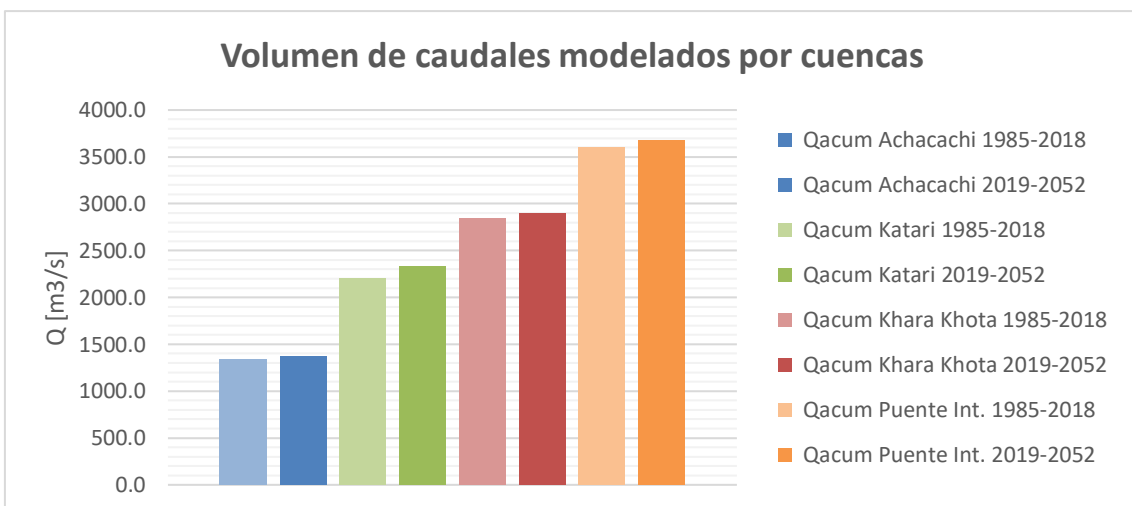


Figura 29 Análisis de volumen de agua a nivel mensual por cuencas

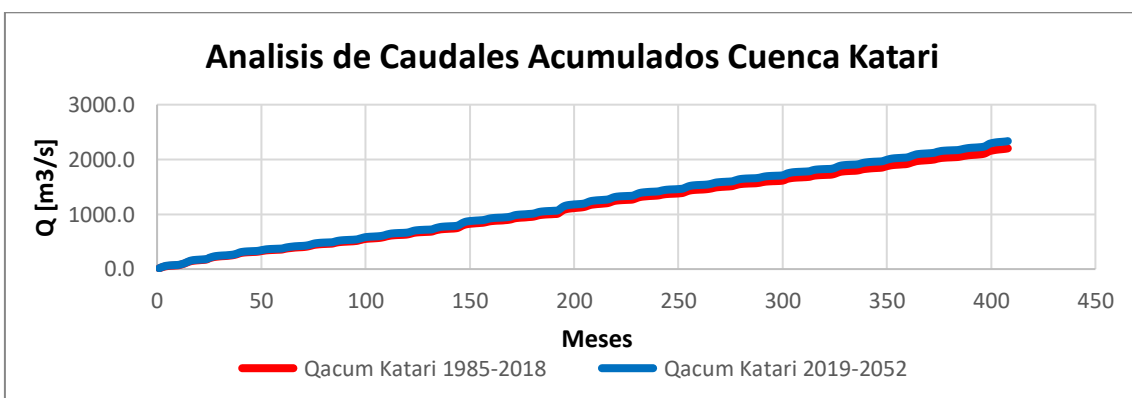


Figura 30 Análisis de caudales acumulados a nivel mensual, cuenca Katari

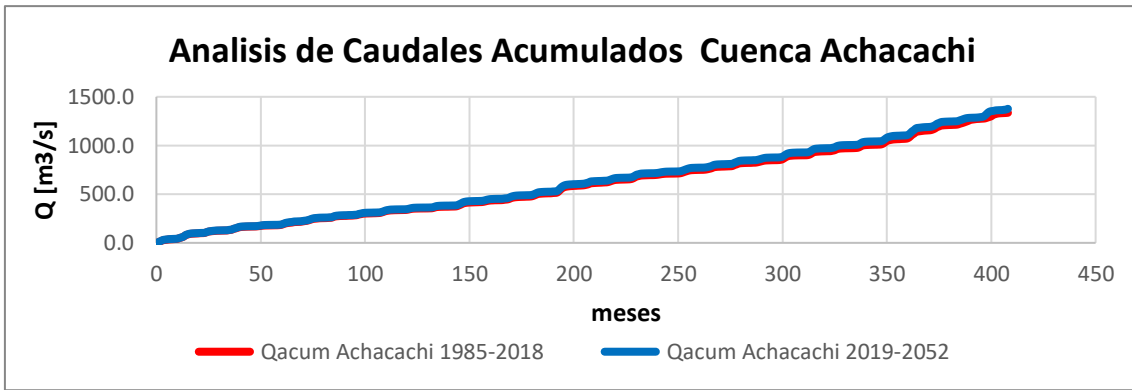


Figura 31 Análisis de caudales acumulados a nivel mensual, cuenca Achacachi

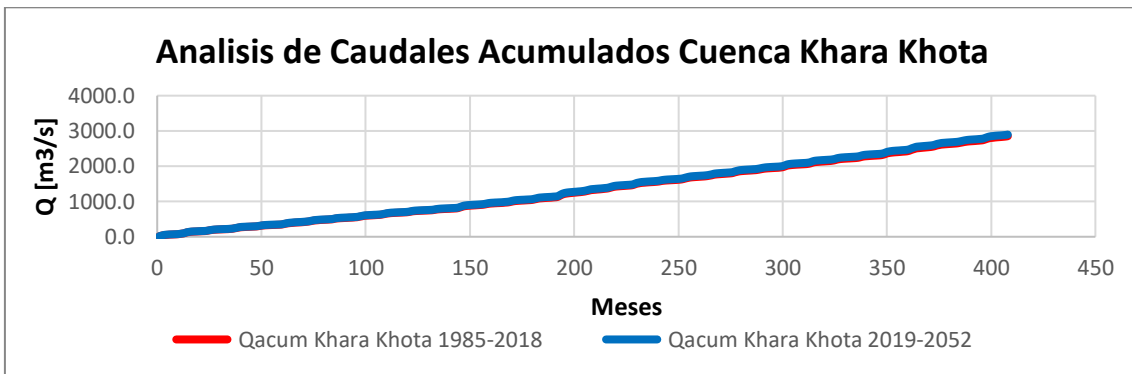


Figura 32 Análisis de caudales acumulados a nivel mensual, cuenca Khara Khota

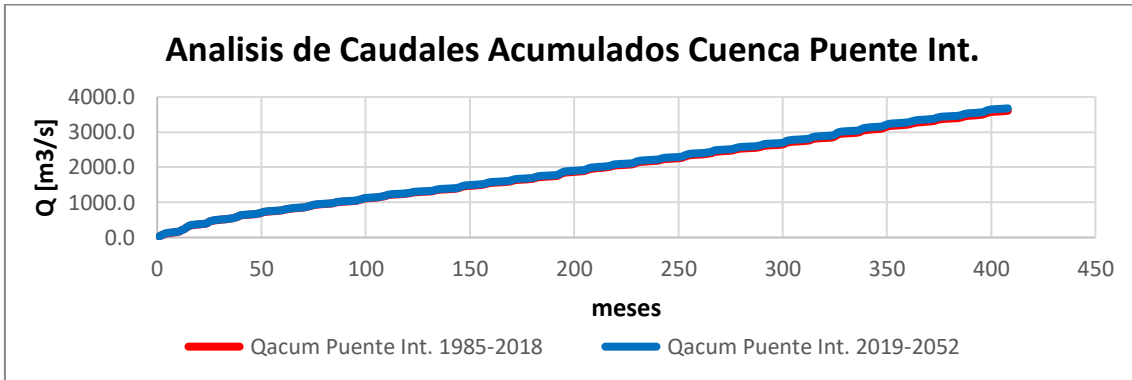


Figura 33 Análisis de caudales acumulados a nivel mensual, cuenca Puente Internacional

El análisis de escenario con el modelo HydroBID no pudo ser posible, ya que la herramienta “Climate Scenario” presentó un error al perturba la precipitación mensual en cm, con valores negativos, está en plena observación por los desarrolladores del programa, comentándome que la metodología que he utilizado es la primera ves utilizada con la herramienta de “Precipitation Adjustmen (+/-)”.

6. DISCUSIÓN

La buena cuantificación y gestión de los recursos hídricos es vital para la toma de decisiones futuras, tomando en cuenta que la cuenca Katari y lago menor del Titicaca presenta niveles altos de contaminación y la presente investigación sería un apoyo inicial para poder afrontar esta problemática.

En la calibración del modelo hidrológico WEAP se optimizó los parámetros de calibración por el método de Montecarlo (Delgadillo & Villazon, 2019), obteniendo los parámetros de calibración óptimos, llegando a sus límites de eficiencias en estas dos estaciones de control. Donde podemos observar que los dos modelos obtuvieron respuesta de transformación similares, por lo que los dos modelos están dentro de sus rangos de rendimiento óptimos de transformación de lluvia-escorrentía.

Se obtuvieron estadísticas aceptables en la calibración en la estación Tambillo con una eficiencia de Nash S. de 0.55 y un error volumétrico del -5.1% y en la estación Achacachi con una eficiencia de Nash S. de 0.48 y un error volumétrico de -3.7%. Según el estudio elaborado por (BRL Ingeniería & IRD, 2018), donde se obtuvo una eficiencia de Nash S. de 0.41 en la estación Tambillo en el periodo (2010-2016) a nivel mensual. Se podría afirmar que se obtuvo una mejora del modelo a nivel mensual en la estación Tambillo, donde sus parámetros físicos de calibración fueron utilizados para modelar las cuencas Puente Internacional y Khara Khota que están dentro de nuestra unidad hidrográfica, tomando en cuenta que estas cuencas tienen ecosistemas iguales.

Otro punto importante para que los dos modelos hidrológicos lleguen a una similar transformación de lluvia-escorrentía se debe que sus modelos de cálculos tengan conceptos similares (Modelo GLWF, Modelo de Humedad de Suelo), en el cálculo de escorrentía se analizó que los dos modelos presentan una similitud de cálculo, el modelo HydroBID utiliza un retraso de flujo denominado RTI que depende de la cobertura vegetal y tipo de suelo, donde este factor controla la velocidad de los caudales generados en los tramos de ríos. En el modelo WEAP, este fenómeno físico es el factor de calibración RRF (factor de resistencia a la escorrentía) que es el que controla la velocidad del flujo de igual manera que la metodología RTI en HydroBID.

En el análisis de los caudales modelados en las cuencas Katari, Achacachi, Khara Khota y Puente internacional en el periodo 1985-2018, se obtuvieron estadísticas (Tabla 9), donde el modelo HydroBID presenta una sobreestimación de los caudales modelados según los caudales obtenidos con el modelo WEAP y los errores volumétricos en

porcentajes que se presentaron en las cuencas son, cuenca Katari con 32% , Achacachi con 6% y Khara Khota 13% y en la cuenca Puente Internacional se obtuvo un subestimación del 53% de volumen de agua debido la diferencia de área delimitada por los modelos (Tabla 4).

Para poder observar un análisis más visible se obtuvieron factores de escurrimiento según (Linsley & Franzini, 2007). Se realizó la obtención de factores de escurrimiento a la salida de cada cuenca considerando la lámina de agua, la precipitación y las áreas generadas por cada modelo hidrológico (Tabla 10), en las cuencas Katari y Puente internacional se presenta una variación de factores de escurrimientos debido a la diferencia de área auto delimitada por los modelos hidrológicos con sus herramientas predefinidas. En las cuencas Achacachi y Khara Khota los factores de escurrimientos presentan diferencias pequeñas, teniendo una similar representación de escurrimiento en esas cuencas.

Según el estudio realizado por Molina & Uria (2017) se obtuvieron un factor de escurrimiento en la subcuenca Tambillo de 0.04 y en la cuenca Achacachi de 0.31, donde se observa una concordancia de los valores obtenidos, tomando en cuenta que la subcuenca tambillo aguas abajo es nuestra cuenca Katari desembocando en el lago menor del Titicaca.

En el análisis de cambio climático se generó un ensamble de 9 modelos de circulación global en el periodo proyectado de 2046-2065 con un escenario B1 (Low) de baja emisión de gases de efecto invernadero tomando en cuenta el estudio realizado por Dirk (2016). En la variable de precipitación se presentó un incremento en los meses húmedos en el rango entre 2 [mm] a 17 [mm] (diciembre a abril), en el periodo de sequía (mayo a noviembre) un decremento en el rango de 2 [mm] a 9 [mm], en la temperatura se observó un incremento de la temperatura en el rango de 1.9 [C°] a 2.4 [C°].

Los caudales modelados en el en el escenario 2019-2052 se observa que el modelo WEAP genera entre 1% a 6% volumen total de agua en las cuencas con un aumento de 2 [C] por mes de la temperatura, eso se debe a que se consideró el escenario más favorable para el área de estudio, como tampoco se consideró el incremento poblaciones y el derretimiento de los pequeños glaciares que son un aporte de escurrimiento de agua en los ríos de alta montaña de mucha importancia, porque según el estudio realizado por (Escobar, 2013) los glaciares pequeños podrían desaparecer en 30 años.

7. CONCLUSIONES

- Los modelos hidrológicos WEAP e HydroBID obtuvieron desempeños similares, debido que los dos modelos cuentan con transformaciones de lluvia-escorrentía similares, utilizando un retraso de flujo en sus modelos.
- Los caudales modelados por el modelo HydroBID tienden a subestimar los caudales altos, debido a el factor de calibración número de curva se utilizaron los valores pre calibrados por el modelo.
- El modelo hidrológico Weap tiene una mejor auto delimitación de las cuencas, debido que tiene una resolución de 5 s y 15 s, donde el modelo hidrológico HydroBID cuenta con una resolución de 15 s predefinidas en su base de datos AHD y LAC.
- El modelo hidrológico HydroBID es un modelo mas manejable por el gran esfuerzo invertido en la realización de la base de datos pre calibrados para todas sus sub cuencas por la AHD requiriendo menos esfuerzos para su calibración.
- Se implemento solo el escenario de cambio climático en el periodo 2019-2052 para el modelo WEAP, el modelo HydroBID presento errores en el programa con la metodología utilizada en TFM.
- Los caudales modelados por WEAP en el periodo 2019-2052 presentan un aumento de volumen de agua en las cuencas del 1% al 6% debido que se tomó el escenario B1 Low y no se considero la demanda de agua que presentaría el aumento poblacional en el área de estudio como tampoco el derretimiento de los glaciares que son una fuente importante de volumen de escurrimiento en nuestras cuencas.

8. BIBLIOGRAFIA

- ALT. (Julio de 2016). *Programa de expediciones científicas de calidad de agua del lago Titicaca (ECALT)*. Obtenido de <http://www.alt-perubolivia.org/web/2016-10-12-20-35-20/programa-ecalt.html>
- Bosen, J. (1960). A formula for approximation of saturation vapor pressure over water. *Monthly Weather Reviews* 88(8):275-276. .
- BRL Ingeniería, & IRD. (2018). *Desarrollo e implementación de un modelo hidrológico de la cuenca del Río Katari, y su aplicación para la exploración de escenarios climáticos e identificación de temas críticos de adaptación, y diseño de la red de monitoreo hidrológico- BO-T1252*. Cochabamba.
- Cabrera, J. (2006). Calibración de modelos hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería: Tesis de maestría.
- CCGU-SEI. (2009). Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP. *Guía metodológica*. Boston, Santiago: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile.
- Delgadillo, F., & Villazon, M. (Septiembre de 2019). Evaluación de la precipitación mediante distintas fuentes de información satelital y análisis de sensibilidad en un modelo lluvia escurrimiento (caso de estudio cuenca del Río Pirai, Santa Cruz-Bolivia). *Tesis de pregrado*. Cochabamba, Bolivia.
- Dirk, H. (09 de Mayo de 2016). 2 C de incremento de temperatura al 2030 en Tierras Bajas y Yungas. La Paz, Bolivia.
- Escobar. (2013). Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministros de aguas de las ciudades de La Paz y el Alto, Bolivia. *Aqua-LAC*. La Paz.
- Fedaku, M. (2014). *Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos*. Obtenido de http://sp.hydrobidlac.org/assets/site_32/files/hydro-bid%20funcionalidad%20del%20sistema%20y%20uso.pdf
- Forsythe, W. (1960). A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year. *Ecological Modeling* 80:87-95.
- GMET. (2018). *GMET Bolivia*. La Paz-Bolivia: Ministerio de Medio Ambiente y Agua MMyA.
- Gupta, j. (1999). Effect of different vegetable proteins on the utilization of broken rice in

- broiler production. Indian.
- Haan, C. (1972). A water yield model for small watersheds. *Water Resources Research* 8(1):58-69.
- Hait, D. (1985). *An event-based procedure for estimating monthly sediment yields*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers .
- Hait, D., Mandel, R., & Wu, R. (1996). Generalized Watershed Loading Functions. Version 2.0 User's Manual.
- Hamon, R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. Journal of the Hydraulics Division 87(HY3):107-120.
- Hawkins, R. (1978). Runoff curve numbers with varying site moisture. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. Journal of the Irrigation and Drainage Division 104(1R4):389-398.
- Iagua. (03 de 10 de 2017). *Bolivia promueve el uso de una herramienta innovadora para la gestión hídrica*. Obtenido de <https://www.iagua.es/noticias/bolivia/mmaya/17/10/13/bolivia-promueve-uso-herramienta-innovadora-gestion-hidrica>
- Ibañez, L. (19 de Abril de 2019). *iagua*. Obtenido de Bolivia acuerda acciones para descontaminar la Cuenca Katari y el lago Menor del Titicaca: <https://www.iagua.es/noticias/mmaya/bolivia-acuerda-acciones-descontaminar-cuenca-katari-y-lago-menor-titicaca>
- INE. (2012). *Ficha resumen censo poblacion y vivienda*. Obtenido de http://censosbolivia.ine.gob.bo/censofichacomunidad/c_pdfm/generar_pdf/02/01/05/x
- Jobson, H. (1996). Prediction of traveltime and longitudinal dispersion in rivers and streams. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report. 96-4013, 69 p. .
- Legates, D. (1999). Evaluación del uso de medidas de "bondad de ajuste" en la validación de modelos hidrológicos e hidroclimáticos. *Water Resources Research* 35 (1): 233-241.
- Linsley, & Franzini. (2007). Engenharia de recursos hídricos. *Universidade de San Paulo*. San Paulo, Brazil.
- Martinez, V. (2019). *Informe Tecnico INF/MMAYA/VRHR/UGCK N° 0604/2019 MMAYA/2019-51117* . La Paz: Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

- MMYA. (06 de Julio de 2006). *Plan director de la cuenca Katari*. Obtenido de http://www.cuencasbolivia.org/files/plan_director_katari.pdf.
- MMYA. (2018). *Balance Hidrico Superficial de Bolivia*. La Paz.
- Molina , J., & Uria, A. (29-29 de Abril de 2017). Regimen hidrológico del río Katari . La Paz, Bolivia.
- Moreda, F., & Wilhelm, F. (2014). *Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos*. IDB.
- Moriasi, D. (2007). Directrices modelo de evaluación para la cuantificación sistemática de precisión en simulaciones de cuencas hidrográficas.
- Nalesso, M., & Coli, P. (2017). Guía paso a paso, manual de hydroBID.
- OCHA. (01 de Junio de 2016). *Afectacion y riesgo por sequia*. Obtenido de https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Redhum-BO-Infografia_Sequia-20160602-AM-18551.pdf
- Pardo, P. (2018). Analisis de escenarios de cambio climatico respecto a la precipitacion con fines de la oferta hidrica. *Tesis presentada para optar al grado academico de Master en Ciencias*. Cochabamba, Bolivia.
- Rodríguez, D. E., & Martínez, V. E. (2019). *Implementación del plan director de la cuenca Katari y su estrategia de recuperación integral de la cuenca y Lago Menor del Titicaca*. La Paz.
- Sanchez, M., & Carvacho, L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*.
- SEI. (2015). User Guide.
- Soria, F. (2017). *Consultoría por producto elaboración del balance hidrico superficial integrado para la cuenca del Río Azero, Chuqui*. La Paz.
- Spickenbom, J., & Quintanilla, M. (09 de Mayo de 2016). *Fundación Instituto Boliviano de la Montaña BMI*. Obtenido de https://cambioclimatico-bolivia.org/index-cc.php?cod_aporte=374
- UNESCO. (2004). *Water for people, water for lives. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura Paris*. Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556e.pdf>
- Yates, D., Sieber, D., Purkey, & Huber Lee, H. (2005). WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model. *Aiding freshwater ecosystem service evaluation* . Water International.

Yates, S. (1994). [Watbal: Un modelo de balance hídrico para el asesoramiento de impactos climáticos en la esorrentía de ríos. *International Institute for Applied Systems Analysis*. Laxenburg: WP-94-64.