Estado Plurinacional de Bolivia

Balance Hídrico Superficial de Bolivia (1980-2016)

Documento de difusión

MMAyA
Ministerio de Medio Ambiente y Agua

MMAyA

Ministerio de Medio Ambiente y Agua

BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE BOLIVIA

Elaborado por:
Ministerio de Medio Ambiente y Agua

A través de:
Stockholm Environment Institute
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)
Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés (IHH/UMSA)
Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón (LH/UMSS)

Carlos René Ortuño Yañez
Ministro de Medio Ambiente y Agua

Deposito Legal
4-1-282-18 P.O.

Diseño y Diagramación:
Juan Jimenez Ramirez

Impreso en:
SIGRAF

La Paz - Bolivia, 2018

Presentación

Siendo el agua un recurso vital y estratégico, enfoques tales como el desarrollo sustentable en equilibrio con la Madre Tierra y la gestión integrada de recursos hídricos son altamente necesarios, en un panorama actual en el cual nuestras sociedades tienden a generar mayor demanda de agua, ya sea para consumo de agua potable, producción agrícola, generación de energía, entre otras.

El problema se agrava en casos donde la cuantificación de los recursos hídricos no cuenta con información pertinente y útil para los diferentes sectores que planifican y gestionan los recursos hídricos.
Ante esta situación, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) pone a disposición el "Balance Hídrico Superficial de Bolivia" en el periodo histórico 1980-2016, como una herramienta fundamental para la cuantificación de la disponibilidad de recursos hídricos superficiales en el territorio nacional.

Por esta razón, es grato poder presentar este documento, que con seguridad será de gran utilidad para continuar trabajando hacia las metas establecidas en el Plan Sectorial de Desarrollo Integral de Medio Ambiente y Agua del Estado Plurinacional de Bolivia.

Carlos René Ortuño Yáñez
Ministro de Medio Ambiente y Agua

Resumen

Este documento presenta el resumen del estudio de Balance Hídrico Superficial de Bolivia (BHSB) ejecutado en el año 2017 bajo el liderazgo del Ministerio del Medio Ambiente y Agua (MMAyA) que creó una Plataforma Institucional la cual participó de las diferentes instancias del proyecto a través de talleres de avance realizados entre Noviembre 2016 y Noviembre 2017. El proyecto fue financiado por un préstamo del IADB que fue administrado por el programa Más Inversión para Riego (MI RIEGO) y ejecutado por el Instituto del Ambiente de Estocolmo (SEI) en colaboración con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés (IHH-UMSA), el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón (LH-UMSS) y el Centro de Investigaciones Atmosféricas de los Estados Unidos (NCAR).

Como es común para la generación de balances hídricos, los datos climáticos e hidrométricos existentes constituyeron la base de datos para alimentar los algoritmos de cálculo. En este caso, durante las etapas iniciales del procesamiento de datos, se lograron identificar retos como la escasez de datos en algunas regiones, la necesidad de filtrar los mismos para poder contar con información confiable, el procesamiento requerido para aquellos que se evaluaron como válidos, y la inclusión de los criterios de decisión para relleno y completado de series de tiempo identificadas como válidas y confiables. Este reto se presentó en este estudio sobre todo debido a la dificultad de obtener una base de datos para el período de tiempo de 36 años de 1980-2016 ya procesada por SENAMHI. Dicha institución facilitó toda la información existente, incluyendo aquella que ya estaba procesada, y fue labor del Equipo Implementador terminar de procesar y completar la base de datos para poder aplicar la metodología seleccionada. Además, debido a la existencia de cuencas compartidas con otros países, fue necesario obtener datos de Perú, Brasil, Chile, Argentina y Paraguay a través de sitios WEB y convenios del SENAMHI con los servicios meteorológicos extranjeros. De esta forma, se logró completar una base de datos para obtener el balance hídrico en todas las cuencas internas al país y también en aquellas compartidas con los países limítrofes. El trabajo relacionado con cuencas transfronterizas consideró que los datos de los países limítrofes ya han sido evaluados en términos de su calidad.

El trabajo se realizó usando el software Water Evaluation and Planning System – WEAP – del SEI. WEAP incluye un algoritmo para calcular la humedad de suelo que permite evaluar las diferentes entradas y salidas del Balance Hidrológico para cada paso de tiempo (Yates et al., 2005a, 2005b). El período de modelación fue definido para 1980-2016 a paso de tiempo mensual. Para utilizar el algoritmo se realizó el procesamiento de datos de entrada incluyendo variables meteorológicas como la precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y horas sol. También se procesaron datos hidrométricos para cerrar los balances en puntos clave donde se procedió a ajustar y calibrar el balance en subcuencas respectivas.

En particular para el procesamiento de los datos de precipitación y temperatura se utilizó un algoritmo denominado GMET – Grided Meteorological Ensamble Tool – el cual permite la cuantificación de la incertidumbre usando un proceso de interpolación de temperatura y precipitación que estima la probabilidad de la ocurrencia y probabilidad de la distribución de las cantidades de precipitación. Esta metodología fue desarrollada e implementada por el NCAR (Newman et al., 2015). Un resultado del método GMET es la desviación estándar de los mapas generados de la precipitación y temperatura con respeto a los observados, la cual sirve como una de las métricas de incertidumbre del modelo.

Otras variables climáticas como horas de sol, velocidad de viento y humedad relativa fueron regionalizadas con métodos de interpolación tradicional como distancia inversa ponderada. Los datos de suelo fueron basados en datos publicados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés). Dada la existencia de datos de uso de suelo liberados en Abril 2017 por la Agencia Espacial Europea (ESA), fue posible tener una información uniforme de datos de uso de suelo para el dominio espacial del estudio. Estas son fuentes mundiales y para las cuencas transfronterizas constituyeron la forma de contar con todos los datos necesarios.

Estas dos bases de datos, FAO y ESA, también aportaron incertidumbre en los resultados finales del estudio. El algoritmo de lluvia escorrentía usa parámetros derivados de procesos físicos en la parte superficial del modelo (parámetros ajustables en rangos limitados por la combinación entre suelo/cobertura) y parámetros susceptibles a calibración en la parte profunda del mismo. Sin embargo, estos parámetros también constituyen una fuente de incertidumbre en los resultados de escurrimiento y evapotranspiración derivados del algoritmo.
En la etapa de generación de los balances, se aplicó un procedimiento estructurado para la calibración de los balances con base en parámetros físicos del suelo y la cobertura vegetal. Ya que cada unidad hidrográfica fue cruzada con capas de suelo y cobertura vegetal, se usaron referencias base para definir los parámetros del modelo hidrológico en WEAP.

Los principales resultados del balance son la precipitación, evapotranspiración real, escurrimiento, caudal específico y coeficiente de escorrentía para las diferentes unidades hidrográficas del país localizadas en la Amazonía, el Plata y el Altiplano. Además, se generaron mapas de caudales por punto de salida de cada unidad hidrométrica. Debido a que el uso de variables climatológicas genera incertidumbre en los resultados del balance hídrico, se utilizaron estimados para calcular alguna medida de error, incluyendo la desviación estándar de la precipitación y temperatura. La estimación de los diferentes componentes del balance hídrico a saber: evapotranspiración potencial, precipitación, evapotranspiración real, y la escorrentía en todo el país de Bolivia requirió la regionalización en formato raster de los datos climáticos, cobertura vegetal y el tipo de suelo. Sin embargo, el enfoque a nivel de unidad hidrográfica, implicó que los resultados se presentaron como promedios mensuales multianuales derivados de las series de tiempo de 1980-2016.

Un aspecto adicional de este estudio fue la generación de escenarios climáticos para el país, y el estimado del balance hídrico para condiciones futuras. Este estimado permite tener información referencial sobre condiciones futuras posibles de la disponibilidad del agua en el país.

El estudio incluye un set de conclusiones y recomendaciones con respecto a aspectos claves identificados en el proceso. Se incluyen recomendaciones para reducir la incertidumbre de la base de datos utilizada, las cuales surgen de las mediciones climáticas directas y el uso de GMET. Otras recomendaciones se enfocaron en el funcionamiento y calibración del modelo detrás del BHSB. Finalmente, se presentaron recomendaciones sobre el uso de la plataforma WEAP para procesos de planeación y toma de decisión.

El trabajo coordinado del Equipo Implementador y la Plataforma Institucional constituye un ejemplo de trabajo participativo que recoge las visiones y conocimiento de las diferentes instituciones reflejadas en este producto final. La participación de los diferentes actores permitió identificar métodos comunes para resolver algunas de las fuentes de incertidumbres derivadas de un estudio de esta naturaleza. De esta forma, el estudio permitió la generación de modelos en la plataforma WEAP para el balance hídrico de cada cuenca de estudio, Además, queda como tarea a la Plataforma Institucional la actualización futura del balance hídrico a través de la mejora en técnicas para procesar los datos de entrada y enfoques de calibración más refinados que puedan mejorar las representaciones en WEAP. Aunque el método seleccionado no responde a ningún lineamiento internacional específico para desarrollo de balances hídricos, la selección de este método responde a la necesidad de planeación hídrica en el país a partir de una plataforma estandarizada que pueda ser refinada a nivel regional. En este documento se reportan los resultados finales del proceso de implementación del BHSB 2017.

Contenido

PRESENTACIÓN 3
RESUMEN 4
CONTENIDO 5

1. INTRODUCCIÓN 9
1.1. METODOLOGÍA 11
1.1.1. ENFOQUE DE REPRESENTACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE 11
1.2. GRILLA DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA 12
1.3. METODO DE CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL 14
2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA 15
2.1 INFORMACIÓN BIOFÍSICA (COBERTURA VEGETAL Y SUELO) 18
2.2. CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DE BOLIVIA 20
2.3. LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y SUS BALANCES HIDROLÓGICOS 21
2.4. CARACTERÍSTICAS DEL BALANCE HIDROLÓGICO (LINEA BASE) 21
3. PRECIPITACIÓN 23
3.1. DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE LAS PRECIPITACIONES 25
3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PRECIPITACIONES 25
3.3. PRECIPITACIÓN POR MACROCUENCAS 26
3.3.1. CUENCA AMAZÓNICA 26
3.3.2. CUENCA DEL PLATA 26
3.3.3. CUENCA DEL ALTIPLANO 27
4. EVAPOTRANSPIRACIÓN 29
4.1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA MEDIA DEL AIRE 31
4.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y ESTACIONAL DE LA ETR 32
4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN POR MACROCUENCA 33
4.3.1. CUENCA AMAZÓNICA 33
4.3.2. CUENCA DEL PLATA 33
4.3.3. CUENCA DEL ALTIPLANO 33
5. ESCURRIMIENTO 35
5.1. PATRÓN ESTACIONAL 37
5.2. CUENCA AMAZÓNICA 37
5.3. CUENCA DEL PLATA 38
5.4. CUENCA DEL ALTIPLANO 38
5.5. BALANCE HÍDRICO EN LOS LAGOS 39
6. ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS 41
6.1. INCERTIDUMBRE Y ERROR DEL BALANCE HIDROLÓGICO 43
6.2. INCERTIDUMBRE DE GMET 43
6.3. DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE GMET 44
6.4. VALIDACIÓN DE GMET CON OTROS SETS DE DATOS 45
6.5. VALIDACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN POR MODELACIÓN HIDROLÓGICA 46
6.6. ÍNDICE DE ARIDEZ 46
6.7. BALANCE HIDROLÓGICO PARA CONDICIONES CLIMÁTICAS FUTURAS 47
6.8. CAMPAÑAS DE AFORO DURANTE EL ESTUDIO 48
6.9. RESUMEN DEL PROCESO DE CAPACITACION DURANTE EL ESTUDIO 49
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 51
7.1. CONCLUSIONES 53
7.2. RECOMENDACIONES 54
7.3. REFERENCIAS 57

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación Balances Hídricos de Bolivia 1992, 2012, 2017 8
Tabla 2. Resumen de puntos de calibración e unidades hidrográficas del BHSB de Bolivia 19
Tabla 3. Precipitación media multimensual y multianual en mm, periodo 1980-2016 22
Tabla 4. Temperatura media promedio multimensual y multianual para el periodo 1980-2016 27
Tabla 5. Evapotranspiración media multimensual y multianual periodo 1980-2016 28
Tabla 6. Escurrimiento medio multimensual y multianual en mm para el periodo 1980-2015 30
Tabla 7. Resumen de estaciones procesadas 35
Tabla 8. Categorías para el índice de aridez (IDEAM, 2013) 38
Tabla 9. Cambios relativos en los diferentes componentes del balance hídrico para los diferentes escenarios (MPI-ESM-MR y CESM-CAM5) y periodos prospectivos en cada una de las macrocuencas de Bolivia 39
Tabla 10. Estaciones hidrométricas priorizadas para campaña de aforo 40
Tabla 11. Resumen participación de actores en talleres de transferencia de capacidad 42

Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplo de dos ensambles de enero 1981 con su promedio y desviación estándar 10
Figura 2. Estaciones de validación de GMET dentro y fuera de Bolivia, incluyendo elmuestreo de CHIRPS 11
Figura 3. Métricas estadísticas estacionales calculadas usando GMET sobre las estimaciones de pixeles en todas las 515 estaciones en Bolivia 11
Figura 4. Esquema conceptual del modelo Soil Moisture (Yates et al., 2005b) 14
Figura 5. Conceptualización del balance hídrico en las lagunas de inundación y su relación con los componentes del modelo “soil moisture” 15
Figura 6. Clasificación de ESA-CCI-2010 para Bolivia con 36 clases de cobertura vegetal a una resolución de 300 m 16
Figura 7. Cambio acumulado de cobertura vegetal entre 1992 y 2015 usando las clases del IPCC para Bolivia 17
Figura 8. Mapa de tipo de suelo de la FAO 18
Figura 9. Esquema gráfico de provincias fisiográficas de Bolivia 18
Figura 10. Macrocuencas de Bolivia 19
Figura 11. Precipitación media multimensual para el periodo 1980-2016 22
Figura 12. Precipitación media multianual periodo 1980-2016 23
Figura 13. Temperatura promedio multianual para el periodo 1980-2016 26
Figura 14. Temperatura media promedio multimensual [°C] para el periodo 1980-2016. 27
Figura 15. Evapotranspiración media multimensual periodo 1980-2016 27
Figura 16. Escurrimiento medio multimensual en mm para el periodo 1980-2015 30
Figura 17. Componentes de balance hídrico para la macrocuenca Amazónica 30
Figura 18. Componentes de balance hídrico para la cuenca Pilcomayo y Bermejo, macrocuenca La Plata 31
Figura 19. Componentes de balance hídrico para la macrocuenca Altiplano 32
Figura 20. Aporte de agua al lago Poopó y su relación con los niveles almacenados 32
Figura 21. Densidad de estaciones para estimación de precipitación en GMET (número de estaciones por kilómetro cuadrado) 35
Figura 22. Desviación estándar promedio relativo por unidad hidrográfica de los 30 miembros de GMET 36
Figura 23. Promedio del MBE (%) en los puntos de validación por catchment 37
Figura 24. Resultados estadísticos mensuales de comparación de CHIRPS y GMET con estaciones 37
Figura 25. Proceso de validación de GMET en el contexto de modelación hidrológica 37
Figura 26. Factores de ajuste de precipitación identificados en el proceso de calibración 38
Figura 27. Índice de Aridez de Bolivia periodo 1980-2016 39
Figura 28. Estaciones de la campaña de aforo del SENAMHI (Fuente: SENAMHI) 41
Figura 29. Sesión técnica con representantes del MMAYA y otras organizaciones nacionales y regionales, y con directivos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija, Septiembre 2017 42

1. Introducción

Presa Milluni

El Balance Hídrico Superficial de Bolivia (BHSB) se generó usando la plataforma WEAP, la cual requiere datos de entrada de clima, cobertura vegetal y suelo. Los resultados principales del estudio se encuentran en este reporte y los anexos tanto fisicos como digitales los cuales incluyen tablas y mapas para las condiciones históricas y futuras del clima. Por otro lado, los detalles de la recolección y procesamiento de datos se encuentran en el anexo digital dentro del documento denominado "Metadocumento que compila las etapas previas del proyecto en términos de recolección, procesamiento de datos, calibración y resultados preliminares. Además, este Anexo incluye los detalles de las campañas de aforo del SENAMHI que se realizaron durante el estudio.

El BHSB se generó para las principales macrocuencas del país incluyendo la cuenca del Altiplano, la cuenca del Plata, y la cuenca Amazónica generando balances calibrados en 77 cuencas de cierre y reportados en 95 unidades hidrográficas (UH) según clasificación Pffastteter continental llamado Hydrobasin (Lehner and Grill, 2013). Para las cuencas sin estaciones hidrométricas en las cuales los balances no se pueden calibrar, se utilizó la ecuación general de balance hídrico donde la evapotranspiración real (ETR) fue estimada con la ecuación de Turc (Turc, 1961). En el extremo sur del Altiplano tres UH (Laguna Colorada, Laguna Pasto Grande, y Silala) fueron descartadas del balance hídrico debido a un gran déficit en información.

El trabajo se dividió, teniendo en cuenta la experiencia de las instituciones del Equipo Implementador, de forma que el balance de la cuenca del Plata fue liderado por el IHH, el balance de la cuenca Amazónica fue ejecutado por el LH, y el balance de la cuenca del Altiplano y de las cuencas sin puntos de calibración fue realizado por SEI. La calibración del balance hídrico se ejecutó de forma coordinada entre las instituciones siguiendo los mismos criterios, y teniendo en cuenta los fenómenos específicos de cada macrocuenca. De esta forma, por ejemplo, la cuenca del Altiplano fue necesario considerar el balance volumétrico de los lagos, en la cuenca del Plata fue importante procesar y filtrar los datos hidrométricos a usar, y en la cuenca Amazónica fue esencial considerar procesos como recarga subterránea, ruteo de flujo y planicies de inundación. Los detalles de los criterios y proceso de calibración se encuentran en el Anexo digital del presente documento.

Este reporte comienza con una descripción general de la metodología utilizada. Luego presenta las características fisiográficas generales del país, las cuales determinan las cuencas o unidades hidrográficas usadas para estimar y presentar la información. Los balances hídricos son presentados a nivel de dichas cuencas hidrográficas de forma tabular y en mapas en los anexos de este reporte. Posteriormente, se presentan los componentes principales del BHSB, incluyendo un detalle sobre la distribución estacional y espacial de las principales variables del balance hídrico. La secuencia continúa con la presentación general de fuentes de incertidumbre, y de forma más específica, las estimaciones de error logradas en el procesamiento de los datos de precipitación. Como corolario de la presentación de resultados se presenta una estimación del balance hídrico para condiciones climáticas futuras.

Las últimas secciones de este documento consignan un resumen del proceso de aforos realizado por SENAMHI en este proyecto y un resumen del proceso de desarrollo de capacidades y transferencia de metodologías. Por último, se presenta una sección con conclusiones, recomendaciones, y oportunidades para el uso del BHSB en procesos de planeación y toma de decisiones. Se espera que este set de conclusiones y recomendaciones constituyan una guía para la Plataforma Institucional en sus esfuerzos y responsabilidad de continuar el proceso de generación de información para la planeación de recursos hídricos en Bolivia.

1.1 Metodología

A continuación, se presentan aspectos generales de la metodología, incluyendo una discusión sobre las fuentes de incertidumbre, y la descripción del procesamiento de precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y escurrimiento.

1.1.1. Enfoque de representacion de la incertidumbre

La metodología se basa en el uso del algoritmo de hidrología en WEAP, el cual requiere datos de entrada de clima y la parametrización, para generar los valores de caudal de cada unidad hidrográfica. Este procedimiento de cálculo, como cualquier modelo, contiene incertidumbre en las diferentes etapas de recolección y procesamiento de datos. Con base en esto, el margen de error del algoritmo varía para cada unidad hidrográfica. Para estimar esta incertidumbre, la comparación entre valores estimados de caudal y valores observados en las estaciones hidrométricas en las unidades hidrográficas calibradas proporcionó un estimado del error del modelo, el cual se estimó a través de métricas estadísticas. Este error proviene de fuentes de incertidumbre sobre los datos de entrada y el proceso de calibración. A pesar del filtrado de datos de entrada, y de la selección de GMET como un proceso científicamente probado para regionalizar los datos de clima, los datos y procedimiento de cálculo acumulan incertidumbre que resulta en errores implícitos en los resultados reportados por unidad hidrográfica lo cual se debe considerar a la hora de utilizar los mismos.

Algunas de estas fuentes de incertidumbre fueron estimadas a través de decisiones en la etapa de calibración. Por ejemplo, una fuente de error estimada fue la desviación estándar de la precipitación y temperatura basada en GMET que permitió justificar la aplicación de factores de precipitación, pero no alcanzó a explicar toda la incertidumbre asociada con los datos de entrada de precipitación en regiones como Madre de Dios o Alto Beni. Aunque el valor de la desviación estándar da una idea del error máximo en términos de la precipitación, este estimado cubre todas las fuentes de incertidumbre asociadas a otros aspectos de la metodología, incluyendo el procedimiento de cálculo, y el error inherente a las bases de datos de suelos y cobertura vegetal el cual es de alguna manera representado con la calibración del proceso hidrológico. La combinación de los parámetros de suelo a valores basados en parámetros físicos también permitió limitar los errores e inconsistencias incurridas por el algoritmo, sin embargo, no permite alcanzar una comprensión completa de fenómenos que los datos de entrada no estén capturando (ej. el cambio abrupto en la geología entre dos unidades hidrográficas a las cuales se les haya asignado un mismo set de parámetros). Para mayor información, en la sección 6 de este reporte se presenta en detalle los aspectos de incertidumbre asociados a GMET, incluyendo la evaluación de datos climáticos a partir de los resultados mismos del balance hídrico calibrado. De todas maneras, se considera que la estimación regional de la precipitación con GMET constituyó un avance significativo con respecto a estudios de balance hídrico previos.

Respecto a la estimación la evapotranspiración potencial (ETP), esta se basó en el método de Penman Monteith que en algunos casos fue corregido mediante comparación con resultados de estudios previos y evaporación en tanque tipo A. Basado en estos estimados de datos de entrada y en el algoritmo de humedad de suelo en WEAP, se calculó el escurrimiento para cada unidad hidrográfica y sus puntos de calibración asociados. En las cuencas sin estaciones hidrométricas, se estimó el balance hídrico para cada unidad hidrográfica calculando la ETR con la ecuación de Turc (Turc, 1961).

En cuencas con pérdidas subterráneas se incorporó una conexión con los acuíferos a través del uso de un elemento de agua subterránea en WEAP. Además, en las planicies inundables de la cuenca Amazónica fue necesario usar algoritmos de inundación para representar los límites de caudal bajo los cuales el agua desborda el río y genera lagunas de inundación temporales que retardan el comportamiento de los hidrográmas aguas abajo. En la cuenca del Altiplano, se generó un balance a nivel de los dos lagos principales (Titicaca y Poopó), estimando los caudales de entrada de las cuencas y los de salida de los lagos representando la variabilidad volumétrica de ambos lagos en función de la climatología del período de modelación.

A través del uso de la metodología basada en WEAP seleccionada, y a pesar de las incertidumbres asociadas a esta metodología, el BHSB realizado en 2017 constituye un avance en la generación de información hidrológica para planificación del recurso hídrico en el país. Estudios previos permitieron lograr información y avances que sirvieron para estimar la realidad hídrica del país a través de diferentes métodos de procesamiento de datos y algoritmos de cálculo (ver comparación en Tabla 1), sin embargo el presente estudio posee componentes de avance que garantizan resultados dinámicos y actualizables a futuro.

Tabla 2. Comparación Balances Hídricos de Bolivia 1992, 2012, 2017

	1992	2012	2017
Método	Ecuación general de balance hídrico	Método Temez	Método de humedad de suelo de dos baldes en WEAP (Yates et al., 2005a)
Número de estaciones pluviométricas	550	346	381
Rellenado de información	no	Si	si
Período	1968-1982	1998-2012	1980-2016
Número de años	14	14	36
Paso de tiempo	Promedio anual multianual	Promedio mensual para un año	Promedio mensual para el histórico
Numero de pasos de tiempo	1	12	432
Objetivo	Generar línea base hidrológica uniforme para el país	Generar una actualización de la linea base hidrológica	Generar una serie de herramientas para producir balances base en unidades hidrográficas
Resultado	Mapas temáticos de clima de hidrología	Balances hídricos por unidad hidrográfica	Balances hídricos dinámicos y actualizables por unidad hidrográfica en plataforma WEAP
Unidades Hidrográficas	22 macro 122 estaciones de cierre	80	96 unidades hidrográficas 77 estaciones de cierre 197 catchments
Método de interpolacion para Precipitación y Temperatura	Polígonos Thiesssen (Brassel and Reif, 1979)	¿?	GMET (Clark and Slater, 2006; Newman et al., 2015)
Método de interpolación para otras variables climáticas	NA	¿?	IDW (Chen and Liu, 2012)
Cobertura vegetal	NA	COBUSO	ESA
Suelo	NA	Geología de Bolivia	FAO

La plataforma informática generada en WEAP para el BHSB permitirá continuas actualizaciones de las herramientas para estimar la disponibilidad hídrica de las regiones del país. Se espera que esta plataforma informática sea sujeta a actualizaciones consecutivas para el continuo mejoramiento de la información para planificación de recursos hídricos en Bolivia.

A continuación, se presenta en mayor profundidad los aspectos metodológicos de procesamiento de datos y generación del BHSB en la plataforma WEAP.

1.2. Grilla de Precipitación y Temperatura

La grilla desarrollada para el BHSB se basa en la metodología de GMET descrita en detalle en (Newman et al., 2015). Esta metodología reconoce la incertidumbre inherente de los productos de interpolación de precipitación y temperatura debido a las observaciones escasas, representatividad de las observaciones y errores de medición. Reconociendo esta incertidumbre, el método propuesto produce un ensamble de precipitación y temperatura a paso de tiempo diario basado en las observaciones existentes. La generación de ensambles permitió la estimación de una varianza para determinar la incertidumbre, y además durante la validación del producto se realizó una validación cruzada con datos de estaciones observadas. La verificación estadística del ensamble permitió identificar la confiabilidad del ensamble. Aunque el promedio del ensamble es similar a otros sets de datos existentes a nivel global, el producto de GMET es una representación más realista de la estadística de la precipitación por considerar parámetros espaciales invariantes en el tiempo y una red de estaciones de medición puntual, lo cual impacta la derivación empírica de otros campos usados en la modelación hidrológica. La habilidad para la modelación hidrológica de la grilla fue corroborada durante la ejecución de los balances hídricos.

Los algoritmos usados en GMET son una extensión del trabajo realizado por Clark and Slater (2006) para desarrollar un ensamble diario de precipitación y temperatura basado en estaciones para los Estados Unidos de América. El propósito principal al desarrollar este set de datos es para usarlos como datos de entrada para la modelación de superficie de suelo e hidrología y para estudios de asimilación de datos, pero también puede ser usado para la validación de modelos atmosféricos. La descripción del método se basa principalmente en la explicación del sistema de interpolación probabilística. En secciones posteriores, se describe la validación del método y se dan pautas para mejorar la aplicación para el territorio Boliviano.

La interpolación probabilística tiene dos pasos principales:

- La interpolación espacial, y
- La generación del ensamble

La interpolación espacial usa series de datos completa de precipitación y temperatura. Este set de datos cubre el territorio de Bolivia. Los detalles de la generación del set de datos completo están descritos en el Anexo digital "Metadocumento" donde se presentan aspectos del procesamiento de datos de este proyecto. Después de la depuración y análisis de las series, 384 estaciones individuales de temperatura y precipitación fueron consideradas para la interpolación. Los datos de estas estaciones fueron tratados y rellenados. GMET fue corrido para el territorio de Bolivia usando dichas estaciones para obtener un producto final con una resolución espacial de 0.05° (celda) a escala de tiempo diario para el período hidrológico 1980-2016 lo cual implica que se inicia en septiembre 1980 y termina en agosto 2016. El método siguió la guía de Clark and Slater (2006).

Para la generación del ensamble, se usaron campos aleatorios correlacionados espacialmente (SCRFs por sus siglas en inglés – Spatially Correlated Random Fields). El método para generar los SCRF generó números progresivamente para cada punto de la grilla, condicionando los números aleatorios de acuerdo con los números generados previamente. El SCRF se generó para cada día de forma independiente para cada una de las variables: precipitación, temperatura media y rango diurno (diferencia entre temperatura máxima diaria y mínima).

Un resultado importante de uso de SCRF para generar los valores puntuales fue que permitió que sucedan eventos más extremos que las observaciones en secciones de la grilla donde no hay observaciones. Este es un punto clave con respecto a cualquier esquema basado en interpolaciones en que cada punto de la grilla es limitado por el valor máximo de las observaciones, lo cual no siempre es correcto y peor aún en terrenos con bastante influencia orográfica[1].

En total se desarrollaron 30 miembros del ensamble mensual para el periodo 1980-2016 con su promedio y desviación estándar. El promedio del ensamble es el candidato ideal para utilizar como entrada al modelo WEAP para el balance hidrológico y la desviación estándar constituye la representación de la incertidumbre en los datos de entrada de clima (precipitación y temperatura específicamente). Un ejemplo del resultado de la grilla para enero de 1981 se presenta en la Figura 1. En ella, se observa la diferencia entre dos miembros del ensamble, el promedio y la desviación estándar de la misma. En general los patrones espaciales entre ambos miembros del ensamble son consistentes, con poca precipitación en la región de Altiplano Central y Sur. Sin embargo, el miembro #30 presenta mayor precipitación en la zona del Beni. El promedio de los ensambles presenta una naturaleza más realista del clima con regiones de alta y baja precipitación más definidas. La desviación estándar muestra las zonas con mayor o menor incertidumbre en la precipitación en base a todos los miembros del ensamble. Mayor incertidumbre se muestra en las zonas de mayor precipitación y baja densidad de estaciones en el Beni. Este tipo de información es útil para definir fuente de incertidumbre en la modelación hidrológica y generación de balances hídricos.

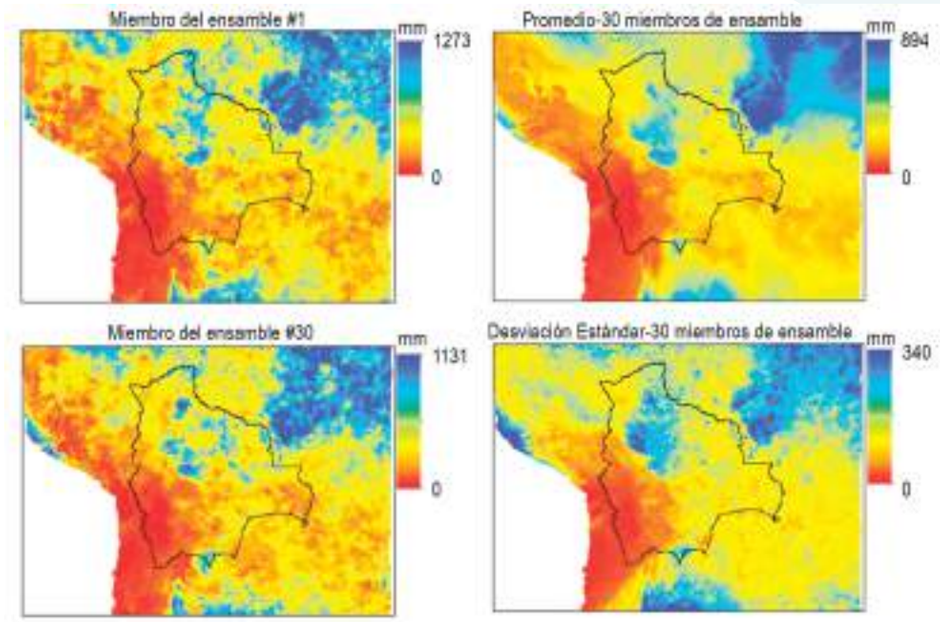

Figura 1. Ejemplo de dos ensambles de enero 1981 con su promedio y desviación estándar

1 El método detrás de GMET esta concebido para representar clima en terrenos complejos (de Clark and Slater (2006))

Además de las estaciones usadas para la grilla, se obtuvieron 131 estaciones para validación, las cuales incluyen menos de 15 años de información y fueron descartadas para ser usadas en la corrida del GMET por su corta duración menor al período 1980-2016 requerido para este estudio. Ya que dichas estaciones no fueron usadas en el algoritmo de GMET pero si para el paso de validación, entonces el total de estaciones para la validación de la grilla fue 384+131 = 515 estaciones. Para mejorar la precisión y calidad del estimado de GMET sobre el dominio de Bolivia, algunas estaciones se adicionaron en una zona de amortiguamiento por fuera del territorio de Bolivia. Estas estaciones incluyeron estaciones meteorológicas de Brasil, Paraguay, Argentina, Chile y Perú. Además, en la parte Noroeste de Bolivia donde no existen estaciones dentro o fuera de Bolivia, se adicionaron 12 puntos de muestreo de Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) para la corrida de GMET para aumentar su calidad usando datos de precipitación basados en información satelital (Figura 2).

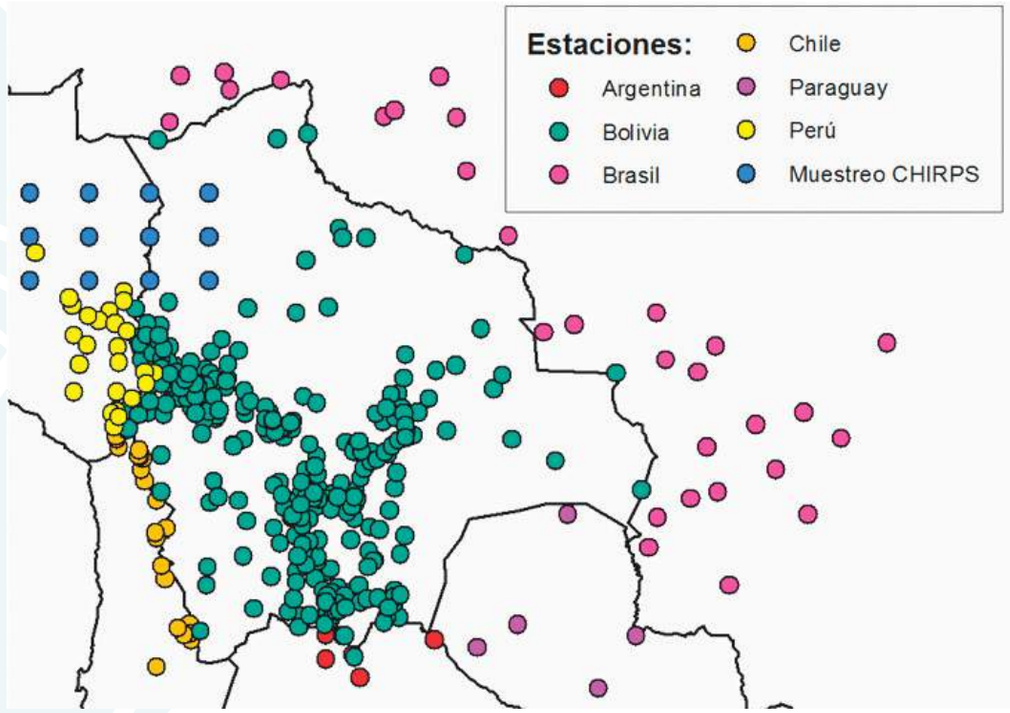

Figura 2. Estaciones de validación de GMET dentro y fuera de Bolivia, incluyendo el muestreo de CHIRPS

Con respecto al desempeño estacional de GMET en Bolivia, la Figura 3 muestra la métrica estadística estacional para todos los 515 puntos de observaciones. El rango total de las métricas estadísticas se muestra como líneas sólidas. El signo circular determina el valor promedio de cada métrica y los cuadrados alrededor de los puntos representan la desviación standard (STDEV) para los valores calculados. Si se considera el hecho que el 63% de los valores calculados están dentro del promedio+STDEV y promedio-STDEV, entonces se puede concluir que la mayoría de los valores de los pixeles de GMET se encuentran altamente correlacionados con los valores observados en Bolivia con un coeficiente de correlación mayor a 0.8. Sin embargo, hay algunos pixeles en los cuales el coeficiente de correlación fue menor, especialmente en la estación seca en la que algunas de las observaciones presentan incluso correlación negativa. Esto indica que se debe prestar más atención a los estimados de GMET en la época seca y las implicaciones en el balance hídrico fueron analizadas en la etapa de

la calibración del modelo hidrológico. En la época seca entre el 80 y 90% del caudal corresponde al flujo base, y el resto a escurrimiento por precipitaciones ocasionales de magnitudes pequeñas; por tanto, se esperaría que los efectos de la subestimación no fuesen relevantes en el balance.

Los valores de sesgo son cercanos a cero en todas las estaciones excepto para la estación seca, similar a la gráfica del coeficiente de correlación. Es interesante observar que el error medio absoluto (MAE, por sus siglas en inglés) en la estación seca es menor que el valor para la estación húmeda o de transición lo cual es un hecho relacionado con los valores bajos de precipitación y lluvia durante la estación seca y la naturaleza del estadístico mismo (expresado en valores absolutos no adimensionales). Se observa que en la cuarta grafica de la Figura 3, el valor normalizado de raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) en la estación seca es mucho mayor al de las otras estaciones, lo cual muestra el hecho de que el rango de error del valor en la estación seca en comparación con el promedio de precipitación es grande. Sin embargo, se observa que los valores promedio de todas estas estadísticas para la estación seca son cercanos a las otras estaciones (signos circulares), y que una pequeña cantidad de pixeles (menor al 37%) no presentan una alta precisión con respecto a GMET en la estación seca, impactando las métricas y el rango de error en ellas. El Bias en el período seco es mayor debido a que en este período los valores absolutos son menores lo cual hace que el error relativo ser mayor.

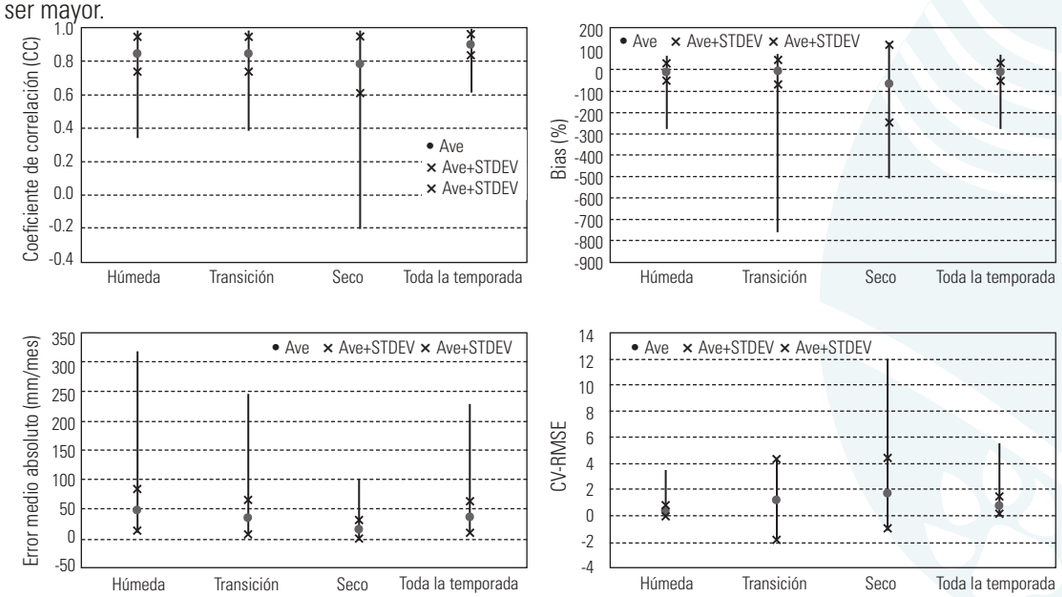

Figura 3. Métricas estadísticas estacionales calculadas usando GMET sobre las estimaciones de pixeles en todas las 515 estaciones en Bolivia.

1.3. Metodo de calculo de la Evapotranspiración Potencial

El modelo hidrológico de WEAP, Soil Moisture (SM), para estimar la ETP usa la versión modificada del método de Penman-Monteith para un cultivo o hierva de altura 0.12 m con una resistencia superficial de 69 s/m, y se define de la siguiente manera (Maidment, 1993):

$$E_{rc} = \frac{\Delta}{\Delta - \gamma^*}(R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta - \gamma^*}\frac{900}{T+275}U_2 D$$

donde:
E_{rc}= Evapotranspiración de referencia,
R_n = Intercambio de radiación neta para la cobertura de cultivo,
G = Flujo de calor del suelo medido o estimado,
T =Temperatura media del aire,
U_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura,
D = Déficit de presión de vapor,
Δ = Pendiente de la curva de la presión de vapor,
γ = Constante psicométrica, $kPa\ °C^{-1}$
γ^*=γ(1+0.33 U_2)

El método requiere datos de radiación, temperatura media del aire, humedad atmosférica, y velocidad del viento. Según Allen, Pereira, Raes, & Smith (1998) el uso de temperatura media en lugar de temperatura máxima y mínima tiene como resultado una presión de saturación más baja, por lo tanto un déficit de presión de vapor también más bajo, lo que resulta en la subestimación de la evapotranspiración de referencia. Por otro lado, es común no contar con datos medidos de radiación solar. El SM de WEAP utiliza la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación, el algoritmo puede ser consultado en Maidment (1993) y Richard G Allen et al. (1998). Para estimar la radiación el SM de WEAP requiere datos de latitud y fracción de nubes, esta última dada por la relación $\frac{n}{N}$ donde es la duración real de la insolación [horas] y N es la duración máxima posible de la insolación [horas].

Cuando no están disponibles los datos medidos de la humedad atmosférica (presión promedio real diaria de vapor), esta puede ser derivada de otras variables climáticas como la humedad relativa máxima y mínima. El SM de WEAP básicamente usa la humedad relativa media y la temperatura media para estimar la presión real de vapor y los algoritmos usados pueden ser consultados en Maidment (1993) y Allen et al. (1998). En resumen, para estimar la evapotranspiración de referencia en SM de WEAP son necesarias las siguientes variables: temperatura media del aire [^oC], humedad relativa media [%], velocidad del viento [ms^{-1}], fracción de nubes, y latitud. Las variables climáticas deben ser ajustadas a una altura de 2 m.

Debido a las simplificaciones de los datos de entrada, la estimación de evapotranspiración de referencia puede tener imprecisiones, como por ejemplo con el uso de temperatura media del aire se podría subestimar la ETP. Otra desventaja a considerar es que el algoritmo funciona a nivel diario y cuando los datos de entrada son mensuales, el SM de WEAP repite el valor para los todos los días de un mes dado.

En este contexto, cuando las estimaciones de ETP se realizan internamente en WEAP el parámetro de Kc debe ser considerado como un factor de corrección y no necesariamente con su interpretación original en la literatura. En el caso específico de este estudio de balance hídrico, el factor de corrección se definió en base a las comparaciones de los resultados de ETP de WEAP con otros estudios tanto de escala nacional como regional, donde existe evidencia de que los cálculos de ETP son relativamente confiables. Además se comparó con la ETP estimada a partir de datos de evaporación en tanque tipo A.

2. Modelación hidrológica

Rio Isiboro Secure

Soil Moisture (SM) es un método uni-dimesional de dos baldes de suelo con un esquema de contabilidad basado en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial (interflujo), y percolación profunda de una cuenca. Este método permite la caracterización del impacto de la cobertura vegetal y del suelo en los procesos hidrológicos. La percolación profunda de una unidad hidrográfica puede ser transmitida a un cuerpo de agua superficial como flujo base o al almacenamiento de agua subterránea si el vínculo apropiado se hace entre la unidad hidrográfica y un nodo de agua subterránea.
Una unidad hidrográfica, N, puede ser dividida entre fracciones de área j representando diferentes usos de suelo y tipos de suelo, y el balance hídrico se calcula para cada fracción de área. El clima se asume uniforme dentro de cada unidad hidrográfica y el balance se estima como:

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

Donde z_1,j es el almacenamiento relativo dado como fracción del almacenamiento total en la zona de raíz (suelo, (0,1)), Rd_j (mm) es la fracción de cobertura de suelo en j. La precipitación efectiva Pe(t), incluye derretimiento desde un paquete de nieve en la sub cuenca. La PET o ETP es estimada según la ecuación presentada en la sección 1.3.

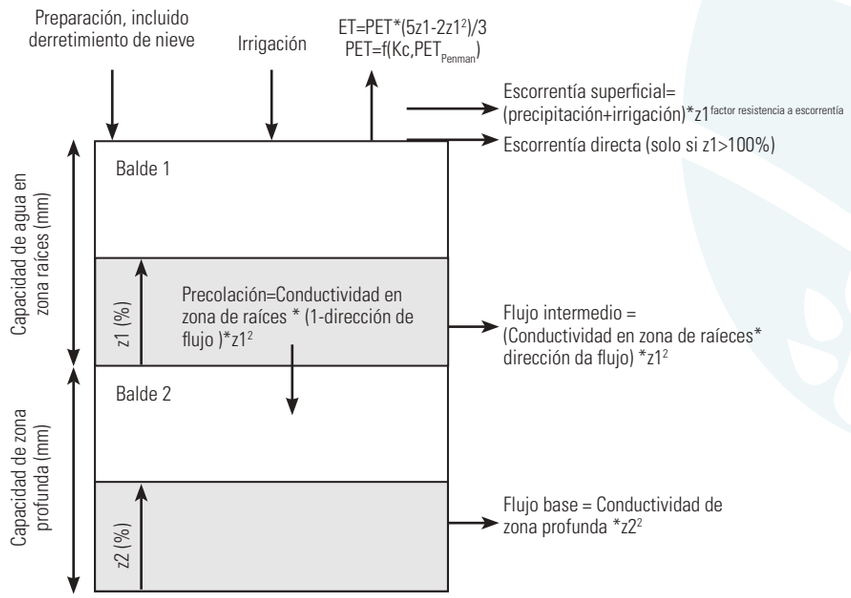

Figura 4. Esquema conceptual del modelo Soil Moisture (Yates et al., 2005b)

El albedo varía en un rango de 0.15 a 0.25 como función de la cobertura de nieve, y el término para el flujo de calor en suelo "G" es ignorado en el cálculo. $k_{c,j}$ es un factor de corrección para cada fracción de cobertura de suelo en el sub elemento j, RRF_j es el factor de resistencia de escurrimiento para cada fracción de cobertura; valores altos de este parámetro representan menor escurrimiento superficial. En la ecuación de Rd_j el cuarto y quinto términos corresponden al inter flujo y percolación respectivamente, donde $k_{s,j}$ es una estimación de la conductividad en la zona de raíces saturada (mm/paso de tiempo de simulación) y f_j es un coeficiente de partición o división relacionado al suelo, tipo de cobertura, y la topografía que fraccionan el agua en dos componentes, vertical y horizontal (dirección de flujo en el modelo).

El escurrimiento superficial y de inter flujo esta descrito de la siguiente manera:

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

El modelo permite definir escurrimiento dirigido hacia elementos como ríos y acuíferos. Para los casos en que las condiciones generales de flujo subsuperficial, el flujo base del segundo balde es estimado con la siguiente ecuación:

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

Donde el flujo de entrada hacia este balde, S_{max} es la percolación desde el balde superior dado en la ecuación de Rd_j, y k_{s2} es la conductividad saturada en el balde inferior (mm/paso de tiempo de simulación), la cual es dada como un valor general para la cuenca (no lleva subíndice j). Las ecuaciones de Rd_j y S_{max} deben ser resueltas por medio de iteración para obtener valores coincidentes en ambos baldes para lo cual WEAP utiliza un 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 A_j es el área de aporte del elemento j.

El agua que se queda en la superficie del suelo, conocida como inundación, puede ocurrir debido a cultivo de arroz, humedales manejados o no manejados, o inundación en la planicie inundable. La inundación existe si la zona de raíces está saturada. El método SM calcula el flujo afuera de la zona de raíces teniendo en cuenta evapotranspiración, influjo y percolación profunda.

Para representar los procesos de almacenamiento en planicies inundables en el río Mamoré y los humedales del Iténez, se aplicó el módulo de inundación de WEAP. Este módulo permitió representar la dinámica de inundaciones de forma básica con el fin de entender su impacto en el balance hídrico regional. El método tiene un enfoque conceptual y más simple que otros sistemas de modelación como el HEC-RAS (USACE and RMA, n.d.) o el MIKE21 (DHI, 2016), los cuales requieren más información y tiempo de ejecución.

En el módulo de inundación, WEAP simula el movimiento de agua entre el río y las planicies inundables usando un componente de almacenamiento superficial en la unidad hidrológica ("catchment"). Las aplicaciones potenciales de este módulo incluyen la simulación de plantaciones de arroz, manejo de humedales artificiales, o inundación natural.

La Figura 5 muestra la conceptualización del balance hídrico del componente de almacenamiento superficial, y su relación con los dos baldes del modelo hidrológico de humedad de suelo. Los flujos de evapotranspiración, escorrentía superficial, flujo sub-superficial y percolación a la zona profunda están estimados con los algoritmos del método de SM. La escorrentía superficial incluye el caudal de salida de la planicie de inundación, el cual es definido como un porcentaje de agua por encima de un umbral de almacenamiento en la planicie de inundación. El caudal de entrada a la planicie de inundación está definido como un porcentaje de agua por encima de un umbral de caudal en el río. Este volumen de agua se puede distribuir entre diferentes catchments, y entre diferentes clases de uso de suelo dentro del catchment. Las ecuaciones para calcular los flujos asociados con la planicie inundada están descritas con más detalle en (Angarita et al., n.d.).

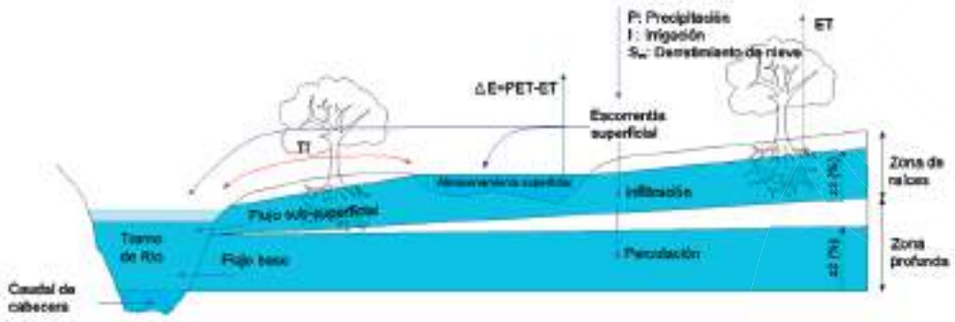

Figura 5. Conceptualización del balance hídrico en las lagunas de inundación y su relación con los componentes del modelo "soil moisture"

Para aplicar el módulo de inundación, se definieron seis parámetros:

- **Límite de inundación del río (River Flooding Threshold):** Es el caudal límite justo antes de la inundación y se define en el tramo del río.
- **Fracción de inundación del río (River Flooding Fraction**): Es el porcentaje del caudal por encima del caudal límite que va a la planicie de inundación y se define en el tramo del río en WEAP.
- **Fracción de inundación recibida (Fraction flooding received):** Es el porcentaje del volumen de inundación que llega a cada clase de uso de suelo y se define en el objeto del catchment.
- **Profundidad máxima (Maximum depth):** Es el nivel máximo en la planicie de inundación sobre el cual el flujo vuelve al río.
- **Fracción de retorno de inundación (Flood return fraction):** Es el porcentaje de agua sobre la profundidad máxima de la planicie que vuelve al río en un paso de tiempo y se define en el objeto catchment. Este parámetro sirve para extender la duración de la inundación en la planicie después de que ha llegado a su profundidad máxima.
- **Curva volumen-área-elevación:** Define la relación entre el volumen de inundación y el área inundada para cada catchment. WEAP requiere datos de altura de inundación (H) y la correspondiente Área Inundada (A) para calcular el volumen de inundación.

En la aplicación del modelo, estos datos fueron suministrados por el MMAyA a través de la información generada en otros estudios específicos para inundaciones en la cuenca amazónica.

2.1 Información Biofísica (Cobertura vegetal y Suelo)

La información biofísica considerada para este estudio específicamente para la parametrización del modelo hidrológico fue principalmente cobertura vegetal y tipo de suelo. Para la primera se usó como fuente la ESA y para la segunda de la FAO.

En Abril de 2017 la iniciativa de Cambio Climático y Cobertura Vegetal (CCI-LC) de la ESA publicó un set de mapas de cobertura vegetal consistente. El producto es acompañado por una Guía de Usuario del Producto (PUG) que provee información detallada de su creación y características. Esta sección describe los aspectos importantes del set de datos, pero para más información detallada se recomienda usar el PUG el cual está disponible en sitio web del CCI donde los datos también pueden ser bajados. Los datos están disponibles en formatos GeoTIFF y NetCDF. El producto ESA-CCI-LC se fundamenta en datos del satélite Espectrómetro de Imágenes de Media Resolución (MERIS) y del PROBA-V y de una combinación de datos de AVHRR y SPOT-VGT para crear una clasificación de cobertura vegetal completa que cubre el período entre 1992-2015 (24 años) con una resolución de 300 m.

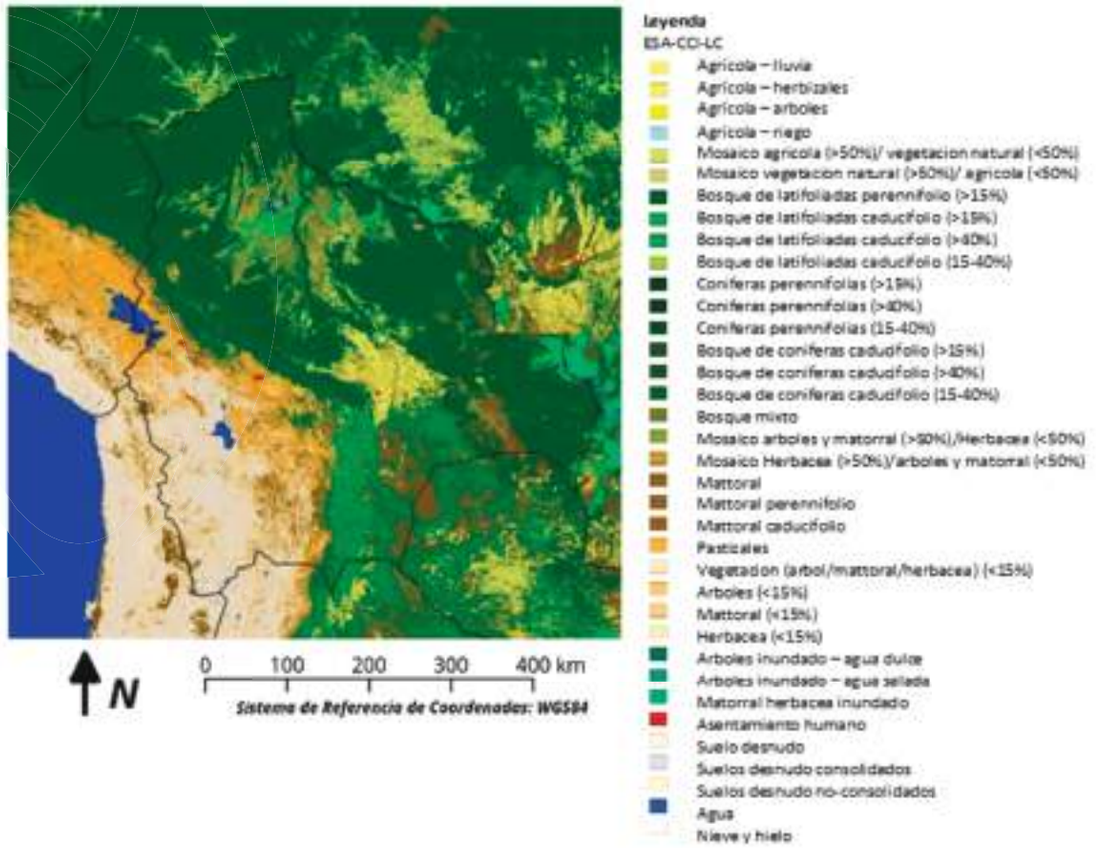

Figura 6. Clasificación de ESA-CCI-2010 para Bolivia con 36 clases de cobertura vegetal a una resolución de 300 m

La topología de cobertura vegetal fue definida en el Sistema de Clasificación de Cobertura Vegetal (LCSS) desarrollado por la FAO de las Naciones Unidas (UN) con el objetivo de proveer un máximo de compatibilidad con los productos ESA GLC200, GlobCover 2005 y 2009. Además, el UNLCCS es compatible con los Tipos de Plantas Funcionales (PFTs) usados en los modelos climáticos. Esta característica hace este producto particularmente adecuado para los propósitos de este estudio el cual depende de una representación ajustada a las características hidrológicas de la vegetación.

Otra característica útil del UN-LCCS es que está diseñado para realizar una clasificación jerárquica ajustable para describir las clases de Cobertura Vegetal. El resultado de la clasificación para este estudio cuenta con 22 clases principales y 10 sub-clases disponibles.

De forma inversa, el set de datos puede ser generalizado siguiendo las 6 clases del IPCC consideradas para la detección de cambios. Esto se considera útil particularmente para nuestro proyecto ya que se busca capturar la cobertura vegetal general en WEAP. Para una caracterización efectiva de los objetos de 'catchment', WEAP generalmente requiere una combinación de terreno, uso de suelo y parámetros de suelo.

Para el propósito del proyecto se usaron las seis clases del IPCC para detectar cambio, con una modificación pequeña que mantiene el detalle proveído por la clase denominada 'otros tipos de cobertura de suelo'. Bajo la clasificación del IPCC los arbustos, vegetación escasa, zonas desnudas y agua se unen en una clase general 'otra'. La clasificación resultante tiene 9 clases: agricultura (agriculture), bosque (forest), herbácea (grassland), humedales (wetland), matorrales (shurbland), vegetación dispersa o aislada de arbustos y gramíneas (other/bare), cuerpos de agua (water), nieve/glaciar (snow/ice), y centros poblados/urbano (settlement).

Con una cobertura del 50% de bosque, Bolivia y sus áreas aledañas están dominadas por bosques, en particular las extensiones bastas del bosque húmedo de la cuenca Amazónica. El resto del territorio está cubierto por arbustos y áreas descubiertas en la cuenca del Altiplano. Desde la primera clasificación de uso de suelo realizada por el CCI en 1992 para el territorio nacional, se ha presentado una transformación dramática principalmente en las áreas de bosque hacia agricultura hasta el año 2015. Se observan tres grandes zonas de cambio: la región fronteriza con el Amazonas brasilero, la región de frontera con la zona superior del Río Paraguay, y la zona alrededor de la ciudad de Santa Cruz.

Entre 1992 y 2015 aproximadamente el 9.5% de la superficie de Bolivia cambió de cobertura vegetal, de la cual aproximadamente 4% fue conversión de bosque exclusivamente (Figura 7).

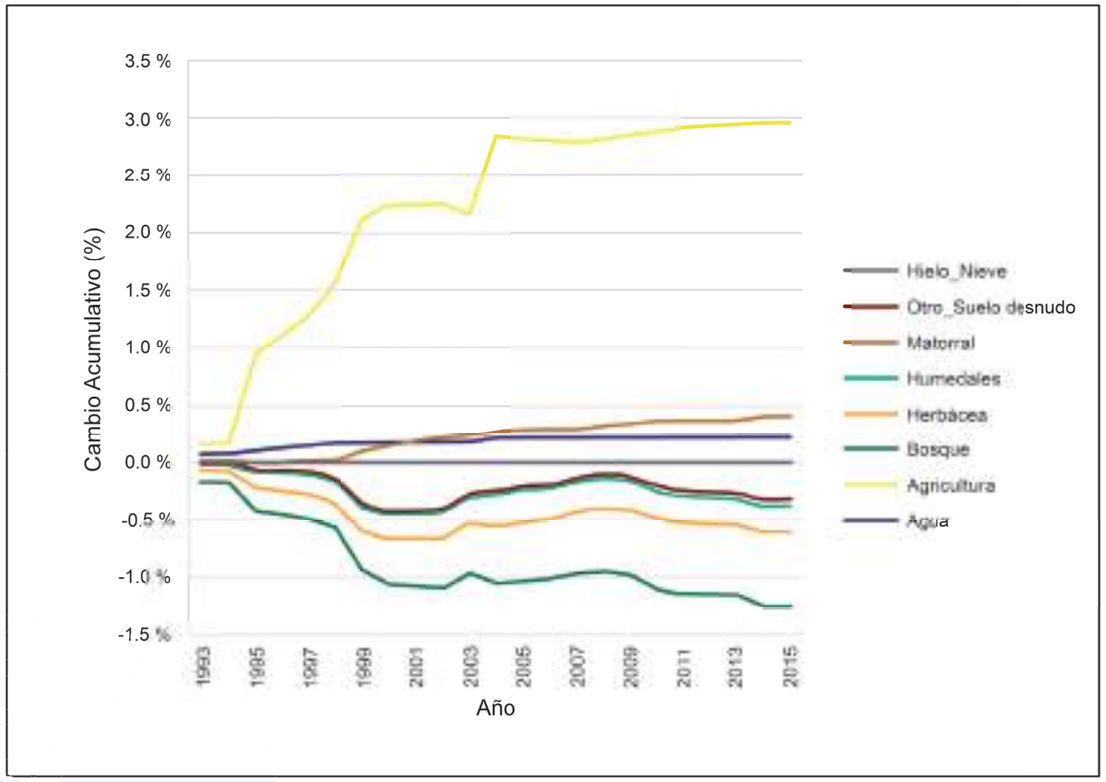

Figura 7. Cambio acumulado de cobertura vegetal entre 1992 y 2015 usando las clases del IPCC para Bolivia

La Figura 7 ilustra que el bosque se transformó a agricultura principalmente hasta el año 2014. Esta Figura 7 muestra además que esta transformación fue altamente variable y que hubo años en que la transformación fue mucho más leve. Se debe recordar que esto puede ser el resultado del procesamiento de datos, y que el producto CCI-LC es capaz de capturar muy bien la transformación total. Algunos años muestran un pico o aumento en la cobertura vegetal, lo cual es posiblemente dado por los errores en la clasificación ya que es improbable que un área sea sujeta a reforestación tan rápidamente. Es también posible que esto esté asociado con años particularmente húmedos, resultando en una señal de bosque verde en los datos del satélite. Después del 2004 la transformación del bosque parece más dominada por la expansión de arbustos (Figura 7).

Respecto a la información de suelos se evaluó y usó la información del mapa digital de suelos de la FAO del año 1995 a escala 1:5'000.000. El producto mencionado cuenta con una base de datos con información de las principales propiedades físicas y químicas del suelo, para este estudio en particular se extrajo la información de textura del suelo.

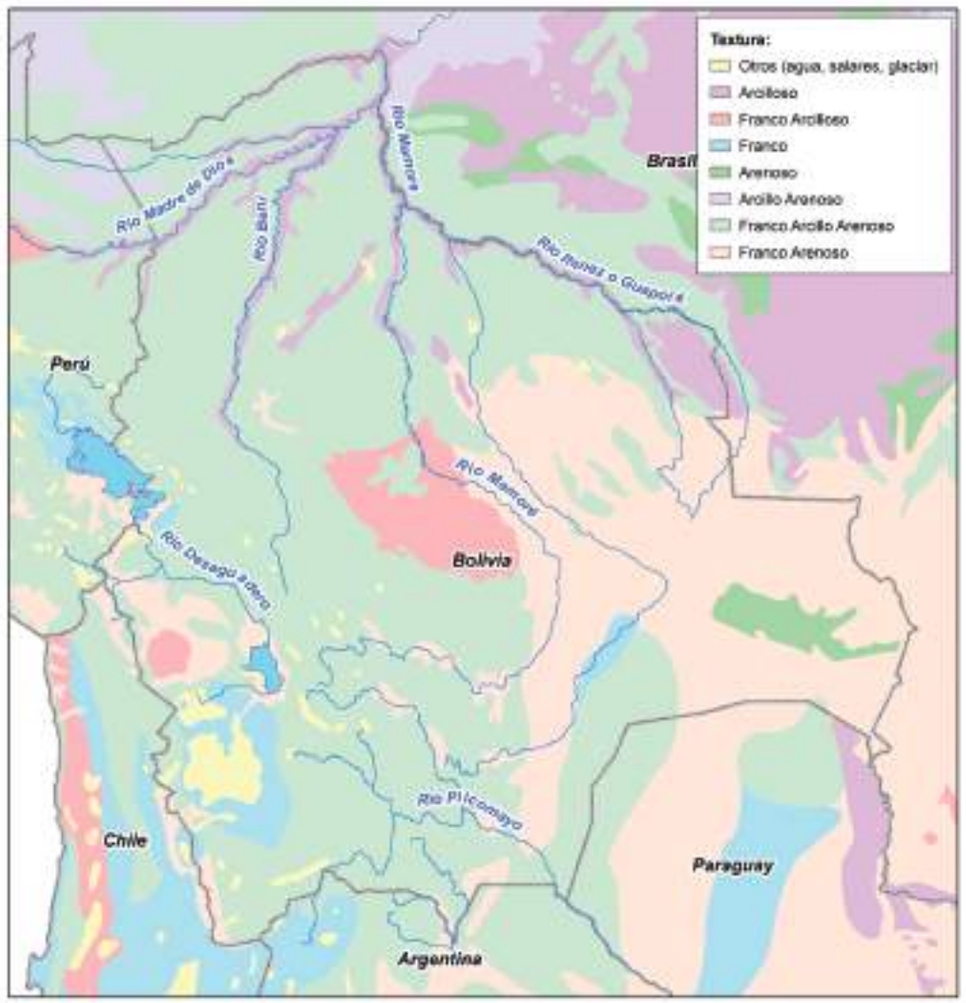

Figura 8. Mapa de tipo de suelo de la FAO

2.2. Características fisiográficas de Bolivia

El conocimiento general de las características fisiográficas del país sirve como marco general para el desarrollo del balance hídrico. En Bolivia se distinguen las siguientes provincias fisiográficas: Cordillera Occidental, Altiplano, Cordillera Oriental, Sub-Andino, Llanura Chaco-Beniana, Escudo Brasilero, y las Superficies de Erosión de Pando o paisaje ondulado amazónico (Figura 9).

Estas provincias sirven de forma referencial para entender aspectos físicos de las regiones de Bolivia los cuales fueron usados para entender la respuesta hidrológica en función de esta clasificación. En las secciones posteriores de presentación de datos se hace referencia a estas provincias para presentación y organización de los resultados.

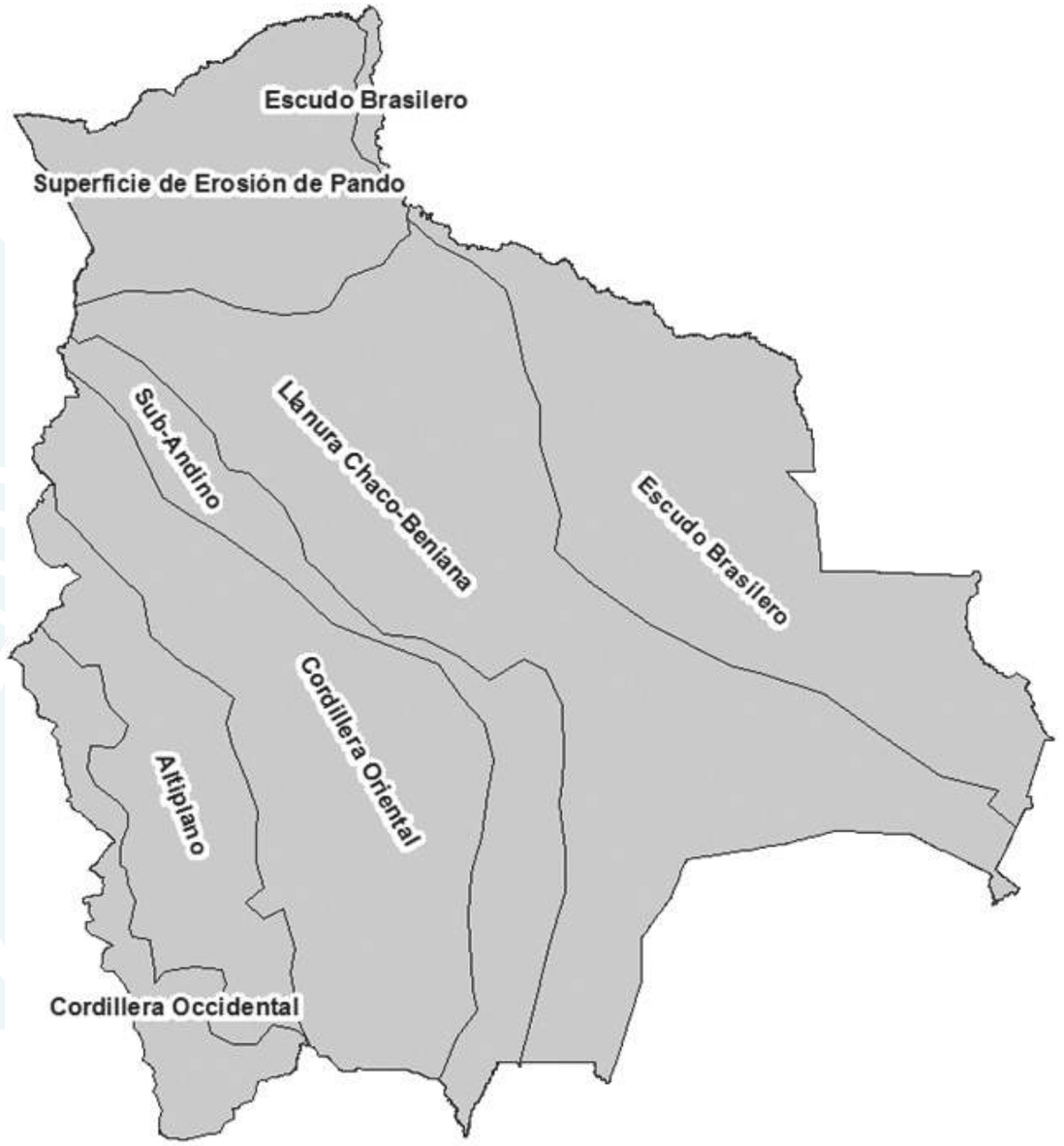

Figura 9. Esquema gráfico de provincias fisiográficas de Bolivia

2.3. Las Cuencas Hidrográficas y sus Balances Hidrológicos

En Bolivia se distinguen tres macrocuencas: Amazónica, Altiplano o Cerrada, y la del Plata (Figura 10). La macrocuenca Amazónica hasta el punto de salida del territorio boliviano en el río Madeira abarca una superficie aproximada de 957,711.54 km2, y los principales tributarios son los ríos Beni y Mamoré. A su vez el río Bení está conformado por los ríos Madre de Dios y río Beni. Los principales tributarios del río Mamoré son el río Iténez o Guaporé y el río Mamoré.

La macrocuenca del Altiplano también llamada Cerrada se encuentra localizada en el margen occidental de Bolivia y abarca una superficie de 216,693.26 km2. En esta macrocuenca se encuentran importantes cuerpos de agua como el Lago Titicaca y el Lago Poopó, los cuales están conectadas por el río Desaguadero. En el caso del Lago Titicaca, este es compartido con la república del Perú. En esta macrocuenca generalmente se distinguen las siguientes cuencas: Lago Titicaca, Mauri, Desaguadero, Lago Poopó, Coipasa, y Uyuni.

La macrocuenca del Plata en el territorio boliviano abarca una superficie de 264,589.19 km2. Las principales cuencas son: río Pilcomayo, Bermejo y las cuencas en la región de Chaco y la Chiquitanía.

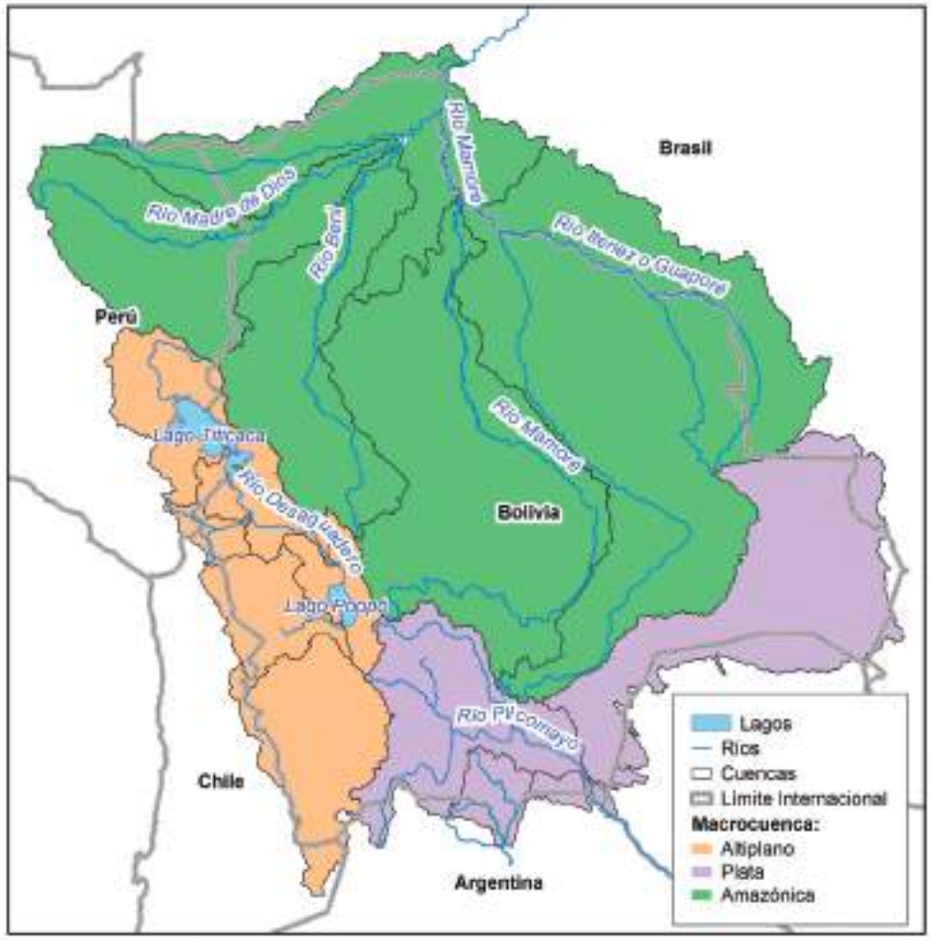

Figura 10. Macrocuencas de Bolivia http://www.hydrosheds.org/page/hydrobasins

El MMAyA para este estudio definió unidades hidrográficas (UHs) combinando los niveles 6, 7 y 8 de Hydrobasin[2] según la clasificación de Pfafstetter. Para el dominio espacial de este estudio existen un total de 95 UHs. En la Tabla 2 se muestra la distribución de los puntos de calibración y UHs en las principales regiones.

Tabla 2. Resumen de puntos de calibración e unidades hidrográficas del BHSB de Bolivia

Cuenca	No de puntos de calibración	No de Unidades Hidrográficas
Altiplano Norte	19	9
Altiplano Sur	0	6
Amazonas	32	53
Pilcomayo	15	7
Bermejo	11	2
Gran Chaco	0	18
Total	**77**	**95**

Los balances hídricos de las unidades hidrográficas a nivel anual y mensual se encuentran en el Anexo 1 en sus componentes principales como precipitación, evapotranspiración y escurrimiento; y en el Anexo 2 se encuentran los mapas correspondientes a nivel anual. En la siguiente sección se resaltan algunos puntos claves del análisis del balance hídrico a nivel de macrocuenca.

2.4. Características del Balance Hidrológico (Linea Base)

En esta sección se presenta los puntos más importantes de los resultados obtenidos del balance hídrico. En los anexos de este documento se puede consultar el detalle de los resultados para cada UH en sus principales componentes como la precipitación, evapotranspiración y escurrimiento. Los resultados que se muestran a continuación corresponden para el periodo 1980-2016.

En el extremo suroeste de Bolivia por la zona del Silala y Laguna Colorada hay un gran déficit de información, resultado de la densidad muy baja de las estaciones pluviométricas y meteorológicas. Los datos de la estación de Laguna Colorada no pueden ser empleados para un área muy grande y mucho menos para Silala. Son datos que necesitan ser evaluados con un mayor detenimiento, el intentar hacer una inferencia de la precipitación y temperatura en estas dos regiones, tiene características que no son homogéneas y por tanto no son técnicamente sustentable; por ello, no es posible entregar resultados de esta zona al carecer de la información pertinente, ya que el espíritu de los resultados del BHSB ha sido estimar los resultados con criterios de verificabilidad y sustentados en valores medidos, en virtud a ello no se consideran los balances de la UH Laguna Colorada, UH Laguna Pasto Grande y UH Silala; evitando de esta manera generar confusión en la toma de decisiones para los profesionales que realizan estudios en la región.

2 http://www.hydrosheds.org/page/hydrobasins

3. Precipitación

Meseta de Tihuanacu

3.1. Distribución estacional de las precipitaciones

Según Roche et al. (1992), la estación lluviosa en Bolivia comprende los meses de diciembre a marzo, la estación seca de mayo a agosto, y dos periodos de transición separan estas dos épocas, uno en abril y otro de septiembre a noviembre. Asimismo, los autores mencionan que entre un 60 a 78% de las precipitaciones ocurren en la estación lluviosa, y de 0 a 15% durante la estación seca. Según los resultados obtenidos en este estudio, por ejemplo, en la macrocuenca del Altiplano el 75% de la precipitación sucede en la estación húmeda y un 5% en la estación seca. Un patrón similar ocurre en algunas cuencas importantes de la macrocuenca del Plata, Pilcomayo y Bermejo, donde las precipitaciones durante la estación húmeda representan un 76 y 75% del total anual respectivamente; mientras que en la estación seca un 3%. El patrón estacional en la macrocuenca Amazónica es diferente en términos de magnitud. La precipitación en la estación húmeda representa un 59% del año hidrológico y en la estación seca un 11%. En las tres macrocuencas la precipitación máxima sucede en el mes de enero, y la mínima en julio (Figura 11 y Tabla 3).

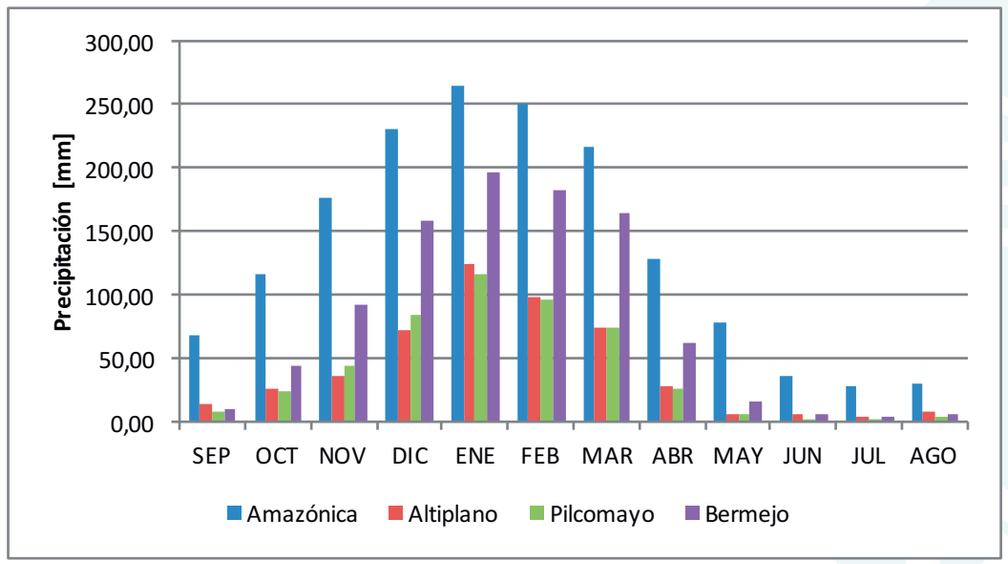

Figura 11. Precipitación media multimensual para el periodo 1980-2016

Tabla 3. Precipitación media multimensual y multianual en mm, periodo 1980-2016

Mes	Amazonas	Altiplano	Pilcomayo	Bermejo
SEP	67.89	13.93	8.00	10.92
OCT	116.42	25.14	23.79	43.49
NOV	177.44	36.24	43.83	91.89
DIC	231.49	72.64	84.30	158.00
ENE	265.22	124.18	116.02	196.44
FEB	251.74	99.01	95.58	183.34
MAR	216.92	74.28	74.30	164.04
ABR	127.51	27.93	26.83	62.32
MAY	78.62	6.01	5.85	15.58
JUN	36.97	5.32	2.34	5.86
JUL	28.35	3.81	1.83	4.40
AGO	30.45	8.00	3.51	5.08
Anual	**1629.02**	**496.47**	**486.18**	**941.37**

3.2. Distribución espacial de las precipitaciones

En el acápite anterior se mencionó que un gran porcentaje de la precipitación ocurre entre diciembre y marzo, según Molina (2005) esto coincide con la inflexión hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). El mismo autor indica que el vapor precipitable se origina en el Atlántico, y que sería reciclado ampliamente por evapotranspiración en la Amazonía y transportado por los vientos alisios del este/noreste. Por el posicionamiento de Los Andes estos se desvían en dirección sureste de la cadena montañosa. Al mismo tiempo, sobre el territorio boliviano se forma un anticiclón cálido que está constituido por una masa de aire más cálida que la que existe a su alrededor, tratándose de un núcleo cálido en donde los gradientes de presión y temperatura tienen la misma dirección (Burgoa Mariaca, 2007). Este anticiclón también se denomina como Alta de Bolivia, y es el principal transportador de aire húmedo desde las regiones amazónicas por encima de Los Andes. Respecto a la influencia de los vientos alisios del Pacífico, la cadena montañosa que se extiende a lo largo del continente impide que pe¬netren hacia el interior de éste (Burgoa Mariaca, 2007).

Para el dominio espacial del presente estudio la precipitación media multianual fue estimada en 1236 mm para el periodo hidrológico 1980-2016. Según los patrones espaciales producidos por GMET (Figura 12), existe una variabilidad creciente en dirección SW a NE. Las precipitaciones más bajas ocurren al SW de Bolivia (parte de la Cordillera Occidental y Altiplano), con magnitudes menores a 200 mm y hacia la parte central del Altiplano existe un incremento hasta llegar a 500 mm; al Norte es más húmedo especialmente en proximidades del Lago Titicaca donde alcanza magnitudes de 1000 mm. En la Cordillera Oriental, la región Norte es más húmeda (500-2000 mm) que la región Sur (200-500 mm).

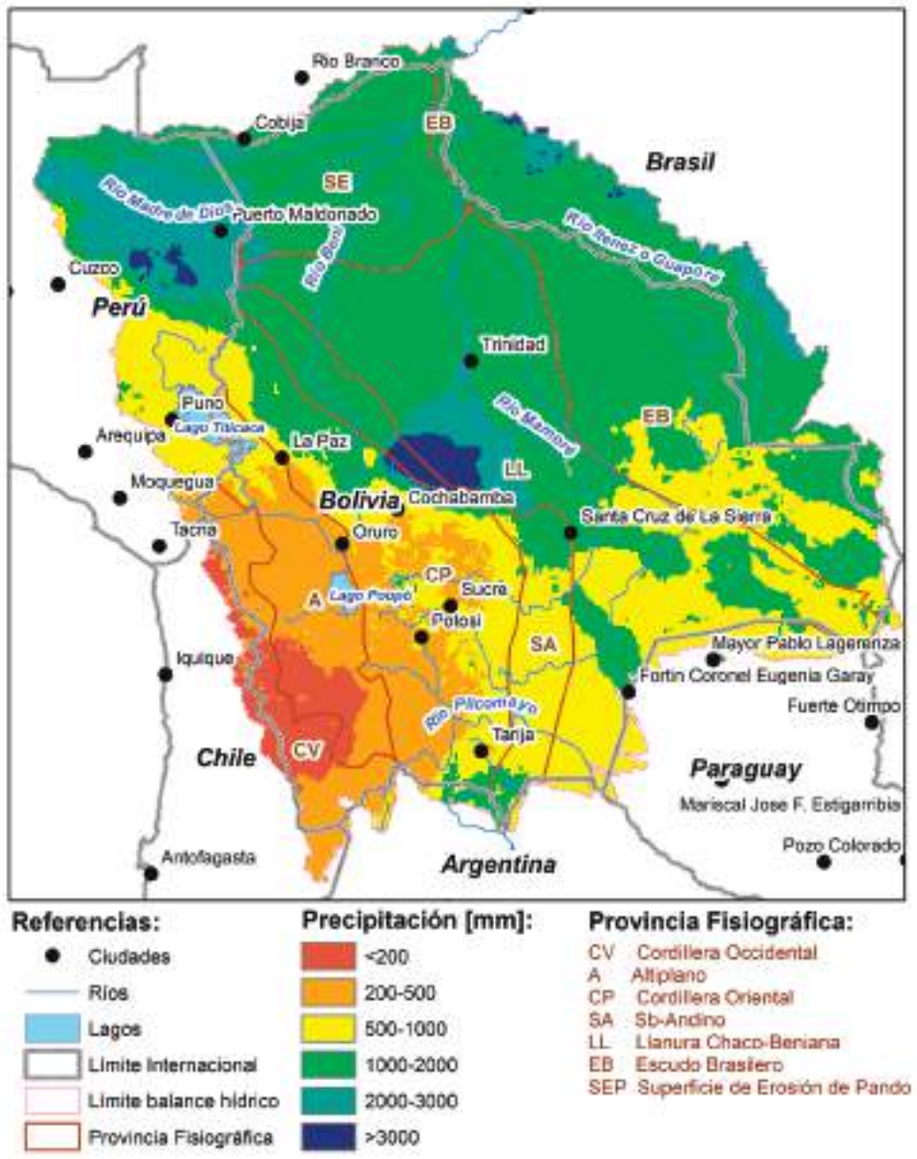

Figura 12. Precipitación media multianual periodo 1980-2016

Esta variación posiblemente esté influenciado por la gran deflexión en el rumbo o dirección a partir del paralelo 17° en la Cordillera Oriental debido a un fuerte control tectónico; sin embargo hacia el extremo sur entre la Cordillera Oriental y la faja Sub-Andina es también húmedo (Bermejo). En proximidades de dicha deflexión se produce la precipitación más alta con magnitudes de 5000 y 6000 mm. Por otro lado, en gran parte de la llanura Chaco-Beniana las precipitaciones anuales oscilan entre 1000 y 2000 mm, con disminución hacia la región del Chaco (Sur de la Llanura Chaco-Beniana) con precipitaciones en el intervalo de 500-1000 mm.

El proceso de regionalización de la precipitación en la zona Sur de la cuenca endorreica mostró que la precipitación tiene un alto grado de incertidumbre por la escasa disponibilidad de información. Los rangos presentados pueden ser ajustados en un futuro con la implementación de una red mejorada de información. Los valores de precipitación en la zona pueden tener incluso valores menores a 100 mm, situación que no es posible precisar. Los rangos de precipitación hasta 200 mm y los valores ligeramente mayores a 200 mm en la zona deberán ser corroborados en un futuro a partir de nuevas observaciones.

3.3. Precipitación por Macrocuencas

3.3.1. Cuenca Amazónica

En esta macrocuenca, para el dominio espacial de este estudio la precipitación media multianual es 1629.02 mm. En la cuenca Ichilo-Mamoré la precipitación varía entre 514.76 y 3034.61 mm. Las UHs de la Cordillera Oriental son las más secas. La UH más humeda está entre la vertiente oriental de la faja Sub-Andina y el piedemonte, Río Mamoré-Chapare.

En las UHs de la cuenca de río Beni la precipitación fluctúa en un rango de 1224.21 y 1841.39 mm. En las UHs de la cuenca Itenez o Guaporé la precipitación varía entre 897.30 y 2073.99 mm, siendo la UH Parapetí la más seca. En Madre de Dios la precipitación media multianual es 2263.13 mm.

3.3.2. Cuenca del Plata

En la cuenca del río Pilcomayo, en las UHs que están localizadas en la Cordillera Oriental la precipitación media multianual varía entre 290.79 y 582.85 mm, mientras que en el Sub-Andino y la Llanura del Chaco está en el orden de 689.95 mm. La UH hidrográfica más seca es la parte alta del río San Juan del Oro y Tupiza[3] .

En la cuenca del río Bermejo, la precipitación en la UH Río Grande de Tarija es 875.5 mm y la UH Río Bermejo 1151.39 mm; en la parte boliviana de la macrocuenca del Plata esta última es una de las UHs más húmeda. La estimación de precipitación en ambas cuencas está dentro de los rangos identificados para la región en el balance hídrico de 1992 (Roche et al., 1992).

En las UHs de la Llanura Chaqueña y Escudo Brasilero la precipitación fluctúa entre 599.97 mm y 1131.39 mm. La región del Chaco presenta los valores más bajos.

3 En El estudio de Espinoza D. (2006) y Molina and Espinoza (2006) para el periodo 1970 - 2000, la precipitacion multianual a nivel de cuencas fluctua entre 262 y 771.5 mm. Mientras que en el balance hidrico nacional del año 19991 varia entre 345 y 700 mm (Roche et al., 1992).

3.3.3. Cuenca del Altiplano

La distribución espacial de la precipitación media anual tiene un patrón decreciente de Norte a Sur a lo largo de toda la macrocuenca, y de Este a Oeste en la región central y Sur. La precipitación multianual fluctúa entre 162.49 y 751.76 mm; siendo las UHs del Sur los más secos, y el más húmedo es la UH Lago Titicaca.

En las UHs de la cuenca del Lago Titicaca, la más húmeda de la macrocuenca, la precipitación varía entre 554.22 y 751.76 mm. Estos valores no incluyen la precipitación en el cuerpo de agua del lago. Por otro lado, en la cuenca de Mauri la precipitación está en el orden de 331.25 mm y en Desaguadero varía entre 375.69 y 590.6 mm.

En la parte central de la macrocuenca, en Coipasa y Poopo, la precipitación es 258.39 y 384.09 mm respectivamente. Mientras que en las UHs del Sur fluctúa entre 162.49 y 185.12 mm.

4. Evapotranspiracion

Yungas

En las cuencas donde existe información de caudales medidos para la calibración, la evapotranspiración real ha sido obtenida del balance hídrico producido por modelo hidrológico SM y Penman Monteith para el cálculo de la ETP. Mientras que en las cuencas sin calibración se ha aplicado la ecuación de Turc, donde esta variable es estimada directamente mediante una ecuación empírica basada en datos de temperatura media y precipitación. Ya que la temperatura juega un rol esencial en el estimado de la ETP, a continuación se presenta un análisis de los valores de temperatura obtenidos a nivel estacional y regional.

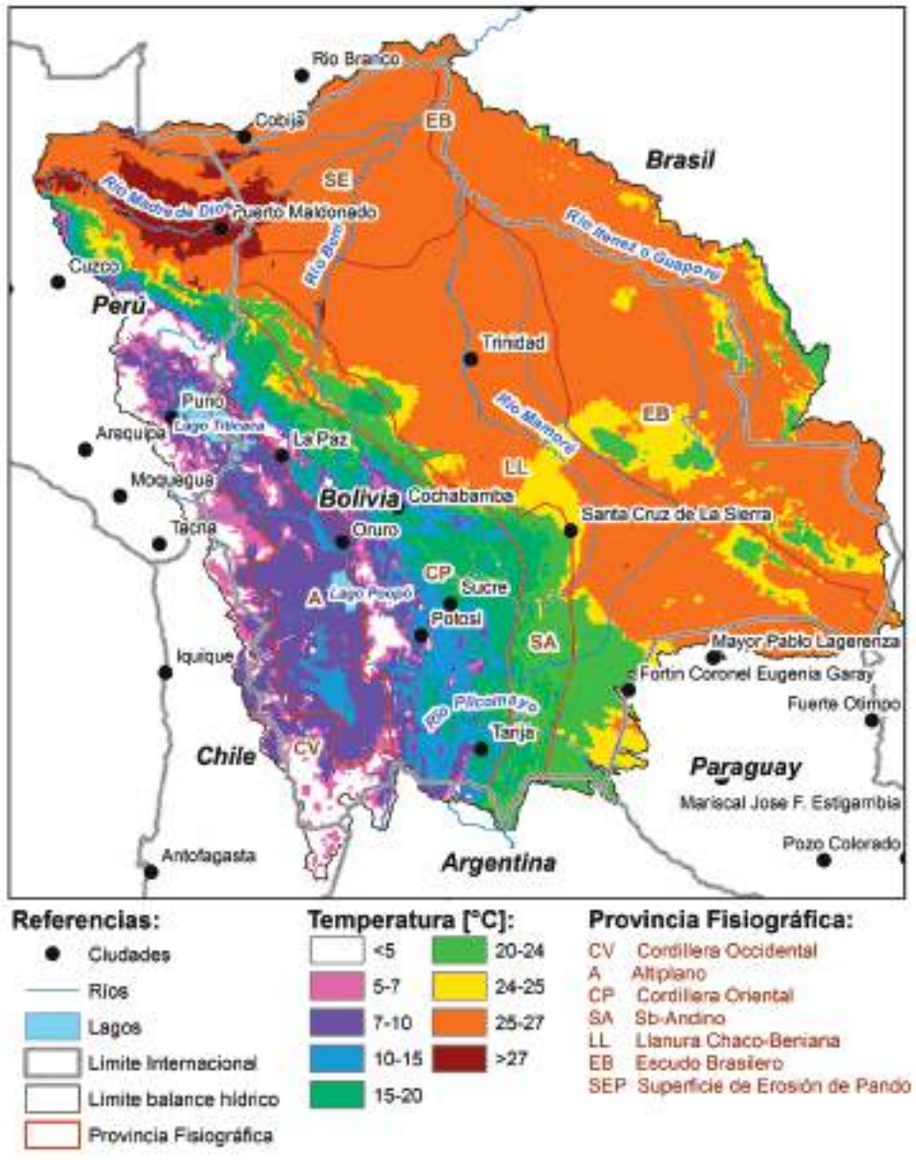

Figura 13. Temperatura promedio multianual para el periodo 1980-2016

4.1. Distribución espacial de la temperatura media del aire

En la Figura 13 se muestra los patrones espaciales de temperatura promedio multianual para el periodo 1980-2016 como salida de GMET. La provincia fisiográfica Cordillera Occidental es la más fría del territorio de Bolivia, donde la temperatura media promedio multianual oscila entre -2.59 y 11.56 °C, el valor medio para toda la provincia es 5.84°C. En la provincia fisiográfica Altiplano varía entre -0.01 y 12.20 °C, y en la Cordillera Oriental entre -3.65 y 26.96 °C; el valor medio en ambas provincias es 8.69 y 13.62 °C respectivamente. La zona Sub-Andina es más caliente a comparación de las tres provincias ya mencionadas, ya que la temperatura varía entre 12.56 y 27.24 °C, y el valor medio en toda la provincia es 22. 21°C. En el resto de las provincias la temperatura media promedio multianual es mayor a 18°C, siendo Superficies de Erosión de Pando la más caliente donde alcanza 26.45°C.

La regionalización de la temperatura se sustenta en la red de mediciones, que permitieron generar un campo de temperatura regional. Las discrepancias micro regionales en valles interandinos o en regiones que pueden mostrar valores un tanto mayores no se presentan para el nivel de disgregación espacial realizado, situación que puede presentarse también en valles profundos no instrumentados.

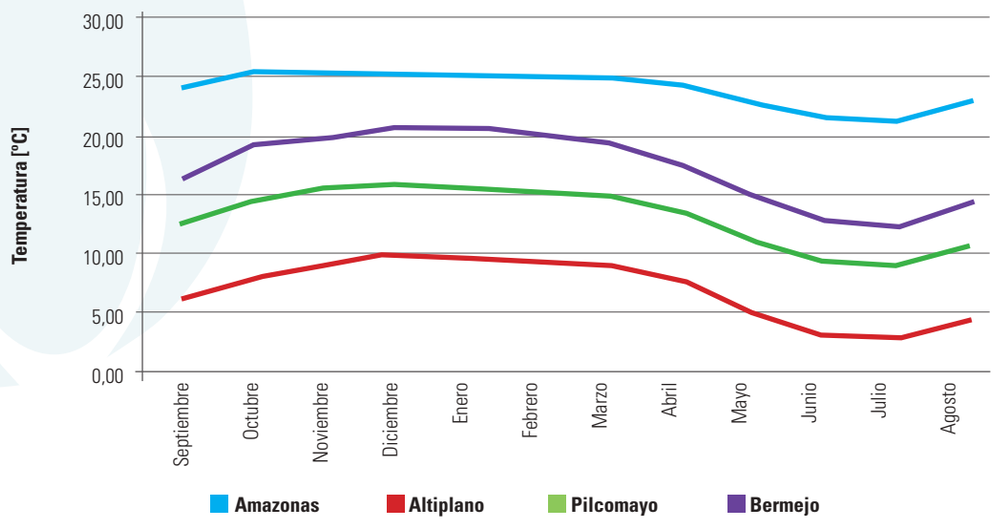

Figura 14. Temperatura media promedio multimensual [°C] para el periodo 1980-2016.

Tabla 4. Temperatura media promedio multimensual y multianual para el periodo 1980-2016

Mes	Amazonas	Altiplano	Pilcomayo	Bermejo
SEP	24.18	6.08	12.50	16.43
OCT	25.29	7.90	14.59	19.22
NOV	25.34	9.12	15.44	19.97
DIC	25.41	9.78	15.92	20.75
ENE	25.25	6.64	15.67	20.80
FEB	24.92	9.32	15.22	20.20
MAR	25.00	9.13	14.99	19.66
ABR	24.35	7.61	13.52	17.63
MAY	22.75	4.93	11.18	15.05
JUN	21.66	3.09	9.41	12.98
JUL	21.36	2.95	9.15	12.51
AGO	22.89	4.37	10.82	14.49
Anual	24.03	6.74	13.20	17.47

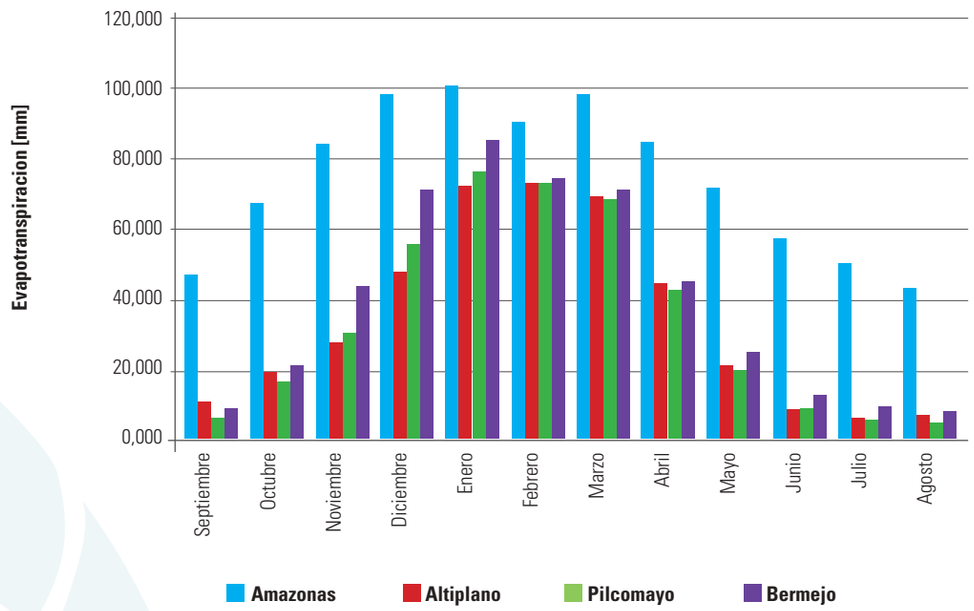

Figura 15. Evapotranspiración media multimensual periodo 1980-2016

4.2. Distribución espacial y estacional de la ETR

A nivel espacial los valores más bajos de la ETR se sitúan al Sur de las provincias fisiográficas de Cordillera Occidental y Altiplano, donde la ETR es menor a 200 mm. Al norte de las provincias fisiográficas mencionadas existe un incremento hasta llegar a los 588.25 mm alrededor del Lago Titicaca. En la Cordillera Oriental al norte del paralelo 17°, la ETR fluctúa entre 684.90 y 767.56 mm, mientras que al Sur entre 266.22 y 486 mm. En el extremo Sur de la Llanura Chaco Beniana y Escudo Brasilero varía en un rango de 600 y 950 mm, mientras que, en la región central y Norte mayor a 800 mm, al igual que en la Superficies de Erosión de Pando.

En las macrocuencas del Altiplano (sin incluir Uyuni) y del Plata (incluye solo Pilcomayo y Bermejo), entre un 63 y un 67% de la evapotranspiración sucede en la estación húmeda, y en la seca entre 11 y 12%. Un patrón estacional distinto sucede en la macrocuenca Amazónica donde la evapotranspiración en la estación húmeda representa un 44%, y en la estación seca 25%. Estas diferencias están influenciadas por la precipitación, donde generalmente las dos primeras macrocuencas se caracterizan por ser más secas en comparación con la cuenca Amazónica. En el Altiplano la evapotranspiración representa un 84% de la precipitación, y similar comportamiento sucede en el Pilcomayo (85%); mientras que en Bermejo es 55%, y en la Amazónica también 55%.

Los resultados del balance hídrico indican que los valores mínimos de ETR ocurren en los meses de julio y agosto (Tabla 5 y Figura 15). En el Altiplano (sin incluir Uyuni) es en julio con 6.76 mm, en la Amazonia en agosto con 43.54 mm, en el Pilcomayo y Bermejo es también en agosto con 5.01 mm y 9.45 mm respectivamente.

Tabla 5. Evapotranspiración media multimensual y multianual periodo 1980-2016 [mm]

Mes	Amazónica	Altiplano	Pilcomayo	Bermejo
SEP	47.04	11.20	6.74	9.44
OCT	67.33	19.76	16.70	22.77
NOV	84.39	28.40	30.89	46.87
DIC	99.23	48.19	56.45	76.95
ENE	102.07	73.05	77.13	92.37
FEB	91.89	73.97	73.89	80.43
MAR	99.21	69.93	69.29	77.17
ABR	85.25	45.60	42.96	49.99
MAY	72.16	22.06	20.04	28.06
JUN	57.35	9.75	9.01	14.39
JUL	50.11	6.76	5.69	10.80
AGO	43.54	7.23	5.01	9.45
Anual	899.58	415.90	413.81	518.70

4.3. Evapotranspiracion por Macrocuenca

4.3.1. Cuenca Amazónica

La ETR en el conjunto de la macrocuenca para el dominio espacial de este estudio es 899.58 mm lo cual representa un 55% de la precipitación. En las UHs de Ichilo-Mamoré la ETR varía entre 384.30 y 1099.81 mm, los valores más bajos ocurren en la zona alta de la cuenca Río Grande. En las UHs de la cuenca Río Beni, oscila entre 684.90 y 974.79 mm. En la cuenca Iténez o Guaporé varía entre 667.49 y 1108.88 mm, donde el valor más bajo corresponde a la UH Río Parapetí. En la UH Madre de Dios la ETR está en el orden de 987.32 mm.

4.3.2. Cuenca del Plata

En las UHs de Pilcomayo, la ETR oscila entre 266.22 y 590.18 mm lo cual representa entre un 86 y 92% de la precipitación. En las UHs Tumusla y Río San Juan del Oro-Tupiza la evapotranspiración representa un 90 y 92% de la precipitación respectivamente.

En las UHs del Río Grande de Tarija y Río Bermejo la ETR representa un 56 y 54% de la precipitación respectivamente. Por otro lado, en las UHs de la Llanura Chaqueña y Chiquitanía la ETR representa entre 81 y 98% de la precipitación.

4.3.3. Cuenca del Altiplano

La ETR obtenido del balance hídrico en esta macrocuenca (sin incluir Uyuni) oscila entre 244.63 y 588.23 mm, que representan entre un 78 y 95% de la precipitación característico de climas semiáridos. Mientras que en las UHs de Uyuni la ETR representa alrededor del 99% de la precipitación, es decir que prácticamente en algunas zonas la ETR es igual a la precipitación.

5. Escurrimiento

Laguna Kasiri

El cálculo de la escorrentía de cada unidad hidrográfica se encuentra en la plataforma de WEAP como un resultado clave del estudio, presentando valores para el periodo 1980-2016; donde además se puede observar la variabilidad del régimen hidrológico en cada subcuenca con características específicas para cada región del país.

5.1. Patrón estacional

En las tres macrocuencas el escurrimiento máximo ocurre en el mes de febrero, y los valores más bajos en agosto y septiembre (Tabla 6 y Figura 16). En la macrocuenca del Altiplano un 79% del escurrimiento sucede en la estación húmeda, mientras que en Pilcomayo y Bermejo (macrocuenca del Plata) un 78 y 73% para ambos casos. En la macrocuenca Amazónica el escurrimiento en la estación húmeda representa un 65% del total anual.

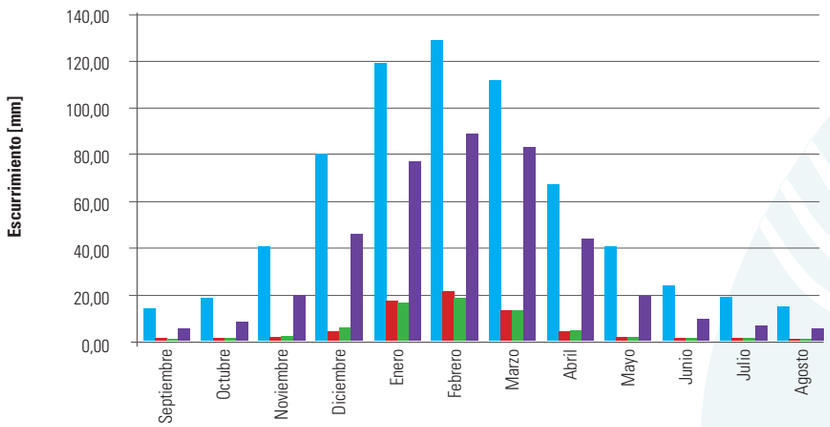

Figura 16. Escurrimiento medio multimensual en mm para el periodo 1980-2015

Tabla 6. Escurrimiento medio multimensual y multianual en mm para el periodo 1980-2015

Mes	Amazónica	Altiplano	Pilcomayo	Bermejo
SEP	13.78	1.41	1.17	4.61
OCT	17.74	1.59	1.37	7.61
NOV	39.92	2.13	2.31	19.84
DIC	79.77	4.67	6.22	47.34
ENE	118.57	18.71	17.66	81.24
FEB	128.25	22.80	19.58	94.37
MAR	111.12	14.25	13.86	88.76
ABR	66.87	5.04	4.94	45.19
MAY	39.85	2.09	2.13	19.50
JUN	23.45	1.53	1.45	9.48
JUL	18.46	1.39	1.23	6.15
AGO	14.61	1.36	1.16	4.82
Anual	672.38	76.97	73.07	428.91

5.2. Cuenca Amazónica

La Figura 17 muestra los componentes del balance hídrico para esta macrocuenca. Algunos componentes relacionados con el escurrimiento total son el flujo base, el flujo sub-superficial y el flujo superficial. En el conjunto de la macrocuenca el flujo superficial en los meses lluviosos representa entre un 74 y 81% del total de escorrentía, y el flujo base entre 7 y 10%. Mientras que en los meses secos (junio a agosto) el flujo base es más importante ya que representa entre un 45 y 65%.

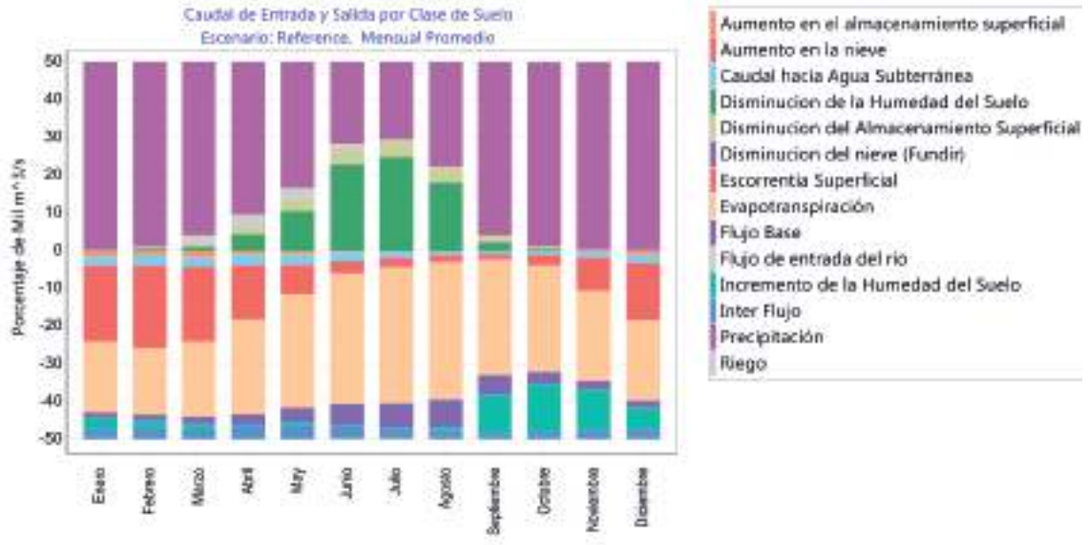

Figura 17. Componentes de balance hídrico para la macrocuenca Amazónica

El aporte anual estimado de esta macrocuenca en el río Madeira es 588081.51 hm^3, lo que equivale a un módulo anual de 18647.94 m^3/s hasta el punto de salida del territorio boliviano[4] . Los tributarios más importantes del río Madeira son el río Beni y el río Mamoré, hasta el punto de confluencia el caudal medio anual de estos ríos es 8779.29 y 8384.56 m^3/s respectivamente.

El escurrimiento en algunas UH de esta macrocuenca incluye el componente de inundación, es decir que hace parte del balance hídrico; por lo tanto, el escurrimiento total incluye el producido por la precipitación y por el volumen inundado. Para la estimación del coeficiente de escorrentía, el escurrimiento total se dividió por la precipitación solamente. El coeficiente de escorrentía varía entre 6.11 y 65.44%, donde el valor más bajo se sitúa en la cuenca alta del río Iténez o Guaporé y un gran porcentaje de la precipitación pasa a la recarga de los acuíferos. El valor más alto ocurre en la UH Río Mamoré-Chapare, donde las precipitaciones son las más altas de Bolivia y por ende tiene un coeficiente de escurrimiento alto. En una pequeña intercuenca llamada UH Riberalta (confluencia del río Beni y Madre de Dios) se reporta un coeficiente de escorrentía de 1413.56%, esto se debe a que dicha intercuenca recibe inundación de la parte alta. Por otro lado, el caudal específico fluctúa entre 1.93 y 62.97 $l/s/km^2$; en el caso de la UH Riberalta 752.52 $l/s/km^2$, el extremo de los valores coincide con lo mencionado para el coeficiente de escurrimiento.

4 En el balance hidrico del año 1992 el modulo fue estimado en 17,000 m3/s (Rocha et al., 1992).

5.3. Cuenca del Plata

La Figura 18 muestra los componentes del balance hídrico en la cuenca Pilcomayo, entre enero y marzo el flujo dominante es el superficial ya que representa entre 54 y 61%, mientras que el flujo base fluctúa entre 6 y 8%, el resto corresponde a flujo sub-superficial. El flujo base es más importante en la escorrentía total entre los meses junio y octubre donde representa entre 79 y 97%, con valor más alto en el mes de agosto.

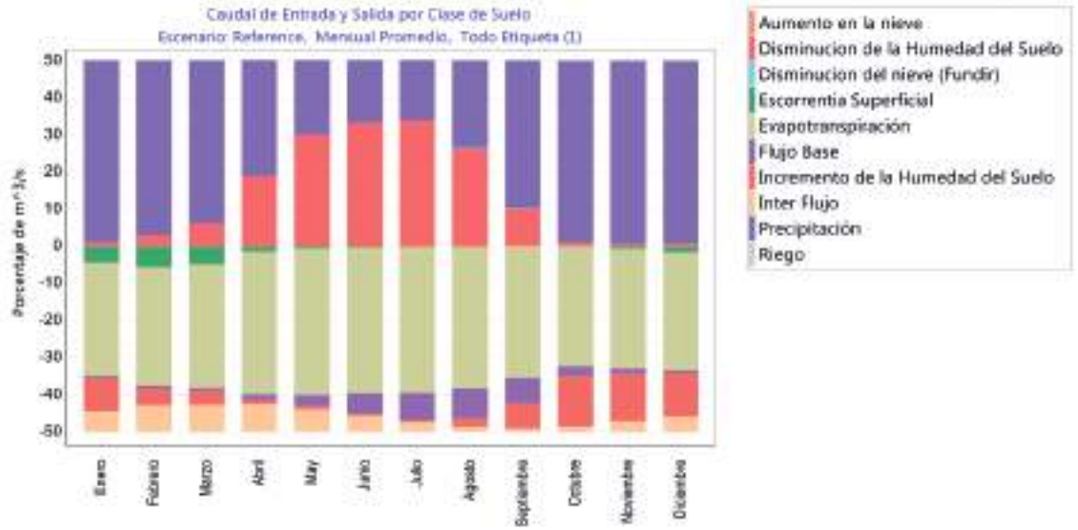

Figura 18. Componentes de balance hídrico para la cuenca Pilcomayo y Bermejo, macrocuenca La Plata

El aporte anual río Pilcomayo hasta el punto de medición en Misión La Paz es 6377.89 hm^3, lo que equivale a un módulo anual de 202.24 m^3/s. La escorrentía expresada por el coeficiente de escurrimiento fue estimado entre 8.54 y 21.20%[5] . El caudal específico estimado varía entre 0.79 y 3.61 $l/s/km^2$ similar a otros estudios previos[6] . En la cuenca Bermejo, el aporte anual de la UH de Río Bermejo es de 2812.62 hm^3, y de la UH Río Grande de Tarija es de 6509.53 hm^3; en términos de módulo anual este sería 89.19 y 206.41 m^3/s respectivamente. El coeficiente de escorrentía en la UH Río Bermejo es 47.07% y en Río Grande de Tarija 44.94%, mientras que el caudal específico 17.19 y 12.48 $l/s/km^2$ para ambos casos.

El aporte anual río Pilcomayo hasta el punto de medición en Misión La Paz es 6377.89 hm^3, lo que equivale a un módulo anual de 202.24 m^3/s. La escorrentía expresada por el coeficiente de escurrimiento fue estimado entre 8.54 y 21.20% . El caudal específico estimado varía entre 0.79 y 3.61 $l/s/km^2$ similar a otros estudios previos . En la cuenca Bermejo, el aporte anual de la UH de Río Bermejo es de 2812.62 hm^3, y de la UH Río Grande de Tarija es de 6509.53 hm^3; en términos de módulo anual este sería 89.19 y 206.41 m3/s respectivamente. El coeficiente de escorrentía en la UH Río Bermejo es 47.07% y en Río Grande de Tarija 44.94%, mientras que el caudal específico 17.19 y 12.48 $l/s/km^2$ para ambos casos.

5.4. Cuenca del Altiplano

La Figura 19 muestra los componentes del balance hídrico en la macrocuenca del Altiplano. El flujo superficial en la estación lluviosa representa entre un 37 y 71%, en el mes de febrero cuando el suelo está saturado se presenta los porcentajes más altos. En la estación seca y transición el flujo base es más importante, ya que entre los meses de junio y octubre su representatividad fluctúa entre 79 y 95%; el mes con el valor más alto es agosto.

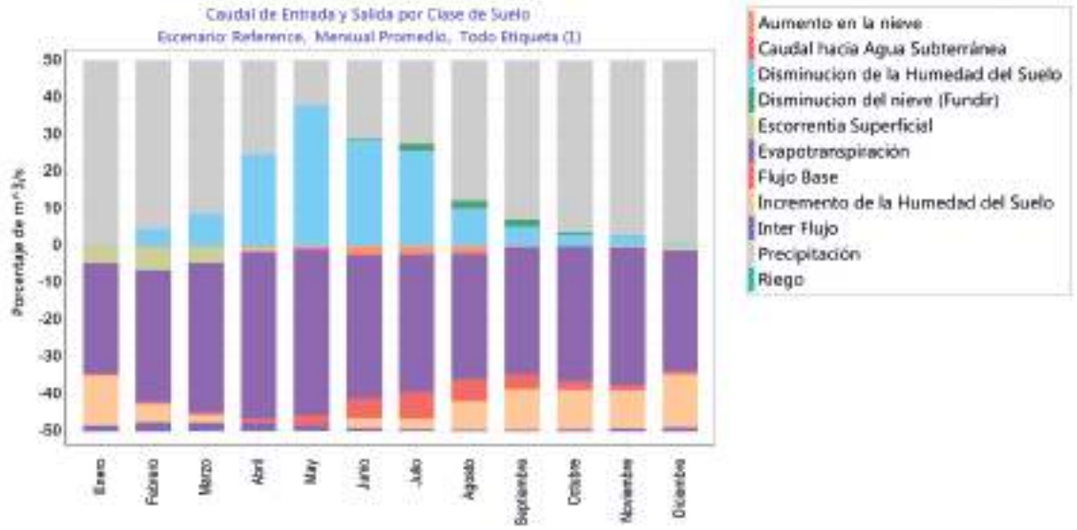

Figura 19. Componentes de balance hídrico para la macrocuenca Altiplano

5. "El valor minimo de este estudio es similar al estudio de (Espinoza D., 2006; Molina and Espinoza, 2006) como al de Roche et al., (1991) sin embargo el valor maximo reportado por ambos estudios es 54 y 68% respectivamente."

6 "En el balance del año 1992 se reporta en el rango de 1.7 y 3.5 l/s/km2, mientras que en el estudio de Espinoza D., (2006); Molina and Espinoza, (2006)) entre -1.1 y 7.3 l/s/km2; los valores negativos se debe a las perdidas hacia aguas subterraneas entre la estacion Villamontes y Mision La Paz."

El volumen anual de las cuencas aportantes del Lago Titicaca es 8531.47 hm^3. El aporte anual del río Desaguadero hasta la estación hidrométrica Chuquiña es 2235.51 hm^3 es decir que el módulo anual es 70.89 m3/s. El coeficiente de escorrentía está en el rango de 4.91 y 21.23% (sin incluir Uyuni), donde el valor más bajo está en la UH Salar de Coipasa, donde casi el 95% de la precipitación se pierde por evapotranspiración. Valores altos se observan en las UH Lago Titicaca y Río Ilave. El caudal específico varía entre 0.40 y 5.06 $l/s/km^2$. En las UHs de la región Sur el coeficiente de escorrentía varía entre 0.68 y 1.66%, y el caudal especifico oscila en el rango de 0.03 y 0.09 $l/s/km^2$.

5.5. Balance Hídrico en los Lagos

En el cuerpo de agua del Lago Titicaca la precipitación fue estimada en 727.02 mm, y la evaporación en 1660.71 mm; el caudal total de las cuencas aportantes al lago es aproximadamente 270.53 m^3/s, y el caudal de salida hacia el río Desaguadero 26.87 m^3/s.

En el Lago Poopó la precipitación fue estimada en 354.60 mm, y la evaporación en 1890.84 mm. El caudal de entrada desde el río Desaguadero y las cuencas locales sumaron un total de 98.89 m^3/s. Las entradas no consideraron las extracciones y pérdidas que existen entre Chuquiña y el Lago Poopó. Según Pillco Zola y Bengtsson (2006) el nivel almacenado en el Lago Poopó depende mucho de los aportes provenientes desde el río Desaguadero, y uno de los aportantes de este río proviene desde el Lago Titicaca. En la Figura 20 se puede observar que los niveles de agua en el Lago Poopó dependen mucho del aporte desde el Lago Titicaca, por ejemplo entre los años 1984 y 1989 los aportes desde el Lago Titicaca representaron entre un 70 y 90% en meses lluviosos respecto al total del volumen de entrada al lago, y en este periodo los niveles del lago fueron los más altos y casi constantes entre 1985-1989. En contraste al periodo comprendido entre 1992 y 2000 el aporte promedio desde el Lago Titicaca fue solo del 0.16% respecto al total de los aportes del lago, y los niveles bajaron considerablemente. En este mismo periodo, el aporte del río Mauri representó un 29.68%, del río Desaguadero solo (sin Lago Titicaca y río Mauri) un 39.91%, y los aportes locales un 30.25%.

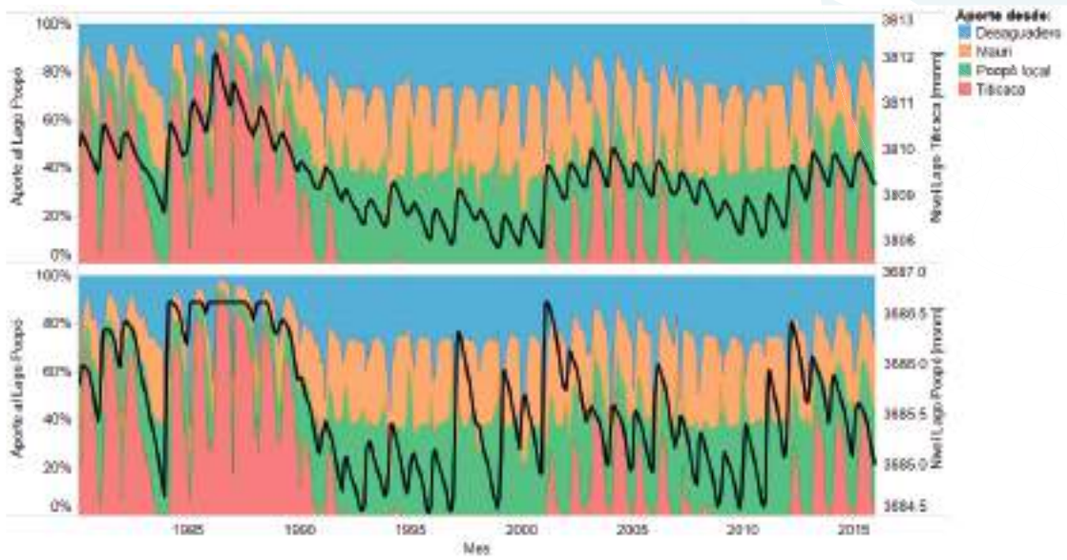

Figura 20. Aporte de agua al lago Poopó y su relación con los niveles almacenados

6. Estudios complementarios

Laguna Colorada

6.1. Incertidumbre y Error del Balance Hidrológico

La incertidumbre de un esquema de balance hídrico puede evaluarse desde varios puntos de vista. Usando el marco propuesto por Van Asselt and Rotmans (2002) las fuentes de incertidumbre pueden darse por i) si el modelo es completo o no, ii) los parámetros del modelo, iii) las entradas al modelo, y iv) la estructura del modelo. Las incertidumbres sobre si el modelo es completo o no se refieren a si el mismo incluyen todos los procesos relevantes. Las incertidumbres sobre los parámetros se refieren a la selección de los mismos en la representación de los procesos físicos y a la selección de las ecuaciones para calcularlos. Las incertidumbres sobre la estructura del modelo se refieren a la organización de los algoritmos para obtener los resultados.

Respecto al punto i), la metodología usada en este estudio busca ser completa en tanto que representa los diferentes procesos del balance hídrico. Sin embargo, como todo algoritmo, algunos detalles de los procesos no están representados en su totalidad, como por ejemplo aspectos específicos de las interacciones entre los diferentes flujos de la escorrentía superficial, sub-superficial, de inundación y de evapotranspiración.

Con respecto al punto ii) de los datos de entrada, la red hidrometeorológica existente actualmente en Bolivia, presenta varios vacíos de información que generan incertidumbre. En este sentido, y teniendo en cuenta la importancia de los datos de precipitación y temperatura en la hidrología superficial, se logró establecer una medida del nivel de incertidumbre de este dato de entrada con base en el procesamiento de GMET y la comparación de los resultados, con fuentes de datos satelitales y con datos observados en campo según esta descrito en el Anexo digital del presente documento. El presente estudio, enfocó esfuerzos sobre el mejor estimado posible de este dato de entrada para enfrentar la principal fuente de incertidumbre del BHSB que es el dato de precipitación. Sin embargo, el estimado de incertidumbre de las otras variables climáticas (humedad relativa, insolación, velocidad de viento, etc.), no ha sido realizado debido a los métodos seleccionados, los cuales no permiten un cálculo directo del error asociado a dichas variables. De todas maneras, se hizo un análisis de sensibilidad para dar una idea de la relevancia de los parámetros del método SM en el BHSB. Este análisis indicó que los parámetros más sensibles son RRF y SWC para la estación húmeda. Otros parámetros como RZC y PDF también presentan sensibilidad media. El detalle de este análisis se encuentra en el Anexo digital del presente documento.

La incertidumbre asociada a los parámetros según el punto iii) se minimizó al máximo teniendo en cuenta el uso de conceptos físicos para determinar los parámetros del modelo hidrológico. Se considera que este tipo de incertidumbre fue enfrentada y reducida con el enfoque de calibración utilizado.

Con respecto al punto iv), el uso de un modelo semi-distribuido basado en parámetros físicos para el cálculo del balance hídrico genera incertidumbres ya que la hidrología sucede de forma distribuida y con base en parámetros físicos medidos reales. Sin embargo, se considera que este método es apropiado para representar los aspectos relevantes a la escala espacial y temporal de aplicación del modelo.

A continuación, se presenta un análisis de la incertidumbre de los datos de entrada de precipitación, presentando como se estudió este componente principal que contribuye a la incertidumbre del balance hídrico.

6.2. Incertidumbre en GMET

Entender el nivel de incertidumbre que existe en la estimación de precipitación en el producto de GMET es importante para comprender sus límites y poder aplicar los resultados del balance hídrico dentro de un rango de confianza. Sin embargo, cuantificar la incertidumbre en el producto final es difícil por la gran cantidad de fuentes de incertidumbre o error y los diferentes métodos para cuantificarlos. Existe incertidumbre en los registros de datos observados, donde los errores de medición pueden bajar la calidad de la información. El proceso de rellenado de series históricas de clima introduce otra incertidumbre a los datos. La densidad y distribución de estaciones en el país también introduce incertidumbre: donde hacen falta de estaciones, una estimación precisa de precipitación es mucho más difícil. El algoritmo mismo de GMET también es una fuente de incertidumbre: usa un método de interpolación probabilístico que puede producir un rango de resultados posibles. Este rango de resultados – el ensamble – nos permite definir la incertidumbre asociada con el método de interpolación, basado en las estaciones de entrada. Sin embargo, es necesario verificar el resultado de GMET con estaciones de validación para definir su capacidad de reproducir datos observados.

Para producir la grilla de precipitación de GMET, se usaron datos de 385 estaciones en Bolivia, Perú, Brasil, Paraguay, Argentina, y Chile, además de 12 puntos de muestreo tomados desde el producto de CHIRPS para cubrir la región de Madre de Dios. La distribución de estas estaciones es muy variable dentro del dominio de estudio, con la mayor densidad de estaciones ubicadas en la cordillera oriental y sub-andina. La falta de estaciones en las cuencas del Amazonas introduce un mayor nivel de incertidumbre en estas cuencas, por falta de observaciones para producir y verificar una grilla de precipitación. El propósito de introducir 12 puntos de muestreo de CHIRPS en la parte de Madre de Dios fue justamente para disminuir el error producido en esta región por falta de información. Como se puede visualizar en el mapa (Figura 21), existen catchments sin ninguna estación; es decir, su estimación de precipitación está enteramente basado en la interpolación de GMET.

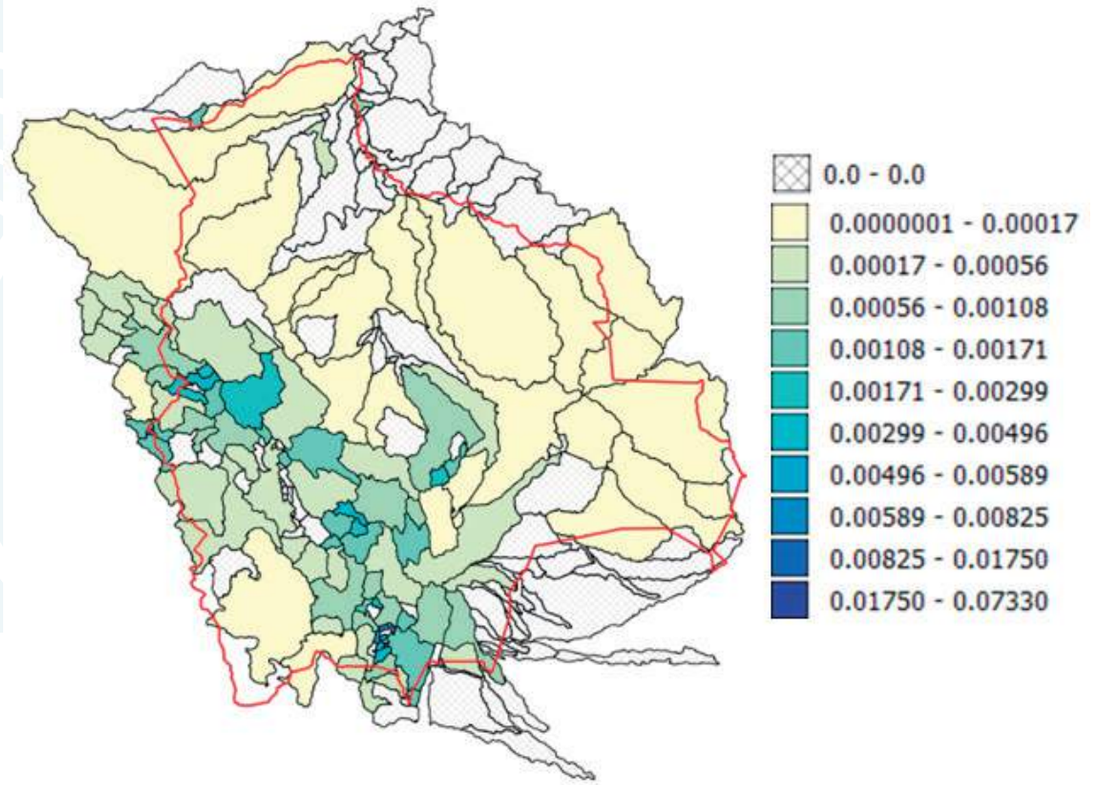

Figura 21. Densidad de estaciones para estimación de precipitación en GMET (número de estaciones por kilómetro cuadrado)

Es importante entender la incertidumbre en la estimación de precipitación al nivel de cuencas de calibración y simulación, porque en esas se puede aplicar un factor de corrección de precipitación, y verificar el efecto que tiene esa corrección en la simulación del caudal observado.

Según el cálculo de pruebas de homogeneidad en la etapa de procesamiento de datos, se identificaron 32 estaciones con datos de precipitación anual sospechosos Después de haber eliminado los datos sospechosos y los valores atípicos, y rellenado los datos faltantes con el método de razón normal, no se identificó ninguna estación con datos de precipitación sospechosos según las pruebas de homogeneidad. La siguiente tabla se presenta un resumen de este análisis y el detalle de cada estación se encuentra en el Anexo digital del presente documento.

Tabla 7. Resumen de estaciones procesadas

	Estaciones recopiladas	Estaciones con mínimo* de datos en 1980-2016	Estaciones con datos buenos**	Estaciones usadas para el producto final (después del rellenado) ***
Bolivia				
Temperatura Mínima	443	155	85	117
Temperatura Máxima	444	153	70	123
Precipitación	1136	322	272	300
Horas Sol	111	25	3	36
Evaporación en tanque	187	41	6	
Viento	320	153	71	134
Perú				
Temperatura Mínima	29	17	7	14
Temperatura Máxima	29	17	6	15
Precipitación	29	29	24	25
Brasil				
Precipitación	75	34	26	29
Chile				
Precipitación	23	23	22	22
Paraguay				
Precipitación	5	5	5	5
Argentina				
Precipitación	7	7	6	6

* mayor a 50% para precipitación y temperatura, y mayor a 30% para horas sol, evaporación en tanque, y viento
** definido por los tests de homogeneidad
***después de homogenizar y completado de datos faltantes

6.3. Desviación estándar de GMET

El algoritmo de GMET produce 30 miembros de un ensamble de resultados; cada miembro tiene estimaciones de precipitación diaria para periodo histórico en el dominio del estudio. Las diferencias entre los miembros del ensamble se generan en la producción de campos aleatorios correlacionados en el tiempo y espacio para muestreo de estimaciones de probabilidad de ocurrencia de precipitación y distribución de cantidad de precipitación. La comparación de los miembros del ensamble resultantes da una estimación de la incertidumbre asociada con el método de interpolación del algoritmo de GMET. En este caso, se calculó la desviación estándar de precipitación mensual en cada pixel de la grilla de GMET entre los 30 miembros del ensamble. La desviación estándar promedio relativo (Figura 22) entre estos miembros del ensamble varia de 5.33% (en la cuenca del río Madre de Dios y en las UHs en proximidades el Lago Titicaca) a 10.77% (en la región de la Chiquitanía, cabecera del río Mamoré, y el Chaco)

Se nota que, aunque el valor absoluto de desviación estándar es mayor en las cabeceras del río Mamoré, este valor alto es principalmente debido a la alta precipitación en esta región. Así mismo, se nota que el valor relativo de la desviación estándar es mayor en las cuencas del Gran Chaco, donde también hay poca densidad de estaciones. Vale mencionar que, para la cuenca de El Sena, que incluye la región de Madre de Dios en Perú, el valor relativo de desviación estándar es uno de los menores de todo el domino de estudio; lo cual está relacionado con la inclusión de 12 puntos de muestreo de CHIRPS. Sin embargo, existe todavía una incertidumbre asociada con los puntos de CHIRPS, en que no se pudo verificar la exactitud de CHIRPS en estos puntos por falta de datos observados. Para esto sería necesario extrapolar el desempeño de CHIRPS en otras partes del país donde una validación con datos observados es posible para cuantificar el desempeño de CHIPRS en Madre de Dios.

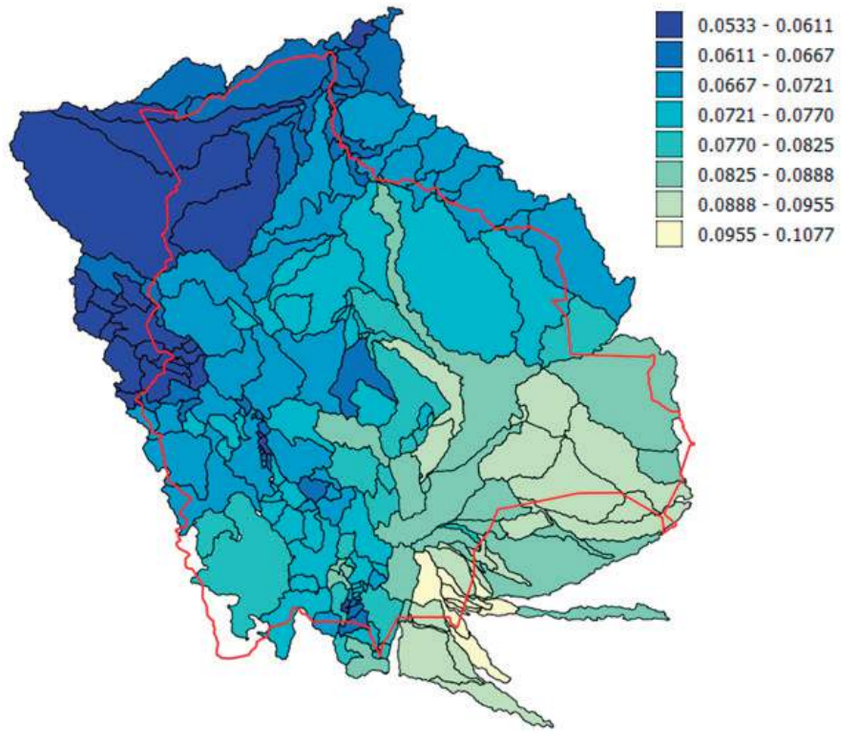

Figura 22. Desviación estándar promedio relativo por unidad hidrográfica de los 30 miembros de GMET

La estimación del sesgo promedio del producto de GMET en las estaciones de validación nos permite cuantificar la capacidad de GMET en reproducir datos de precipitación en el dominio del estudio. Una interpolación de esta estimación de incertidumbre con polígonos de Thiessen nos permite visualizar la distribución de este error, y además estimar el promedio para cada catchment del modelo WEAP. Vale mencionar que es muy difícil describir esta incertidumbre donde no hay estaciones de validación, como en la parte noreste del Amazonas.

Eso nos indica que la mayor subestimación de valores observados de la parte de GMET ocurre en la cuenca de Rurrenabaque, que contiene dos estaciones de validación donde GMET demuestra un sesgo menor que -220%.

Para tratar de caracterizar este error por catchment de WEAP, se tomó el promedio espacial del mapa interpolado en cada catchment. Se nota que en las cuencas del Rio Mamoré existe una subestimación de precipitación, de por lo menos 25% en promedio (Figura 23). También se puede ver el rango de los valores de MBE en el mapa interpolado dentro de cada catchment, para definir la variación en la calidad de GMET dentro de un catchment.

El mayor rango de valores de MBE (Mean Bias Error) - por consiguiente, el mayor rango de bajo desempeño de GMET – se da en las cuencas de Rurrenabaque, El Sena y Puerto Villarroel en las cuales se aplicaron factores de ajuste al GMET. En estas cuencas, existen áreas con pobre desempeño de GMET y áreas con buen desempeño de GMET, por tanto, ha sido necesario aplicar un factor a nivel de UH para corregir la subestimación en este caso. También ha sido necesario aplicar factores de corrección en Vilacota y Chuapalca en la cuenca del Altiplano, y Puente San Juan del Oro en la cuenca del Plata. Eso indica que, según la métrica de MBE en las estaciones de validación, hay un rango bastante amplio de ajustes potenciales a la precipitación en estas cuencas.

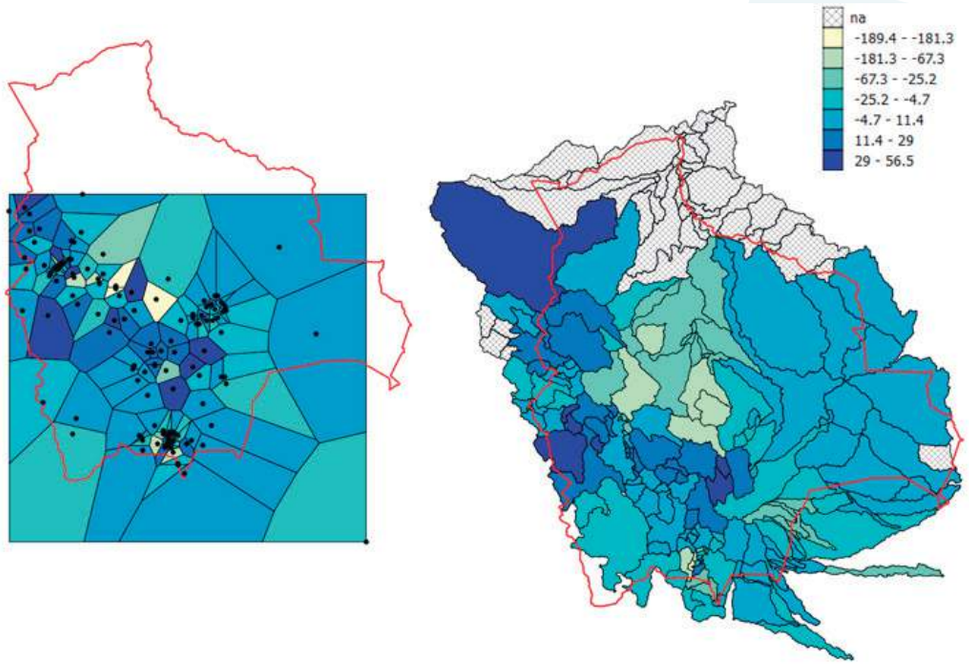

Figura 23. Promedio del MBE (%) en los puntos de validación por catchment

6.4. Validación de GMET con otros sets de datos

Otra manera de cuantificar el error de GMET es analizar su capacidad para reproducir datos observados en estaciones de validación. Estas estaciones de validación no hacen parte de la base de datos de entrada para GMET.

En particular, en la región de Madre de Dios, se puede extrapolar el desempeño de CHIRPS para definir su capacidad de reproducir datos observvados. Eso nos ayuda a definir el error posible en la estimación de precipitación en la cuenca de El Sena. Según el proceso de validación de CHIRPS con relación a estaciones en tierra, CHIRPS tiende a subestimar la precipitación mensual en Bolivia en un promedio de -4%. La correlación de CHIRPS es de 0.82, que es peor a la correlación de GMET, de 0.90 (Figura 24). El error absoluto medio es de 30.95 mm/día con CHIRPS, y 23.28 mm/día con GMET. Eso nos indica que CHIRPS tiene un peor desempeño en el territorio de Bolivia que GMET. Sin embargo, su desempeño es bastante bueno para incluir unos puntos de muestreo desde CHIRPS en la base de datos de entrada en GMET en el Madre de Dios, donde no hay información de estaciones. Esos resultados estadísticos también nos indican que existe incertidumbre en los datos de entrada a la estimación de precipitación en la cuenca de El Sena.

CHIRPS_ Escala mensual

	Min	Ave	Max
MBE (%)	-318.56	-4.08	75.60
Correlation	0.55	0.82	0.94
RMSE	13.35	47.06	249.75
CV-RMSE	0.35	0.75	4.36
MAE (mm/day)	7.27	30.95	180.26

GMET_ Escala mensual

	Min	Ave	Max
MBE (%)	-275.80	-4.66	70.55
Correlation	0.61	0.90	0.99
RMSE	7.85	36.43	227.19
CV-RMSE	0.17	0.63	5.52
MAE (mm/day)	3.93	23.38	173.61

CHIRPS

GMET

Figura 24. Resultados estadísticos mensuales de comparación de CHIRPS y GMET con estaciones

6.5. Validación de datos de precipitación por modelación hidrológica

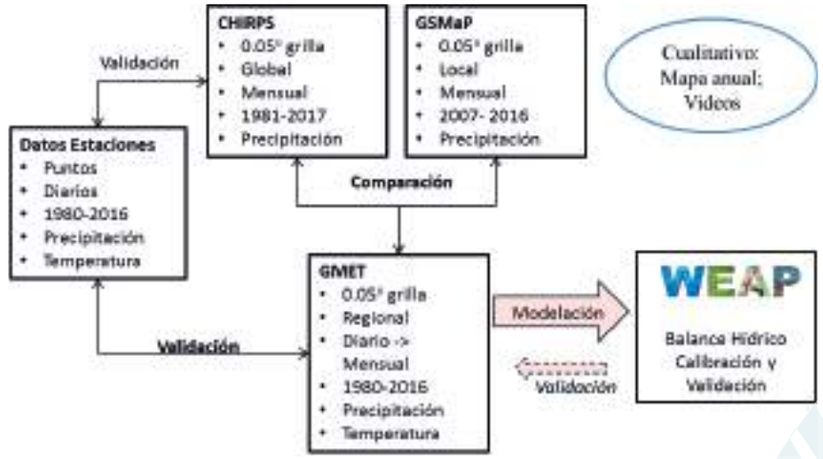

Figura 25. Proceso de validación de GMET en el contexto de modelación hidrológica

La última etapa en el proceso de validación de GMET – y otra manera importante de definir la incertidumbre asociada con su estimación de precipitación – es la modelación hidrológica y la comparación de caudales simulados y observados. En esta etapa, la calibración del modelo sirve para parametrizar el suelo, e identificar lugares en donde una corrección en la estimación de precipitación puede mejorar la calibración.

Según el análisis de incertidumbre en precipitación, se identificaron las siguientes cuencas de calibración como cuencas con problemas en la estimación de precipitación: El Sena, por la inclusión de puntos de muestreo de CHIRPS en la parte de Madre de Dios, Rurrenabaque, Puerto Villarroel, y Santa Rosa del Chapare, por la alta tasa de subestimación de datos observados en las estaciones de validación de la parte de GMET; y las cuencas binacionales con Brasil por la falta de estaciones en Bolivia y la sobreestimación de GMET en las estaciones en Brasil (3.11 % MBE).

En estas cuencas en particular, se miró el desempeño del modelo hidrológico durante el proceso de calibración para determinar si era necesario un ajuste en la precipitación (Figura 26).

		Sesgo (%) en punto de calibración	
Cuenca	Factor	Sin Factor	Con Factor
Rurrenabaque	1.3	-54.6	26.4
El Sena	1.3	-32.3	-7.1
Puerto Villarroel	1.3	-61.9	-35.6
Matto Grosso	0.9	478.7	125.7
Pimenteiras	0.9	54.2	18.8
Pedras Negras	0.9	72	42

Figura 26. Factores de ajuste de precipitación identificados en el proceso de calibración

Como se describió anteriormente, según la desviación estándar de GMET, existe un factor de ajuste posible entre 5-10% (en Figura 22). Por otro lado, el análisis del MBE indica un rango de sesgo hasta del 25% en la cuenca del río Mamoré (en Figura 23). Con esto valores base se aplicaron factores dentro de estos rangos para las cuencas que requirieron ajuste como se ve en la Figura 26. Sin embargo, estos factores aún no logran capturar toda la incertidumbre asociada a los datos de entrada y otros procesos hidrológicos que pueden estar sucediendo y que no están siendo capturados por la metodología del balance hídrico. Por lo tanto, se identifica la importancia de continuar ajustando las bases de datos de entrada que permitan mejorar el conocimiento de la hidrología en estas regiones para la generación de balances hídricos con menor incertidumbre.

6.6. Índice de Aridez

El índice de aridez fue estimado a nivel de las UHs. Este estimado se realizó para utilizar los datos del balance y poder tener una idea gruesa a nivel de las condiciones y riesgos de aridez. El enfoque usado fue el de IDEAM (2013) que está basado en la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real, en este caso se usaron las salidas del balance hídrico.

$$I_a = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

Donde:

I_a = índice de aridez
ETP = Evapotranspiración potencial [mm]
ETR = Evapotranspiración real [mm]

En la Tabla 8 se muestra la clasificación del índice de aridez de la fuente mencionada.

Tabla 8. Categorías para el índice de aridez (IDEAM, 2013)

Rango de Valores	Características
<0.15	Altos excedentes de agua
0.15-0.19	Excedentes de agua
0.20-0.29	Entre moderado y excedentes de agua
0.30-0.39	Moderado
0.40-0.49	Entre moderado y deficitario de agua
0.50-0.59	Deficitario de agua
>0.60	Altamente deficitario de agua

En la Figura 27 se muestra el mapa de índice de aridez de Bolivia. Los resultados indican que gran parte de la macrocuenca del Altiplano especialmente hacia el sur de la cuenca del Lago Titicaca está clasificada como altamente deficitaria de agua, al igual que la cuenca alta y media de Pilcomayo; este último en la macrocuenca del Plata. En la macrocuenca Amazónica, en la parte alta del río Mamoré las UHs localizadas en la Cordillera Oriental son altamente deficitarias de agua; mientras que en la baja entre moderado y excedentes de agua. Las UHs con altos excedentes de agua están localizados en la región del Chapare donde la precipitación anual supera 6000 mm. La región de la Chiquitanía y el Chaco está clasificada como deficitaria de agua.

Es claro que estos resultados no revelan información desconocida sobre las condiciones potenciales de aridez en el país. Además, los estimados no consideran las demandas existentes. Sin embargo, se resalta la flexibilidad y aplicabilidad de las herramientas desarrolladas para poder estimar este, y otro tipo de índices hídricos.

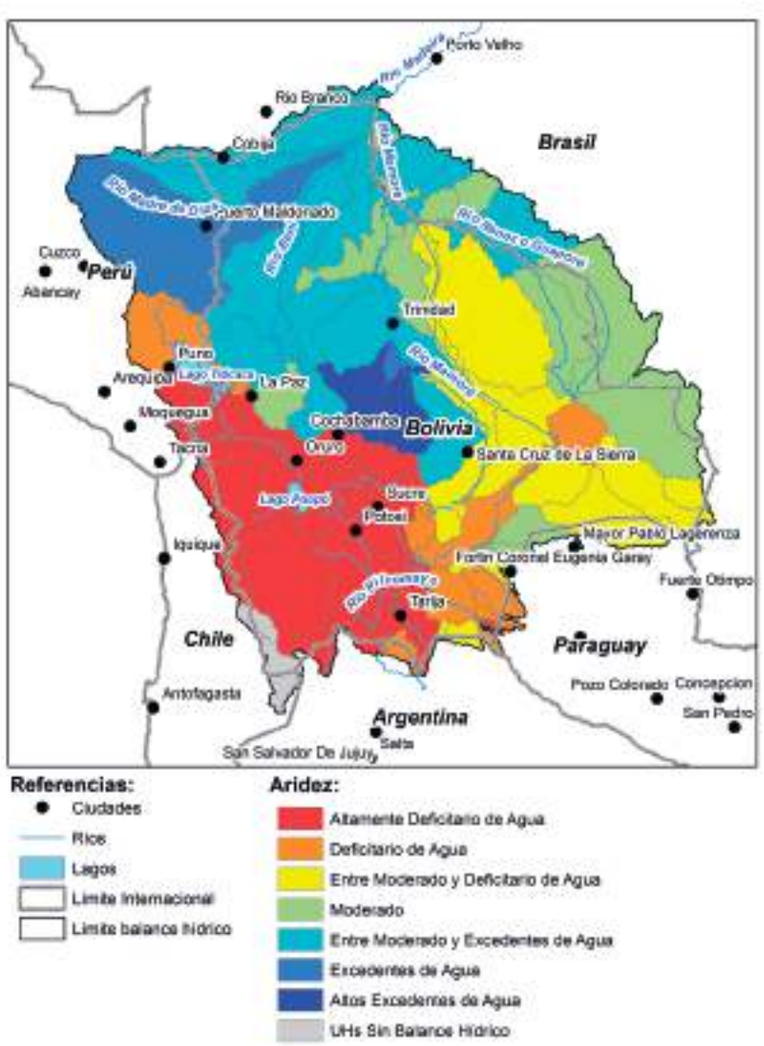

Figura 27. Índice de Aridez de Bolivia periodo 1980-2016

6.7. Balance Hidrológico para Condiciones Climáticas Futuras"

En este estudio se ha realizado un ejercicio de análisis de trayectorias climáticas potenciales futuras. En la ejecución de este análisis, se desarrollaron series climáticas usando el método de reducción de escala denominado kNN (o vecinos cercanos) (Yates et al., 2003) para generar proyecciones climáticas de precipitación y temperatura a los horizontes prospectivos de mediano plazo (2020-2050) y largo plazo (2050-2099), en dos escenarios informados por las proyecciones de los modelos globales CESM-CAM5 y MPI-ESM-MR (IPCC4-CMIP5; RCP 8.5). Dichos modelos fueron priorizados entre el conjunto de modelos globales disponibles para la región de Bolivia según se describe en el anexo digital, "Metadocumento". Para cada uno de los periodos futuros analizados, se realizaron las simulaciones prospectivas del balance de largo plazo utilizando el modelo WEAP descrito en las secciones anteriores, y se establecieron los cambios en las magnitudes de precipitación, evapotranspiración (potencial y real) y escorrentía, relativos con respecto a la condición de referencia (1980-2016).

Los resultados en detalle del balance para condiciones futuras se presentan en el Anexo digital al presente documento, con las tablas y mapas correspondientes a los resultados de los principales componentes del balance hídrico proyectado en cada uno de los escenarios y periodos prospectivos para cada una de las cuencas. A nivel de las macrocuencas los resultados se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9. Cambios relativos en los diferentes componentes del balance hídrico para los diferentes escenarios (MPI-ESM-MR y CESM-CAM5) y periodos prospectivos en cada una de las macrocuencas de Bolivia

PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL
Cambio porcentual respecto a la condición de referencia

Macrocuenca	2020-2050		2050-2099	
	CESM	MPI	CESM	MPI
Amazonica	-1%	-3%	6%	-7%
Del Altiplano	3%	-8%	17%	-3%
Del Plata	-1%	-8%	8%	-7%

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL
Cambio porcentual respecto a la condición de referencia

Macrocuenca	2020-2050		2050-2099	
	CESM	MPI	CESM	MPI
Amazonica	4%	4%	10%	11%
Del Altiplano	6%	7%	16%	17%
Del Plata	5%	5%	12%	13%

ESCORRENTÍA
Cambio porcentual respecto a la condición de referencia

Macrocuenca	2020-2050		2050-2099	
	CESM	MPI	CESM	MPI
Amazonica	-7%	-10%	7%	-19%
Del Altiplano	-23%	-51%	-8%	-51%
Del Plata	-25%	-40%	-28%	-57%

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL
Cambio porcentual respecto a la condición de referencia

Macrocuenca	2020-2050		2050-2099	
	CESM	MPI	CESM	MPI
Amazonica	1%	0%	7%	0%
Del Altiplano	5%	-5%	18%	1%
Del Plata	2%	-4%	12%	-1%

Los dos escenarios considerados – MPI-ESM-MR y CESM-CAM5 – proveen un rango de comportamientos divergentes, especialmente en relación con los cambios esperados en la precipitación de largo plazo. De manera general, el escenario MPI presenta un panorama de reducción de la precipitación de entre -3 y -8%, mientras que el escenario CESM establece un comportamiento relativamente estable de la precipitación para el periodo 2020-2050, seguido de un incremento importante para el periodo 2020-2050, de entre +6 y +17%.
En los dos escenarios y periodos prospectivos considerados, los resultados indican valores comparables en relación con el cambio en la ETP, de entre +4 y +7% (2020-2050) y entre +10 y +17% (2050-2099), como resultado del incremento esperado en la temperatura entre 1.5 y 4.02°C. En contraste, los escenarios muestran cambios divergentes en relación con la magnitud de precipitación, desde -8% (MPI-ESM-MR), hasta +3% (CESM-CAM5) para el horizonte prospectivo 2020-2050, y desde -7% (MPI-ESM-MR), hasta +17% (CESM-CAM5) para el horizonte prospectivo 2050-2099.

En conjunto, los cambios proyectados en los escenarios de ETP y la precipitación, conducen a cambios importantes en los demás componentes del balance hídrico, en particular el componente de escorrentía (Q) de las cuencas del Plata y del Altiplano, donde se anticipa una mayor sensibilidad por su condición climática semiárida. En el caso más crítico, correspondiente al escenario MPI-ESM-MR, en estas dos macrocuencas el efecto conjunto del incremento en la temperatura y la reducción de la precipitación, conduce a un cambio de respectivamente entre -40 y -51% de los caudales medios en el horizonte prospectivo 2020-2050, y de -51 y -57% para periodo 2050-2099. En el caso del escenario CESM-CAM5, los resultados muestran resultados similares, si bien con magnitudes de cambio menores, entre -23 y -25% (2020-2050) y -8 y -28% (2050-2099). En el caso de la cuenca Amazónica, caracterizada por condiciones hidro-climáticas húmedas los resultados indican una respuesta mucho menos drástica en la respuesta de la escorrentía, con cambios entre -7 y -10% para el periodo (2020-2050) y de entre +7 y -19% para el periodo (2050-2099).

Si bien los resultados de los balances alterados con los escenarios climáticos deben ser usados reconociendo sus limitaciones y con conocimiento de los aspectos y suposiciones realizadas, vale la pena resaltar que los cambios identificados proveen una aproximación al rango de la incertidumbre sobre los cambios posibles en el clima futuro (en general caracterizados por incrementos en la temperatura, y cambios divergentes en la precipitación) y su efecto en la respuesta hidro-climática esperada de las cuencas de Bolivia.

6.8. Campañas de aforo durante el estudio

Debido a la importancia de afinar los datos de caudal en algunas regiones de Bolivia, este estudio incluyó un trabajo enfocado de recolección de datos de campo. En la realización de esta actividad se firmó un convenio entre SEI y SENAMHI-Bolivia para realizar dos campañas de aforo, una en época húmeda y otra en época seca. Los puntos de aforo fueron definidos con la participación del equipo supervisor del presente estudio, los cuales se muestra en la Tabla 10, Figura 28.

Tabla 10. Estaciones hidrométricas priorizadas para campaña de aforo

N°	Estación	Río	Departamento	Cuenca
1	Villa Bella	Río Beni - Mamore	Beni	Amazonas
2	Cachuela Esperanza	Río Beni	Beni	Amazonas
3	Riberalta	Río Beni	Beni	Amazonas
4	El Sena	Río Madre de Dios	Pando	Amazonas
5	Guayaramerin	Río Mamoré	Beni	Amazonas
6	El Carmen	Río Grande	Santa Cruz	Amazonas
7	Príncipe da Beira	Río Itenez	Beni	Amazonas
8	Santa Rosa del Chapare	Chapare	Cochabamba	Amazonas
9	San Antonio	Parapety	Santa Cruz	Amazonas
10	Escoma	Río Suches	La Paz	Cerrada del Altiplano
11	Aguallamaya	Río Desaguadero	La Paz	Cerrada del Altiplano
12	Calacoto	Río Desaguadero	La Paz	Cerrada del Altiplano
13	Chuquiña	Río Desaguadero	Oruro	Cerrada del Altiplano
14	Viña Quemada	Río Pilcomayo	Sucre	Del Plata
15	El Puente	Río San Juan del Oro	Tarija	Del Plata
16	Villa Montes	Río Pilcomayo	Tarija	Del Plata

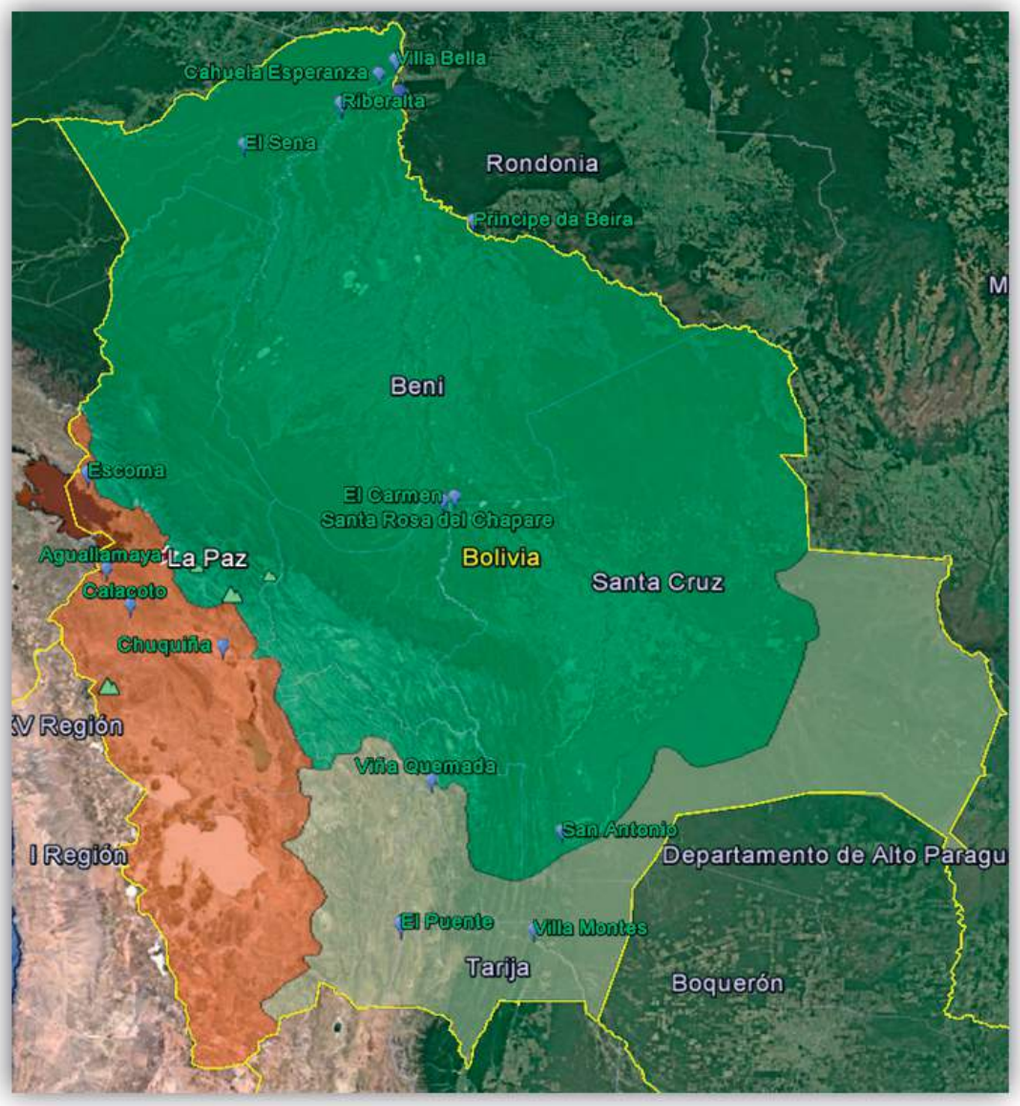

Figura 28. Estaciones de la campaña de aforo del SENAMHI (Fuente: SENAMHI)

La primera campaña (época húmeda) se realizó durante el mes de abril. La segunda campaña (época seca) se realizó durante entre el mes de octubre y noviembre del 2017. Los detalles de ambas campañas se encuentran documentados en el Anexo al presente documento (Metadocumento).

La primera campaña de aforo cubrió 11 estaciones en las cuencas del río Iténez, Mamoré, Beni, Madre de Dios y Pilcomayo. La segunda campaña incluyó un total de 16 estaciones. Las misiones contaron con el equipo especializado del SENAMHI para esta labor, con un total de 12 personas involucradas en la actividad. Los resultados de los caudales fueron incorporados en las bases de datos del SENAMHI para verificación del ajuste de las curvas de calibración existente.

Para el caso de las estaciones de El Carmen y Santa Rosa del Chapare, como de Villa Bella, Camiri y Escoma, se cuenta con muy pocos datos medidos y la información obtenida en estas campañas fue muy valiosa para incrementar su serie histórica. El SENAMHI recomienda generar de forma rutinaria la visita a estas estaciones. Además, se incluirán los resultados del presente trabajo al banco de datos histórico del SENAMHI, conformando parte del ajuste de las curvas de calibración.

Se recomienda continuar elaborando campañas de aforo para continuar afinando las curvas de gasto de las estaciones de medición de caudal. En particular, se recomienda enfatizar el trabajo en las estaciones hidrométricas que presentaron vacíos e inconsistencias en la etapa de calibración.

6.9. Resumen del proceso de capacitacion durante el estudio

A la conclusión del presente estudio, se han implementado 4 talleres de socialización, replica y capacitación, los cuales han cubierto los temas especificados para generar la transferencia tecnológica esperada en este estudio. Además, se implementó un taller final de presentación de resultados en el mes de noviembre en La Paz. Estas capacitaciones, además de la interacción cercana con el equipo implementador, han permitido lograr un avance importante en el conocimiento del uso de WEAP y herramientas asociadas para el análisis como R (https://www.r-project.org/).

Además de los talleres, un resultado importante de la transferencia tecnológica es que los equipos de investigación del LH-UMSS e IHH-UMSA alcanzaron un nivel considerable en su uso de las herramientas utilizadas en el balance hídrico. Este trabajo, permitió compartir aspectos conceptuales y mecánicos de la construcción de la representación del balance hídrico en WEAP. Asimismo, el grupo de expertos de ambas universidades han podido contribuir su propio conocimiento e información de hidrología a nivel local, regional y del país. Para esto, se realizaron sesiones con frecuencia semanal a quincenal, en que se identificó el avance y se programó el trabajo a realizar. Además, el equipo de SEI puso a disposición y desarrolló herramientas específicas, en particular scripts de R, que permitieron procesar datos para determinar métricas de calibración y extraer outputs del balance hídrico de forma automática. La ejecución de estas herramientas específicas es un valor agregado que permite liberar tiempo de procesamiento para dedicar más recursos a la correcta conceptualización de los balances.

Las sesiones de capacitación de los talleres han contaron con participación de un grupo consistente de actores (Tabla 11) (Figura 29).

Tabla 11. Resumen participación de actores en talleres de transferencia de capacidad

Taller	Fecha	PI	EI	Personas	Mujeres	Hombres	Porcentaje Mujeres (%)	Porcentaje Hombres (%)
Taller 1 de Inicio del Proyecto	22-nov-16	x		56	10	46	18	82
Taller 2 de Presentación y Discusión de Datos	14-mar-17		x	23	4	19	17	83
	15-mar-17	x		37	7	30	19	81
	16-mar-17	x		31	4	27	13	87
	17-mar-17	x		30	8	22	27	73
Taller 3 de Presentación y Discusión de Datos	27-jun-17		x	46	2	44	4	96
	28-jun-17	x		47	12	35	26	74
	29-jun-17	x		46	13	33	28	72
	30-jun-17	x		49	14	35	29	71
Taller 4 de Capacitación en Herramientas	26-sep-17		x	15	2	13	13	87
	27-sep-17		x	25	3	22	12	88
	28-sep-17	x		34	6	28	18	82
	29-sep-17	x		27	5	22	19	81
Promedio Participación				36	7	30	19	81

PI: Plataforma Institucional,
EI: Equipo Implementador

Figura 29. Sesión técnica con representantes del MMAYA y otras organizaciones nacionales y regionales, y con directivos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija, Septiembre 2017

En promedio, se contó con la participación de 41 personas representantes de las diferentes instituciones, con una distribución de un 19% de mujeres y 81% de hombres. A través de las sesiones de capacitación se buscó generar sensibilización en los temas de género, de forma que se buscó motivar la participación de mujeres de las diferentes instituciones. Se observa la importancia de continuar motivando este componente para poder seguir contando con la inclusión de las perspectivas diversas que pueden se contribuidas por mujeres en el tema de recursos hídricos en Bolivia.

Revisando los temas de capacitación con respecto a lo esperado al inicio del proyecto, se observa que se cubrió completamente las temáticas específicas. Los materiales entregados contienen todas las sesiones de capacitación incluyendo documentos breves en formato de presentación con detalle y descripción de los scripts de R. Los talleres fueron sistematizados en formato de guías de capacitación que el MMAyA podrá usar para compartir dicho material y conocimiento asimilado durante toda la serie de talleres desarrollados incluyendo ejemplos de WEAP y ejemplos de R. Este material está en manos del MMAyA y MI RIEGO y disponible para todos los actores participantes que quieran revisar y continuar su aprendizaje de las herramientas.

7. Conclusiones y recomendaciones

Salar de Uyuni

7.1.Conclusiones

Respecto a los resultados del BHSB se concluye lo siguiente:

- En este estudio se ha generado una grilla climática diaria con GMET para el periodo 1980-2016 para precipitación y temperatura. La grilla está en formato NetCDF, y puede ser usada en diferentes aplicaciones. 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.

- Según el mapa de precipitación multianual generado por GMET para el periodo 1980-2016, la precipitación sobre el dominio espacial de este estudio es 1236 mm. En el balance hídrico del año 1992 la precipitación multianual fue estimada en 1200 mm.

- En la macrocuenca del Altiplano el 75% de la precipitación sucede en la estación húmeda y un 5% en la estación seca. Un patrón similar ocurre en algunas cuencas importantes de la macrocuenca del Plata, Pilcomayo y Bermejo, donde las precipitaciones durante la estación húmeda representan un 76 y 75% del total anual respectivamente; mientras que en la estación seca un 3%. El patrón estacional en la macrocuenca Amazónica es diferente en términos de magnitud. La precipitación en la estación húmeda representa un 59% del año hidrológico y en la estación seca un 11%. En las tres macrocuencas la precipitación máxima sucede en el mes de enero.

- En el componente evapotranspiración real en las macrocuencas del Altiplano (sin incluir Uyuni) y del Plata (incluye solo Pilcomayo y Bermejo), entre un 63 y un 67% de la evapotranspiración sucede en la estación húmeda, y en la seca entre 11 y 12%. Un patrón estacional distinto sucede en la macrocuenca Amazónica donde la evapotranspiración en la estación húmeda representa un 44%, y en la estación seca 25%. En el Altiplano la evapotranspiración representa un 84% de la precipitación, y similar comportamiento sucede en el Pilcomayo (85%); mientras que en Bermejo es 55%, y en la Amazónica también 55%.

- Respecto al componente de escorrentía, en la macrocuenca del Altiplano un 79% sucede en la estación húmeda, mientras que en Pilcomayo y Bermejo (macrocuenca del Plata) un 78 y 73% para ambos casos. En la macrocuenca Amazónica el escurrimiento en la estación húmeda representa un 65% del total anual, el aporte anual estimado de esta macrocuenca en el río Madeira es 588081.51 hm^3, lo que equivale a un módulo anual de 18647.94 m^3/s hasta el punto de salida del territorio boliviano. El volumen anual en el río Pilcomayo hasta el punto de medición en Misión La Paz es 6377.89 hm^3 (202.24 m^3/s). En la cuenca Bermejo, el aporte anual de la UH de Río Bermejo es de 2812.62 hm^3 (89.19 m^3/s), y de la UH Río Grande de Tarija es de 6509.53 hm^3 (206.41 m^3/s). El aporte anual del río Desaguadero hasta la estación hidrométrica Chuquiña es 2235.51 hm^3 es decir que el módulo anual es 70.89 m^3/s.

- Este estudio también aporta un análisis prospectivo del clima y su influencia sobre los componentes del balance hídrico ante diferentes escenarios de cambio climático generados a partir de técnicas de reducción de escala estadística para los periodos de referencia de mediano (2020-2050) y largo plazo (2050-2099). Los escenarios analizados fueron incorporados al modelo WEAP Nacional, y permiten explorar la respuesta hidrológica de la cuenca ante las incertidumbres climáticas que incluyen cambios en la temperatura (incrementos) y la precipitación (posibles incrementos y/o reducciones). A partir de dicho modelo, fue posible evaluar el rango de los efectos potenciales de dichos cambios en los diferentes componentes del balance hídrico, tales como escorrentía y evapotranspiración potencial y real. Los análisis indican algunos casos críticos de intensificación de la escasez hídrica en las cuencas actualmente caracterizadas por climas predominantemente áridos, por efecto de mayores temperaturas (de hasta 4°C a 2099) y reducciones potenciales de precipitación de hasta -8%. Esta información es particularmente relevante en contexto de planificación a largo plazo, donde las incertidumbres climáticas deben ser efectivamente adoptadas como parte del proceso de toma de decisiones en la planificación de las cuencas hidrográficas.

A través del estudio se identificaron otras conclusiones que sobresalieron en términos de la realidad de generación de datos, procesamiento de los mismos y producción de balances hídricos útiles para el país. Dichas conclusiones se listan a continuación y son el punto de partida para la sección de recomendaciones:

- Existen vacíos temporales y espaciales en las mediciones climáticas históricas de Bolivia lo cual genera incertidumbres en el procesamiento de datos y generación de información regionalizada a nivel de las cuencas hidrográficas del país.

- Existe necesidad de coordinación entre MMAYA y SENAMHI para continuar recolectando datos en regiones priorizadas y con datos escasos para instalar estaciones adicionales.

- Los datos hidrométricos pueden ser utilizados para alimentar los balances hídricos, sin embargo, es necesario definir un procedimiento aprobado técnicamente para realizar esta retroalimentación de forma continua y sistemática.

- Los datos satelitales deben ser utilizados de forma sensata para poder aprovechar su capacidad de cobertura, sin deteriorar la calidad de la información de campo que representa de forma más fidedigna los fenómenos locales.

- El procesamiento de datos climáticos de precipitación y temperatura requiere una continua revisión para lograr aprovechar los algoritmos y datos existentes de forma que puedan representar mejor la variabilidad temporal y espacial del clima.

- La zona amazónica del país presenta dinámicas de inundación que deben ser caracterizadas con mayor detalle para poder representar los balances en esta región con mayor resolución, ya sea por mejora en disponibilidad de datos o por mejoras en los algoritmos de cálculo.

- Las aguas subterráneas son una gran incertidumbre que puede influir de forma considerable en los balances hídricos como se observó en la inclusión de las mismas en la cuenca Amazónica.

- Algunas estaciones hidrométricas requieren revisión de sus datos para poder mejorar la calibración de WEAP. Así mismo, la existencia de los metadatos de la recolección de datos es importante para poder revisar la fuente de los datos en caso de que existan inconsistencias.

- La falta de sistematización de los datos históricos genera una serie de retos en la generación de los balances hídricos pues cada equipo de investigación aplica sus propios métodos de procesamiento, pero sin uniformidad requiriendo una revisión de los mismos cada vez que se realiza un estudio hidrológico.

- Algunas de las fuentes de incertidumbre que se generaron en el balance hídrico se pueden cuantificar por medidas de error como desviación estándar. Otras métricas no tienen este tipo de estimados, y esto impide la cuantificación completa de la incertidumbre total en el balance hídrico.
- La información generada será muy útil para la Plataforma Institucional y otras organizaciones del país, por lo cual es importante poder poner a disposición del público las herramientas y resultados logrados.

- La plataforma WEAP generada tiene múltiples usos en términos de análisis hidrológico y planeación de cuencas. Este paso será importante para poder avanzar en planeación del recurso hídrico en el país.

7.2. Recomendaciones

El desarrollo de un balance hídrico es una etapa clave en el camino hasta un manejo racional de los recursos hídricos. Es imposible manejar el recurso agua si la cantidad disponible es desconocida. Sin embargo, en el ciclo hidrológico la incertidumbre asociada con algunos componentes del balance hace que una buena estimación de la cantidad de agua disponible sea imposible de saber de forma exacta. A pesar de esta incertidumbre, esta estimación representa el punto de partida en una evaluación de las opciones de manejo, incluyendo nueva infraestructura, la operación de infraestructura existente, nuevas políticas sobre el uso y distribución del agua, y la definición de normas relacionadas a la calidad de agua y la condición de los ecosistemas acuáticos. Si el proceso de la toma de decisión funciona bien, esta evaluación, informada por el balance hídrico, permitirá lograr un manejo racional del agua, que es lo que motivó la realización del balance en primer lugar.

Con la finalización del desarrollo del BHSB 2017 se presenta un buen momento para imaginar la existencia de una buena estimación de la disponibilidad de agua histórica y futura en cuencas hidrográficas bolivianas creando una base conceptual y cuantitativa para un manejo racional del agua en el país. El desarrollo del BHSB 2017 se realizó a través de un proceso abierto y participativo en que el Equipo Implementador y la Plataforma Institucional participaron durante la implementación del proyecto. Este proceso permitió capturar el conocimiento y visión de un amplio set de participantes de instituciones y de la academia en Bolivia. Esta sección del documento ofrece algunas recomendaciones sintetizadas de las ofrecidas por los participantes. Esta sección está dividida en tres partes. La primara incluye recomendaciones asociadas con la reducción de la incertidumbre inherente en el BHSB 2017. La segunda parte ofrece ideas asociadas con oportunidades para mejorar las herramientas analíticas que constituyen los bloques analíticos básicos del balance. El documento se cierra con una descripción de las oportunidades de uso de esas herramientas dentro de procesos de planeación y toma decisiones en cuencas bolivianas.

Recomendaciones sobre la reducción de la incertidumbre en la base de datos del BHSB 2017:

Los resultados del BHSB 2017 dependen enormemente sobre la calidad de los datos climatológicos históricos como precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y fracción de nubosidad. A pesar del hecho de que el equipo implementador tomó el máximo cuidado en la selección de los datos insumo del desarrollo del BHSB 2017, hay incertidumbres asociadas con el base de datos que son la base del ejercicio. Estas incertidumbres salen de los huecos temporales y espaciales en las mediciones climáticas históricas en Bolivia y de los desafíos asociados con su uso como parte de un balance hídrico con datos satelitales actualmente disponibles. Además de la calidad de los datos de insumo, el BHSB 2017 depende mucho sobre el uso de GMET para producir la información climática distribuida necesaria para cuantificar el balance. Esta sección contiene también recomendaciones sobre la actualización futura de GMET.

Mejoras en las mediciones climáticas e hidrométricas directas

El fundamento de cualquier balance hídrico es la cantidad y calidad de información climática observada disponible. Esta sub-sección ofrece algunas recomendaciones pertinentes a la importancia de esas observaciones.

- Se recomienda al MMAYA trabajar en coordinación con el SENAMHI para hacer un análisis de relación entre la deviación estándar del ensamble de corridas de GMET, por celda de la grilla, por cuenca, y por región hidroclimática, y la densidad de estaciones climáticas. Este análisis puede guiar decisiones alrededor de la instalación de nuevas estaciones climatológicas en el futuro.

- Así mismo, se recomienda al MMAYA y la Plataforma Institucional definir criterios y procedimientos que permitan mejorar la base de datos climática histórica con base en los datos de caudales observados. Las observaciones de los caudales integran la influencia de la precipitación actual, entre otros factores, y en ese sentido las observaciones hidrométricas disponibles pueden informar el proceso para llenar huecos en los datos climáticos asociados con estaciones ubicadas dentro de la cuenca en cuestión. Esta recomendación se basa en el hecho de que debido a los escases de estaciones de observación climática existen vacíos de datos de entrada de precipitación y temperatura, y sin embargo los datos de caudal pueden ayudar a corregir los datos de precipitación en las subcuencas con baja densidad de estaciones. Se recomienda entonces definir un procedimiento valido, ya sea basado en literatura (Su et al., 2008; Wang et al., 2017a, 2017b) o en experimentos numéricos ejecutados sobre el BHSB existente, y definir rangos y componentes que permitan ajustar los datos de precipitación con datos de caudal.

- Respecto a la red climatológica, se recomienda generar conciencia en los pobladores para que las estaciones no sean víctimas de robo y vandalismo, que se instalen estaciones cerca de las fronteras para así contrastar con los datos de otros países y extender la información existente más allá de la frontera, e instalar estaciones cerca de las divisorias de agua de las cuencas de la cordillera oriental.

- Mejorar el análisis de evaluación de las variables hidrometeorológicas a través del mejoramiento de la red, mínimamente instalar instrumentos automáticos en puntos específicos del país (sur de la cuenca endorreica, chaco boliviano y otros).

- Generar una plataforma de base datos criticados que sean certificados por SENAMHI, dichos datos depurados serán de carácter oficial y permitirán mejorar las futuras versiones del balance.

- Generar convenios institucionales específicos para el tratamiento de información con las Universidades que participan en la Plataforma.

- Realizar un plan de mediciones periódicas con menos intervalos de tiempo de separación de toma de datos en las estaciones hidrométricas clave en la calibración de la aplicación de WEAP en todas las cuencas, y el mejoramiento en la calidad de estos datos aumentaría la confianza en la calibración del modelo.

- Crear planes de entrenamiento en toma de datos, en las poblaciones cercanas a las estaciones, para instruir a los pobladores y concientizar de la importancia de contar con buenas medidas.

- Controlar periódicamente el estado de las reglas instaladas en las estaciones hidrométricas y replantear los niveles ceros mediante las cotas Datum cercanas a dichas estaciones.

- Solicitar un informe del estado de los metadatos (planillas de campo de aforos, niveles de regla, descripción de estaciones) ya que es información histórica y debería ser preservada y tratarse como tal, para posibles consultas en un futuro.
- Destinar recursos económicos tanto para la preservación de la información mencionada en los puntos anteriores, como también para el mantenimiento de los equipos utilizados en las mediciones tanto en aforos como en los niveles de estaciones hidrométricas.

- Solicitar más campañas de aforos y mediciones en épocas de aguas altas, con mayor personal de campo e incluso con supervisión por parte de las autoridades competentes.

- Solicitar mayor personal con un perfil de grado académico que sea destinado a realizar estas actualizaciones en base de datos y mediciones en un futuro, para contar con una red de estaciones más amplia en áreas donde no se cuenta con mucha información.

- En este proyecto para la cuenca de Pilcomayo se ha usado la información de caudales mensuales procesados por Vauchel P. et al. (2006). No se ha podido acceder a la base de datos con información de curvas de calibración y niveles depurados. Se recomienda que mediante el IHH-UMSA se pueda realizar un nuevo procesamiento siguiendo los criterios de Vauchel P. et al. (2006) de esta manera se tendrá una base de datos que permitirá la actualización de caudales.

- En las regiones donde no se cuenta con información hidrométrica como el Altiplano Sur, el Chaco y la Chiquitanía no ha sido posible calibrar el modelo hidrológico propuesto. En estas regiones se aplicó la ecuación general de balance hídrico para los datos multianuales para el periodo 1980-2016, donde el escurrimiento fue estimado en base a la precipitación obtenida de GMET y el ETR estimada con la ecuación de Turc. Se recomienda la instrumentación para el monitoreo hidrométrico de manera que pueda cubrirlas regiones mencionadas.
Mejoras en el uso de datos satelitales

Hay muchas expectativas en la comunidad científica sobre la potencialidad de las observaciones satelitales para informar la cuantificación de los componentes de ciclo hidrológico terrestre. Hasta ahora la mayoría del interés y entusiasmo se enfoca en la estimación de la precipitación. Sin embargo, emergen productos asociados con otros componentes como evapotranspiración y fracción de nubosidad. A pesar de las expectativas, quedan cuestiones y limitaciones asociadas al uso de información satelitales, en particular los huecos en las observaciones, la precisión de las estimaciones, y el corto periodo de existencia de algunos productos. Esta sub-sección ofrece algunas recomendaciones pertinentes al uso futuro de esas observaciones.

- A pesar de la consideración e incorporación limitada de información espacial de CHIRPS en la grilla de GMET ejecutada en este estudio, existe aún la inquietud e interés por parte de la academia de continuar explorando el uso de datos satelitales. Se recomienda realizar un estudio en que se avance en la comparación de datos satelitales con datos locales y con aquellos obtenidos de GMET. Un esfuerzo sobre el que se puede capitalizar es la aplicación local realizada en el uso de GSMAP en la zona de Cochabamba. Se recomienda realizar una comparación entre GMET y GSMAP en la región donde estos datos ya estén validados, y explorar opciones de alimentar futuras corridas de GMET con datos satelitales de este tipo validados. Este ejercicio ofrecería una estimación de la calidad actual de los datos satelitales de precipitación que guiará futuras inclusiones de este tipo de datos en actualizaciones futuras de GMET.

- Para las variables climáticas de humedad relativa, velocidad de viento y fracción de nubosidad se recomienda comparar con datos satelitales en períodos en que estos se encuentren disponibles, lo cual sucede generalmente después del 2000. Esta recomendación nace del input e inquietud de la Plataforma Institucional. A pesar de que SEI exploró la consecución de datos satelitales de este tipo con representantes de la Plataforma que recomendaron este paso, dichos representantes también indicaron que esta comparación es válida únicamente en la región del Altiplano Central y Sur, donde no existe una atmósfera densa y por lo tanto los datos satelitales son más confiables. Los links de la NASA compartidos por estos representantes de la Plataforma Institucional ya no están válidos, y la tarea incluirá explorar la localización de dichas bases de datos dentro de los sistemas de la NASA.

- Articular procesos de investigación entre el MMAyA y las organizaciones científicas con el objetivo de mejorar los procesos de regionalización de las zonas donde hay ausencia de información.

Mejoras en el uso de GMET

Una de las innovaciones más importante del BHSB 2017 es la aplicación de GMET para el desarrollo de una estimación mensual continua de precipitación y temperatura sobre la totalidad del territorio boliviano. La formalización del uso de GMET en Bolivia a través de la capacitación de los técnicos en las organizaciones apropiadas será el enfoque de un nuevo proyecto. Esta sub-sección ofrece algunas pautas sobre el uso futuro de la herramienta en el país.

- Actualizaciones futuras de GMET deberán enfocarse en 1) aumentar la cantidad de estaciones de datos de entrada, 2) definir periodos que cuenten con mejor calidad y número de estaciones, 3) explorar aplicaciones de GMET a nivel regional, 4) alimentar GMET con datos satelitales validados y 5) hacer una exploración de variables adicionales que puedan ser correlacionadas con el clima y que puedan introducirse como factores dentro del algoritmo de cálculo de la precipitación y temperatura. Este tipo de experimentos se realizarán durante la ejecución del trabajo de GMET en colaboración con el LFA y NCAR. Se recomienda al MMAYA participar activamente en este proceso y compartir criterios específicos para realizar las aplicaciones de GMET que cubran los cinco aspectos aquí descritos.

- Como se observa en la gráfica de la desviación estándar de GMET (Figura 1) la razón por la cual algunas cuencas como Pimenteiras, Mato Grosso, Campamento More y Pedras Negras encontraron dificultes para la calibración es porque la incertidumbre en la región y en los valores de la precipitación son demasiado alto. Se recomienda realizar un análisis de regionalización de las estaciones que permita detectar cual estación está provocando este efecto sobre el ensamble.

Recomendaciones sobre el funcionamiento y la calibración del modelo WEAP detrás del BHSB 2017:

El enfoque técnico del BHSB 2017 es diferente al que fue adoptado por balances hídricos antecedentes (1992, 2012) en virtud del uso de un modelo hidrológico, específicamente WEAP. A diferencia de los estudios previos, en los que se aplicó de una manera aritmética la ecuación clásica del balance de masa - es decir el cálculo del flujo de entrada menos salida equivale a cambio en el almacenamiento - el balance actual depende sobre una

simulación calibrada de esos flujos y niveles de almacenamiento. Las ventajas de uso de un modelo son las siguientes: (i) la posibilidad de estimar balances a nivel sub-anual y estacional; (ii) la posibilidad de estimar el balance en cualquier punto y no solamente en los puntos de salida de unidades de análisis predefinidas; y (iii) la posibilidad de utilizar el modelo para estimar un balance bajo condiciones futuras diferentes que las condiciones históricas. Sin embargo, la utilidad del modelo, y su capacidad de capturar esas ventajas, depende sobre todo de su calibración, sus rutinas analíticas, y al acceso a sus funcionalidades. Esta sub-sección ofrece algunas recomendaciones sobre el rol de WEAP en futuras actualizaciones y aplicaciones de balance hídrico.

- Se recomienda una continua revisión y actualización del BHSB en la zona de inundaciones en la medida en que se produzcan estudios adicionales con información para refinar la representación de planicies de inundación realizada en WEAP en la cuenca Amazónica.

- Debido a la naturaleza general del algoritmo actual existente en WEAP para la representación de inundaciones, se recomienda al MMAYA explorar la necesidad de mejorar dichos algoritmos. Si este fuera el caso, SEI estaría dispuesto a apoyar con ideas sobre cómo mejorar los algoritmos con base en aspectos identificados en la aplicación del algoritmo para Bolivia (ver Anexo digital, Metadocumento, sección 10.5).

- Así mismo se recomienda una contínua producción de estudios de aguas subterráneas, y el análisis e incorporación de estos resultados para la revisión de las suposiciones de conexión de cuencas con acuíferos realizadas en el BHSB en WEAP. El ejemplo de un trabajo hecho en California, en el Contado de Yolo, se conectó en WEAP un balance superficial con un balance sub-superficial, y basado en la evolución se simuló los intercambios entre ríos y acuíferos (Mehta et al., n.d.).

- Se recomienda realizar un cálculo de la incertidumbre total del resultado del balance hídrico por unidad hidrográfica. A pesar de que algunos de los componentes del balance hídrico cuentan con datos de incertidumbre asociada (i.e. la desviación estándar de GMET), se recomienda al MMAYA que lidere conjuntamente con la Plataforma Institucional, el trabajo de analizar la incertidumbre combinada del efecto de todas las otras variables del BHSB para poder tener un panorama de la incertidumbre asociada en cada una de las unidades hidrográficas (catchments) estudiadas en el presente estudio. Un ejemplo de este proceso de análisis ha sido cubierto en este documento en la sección 6.1 para el caso de datos de clima.

Recomendaciones sobre el uso del BHSB 2017 en procesos de planeación y la toma de decisión:

Como se mencionó antes, un buen balance hídrico representa el punto de partida en una evaluación de las opciones de manejo y gestión del agua, la instalación de nueva infraestructura, cambios en la operación de la infraestructura existente, nuevas políticas sobre el uso y distribución del agua, y la definición de normas relacionadas a la calidad de agua y la condición de los ecosistemas acuáticos. Sin un esfuerzo institucional para conectar el balance a los procesos específicos de planeación y la toma de decisiones en cuencas, la utilidad real del BHSB no será posible. Esta sección ofrece algunas recomendaciones para promover el uso del BHSB 2017 como parte de esos procesos.

En el caso del uso futuro del BHSB 2017 como parte de la planeación en cuencas bolivianas:

- Se recomienda al MMAYA realizar talleres a nivel regional compartiendo los resultados de este estudio. Estos talleres permitirán identificar necesidades de uso de la herramienta, y la aplicabilidad de la resolución de datos de entrada para las necesidades de las instituciones locales. De este proceso sistemático de realización de talleres, se sugiere que se realicen sesiones en que las instituciones compartan sus inquietudes, y que el MMAYA compile esta información para poder mantener una base de datos de las aplicaciones y usos del BHSB a nivel regional. Esto permitirá mantener un record de estudios que se estén realizando a nivel regional, y la posibilidad de que estos estudios generen datos adicionales que puedan retroalimentar el BHSB.

- Se recomienda al MMAYA guiar la generación de Planes Directores de Cuenca usando como base los resultados del BHSB para las regiones particulares en que estos planes se realicen. El trabajo avanzado en Planes Directores podrá promover la validación de los balances a nivel regional, y retroalimentar el BHSB con datos de demanda e infraestructura que podrán incorporarse en la plataforma WEAP. Este es el enfoque que se aplicará como parte del desarrollo de Plan Director de la Cuenca del Río Rocha financiado por el PPCR.

- Se recomienda realizar estudios adicionales que puedan ayudar a mejorar el estatus actual del BHSB, además de los que ya se están concibiendo para mejorar los datos de entrada de GMET. Estos estudios podrán incluir:

- Estudio detallado de demandas y usos a través de la validación local del mapa nacional del uso de suelo utilizado a la escala nacional.
- Estudio detallado de infraestructura hidráulica, incluyendo un inventario de las características físicas de embalses y sus reglas de operación.
- Inclusión de información detallada de estudios de acuíferos.
- Mejoras en la representación de zonas de inundación.

- El balance hídrico es y será una importante fuente de referencia indicativa, por ende, para el desarrollo de proyectos de los recursos hídricos se deberá realizar estudios hidrológicos específicos en las cuencas de interés.

- Deberá ser el primer documento junto a la base de datos, como la referencia inicial para cualquier proyecto de desarrollo de los recursos hídricos, lo que no exime de la realización de estudios específicos.

- Este documento junto a la base de datos, puede ser utilizado en las políticas y en la elaboración de estrategias de Gestión Integral de los Recursos Hídricos y Manejo Integral de Cuencas. Los Planes de Aprovechamiento son un ejemplo de este tipo de estrategia.

7.3. Referencias

Agua Sustentable, 2016. Vulnerabilidad y Resiliencia en el Altiplano Boliviano. La Paz, Bolivia.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO Rome 300, D05109.

Angarita, H., Wickel, A.J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J.A., n.d. Large-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia.

Brassel, K.E., Reif, D., 1979. A Procedure to Generate Thiessen Polygons. Geogr. Anal. 11, 289–303. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1979.tb00695.x

Burgoa Mariaca, A., 2007. CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE TERRITORIO BOLIVIANO DURANTE LA FASE ACTIVA Y PASIVA DEL MONZÓN SUDAMERICANO. Rev. Boliv. Física 13, 45–53.

Chen, F.-W., Liu, C.-W., 2012. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. Paddy Water Environ. 10, 209–222. https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319-1
Clark, M.P., Slater, A.G., 2006. Probabilistic quantitative precipitation estimation in complex terrain. J. Hydrometeorol. 7, 3–22.

DHI, 2016. MIKE21. BHI Water & Environment Pty Ltd.

Espinoza D., 2006. Balance Hídrico Superficial Microregional de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo (Tesis de Licenciatura). UMSA, La Paz.

IDEAM, 2013. Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional del Agua. Bogotá D.C.

Lehner, B., Grill, G., 2013. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. Hydrol. Process. 27, 2171–2186. https://doi.org/10.1002/hyp.9740

Maidment, D.R., 1993. Handbook of hydrology. McGraw-Hill New York.

Mehta, V.K., Young, C., Bresney, S.R., Simcha Spivak, D., Winter, J.M., n.d. How can we support the development of robust Groundwater Sustainability Plans? (Submitted). Calif. Agric.

Molina, J., Espinoza, D., 2006. Balance Hídrico Superficial de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo (Informe Final). Instituto de Hidráulica e Hidrología, La Paz.

Molina Carpio, J., 2005. Régimen de precipitación en la cuenca de Huarinilla-Cotapata, La Paz-Bolivia. Ecol. En Boliv. 40, 43–55.

Newman, A.J., Clark, M.P., Craig, J., Nijssen, B., Wood, A., Gutmann, E., Mizukami, N., Brekke, L., Arnold, J.R., 2015. Gridded ensemble precipitation and temperature estimates for the contiguous United States. J. Hydrometeorol. 16, 2481–2500.

Pillco Zola, R., Bengtsson, L., 2006. Long-term and extreme water level variations of the shallow Lake Poopó, Bolivia. Hydrol. Sci. J. 51, 98–114.

Roche, M.-A., Bourges, J., Cortes, J., Mattos, R., 1991. Climatologia e hidrologia de la cuenca del lago Titicaca.
Roche, M.-A., Fernandez, C., Aliaga, A., Peña, J., Salas, E., Montaño, J.L., 1992. Balance Hídrico Superficial de Bolivia. La Paz, Bolivia.

Su, F., Hong, Y., Lettenmaier, D.P., 2008. Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin. J. Hydrometeorol. 9, 622–640. https://doi.org/10.1175/2007JHM944.1

Turc, L., 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. Ann Agron 12(1), 13–49.

USACE, RMA, n.d. HEC-RAS. US Army Corps of Engineers.

Van Asselt, M.B., Rotmans, J., 2002. Uncertainty in integrated assessment modelling. Clim. Change 54, 75–105.
Vauchel P., Malbrunot A., Aguilar I., 2006. Análisis, critica y tratamiento de los datos hidrométricos de la cuenca alta del río Pilcomayo disponibles aguas arriba de la Misión La Paz (Argentina). Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Instituto de Hidráulica de Hidrología (IHH), Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), La Paz, Bolivia.

Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., 2017a. Evaluation and hydrologic validation of TMPA satellite precipitation product downstream of the Pearl River Basin, China. Hydrol. Process. 31, 4169–4182. https://doi.org/10.1002/hyp.11350

Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., Chen, J., 2017b. Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility. Atmospheric Res. 196, 151–163. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.020

Yates, D., Gangopadhyay, S., Rajagopalan, B., Strzepek, K., 2003. A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm. Water Resour. Res. 39, 1199. https://doi.org/10.1029/2002WR001769

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A., 2005a. WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Water Int. 30, 487–500. https://doi.org/10.1080/02508060508691893

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A., 2005b. WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. Water Int. 30, 487–500.