



**IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO
HYDROBID EN LA CUENCA YUKYRY
COMO SISTEMA DE MONITOREO DEL
LAGO YPACARAÍ (PARAGUAY)**

**IMPLEMENTATION OF THE HYDROBID
MODEL IN THE YUKYRY BASIN AS A
MONITORING SYSTEM FOR LAKE
YPACARAÍ, PARAGUAY**

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

Presentado por:

D^a VERÓNICA BELÉN BERESTOVOY MAZUREK

Dirigido por:

Dr. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR

Alcalá de Henares, a 6 de junio de 2022

AGRADECIMIENTOS

Se expresan los agradecimientos:

A la Fundación Carolina por la oportunidad de realizar el máster.

Al tutor Dr. Juan Antonio Pascual por su apoyo en la resolución de dudas

A toda la comunidad educativa de la Universidad de Alcalá y Rey Juan Carlos por los conocimientos recibidos.

Al Banco Interamericano de Desarrollo por su apoyo con el desarrollo de la herramienta HydroBID.

A mi familia por el apoyo incondicional

ÍNDICE

RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. OBJETIVOS	12
3. METODOLOGÍA.....	12
3.1. Zona de estudio.....	12
3.2. Bases de datos.....	14
3.3. Tratamiento de datos.....	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1. Identificación de la cuenca en la base de datos AHD	20
4.2. Interpolación de datos climáticos.....	22
4.3. Calibración del modelo HydroBID.....	26
4.4. Caudales obtenidos.....	29
4.5. Carga de Fósforo Total.....	30
5. CONCLUSIONES.....	31
6. ANEXOS.....	32
7. BIBLIOGRAFÍA.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la cuenca del arroyo Yukyry	13
Figura 2. Cuenca del arroyo Yukyry en la AHD original	21
Figura 3. Cuenca del arroyo Yukyry en la AHD modificada.....	22
Figura 4. Representación de la precipitación acumulada en las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca de estudio.....	23
Figura 5. Representación de la precipitación acumulada en la estación Aeropuerto Luque	24
Figura 6. Representación de la precipitación acumulada diaria en la estación Paraguarí 24	
Figura 7. Curva de doble masa obtenido entre la estación Aeropuerto Luque y San Bernardino	25
Figura 8. Curva de duración de caudales obtenida	28
Figura 9. Carga de Fósforo Total en la cuenca del Yukyry.....	30
Figura 10. Situación crítica del lago Ypacaraí en el año 2013.....	32
Figura 11. Situación del lago Ypacaraí en el año 2019	32
Figura 12. Representación conceptual del modelo GWLF	33
Figura 13. Fósforo total en el punto de muestreo.....	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca de estudio.....	14
Tabla 2. Características de la cuenca Yukyry en la base de datos AHD modificada	21
Tabla 3. Características del suelo en la cuenca Yukyry (COMID 314578900) según la base de datos de hidrología analítica del sistema HydroBID.....	26
Tabla 4. Parámetros de calibración para la cuenca Yukyry.....	27
Tabla 5. Caudales obtenidos en la cuenca Yukyry.....	29
Tabla 6. Balance hídrico obtenido con el sistema HydroBID en la cuenca del arroyo Yukyry	35

TABLA DE ABREVIATURAS

AHD: Base de Datos de Hidrología Analítica

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

CONALAYPA: Comisión Nacional de Gestión y Manejo de Lago Ypacaraí

DMH: Dirección de Meteorología e Hidrología

GWLF: Generalized Watershed Loading Functions

ID: Distancia Inversa

NHDPlus: U.S. National Hydrography Dataset Plus

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

QGIS: Quantum Geographical Information System

UNA: Universidad Nacional de Asunción

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

RESUMEN

El presente trabajo se realiza con el objetivo de desarrollar el modelo HydroBID a fin de proponer un sistema de monitoreo para la cuenca del lago Ypacaraí (Paraguay). Se seleccionó la cuenca Yukyry como cuenca piloto y se simuló el modelo con datos de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio y un punto de aforo de caudal situado aguas debajo de la cuenca. Se logró una calibración mensual y se obtuvo un flujo promedio de 6.2 m³/s en la cuenca que desemboca en el lago y se concluyó que el sistema resulta útil para monitorear el flujo de entrada de agua al lago e incluso servir para evaluar otras condiciones como la calidad del mismo.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento fundamental en el medio ambiente y constituye un factor primordial en el desarrollo económico y social; por ello es esencial generar información para su adecuada gestión.

Según la UNESCO (2021), el estado actual de los recursos hídricos destaca la necesidad de mejorar su gestión; y para esto, es importante reconocer, medir y expresar el valor del agua, a fin de obtener la información que permita tomar decisiones adecuadas para lograr una gestión sostenible y equitativa de los recursos hídricos y alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda para el Desarrollo Sostenible 2030 de las Naciones Unidas, especialmente el sexto, que hace referencia a garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.

Hay que tener en cuenta que las aguas superficiales son las que se encuentran más contaminadas debido a las descargas de aguas residuales sin tratamiento que reciben provenientes de las actividades humanas, incluso existen corrientes superficiales en el mundo en un estado avanzado de contaminación que solo son utilizadas como receptoras de desechos (Sierra, 2011).

El Paraguay es un país con abundancia de recursos hídricos, siendo el lago Ypacaraí el mayor lago de la República y constituyendo un recurso emblemático e importante, y no solo ambientalmente, sino también en el sector turístico, económico y cultural; sin embargo este lago constituye un ejemplo de lo mencionado anteriormente en cuanto a calidad de aguas superficiales, ya que presenta una abundante floración de cianobacterias fitoplanctónicas debido al gran incremento de las cargas de nutrientes al lago, sobre todo nitrógeno y fósforo (Rodríguez, 2019).

El estado ambiental del lago tuvo un punto crítico en el periodo 2012 y 2013 con consecuencias sociales, económicas y ambientales, lo que generó que en el año 2020 se creara por Ley N.º 6489 la Comisión Nacional de Gestión y Manejo del Lago Ypacaraí (CONALAYPA) bajo el lema “El lago Ypacaraí es causa nacional”

para la preservación, recomposición y aprovechamiento sostenible del lago Ypacaraí, de su cuenca y su área de influencia (CONALAYPA, 2020).

Este lago tiene dos cuencas afluentes principales denominadas Yukyry y Pirayu, las cuales influyen en la cantidad y calidad de agua que llega al lago, por ello resulta necesario generar información acerca del flujo de agua que estas cuencas drenan; sin embargo, no existe un sistema de monitoreo de caudales permanente en el área.

Entre las herramientas que pueden resultar útil para la gestión sostenible de los recursos hídricos se menciona la modelación hidrológica. Los modelos hidrológicos pueden ser aplicados a la gestión integral del agua, de modo a mejorar los sistemas de uso y distribución del agua (García, 2014).

Teniendo en cuenta esto, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha elaborado una herramienta de simulación llamada HydroBID que consiste en un sistema integrado para la simulación del flujo de agua en cuencas con una base de datos hidrográficos para la región de América Latina y El Caribe. Las principales ventajas que conlleva la utilización de esta herramienta es su aplicabilidad en zonas donde existe escasez de datos, la posibilidad de acceder a un centro de soporte técnico y la constante actualización del sistema que va ampliándose con módulos que permiten su integración con otros sistemas a fin de poder evaluar más escenarios en las cuencas de estudio, y que además es una fuente abierta a fin de impulsar el desarrollo en la región (BID, 2022).

Por lo tanto, teniendo en cuenta la situación del lago y la utilidad de esta herramienta se propone desarrollar el sistema HydroBID a fin de generar características del flujo de agua que llega al lago Ypacaraí a través de la cuenca del arroyo Yukyry. La información generada puede resultar útil en la toma de decisiones para la gestión del recurso hídrico y suministrar datos para otros modelos que relacionan la calidad del agua, la interacción con las aguas subterráneas o la combinación entre oferta y demanda de agua en la cuenca.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es el de desarrollar el sistema HydroBID para la cuenca del arroyo Yukyry.

Como objetivos secundarios se plantea lo siguiente:

- Identificar la cuenca en la base de datos de hidrología analítica (AHD) a través del programa QGIS.
- Analizar los datos de entrada disponibles en la cuenca del Yukyry para el modelo HydroBID.
- Determinar el flujo de salida de la cuenca del arroyo Yukyry que desemboca al lago Ypacaraí.
- Especificar la carga contaminante de fósforo total que desemboca en el lago Ypacaraí a través de la cuenca del Yukyry.

3. METODOLOGÍA

3.1. Zona de estudio

La cuenca del lago Ypacaraí se encuentra en la cuenca del río Paraguay, una de las sub cuencas del sistema de la Cuenca del Plata, se ubica a 25 km al este de Asunción en Paraguay y ocupa una extensión 54 km² con una elevación promedio de 64 msnm; se lo describe como un lago de agua dulce, poco profundo, con bañados asociados en una zona de paisaje ondulado (Facetti *et al.*, 2006).

La población que habita en la cuenca hidrográfica del lago Ypacaraí tiene una tasa de crecimiento actual estimada en 10%, actualmente habitan alrededor de un millón y medio de personas. El uso de suelo de la cuenca se clasifica de manera general en 34% de actividades agrícolas, 26% de áreas urbanas, 17% de cuerpos de agua y zonas bajas, 11% de asentamientos y cultivos del área rural, 10% de bosques y 2% es suelo vacante (BETA Studio – Thetis, 2015).

La zona de estudio comprende la cuenca del arroyo Yukyry. La misma se ha seleccionado como cuenca piloto para la implementación del sistema HydroBID, teniendo en cuenta que constituye un afluente al lago Ypacaraí cuyo caudal de

aporte corresponde al 38% en un año normal y entre 36.5 y 40 % en años secos y húmedos respectivamente (UNA, 2005).

La cuenca Yukyry abarca parte de los distritos de Luque, Areguá, San Lorenzo, Capiatá, Julián Augusto Saldívar, Itauguá e Itá del departamento de Central en Paraguay y sus coordenadas UTM Zona 21 J son 463663.52 m E y 7204950.44 m S. En la Figura 1 se muestra la ubicación correspondiente teniendo en cuenta la base de datos de hidrología analítica (AHD).

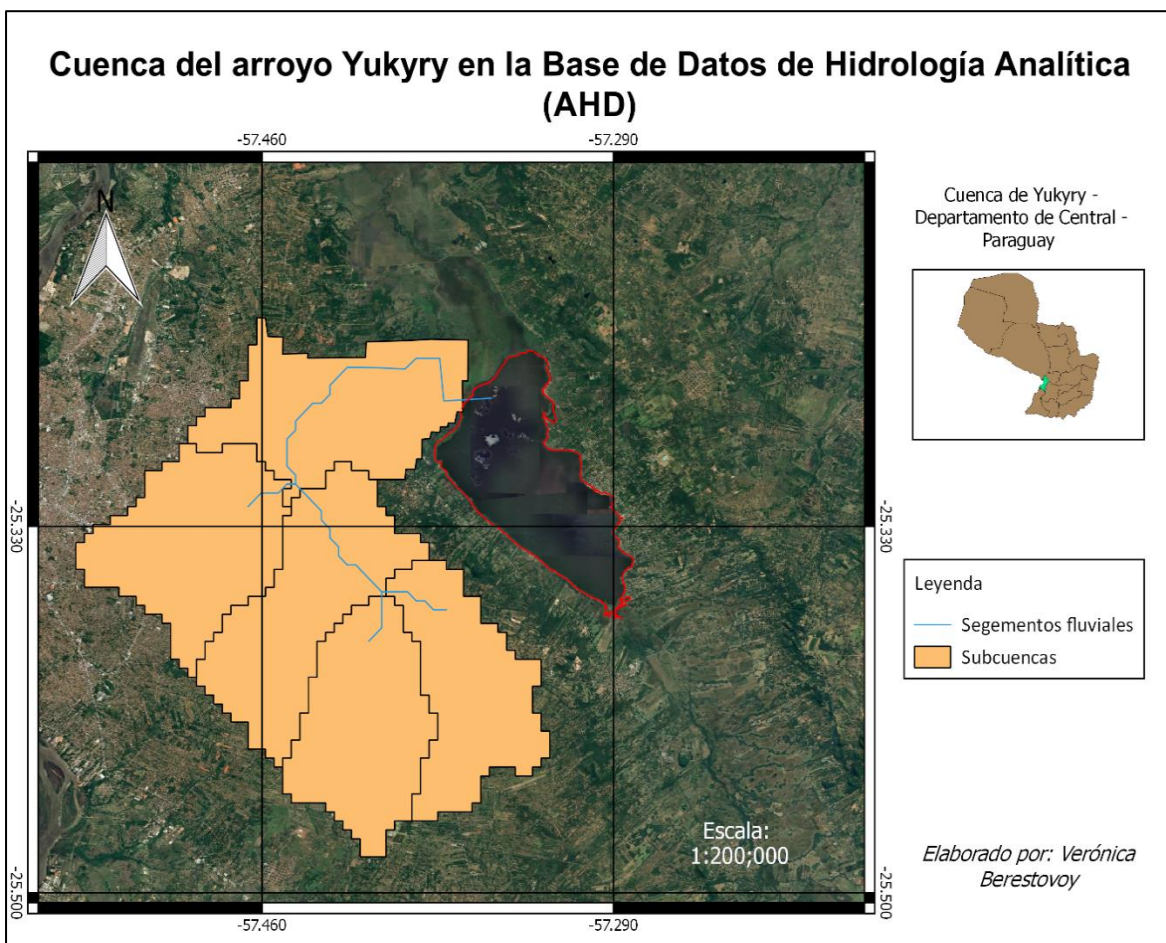


Figura 1. Ubicación de la cuenca del arroyo Yukyry

3.2. Bases de datos

3.2.1. Base de datos de hidrología analítica para América Latina y El Caribe

La Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) es una base de datos desarrollada por el BID, está basada en un sistema de información geográfica de aguas superficiales y tiene cuatro características claves: una estructura de cuencas de polígono anidado con un esquema único de identificación de cuencas; una estructura derivada correspondiente para los segmentos fluviales contenidos dentro de las cuencas; atributos descriptivos que crean un sistema interconectado de segmentos fluviales aguas arriba y aguas abajo y entre cuencas; y una estructura de base de datos para poblar y adjuntar atributos adicionales específicos al modelo (Rineer *et al.*, 2014).

La AHD ha sido creada para toda América del Sur y América Central incluyendo más de 200 000 segmentos fluviales y 230 000 cuencas.

3.2.2. Base de datos climática

Se dispone de información meteorológica de temperatura media y precipitación acumulada diaria en cuatro estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio y operadas por la Dirección de Meteorología e Hidrología del Paraguay que se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca de estudio

Estación	Latitud	Longitud	Sistema	Porcentaje de datos faltantes	Distancia al punto de aforo (km)
Aeropuerto Luque	-25.2388	-57.5192	Convencional Automática	0 1.7	10
Paraguarí	-25.6235	-57.1494	Convencional	0	40
San Bernardino	-25.3122	-57.2979	Automática	1.2	14
Secretaría Nacional de Deportes	-25.3162	-57.5793	Convencional	11.7	17

El análisis hidrológico necesita de series de tiempo continuas y con el mayor intervalo de tiempo posible. Los vacíos de información pueden darse por diversos motivos como la ausencia de lectura, deficiencia del instrumento de registro, error de transcripción; por esto se debe examinar el tratamiento que se dará a los vacíos de información (García, 2015).

Para el análisis de consistencia de datos de las estaciones se realizaron gráficas de serie de tiempo que permiten visualizar el comportamiento de datos, mediante estas se representa los datos ordenados cronológicamente en las ordenadas y el tiempo en las abscisas y así se puede observar claramente las tendencias, las variaciones, la irreversibilidad, y la intermitencia (Carvajal y Castro, 2010).

También se utilizó la curva o gráfica de doble masa de manera a analizar la consistencia de las observaciones. En este paso, se grafica en el eje de las abscisas los valores acumulados de la estación patrón y en el eje de las ordenadas los valores acumulados de la estación en estudio, la gráfica debe mostrar una relación estable de proporcionalidad entre la estación patrón y la estación en estudio (Lobo, 2004).

Luego para el relleno de datos se utilizó el método de razón q , para ello se ha analizado la consistencia de los datos a través de una curva de doble masa.

El método razón q fue propuesto en la Guía de prácticas climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial y aplica a pares de estaciones, en donde una tiene los datos completos y otra no, entonces, se determina “ q ” como el cociente entre la sumatoria de los datos de la estación incompleta entre la sumatoria de los datos de la estación completa en el periodo seleccionado (WMO, 2018).

3.2.3. Base de datos de caudales

Se dispone de medición de caudales en el periodo 2015 al 2018 en la estación de aforo denominada “Yukyry”. Esta serie presenta 13.6% de datos faltantes.

A fin de rellenar esta serie faltante se utilizó el método de Distancia Inversa (ID) que se basa en una idea de ponderación de la distancia entre la estación de destino y la estación vecina y supone que las estaciones más cercanas están mejor correlacionadas con la estación de destino en comparación con otras estaciones (Bibi *et al.*, 2020) a través de la ecuación 1:

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{d_{it}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{it}}} \quad [1]$$

En donde d_{it} es la distancia entre la estación objetivo y i^{th} la estación vecina.

Según Norliyana *et al.*, (2017), la técnica ID es la más utilizada en el cálculo de los datos faltantes de precipitaciones y caudales y resulta útil cuando se tenga los datos de estaciones vecinas del mismo período, en este caso se tiene un punto de aforo denominado “Yukyry-mi” que coincide con el periodo faltante en la serie “Yukyry”. Estos datos serán utilizados para la calibración del modelo.

3.2.4. Base de datos de calidad de aguas

Se dispone de 16 mediciones referentes a Fósforo Total en un punto aguas abajo del arroyo Yukyry en los años 2015 al 2018 realizado dentro del proyecto denominado “Monitoreo de Calidad de Agua por Campañas de Muestreo en el Lago Ypacarai” por la Dirección General del Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas Universidad Nacional de Asunción.

El procedimiento de muestreo de agua superficial, para cada punto, se ha basado en lo establecido por el Standard Methods 20^o Edición para agua superficiales y de desechos, para un estudio descriptivo de corte transversal. Las muestras fueron recolectadas y preservadas según lo establecido y para las determinaciones laboratoriales se aplicaron metodologías estandarizadas para aguas superficiales, según Standard Methods 18 y 20^o Edición para aguas superficiales y de desechos. El método para la determinación de fosfato total fue SM-4500-P E (UNA, 2015).

3.3. Tratamiento de datos

3.3.1. QGIS (Quantum Geographical Information System)

Se utiliza QGIS versión 2.18 como sistema de información geográfica para navegar la información de la AHD a través del complemento denominado AHD Navigator.

El sistema QGIS es un software libre y de código abierto que a través de una aplicación de sistema de información geográfica se puede manejar y analizar información en forma de mapas. Con QGIS se puede abrir archivos que tienen mapas digitalizados, consultar la información que está codificada en dichos mapas, y producir nuevos mapas (Gómez, 2016).

El complemento AHD Navigator permite la navegación rápida desde cualquier cuenca hidrográfica aguas abajo o segmento fluvial para incluir todas las cuencas y corrientes aguas arriba que desembocan en ellos (Rineer *et al.*, 2014). Para este paso se debe cargar las capas correspondientes de la AHD que contiene la información sobre las cuencas y los segmentos fluviales, también se debe cargar la tabla AHDFlow (componente de la AHD), ya que a través de esta tabla se puede navegar rápidamente aguas arriba o aguas abajo del punto de interés y se obtiene todas las cuencas o segmentos fluviales que fluyen hacia dicho punto.

Entre las características que se puede obtener de la AHD se tiene: el número de cuencas que fluyen hacia el punto de estudio (aguas arriba o aguas abajo), el área en km², el número de segmentos fluviales y la longitud total de los mismos.

Cada una de las cuencas de la AHD tiene un número identificador único que se denomina "COMID", y este número es el que se utiliza en el sistema HydroBID para vincular la información disponible de la base de datos. Este COMID puede identificarse a través de la herramienta AHD Navigator mencionada o a través del identificador de objetos espaciales de QGIS.

Es importante mencionar que, una vez identificado el COMID y colocado en el la configuración HydroBID, el sistema calcula el balance hídrico para cada una de las cuencas aguas arriba que se encuentran fluyendo aguas arriba del mismo.

3.3.2. Herramienta de interpolación de datos climáticos de HydroBID

El sistema HydroBID necesita datos meteorológicos diarios para cada subcuenca que se pretende simular y permite que el usuario suministre series de tiempo de precipitación y temperatura a través de la Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos (CDIT).

La CDIT se basa en la metodología de la Distancia Inversa Ponderada (IDW) que calcula un promedio ponderado usando la distancia entre puntos y da mayor peso a los puntos más cercanos al punto de predicción y los pesos disminuyen en función de la distancia.

Para poder utilizar la CDIT se necesita datos diarios de precipitación y temperatura media de cada una de las estaciones meteorológicas a utilizar, también las coordenadas en grados decimales de dichas estaciones y cada uno de los centroides de la cuenca de estudio. Además, se puede indicar cuantas estaciones pueden ser interpoladas.

3.3.3. Módulo de disponibilidad hídrica de HydroBID

Hydro-BID está basado en el sistema Generalized Watershed Loading Functions (GWLF) y mejorado por la metodología de tiempo de retardo-enrutamiento. Este modelo de precipitación-escorrentía que compone al GWLF toma en consideración los usos de tierras y las condiciones del suelo dentro de la cuenca, y la respuesta a esto es tratada por separado para generar un volumen de escorrentía estimado. El flujo que se genera de cada cuenca, incluyendo las contribuciones de aguas subterráneas poco profundas o flujo base, se dirige a través de las redes de corrientes definidas por la AHD (Moreda *et al.*, 2014).

El modelo GWLF simula la escorrentía superficial mediante la ecuación del número de curva del Servicio Americano de Conservación del Suelo a partir de datos diarios de precipitación y temperatura, para cada subcuenca se realiza un balance hídrico diario a partir de la precipitación, deshielo, estado inicial y capacidad de la zona insaturada y la evapotranspiración, y en cuanto a la evapotranspiración se

determina a partir de los datos meteorológicos diarios y un factor de cobertura que depende del tipo de uso/vegetación del terreno (CHE, 2017).

El modelo HydroBID utiliza los siguientes parámetros para su calibración:

- Velocidad de corriente: Velocidad promedio estimada de la corriente. Este parámetro se encuentra fijado en 0,5 m/s.
- Latitud: Ubicación del centroide de la cuenca.
- Inicio y final de estación de cultivo: Fecha juliana del día de inicio y final de la estación de cultivo.
- NC: Número de curva. Controla la cantidad inicial de abstracción utilizada para calcular la escurrentía
- CDA: Contenido de agua disponible en cm. Este parámetro se encuentra fijado en la base de datos AHD, el usuario puede modificar el valor utilizando la opción de multiplicador para aumentar o disminuir porcentualmente, o bien modificando el valor propiamente. Activa el inicio de la percolación.
- r: Coeficiente de recesión. Controla la tasa del flujo base.
- s: Coeficiente de percolación. Controla la tasa de percolación a la zona saturada profunda.
- Factor ET: Factor de Evapotranspiración en temporadas de cultivo y latente.
- Umbral de Temperatura: Temperatura que clasifica la precipitación como lluvia o nieve.
- Factor de Fusión: Factor que controla la tasa a la cual se derrite la nieve.

El sistema utiliza los siguientes cálculos estadísticos para la calibración: error de volumen general (Overall volumen error), correlación (-r), coeficiente de correlación modificado (r_{mod}), y el índice de Eficiencia de Nash- Sutcliffe (Moreda et al., 2014).

La calibración se realiza a través del proceso prueba y error, este es el método más utilizado y se realiza un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador (Cabrera, 2012).

3.3.4. Carga de Fósforo Total

Con las concentraciones de fósforo y los caudales de los cauces fluviales que desembocan en un ecosistema acuático, la carga de fósforo total puede determinarse a partir de la siguiente ecuación (Romero, 2019).

$$IPF = \sum Qi.Pi$$

Siendo IPF (mg/año) la carga de fósforo,

Qi el caudal del cauce fluvial que llega al ecosistema acuático en $m^3/año$.

Pi la concentración de fósforo en el cauce en mg/m^3 .

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Identificación de la cuenca en la base de datos AHD

El proceso de identificación de la cuenca Yukyry en la base de datos AHD se realizó dos veces. La primera vez, se pudo notar que la cuenca en la AHD no respondía al flujo real, sino que la cuenca terminaba desembocando aguas más abajo del lago Ypacaraí. De esta manera, se solicitó la modificación correspondiente al Banco Interamericano de Desarrollo.

Finalmente, las características de la cuenca según la AHD se especifican en la tabla 2, en donde se puede notar que la cuenca, teniendo en cuenta el área total, se clasifica como intermedia-pequeña según la clasificación propuesta por Campos (1992).

El COMID identificado es el utilizado para la modelación en el sistema HydroBID.

Tabla 2. Características de la cuenca Yukyry en la base de datos AHD modificada

Variables	Valor
N.º de subcuencas	5
Área total	345.44 km ²
N.º de segmentos fluviales	5
Longitud total de los segmentos fluviales	35 km
COMID (aguas abajo)	314578900

En la Figura 2 se muestra la primera identificación de la cuenca Yukyry realizada en la base de datos AHD, como se puede observar el segmento fluvial de la cuenca termina desembocando en un cauce denominado “Salado” que se ubica aguas abajo del lago Ypacaraí.

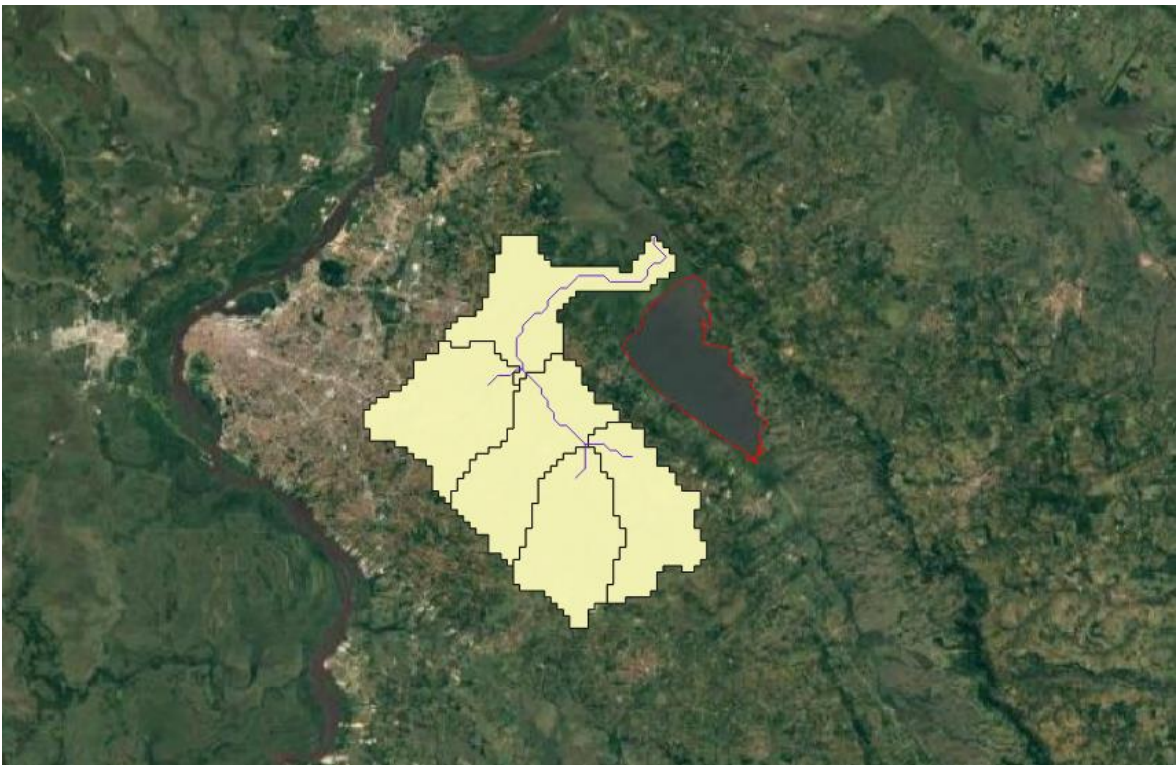


Figura 2. Cuenca del arroyo Yukyry en la AHD original

Posteriormente, luego de la modificación del BID, la identificación de la cuenca Yukyry se observa en la Figura 3, en donde ya se puede notar que el segmento fluvial desemboca en el lago como sucede en la realidad. Con esta segunda identificación se procedió a realizar la simulación correspondiente.

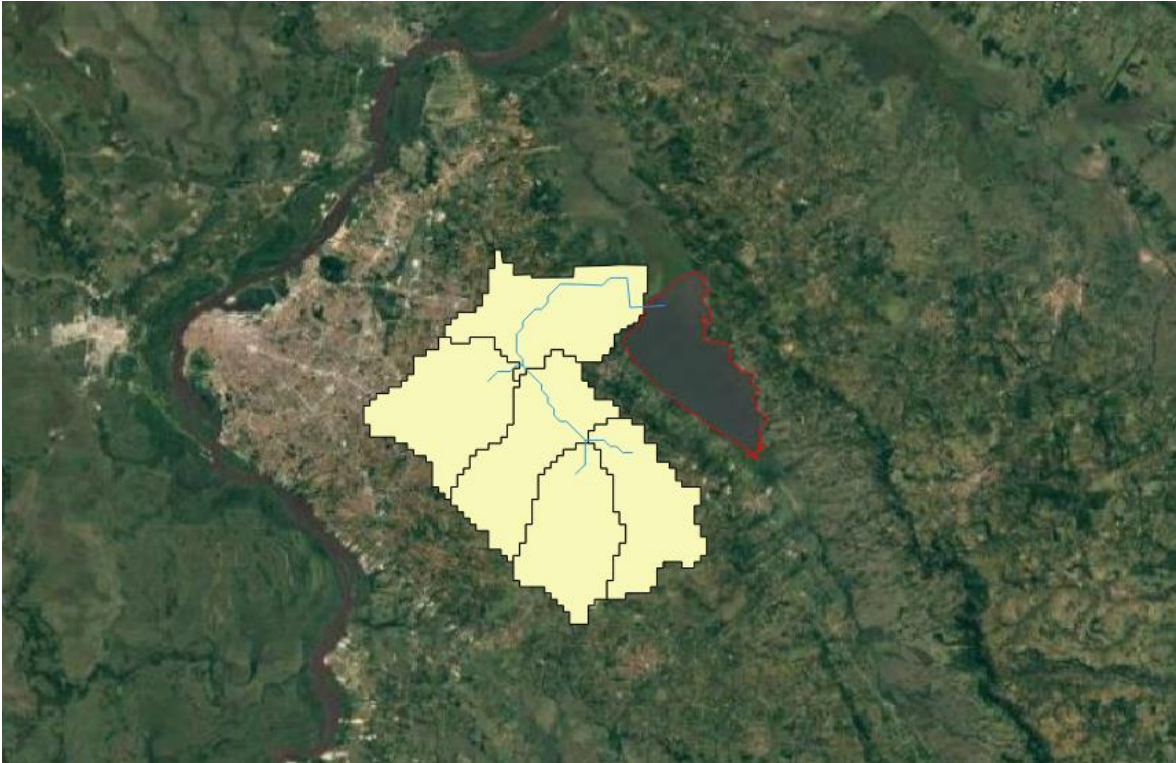


Figura 3. Cuenca del arroyo Yukyry en la AHD modificada

4.2. Interpolación de datos climáticos

En el cálculo de la precipitación acumulada anual en las estaciones meteorológicas de estudio, se pudo notar que la estación “Secretaría Nacional de Deportes” presentaba valores fuera de lo normal en algunos años, además del 11.7% de datos faltantes por lo que se descartó esta estación para el estudio.

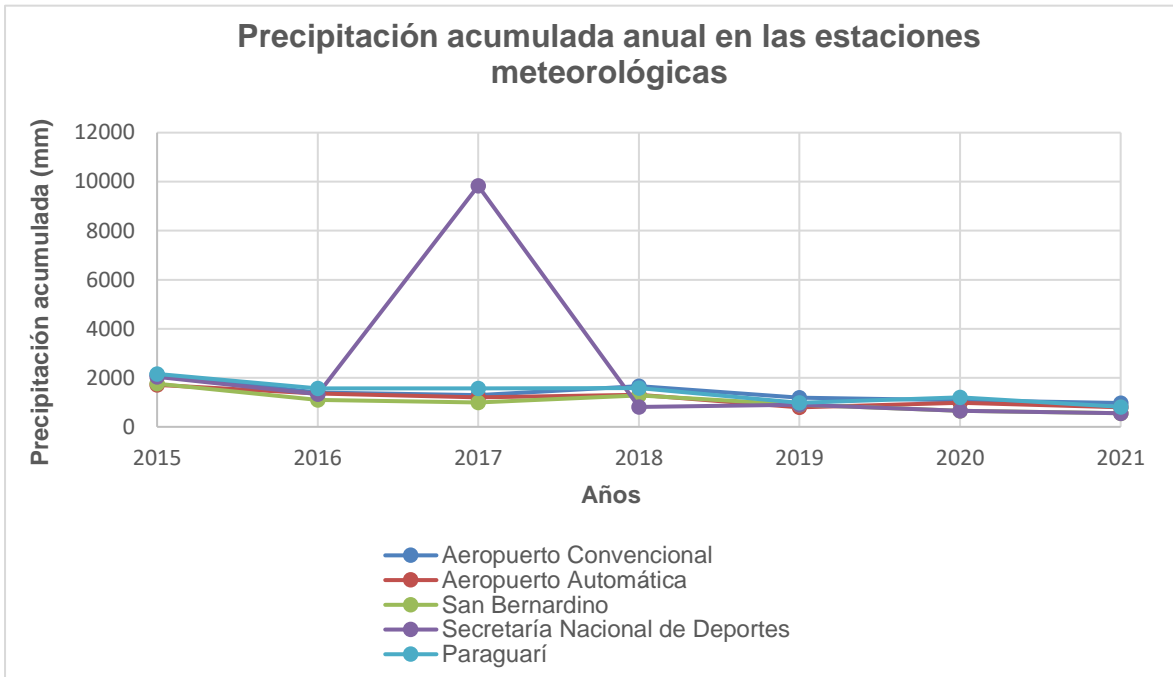


Figura 4. Representación de la precipitación acumulada en las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca de estudio

En la estación “Aeropuerto Luque” se tenía dos series de datos de dos sistemas de medición, en la Figura 5 se muestra en la precipitación acumulada mensual para cada serie.

Entre ambas series se observó una diferencia de aproximadamente 2000 mm para el periodo de análisis, teniendo en cuenta que la serie convencional no presentaba datos faltantes y que la misma es catalogada como oficial por la Dirección de Meteorología e Hidrología del Paraguay, se seleccionó esta para la interpolación de datos en el sistema HydroBID.

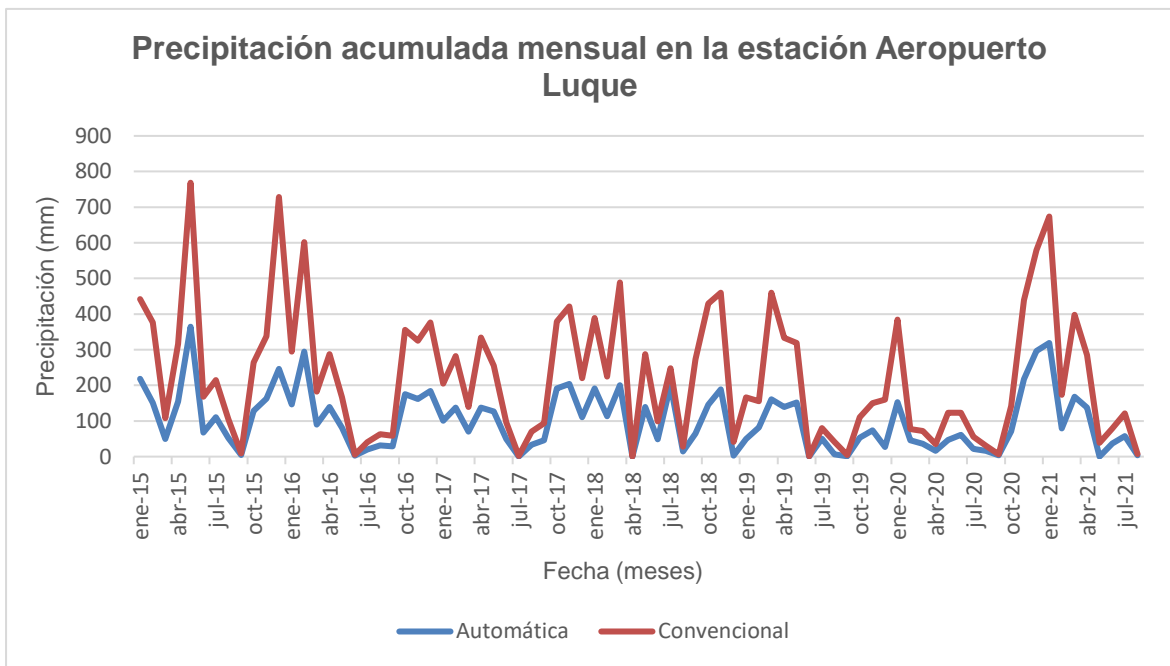


Figura 5. Representación de la precipitación acumulada en la estación Aeropuerto Luque

En cuanto a la estación “Paraguarí” esta no presentaba datos faltantes y los valores diarios mostraban un comportamiento similar en todo el periodo analizado como se ve en el gráfico de dispersión de la Figura 6.

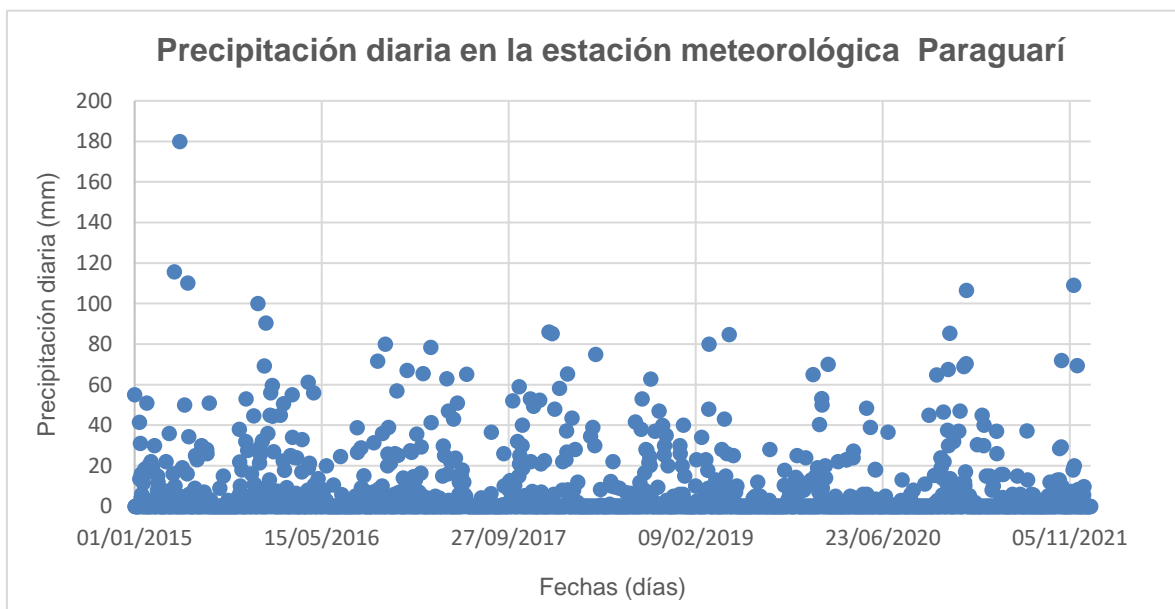


Figura 6. Representación de la precipitación acumulada diaria en la estación Paraguarí

En la Figura 7 se muestra la curva doble masa obtenida para el relleno de la estación “San Bernardino” que presentaba 1.2% donde se obtuvo un valor R^2 cercano a 1 indicando una tendencia lineal entre la estación San Bernardino y la de Aeropuerto Luque.

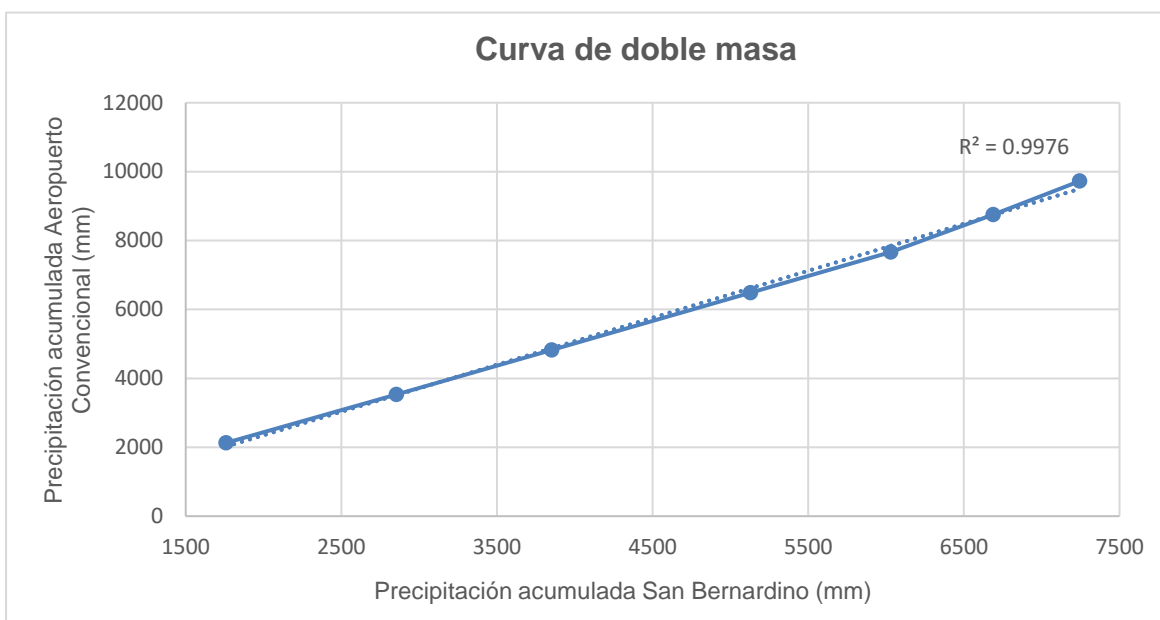


Figura 7. Curva de doble masa obtenido entre la estación Aeropuerto Luque y San Bernardino

De esta manera se obtuvo el coeficiente $q = 0.77$ utilizado para rellenar la serie de datos faltantes en la estación San Bernardino.

Se realizó la interpolación climática correspondiente para el periodo 01/01/2015 al 31/03/2018 con datos diarios de precipitación y temperatura media de las estaciones Aeropuerto Luque (sistema convencional), Paraguarí y San Bernardino.

El promedio de temperatura media diaria interpolada oscila 23.8°C , la temperatura media máxima diaria es de 32.8°C y la temperatura media mínima diaria es de 7.1°C .

En cuanto a la precipitación acumulada diaria, se tiene un promedio interpolado de 4 mm y un valor máximo de precipitación acumulada en el día de 9 mm.

4.3. Calibración del modelo HydroBID

Se procedió a utilizar valores sugeridos, en donde los valores de Número de Curva y Contenido de Agua Disponible se mantuvieron en correspondencia con la base de datos.

Los valores de Número de Curva fijados en la base de datos para la cuenca identificada con el COMID 314578900 se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Características del suelo en la cuenca Yukyry (COMID 314578900) según la base de datos de hidrología analítica del sistema HydroBID

Tipo de Uso de Suelo	Grupo Hidrológico del Suelo D
Bosque Mixto	79
Bosque Siempreverde de hoja acicular	
Bosque Siempreverde de hoja ancha	
Bosque Deciduo de hoja acicular	
Bosque Deciduo de hoja ancha	
Tierras agrícolas mixtas secas/irrigadas y Pastizales	81
Agricultura /Mosaicos de bosques claros	
Agricultura/Mosaico de Pastizales	
Tierras agrícolas secas y pastizales	85
Tierras agrícolas Irrigadas y Pastizales	
Pastizales	87
Sabana	
Humedales Herbáceos	
Humedales Arbolados	

En cuanto al Contenido de Agua Disponible, el valor otorgado para la cuenca mencionada es de 15 cm.

En el análisis de sensibilidad se pudo notar que los parámetros de Número de Curva y Factor de Evapotranspiración en Temporada Latente eran los más sensibles al modelo.

Como el modelo subestima los caudales, se disminuyó el número de curva en 15% a fin de aumentar la escorrentía y se disminuyó el Coeficiente de Evapotranspiración en temporada latente.

Se disminuyó el coeficiente de recesión a fin de obtener un mayor flujo de aguas subterráneas hacia el arroyo, se disminuyó la percolación a fin de disminuir la infiltración hacia la zona saturada profunda.

Entre los factores de incertidumbre a tener en cuenta para la calibración se tiene:

- Serie de caudales corta y con datos faltantes.
- Serie de precipitación con datos faltantes, inconsistentes en ciertos periodos y fuera de la cuenca.

En la Tabla 4 se muestran los valores de cada parámetro utilizado para la calibración de la cuenca Yukyry

Tabla 4. Parámetros de calibración para la cuenca Yukyry

Parámetro	Valor utilizado
Número de curva	0.85
Contenido de Agua Disponible	0.25
Coeficiente de recesión	0.008
Coeficiente de percolación	0.005
Factor de evapotranspiración en temporada de cultivo	1
Factor de evapotranspiración en temporada latente	0.75
Umbral de temperatura	1
Factor de fusión	1

En la Figura 8 se muestra la curva de duración de caudales obtenida, esta curva muestra el porcentaje de tiempo en el que el caudal es igualado o excedido según el modelo.

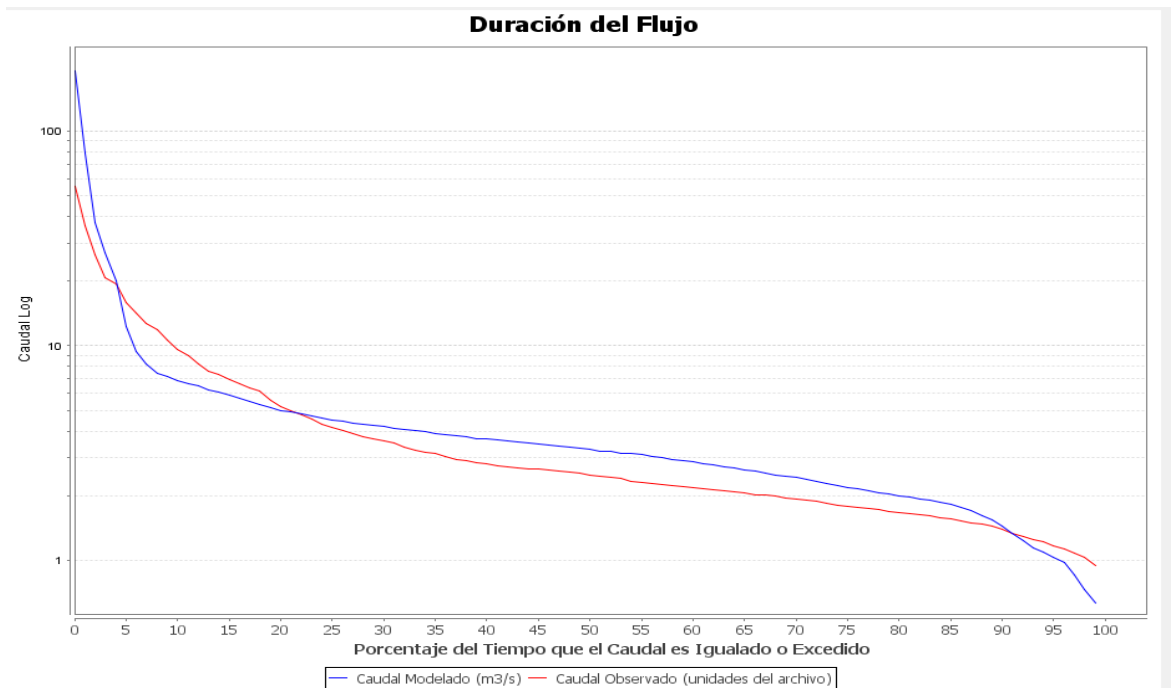


Figura 8. Curva de duración de caudales obtenida

Se pudo notar que el modelo no respondía correctamente al comportamiento diario de la cuenca, esto debido principalmente a los datos de precipitación utilizados como datos de entrada en el modelo, ya que se mencionó que los mismos constituyen un factor de incertidumbre por la inconsistencia de los mismos.

Por otra parte, hay que destacar que según la base de datos hay un porcentaje de la cuenca que está clasificada como humedal, esto hace que los caudales sean retenidos en estas zonas; sin embargo, en el modelo se pudo observar que esto no se simulaba correctamente; es decir los caudales pasaban de valores altos a bajos en un día, y en realidad estos tardaban más días en bajar.

En cuanto a los resultados estadísticos, los valores mensuales obtenidos fueron un coeficiente Nash-Sutcliffe de 0.4. Según Cabrera (2012) un valor de 0.4 a 0.6 puede clasificar el ajuste como bueno.

Los resultados anuales obtenidos muestran que para el año 2016 el caudal en la cuenca de calibración era de 4.08 m³/s y el flujo simulado es de 4.38 m³/s, para el año 2017 se tiene un caudal de 4.44 m³/s y el sistema simula en 4.34 m³/s y para el año 2018 el caudal observado era de 5.76 m³/s y el sistema simula en 6.75 m³/s; hay que tener en cuenta que el año 2018 solo tiene un trimestre de datos observados.

Es importante destacar que el sistema HydroBID utiliza como mínimo un año de calentamiento para la simulación.

4.4. Caudales obtenidos

En la Tabla 5 se presentan los caudales promedio mensuales para el periodo de estudio obtenido en toda la cuenca del arroyo Yukyry.

Tabla 5. Caudales obtenidos en la cuenca Yukyry

Mes	Caudal (m3/s)
Enero	6.108370361
Febrero	7.546663464
Marzo	5.353393564
Abril	5.992993102
Mayo	8.433091967
Junio	5.0268973
Julio	4.049053029
Agosto	2.863593598
Septiembre	1.989350153
Octubre	4.461989658
Noviembre	6.312070796
Diciembre	9.650326577

Entre los caudales obtenidos se tiene el mes de diciembre con caudales más altos y agosto con caudales más bajos. En promedio se tiene un caudal de 6.2 m³/s que ingresa al lago Ypacaraí por parte de la cuenca del arroyo Yukyry.

4.5. Carga de Fósforo Total

Teniendo en cuenta la información disponible, la carga de fósforo total que ingresa al lago Ypacaraí se muestra en la Figura 9.

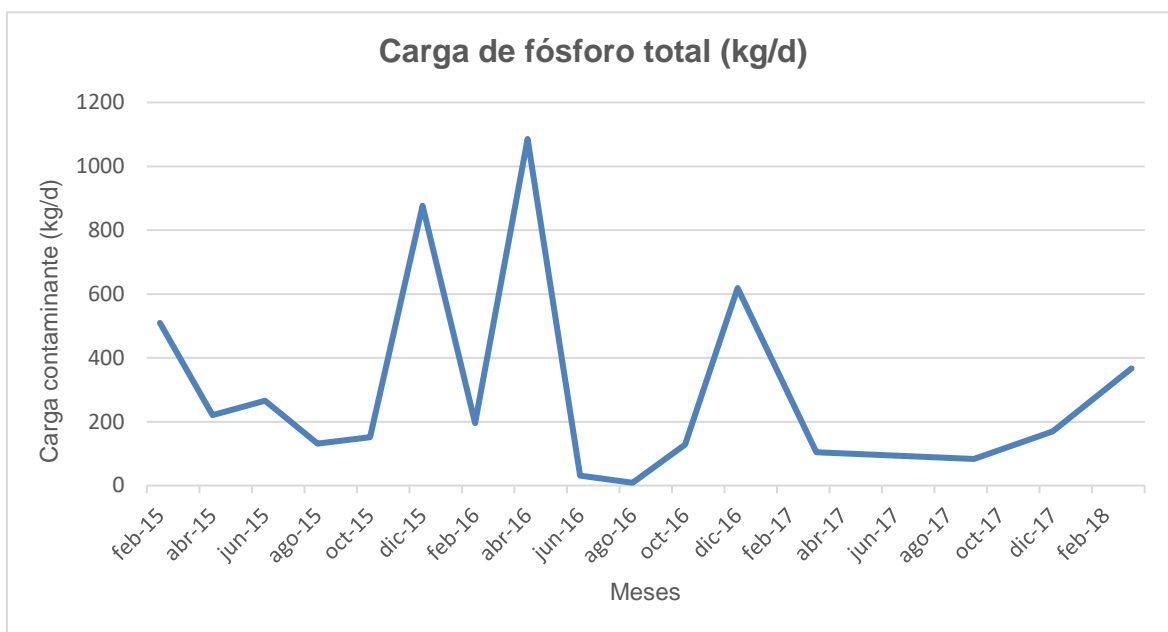


Figura 9. Carga de Fósforo Total en la cuenca del Yukyry

Se puede notar que la carga de fósforo total que supera el valor promedio se da principalmente en los meses de diciembre en donde inicia el periodo de verano y las temperaturas aumentan.

5. CONCLUSIONES

El modelo HydroBID es una herramienta útil para la gestión de recursos hídricos a pesar de no disponer mucha información como datos de entrada.

La calibración puede realizarse de manera diaria o mensual y los factores de incertidumbre influyen en ello, en el caso de la cuenca Yukyry la falta de información meteorológica, así como la corta serie de caudales han sido componentes que influyeron en la calibración.

El modelo arroja buenos resultados de manera mensual y anual. Para mejores resultados diarios se debe tener más información de precipitación principalmente en estaciones meteorológicas dentro de la cuenca.

Para lograr una calibración mejorada se debe tener una serie de caudales más amplia que permita observar el comportamiento del flujo de la cuenca en diferentes periodos.

Por otra parte, la cuenca Yukyry aporta un volumen de agua al lago en promedio de 6.2 m³/s y la carga más alta de fósforo total se dan en los meses de diciembre.

La herramienta HydroBID puede servir como sistema de monitoreo del flujo de agua que entra al lago Ypacaraí y servir como dato de entrada para otros modelos como por ejemplo los de escenarios climáticos o calidad de agua.

6. ANEXOS

6.1. Imágenes de la situación del lago Ypacaraí



Figura 10. Situación crítica del lago Ypacaraí en el año 2013
Fuente: (El Espectador, 2013).



Figura 11. Situación del lago Ypacaraí en el año 2019
Fuente (Última Hora, 2019)

6.2. Representación conceptual del modelo GWLF utilizado en HydroBID

En la Figura 12 se muestra la representación conceptual de GWLF. El modelo se aplica en una cuenca de captación con capas de suelo saturadas y no saturadas. La escorrentía y los flujos base se calcula por cada cuenca de captación. La precipitación cae y cierta parte se evapotranspira y otra parte de ella se infiltra, el exceso de infiltración se calcula como escorrentía y la liberación gradual de la capa saturada como flujo base. Otra parte de la infiltración descende hasta la capa no saturada, luego de un tiempo, el agua infiltrada de la capa no saturada pasa a reponer el volumen almacenado de la capa saturada y el agua de esta capa entra en el canal de corriente como flujo base y se suma a la escorrentía de la cuenca y otros flujos de entrada provenientes de las cuencas de aguas arriba para proporcionar el volumen de flujo de corriente para el día (Moreda *et al.*, 2014).

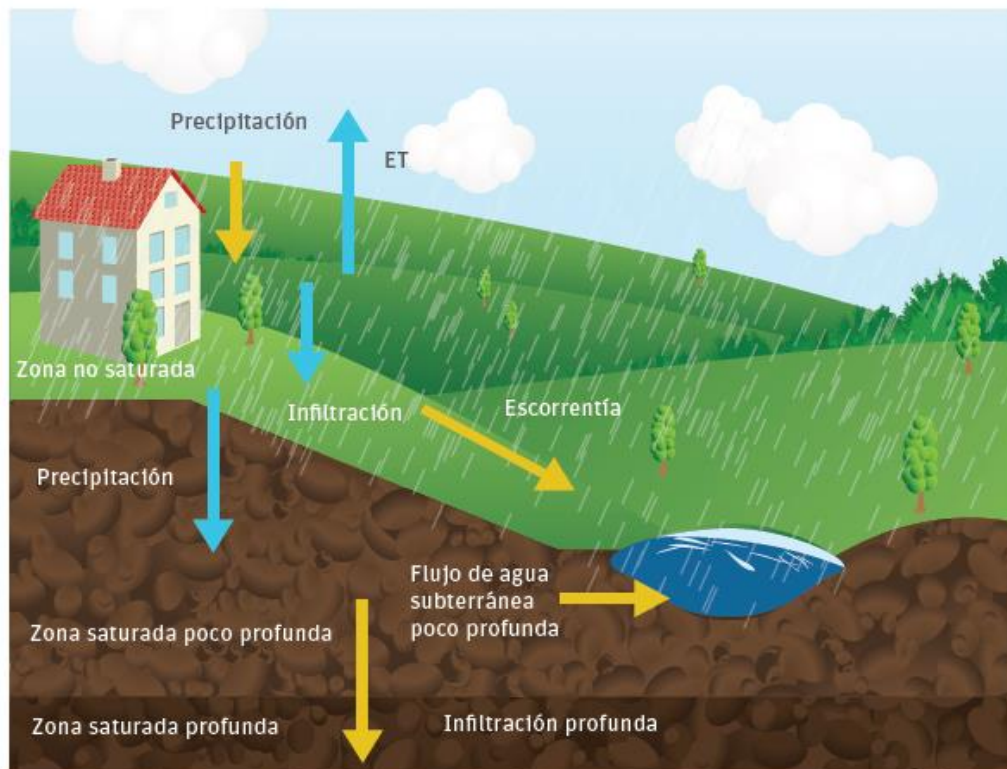


Figura 12. Representación conceptual del modelo GWLF

Fuente: (Moreda *et al.*, 2014)

6.3. Fósforo total en el punto de medición

En la Figura 13 se muestra los valores de fósforo total medidos en el punto con coordenadas UTM Zona 21 J 456961.00 m E 7206341.87 m S en la cuenca Yukyry.

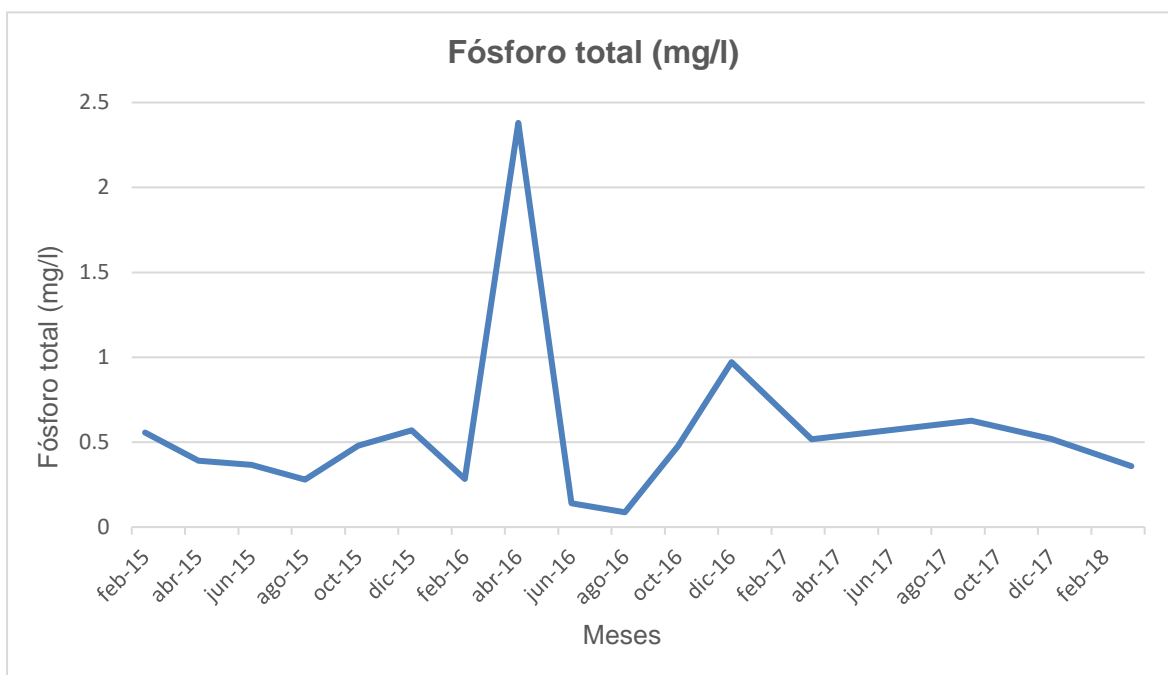


Figura 13. Fósforo total en el punto de muestreo.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Informe de monitoreo de calidad de agua por campañas de muestreo en el lago Ypacaraí (UNA, 2015)

6.4. Balance hídrico obtenido en la cuenca del arroyo Yukyry

En la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos con el sistema HydroBID en el periodo 2016 al 2018 en la cuenca del arroyo Yukyry. Estos componentes del balance, así como la unidad de medida de los mismos son dados por HydroBID en formato .csv.

En donde:

- “Prec” es la precipitación interpolada en cm
- “T” es la temperatura interpolada en °C
- “Ev.” es la evapotranspiración en la salida en cm
- “Almac. No sat.” es el almacenamiento no saturado en la cuenca de salida en cm
- “Perc.” es la percolación en cm
- “Almac. Sat.” es el almacenamiento saturado en la cuenca de salida en cm
- “Perc.” es la percolación profunda en cm
- “Esc.” es la escorrentía en la salida en cm
- “Desc. Aguas Subt.” es la descarga de aguas subterráneas poco profundas en cm
- “Caudal” es la unidad de caudal en cm.

Tabla 6. Balance hídrico obtenido con el sistema HydroBID en la cuenca del arroyo Yukyry

Año	Prec.	T	Ev.	Almac. No sat.	Perc.	Almac. Sat.	Perc.	Esc.	Desc. Aguas Subt.	Caudal
2016	124.9	23	75.1	2.0	37.6	9.7	17.7	13.4	28.6	42.0
2017	125.0	24	73.7	1.8	35.8	8.6	15.6	16.4	25.2	41.6
2018	47.7	6	24.7	0.5	12.8	1.9	3.4	9.0	5.5	14.5

7. BIBLIOGRAFÍA

- BETA Studio – Thetis. (2015). Plan de saneamiento integral de la cuenca del lago Ypacaraí "Documentos finales y anteproyectos de ingeniería". Asunción: BID Proyecto #: PR-T1162.
- Bibi, F.; Mohd, F.; Mohd, S.; Jaafar, O.; Abdul Jamil, N. (2020). Imputation methods for recovering streamflow observation: A methodological review. *Cogent Environmental Science*, 6:1.
doi:<https://doi.org/10.1080/23311843.2020.1745133>.
- BID. (2022). Iniciativa: HYDROBID. Banco Interamericano de Desarrollo: <Accesible en URL: <https://www.iadb.org/es/agua-y-saneamiento/about-hydro-bid>>.
- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. <Accesible en URL: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf>.
- Campos, D. (1992). Procesos del ciclo hidrológico. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Carvajal, Y.; Castro, L. (2010). Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente(9), 15-25. <Accesible en URL: <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434002.pdf>>.
- CONALAYPA. (2020). Comisión Nacional de Gestión y Manejo del Lago Ypacaraí. <Accesible en URL: <https://conalaypa.gov.py/>>.
- CHE. (2017). Estudio del estado trófico del embalse de El Val (Zaragoza) y programa de medidas. Confederación hidrográfica del Ebro. <Accesible en URL: https://www.chebro.es/documents/20121/55149/EC16013_SENSIBLES_VAL_IF_vD.pdf>.
- El Espectador. (2013). Recuperar el lago Ypacaraí en Paraguay costará más de US\$ 520 millones. <Accesible en URL: <https://www.elespectador.com/mundo/america/recuperar-el-lago-ypacarai-en-paraguay-costara-mas-de-us-520-millones-article-453631/>>.
- Facetti M. J.; Lozano, F.; Flores, F. (2006). Aspectos Hidrológicos del Lago de Ypacaraí : Un caso de estudio. *Revista de la sociedad científica del Paraguay*. <Accesible en URL: https://www.researchgate.net/publication/326786081_Aspectos_Hidrologico>

- s_del_Lago_de_Ypacarai_Un_caso_de_estudio>.
- García, P. (2015). Imputación de Datos en Series de Precipitación Diaria. Caso de Estudio Cuenca del Río Quindío. (U. Libre-Barranquilla, Ed.) *INGENIARE*, 10(18), 73-86. <Accesible en URL: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/view/539/421>>.
- García, C. (2014). Utilización de información satelital y modelación hidrológica distribuida para el manejo integrado de recursos hídricos. Universidad Católica de Córdoba, Argentina. <Accesible en URL: <http://pa.bibdigital.ucc.edu.ar/id/eprint/203>>.
- Gómez, V. (2016). QGIS: Geografía, Computación, Matemáticas. *Revista Electrónica de Matemáticas*, 1(2), 46-72. <Accesible en URL: <https://sahuarus.unison.mx/index.php/sahuarus/article/view/35/46>>.
- Lobo, L. (2004). Guía Metodológica para la Delimitación del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas Secas de América Latina y el Caribe. CAZALAC – UNESCO PHI – Gobierno de Flandes, Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe. <Accesible en URL: http://www.cazalac.org/mapa_alc_guia.php>.
- Moreda, F.; Miralles-Wilhelm, F.; Muñoz Castillo, R. (2014). Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos . <Accesible en URL: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Hydro-BID-Un-sistema-integrado-para-la-simulaci%C3%B3n-de-impactos-del-cambio-clim%C3%A1tico-sobre-los-recursos-h%C3%ADdricos-Parte-2.pdf>>.
- Norliyana, W.; Ismail, W.; Zawiah, W.; Zin, W.; Ibrahim, W. (2017). Estimation of rainfall and stream flow missing data for Terengganu, Malaysia by using interpolation technique methods. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 13(3), 213-217. <Accesible en URL: <https://mjfas.utm.my/index.php/mjfas/article/view/578>>.
- Rineer, J.; Bruhn, M.; Miralles-Wilhelm, F.; Muñoz Castillo, R. (2014). Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe. <Accesible en URL: <https://publications.iadb.org/es/base-de-datos-de-hidrologia-analitica-para-america-latina-y-el-caribe>>.
- Rodríguez, A. (2019). Estudio de la contaminación del lago Ypacaraí e introducción de un dron acuático para el monitoreo de la calidad del agua. Escuela

- Politécnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. <Accesible en URL: <https://idus.us.es/handle/11441/93281>>.
- Romero, I. (2019). Eutrofización. Carga crítica de fósforo. Universitat Politècnica de València. <Accesible en URL: <https://riunet.upv.es/handle/10251/116293>>.
- Sierra, C. (2011). Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico. Universidad de Medellín.
- Última Hora. (2019). El Ypacaraí presenta afloramiento masivo de algas tóxicas en Areguá. <Accesible en URL: <https://www.ultimahora.com/el-ypacarai-presenta-afloramiento-masivo-algas-toxicas-aregua-n2797127.html>>.
- UNA. (2015). Monitoreo de Calidad de Agua por Campañas de Muestreo en el Lago Ypacarai. Universidad Nacional de Asunción.
- UNESCO. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. París. <Accesible en URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378890>>.
- Universidad Nacional de Asunción. (2005). Investigación de las condiciones hidrológicas y geológicas de la cuenca del lago Ypacarai. <Accesible en URL: <http://mades.gov.py/sites/default/files/Estudio%20%20Hidrologico%20del%20Lago%20Ypacarai.pdf>>.
- WMO. (2018). Guide to Climatological Practices. <Accesible en URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5541>.