



IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA DE LA CUENCA MISICUNI (BOLIVIA)

IMPACT OF CLIMATE CHANGE IN THE WATER AVAILABILITY OF MISICUNI WATERSHED (BOLIVIA)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

D. Daniel Becerra Villanueva

Dirigido por:

D. Juan Antonio Pascual Aguilar

D. Gustavo Ayala Ticona

Alcalá de Henares, Junio de 2022

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios, familia y amigos por todo el cariño, apoyo y ánimos vertidos que me impulsaron a dar este paso en mi vida profesional, para seguir aprendiendo y continuar trabajando por mi país con mejores herramientas. Agradezco especialmente a mis padres que siempre me animaron y apoyaron a seguir mis sueños, y continuar luchando para crecer en cada aspecto de mi vida; y a mi novia que con todo su amor me brindó un apoyo incondicional dándome la fortaleza para enfrentar esta nueva etapa, siempre aconsejándome y acompañándome a la distancia con todo su cariño, permitiéndome a tener la lucidez y ánimo para concluir los estudios.

A mis amigos del master (principalmente Andrés, Alejandro y Diego) con quienes formé una bonita familia, ayudándonos, animándonos, estudiando, compartiendo y bromeando; con quienes pude disfrutar de esta experiencia, incluso estando tan lejos de mi país y mi gente.

A mis tutores Gustavo Ayala y Juan Antonio Pascual que me brindaron sus conocimientos y experiencia, para poder desarrollar un trabajo de master de calidad, aprendiendo de sobre manera, creciendo como profesional en el proceso. Al BID y Mauro Nalesso por su colaboración y predisposición a transmitir sus conocimientos y experiencias en el manejo de su herramienta Hydro-BID.

Finalmente, agradezco a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) por otorgarme la beca y darme la posibilidad de desarrollar mis estudios de posgrado brindándome una gran cantidad de conocimientos muy valiosos para el desarrollo de mi vida profesional, en beneficio de mi amada patria.

ÍNDICE

Resumen.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Breve descripción de la zona de estudio.....	3
2. Justificación y objetivos.....	4
3. Plan de trabajo/Materiales y Métodos.....	6
3.1. Disponibilidad de información y metodología.....	6
3.1.1. Sistema Hydro-BID y AHD	7
3.1.2. Precipitación y temperatura.....	9
3.1.3. Serie de caudales y volúmenes.....	11
3.1.4. Proyección de cambio climático.....	12
3.2. Pretratamiento de información para Hydro-BID.....	14
3.2.1. Identificación de estrategia de modelación hidrológica...14	
3.2.2. Edición de Base de Datos de Hidrológica Analítica – AHD	
.....	15
3.2.3. Interpolación de información climática	15
3.2.4. Identificación del Número de Curva de la cuenca.....	16
3.2.5. Anomalías en precipitación y temperatura (Cambio	
Climático)	17
3.3. Implementación del modelo hidrológico Hydro-BID.....	17
3.3.1. Calibración y validación de modelo hidrológico – Línea	
Base.....	17
3.3.2. Simulación del Cambio Climático.....	19
4. Resultados y Discusión.....	20
4.1. Hydro-BID, y edición de AHD en la zona de estudio.....	20

4.2.	Información base consolidada.....	23
	4.2.1. Precipitación y temperatura en cuenca Misicuni	23
4.3.	Calibración y validación del modelo.....	26
4.4.	Variación de la oferta hídrica en la cuenca Misicuni por efecto del cambio climático.....	30
5.	Conclusiones.....	32
6.	Bibliografía.....	34
7.	Anexos.....	33
	Anexo I. Exploración a la AHD para la cuenca Misicuni.....	36
	Anexo II. Análisis de datos de clima y caudales.....	39
	Anexo III. Proyección de cambio climático.....	43
	Anexo IV. Edición de la AHD.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de presa y cuenca Misicuni.	3
Figura 2. Localización del PMM y Esquema de Trasvases. (Fuente: MMAyA, 2013).....	4
Figura 3. Metodología general para alcanzar el objeto del estudio.	6
Figura 4. Diagrama de Flujo del Hydro-BID (Fuente: BID, 2014).	7
Figura 5. Comparación de Cuenca Misicuni real vs AHD.....	8
Figura 6. Subcuencas, Polígonos de Thiessen y Ubicación de Estaciones Pluviométricas empleados en el estudio sobre “Modelo de Operación del Embalse” (Fuente: López, 2016).....	9
Figura 7. Serie diaria de volumen de agua, embalse Misicuni.	11
Figura 8. Proyección de temperatura media anual para Bolivia, 2020-2039 (CCKP).	13
Figura 9. Estrategia de modelación hidrológica para la cuenca Misicuni.	14
Figura 10. Configuración de “Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos” en Misicuni.....	16
Figura 11. Configuración de calibración “línea base” sistema Hydro-BID, cuenca Misicuni.	18
Figura 12. Calibración de parámetros hidrológicos, “línea base” sistema Hydro-BID Misicuni.....	18
Figura 13. Configuración de validación “línea base” sistema Hydro-BID, cuenca Misicuni.	19
Figura 14. Configuración de anomalías, módulo de “Escenario Climático”, periodo 2020- 2039.....	20
Figura 15. Representación esquemática del modelo de GWLF (modificado de Haith et al., 1996. Fuente: BID, 2014)	21
Figura 16. Serie trimestral de precipitación en cuenca Misicuni (Elaborado con datos de EM).	24
Figura 17. Serie diaria de temperatura en estación Sivingani (Elaborado con datos de EM)	25
Figura 18. Tabla de precipitación y temperatura en la AHD para la zona de estudio.	26
Figura 19. Resultados de 1ra iteración, calibración cuenca Misicuni.	26
Figura 20. Resultados de calibración, cuenca Misicuni.....	27
Figura 21. Parámetros estadísticos de calibración generados por Hydro-BID.....	28
Figura 22. Resultados de validación del modelo hidrológico, cuenca Misicuni.	28

TABLA DE ABREVIATURAS

<i>AHD.</i>	<i>Base de Datos de Hidrología Analítica.</i>
<i>ASTER.</i>	<i>Radiómetro Especial Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica.</i>
<i>BID.</i>	<i>Banco Interamericano de Desarrollo.</i>
<i>CAF.</i>	<i>Corporación Andina de Fomento.</i>
<i>CCKP.</i>	<i>Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático.</i>
<i>CMIP6.</i>	<i>Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados.</i>
<i>CN.</i>	<i>Número de Curva.</i>
<i>COMID.</i>	<i>Identificador Único de Cuenca – Hydro-BID.</i>
<i>DEM.</i>	<i>Modelo Digital de Elevación.</i>
<i>DGIA.</i>	<i>Dirección de Gestión Integral de Agua.</i>
<i>EM.</i>	<i>Empresa Misicuni.</i>
<i>GWLF.</i>	<i>Función de Carga de Cuenca Generalizada.</i>
<i>IPCC.</i>	<i>Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.</i>
<i>NASA.</i>	<i>Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio.</i>
<i>OCHA.</i>	<i>Oficina de las Naciones Unidas de Coordinación de Asuntos Humanitarios.</i>
<i>OMM.</i>	<i>Organización Meteorológica Mundial.</i>
<i>PPM.</i>	<i>Proyecto Múltiple Misicuni.</i>
<i>RTI.</i>	<i>Instituto de Investigación del Triángulo Internacional.</i>
<i>SEMAPA.</i>	<i>Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario.</i>
<i>SENAMHI.</i>	<i>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.</i>
<i>SISMET.</i>	<i>Sistema de Procesamiento de Datos Meteorológicos.</i>
<i>SSP.</i>	<i>Caminos Socioeconómicos Compartidos.</i>

RESUMEN

El crecimiento del área metropolitana de Cochabamba con la cada vez más frecuente ocurrencia de eventos de sequía viene incrementando la presión sobre la oferta hídrica en Cochabamba, Bolivia. Esto combinado con la elevada vulnerabilidad al cambio climático y a eventos del fenómeno del Niño (ENSO), indican una urgente necesidad de gestión eficiente del agua. Para atender esta constante necesidad se construyó el embalse Misicuni con 180 hm³ de capacidad, cuya gestión eficiente y planificada es una prioridad para la región.

En este contexto, el presente estudio busca simular el comportamiento hidrológico de la cuenca Misicuni y estimar la variación en la oferta hídrica por efecto del cambio climático, empleando la herramienta Hydro-BID. Para este propósito, se realiza el análisis y procesamiento de información disponible histórica y proyecciones climáticas (periodos 2006-2016 y 2020-2100 respectivamente), calibración y validación del modelo, y simulación de hidrogramas para los periodos analizados.

En base a los resultados y análisis de estos, se concluye que el modelo representa de manera aceptable los procesos hidrológicos relativos a la disponibilidad hídrica, indicando que para escenarios de cambio climático SSP-4.5, la disponibilidad hídrica disminuye entre 12-16% para 2040-2059, a 17-30% para el 2080-2100.

1. INTRODUCCIÓN

Bolivia es considerado uno de los países de Latinoamérica con mayor índice de vulnerabilidad al cambio climático, destacando el departamento de Cochabamba cuyo riesgo está catalogado como extremo (CAF, 2014). Así también, los eventos de El Niño y La Niña alteran el comportamiento de las precipitaciones principalmente en la región andina, cuya intensidad de afectación es variada, y depende también de otros fenómenos de escala regional, como la posición e intensidad de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur, del Anticiclón del Pacífico y el Anticiclón del Atlántico (CEPAL, 2014).

El crecimiento del área metropolitana de Cochabamba (conformada principalmente por los municipios: Sacaba, Cercado, Colcapirhua, Quillacollo, Vinto, Tiquipaya y Sipe Sipe) viene incrementando la presión sobre la oferta hídrica, denotando una urgente necesidad de gestión eficiente del agua (SDC, DGIA, 2014). Ante esta necesidad, se llevó adelante el Proyecto Múltiple Misicuni (PMM), cuyo objetivo principal es “suministrar Agua Potable a las poblaciones urbanas del Valle Central de Cochabamba, Agua de Riego para la agricultura del área agrícola de influencia y generación de energía eléctrica para el Sistema Interconectado Nacional” (fuente: www.misicuni.gob.bo).

El PMM se constituye en la principal fuente de agua para consumo en la región metropolitana de Cochabamba, y prevé preliminarmente entregar 2000 litros por segundo de agua para riego, y 3181 litros por segundo para consumo humano, haciendo un total de 5181 litros por segundo (MMAyA, 2013). Sin embargo, se constituye en una necesidad urgente analizar el impacto que el cambio climático pueda afectar sobre la oferta hídrica del PMM, a partir del cual la EM y los actores sociales puedan plantear medidas de gestión a mediano y largo plazo.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) como parte de su compromiso de ayudar a los países miembros en la adaptación al cambio climático, ha desarrollado el Sistema de Simulación Hydro-BID para servir como herramienta clave de planificación y manejo de recursos hídricos (BID, 2014), la cual será empleada en el presente estudio para la modelación hidrológica y análisis de cambio climático.

1.1. DESCRIPCIÓN DE ZONA DE ESTUDIO

La presa Misicuni se ubica (ver Figura 1) en coordenadas 17° 5' 47.72" latitud sur y 66° 19' 48.79" longitud oeste, específicamente en la cordillera del Tunari, tiene una capacidad de almacenamiento de 180 millones de m³ (180 Hm³), y se constituye en la principal fuente de agua para la región metropolitana de Cochabamba. A partir de información satelital DEM – ASTER (Resolución 30x30m – generado por la NASA), se ha estimado una cuenca de aporte total de 344.75 km².

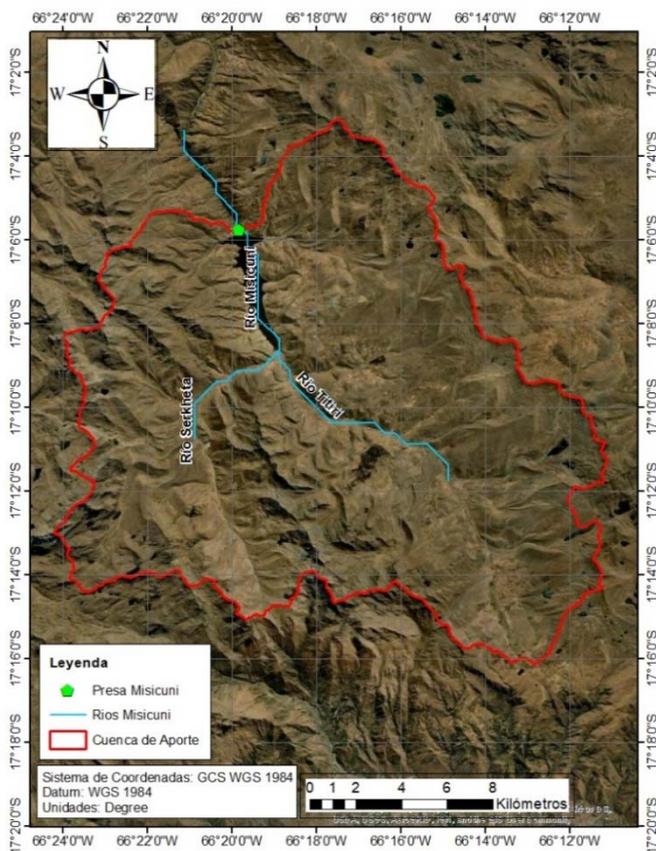


Figura 1. Ubicación de presa y cuenca Misicuni.

Políticamente, la cuenca Misicuni está ubicada en Bolivia (centro de Sudamérica), departamento Cochabamba, contiguo a la región metropolitana de Cochabamba. Hidrológicamente, la cuenca Misicuni forma parte de la cuenca del río Alto Beni, y el centro urbano de Cochabamba se encuentra en la cuenca del río Rocha; es decir, para el aprovechamiento de las aguas de la cuenca Misicuni, se realiza el embalse y trasvase de las aguas (ver Figura 2, línea verde). Las cuencas Alto Beni y Rocha se encuentran separadas por la cordillera del Tunari (Cordillera de Los Andes), estando la cuenca Alto Beni ubicada al norte de la cordillera en la región amazónica, y la cuenca Rocha al sur de la cordillera en la región sub-andina.

Dada su mencionada ubicación y diferencias climáticas entre regiones, la cuenca Misicuni presenta una precipitación media anual aproximada de 800 mm al año (López, 2016), mayor que en la cuenca Rocha con precipitación media aproximada de 500 mm al año (SISMET – SENAMHI).

En la cuenca predominan los afloramientos rocosos con escasa o nula vegetación, zonas de uso pastoril con herbazal bajo o mediano, y bofedales (EM, 2009), cuyas pendientes van desde 26% en las laderas, hasta 7% en los cauces (López, 2016). Los tres principales afluentes del embalse Misicuni son: río Misicuni (ingresa por el sector sur) que nace de la confluencia de los ríos Titiri (subcuenca oeste) y Serkheta (subcuenca este); y el río Sivingani (ingresa por el sector este), afluente de menor tamaño.

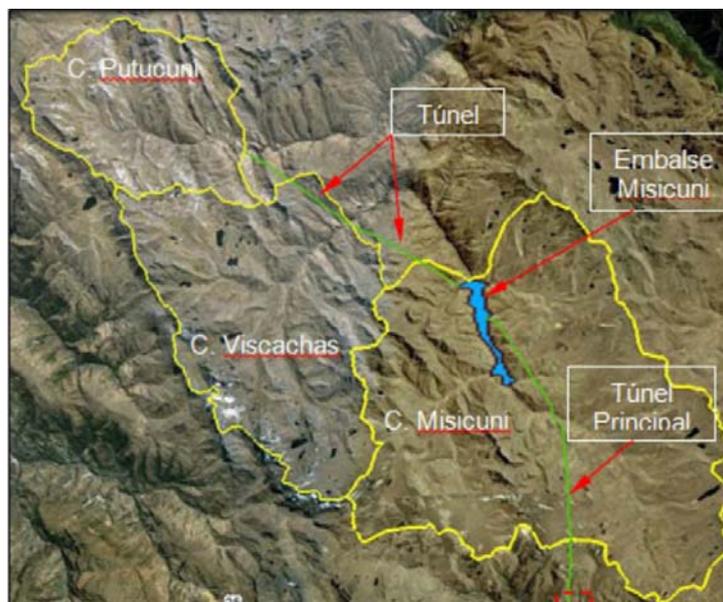


Figura 2. Localización del PMM y Esquema de Trasvases. (Fuente: MMAyA, 2013)

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Durante varias décadas, la cuenca del río Rocha (entre otras) viene presentando eventos de sequía con intensidad variada, afectando a toda la población y a las actividades socioeconómicas. En 2016, se reportó una de las mayores sequías de los últimos años en Bolivia, Cochabamba no fue la excepción. De los 47 municipios del departamento, 26 se declararon en emergencia y 4 dictaron desastre natural (Peredo, 2016). La Gobernación de Cochabamba reportó que los principales cuerpos de agua del departamento se estaban secando, incluyendo las principales represas que suministran agua tanto para consumo humano y riego (OCHA, 2016).

A raíz de esta recurrente y antigua problemática, la Empresa Misicuni (EM) llevó adelante la implementación del PMM, cuyas obras consideraban (entre otras) la construcción de un túnel de trasvase y una presa de 120 metros de altura, para el suministro de agua destinado a consumo, riego y generación hidroeléctrica. Concluida su construcción, en septiembre de 2017 la EM comenzó a proveer agua a la región metropolitana de Cochabamba (www.misicuni.gob.bo).

Actualmente la represa Misicuni garantiza el suministro de agua a corto plazo (desde 2014 entrega agua a SEMAPA), pero considerando el crecimiento de la demanda de agua a mediano y largo plazo, y para garantizar el suministro de agua para el consumo humano, es posible que se requiera disminuir la cantidad de agua destinada para riego del PMM (SDC, DGIA, 2014). Estas presiones sobre la presa Misicuni a corto y largo plazo, hacen necesaria una adecuada planificación en gestión de agua, partiendo por cuantificar la oferta hídrica y analizar su posible alteración por efecto del cambio climático.

Sobre este último, se acumulan pruebas de que las temperaturas mundiales están ascendiendo, con una rapidez que puede ser considerablemente mayor que en el pasado (IPCC, 2001). Para analizar la sensibilidad en la producción hídrica de un sistema ante los efectos del cambio climático, puede modificarse la media y/o desviación típica respecto a una serie sintética de flujo del sistema (OMM, 2011).

Considerando todo lo mencionado, el objetivo general de este estudio es estimar la oferta hídrica actual y futura en la cuenca Misicuni evaluando la sensibilidad del sistema ante los efectos del cambio climático, empleando analíticamente el modelo hidrológico GWLF (Generalized Watershed Loading Factor) disponible en el sistema Hydro-BID. Como objetivos específicos se plantean:

- Disponer de información procesada de clima y flujo como insumo del modelo.
- Analizar la metodología empleada por Hydro-BID para su correcta aplicación en la zona de estudio.
- Calibrar el modelo hidrológico estimando la oferta hídrica actual.
- Estimar y analizar la variación en la oferta hídrica futura considerando los efectos del cambio climático.

3. PLAN DE TRABAJO/MATERIAL Y MÉTODOS

Para estimar la oferta hídrica actual y futura en la cuenca Misicuni, se requiere disponer de un modelo hidrológico calibrado y validado capaz de representar adecuadamente los procesos físicos que transforman la precipitación en escorrentía. De esta manera, y conociendo los efectos del cambio climático sobre la precipitación y temperatura en la cuenca, es posible estimar la variación futura en la escorrentía. Como herramienta de modelación hidrológica, el presente estudio emplea el Sistema de simulación Hydro-BID, desarrollado por el BID.

De manera general, en la Figura 3 se muestra la metodología empleada para la generación del modelo hidrológico y resultados esperados. Dentro de este apartado, se describe de manera concisa la zona de estudio, información disponible, metodología empleada para tratamiento de información, softwares, y otros empleados en el presente estudio. Los resultados (intermedios y finales) de aplicar la metodología se describe en el apartado 4. Las consideraciones específicas de aplicación de las metodologías se describen en los Anexos.

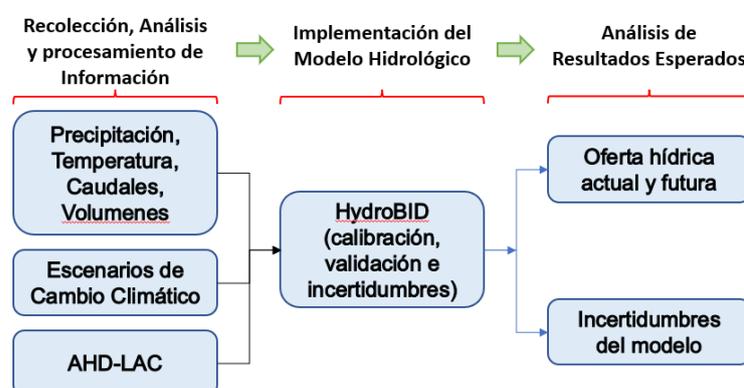


Figura 3. Metodología general para alcanzar el objeto del estudio.

3.1. DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA

En estudios hidrológicos, el principal problema suele ser la disponibilidad de datos y el acceso a estos. La cuenca Misicuni ha sido objeto de estudio por parte de la EM e investigadores desde la década de 1970 cuyos principales resultados se emplearon para el diseño y construcción del Proyecto Múltiple Misicuni (López, 2016).

3.1.1. Sistema Hydro-BID y AHD

De acuerdo con el BID (2014), el Sistema Integrado Hydro-BID realiza una simulación cuantitativa de hidrología (en base al modelo GWLF) y cambio climático, construido sobre la “Base de Datos de Hidrología Analítica” (Analytical Hydrographic Dataset, AHD) desarrollada por el BID. En la siguiente figura se muestra el funcionamiento del Sistema Hydro-BID.

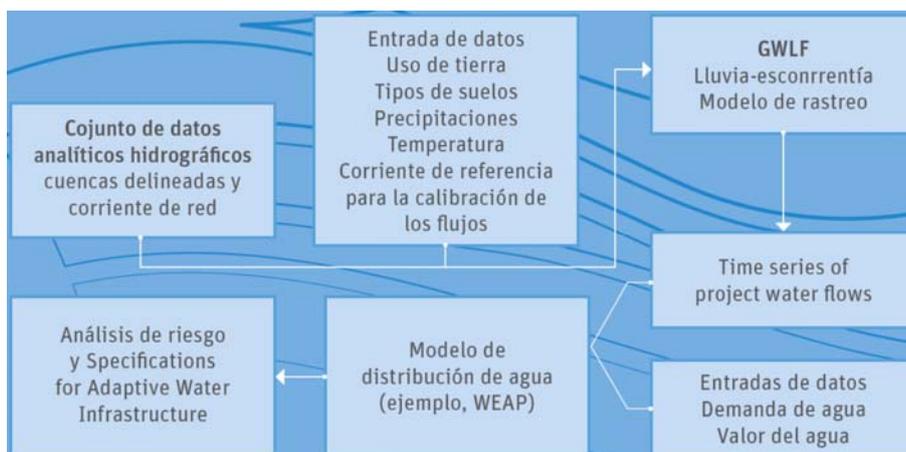


Figura 4. Diagrama de Flujo del Hydro-BID (Fuente: BID, 2014).

Para explorar el funcionamiento del sistema Hydro-BID, se realizó:

- Análisis al funcionamiento de Hydro-BID en base a bibliografía,
- Análisis de la información disponible en la AHD relativas a la zona de estudio, empleando los programas “QGIS” y “DB Browser for SQLite”.
- Identificación de información adicional necesaria para funcionamiento de Hydro-BID (precipitación, temperatura, caudales, e información espacial).
- Identificación de formato requerido de la información para ser asimilados por el sistema Hydro-BID.

De la exploración realizada a la AHD (ver Anexo I), se observa que se dispone de la siguiente información para la cuenca de estudio:

- Estructura de cuencas predefinidas con esquema único de identificación,
- Estructura derivada para los segmentos fluviales de las cuencas predefinidas
- Atributos de interconexión de segmentos y cuencas,
- Parámetros geométricos de cuencas y segmentos fluviales,
- Información sobre tipo y uso de suelos, relativos a parámetros hidrológicos como Número de Curva, Capacidad disponible de agua del suelo, etc.

El área de cuenca es determinante al momento de transformar la precipitación en escorrentía, en ese sentido, se verificó que el área de cuenca en la AHD sea coincidente con la realidad de la cuenca Misicuni. Con ayuda del software ArcGIS, se comparó espacialmente las cuencas de la AHD y la estimada empleando información satelital (ver Figura 5).

En la Figura 5 se observa que la cuenca Misicuni está conformada por 3 cuencas predeterminadas de la AHD. Por otro lado, según López (2016) del área total de la cuenca Misicuni, 45.11 km² son actualmente aprovechados por SEMAPA (ver Figura 6), quedando 299.64 km² como área total de cuenca aprovechable por el embalse Misicuni. Si se emplea el área de cuenca de la AHD (363.261 km²), se tiene una sobreestimación del 21% del área real. Para corregir esta diferencia se realizó la edición de la AHD (ver apartado 3.3.2), ajustando también otros parámetros vinculados al área de cuenca, como ser: área por tipo de cobertura (CN), entre otros.

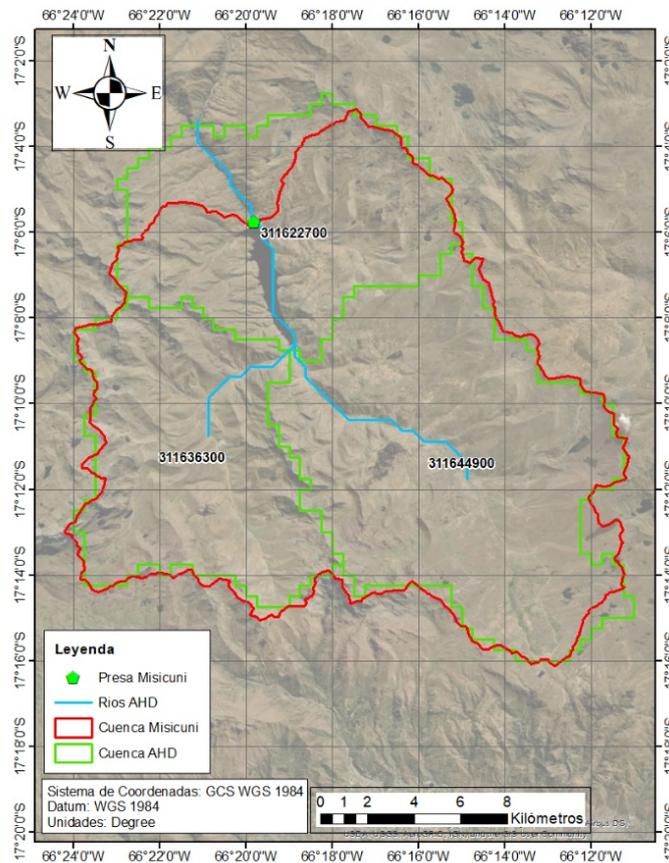


Figura 5. Comparación de Cuenca Misicuni real vs AHD.

Para el presente estudio, la EM ha proporcionado información analizada, rellena y validada de precipitación diaria (López, 2016) para 5 estaciones principales: Sivingani, Templo, Sunjani, Cuatro Esquinas y Aguadas (ver Figura 6). Esta información ha sido comparada (por la EM) con registros de caudal, garantizando una aceptable representación del sistema. La serie proporcionada corresponde al periodo 20/03/2006 al 31/12/2016 (3940 registros). Según López (2016), la información de las estaciones Bocatoma, Escalerani y La Cumbre, presenta inconsistencias críticas atribuibles a cambio de ubicación, errores en los registros, y otros, motivo por el cual la EM recomendó no emplear dentro el estudio.

Adicionalmente la EM ha entregado información de precipitación sin procesar del periodo 01/01/2017 a 15/04/2019 para las mencionadas estaciones; y se accedió a datos diarios de la estación “Aasana Cochabamba” de la página web del SENAMHI (www.senamhi.gob.bo).

Respecto a la información de temperatura, las estaciones de Sivingani y Aasana Cochabamba son las únicas que disponen de registros para el periodo 20/03/2006 al 31/12/2016. Ante esta falta de información, se asume la información de la estación Sivingani, como representativa de toda la cuenca Misicuni; siendo la estación Aasana Cochabamba empleada para análisis y relleno de datos.

A continuación, se describe la metodología empleada para exploración, tratamiento y actualización de la base de datos de precipitación y temperatura, que se encuentra basada en el estudio de López (2016). En el apartado 4.2.1 se describen los resultados obtenidos, y en el Anexo II se presentan las gráficas y análisis específico realizado.

- *Establecer base de datos para manejo de información.* En un libro Excel se consolida la información disponible, para su tratamiento, identificándose valores representativos (promedio, mensual, anual, estacionalidad), periodos sin registros o datos faltantes.
- *Análisis de consistencia.* Para identificar datos anómalos, se realiza el control visual de los datos y curvas doble masas a nivel diario o mensual, siendo Sivingani la principal estación de referencia dentro de cuenca. Los datos anómalos son eliminados.

- *Relleno de datos.* Para datos puntuales se emplearon métodos simples como la inversa de la distancia; y para periodos extensos (no mayor a 2 semanas) el relleno emplea datos mensuales mediante un modelo de correlación lineal. Los datos mensuales son desagregados empleando como referencia el comportamiento de la estación más cercana. Considerando la existencia de una BBDD consolidada hasta el 2016, el relleno de datos se consideró principalmente para el periodo 2017 a 2019.

3.1.3. Serie de caudales y volúmenes

La información de caudales en la cuenca Misicuni es bastante escasa y discontinua, por ello la Empresa Misicuni (López, 2016) ha realizado la reconstrucción de una serie de caudales mensuales para el periodo 08/1967 a 07/2016 (ver Tabla 2). Por otro lado, se dispone de registros diarios de nivel y volumen (Figura 7) del embalse Misicuni en el periodo 11/2016 a 12/2020.

Tabla 2. Serie de caudales medios mensuales (m³/s) para sitio de presa Sivingani (Fragmento, Fuente: López, 2016)

AÑO	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM
00/01	0.22	0.28	0.45	0.79	4.03	6.65	6.61	5.19	2.01	4.25	0.49	0.30	2.61
01/02	0.53	0.30	0.48	2.87	5.03	3.75	3.72	3.92	0.65	0.94	0.35	0.80	1.95
02/03	0.22	0.38	1.32	1.51	1.44	4.87	8.68	4.08	2.38	0.49	0.31	0.31	2.17
03/04	0.29	0.23	0.63	3.37	5.84	15.24	11.53	6.05	3.19	0.73	2.62	1.43	4.26
04/05	0.50	0.72	1.99	3.79	5.98	10.71	12.30	4.46	3.84	1.61	0.47	0.34	3.89
05/06	0.30	4.22	1.29	3.83	4.91	7.49	7.29	10.10	3.91	0.68	0.41	0.31	3.73
06/07	0.27	0.61	0.93	1.64	5.05	6.01	7.32	4.15	1.09	0.44	0.30	0.25	2.34
07/08	0.20	1.01	0.59	3.50	4.26	13.99	6.64	6.40	2.65	0.63	0.40	0.30	3.38
08/09	0.26	0.20	0.38	0.95	6.06	6.80	4.37	4.32	1.80	0.48	0.31	0.27	2.18
09/10	0.20	0.20	0.88	2.47	6.65	5.21	8.11	6.25	3.97	0.71	0.38	2.49	3.13
10/11	0.57	0.26	0.33	0.37	3.71	5.60	12.93	9.86	2.66	0.62	0.42	1.81	3.26
11/12	0.36	0.46	0.55	1.19	1.90	5.57	8.28	4.38	0.98	0.39	0.30	0.24	2.05
12/13	0.20	0.27	0.68	2.31	2.07	0.87	9.59	2.49	0.95	0.51	1.13	0.88	1.83
13/14	2.75	1.21	0.88	1.91	5.34	5.13	10.86	1.63	1.38	0.89	0.52	0.77	2.77
14/15	0.38	0.46	0.52	0.45	1.54	7.06	5.14	2.57	1.82	0.74	0.33	2.38	1.95
15/16	0.49	0.31	0.80	0.38	0.85	3.29	8.21	1.87	0.75	0.28	0.20	0.20	1.47

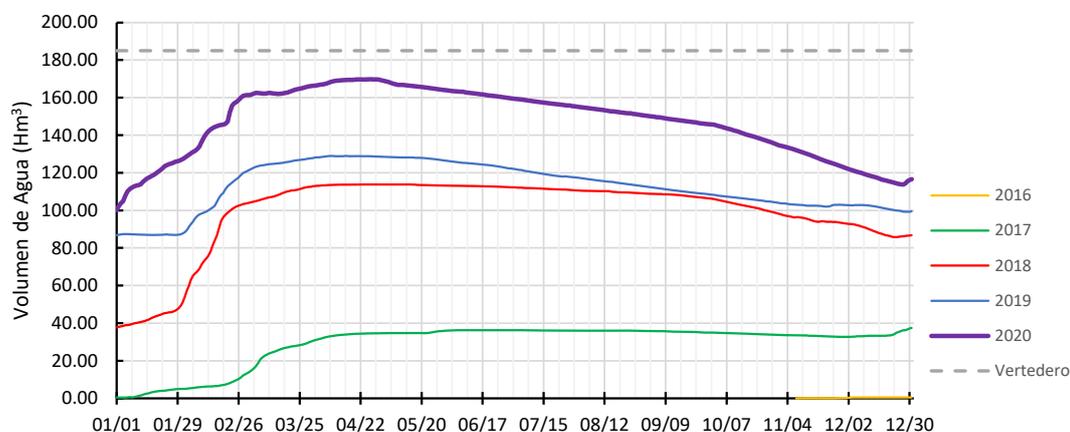


Figura 7. Serie diaria de volumen de agua, embalse Misicuni.

Respecto a la información de caudales mensuales, el estudio de López (2016) menciona que para todo el periodo (1967-2016), el promedio es de 2.82 m³/s, variando entre 0.48 m³/s en estiaje (agosto) a 8.22 m³/s en época de lluvias (enero). La serie reconstruida se denomina “híbrida”, cuya descripción textual menciona que “*incluye las series de caudales observados en el periodo 1989 – 1997 y Observados Reducidos en el periodo 1968 – 1982. En los periodos remanentes, se toman los caudales simulados por el modelo HEC-HMS, corregidos en el periodo de estiaje (Mayo a Diciembre) ...mayorando su valor en 100 l/s*”. El mencionado ajuste se atribuye a una subestimación del modelo hidrológico respecto al flujo base durante las épocas de transición y estiaje. Con base en lo descrito, podemos decir que la serie de caudales empleada en el presente estudio es confiable y corresponde con la precipitación disponible, siendo representativa para la cuenca de estudio.

Si bien los caudales y volúmenes anteriormente mencionados se consideran oficiales por la EM, como parte del pretratamiento de esta información para su uso en Hydro-BID, se realizaron las siguientes actividades (ver análisis en Anexo II):

- *Establecer base de datos para manejo de información.* En un libro Excel se consolida la información disponible, para su tratamiento y exploración.
- *Evaluación de extremos y datos anómalos.* Si bien los datos ya fueron procesados y validados por la EM, se realizó un control estadístico de los datos, y visual comparando con la información de precipitación.
- *Revisión de datos faltantes o duplicados.* Se verifico la inexistencia de datos faltantes o duplicados, garantizando una serie continua.
- *Pretratamiento para Hydro-BID.* Verificados los registros de caudales, se consolidaron en un archivo csv.

3.1.4. Proyección de cambio climático

Para evaluar el cambio climático, la herramienta Hydro-BID requiere que el usuario indique numérica o porcentualmente, el cambio (anomalías) que pueda sufrir la precipitación y/o temperatura a futuro a nivel mensual.

El Banco Mundial ofrece de manera libre, el “Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático” (CCKP, por su sigla en inglés) donde se muestra información relativa a

proyecciones de cambio climático desarrollados específicamente para los países de la región (climateknowledgeportal.worldbank.org). Los datos de proyección climática corresponden al CMIP6 (Coupled Model Inter-comparison Projects, Sexta Fase) que forma parte de la base de datos de los informes de evaluación del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, por su sigla en inglés). Estos datos junto con diferentes escenarios de emisiones conforman los SSP (Caminos Socioeconómicos Compartidos, por su sigla en inglés).

Las proyecciones climáticas corresponden a 4 periodos temporales (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079, 2080-2099), 11 modelos de circulación global, y 5 escenarios SSP (Caminos Socioeconómicos Compartidos, por su sigla en inglés). Estas proyecciones se presentan en escala temporal mensual, trimestral y anual; y tienen una escala espacial (tamaño de píxel) de 100 km x100 km. Considerando que la cuenca de estudio tiene un tamaño de 300 km², y se ubica en una región de alta variabilidad fisiográfica, la resolución de las proyecciones puede generar incertidumbre.

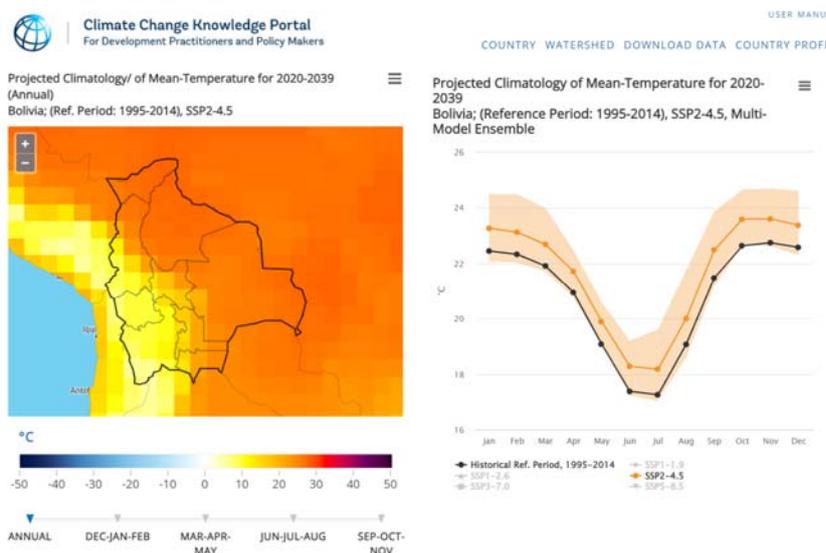


Figura 8. Proyección de temperatura media anual para Bolivia, 2020-2039 (CCKP).

Las anomalías de clima para la zona de estudio se estimaron mediante (Anexo II):

- Extracción de la serie histórica y anomalías de temperatura y precipitación para el píxel representativo de la zona de estudio, empleando el software RStudio para leer los archivos en formato netcdf ofrecidos por el CCKP.
- Comparativa de los valores medios históricos empleados por el CCKP (periodo 1995-2014) con los valores medios de la cuenca.

- Análisis de la variación en la tendencia hidrológica histórica de la cuenca.
- Consolidación de las anomalías mensuales en la zona de estudio, para diferentes periodos de proyección e incertidumbre inherente a los modelos.

Para el presente estudio se emplea el escenario SSP2-4.5, representativo de emisiones futuras medias con una disminución de la concentración futura de CO₂ desde el 2020 al 2100, llegando a la mitad de concentración (IPCC, 2021). El comportamiento de cambio climático en términos de anomalías para la precipitación y temperatura se mencionan en el apartado 3.2.5.

3.2. PRETRATAMIENTO DE INFORMACIÓN PARA HYDRO-BID

Conociendo la información disponible, Hydro-BID requiere para su correcto funcionamiento identificar una estrategia de simulación, y el consecuente pretratamiento de la información disponible, garantizando su compatibilidad con la AHD (base de datos interna), y el algoritmo interno del modelo hidrológico GWLF. A continuación, se describe la metodología empleada en cada etapa.

3.2.1. Identificación de estrategia de modelación hidrológica

La modelación hidrológica esta principalmente limitada por la disponibilidad de datos en la zona de estudio. Por ello, considerando el método de simulación de la herramienta Hydro-BID, información en la AHD, y la disponibilidad de datos de clima, caudales y volúmenes en la cuenca/embalse Misicuni, se planteó una estrategia de modelación que considera primero definir una “línea base” con un modelo hidrológico calibrado y validado para el periodo 2006-2016 empleando toda la información disponible y preprocesada. A partir de ésta, y empleando la información sobre cambio climático se generan las proyecciones de disponibilidad hídrica realizando el análisis respectivo (ver Figura 9).

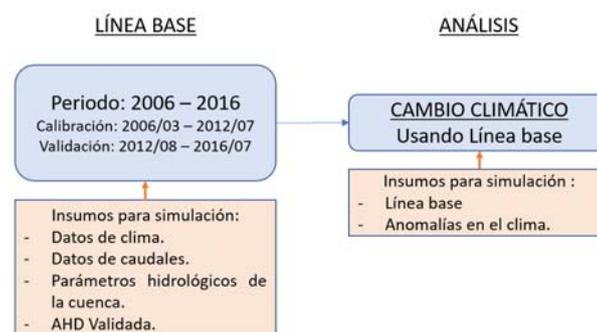


Figura 9. Estrategia de modelación hidrológica para la cuenca Misicuni.

3.2.2. Edición de Base de Datos de Hidrológica Analítica – AHD

Anteriormente se describió la información que ofrece la AHD para el proceso de modelación hidrológica (ver apartado 3.2.1), así como el análisis realizado sobre ésta, para su aplicación en la cuenca Misicuni. Producto de este análisis, se considera necesario editar la AHD garantizando:

- Las 2 subcuencas (Titiri y Serkheta) deben cubrir toda la cuenca de aporte, excepto el área actualmente aprovechada por SEMAPA (ver Figura 5 y 6),
- Corregir la interconexión derivada para los segmentos fluviales.

Para ello, se realizaron los siguientes ajustes en la AHD (ver Anexo IV):

- *Modificar el Área de Cuencas predefinidas en la zona de estudio.* Dentro la tabla “Catchments” se modificó el área de las cuencas Titiri (reduciendo el área aprovechada por SEMAPA) y Serkheta (añadiendo el área de la intercuenca desde la confluencia de estos ríos, hasta el embalse).
- *Modificar la interconexión de las cuencas.* En tabla “catchment_navigation” se definió conexión de Titiri a Serkheta, garantizando la cuenca de estudio.
- *Ajuste de áreas por tipo de suelo.* En la tabla “catchment_nlcd_soils” se modificó el área de los tipos de suelo, garantizando una representación espacial correcta de los usos de suelo predeterminados.

3.2.3. Interpolación de información climática

Hydro-BID dispone de una “Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos” (ver Figura 10) para precipitación y temperatura basado en el método IDW. Al disponer de una red de monitoreo distribuida espacialmente, la aplicación del método IDW se considera aceptable para una adecuada espacialización de la precipitación.

En base a la estrategia de simulación, se configuró su funcionamiento de la siguiente manera:

- Periodo de interpolación abarcando el periodo de línea base (ver Figura 9),
- Información diaria de precipitación y temperatura (consolidado y descrito en el apartado 3.2.2) en formato tabular de archivo “csv”.
- Coordenadas de estaciones y centroides de cuencas que intervienen en la zona de estudio. Los centroides se extraen de la AHD.

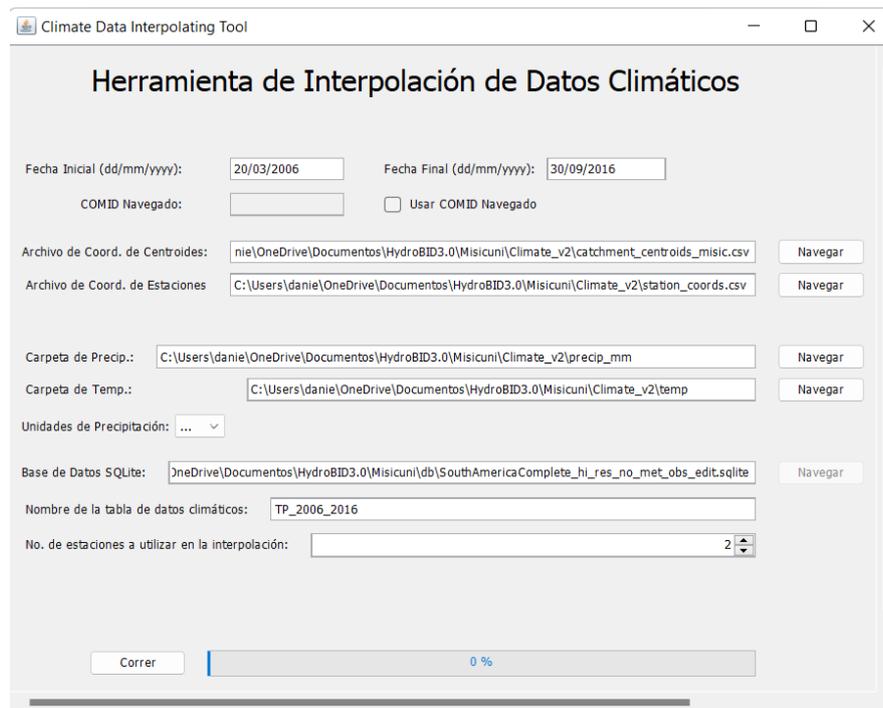


Figura 10. Configuración de “Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos” en Misicuni.

3.2.4. Identificación del Número de Curva de la cuenca.

El número de curva (CN) como parámetro hidrológico del modelo, controla la cantidad inicial de abstracción y es usada para calcular la retención y el consecuente escurrimiento superficial; su valor es determinado usando la clasificación del método, según el tipo y uso de suelo (BID, 2014). De acuerdo a la ecuación del U.S. SCS, a mayor CN (máximo 100 en superficies de infiltración nula) la retención del suelo es menor, por lo cual el escurrimiento es mayor. De estudios previos en la cuenca Misicuni, fue posible identificar un CN de referencia que permita calibrar el modelo hidrológico, reduciendo la incertidumbre. Según Siles (2011), los CN para las cuencas Serkheta y Titiri son aproximadamente 80 y 76 respectivamente. Estos valores indican que la cuenca tiene una respuesta rápida a eventos de precipitación, atribuible principalmente a la topografía de alta montaña.

En el apartado 4.1 se describe la comparación del CN determinado por Siles (2011) con el CN de la AHD para la cuenca de estudio. Esta relación permitirá reducir la incertidumbre del modelo atribuible a este parámetro del modelo hidrológico.

3.2.5. Anomalías en precipitación y temperatura, Cambio Climático

En base a los datos del CCKP (ver apartado 3.2.4), se identificaron las anomalías trimestrales para la temperatura (ajuste) y precipitación (multiplicador) del sistema Misicuni. En la siguiente tabla se observa el resumen de valores proyectados (ver cálculo en Anexo III) para la mediana (percentil 50th) y percentiles 10th y 90th.

Tabla 3. Anomalías de precipitación y temperatura, cuenca Misicuni (En base a datos del CCKP)

PERIODO DE PROYECCIÓN	PERCENTIL	PRECIPITACIÓN (Multiplicador)				TEMPERATURA (Ajuste)			
		DEF	MAM	JJA	SON	DEF	MAM	JJA	SON
2020-2039	10th	0.76	0.77	0.38	0.71	0.06	0.08	0.48	0.43
	50th	0.99	0.96	1.00	0.96	0.76	0.79	0.99	0.82
	90th	1.26	1.64	1.43	1.88	1.31	1.24	1.83	1.41
2040-2059	10th	0.75	0.75	0.35	0.66	0.51	0.51	0.87	0.90
	50th	1.01	0.98	0.89	0.98	1.42	1.45	1.82	1.69
	90th	1.32	1.69	1.64	1.79	2.00	2.08	2.48	2.10
2060-2079	10th	0.75	0.63	0.37	0.66	0.89	0.84	1.32	1.12
	50th	0.98	0.94	0.95	0.95	2.05	1.90	2.49	2.23
	90th	1.25	1.53	1.49	1.83	2.75	2.75	3.02	2.75
2080-2099	10th	0.74	0.70	0.36	0.63	1.16	1.20	1.60	1.42
	50th	0.96	0.95	0.92	0.93	2.44	2.20	2.98	2.66
	90th	1.27	1.63	1.40	1.70	3.27	3.24	3.63	3.18

Los percentiles de cada periodo de proyección representan la incertidumbre inherente al uso de los diferentes modelos de proyección climática; comportamiento considerado en la modelación y análisis del cambio climático (ver apartado 4.4).

3.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO EN HYDRO-BID

Según la estrategia de simulación (ver apartado 3.3.1), se procede a establecer el modelo hidrológico para la “Línea Base”, a partir del cual se realizará el análisis de sensibilidad al cambio climático, y evaluar la posibilidad de simular el embalse Misicuni. El proceso de implementación está basado en las publicaciones del BID: “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2” (2014), “Guía Paso A Paso. Manual de Hydro-BID” (2017), y “Hydro-BID: Nuevas Funcionalidades” (2016).

3.3.1. Calibración y validación de modelo hidrológico – Línea base

Empleando la información pretratada bajo la metodología descrita anteriormente, se realizó la implementación del modelo hidrológico “Línea Base” en Hydro-BID. Para ello, se siguió principalmente 3 etapas:

- *Configuración del modelo.* Se indica el COMID de la subcuenca a la salida

de la zona de estudio, periodo de simulación, lectura de base de datos, lectura de caudales, y dirección de salida de resultados. En la Figura 11 se observa la configuración realizada para la calibración.



Figura 11. Configuración de calibración “línea base” sistema Hydro-BID, cuenca Misicuni.

- *Calibración del modelo.* Se realizó un proceso iterativo ajustando los parámetros hidrológicos que intervienen en el modelo de transformación lluvia-escorrentía, permitiendo ajustar el hidrograma simulado al observado. La calibración de la “línea base” se realizó a paso de tiempo mensual, considerando que el hidrograma disponible es mensual (ver 3.2.3) y que el objetivo del modelo es estimar la oferta hídrica anual. En la Figura 12 se observan los parámetros empleados durante la etapa de calibración.

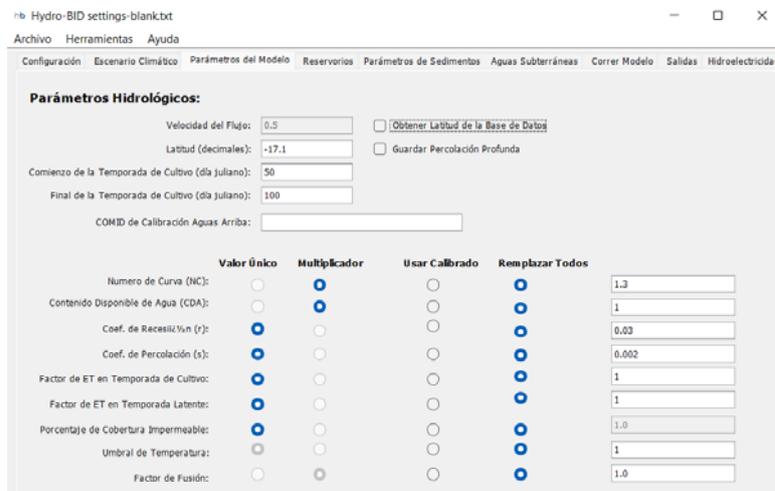


Figura 12. Calibración de parámetros hidrológicos, “línea base” sistema Hydro-BID Misicuni

Como se observa en la figura anterior, Hydro-BID para la calibración del modelo GWLF (ver apartado 4.1), requiere el ajuste de manera iterativa de los parámetros “Número de Curva (NC)”, “Contenido Disponible de Agua (CDA)”, “Coef de Recesión (r)”, “Coef de Percolación (s)”.

Para esto, se ha evaluado la evolución de la calibración y consiguiente mejora en la eficiencia del modelo, disponiendo de los indicadores estadísticos y gráficas generadas por Hydro-BID, que fueron consultados en las etapas de calibración y validación. En el apartado 4.3 se describen los resultados del proceso y su interpretación.

- *Validación del modelo.* La validación consideró incluir el periodo 2012/08 – 2016/07 según lo establecido en la estrategia de simulación. Esta etapa consistió en verificar el comportamiento del modelo calibrado, y realizar ligeros ajustes a los parámetros hidrológicos de ser necesario.



Figura 13. Configuración de validación “línea base” sistema Hydro-BID, cuenca Misicuni.

3.3.2. Simulación del Cambio Climático

Concluida la calibración y validación del modelo hidrológico para la Línea Base, se procede a ingresar las anomalías para la precipitación y temperatura en el módulo de “Escenario Climático” según los valores descritos en el apartado 3.3.5. Este proceso de simulación se realiza para los 4 periodos climáticos proyectados y presentados en el CCKP.

El módulo de “Escenario Climático” es capaz de asimilar anomalías de clima a nivel mensual y anual. Considerando los datos disponibles, el análisis se realiza con anomalías a nivel mensual (ver Figura 14).

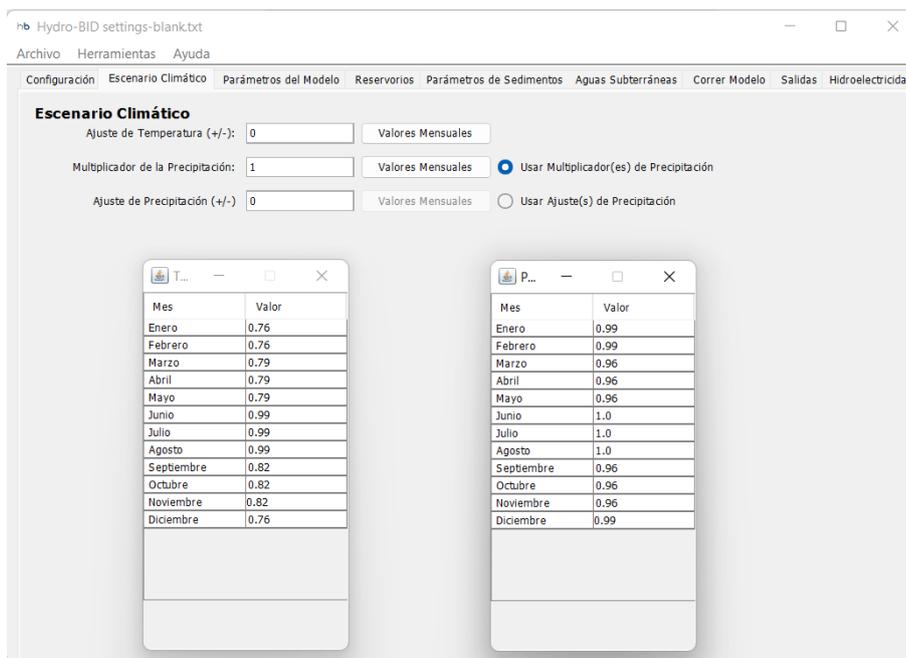


Figura 14. Configuración de anomalías, módulo de “Escenario Climático”, periodo 2020-2039.

Los resultados de la modelación hidrológica para cada escenario climático fueron comparados (ver apartado 4.4) con los resultados de la Línea Base, a objeto de identificar la variación absoluta y porcentual en la esorrentía. Las incertidumbres atribuibles a variabilidad climática histórica de los datos y de los escenarios climáticos, también fueron analizados y comparados, permitiendo generar conclusiones precisas relativas al cambio climático y su influencia en la cuenca.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se describen los principales resultados generados en la aplicación de la metodología y uso de los datos descritos en el apartado anterior. También se realiza la discusión empleando para ello resultados de este y otros estudios.

4.1. HYDRO-BID, Y EDICIÓN DE AHD EN LA ZONA DE ESTUDIO

El funcionamiento numérico de Hydro-BID se basa en las ecuaciones de Función de Carga de Cuenca Generalizada (GWLF, por su sigla en inglés) y Retardo – Enrutamiento de RTI. La Figura 15 muestra el funcionamiento de la GWLF.

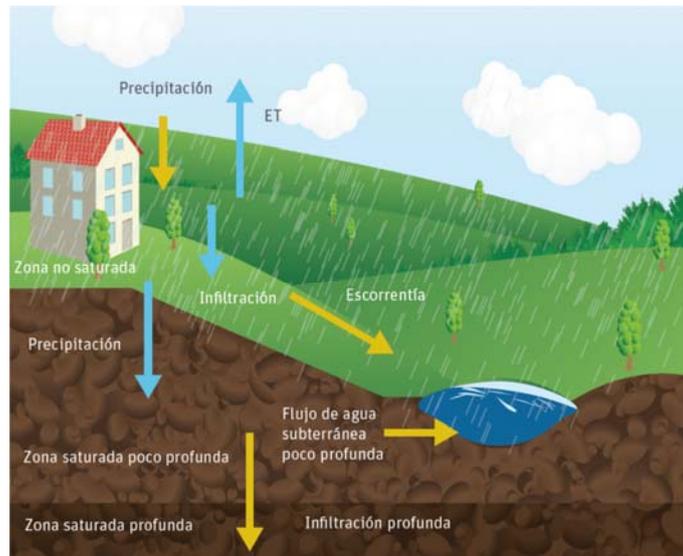


Figura 15. Representación esquemática del modelo de GWLF (modificado de Haith et al., 1996. Fuente: BID, 2014)

Conocer el método permitió identificar los principales parámetros que gobiernan el modelo para transformar lluvia a escorrentía. Se observó:

- La escorrentía superficial está gobernada por el “Número de Curva”,
- El interflujo responde principalmente a la “CDA” y “recesión”,
- El método no considera la representación del “flujo base”.

La AHD dispone de información predefinida en zona de estudio:

- Cuencas predeterminadas con datos de área, pendiente, longitud de río, y contenido de humedad.
- El tipo y uso del suelo en las cuencas mencionando áreas, número de curva, grupo hidrológico, tipo de suelo, entre otros.
- Estructura de interconexión entre cuencas.

Para el correcto funcionamiento del modelo hidrológico en la zona de estudio, se realizó la edición de la AHD según se describe en el apartado 3.2.2. A continuación se resumen las modificaciones (ver Anexo IV) realizadas en la AHD.

Tabla 4. Resumen de modificación realizadas a la AHD.

AHD INICIAL	AHD MODIFICADA	JUSTIFICACIÓN
3 cuencas predefinidas cubren la zona de estudio.	Se editan 2 cuencas predefinidas para cubrir la zona de estudio.	Área inicialmente sobreestimada en un 21%, que se debió ajustar.
En tabla "Catchments". <u>Subcuenca Serkheta</u> (311636300): - Área: 98.519 km ² <u>Subcuenca Titiri</u> (311644900): - Área: 159.836 km ² <u>Subcuenca Misicuni</u> (311636300): - Área: 104.906 km ²	En tabla "Catchments". <u>Subcuenca Serkheta</u> (311636300): - Área: 184.914 km ² <u>Subcuenca Titiri</u> (311644900): - Área: 114.726 km ²	Debido a la sobreestimación de 21% del área total de cuenca.
En tabla "catchments_nlcd_soils". <u>Subcuenca Serkheta</u> (311636300): - Tipo de suelo: Shrubland Área: 78.22 km ² - Tipo de suelo: Grassland Área: 35.93 km ² - Tipo de suelo: Wooded Tundra Área: 4.7 km ² <u>Subcuenca Titiri</u> (311644900): - Tipo de suelo: Shrubland Área: 36.99 km ² - Tipo de suelo: Grassland Área: 123.38 km ²	En tabla "catchments_nlcd_soils". <u>Subcuenca Serkheta</u> (311636300): - Tipo de suelo: Shrubland Área: 113.484 km ² - Tipo de suelo: Grassland Área: 51.33 km ² - Tipo de suelo: Wooded Tundra Área: 20.1 km ² <u>Subcuenca Titiri</u> (311644900): - Tipo de suelo: Shrubland Área: 27.86 km ² - Tipo de suelo: Grassland Área: 86.866 km ²	Para incrementar las áreas de suelo en la subcuenca Serkheta, se empleó de referencia imágenes satelitales y la relación de áreas por tipo de suelo en la subcuenca Misicuni. Para reducir las áreas de suelo en la subcuenca Titiri, se empleó de referencia imágenes satelitales y la relación de áreas por tipo de suelo en la subcuenca Titiri.
En tabla "catchments_navigation". - Subcuencas Titiri y Serkheta, drenan a Misicuni.	En tabla "catchments_navigation". Subcuenca Titiri (311644900) dreña a Serkheta (311636300).	Garantiza que el escurrimiento total corresponda a las dos subcuencas identificadas para zona de estudio.

La AHD brinda información valiosa para un estudio hidrológico, sin embargo, para modelar cuencas pequeñas y dependiendo de la ubicación de la estación de caudales, editar la AHD permitió reducir la incertidumbre inherente a la superficie mejorando así el ajuste durante el proceso de calibración y validación.

Como parte de los parámetros de calibración, disponer de números de curva predefinidos en la AHD resulta favorable al momento de modelar. En la AHD, se observó que este parámetro tiene un valor promedio de 65 en la zona de estudio atribuible a un suelo con escurrimiento y retención moderada. Comparando éste con los resultados de Siles (2011), cuyos CN aproximado (ver apartado 3.3.4) para las cuencas Serkheta y Titiri son 80 y 76 respectivamente; es decir, el NC definido en la AHD estaría "subestimando" la esorrentía. Comparando estos valores, el NC de la AHD debe ser ajustado por un factor aproximado de **1.3**, durante la calibración.

4.2. INFORMACIÓN BASE CONSOLIDADA

4.2.1. Precipitación y temperatura en cuenca Misicuni.

Como se muestra en la Figura 6, las 5 estaciones (Sivingani, Templo, Sunjani, Cuatro Esquinas y Aguadas) se encuentran distribuidas dentro la cuenca Misicuni.

Respecto a la información de precipitación consolidada por la EM para el periodo 2006-2016, se calcula una precipitación media anual entre 720 mm en la cuenca media y baja (Sivingani, Aguadas, Sunjani), a 750 mm en la cuenca media/alta (4 esquinas, Templo). Este comportamiento muestra un gradiente ascendente en la precipitación coincidente con el gradiente topográfico, indicando que probablemente en la cuenca alta la precipitación sea próxima a 800 mm/año.

El comportamiento promedio mensual muestra que entre diciembre a febrero (DEF) se registran los mayores eventos de lluvia, y los meses mayo a agosto (MJJA) constituyen el periodo de estiaje, catalogándose así a los meses restantes como periodo de transición. Este comportamiento coincide con el criterio generalizado en Bolivia por el SENAMHI, que identifica a los meses diciembre a marzo como temporada de lluvias, y los meses mayo a agosto como temporada de estiaje.

De manera estacional, en temporada de lluvias se registra aproximadamente el 58% de la precipitación anual, 38% durante la época de transición, y el 4% durante la época de estiaje. Esto último indica la presencia de caudales extremos en temporada de lluvias (DEF), presencia de recesión y escurrimiento continuo de menor magnitud durante el periodo de transición, con caudales mínimos durante los meses de mayo a agosto.

Para visualizar esta tendencia estacional, la Figura 16 muestra la precipitación agregada trimestral de las 5 estaciones, cuyo comportamiento es similar a lo largo de la cuenca. Se observa que durante la temporada de lluvias (DEF) se registran el mayor porcentaje (350 – 600 mm acumulados) de la precipitación anual.

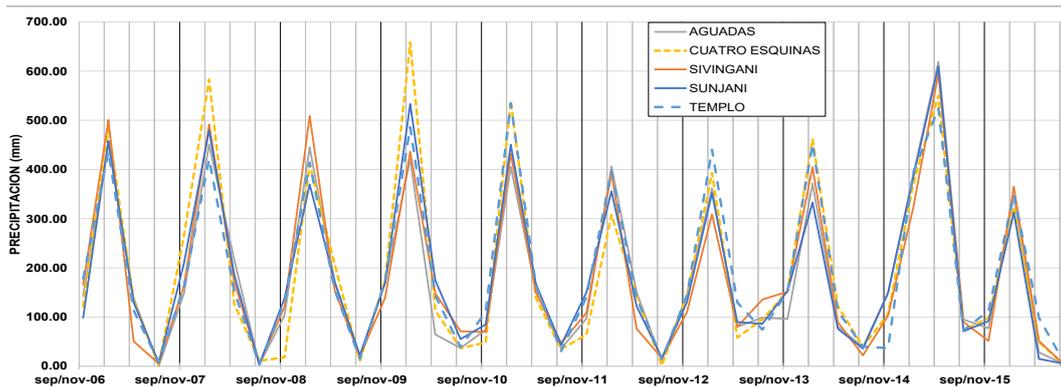


Figura 16. Serie trimestral de precipitación en cuenca Misicuni (Elaborado con datos de EM).

Sobre el comportamiento espacial de la precipitación (ver Anexo II), para el periodo 2006-2016, en promedio las estaciones “Cuatro Esquinas” (subcuenca Titiri) y “Templo” (subcuenca Serkheta) ubicadas en la parte alta presentan mayor precipitación media (750 mm/año) y la estación Aguadas ubicada en parte baja de la cuenca, registra la menor precipitación media (700 mm/año). Esta baja diferencia muestra que la precipitación anual es relativamente homogénea en la cuenca.

Respecto a eventos extremos, el año hidrológico 2009/2010 es año húmedo (20% sobre la media), y 2015/2016 (bajo efecto del ENSO) es un año seco (35% bajo la media). Si bien se dispone solo de 10 años de registros, este evento de sequía perturba la media anual de la precipitación en 3% para ese periodo. Lo mencionado, muestra que la cuenca presenta una marcada variabilidad climática normal.

Respecto a la información de precipitación sin consolidar (por la EM), para las gestiones 2017 a 2019, se realizó el análisis de disponibilidad de datos en las 5 estaciones principales (ver Tabla 5).

Tabla 5. Disponibilidad de datos diarios de precipitación en cuenca Misicuni.

ESTACION PLUVIOMETRICA	2017												2018												2019			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
AGUADAS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CUATRO ESQUINAS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
SIVINGANI	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
SUNJANI	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
TEMPLO	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ Mes con datos diarios completos
 ■ Mes en que falta 1 o más datos diarios de precipitación
 ■ Mes en que falta 21 o más datos diarios de precipitación

En la tabla anterior se observa una ausencia general de datos en el periodo abril a agosto del 2017. Considerando que el sistema Hydro-BID requiere inicialmente un año de datos para “calentamiento”, la ausencia de datos mencionada anteriormente

representa una limitante para el análisis hidrológico a partir de la gestión 2017, requiriéndose un estudio específico para reconstrucción de las precipitaciones. Esto último junto con la ausencia de datos de “caudal” y “demandas” del embalse Misicuni, constituyen un impedimento para la aplicación del “módulo de embalses”.

Respecto al parámetro de temperatura, se dispone únicamente de datos en la estación Sivingani, cuya representación temporal se muestra en la siguiente figura.

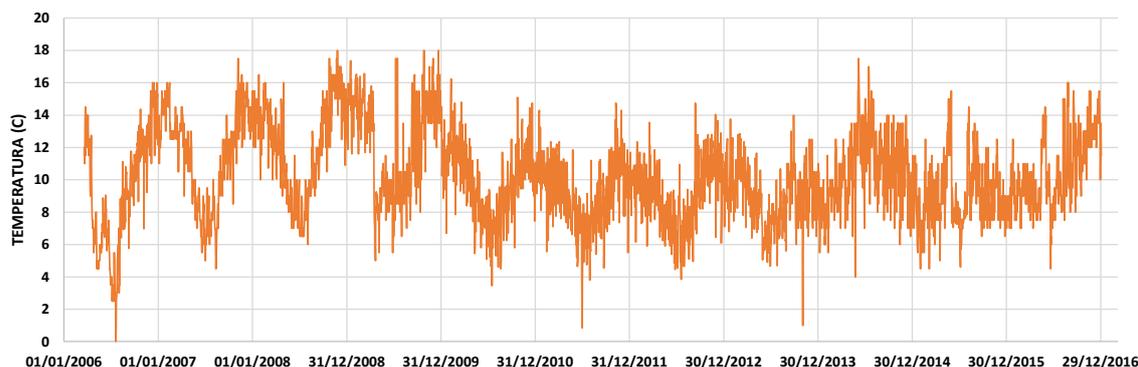


Figura 17. Serie diaria de temperatura en estación Sivingani (Elaborado con datos de EM)

Se observa que la temperatura media diaria, oscila mayormente entre 15 a 5 grados centígrados, con un promedio aproximado a 9 °C. Según López (2016) la temperatura media de la cuenca es de 8 °C, coincidiendo con los datos a los cuales se tuvo acceso para el presente estudio. Siendo Sivingani la única estación con información de temperatura, y considerando que toda la cuenca se encuentra en una ecorregión similar, se deberá asumir estas temperaturas como representativas de toda la cuenca. Considerando que la estación está en la zona baja y que la temperatura en la zona alta es menor; asumir a Sivingani como representativa genera incertidumbre y ligera sobreestimación de la ETP en la parte media y alta, ocasionando una ligera subestimación de la escorrentía en este sector, lo cual deberá considerarse al momento de calibrar y analizar el modelo hidrológico.

La información de precipitación y temperatura consolidada fue pretratada y consolidada en archivo “csv”, para ser adecuadamente asimilada por Hydro-BID. Del proceso de interpolación de datos empleando la “Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos” (ver apartado 3.3.3), se generó en la BBDD una tabla (Figura 18) con información de clima para cada subcuenca de la AHD que incide en la zona de estudio. Esto garantiza una correcta alimentación al modelo con datos de clima.

DB Browser for SQLite - C:\Users\danie\OneDrive\Documents\HydroBID3.0\Misicuni\db\SouthA

Archivo Editar Ver Ayuda

Nueva base de datos Abrir base de datos Guardar cambios Deshacer cambios

Estructura de la Base de datos Navegar Datos Editar Pragmas Ejecutar SQL

Tabla: **Clima_2006_2016** Nuevo registro Borrar registro

	comid	measured_date	avg_temp	avg_precip
	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro
1	311636300	20060320	11.5	0.411
2	311636300	20060321	12.0	1.4248
3	311636300	20060322	11.0	0.274
4	311636300	20060323	13.0	0.0
5	311636300	20060324	14.0	1.3426

Figura 18. Tabla de precipitación y temperatura en la AHD para la zona de estudio.

4.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

En base a la metodología y criterios mencionados en el apartado 3.4.1, en la Figura 19 se muestra los parámetros de la primera iteración para la calibración hidrológica y los resultados generados por Hydro-BID.

Para determinar la calidad de ajuste entre los caudales observados y simulados, Hydro-BID dispone de 4 principales valores estadísticos de referencia (BID, 2017):

- Error de volumen general (ove%). Valor óptimo cercano a 0.
- Coeficiente de correlación (r). Valor óptimo cercano a 1.
- Coeficiente de correlación modificada (Rmod). Valor óptimo cercano a 1.
- Índice de eficiencia de Nash-sutcliffe, R^2 . Valor óptimo cercano a 1.

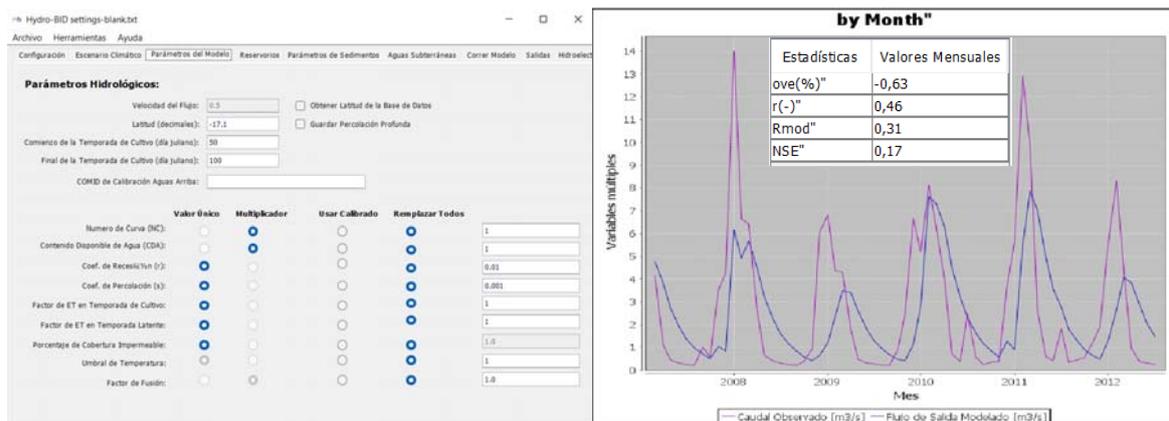


Figura 19. Resultados de 1ra iteración, calibración cuenca Misicuni.

En la figura anterior, se observa que, en base a los parámetros definidos en la AHD y los datos de clima y caudales, el modelo muestra una subestimación de los caudales mensuales, y el proceso de recesión es más lento comparado con la serie

de caudales observados. Los indicadores estadísticos muestran el ajuste deficiente del modelo, pero sorprende la baja subestimación del volumen en 0.63%. Esta subestimación volumétrica coincide con la hipótesis planteada al comparar (ver apartado 4.1) los CN de la AHD y Siles (2011). Por lo expuesto, la calibración deberá considerar (entre otros ajustes) incrementar el “Coeficiente de Recesión (r)”, y para el “Número de Curva” emplear un multiplicador próximo a 1.3.

Producto del proceso iterativo de calibración, en la siguiente figura se muestran los parámetros usados para calibración del modelo para la cuenca Misicuni.

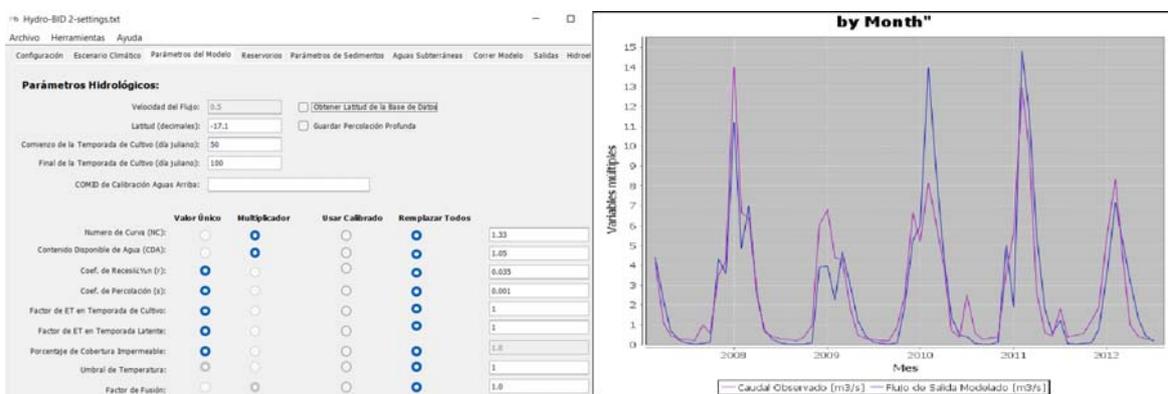


Figura 20. Resultados de calibración, cuenca Misicuni.

Visualmente (ver figura anterior) se puede observar que el hidrograma modelado guarda una marcada similitud con el hidrograma observado (excepto en gestiones 2009 y 2010). Se debe aclarar que como el modelo no es capaz de representar el flujo base para la época de estiaje, se buscó sobreestimar ligeramente el escurrimiento en temporada de lluvias, bajo la premisa que el objeto de estudio prioriza el volumen de escurrimiento y no así los caudales.

La Figura 21 muestra los indicadores estadísticos de la calibración. Considerando que los caudales observados son mensuales, no se considera el ajuste estadístico de “valor diario” en el análisis. Los coeficiente estadísticos (“r(-)”, NSE y Rmod) indican que el modelo hidrológico reproduce de manera aceptable los procesos físicos de transformación de la lluvia en escorrentía para paso de tiempo mensual. Así también, considerando que el objeto del estudio es estimar la oferta hídrica, el “error de volumen general (ove (%))” muestra una baja subestimación en 0.33%;

por otro lado, el impacto de la sobreestimación del flujo en la gestión 2010 ha sido compensada por la subestimación en el 2009.

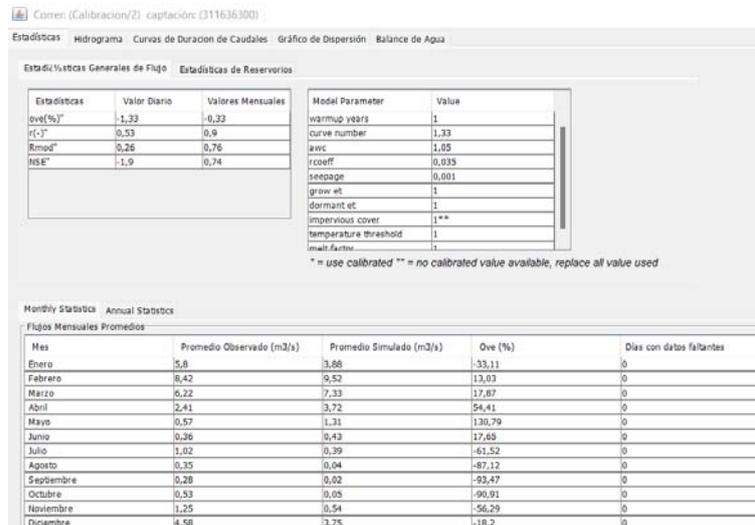


Figura 21. Parámetros estadísticos de calibración generados por Hydro-BID.

Para el proceso de validación del modelo, se extendió el periodo de simulación cuyos resultados se muestran en la Figura 22.

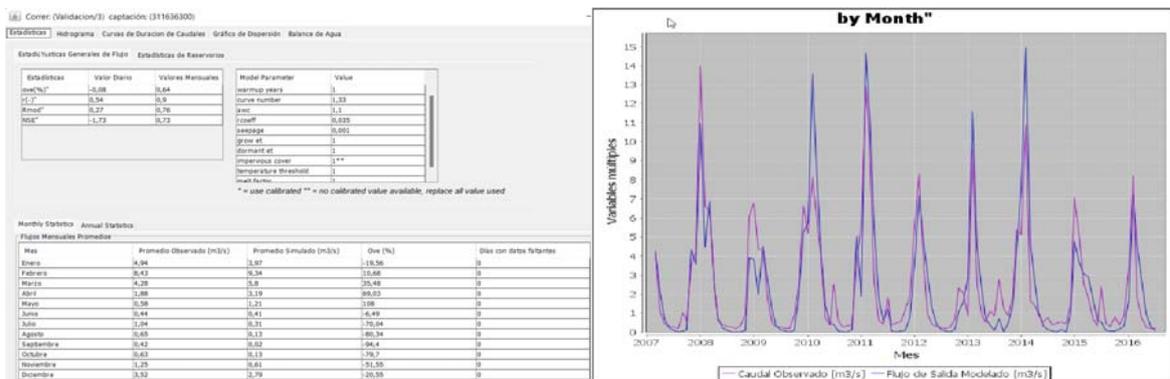


Figura 22. Resultados de validación del modelo hidrológico, cuenca Misicuni.

El comportamiento del hidrograma modelado continúa representando de manera aceptable al hidrograma observado, esto también se evidencia en los indicadores estadísticos que prácticamente no han variado. Respecto al volumen de flujo, el indicador estadístico “error de volumen general (ove (%))” ha variado de “-0.33%” (calibración) a “0.64” (validación), manteniendo un ajuste aceptable.

En base a los resultados obtenidos para la calibración y validación, y comparando con otros estudios, se puede destacar los siguientes:

- La información predefinida en la AHD, induce que el modelo subestime los caudales medios mensuales y genera una respuesta tardía de la cuenca a eventos de lluvia, aspecto gobernado por el NC. Sin embargo, la subestimación volumétrica es muy baja “-0.63%”, resaltando que un modelo mal calibrado puede presentar algunos indicadores estadísticos favorables.
- El modelo hidrológico generado reproduce de la manera aceptable el comportamiento del hidrograma observado de la EM. Esta representativa se fundamenta en los indicadores estadísticos del modelo (“NSE” = 0.73, “r” = 0.9, “Rmod” = 0.76, y “ove%” = 0.64), y en el ajuste visual de la serie.
- Del proceso de calibración y validación se observó un cambio en el “error de volumen general (ove (%))” de -0.33% (calibración) a 0.64% (validación), siendo este un indicador de la incertidumbre del modelo, para el análisis de cambio climático.
- El modelo hidrológico subestima (entre 100 a 300 l/s) los caudales base durante la temporada de estiaje (mayo a septiembre) y sobre estima ligeramente los caudales pico durante la temporada de lluvias. Al respecto, el modelo GWLF empleado por Hydro-BID (ver Figura 15) no considera al flujo base como parte de sus procesos, ya que determina la recesión de manera lineal empleando el almacenamiento en la zona Saturada poco profunda, y no toma en cuenta la recesión (significativa en esta cuenca) de la zona Saturada profunda (BID, 2015). Por lo expuesto, la calibración buscó representar con la sobreestimación observada en temporada de lluvias, al porcentaje de flujo que debería infiltrarse y transformarse luego en el flujo base de la cuenca.
- Esta subestimación de los caudales base también puede observarse en el Caso de estudio de Hydro-BID en la cuenca del Río Grande en Argentina (BID, 2014) cuyo caudal base (ver Figura 7-1 del estudio) por efecto de la zona saturada no se representa adecuadamente. De la misma manera, en

el caso de estudio N° 6 de Hydro-BID (2017), en el proceso de calibración y validación se observa este comportamiento del flujo base cuya recesión es mucho más rápida que el caudal observado.

- Cabe mencionar que los caudales observados empleados en el sistema Hydro-BID, fueron reconstruidos en el estudio de López (2016) empleando el software HEC-HMS cuyo modelo numérico tiene la capacidad de considerar el flujo base. Adicionalmente, López (2016) menciona textualmente “se observa que los caudales mínimos son del orden de 100 l/s, llegando en algunos periodos cortos del estiaje incluso a valores de 0. Esto contrasta con las mediciones de los caudales”, y luego continua “para corregir esta situación, los caudales simulados generados por el HEC-HMS entre los meses de Mayo a Diciembre para el periodo 1967 – 2016, han sido mayorados con 100 l/s”. Esto respalda la existencia del caudal base en la serie observada y la diferencia de magnitudes con el modelo desarrollado.
- En la Figura 22 se observa que durante la temporada de lluvias en las gestiones 2009/2010 y 2010/2011 existe subestimación y sobreestimación de caudales respectivamente. Considerando que el resto de la serie guarda una aceptable representación del modelo, es posible que el error se atribuya a los registros de precipitación entregados por la EM.

4.4. VARIACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EN LA CUENCA MISICUNI POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En base al modelo hidrológico calibrado y validado para la cuenca Misicuni, se ha estimado la afectación del cambio climático sobre la oferta hídrica de la cuenca Misicuni. Para ello, se emplearon los periodos de proyección y las anomalías de precipitación y temperatura descritas en el apartado 3.3.5 y Anexo III.

Para brindar un punto de comparación, en la siguiente tabla se resume los resultados del modelo hidrológico relativos a la oferta hídrica del embalse Misicuni para la Línea Base (2006 – 2016). El volumen de escorrentía promedio que llega al embalse Misicuni (excepto 2006 y 2016, por ser años con menos meses de datos) es aproximadamente 70.29 Hm³ al año, con un coeficiente de escurrimiento promedio estimado de 0.172, aceptable para el tipo de cuenca.

Tabla 6. Oferta hídrica simulada al embalse Misicuni, Línea Base 2006 – 2016.

GESTIÓN	PRECIPITACIÓN (mm)	ESCORRENTÍA (mm)	ESCORRENTÍA (m³)	COEF. ESC.
2007	760.16	143.46	75 977 459.6	0.189
2008	737.43	167.78	83 066 358.8	0.228
2009	792.25	127.37	62 353 357.3	0.161
2010	809.95	178.01	107 516 072.0	0.219
2011	722.25	133.43	99 777 051.0	0.185
2012	716.40	97.52	63 250 868.5	0.137
2013	762.43	114.29	77 085 620.7	0.149
2014	605.29	108.29	82 979 546.9	0.179
2015	676.03	70.09	50 843 720.4	0.104

Producto de aplicar las anomalías en la precipitación y temperatura por efecto del cambio climático, se han generado las siguientes escorrentías para cada periodo de proyección climática ofrecido por el CCKP.

Tabla 7. Comparativa de oferta hídrica de la cuenca Misicuni, aplicando proyecciones de cambio climático al sistema Hydro-BID.

GESTIÓN	ESCORRENTÍA (m³) PARA ESCENARIOS CLIMÁTICOS				
	Línea Base	2020 – 2039	2040 – 2059	2060 – 2079	2080 – 2099
2007	75 977 459.6	65 686 105.1	63 725 461.6	57 094 207.8	53 432 604.9
2008	83 066 358.8	72 947 715.2	71 657 909.6	65 682 279.2	62 192 079.1
2009	62 353 357.3	52 013 496.7	50 047 951.7	44 337 015.0	41 514 442.3
2010	107 516 072.0	96 488 298.2	94 852 066.1	87 442 087.0	83 110 165.8
2011	99 777 051.0	87 830 796.9	86 934 863.9	80 949 811.0	77 484 461.0
2012	63 250 868.5	52 985 812.7	51 724 719.2	45 799 776.9	42 329 471.5
2013	77 085 620.7	62 722 345.7	59 723 226.9	53 168 600.1	50 175 844.6
2014	82 979 546.9	71 733 349.6	67 457 832.5	58 379 890.2	52 853 588.3
2015	50 843 720.4	43 140 748.2	41 806 169.8	36 473 486.7	33 522 226.6

Comparando las escorrentías proyectadas con la escorrentía actual simulada, se ha estimado el porcentaje promedio de variación del volumen de escurrimiento para cada escenario de proyección climática.

Tabla 8. Estimación de variación % en la oferta hídrica de la cuenca Misicuni, aplicando proyecciones de cambio climático.

	ESCENARIOS CLIMÁTICOS			
	2020 – 2039	2040 – 2059	2060 – 2079	2080 – 2099
VARIACIÓN TOTAL (%)	-14.23%	-16.83%	-25.42%	-30.18%
POR ETP (%)	-6.38%	-12.40%	-15.49	-17.60%

Considerando las anomalías en la precipitación anual proyectada que disminuye desde 2.2% (2020-2039) a 5.2% (2080-2099), y la temperatura media anual se incrementará en 0.8 °C (2020-2039) a 2.6 °C (2080-2099), en la tabla anterior se observa una disminución aproximada de la escorrentía en 14% para el periodo 2020-2039, y 30% para el periodo 2080-2099. Respecto a la incertidumbre de los datos (ver Anexo III), se observa que la temperatura presenta marcada tendencia ascendente, sin embargo las precipitaciones además de la gran incertidumbre, no muestran una tendencia definida que indique un descenso real en la cuenca.

Comparando esta proyección con el análisis realizado al comportamiento hidrológico histórico de la cuenca (ver Anexo III), se sabe que la variación en los caudales históricos tiene una desviación estándar de $\pm 30\%$ del caudal medio, con una tendencia actual a descender. Otro aspecto importante para mencionar es que el periodo de referencia del CCKP (1995-2014), corresponde a un periodo ligeramente húmedo respecto a la media histórica, permitiendo suponer que, ante un posible descenso de la oferta hídrica, ésta podría ser asimilada por el sistema Misicuni considerando que el caudal medio histórico es ligeramente inferior al caudal medio de referencia en la proyección climática.

5. CONCLUSIONES

- Se cuenta con una extensa información de precipitación y caudales oficiales que han sido compartidos (para el periodo 2006 a 2019) por la Empresa Misicuni. Del estudio se observa de manera general, que la información de clima y caudales proporcionada se encuentra validada y procesada. Sin embargo, existen inconsistencias (respecto a los flujos observados) en las precipitaciones de las temporadas de lluvias 2009/2010 y 2010/2011. Por otro lado, las temperaturas en la estación Sivingani desde la gestión 2014, muestran un comportamiento diferente a la tendencia estacional.
- Se dispone de una AHD modificada para la cuenca Misicuni que ha contribuido de manera adecuada a la modelación hidrológica. Ante la disponibilidad de estudios más extensos sobre el tipo y uso de suelos en la cuenca Misicuni, es posible reeditar la AHD mejorando su precisión, principalmente si se desea iniciar a simular el caudal base.
- Se ha generado satisfactoriamente un modelo hidrológico en Hydro-BID en la cuenca Misicuni, para el periodo 2006 a 2016. Considerando el objeto del estudio, el error entre la oferta hídrica simulada y observada (representado por el parámetro "error de volumen general") es del $\pm 0.64\%$, indicando una adecuada representación. Esto se respalda en parámetros estadísticos aceptables inherentes al modelo, $NSE = 0.73$, y correlación " r " = 0.9.
- El modelo hidrológico muestra que existen inconsistencias entre los datos de precipitación y caudales, durante las temporadas de lluvias 2009/2010 y 2010/2011. Considerando que tanto la información de precipitación, como de

caudales ha sido tratada, procesada y en algunos casos reconstruida, se debe verificar el origen de esta inconsistencia a partir de los datos originales.

- El modelo hidrológico en Hydro-BID para la cuenca Misicuni, no tiene la capacidad de representar adecuadamente el “caudal base”, mostrándose una generalizada subestimación de este valor, coincidente con otros estudios mencionados en el análisis. Por ello, el presente estudio ha considerado un excedente en los caudales durante la temporada de lluvias, para compensar el volumen que debería recarga la zona saturada del suelo, y alimentar al río durante la temporada de estiaje como caudal base.
- Para el objeto de estudio el sistema Hydro-BID fue capaz de representar estadísticamente bien los procesos hidrológicos y determinar el volumen que escurre en la cuenca Misicuni de manera anual. Sin embargo, observada la importancia del caudal base en el comportamiento hidrológico mensual de esta cuenca (como otras existentes en Bolivia), para temas de gestión (por ejemplo, de embalses) es recomendable analizar la actualización del Sistema Hydro-BID para incluir este proceso en el modelo.
- A partir de los datos proporcionados por el CCKP para la zona de estudio, se ha estimado que la precipitación anual proyectada podría disminuir en promedio entre 2.2% (2020-2039) a 5.2% (2080-2099), y la temperatura media anual se podría incrementar en 0.8 °C (2020-2039) a 2.6 °C (2080-2099). Analizando la incertidumbre de estos parámetros, se observa que la anomalía en la precipitación no es concluyente, sin embargo, la temperatura si muestra una marcada tendencia a ascender.
- Con respecto al periodo 1995-2014 (referencia del CCKP) y la variación climática mencionada, se podría ocasionar una reducción media en la escorrentía entre 14% para el periodo 2020-2039, y 30% para el periodo 2080-2099. Es decir, considerando que la cuenca Misicuni genera en promedio 70.3 Hm³, en el periodo 2020-2039 podría reducir a 60.2 Hm³, y para el periodo 2080-2099 reducir a 49 Hm³; de los cuales 6.4 y 16.6 Hm³ corresponden a incremento en evapotranspiración (efecto de temperatura).
- Se aclara que las proyecciones climáticas conllevan una elevada incertidumbre, relacionadas a la naturaleza del método (SSP y MCG). Pero dada la disponibilidad de datos e importancia de este análisis, se deben realizar estudios específicos para generar proyecciones climáticas representativas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- CEPAL (2014). La economía del cambio climático en el Estado Plurinacional de Bolivia. 17.
- Empresa Misicuni (2009). Estudio de evaluación de impacto ambiental. Proyecto Misicuni Fase I. 25-34.
- IPCC (2001). Cambio climático 2001: Informe de síntesis. 7.
- López, P. (2016). Diseño Del Modelo De Operación Inicial Del Embalse Misicuni". Empresa Misicuni.
- Mapplecroft (2014). Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe. Corporación Andina de Fomento (CAF). 99, 105, 122, 123.
- MMAyA (2013). Plan Maestro Metropolitano de Agua Potable y Saneamiento del Área Metropolitana de Cochabamba, Bolivia. Demandas futuras y estrategias de expansión. VIII.
- Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Castillo, R. M. (2014). Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Moreda, F. Lord, B. Nalesso, M., Coli, P. Corrales, J. (2016). Hydro-BID: Nuevas Funcionalidades (Módulos de Simulación de Embalses, Transporte de Sedimentos y de Aguas Subterráneas). Banco Interamericano de Desarrollo.
- Moreda, F. Serago, J. Ecurra, J. Brantly, E. Coli, P. (2017). Hydro-BID case study N° 5: Impacto f climate change on proposed water investments in Chalpi Basin, Ecuador. Banco Interamericano de Desarrollo. 23-32.
- Nalesso, M., Coli, P. (2017). Guía paso a paso. Manual de Hydro-BID. Banco Interamericano de Desarrollo.
- OCHA (2016). Sequía azota a seis municipios de Cochabamba. <Accesible en URL: <https://reliefweb.int/report/bolivia-plurinational-state/sequ-azota-seis-municipios-de-cochabamba>>
- OMM (2011). Guía de prácticas hidrológicas Volumen II. Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas. OMM-N° 168. II.4-21-22.
- Peredo, N. (22 de julio de 2016). Cochabamba sufre la peor sequía en 20 años. Periódico Los Tiempos. <https://www.lostiempos.com>.
- Rineer, J., Bruhn, M., Miralles-Wilhelm, F., & Castillo, R. M. (2014). Base de Datos

- de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe. Parte 1. Banco Interamericano de Desarrollo.
- SDC, DGIA (2014). Plan director de la cuenca del río Rocha “Estado de situación y propuesta de lineamientos estratégicos”. La Paz-Bolivia: Impresiones Quality SRL. 22.
- Siles, C. (2011). Optimización del diseño hidráulico – estructural de la ataguía aguas arriba de la presa Misicuni. Universidad Mayor de San Simón. 100 – 109.
- Vuille, M. (2013). El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes tropicales. Banco Interamericano de Desarrollo, 21.
- Wyatt, A. Moreda, F., Brantly, E. Miralles-Wilhelm, F., & Castillo, R. M. (2014). Caso de estudio de Hydro-BID N°1: Modelo de gestión del recurso hídrico en la cuenca del Río Grande en Argentina. Banco Interamericano de Desarrollo. 69-72.

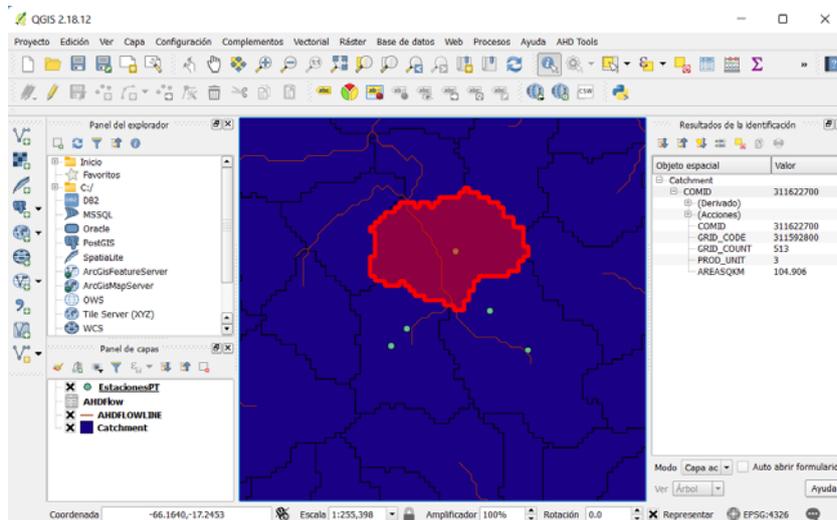
7. ANEXOS

ANEXO I. EXPLORACIÓN A LA AHD PARA LA CUENCA MISICUNI.

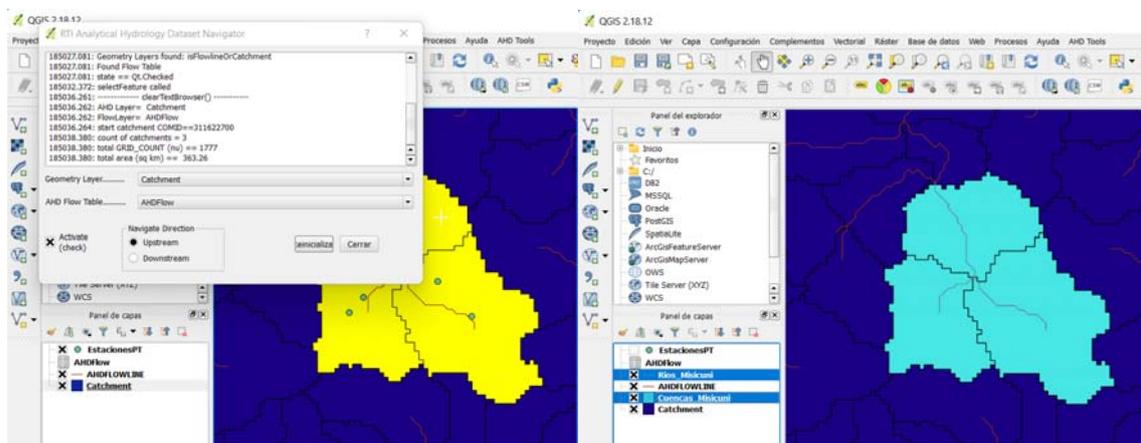
Tomando como referencia las publicaciones del BID: “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2” (2014) y “Guía Paso A Paso. Manual de Hydro-BID” (2017), se han realizado las siguientes actividades principales para explorar la AHD.

a) Identificación de la zona de estudio en la AHD.

Empleando el software sobre Sistemas de Información Geográfica (QGIS), y los archivos espaciales desarrollados por el BID para la AHD, se visualizaron las cuencas en la zona de estudio, identificándose a la subcuenca con COMID 311622700 en la salida de la cuenca Misicuni.



b) Con ayuda de la herramienta “RIT Analytical Hydrology Dataset Navigator” en QGIS, se extraen las cuenca y ríos para la zona de estudio.



c) Exploración de la Base de datos para LAC.

Identificar las subcuencas en la zona de estudio, permitió analizar la información hidrológica que dispone la AHD para estas subcuencas. Los COMID para las subcuencas de la zona de estudio son: 311636300 (Serkheta), 311644900 (Titiri) y 311622700 (Misicuni).

Con estos COMID, es posible navegar en la BBDD de la AHD cuyas principales tablas para el objeto y zona de estudio son: “Land_use_type_CN”, “catchments”, “catchment_navigation”, “catchment_nlcd_soils”.

La tabla “catchments” muestra los parámetros geométricos y el parámetro de “Capacidad de agua disponible del suelo (AWC)”. De esta tabla se extrajo siguiente información:

Nombre	COMID	Área total (km ²)	AWC_cm	Longitud río (km)
Serkheta	311636300	98.519	14.8613	6.1697
Titiri	311644900	159.836	15	10.4337
Misicuni	311622700	104.906	15	11.5623

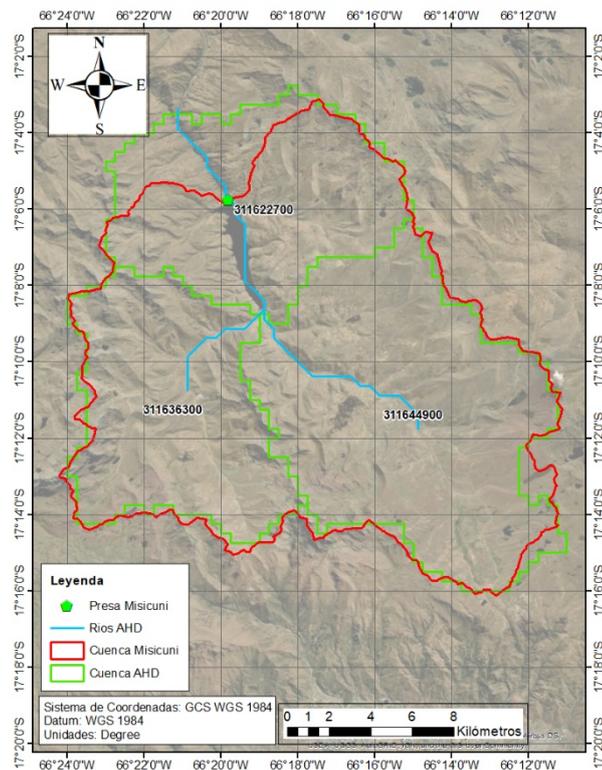
La tabla “catchment_navigation” indica la interrelación de cuencas, es decir la dirección de drenaje entre cuencas, determinando que las cuencas Serkheta y Titiri drenan a la cuenca Misicuni.

La tabla “Land_use_type_CN” muestra de manera general los diferentes tipos de suelo que maneja Hydro-BID, y su consecuentes Número de Curva, codificación, nombre, grupo hidrológicos, etc.

De manera más específica, la tabla “catchment_nlcd_soils” presenta para cada subcuenca de la AHD, los tipos de suelo que la componen, áreas, número de curva, grupo hidrológico, entre otros. Para la zona de estudio se extrae lo siguiente:

Nombre	Suelo ID	Nombre Suelo	Área (m ²)	Número de Curva	Grupo Hidrológico
Serkheta	7	Grassland	35930963.062	70	B
	8	Shrubland	58217608.282	57	B
	21	Wooded Tundra	4696102.188	57	B
Titiri	7	Grassland	123375278.407	70	B
	8	Shrubland	36989166.789	57	B
Misicuni	7	Grassland	54813784.399	70	B
	8	Shrubland	32913346.130	57	B
	21	Wooded Tundra	17526589.211	57	B

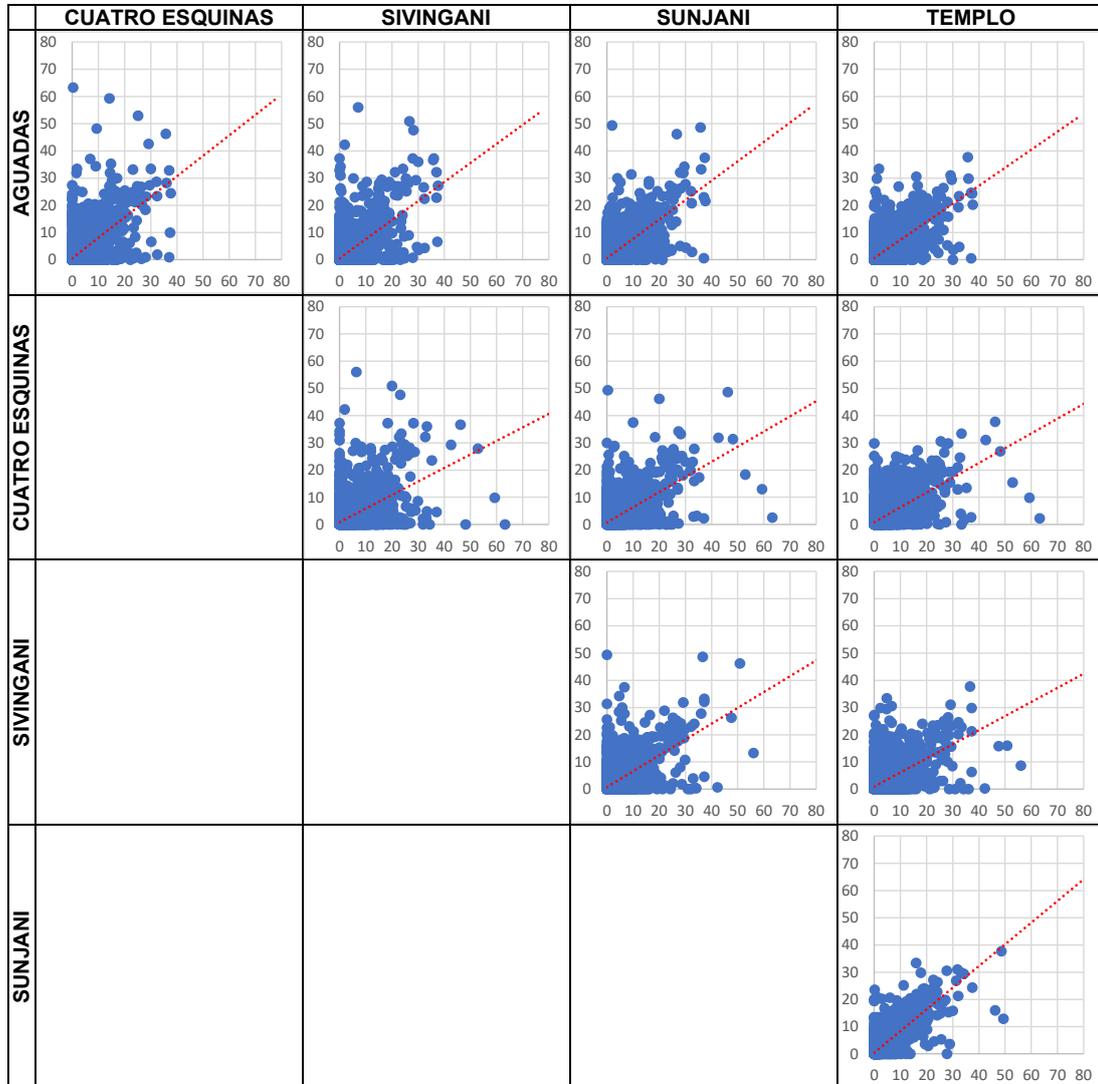
Para verificar que esta Información es representativa de la zona de estudio, se realizó la visualización espacial de la cuenca Misicuni, y de las subcuencas de la AHD que conforman la zona de estudio.



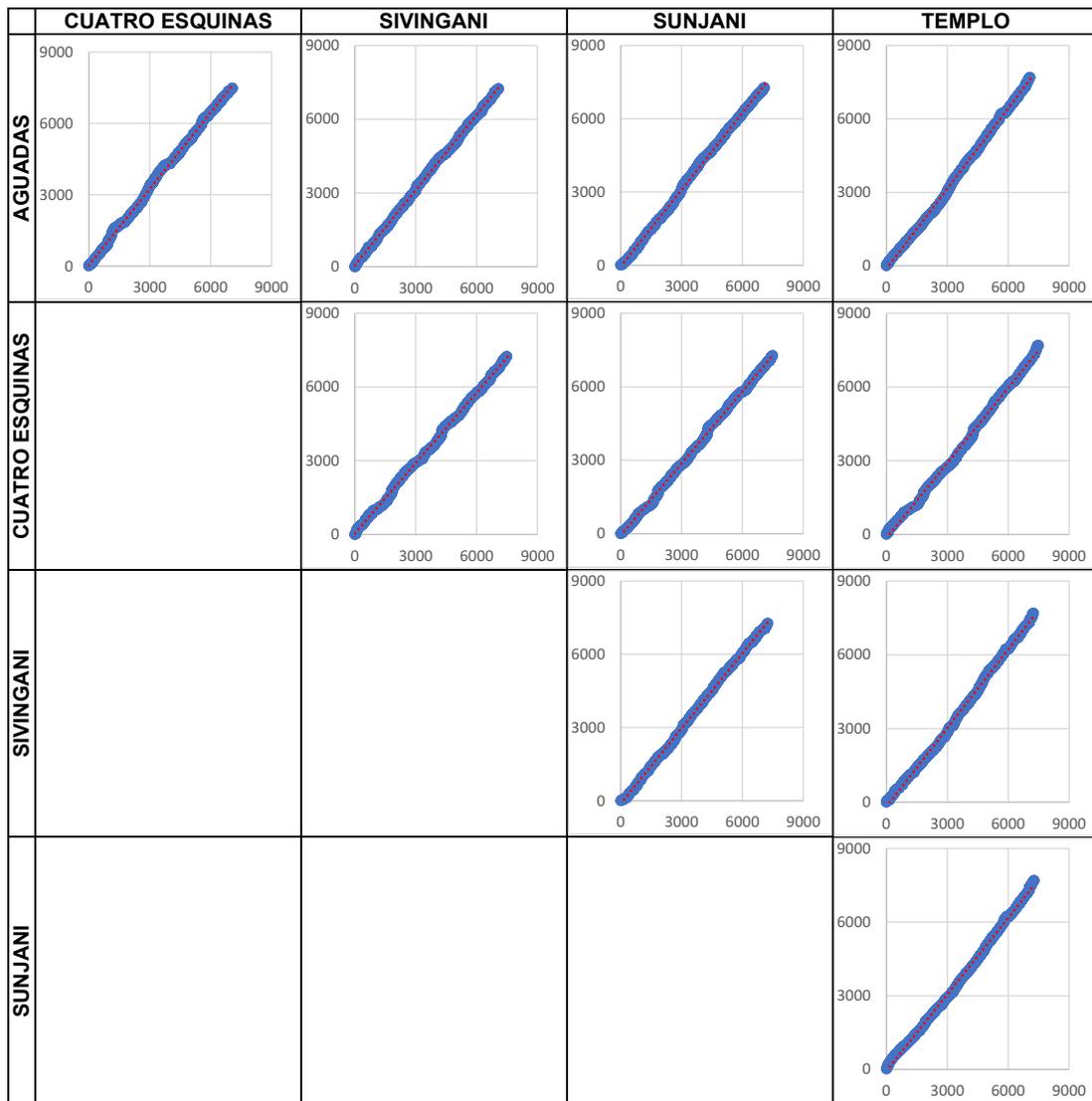
Como se observa en la figura anterior, la superficie de la cuenca AHD es mayor que la cuenca real, y considerando que según López (2016) del área total de la cuenca Misicuni, 45.11 km² son actualmente aprovechados por SEMAPA, entonces el área aprovechable por el embalse Misicuni es 299.64 km². Es decir, que con la AHD se sobreestimaría el área en aproximadamente 21.53%. Por este motivo, se procedió a realizar el ajuste a la AHD.

ANEXO II. ANALISIS DE DATOS DE CLIMA Y CAUDALES.

A objeto de identificar datos anómalos y correlación entre estaciones, se ha generado un gráfico de dispersión de datos para las estaciones de la cuenca.



De manera general se puede observar una aceptable correlación entre las estaciones, exceptuando algunos registros extremos en la estación de “cuatro esquinas”. Las estaciones Templo – Aguadas y Templo – Sunjani muestran la mejor correlación a nivel diario. Para verificar la consistencia de los datos, se muestra a continuación las gráficas doble masa para las 5 estaciones de la cuenca Misicuni.



Se observa que la consistencia de los datos es adecuada para la modelación hidrológica. La estación Templo presenta en magnitud mayor precipitación que el resto de las estaciones.

Del análisis de datos a partir de la gestión 2017 a 2019, se realizó la visualización de la disponibilidad de datos, que se muestra a continuación.

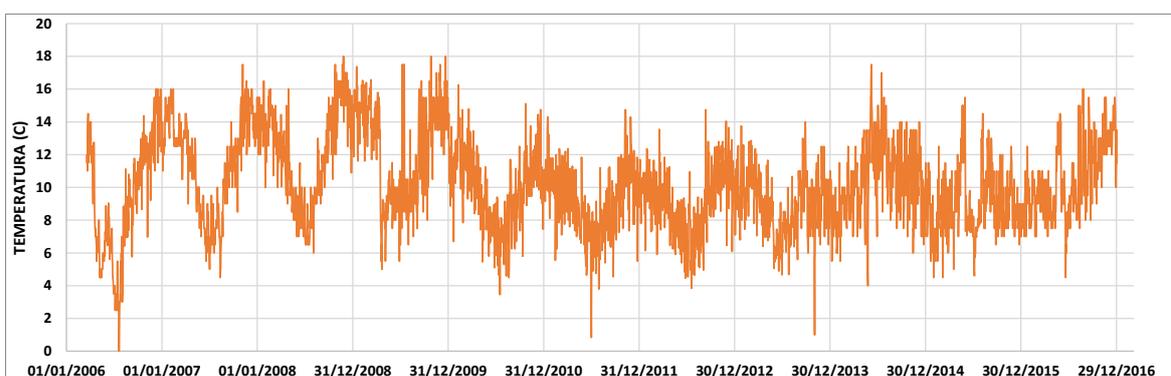
ESTACION PLUVIOMETRICA	2017												2018												2019			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
AGUADAS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CUATRO ESQUINAS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
SIVINGANI	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
SUNJANI	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
TEMPLO	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ Mes con datos diarios completos
 ■ Mes en que falta 1 o más datos diarios de precipitación
 ■ Mes en que falta 21 o más datos diarios de precipitación

Se observa una marcada ausencia de registros durante toda la gestión 2017 llegando a faltar en este periodo aproximadamente el 65% de los datos en las 5 estaciones de la cuenca. Esto imposibilita un proceso de relleno de datos durante la gestión 2017.

Del análisis al funcionamiento de Hydro-BID, se observa que requiere un año de datos para calentamiento del modelo, a partir del cual comenzar a generar resultados analizables. Considerando la falta de datos a partir de la gestión 2017, impide realizar una evaluación posterior a la gestión 2016.

Para la información de temperatura, solo se pudo acceder a información de la estación Sivingani. En la siguiente figura se muestra el registro de datos diarios.



Se observa una mayor variabilidad estacional entre los años 2006 a 2009 con extremos más pronunciados. A partir del 2010 al 2013 estos extremos son menos acentuados, pero continúa un comportamiento normal. A partir de la gestión 2014 se observa una disminución en el comportamiento normal debido a la estacionalidad del clima. Esto debe ser analizado por la Empresa Misicuni.

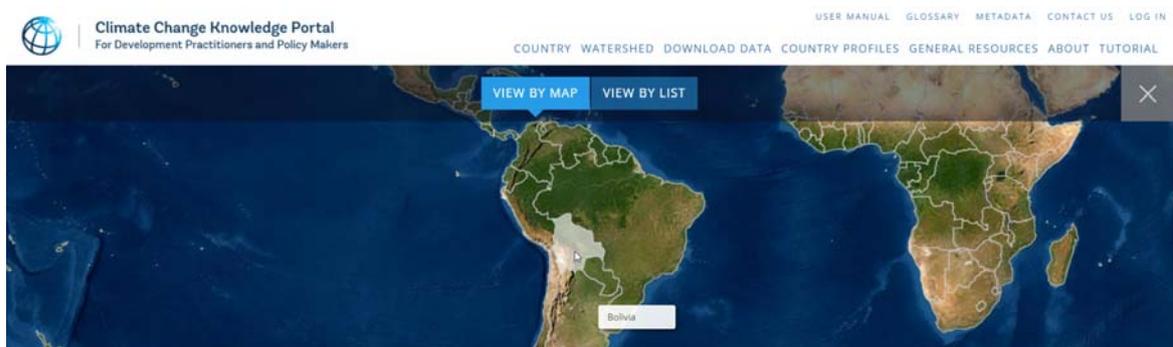
Sobre la información de caudales y volúmenes del embalse, se dispone de datos oficiales de la EM sobre caudales (reconstruidos en base a un modelo hidrológico) que se muestran en la siguiente tabla extraída del estudio de López (2016).

AÑO	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	PROM
67/68	0.52	0.60	0.70	0.88	6.01	6.50	8.34	5.22	1.73	1.17	0.63	0.63	2.74
68/69	0.58	0.46	0.56	1.50	1.78	5.82	15.07	1.46	0.74	0.53	0.47	0.42	2.45
69/70	0.38	0.35	0.39	0.39	1.36	4.79	13.77	11.08	1.17	0.55	0.41	0.38	2.92
70/71	0.33	0.39	0.60	1.50	2.07	7.56	15.36	3.40	0.71	0.45	0.47	0.39	2.77
71/72	0.33	0.31	0.33	1.45	4.68	13.16	11.24	5.00	1.84	0.61	0.47	0.41	3.32
72/73	0.50	0.60	0.65	1.05	4.61	2.93	4.55	2.59	1.01	0.45	0.45	0.32	1.64
73/74	0.40	0.48	0.56	0.61	1.97	8.86	8.23	6.72	3.26	0.67	0.46	0.39	2.72
74/75	0.48	0.40	0.41	0.43	0.72	5.99	7.77	4.37	1.18	0.49	0.39	0.27	1.91
75/76	0.25	0.27	0.45	0.80	2.15	7.16	10.37	3.17	0.89	0.58	0.37	0.28	2.23
76/77	0.29	1.02	0.55	0.38	0.70	1.53	4.23	7.48	1.32	0.83	0.67	0.41	1.62
77/78	0.37	0.62	0.64	2.17	4.36	10.41	8.03	5.80	2.17	0.98	0.63	0.50	3.06
78/79	0.45	0.39	0.36	0.73	5.84	15.62	7.61	7.09	1.40	0.75	0.48	0.38	3.42
79/80	0.33	0.24	0.76	0.62	6.02	7.59	2.37	3.43	1.17	0.53	0.38	0.33	1.98
80/81	0.28	0.39	0.48	0.41	0.89	4.91	9.48	5.75	2.33	0.99	0.73	0.63	2.27
81/82	0.94	1.27	1.76	1.93	4.11	15.13	4.55	12.96	3.28	1.06	0.44	0.34	3.98
82/83	0.90	0.98	0.78	2.07	4.84	4.69	4.33	5.87	1.27	0.98	0.43	0.65	2.31
83/84	0.82	0.52	0.94	1.57	4.01	7.30	9.35	12.50	4.90	0.79	0.48	0.38	3.63
84/85	0.31	0.29	4.13	7.24	6.13	10.20	6.90	7.98	6.54	1.95	0.56	2.84	4.59
85/86	0.63	0.30	0.36	1.27	5.91	14.14	6.29	12.12	2.88	0.76	0.43	0.44	3.79
86/87	0.30	2.59	1.68	0.54	5.16	12.73	7.34	2.98	0.97	1.40	0.44	0.59	3.06
87/88	0.40	0.47	1.35	1.45	3.78	13.07	9.12	12.93	3.03	0.92	0.46	0.37	3.94
88/89	0.30	0.87	1.12	1.34	2.63	8.75	5.50	8.32	4.73	1.49	0.41	2.54	3.17
89/90	0.36	0.75	0.46	0.51	3.00	7.50	6.08	2.81	1.64	0.73	1.55	0.77	2.18
90/91	0.57	0.50	0.72	2.35	3.72	8.43	10.88	5.17	2.27	1.09	0.56	0.43	3.06
91/92	0.39	0.38	0.36	0.67	0.78	7.24	4.58	5.18	1.11	0.80	0.75	1.09	1.94
92/93	0.69	0.94	0.84	1.30	2.40	13.31	3.90	2.60	1.67	0.82	0.69	0.72	2.51
93/94	1.22	1.88	1.44	1.41	20.66	17.02	8.27	2.69	1.32	0.99	0.53	0.46	4.82
94/95	0.41	0.37	0.61	1.38	2.56	9.01	11.39	7.84	2.48	1.08	0.64	0.58	3.20
95/96	0.45	0.43	0.60	0.82	1.44	7.53	5.88	4.43	1.49	0.66	0.46	0.45	2.05
96/97	0.42	0.49	0.46	3.65	4.12	15.86	11.78	8.11	1.19	0.47	0.69	0.61	3.99
97/98	0.55	0.51	0.53	0.85	1.85	4.20	7.80	4.74	4.58	0.69	0.33	0.27	2.24
98/99	0.20	0.90	1.65	4.79	3.35	6.69	7.00	10.71	2.11	0.59	0.39	0.30	3.39
99/00	0.25	1.88	0.88	0.40	1.15	6.88	10.12	5.78	1.22	0.45	0.37	0.29	2.47
00/01	0.22	0.28	0.45	0.79	4.03	6.65	6.61	5.19	2.01	4.25	0.49	0.30	2.61
01/02	0.53	0.30	0.48	2.87	5.03	3.75	3.72	3.92	0.65	0.94	0.35	0.80	1.95
02/03	0.22	0.38	1.32	1.51	1.44	4.87	6.68	4.08	2.38	0.49	0.31	0.31	2.17
03/04	0.29	0.23	0.63	3.37	5.84	15.24	11.53	6.05	3.19	0.73	2.62	1.43	4.26
04/05	0.50	0.72	1.99	3.79	5.98	10.71	12.30	4.46	3.84	1.61	0.47	0.34	3.89
05/06	0.30	4.22	1.29	3.83	4.91	7.49	7.29	10.10	3.91	0.68	0.41	0.31	3.73
06/07	0.27	0.61	0.93	1.64	5.05	6.01	7.32	4.15	1.09	0.44	0.30	0.25	2.34
07/08	0.20	1.01	0.59	3.50	4.26	13.99	6.64	6.40	2.65	0.63	0.40	0.30	3.38
08/09	0.26	0.20	0.38	0.95	6.06	6.80	4.37	4.32	1.80	0.48	0.31	0.27	2.18
09/10	0.20	0.20	0.88	2.47	6.65	5.21	8.11	6.25	3.97	0.71	0.38	2.49	3.13
10/11	0.57	0.26	0.33	0.37	3.71	5.60	12.93	9.88	2.66	0.62	0.42	1.81	3.26
11/12	0.36	0.46	0.55	1.19	1.90	5.57	8.28	4.38	0.98	0.39	0.30	0.24	2.05
12/13	0.20	0.27	0.68	2.31	2.07	0.87	9.59	2.49	0.95	0.51	1.13	0.88	1.83
13/14	2.75	1.21	0.88	1.91	5.34	5.13	10.86	1.63	1.38	0.89	0.52	0.77	2.77
14/15	0.38	0.46	0.52	0.45	1.54	7.06	5.14	2.57	1.82	0.74	0.33	2.38	1.95
15/16	0.49	0.31	0.80	0.38	0.85	3.29	8.21	1.87	0.75	0.28	0.20	0.20	1.47
PROM	0.48	0.69	0.83	1.63	3.86	8.22	8.14	5.84	2.11	0.85	0.54	0.67	2.82
MIN	0.20	0.20	0.33	0.37	0.70	0.87	2.37	1.46	0.65	0.28	0.20	0.20	1.47
MAX	2.75	4.22	4.13	7.24	20.66	17.02	15.36	12.96	6.54	4.25	2.62	2.84	4.82
DESEST	0.39	0.69	0.62	1.34	3.02	3.95	3.00	3.07	1.29	0.59	0.37	0.64	0.81
CV	0.81	1.00	0.75	0.83	0.78	0.48	0.37	0.53	0.61	0.69	0.68	0.95	0.29

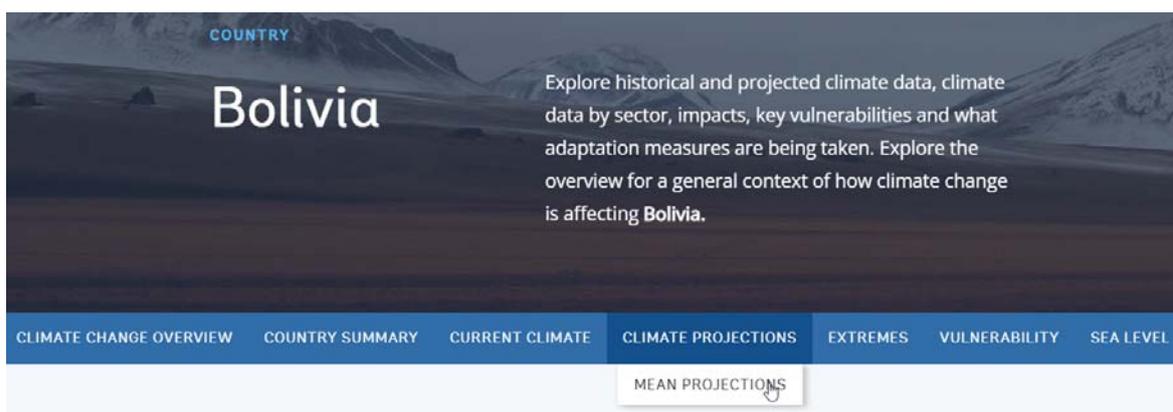
En la tabla anterior, se observa que el comportamiento estacional de los caudales coincide con las precipitaciones. Considerando que Hydro-BID requiere datos diarios de caudal para la modelación, se preparó un archivo “csv” con registro temporal diario, donde los caudales mostrados anteriormente, se reproducen para cada día del mes.

ANEXO III. PROYECCION DE CAMBIO CLIMÁTICO.

Para obtener las anomalías en la precipitación y temperatura por efecto del cambio climático, se accedió a la información del “Climate Change Knowledge Portal” cuyo enlace es <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>.

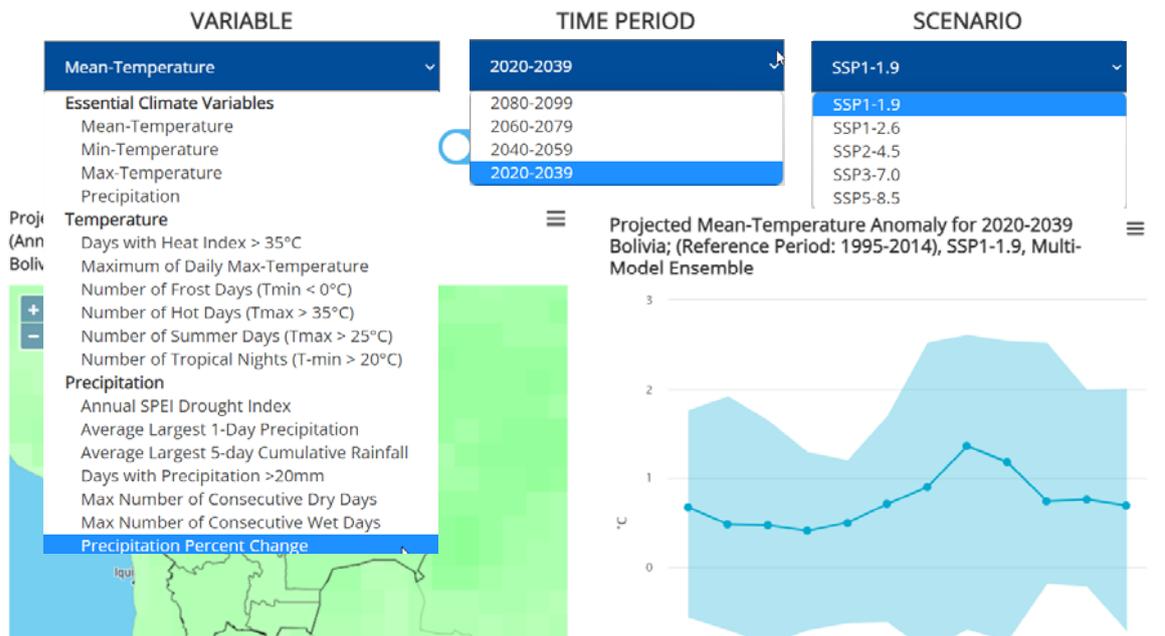


Dentro del portal es posible acceder a información específica de cada país (ver figura anterior). Para cada país se dispone de información general, pero también es posible acceder a información climática actual y proyecciones (ver figura siguiente)



Respecto a las proyecciones climáticas en Bolivia, se ofrece información relativa a precipitación y temperatura, para 4 principales periodos de proyección y con 5 escenarios de Caminos Socioeconómicos Compartidos (SSP) determinado principalmente por emisiones definidas, esfuerzos de mitigación y otros.

Esta información es entregada para los diferentes departamentos (división política) que componen Bolivia, y a nivel espacial como pixels. Para el presente estudio se extrajo la información espacial del píxel (centroide en lat: -17° y lon: -67°) en archivos netcdf, y esta fue trabajada empleando el software RStudio. En la siguiente figura se muestra la información que ofrece el CCKP.



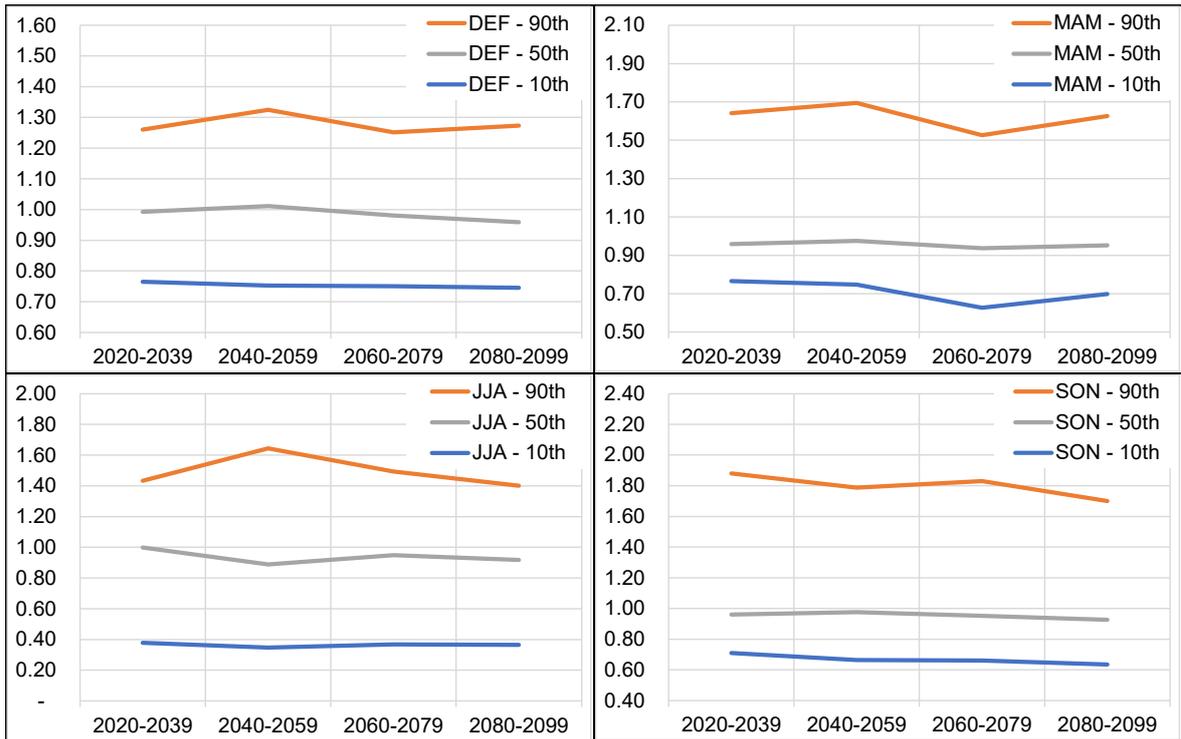
Respecto a los archivos de proyección climática, se debe mencionar que cada pixel tiene una resolución de 100 km x 100 km, llegando a abarcar regiones más allá de la zona de estudio, con clima variado.

Del análisis realizado se observa que precipitación histórica empleada para elaborar los escenarios climáticos, menciona que en la zona de estudio (300 km²) la precipitación anual es aproximadamente 726 mm/año, comparable con la precipitación media de la cuenca según el modelo en Hydro-BID de 731 mm/año.

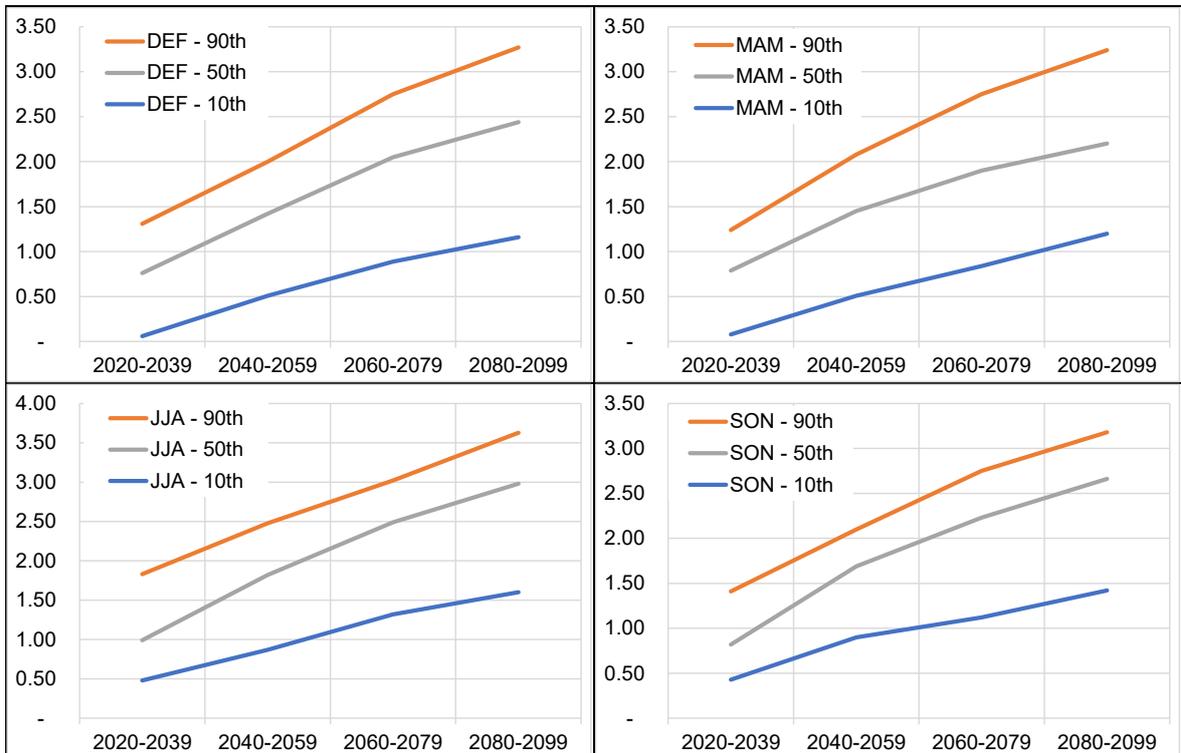
Seguidamente se identificaron las anomalías en precipitación y temperatura para el pixel ubicado sobre la zona de estudio, generandose la siguiente tabla.

PERIODO DE PROYECCIÓN	PERCENTIL	PRECIPITACIÓN (Multiplicador)				TEMPERATURA (Ajuste)			
		DEC-FEB	MAR-MAY	JUN-AGO	SEP-NOV	DEC-FEB	MAR-MAY	JUN-AGO	SEP-NOV
2020-2039	10th	0.76	0.77	0.38	0.71	0.06	0.08	0.48	0.43
	50th	0.99	0.96	1.00	0.96	0.76	0.79	0.99	0.82
	90th	1.26	1.64	1.43	1.88	1.31	1.24	1.83	1.41
2040-2059	10th	0.75	0.75	0.35	0.66	0.51	0.51	0.87	0.90
	50th	1.01	0.98	0.89	0.98	1.42	1.45	1.82	1.69
	90th	1.32	1.69	1.64	1.79	2.00	2.08	2.48	2.10
2060-2079	10th	0.75	0.63	0.37	0.66	0.89	0.84	1.32	1.12
	50th	0.98	0.94	0.95	0.95	2.05	1.90	2.49	2.23
	90th	1.25	1.53	1.49	1.83	2.75	2.75	3.02	2.75
2080-2099	10th	0.74	0.70	0.36	0.63	1.16	1.20	1.60	1.42
	50th	0.96	0.95	0.92	0.93	2.44	2.20	2.98	2.66
	90th	1.27	1.63	1.40	1.70	3.27	3.24	3.63	3.18

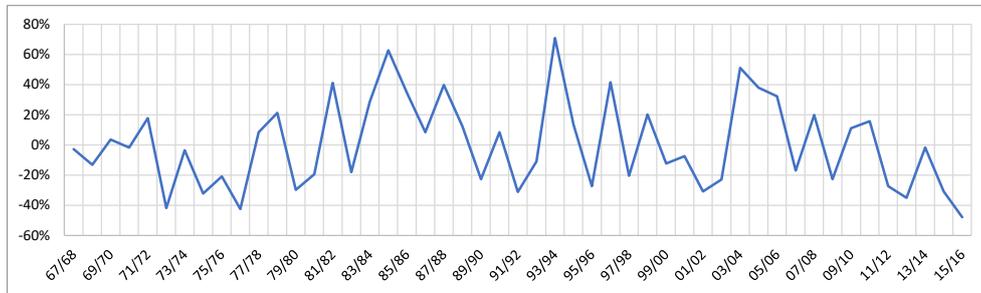
Anomalía (multiplicador) en la precipitación según el Percentil (en base a datos del CCKP)



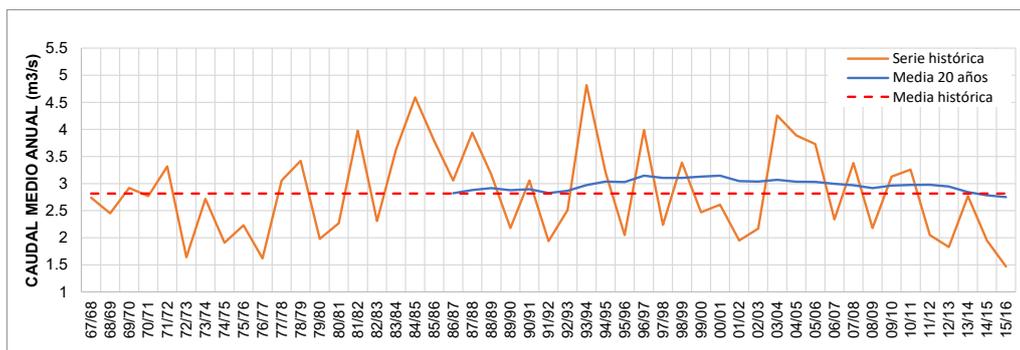
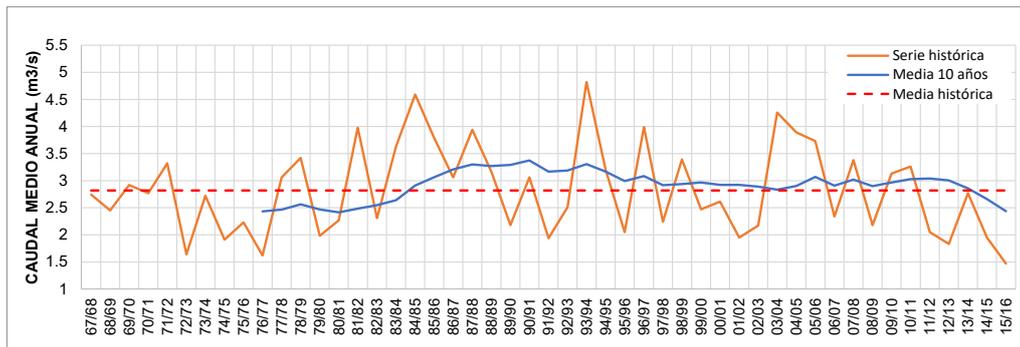
Anomalía (ajuste) en la temperatura según el Percentil (en base a datos del CCKP)



A objeto de entender el impacto real de los “escenarios de cambio climático” sobre la variación climática inherente al comportamiento de la cuenca y de la región; se ha analizado la variabilidad hidrológica (ver siguiente figura) de la cuenca, en base a la información de caudales del estudio de López (2016).



En la figura anterior se observa la variación del caudal medio anual con respecto a la media histórica de la cuenca. Las variaciones van desde +70% a -48% del caudal, con una desviación estandar de 30%. Sin embargo, para observar de manera más real la variación hidrológica, se ha graficado la media móvil para 10 y 20 años.



Complementando a lo mencionado anteriormente, se observa que tanto la media móvil a 10 y 20 años, muestran que previo a la década de los 80 de años se tenían años mayormente por debajo la media. Luego, hasta la primera década del Siglo XXI se tiene un comportamiento mayormente por encima la media; ingresando posterior a este periodo a un comportamiento marcadamente por debajo la media.

ANEXO IV. EDICIÓN DE LA AHD.

Para editar la AHD se empleó principalmente el software “DB Browser for SQLite”, permitiendo abrir el archivo de BBDD que emplea el Hydro-BID. Como se mencionó en Anexo I, se definió necesario editar la AHD planteándose 2 alternativas:

- Editar la subcuenca Titiri reduciendo el área aprovechada por SEMAPA, y reducir el área de la subcuenca Misicuni, con la consecuente edición a las tablas vinculadas.
- Editar la subcuenca Titiri reduciendo el área aprovechada por SEMAPA, y prescindir de la subcuenca Misicuni, ampliando el área de la subcuenca Serkheta con la consecuente edición a las tablas vinculadas.

Ambas alternativas significaban una edición avanzada de la AHD, sin embargo, para reducir la edición se decidió emplear la segunda alternativa. Por lo tanto, a continuación, se enumeran las modificaciones realizadas.

- En la tabla “Catchments”, para representar la zona que es aprovechada por SEMAPA, se redujo el área de la cuenca Titiri de 159.836 a 114.726 km².



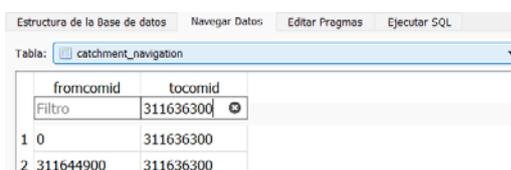
	awc_cm	comid	total_area	slope	channel_length	mavelu	latitude	longitude
	Filtro	311644900	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro
1	15.0	311644900	114.726	0.01744	10.43365982...	0.0	-17.18973252...	-66.25253090...

- En la tabla “Catchments”, para representar la fracción de la subcuenca Misicuni que llega al embalse, se incrementó el área de la cuenca Serkheta de 98.519 a 184.914 km².



	awc_cm	comid	total_area	slope	channel_length	mavelu	latitude	longitude
	Filtro	311636300	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro
1	14.86126508...	311636300	184.914	0.03971	6.16965724801	0.0	-17.18745677...	-66.35390733...

- En la tabla “catchments_navigation” se corrigió la interdependencia de las subcuencas, volviendo a la subcuenca Titiri aportante a Serkheta.



	fromcomid	tocomid
	Filtro	311636300
1	0	311636300
2	311644900	311636300

- En la tabla “catchments_nlcd_soils” se editó la distribución de suelos para la subcuenca Titiri, basado en información de la AHD e información satelital.

Estructura de la Base de datos Navegar Datos Editar Pragmas Ejecutar SQL

Tabla: Nuev

	comid	nlcd_id	area	curve_number	hydgrp	kfact	ls_factor
	311644900	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro
1	311644900	7	86866278.40...	70	B	0.190753062...	250.3646157...
2	311644900	8	27869166.78...	57	B	0.190753062...	174.4322852...

- En la tabla “catchments_nlcd_soils” se editó la distribución de suelos para la subcuenca Serkheta, basado en información de AHD e información satelital.

Estructura de la Base de datos Navegar Datos Editar Pragmas Ejecutar SQL

Tabla: Nuev

	comid	nlcd_id	area	curve_number	hydgrp	kfact	ls_factor
	311636300	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro
1	311636300	7	51330963.06...	70	B	0.190753062...	358.3283358...
2	311636300	8	113484608.2...	57	B	0.190753062...	414.1491775...
3	311636300	21	20196102.18...	57	B	0.190753062...	194.6084783...