

Modelación Hidrológica HEC-HMS

Contenido

Generalidades	3
Área de Estudio	4
Cuenca del río Apa.....	4
Cuenca del río Aquidabán	5
Cuenca del río Ypané	6
Cuenca del río Jejuí.....	7
Cuenca del río Manduvirá	8
Materiales y Métodos	10
Software utilizado	10
Modelo Hidrológico HEC-HMS.....	10
HEC-DSS	11
SOIL GRIDS	11
SOIL WATER CHARACTERISTICS.....	11
QGIS	11
Datos de elevación	11
Datos de Tipo y Uso de Suelo	12
Datos de Series de Tiempo	14
Datos de precipitación	14
Datos hidrométricos	15
Métodos utilizados para los componentes del ciclo hidrológico en el HEC-HMS	16
Modelo de Pérdidas.....	16
Caudal base.....	18
Modelo de Transformación: Hidrograma Unitario de Clark	19
Cálculo de Tránsito de Hidrograma	19
Distribución de precipitación	20
Evapotranspiración	21
Estimación de caudales sintéticos	22
Modelación Hidrológica	23
Modelo Conceptual del Sistema en HEC-HMS	23
Cuenca del río Apa	24
Cuenca del río Aquidabán.....	25
Cuenca del río Ypané	26

Cuenca del río Jejuí	27
Cuenca del río Manduvirá	28
Calibración	30
Cuenca del río Apa	31
Cuenca del río Aquidabán.....	34
Cuenca del río Ypané	36
Cuenca del río Jejuí.....	39
Cuenca del río Manduvirá	42
Conclusiones y Recomendaciones.....	46

Generalidades

El Paraguay se encuentra dentro de la sexta cuenca más grande del mundo, donde los principales ríos: Río Paraguay y Río Paraná, se desarrollan a lo largo de la Región Oriental. La cuenca del Río Paraguay ocupa 106.907 km² (67%) en esta región, estos a su vez tienen importantes afluentes que bañan a esta región.

Las cuencas hidrográficas más importantes de la región Oriental, se consideran como aporte lateral, siendo sus cauces los principales afluentes de río Paraguay: la Sub cuenca del Río Apa con 15.263 km², Sub cuenca del Río Aquidabán con 11.769 km², Sub cuenca del Río Ypané con 10.266 km², Sub cuenca del Río Jejuí Guazú con 22.719 km², Sub cuenca del Río Manduvirá con 10.583 km², Sub cuenca del Río Piribebuy con 1.624 km², Sub cuenca del Río Salado con 1.128 km², Sub cuenca del Río Tebicuary con 26.295 km². En la figura xx se ilustran las principales cuencas y ríos del país.



Figura x. Principales cuencas hidrográficas de la Región Oriental. Fuente: Elaboración propia

De la margen derecha, Región Occidental o Chaco no se consideran las cuencas como aporte lateral al río Paraguay, esto atendiendo a que no se identifican cauces activos que aporten significativamente al cauce del río Paraguay frente a los cauces de la Región Oriental ya indicados. Los cauces que llegan al río Paraguay en la Región Occidental como los riachos Negro, Confuso, Verde, Montelindo y otros sólo se activan en periodos húmedos y por tanto no se los considera en esta fase de modelación hidrológica para el modelo hidráulico del río Paraguay. El único cauce relativamente importante de la región, el río Pilcomayo, solo tiene cauce activo binacional con la Argentina en unos 60 kilómetros de la frontera boliviana y luego desaparece como cauce activo a través de 2 brazos, uno en cada país y que alternativamente distribuyen aguas en periodos lluviosos a cada uno ellos. A nivel público y educativo, aún se tiene la creencia que el río Pilcomayo es frontera entre Argentina y Paraguay, el cual ya ha desaparecido en más de 300 kilómetros de cauce límite por erosión retrógrada en los últimos 70 años y el cauce que llega al río Paraguay entre Puerto Falcón y Clorinda solo es realimentación de la cuenca baja por lluvias.

Más abajo, en territorio Argentino se tiene el río Bermejo el cual descarga al sur de Formosa y no se considera en este estudio, ya que se analiza el río Paraguay hasta Asunción.

Área de Estudio

De esta forma, para el presente proyecto se consideraron las cuencas de mayor aporte al río Paraguay en la Región Oriental, enfocándose en las que afectan principalmente al caudal que llega a Asunción.

Cuenca del río Apa

Posee un área de 15.263 km² (figura xx), de los cuales el 75% de la cuenca se encuentra en territorio brasileño y el 25% restante en el paraguayo. La naciente del río se encuentra localizada en el estado brasileño de Mato Grosso do Sul y en el departamento de Amambay en Paraguay, mientras que desemboca en el río Paraguay en el estado de Mato Grosso do Sul y el departamento de Concepción (Echeverría et al., 2011).

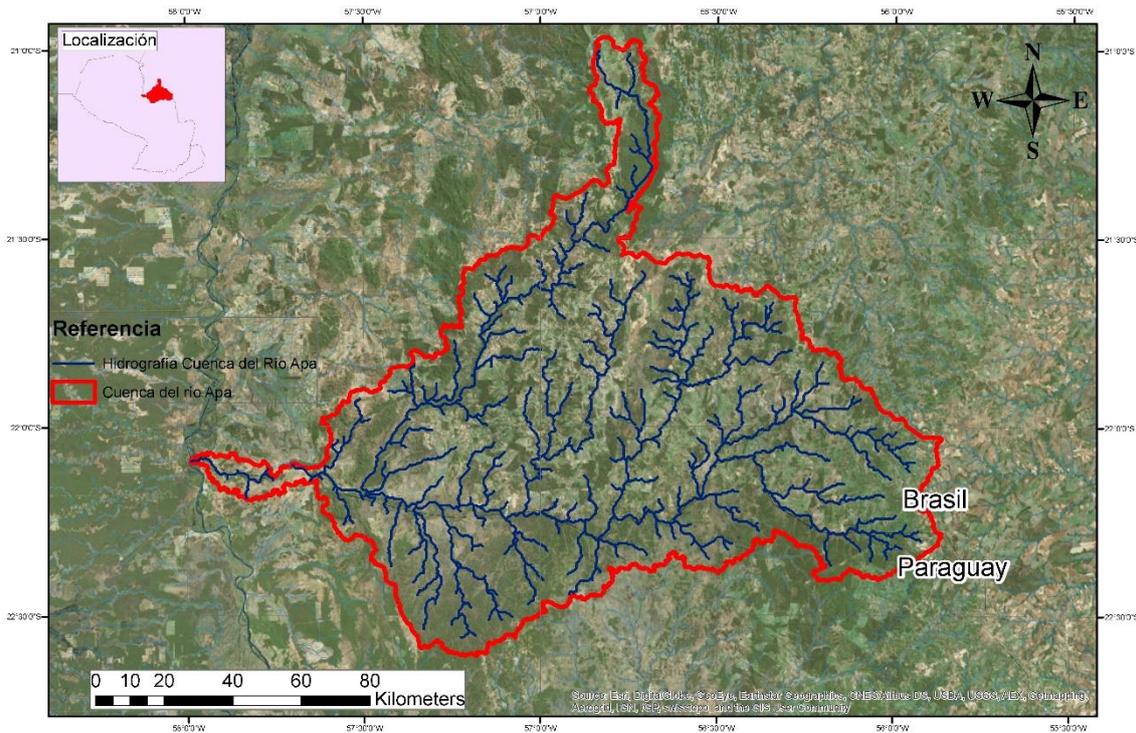


Figura x. Cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia

El río Apá recorre un territorio muy plano, presentando numerosos meandros en todo su trayecto. Entre sus afluentes más importantes, se encuentran los ríos Pirapucu, Caracol y Perdido (Echeverría et al., 2011).

Entre las principales actividades desarrolladas por la población de la cuenca, las más importantes son la pesca, el comercio y el turismo. El comercio está potenciado por tener tanto frontera fluvial como seca (Echeverría et al., 2011).

Cuenca del río Aquidabán

La cuenca del Río Aquidabán se encuentra en su totalidad en territorio paraguayo (Figura xx). Se extiende de este al oeste de la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil, al norte con la cuenca del Río Apa, al noroeste con la cuenca del Río Tagatiyá y al sur con la cuenca del Río Ypané (Chávez et al., 2006).

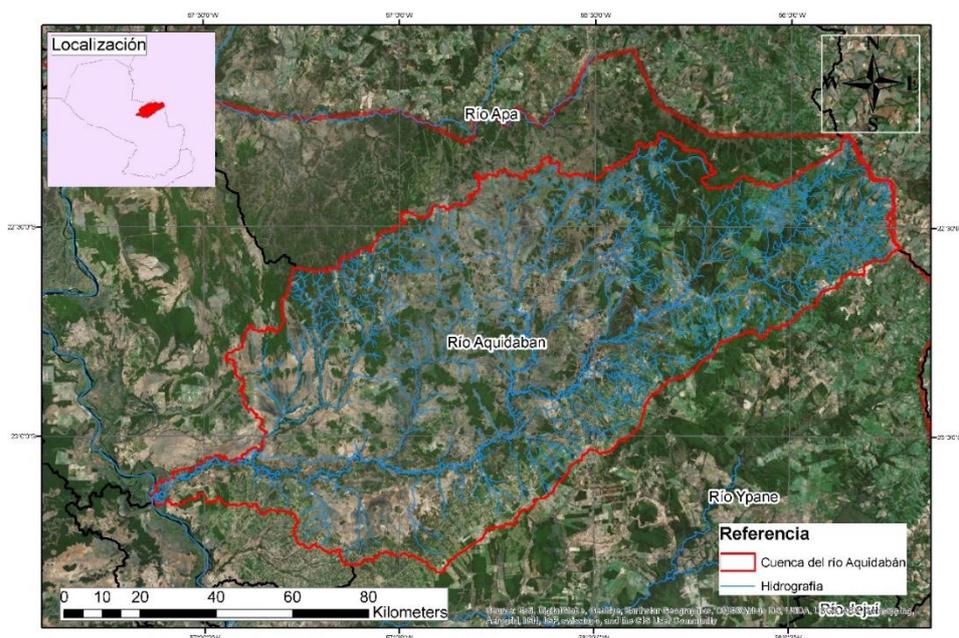


Figura x. Cuenca del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia.

La superficie de la cuenca es de aproximadamente 11.769 Km² (2,9 % del país y 7,4 % de la Región Oriental) (Chávez et al., 2006).

La longitud de su curso es de aproximadamente 250 km, desembocando en el km 744 a contar desde la confluencia de los ríos Paraguay y Paraná. Este río es navegable para embarcaciones menores, pero en época de estiaje la navegación se ve obstaculizada por la presencia de arrecifes (Chávez et al., 2006).

El río Aquidabán posee numerosos afluentes, entre los cuales se pueden citar como principales al Trementina, cuyo curso tiene una extensión de 76 km, y al Negla, con un curso de 64 km de longitud. Otros afluentes en su margen derecha son el Arroyo Chacalina y el Arroyo Tacuara; mientras que en su margen izquierda se encuentran el Arroyo Primavera, Yaguaray Guazú, Yuquyry y Gasory (Chávez et al., 2006).

El clima regional corresponde al clima tropical cálido, característico de la zona situada al norte del trópico de Capricornio. Las temperaturas son altas en la mayor parte del año, con lluvias más probables en los meses de verano. La temperatura media anual típica es de unos 23 °C, con una máxima promedio de 30 °C en verano y una mínima de promedio de 18 °C en los meses más fríos. Estas temperaturas varían a su vez, de mayor a menor a medida que uno se aleja del río Paraguay hacia la ciudad de Pedro Juan Caballero. La precipitación anual varía en el mismo sentido pero aumentando, registrándose entre 1.300 a 1.700 mm en las cercanías del río Paraguay y entre 1.700 a 1.900 mm hacia Pedro Juan Caballero (Chávez et al., 2006).

Los vientos predominantes de esta región corresponden al viento norte proveniente del Brasil, caracterizado por ser cálido y húmedo, y generalmente anticipa lluvias (Chávez et al., 2006).

Cuenca del río Ypané

Se extiende de este a oeste en la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil (límite natural de la cordillera de Amambay), al oeste con el Río Paraguay, al norte con la cuenca del Río Aquidabán y al sur con la cuenca del Río Jejuí Guazú. Abarca en parte a los

departamentos de Concepción, San Pedro y Amambay (Chávez et al., 2006), como se ve en la figura xx.

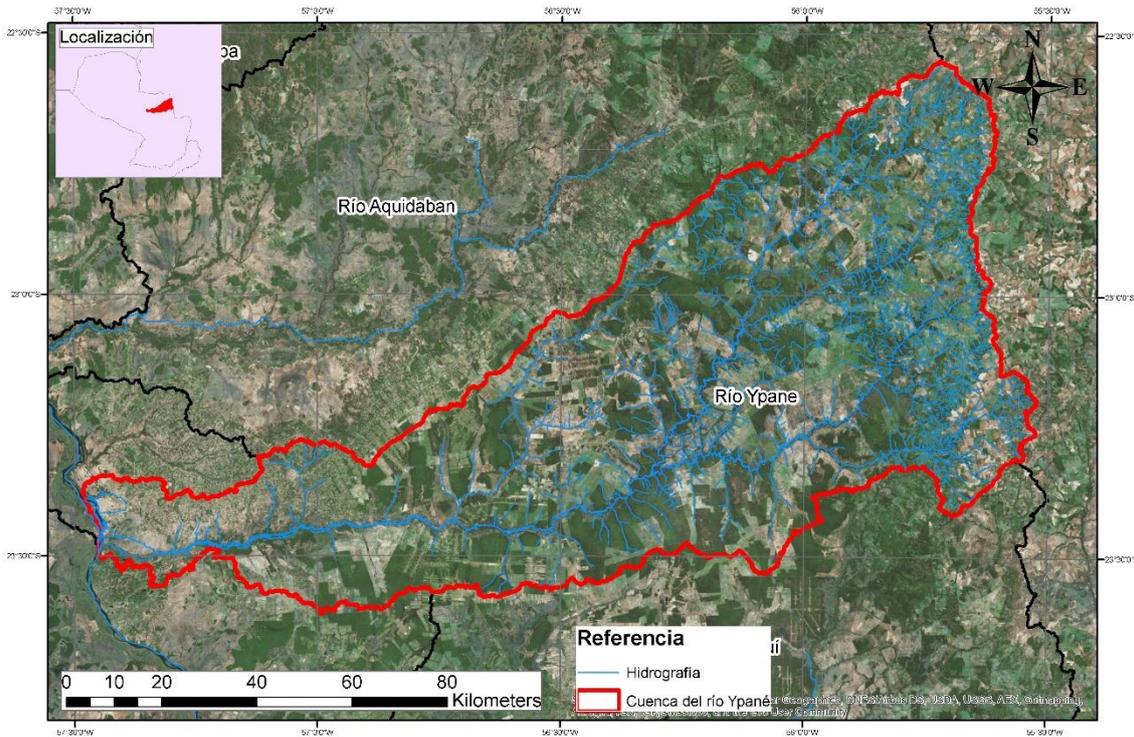


Figura x. Cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

La superficie de su cuenca es de 10.266 Km² y la longitud del curso principal es de 282 km. aproximadamente, desembocando en la margen izquierda del río Paraguay a la altura del km 692 contando desde la confluencia de los ríos Paraguay y Paraná y a unos 8 km aguas abajo del Puerto de Concepción (Chávez et al., 2006).

Entre los numerosos afluentes del río Ypané se citan como principales el río Ypané-mi de 60 km de longitud, el Guazú cuyo curso tiene una extensión de 72 km y el Cagatá de 84 km (Chávez et al., 2006).

El clima regional de la cuenca puede clasificarse como tropical. En general, las temperaturas son elevadas en la mayor parte del año y las precipitaciones son más frecuentes en épocas de verano. El viento predominante de la cuenca es el norte que proviene del Brasil, es cálido y húmedo y generalmente anticipa lluvias, según la DMH (Chávez et al., 2006).

Cuenca del río Jejuí

Se extiende de este a oeste de la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil, al oeste con el Río Paraguay, al norte con la cuenca del Río Ypané y al sur con la cuenca del Río Manduvirá. El Río Jejuí Guazú desemboca en el río Paraguay hacia su margen izquierda en el km 571 (contado a partir de la confluencia Paraguay-Paraná) a unos 34 km. aguas arriba de Puerto Rosario (figura xx). La superficie de la cuenca del Río Jejuí Guazú es de aproximadamente 22.719 km² (equivale al 14.2 % de la Región Oriental y al 5.6 % del país) (Chávez et al., 2006).

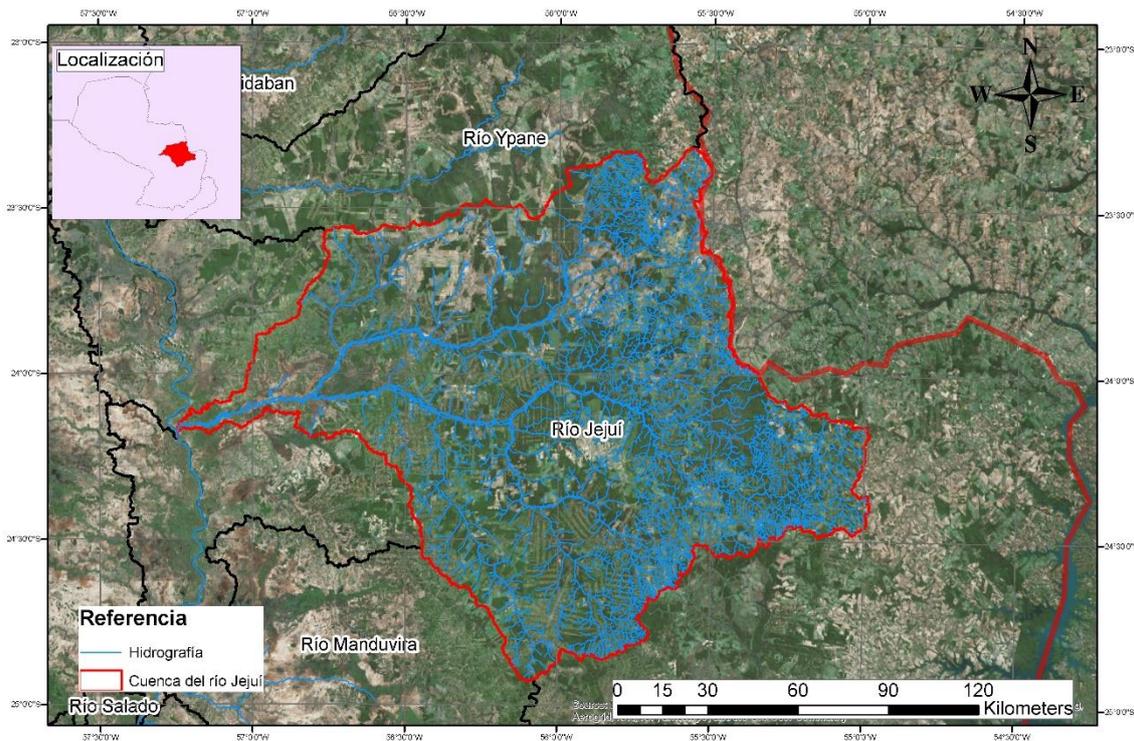


Figura x. Cuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

La longitud de su curso tiene una extensión aproximada de 263 km y está alimentado por dos grandes afluentes en su margen derecha: río Jejuí-mi y el río Aguararay-Guazú. (de unos 220 km aproximadamente de extensión). A su vez cada uno de estos afluentes recibe las aguas de numerosos riachos y arroyos (Chávez et al., 2006).

Los afluentes más importantes en su margen izquierda son: río Curuguaty y arroyo Capiibary. Este río es navegable para buques pequeños hasta aproximadamente 200 km de la confluencia con el río Paraguay (Chávez et al., 2006).

El clima regional corresponde al clima tropical cálido. La temperatura media anual es de unos 21 a 23 °C, con una máxima promedio de 28 °C en enero y una mínima promedio de 17 °C en los meses más fríos (año 1.997). La precipitación anual varía desde 1.300 a 1.700 mm en las cercanías de la desembocadura hasta 1.900 mm en la naciente del río, en la zona de Canindeyú (Chávez et al., 2006).

Cuenca del río Manduvirá

Se encuentra en su totalidad en territorio paraguayo, extendiéndose de este a oeste de la Región Oriental por una superficie de aproximadamente 10.583 km², lindando al este con las cuencas de los Ríos Acaray y Monday, al suroeste con la cuenca del Río Piribebuy, al norte con la cuenca del Río Jejuí Guazú y al sur con la cuenca del Río Tebicuary (figura xx) (Chávez et al., 2006).

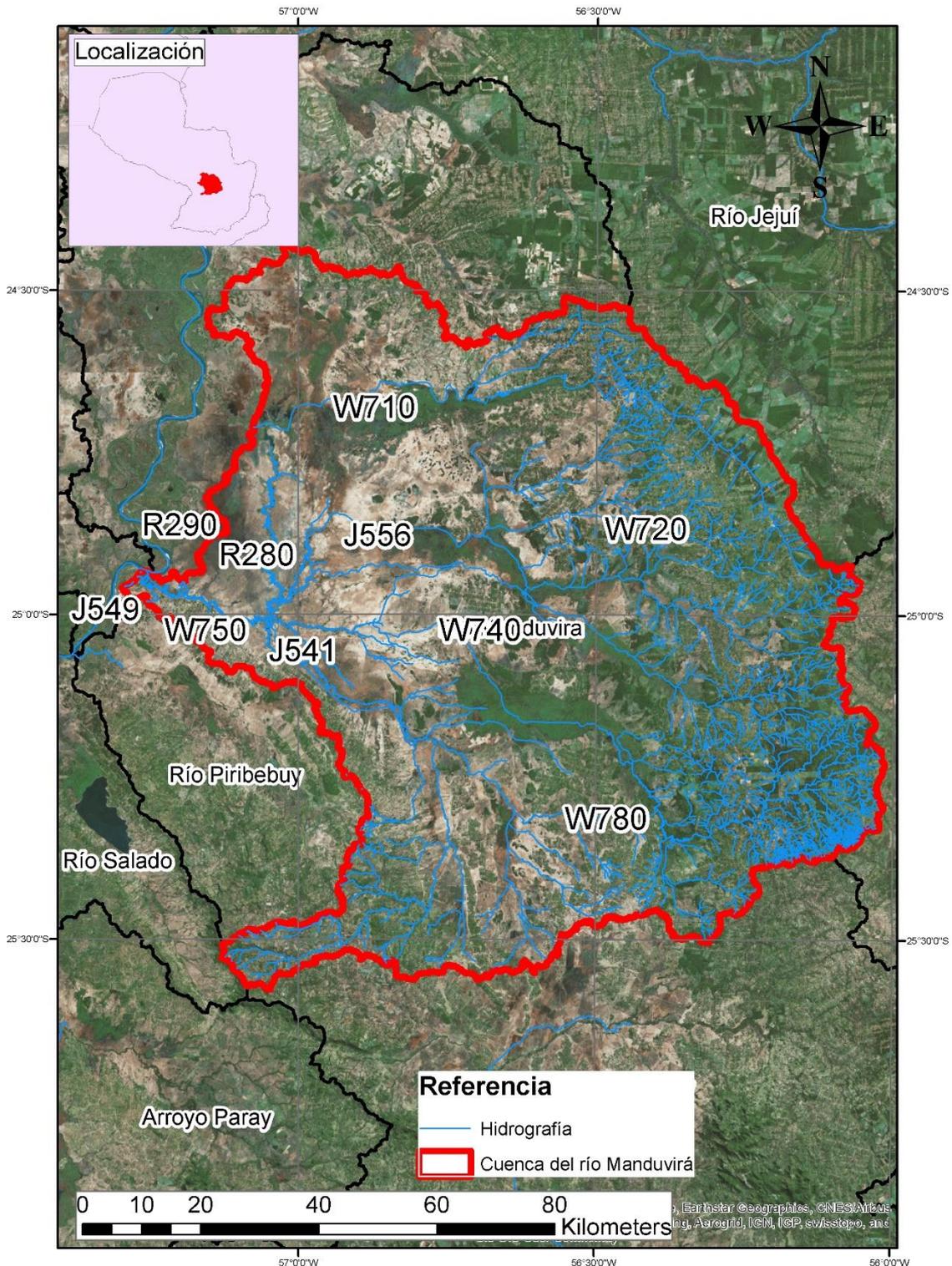


Figura x. Cuenca del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

La Cuenca del Río Manduvirá incorpora tres cursos caudalosos, el Arroyo Tobatiry con su afluente el Arroyo Peguajho, el Arroyo Yhú y el Arroyo Yhaguy al Sur (Toñánez, 2014).

La red de drenaje compuesta por tributarios de los citados cursos que son alimentados por numerosos esteros y campos bajos que ocupan más del 50 % de la cuenca media (Toñáñez, 2014).

El clima regional corresponde al clima tropical cálido. Las temperaturas son altas en la mayor parte del año siendo la media anual de unos 22 a 23 °C, con una máxima promedio de 28 °C en verano y una mínima promedio de 18 °C en los meses más fríos (año 1997) (Chávez et al., 2006).

El caudal promedio (17 años de registro - Balance Hídrico DINAC) del Río Manduvirá es 136 m³/s, equivalente a 456 mm de escorrentía. La precipitación media de la cuenca está en el orden de 1.481 mm anual, con una evapotranspiración de 1.025 mm, lo que confiere a la cuenca la característica de que en ella no se registra déficit hídrico, al contrario hay un excedente importante (Toñáñez, 2014).

Materiales y Métodos

Software utilizado

Modelo Hidrológico HEC-HMS

El HEC-HMS es un programa de dominio público, para modelación hidrológica desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, en el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) y está diseñado para simular el proceso de precipitación y escurrimiento en cuencas y puede ser aplicado a un amplio rango de regiones geográficas como grandes cuencas sin intervención. Además, los resultados pueden ser aplicados para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervención en cuencas, reducción de daños por inundaciones, operación de sistemas, entre otros.

La aplicación del modelo en este trabajo, estará enfocada a obtener hidrogramas de salida de cuencas hidrográficas a partir de datos de precipitación en un periodo de tiempo de 1 o varios años, como simulación continua.

El modelo HEC-HMS simula 4 (cuatro) componentes del ciclo hidrológico, brindando una gran variedad de métodos que pueden ser utilizados para cada componente. La selección de uno u otro método dependerá del tipo de modelo que se quiera crear (de evento o continuo), así como de la calidad y cantidad de datos disponibles.

Estos componentes son los siguientes (Sánchez, 2012):

- a) Vegetación, superficie, pérdidas: esta primera etapa calcula qué parte de la precipitación caída va a generar escorrentía directa (Precipitación Neta).
- b) Transformación: el programa calcula la escorrentía directa producida por la precipitación neta. Para esta etapa, existen diversos métodos que pueden utilizarse y se ha seleccionado el Hidrograma Unitario de Clark atendiendo a los pocos datos medidos disponibles.
- c) Caudal Base: en esta etapa el programa suma la escorrentía directa a la escorrentía básica (si existía previamente). Calcula la evolución de la escorrentía básica a lo largo del tiempo. Existe una gran variedad de métodos, pero solo uno trabaja en conjunto con el modelo de pérdidas SMA para simulaciones continuas, el Linear Reservoir.
- d) Tránsito de Avenidas: el programa calcula cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce, o a través de un depósito o embalse y se utiliza el método Muskingum Kunge que se describe más adelante.

Por otro lado, el programa tiene 3 (tres) componentes estructurales (Sánchez, 2012):

1) Modelo de Cuenca: se brinda la información al programa acerca de las distintas subcuencas y sus características. Estas características son los parámetros asociados a los modelos de pérdidas, transformación, caudal base y tránsito de avenidas.

2) Modelo Meteorológico: en este componente se asignan los pluviómetros. Los datos de cada pluviómetro son introducidos previamente en el Administrador de las Series de Tiempo.

3) Especificaciones de Control: en este componente se le indica al programa cuando debe empezar y terminar la simulación, así como el intervalo de tiempo.

HEC-DSS

Es una base de datos que ofrece el Centro de Ingeniería Hidrológica, para facilitar la carga de datos de series de tiempo.

SOIL GRIDS

Es un sistema de mapeo automatizado del suelo basado en métodos de predicción espacial de vanguardia, ofrece una colección de mapas del mundo de propiedades y clases de suelos actualizables a resoluciones espaciales de 1 km/250m producidas mediante mapas automatizados de suelos basados en algoritmos de aprendizaje automático. Los datos de SoilGrids están disponibles públicamente bajo la licencia Open Data Base.

SOIL WATER CHARACTERISTICS

A partir de los contenidos de arena y arcilla, provee las relaciones del contenido hídrico y tensión (punto de marchitez, capacidad de campo y saturación) y conductividad hidráulica saturada (Ksat) y no saturada, según la clasificación de tipo de suelos del USDA.

QGIS

Es un sistema de información geográfica de uso libre, que permite trabajar con mapas e información geográfica en general, y además tiene múltiples aplicaciones para el área de la hidrología.

Datos de elevación

Para realizar los análisis iniciales, se utilizó un Modelo de Elevación Digital de toda la cuenca del río Paraguay.

El modelo digital de elevación utilizado es el descargado gratuitamente de la página del CGIAR-CSI por el Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). El modelo utilizado fue el elaborado por la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de la National Geospatial Intelligence Agency (NASA). El mismo tiene una resolución espacial de 90m x 90m.

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados. En la figura x se observa el MDE utilizado en contraste con las cuencas aportantes al río Paraguay de la Región Oriental.

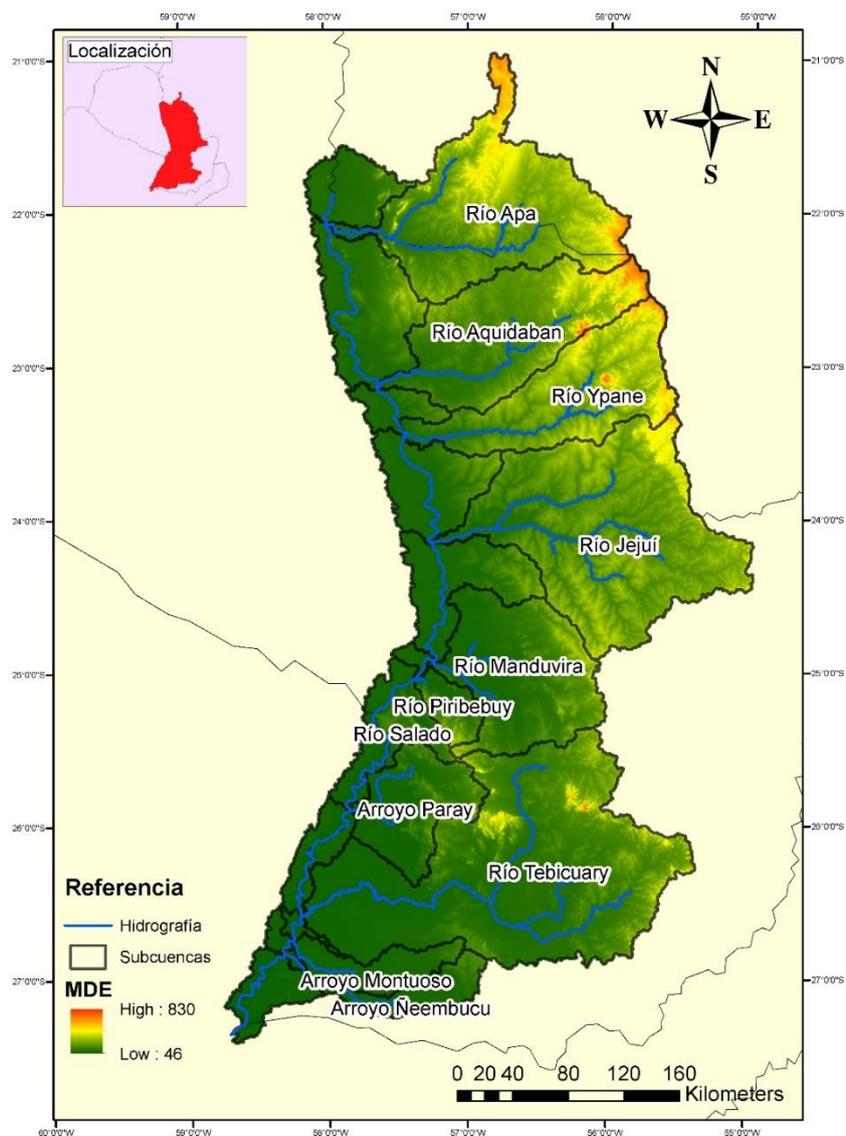


Figura x. Modelo Digital de Elevación utilizado en el proyecto. Fuente: Elaborado a partir de datos del SRTM.

Datos de Tipo y Uso de Suelo

Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (PRUT)

El Estudio de Suelos de la Región Oriental del Paraguay en el marco del Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (PRUT) se llevó a cabo a través del uso de ampliaciones de imágenes satelitales a escala 1:100.000, cuyo procesamiento y cartografía digital fue realizado por el "Earth Satellite Corporation", de Rockville, Md., EEUU, a partir del "Landsat Thematic Mapper" (TM) - conteniendo las bandas TM 3, 7 y 4, en órdenes azul, verde y rojo-; cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar a escala 1:100.000; trabajo de campo consistente en la descripción de perfiles de suelos de toda la Región Oriental y toma de muestras de suelos; análisis laboratoriales de las muestras de suelos e interpretación y procesamiento de toda la información recolectada. También se caracterizó el clima, la fisiografía-geomorfología y uso actual de la tierra. Este estudio permitió la elaboración de los mapas de Taxonomía de los suelos, de Capacidad de Uso de la Tierra y de Ordenamiento de la Tierra de la Región Oriental del Paraguay.

El proyecto tuvo como objetivo la realización de un estudio de reconocimiento de suelos y determinación de su capacidad de uso en la Región Oriental del Paraguay, a efectos de sentar las bases para la planificación racional del uso y manejo sustentable de este recurso y la promoción de su ordenamiento territorial (López et al. 1995).

El mapa de suelos de la Región Oriental del país, producido en este estudio, contiene 349 unidades cartográficas, en donde los suelos que las componen pertenecen a 7 Ordenes, 13 Subórdenes, 28 Grandes Grupos y 58 Subgrupos, clasificados por el sistema "Soil Taxonomy", del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, 1992). Las unidades cartográficas contienen información sobre el tipo de suelos de cada área, en particular, paisaje donde aparece cada suelo, material parental, clase textural, pendiente del terreno, drenaje, pedregosidad y rocosidad. Además, cada tipo de suelos se presenta descrito según sus características morfológicas, químicas, físicas y taxonómicas.

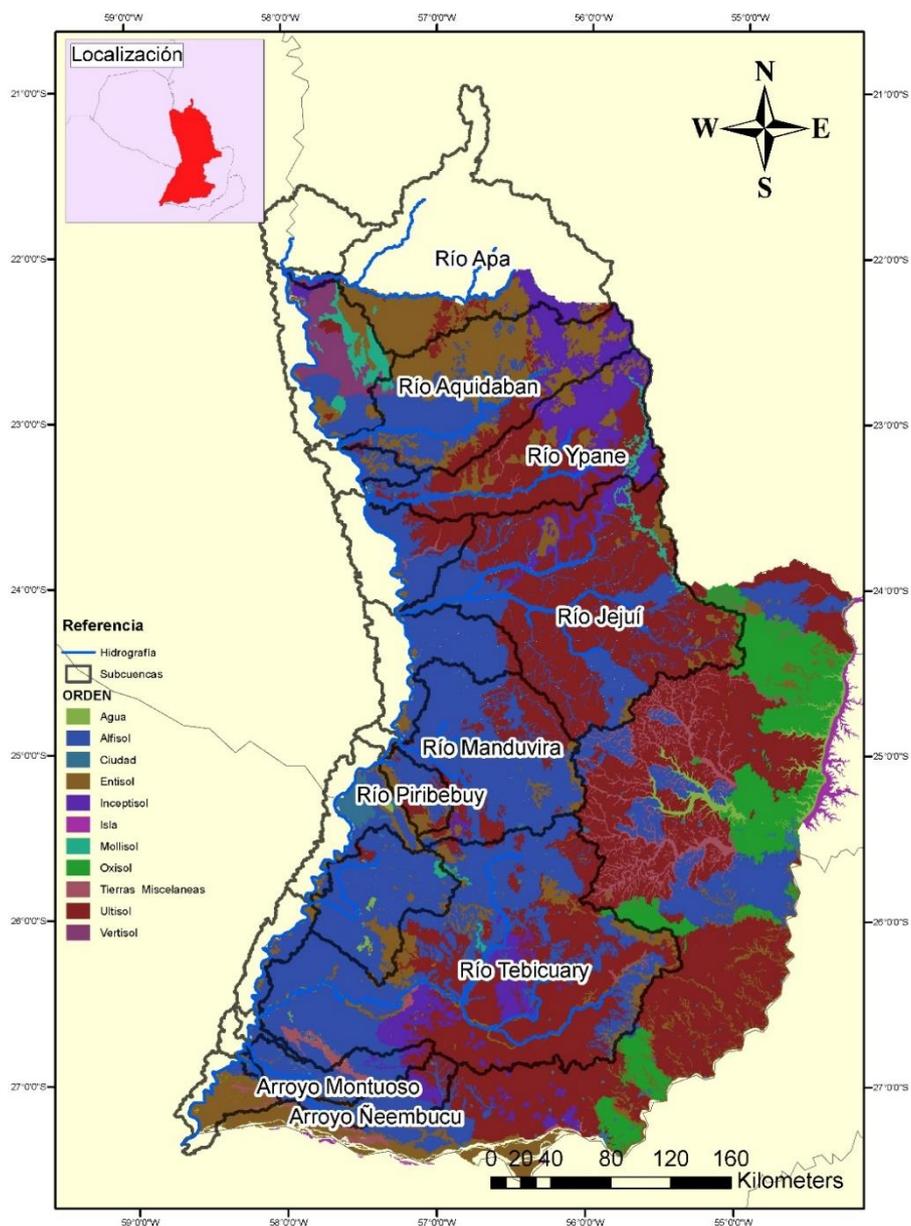


Figura x. Orden de suelos de la Región Oriental. Fuente: Elaborado a partir de datos del PRUT (1995).

Datos de Series de Tiempo

Datos de precipitación

Para la generación de caudal, se utilizaron datos de precipitación de estaciones administradas por la Dirección de Meteorología e Hidrología de la DINAC y de la Agencia Nacional de Aguas del Brasil. Las estaciones y las cuencas en las que fueron utilizadas se detallan en la tabla x, así como su distribución espacial en la figura x.

Estación	Institución	Longitud	Latitud
Asunción	DMH	-57.515	-25.236
Concepción	DMH	-57.43	-23.442
Coronel Oviedo	DMH	-56.378	-25.484
Puerto Casado	DMH	-57.94	-22.283
Paraguarí	DMH	-57.146	-25.627
Pedro Juan Caballero	DMH	-55.833	-22.64
Salto del Guairá	DMH	-54.354	-24.033
San Pedro	DMH	-57.088	-24.085
Santaní	DMH	-56.448	-24.667
Villarrica	DMH	-56.438	-25.754
Bela Vista	ANA	-56.526	-22.109
Caracol	ANA	-57.029	-22.031
Marabá	ANA	-57.358	-21.688
Jardim	ANA	-56.192	-21.471

Tabla x. Estaciones pluviométricas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

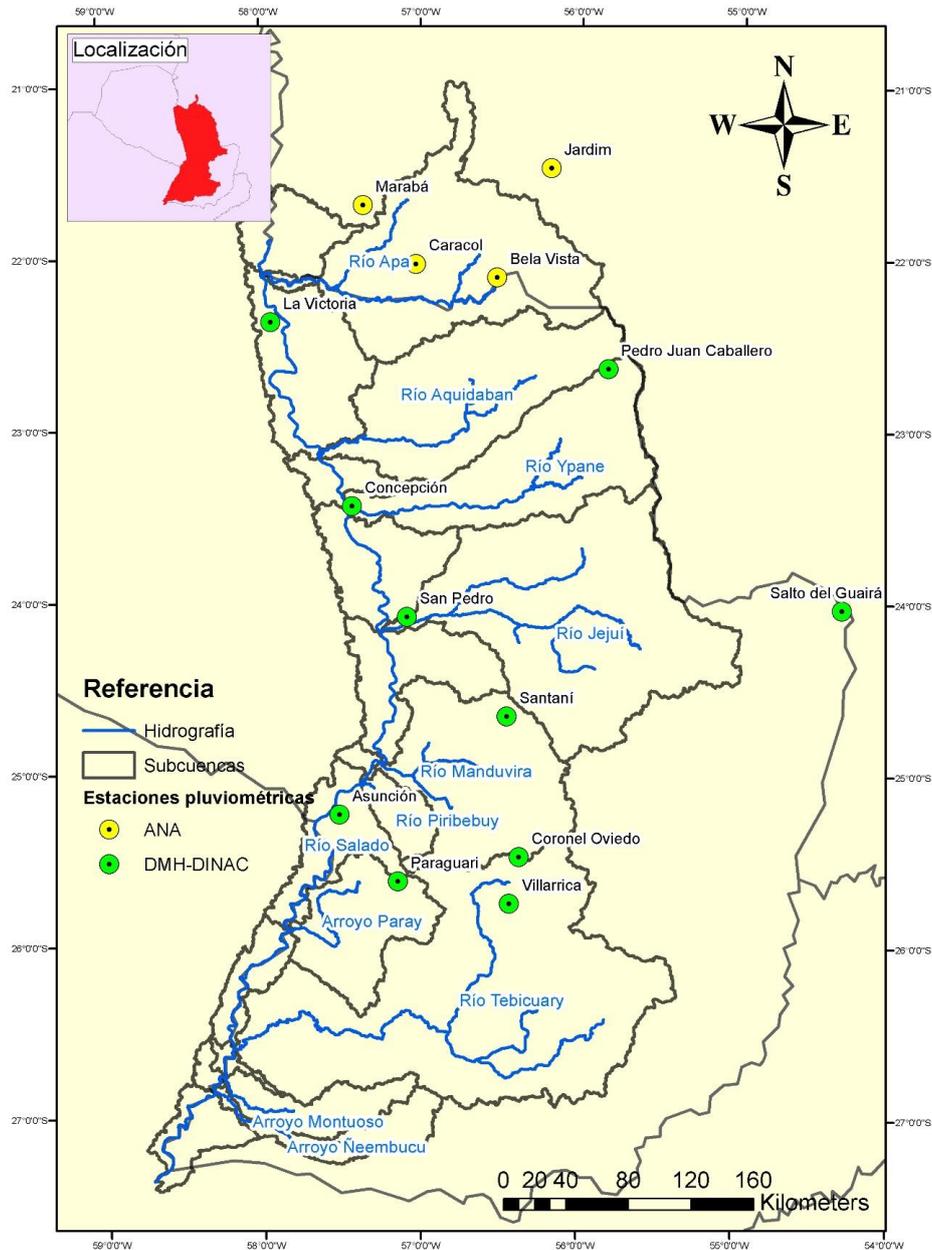


Figura x. Estaciones pluviométricas utilizadas en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Datos hidrométricos

Para la calibración del caudal calculado por el modelo hidrológico, se utilizaron estaciones hidrométricas ubicadas en los cauces principales de cada cuenca. Para la cuenca del río Apa, se utilizó la estación de São Carlos, administrada por la ANA, la cual dispone de datos de nivel y caudal verificados por la misma entidad, en un periodo desde 1971 al 2013. Para las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá no se tienen datos disponibles de caudal, sin embargo, se cuentan con datos históricos de nivel hidrométrico del Anuario Hidrográfico de la ANNP, con un registro de mediciones del 01/01/1974 al 31/12/1991, los cuales fueron utilizados para la estimación de caudales sintéticos. En la figura x, se observa la ubicación de las estaciones durante el periodo de medición detallado.

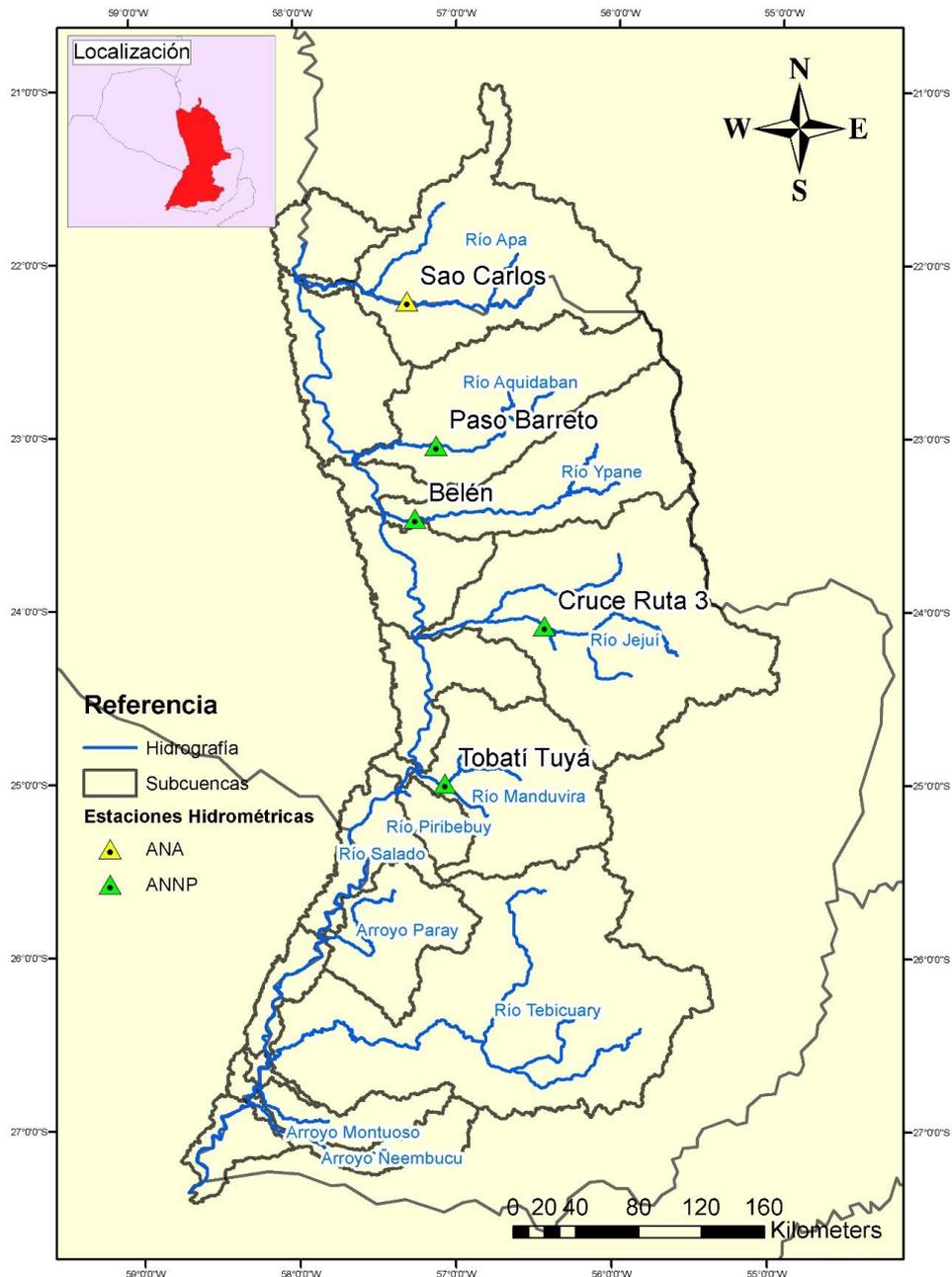


Figura x. Estaciones hidrométricas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

Métodos utilizados para los componentes del ciclo hidrológico en el HEC-HMS

A continuación, se describen los métodos utilizados para la estimación de los parámetros que rigen la modelación hidrológica, los valores finales resultantes de la calibración se transcriben en el anexo A. Estos procesos y la estimación de sus parámetros se realizaron de forma independiente para cada cuenca incluida en el estudio.

Modelo de Pérdidas

El método utilizado por el modelo para simulaciones continuas es el Soil Moisture Accounting (Modelo de la Contabilidad de la Humedad del Suelo). Este simula el movimiento y almacenamiento del agua a través de la vegetación, la superficie del suelo, el perfil del suelo y

las distintas capas del agua subterránea (Pereira, 2015). En la figura x se observa el proceso realizado por el SMA.

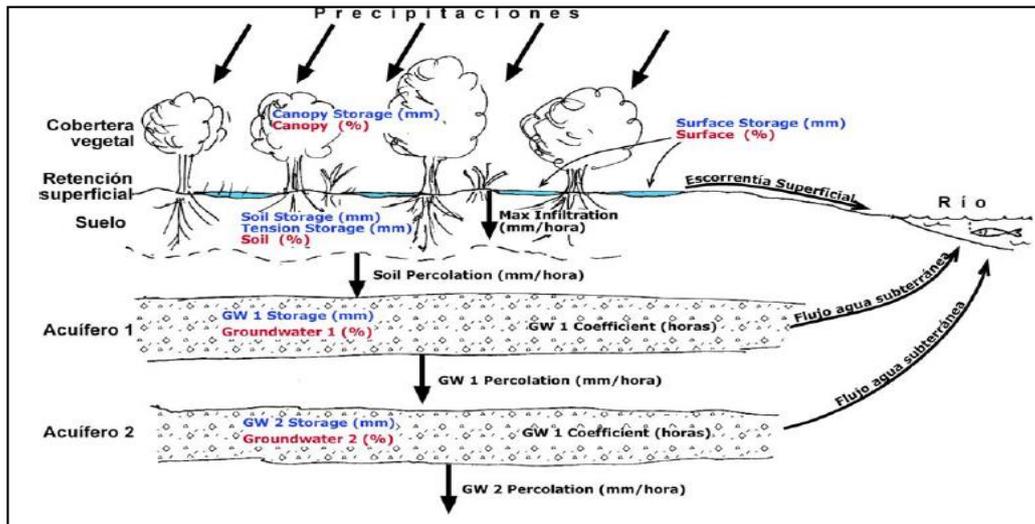


Figura x. Esquema del Soil Moisture Accounting. Fuente: Manual del Usuario HEC-HMS.

a) *Interceptación en la cubierta vegetal (Interception Canopy)*: Representa la parte de la precipitación que no alcanza el suelo porque es retenida en las plantas. La única entrada son las precipitaciones y la única salida la evapotranspiración (ET). Mediante el procesamiento de imágenes satelitales, se realizó la clasificación del uso del suelo para cada subcuenca, asignando valores de referencia de acuerdo a Vélez et al. (2009), mostrados en la tabla x.

Descripción	Almacenamiento (mm)	Intercepción (mm)
Bosque	4.5	9
Pastos o hierbas	6	3
Suelos desnudos	1	0
Urbano alta densidad	5	1
Urbano baja densidad	3	2
Agua	0	0

Tabla x. Valores asignados a las abstracciones iniciales por cobertura vegetal. Fuente: Vélez et al., 2009.

b) *Almacenamiento en depresiones superficiales (Surface depression storage)*: Es el volumen de agua retenido en las irregularidades de la superficie del terreno. Se utilizó el criterio de Gaete y Vergara, especificado en el “Manual de diseño de Sistemas de Riego Tecnificado” (2001), porque permite estimar la Capacidad de Infiltración en función a la textura del suelo, y posteriormente aplicar un factor de corrección en función a la pendiente de la superficie.

c) *Almacenamiento en el suelo (Soil profile storage)*: La entrada es la infiltración desde la superficie. Las salidas son la ET y la percolación hacia el acuífero subyacente. HMS distingue dos zonas dentro del suelo:

c1) *Zona superior (Upper zone)*: Parte del suelo que puede perder agua por ET o por percolación. Corresponde al agua gravífica, que ocupa los poros del suelo y es susceptible de ser atrapada por las raíces de las plantas o de ser arrastrada hacia abajo por la gravedad.

c2) *Zona de tensión (Tension zone)*: Parte del agua contenida en el suelo que se pierde solamente por ET. Corresponde al agua adherida a las partículas del suelo; las raíces pueden

utilizarla, pero no puede moverse. La ET primero toma agua de la Upper zone, y posteriormente de la Tension zone.

Los parámetros solicitados por el SMA fueron posibles estimar; con los datos de textura de suelo, materia orgánica (datos del PRUT y SoilGrids), y la utilización del software Soil Water Characteristics (SWC).

Con el SWC se estima la conductividad hidráulica del suelo, la capacidad de campo y la saturación del suelo, mediante el porcentaje de arcilla, arena y la materia orgánica de cada tipo de suelo. En ausencia de mejor información, la "Máxima Tasa de Percolación del Suelo (mm/hr)" solicitada por el SMA, es asumida como igual a la Conductividad Hidráulica vertical de la superficie del suelo.

Por otra parte, los parámetros "almacenamiento del suelo (mm)" y "zona de tensión (mm)" son asumidos como la saturación y la capacidad de campo (proporcionados por el SWC), respectivamente.

d) *Almacenamiento en los acuíferos (Ground water storage)*: El modelo distingue dos niveles:

Un acuífero más superficial, "GW 1"; que recibe directamente la percolación del agua gravífica que no ha sido atrapada por la ET y que ha excedido la capacidad de almacenamiento del suelo. Desde este acuífero más superficial, el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea (que puede alimentar el caudal base de los ríos) o percolar hacia un acuífero más profundo "GW2". Análogamente, desde este acuífero el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea o percolar aún más profundamente; en este caso el modelo considera esta agua perdida, sale del sistema y no es considerada.

Los coeficientes GW1 y GW2, son el tiempo de retardo que debe transcurrir para que el agua almacenada en cada uno de los niveles acuíferos salga lateralmente y alimente al cauce como caudal base.

Las capas subterráneas del subsuelo requieren 6 (seis) parámetros, 3 (tres) parámetros incorporados al primer acuífero y 3 al segundo. Los parámetros estimados son la Capacidad de Almacenamiento (mm) y el Coeficiente (hr) de respuesta de los dos acuíferos. Estos valores se estiman a partir del uso del Soil Grids que nos da los porcentajes de arena y arcilla, para espesores de 1 metro (1000 mm) para el almacenamiento subterráneo 1 (GW1) y 2 metros (2000 mm) para el almacenamiento subterráneo (GW2), luego con el SWC se estima la conductividad hidráulica, capacidad de campo, punto de marchitamiento y saturación.

Caudal base

Se seleccionó el método de Reservoirio Lineal, el cual funciona en conjunto con el SMA y que supone el tránsito a través de una serie de depósitos lineales. El método simula el almacenamiento y el movimiento del flujo subsuperficial a través de reservorios.

-*Contenido inicial de agua subterránea (GW Initial)*: Es el caudal inicial, en el momento que el modelo comienza a trabajar.

-*Coeficiente de agua subterránea (GW Coefficient)*: Es el coeficiente de almacenamiento de agua subterránea. El acuífero actúa como un lago o embalse, que recibe y suelta agua, también el acuífero atenúa el caudal y lo retrasa, como en cualquier procedimiento de tránsito de caudales. Este parámetro en horas informa al modelo el tiempo de respuesta de este depósito intermedio que es el acuífero.

-Reservorios de agua subterránea (GW Reservoirs): Simula cada acuífero como un número de depósitos en cadena que provocan la atenuación del caudal que se comenta más arriba. Por omisión aparece 1, que corresponde a la mínima atenuación. Se toma dos reservorios. Teniendo en cuenta la ausencia de datos, los coeficientes de los acuíferos solicitados en este método serán asumidos como iguales a los coeficientes determinados para el método de pérdidas.

Modelo de Transformación: Hidrograma Unitario de Clark

El método utilizado para el presente trabajo es el Hidrograma Unitario de Clark. Este modelo consiste en un hidrograma unitario sintético, es decir, el hidrograma es estimado de acuerdo con fórmulas que incluyen parámetros físicos de la cuenca de estudio como el área, longitud del cauce principal, pendiente media, etc. Para el caso del HU de Clark del HEC-HMS, el programa construye una curva de Tiempo vs. Área y la utiliza para desarrollar la translación del hidrograma resultante de una precipitación.

Parámetros solicitados:

- *Tiempo de Concentración (hr)*: se define como el tiempo que tarda una partícula de agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca al punto de descarga (Fattorelli & Fernández, 2011). El tiempo de concentración define el tiempo máximo de viaje en cada subcuenca (USACE, 2013).
- *Coefficiente de Almacenamiento (hr)*: parámetro que tiene en cuenta el efecto del almacenamiento en la red de cauces de la cuenca (Fattorelli & Fernández, 2011). El coeficiente de almacenamiento es utilizado en el reservorio lineal que mide los efectos del almacenamiento (USACE, 2013).

Para obtener el tiempo de concentración se utiliza la fórmula desarrollada en el Brasil para cuencas rurales medianas y grandes, denominada DNOS6 (Manual Hidrología Unicamp), teniendo en cuenta la trayectoria de flujo más larga en cada subcuenca y la pendiente media asociada a dicha trayectoria.

La fórmula de DNOS que es la siguiente:

$$T_c = \frac{10}{k} \times \frac{A^{0.3} \times L^{0.2}}{I^{0.4}} \quad \text{Ecuación x}$$

T_c = tiempo de concentración, en minutos,

A = área de la cuenca en ha,

L = longitud del curso de agua en m,

I = pendiente en %.

k = Depende de las características de la cuenca, conforme se describe:

- Terreno areno-arcilloso, cobertura de vegetación intensa y alta absorción $K=2$
- Terreno común, cubierto de vegetación y absorción apreciable $K=3$
- Terreno arcilloso, cubierto de vegetación y poca absorción $K=4$

Cálculo de Tránsito de Hidrograma

Para el presente proyecto, se optó por el método de Muskingum-Cunge, que es una técnica de coeficientes no lineales que tiene en cuenta la difusión y amortiguación del hidrograma basado en propiedades físicas del canal y el hidrograma de entrada al tramo.

- **Configuración de la Sección Transversal del canal dado por 8 puntos:** con esta configuración mostrada en la figura x, los puntos 3 y 6 representan las orillas izquierda y derecha del canal, respectivamente. Los puntos 4 y 5 se encuentran entre el canal. Los puntos 1 y 2 representan los puntos finales de la planicie de inundación del lado izquierdo, mientras que los puntos 7 y 8 representan los puntos finales de la planicie de inundación del lado derecho.

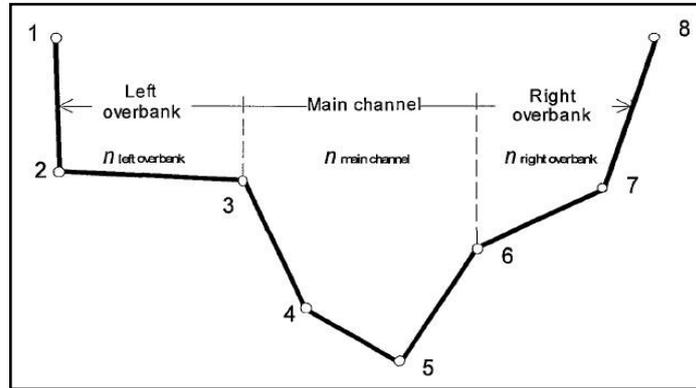


Figura x. Sección transversal de 8 puntos. Fuente: Manual de Referencias Técnicas del HEC-HMS.

La metodología utilizada para determinar los 8 puntos de cada canal a ser modelado en cada cuenca de estudio fue estableciendo secciones transversales al río en el DEM de los satélites ALOS7 (Advanced Land Observing Satellite), y para obtener el ancho del río se recurrió a Google Earth versión PRO.

La profundidad de canal asumida fue de 6m para el primer canal colector aguas arriba, aumentando progresivamente en los siguientes tramos.

Los parámetros físicos, como la longitud y pendiente de los cauces fueron obtenidos mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica.

Los valores de Manning tanto para el canal principal como para las planicies de inundación, fueron seleccionados a partir de valores estimados por V. T. Chow (1959) según características del cauce y de las planicies de inundación, mediante inspección visual de imágenes satelitales.

Distribución de precipitación

En general, la altura de lluvia (mm) que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores aunque sea en sitios cercanos. Las estaciones pluviométricas registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en que está instalado el aparato y, para los cálculos ingenieriles, es necesario conocer la lluvia media en una zona dada, como puede ser una cuenca (Aparicio, 1992).

La distribución de precipitación media en la Cuenca fue realizada mediante el Método de los Polígonos de Thiessen. Este método asigna un peso a las Estaciones Pluviométricas en cada subcuenca (figura x).

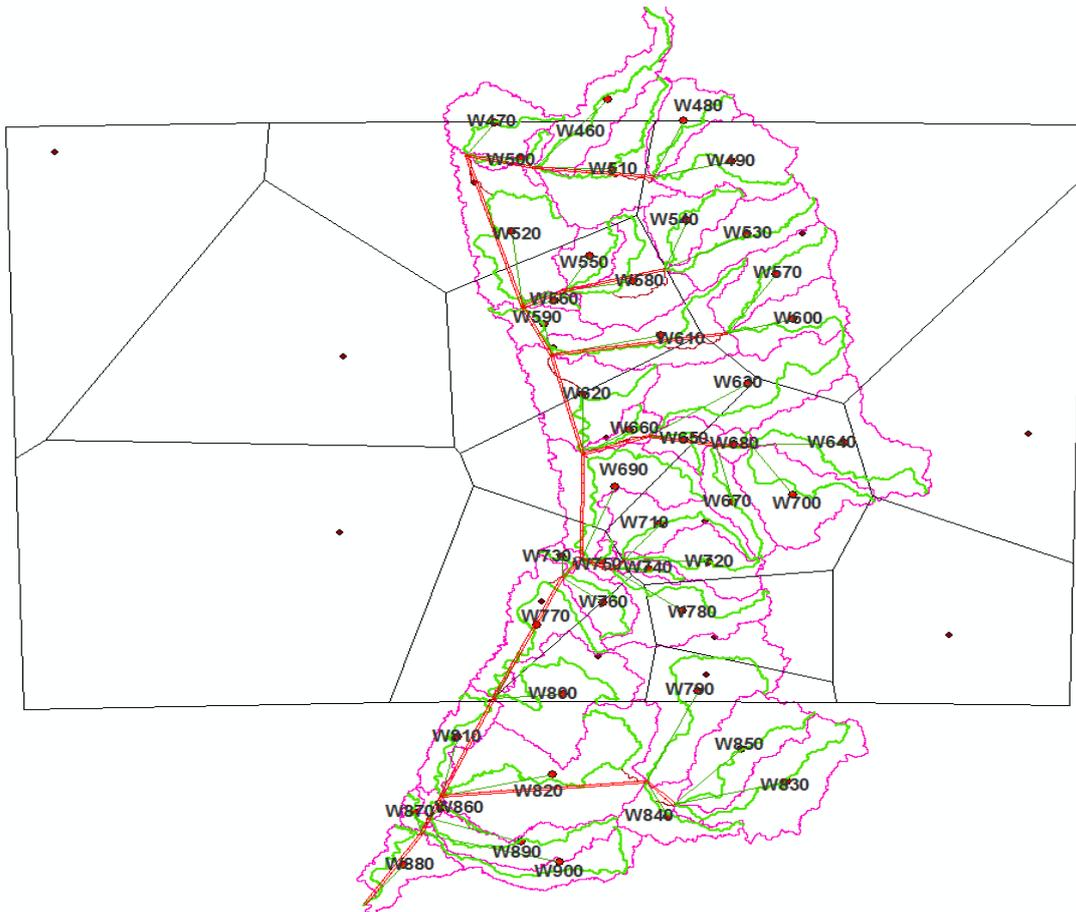


Figura x. Polígonos de Thiessen utilizados para la distribución de la precipitación. Fuente: Elaboración propia.

Es importante aclarar que las asignaciones de pesos por el método de Thiessen no es una tarea de total precisión, por ello, modificar los pesos durante la calibración del modelo podría mejorar el resultado (Fattorelli & Fernández, 2011).

Evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de la evaporación desde la superficie de suelo y la transpiración de la vegetación. Los mismos factores que dominan la evaporación desde una superficie de agua abierta también dominan la evapotranspiración, los cuales son: el suministro de energía y el transporte de vapor mediante el viento. Además, el suministro de humedad a la superficie de evaporación es un tercer factor que se debe tener en cuenta. A medida que el suelo se seca, la tasa de evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido. (Chow, 1994)

Numerosas fórmulas nos permiten evaluar la ETP con una aproximación suficiente para muchos estudios hidrológicos. Para este trabajo se utilizó el método de Thornthwaite, los datos necesarios son; de temperatura y de la latitud por una tabla se obtiene el nº teórico de horas de sol.

$$ETP \text{ (mm/mes)} = 16 \left(\frac{l}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(10 \frac{T_a}{l}\right)^a \tag{Ecuación x.}$$

Donde:

l = Duración del día (Hr)

$N =$ nº de días en un mes

$T_a =$ Temperatura del aire media mensual (°C)

$$a = (6,75 \times 10 - 7I3) - (7,71 \times 10 - 5I2) + (1,79 \times 10 - 2I) + 0,49$$

$$I = \sum_1^{12} i \text{ para los 12 meses.}$$

$$i = \left(\frac{T_a}{5}\right)^{1,514}$$

Estimación de caudales sintéticos

Teniendo en cuenta que, a excepción del río Apa, no se cuentan con datos observados de caudal en los cauces, por lo que para la calibración de las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá, se recurrió primeramente a la estimación de caudales sintéticos a partir de datos de nivel observados, recolectados del anuario hidrográfico ANNP. Para ello, se recurrió al **Método Área Pendiente**, que para el caso en el que ocurren grandes eventos de crecidas, puede estimar el flujo a través de métodos indirectos, con valores de niveles medidos, y estimaciones de parámetros físicos (a través de observación de imágenes satelitales) de las áreas de las secciones transversales (se asumen secciones trapezoidales para el presente caso), la pendiente de los canales, entre otros (figura x).

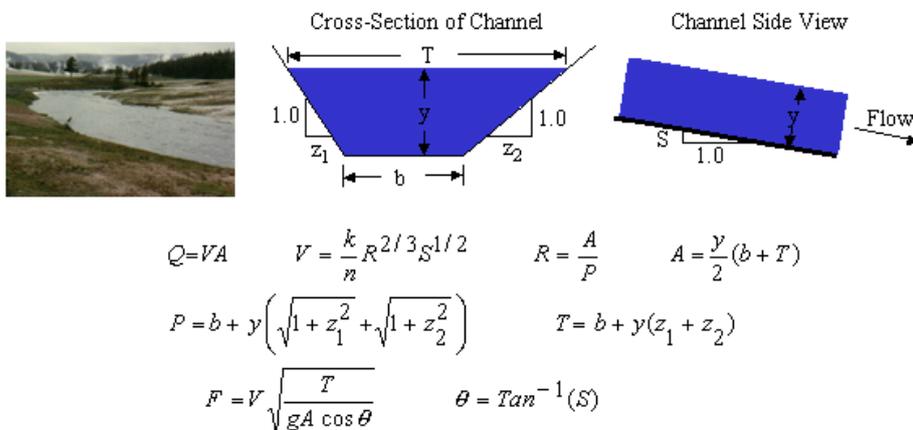


Figura x

Donde,

$y =$ Nivel

$T =$ Ancho superficial = $b + y(z_1 + z_2)$

$Z =$ Talud

$b =$ ancho del canal

Luego, se introducen estos valores en la ecuación de Manning para estimar el flujo, la cual es:

$$Q = \frac{A R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad \text{Ecuación x}$$

Dónde:

$Q =$ Caudal (m^3/s).

$n =$ Coeficiente de rugosidad de Manning, estimados a partir de Ven Te Chow, 2004.

A = Área de la sección transversal.

R = Radio hidráulico, equivalente al área dividido por el perímetro mojado.

S = Pérdida de carga por unidad de longitud del canal, aproximado por la pendiente del canal.

Para definir el radio hidráulico, se tiene que:

$$R = \frac{A}{P} \quad \text{Ecuación x}$$

Dónde:

A = Área de la sección transversal

R = Radio hidráulico, equivalente al área dividido por el perímetro mojado

P = Perímetro mojado

A su vez, se define el área y perímetro de un canal con sección trapezoidal:

$$A = \frac{y}{2}(b + T) \quad \text{Ecuación x}$$

$$P = b + y(\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2}) \quad \text{Ecuación x}$$

Dónde:

y = Nivel

b = Ancho del canal

T = Ancho superficial

$Z_1 = Z_2 =$ talud

En la mayoría de los cursos hídricos menores, el coeficiente de rugosidad de Manning se encuentra entre 0,010 y 0,750. Si los valores estimados de n , A , R , y S son razonables, la ecuación de Manning puede ser utilizada para estimar el caudal de descarga que ha ocurrido durante un periodo de aguas altas. (W.J. and Lewis, 2003).

Los caudales sintéticos medios se estimaron mediante la optimización de los parámetros en la ecuación de Manning teniendo en cuenta la sección en el lugar de medición de los niveles en régimen permanente y tomando como datos de control caudales estimados en la bibliografía. Este proceso se muestra en detalle en la sección de calibración para cada cuenca.

Modelación Hidrológica

Modelo Conceptual del Sistema en HEC-HMS

Teniendo definidas las cuencas de estudio, se procedió a generar el modelo de cuencas para cada una de ellas, primeramente, por las características propias de un Modelo Hidrológico Semi distribuido, es imprescindible subdividir el área de proyecto en unidades más pequeñas llamadas subcuencas, generadas de acuerdo a la red de drenaje y la topografía y a las cuales se le asignarán características particulares de acuerdo al tipo de suelo, uso de suelo, precipitación media, etc. Este proceso se realiza para cada una de las cuencas aportantes.

Una vez definido el sistema de drenaje de las cuencas de estudio, es posible crear el modelo conceptual en el HEC-HMS.

En el modelo conceptual se indican los elementos por los cuales estará compuesto el sistema:

-*Subcuenca*: representa a cada unidad de subcuenca en donde uno ingresa los parámetros asociados al modelo de pérdidas, transformación y caudal base.

-*Junction*: representa a los nodos del sistema real y son utilizados para sumar los hidrogramas generados en dos subcuencas.

-*Reach*: representa el tramo de un cauce en donde se introducirán los parámetros asociados al modelo de tránsito de hidrogramas. Este elemento une dos nodos consecutivos.

Este proceso se realizó para cada una de las cuencas aportantes, cuyos resultados se detallan a continuación.

Cuenca del río Apa

La cuenca fue subdividida en cinco unidades con áreas que rondan entre 700 a 4.500 km² (figura x). De acuerdo a esto, fue generado el modelo conceptual, estableciendo como salida o outlet a la desembocadura en el río Paraguay (figura x).

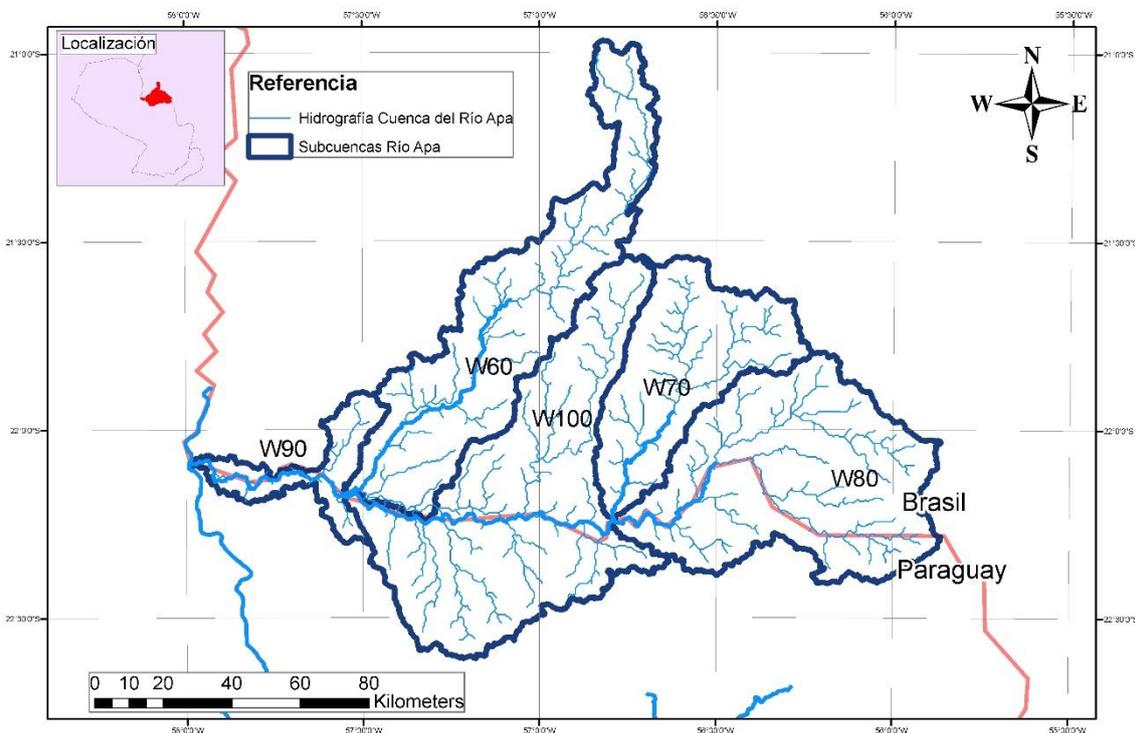


Figura x. Subcuencas del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

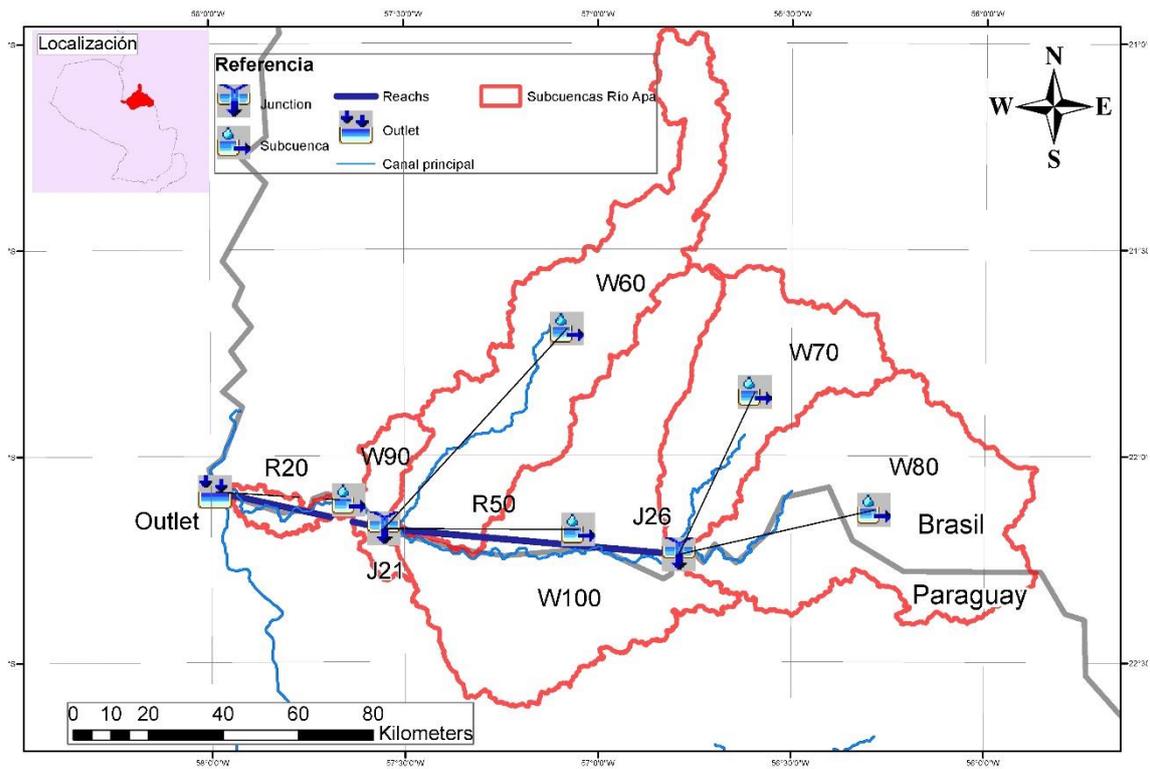


Figura x. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Apa. Fuente: Elaboración propia

Cuenca del río Aquidabán

La subdivisión alcanzada en la cuenca y el modelo conceptual aplicado se muestran en las figuras x y x. Se utilizaron cinco subcuencas, con áreas comprendidas entre 400 y 3.800 km².

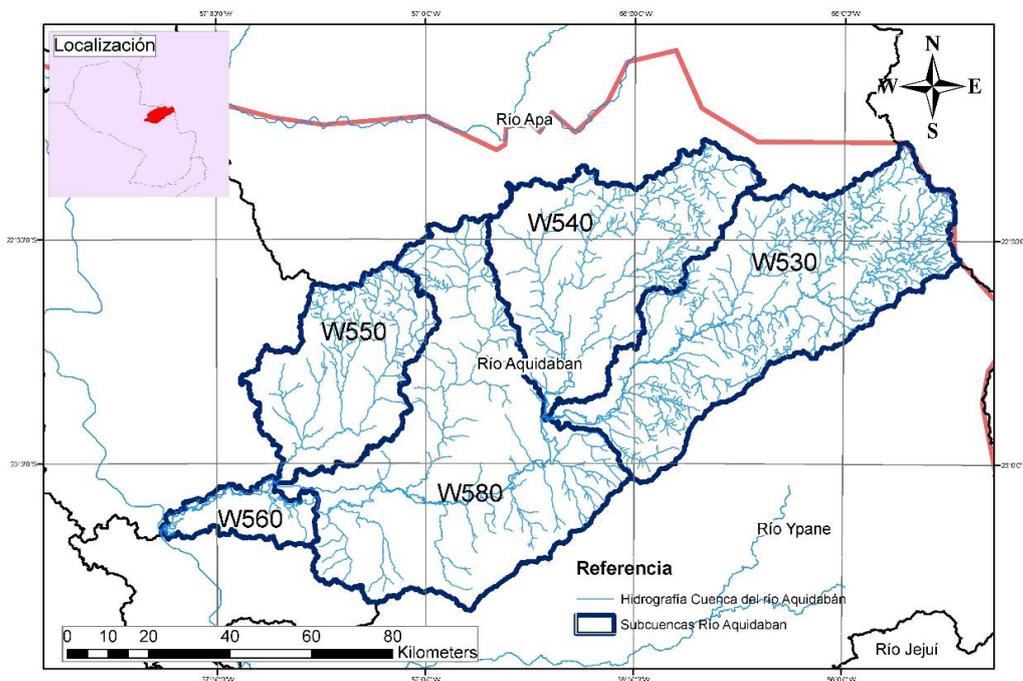


Figura x. Subcuencas del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia.

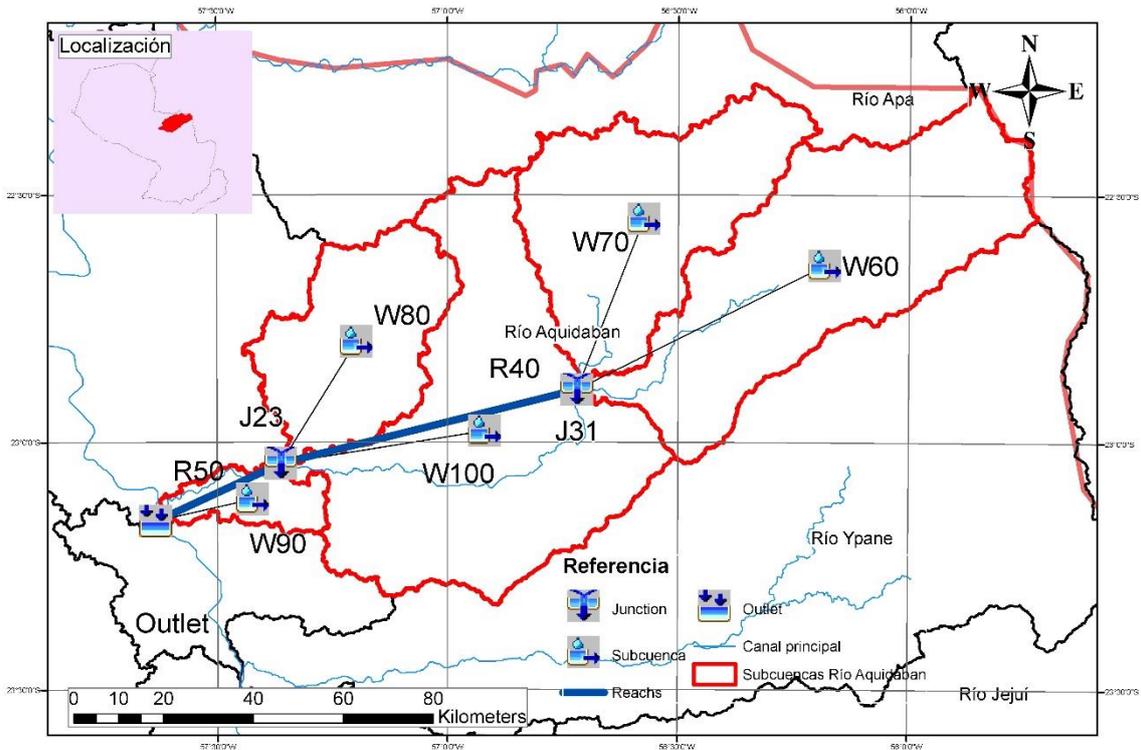


Figura x. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia

Cuenca del río Ypané

Los resultados se muestran en las figura x y x, se generaron tres subcuencas de 2.600 a 4.037 km² utilizados en el modelo conceptual.

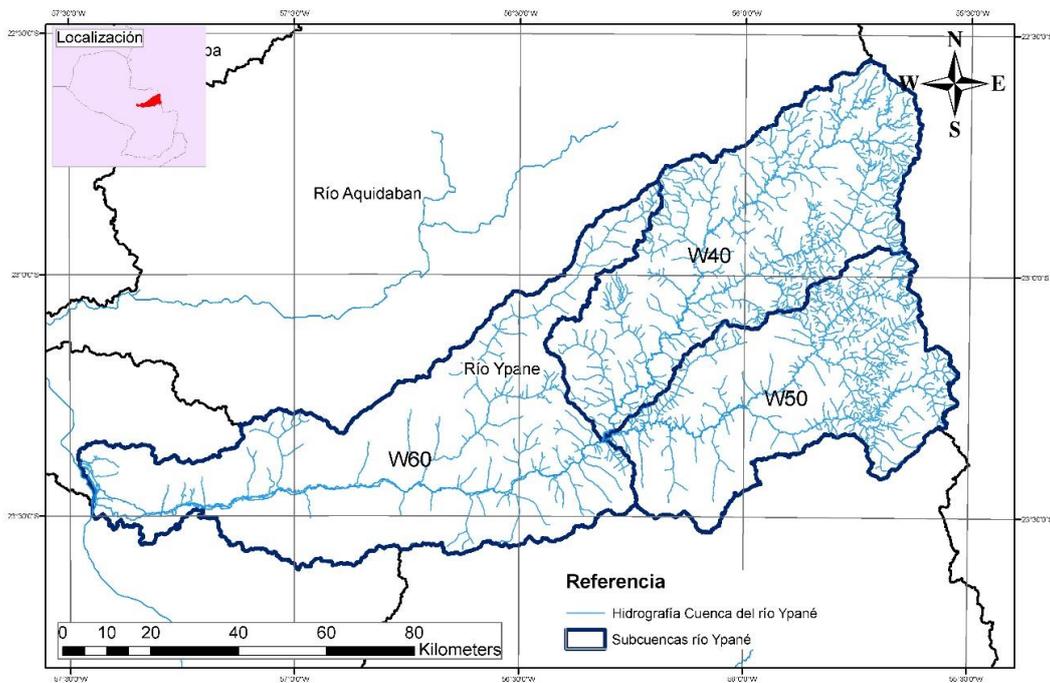


Figura x. Subcuencas del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

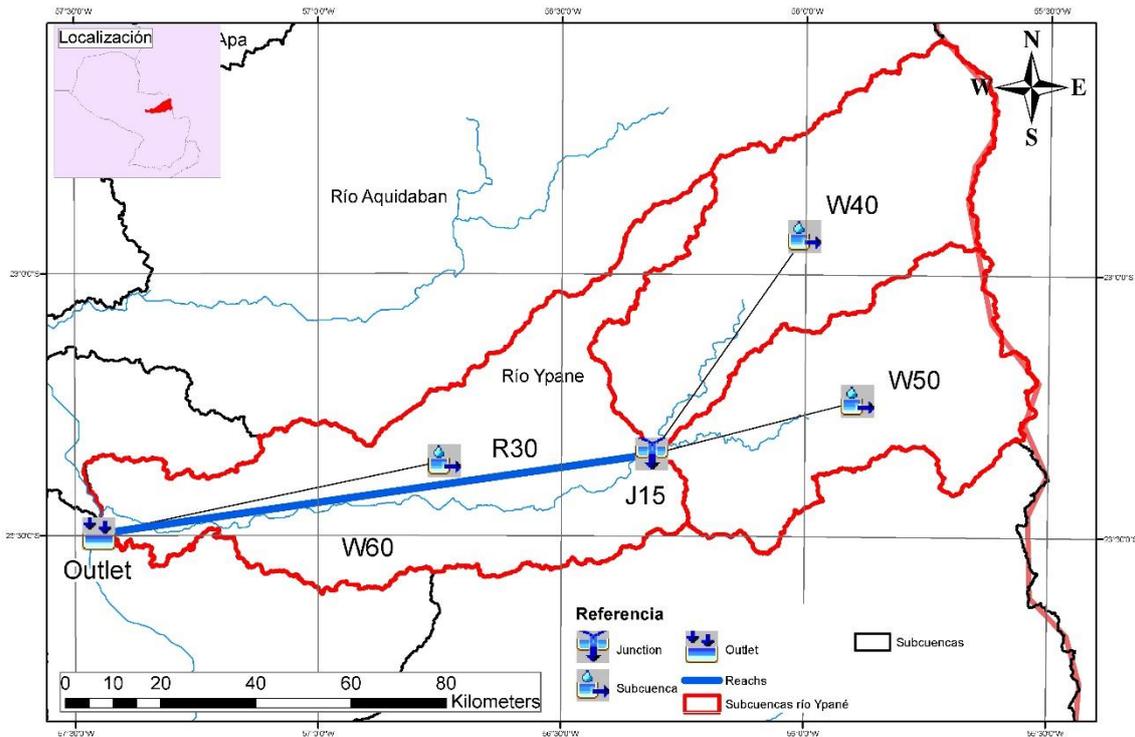


Figura x. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Ypané. Fuente: Elaboración propia

Cuenca del río Jejuí

Considerando el mayor tamaño de la cuenca, se subdividió la misma en siete unidades (figura x), las áreas varían entre 446 a 6.300 km², éstas se utilizaron para el modelo de cuencas (figura x) y se estimaron los parámetros hidrológicos que las rigen en cada una.

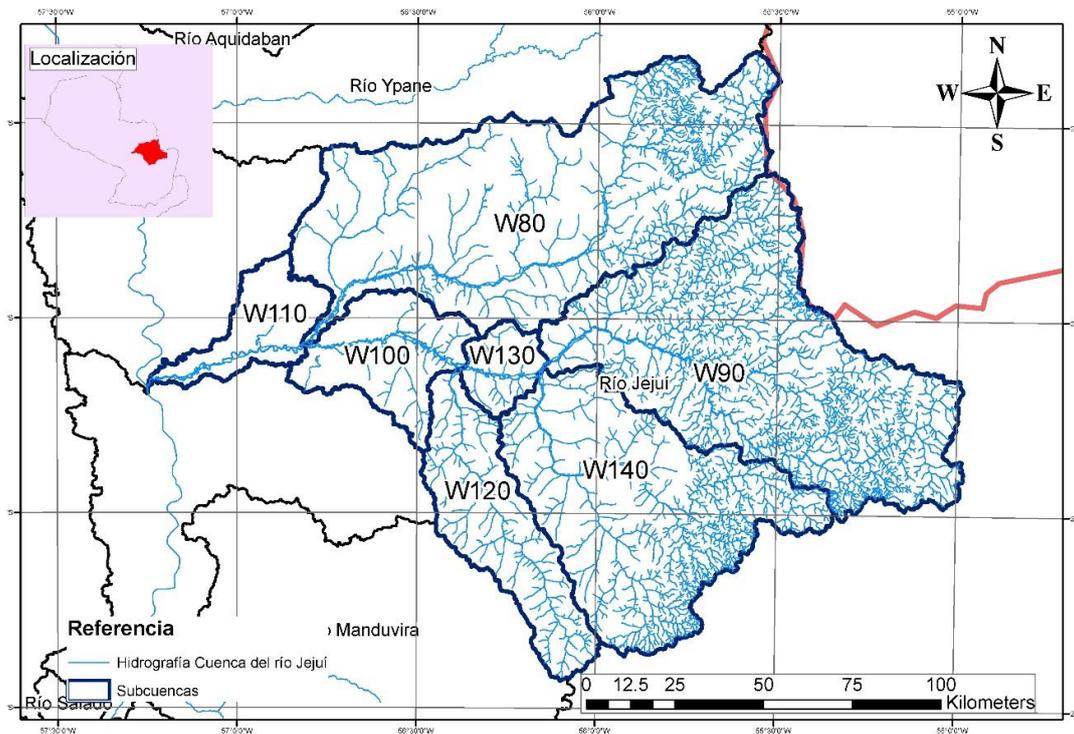


Figura x. Subcuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

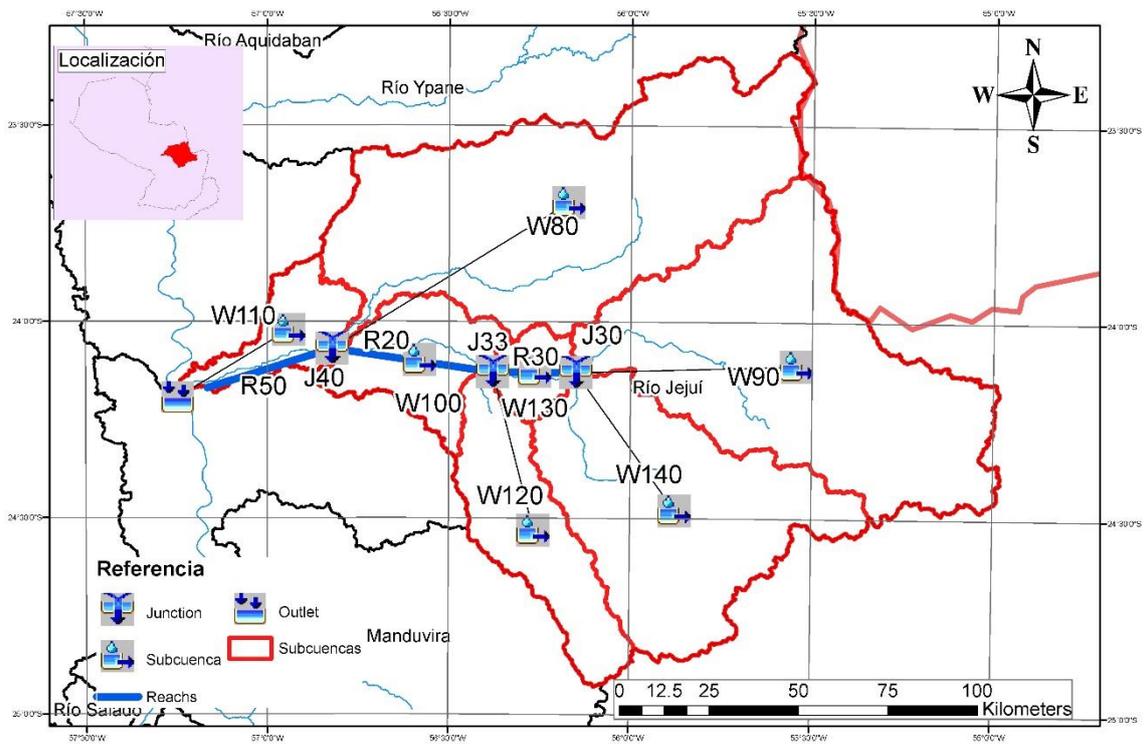


Figura x. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Jejuí. Fuente: Elaboración propia

Cuenca del río Manduvirá

Para la cuenca del río Manduvirá, se generaron cinco subcuencas, con áreas que rondan los 425 a 3.800 km². La subdivisión y el modelo conceptual aplicado se observan en las figuras x y x.

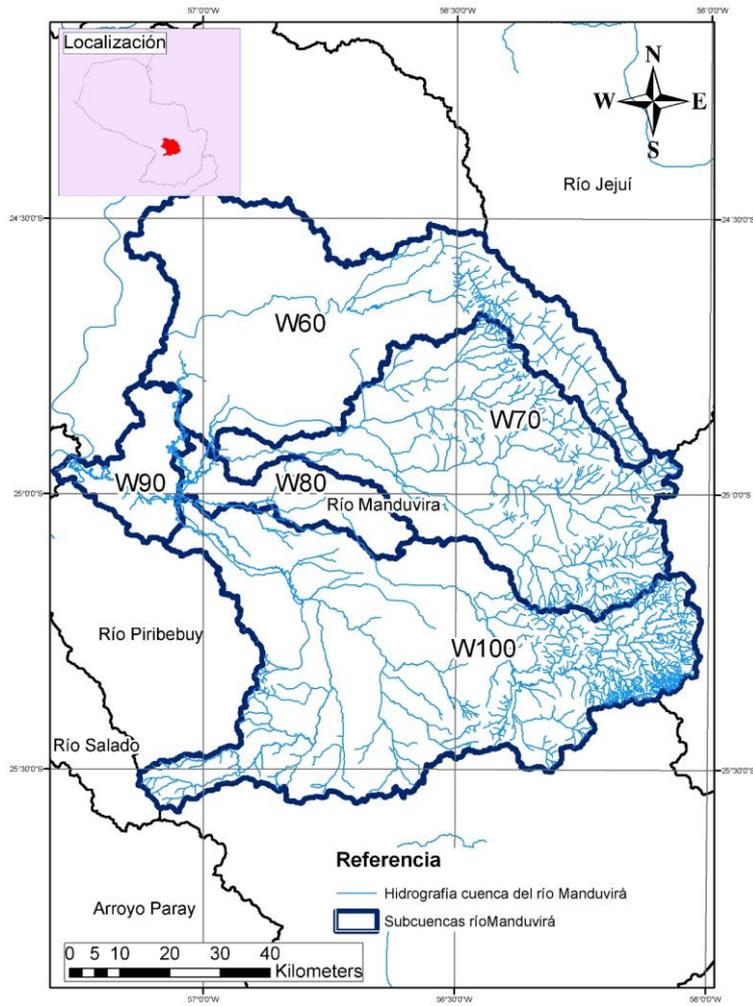


Figura x. Subcuencas del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

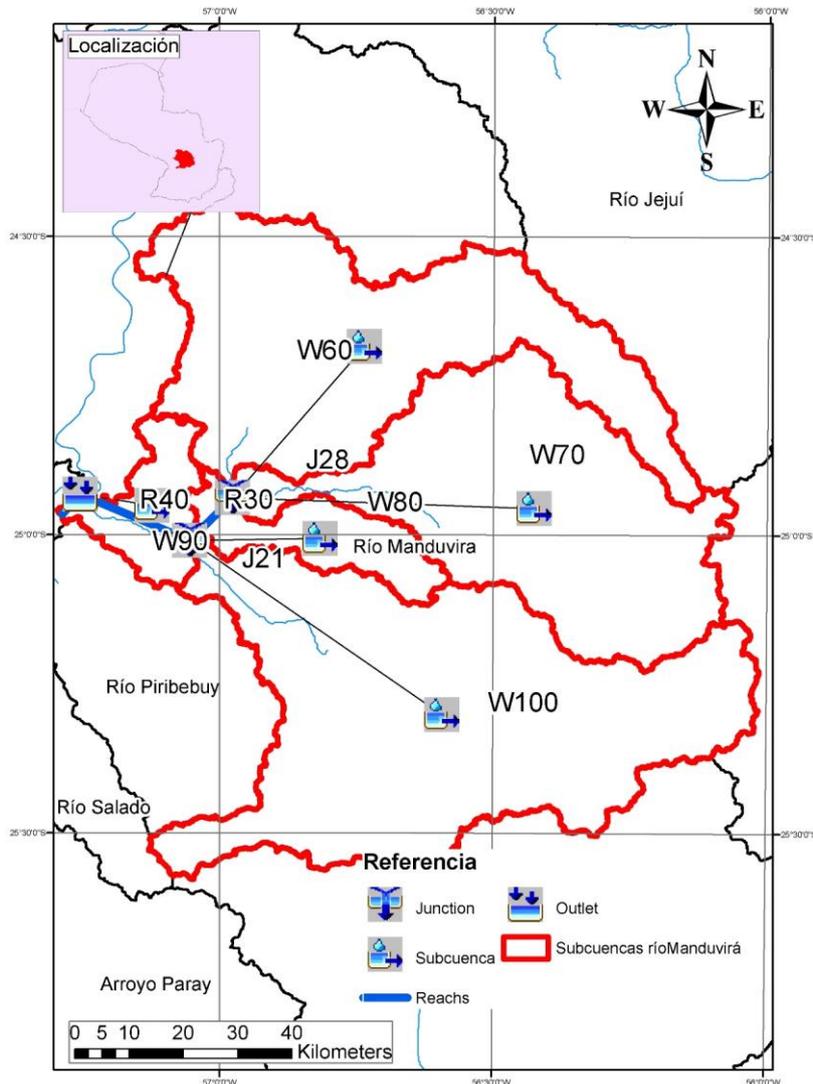


Figura x. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia

Calibración

Una vez estimados los parámetros iniciales para cada cuenca, se inicia el proceso de calibración, el cual consiste esencialmente en ajustar dichos parámetros, mediante un proceso iterativo, de manera a que el caudal calculado por el modelo replique de la mejor forma posible los caudales observados.

La experiencia con los modelos hidrológicos, concentrados o distribuidos, prueba que ninguna técnica de calibración y que ningún modelo llega a una perfecta correlación entre los valores calculados y observados. Existen errores en los valores calculados, en la estructura del modelo y en los parámetros obtenidos en la calibración (Haan, 1989) que resultan en una gran incerteza en los resultados calculados por el modelo.

La evaluación de desempeño de cada modelo se realizó con la siguiente función objetivo:

Coefficiente Nash (R^2): tiene un valor máximo igual a 1, que corresponde a un ajuste perfecto entre caudales simulados y observados. El valor de R^2 está fuertemente influenciado por errores de caudales máximas, por esto, cuando es próximo a 1, el modelo está obteniendo un buen

ajuste para los picos altos. El desempeño de un modelo es considerado adecuado y bueno si el valor de R^2 supera 0,75, y es considerado aceptable si el valor de R^2 queda entre 0,36 y 0,75 (Gotschalk y Motovilov, 2000).

Los periodos de calibración para las cuencas se seleccionaron de acuerdo a la disponibilidad de datos de precipitación y caudal/nivel observados en las estaciones utilizadas, de forma a que exista una consistencia entre ellos en un mismo periodo.

Es importante recalcar que solo se cuentan con datos de caudal observado en el río Apa, con un registro extenso y con escasos datos faltantes. El proceso de calibración en las demás cuencas se torna dificultoso debido a que, si bien se optó por el método de generación de caudales sintéticos explicado anteriormente, los datos de nivel del Anuario Hidrográficos no se encuentran completos, con periodos muy extensos sin datos, con esto en cuenta, se seleccionaron los periodos de forma a poder simular un periodo de al menos dos años, contando con una buena cantidad de datos de precipitación y nivel/caudal.

Además, el método de área pendiente se utilizó ante la ausencia de datos observados de caudal. Es por esto, que se aplicó un proceso de calibración y validación riguroso en la cuenca del Apa (en dónde si se tienen datos reales), y teniendo en cuenta la naturaleza empírica del método de generación de caudales, el ajuste de la simulación en las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá se basó en limitar los valores resultantes a que se ajusten lo mejor posible a los caudales sintéticos y que no repercutan de manera negativa en el modelo hidráulico una vez ingresados como aportes laterales. De haber errores marcados, estos se notaran en los resultados de la modelación hidráulica, permitiendo un reajuste de los parámetros hidrológicos.

A continuación, se detallan los resultados de la calibración para las cuencas de estudio.

Cuenca del río Apa

La calibración del modelo en la cuenca se realizó comparando los resultados con caudales observados por la estación São Carlos de la ANA (figura x).

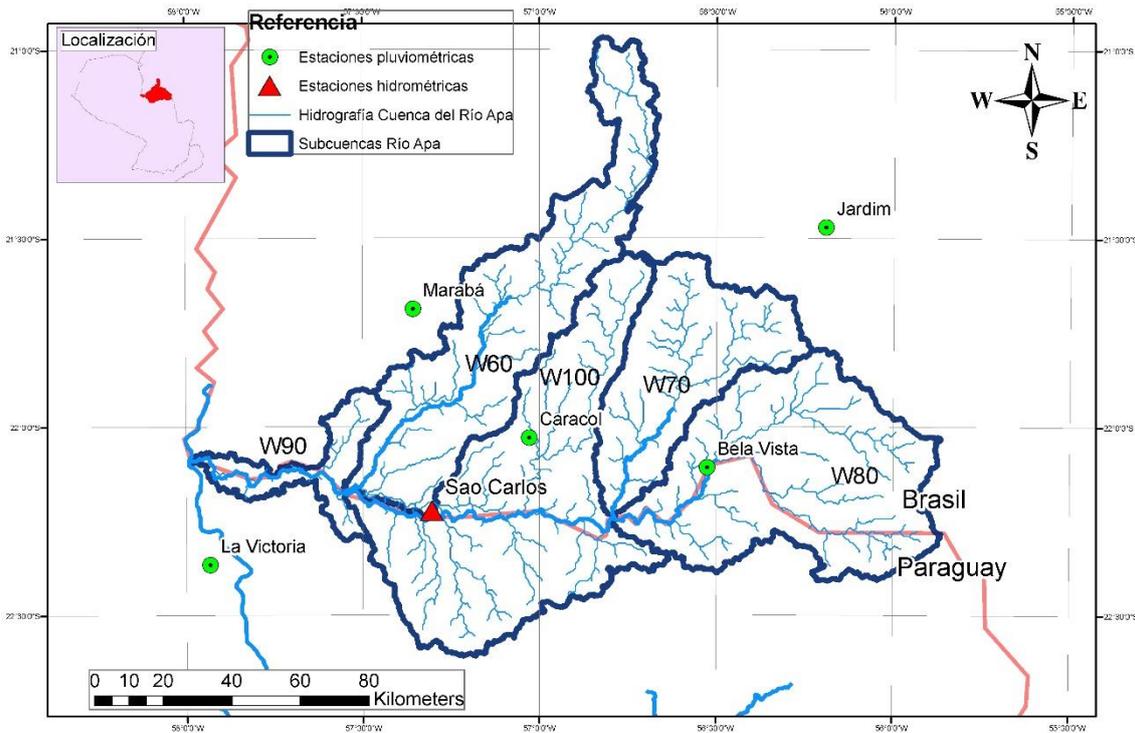


Figura x. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

El periodo seleccionado para la calibración es del 02 de Enero del 2009 al 31 de Diciembre del 2010, a partir de los parámetros iniciales estimados, se realizó el ajuste de los mismos obteniendo el resultado que se observa en la figura x. A simple vista, los caudales calculados se ajustan de buena manera a los observados, exceptuando periodos cortos al inicio de la simulación, pero representando adecuadamente los eventos de crecidas y la frecuencia del hidrograma observado.

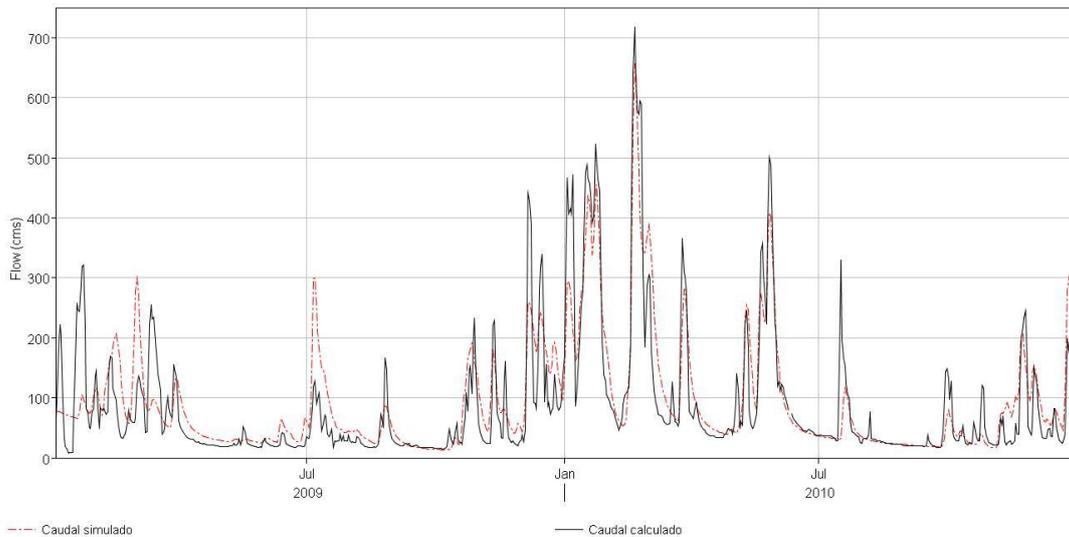
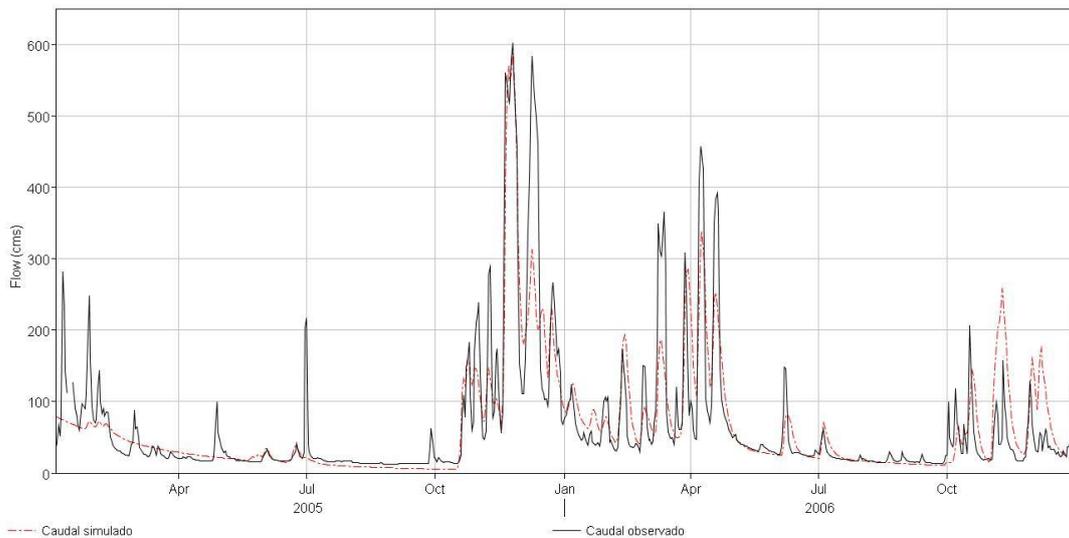


Figura x. Calibración en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

Con los parámetros establecidos en la calibración, se validó el modelo evaluando su desempeño en un periodo diferente al de la calibración, el periodo seleccionado fue del 02 de Enero del 2005 al 31 de Diciembre del 2006, los resultados se muestran en la figura x. El modelo no representa correctamente la frecuencia al inicio de la simulación, sin embargo, se ajusta correctamente en periodos de crecidas y con mucha variabilidad.



Figurax. Validación en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla x se observan los resultados resumidos de acuerdo a ciertos indicadores, considerando estos valores, se concluyó la calibración con los parámetros calibrados y validados.

Indicadores	Periodo	
	2009-2010	2005-2006
NSE	0.75	0.72
Pico máximo observado (m³/s)	716.9	602.00
Fecha pico máximo observado	20/02/2010	25/11/2005
Pico máximo simulado (m³/s)	656.9	587.8
Fecha pico máximo simulado	20/02/2010	25/11/2005
Volumen total observado (hm³)	5622.79	5622.79
Volumen total simulado (hm³)	5978.78	6939.32
Diferencia del volúmen	+6.33%	+3.13%

Tabla x. Indicadores de evaluación del modelo hidrológico en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, con los parámetros establecidos, se generaron caudales para el periodo del 2006 al 2018, los cuales fueron utilizados como aportes laterales en el modelo hidráulico (figura x).

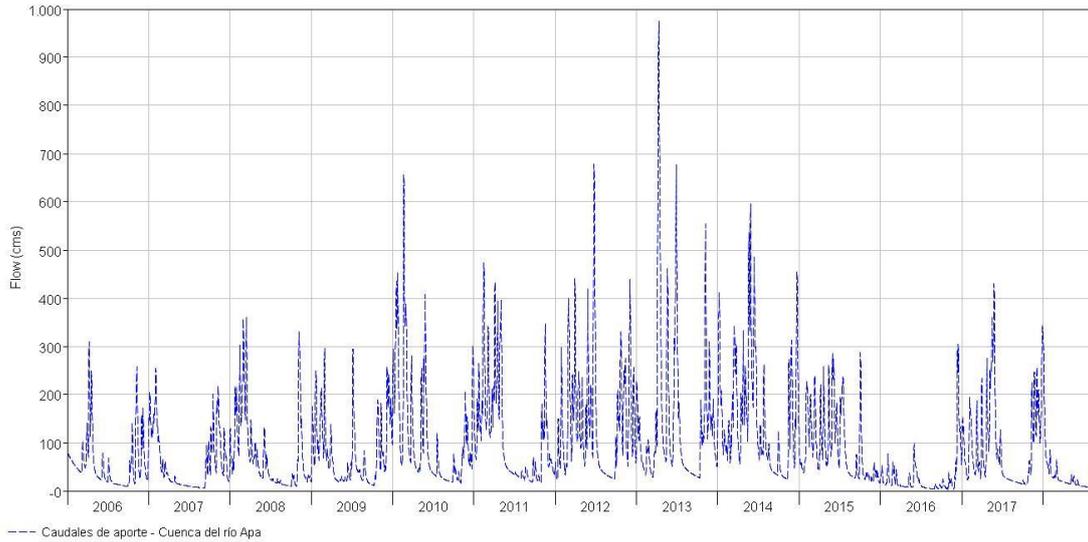


Figura x. Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico de la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca del río Aquidabán

La calibración en esta cuenca consistió en ajustar los parámetros iniciales comparando los resultados calculados con los caudales sintéticos estimados a partir de datos de nivel hidrométrico del Anuario Hidrográfico. Los caudales sintéticos se generaron de datos de nivel en la Estación Paso Barreto de la ANNP (figura x).

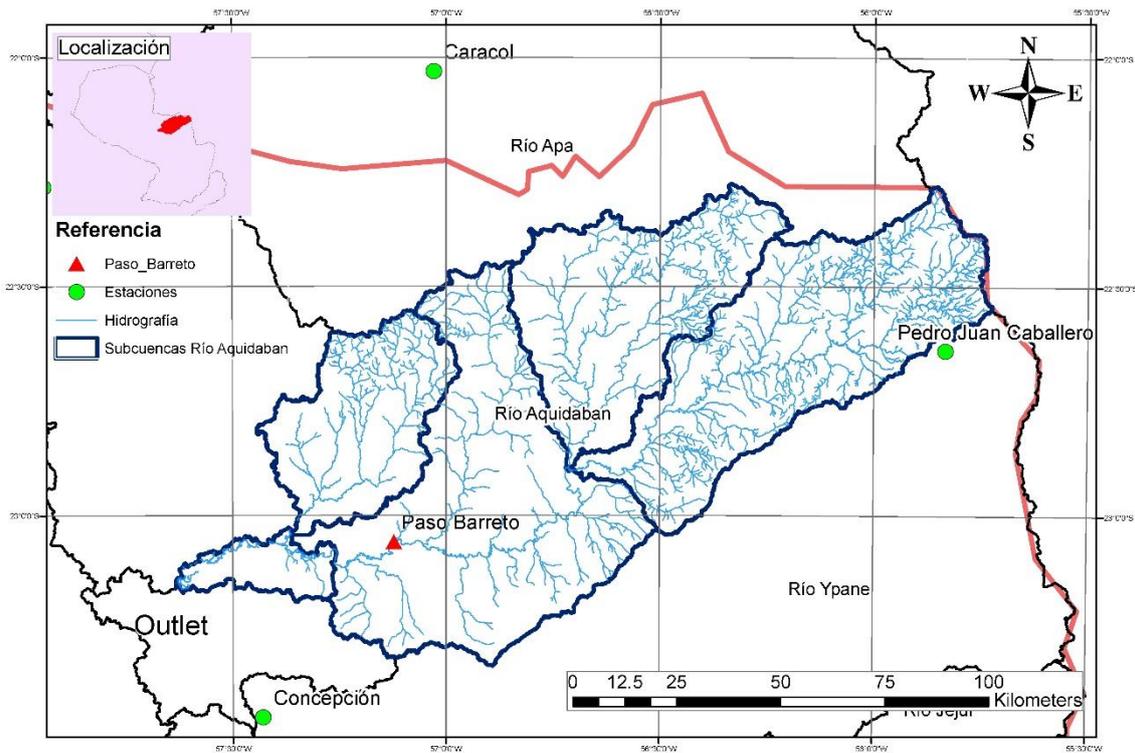


Figura x. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia.

Caudales sintéticos

Primeramente, se estimaron los caudales mediante el método de Área Pendiente, posteriormente, los valores medios mensuales del periodo de datos completo fueron ajustados con valores promedios mensuales de caudal del río Aquidabán, estimados por métodos estadísticos en el Proyecto “Inventario de los Recursos Hidroenergéticos de las cuencas hidrográficas de los ríos afluentes del Paraná y Paraguay en la Región Oriental del Paraguay (2013)”, el resultado se muestra en la tabla x. Con este ajuste, se generaron caudales diarios a partir de datos de nivel (figura x) que se utilizaron para el ajuste del modelo hidrológico.

Mes	Q1 RHPY	Q2 Anuario
Ene	38.08	38.72
Feb	43.68	39.62
Mar	42.72	60.00
Abr.	43.32	25.14
May.	33.68	53.74
Jun.	31.12	32.71
Jul.	38.84	26.51
Ago.	31	14.02
Sep.	39.12	16.69
Oct.	33.8	23.23
Nov.	35.48	44.54
Dic.	39.16	75.09
Promedio	37.50	37.50

Tabla x. Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación Paso Barreto. Fuente: Elaboración propia.

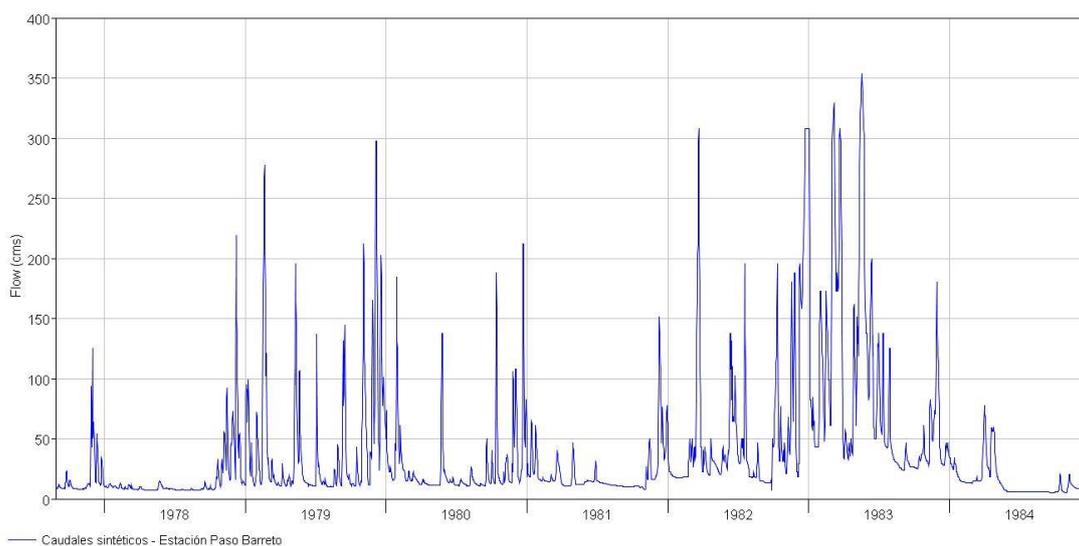


Figura x. Caudales sintéticos generados en la estación Paso Barreto. Fuente: Elaboración propia.

Calibración

De acuerdo a la calidad y cantidad de los datos, se seleccionó para la calibración el periodo del 02 de Enero de 1981 al 31 de Diciembre de 1982. El resultado se muestra en la figura x, los caudales simulados no se ajustan principalmente en frecuencia con los caudales sintéticos, sin embargo, se mantienen dentro del mismo rango de magnitudes, considerando el método

utilizado, y consultando con datos bibliográficos del río, los valores obtenidos se consideran aceptables para el propósito del modelo, así, con los parámetros establecidos, se generan los caudales de aporte por el periodo 2006 al 2018 (figura x).

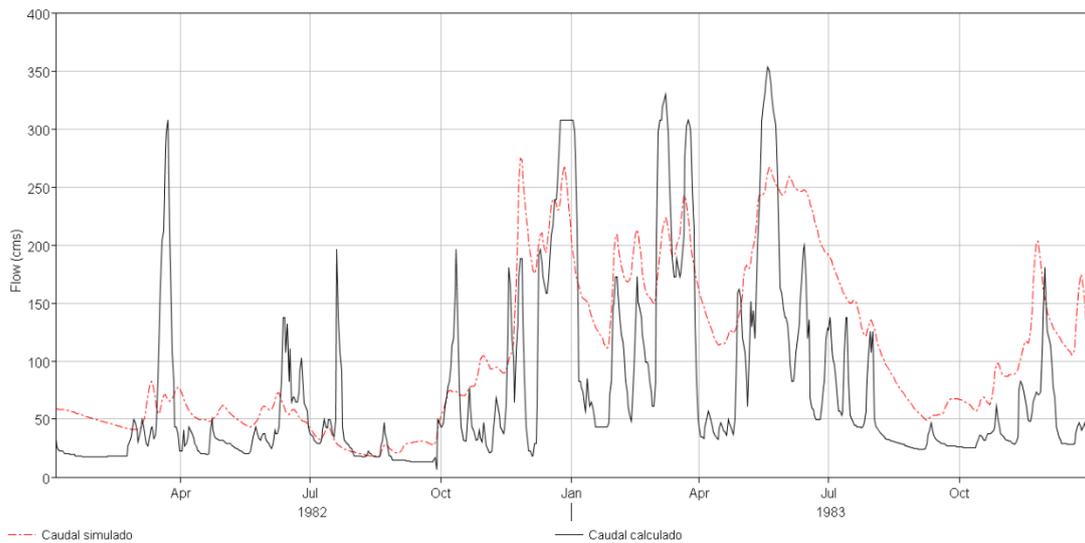


Figura x. Calibración del modelo hidrológico de la cuenca del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia.

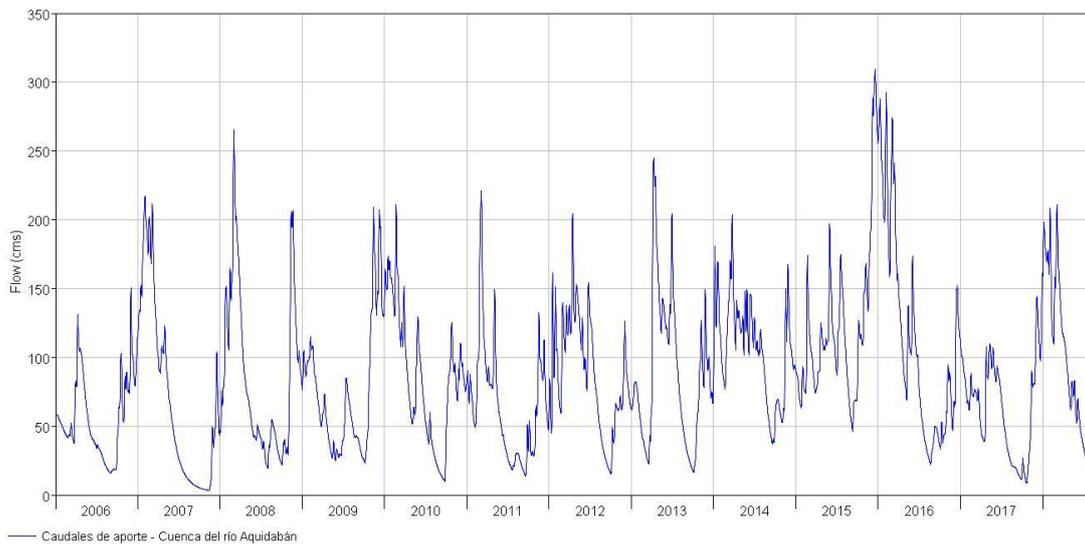


Figura x. Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico de la cuenca del río Aquidabán. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca del río Ypané

Para la calibración y generación de caudales sintéticos, se utilizó la estación de Belén (figura x). Se utilizó el mismo procedimiento de ajuste que en la cuenca del río Aquidabán.

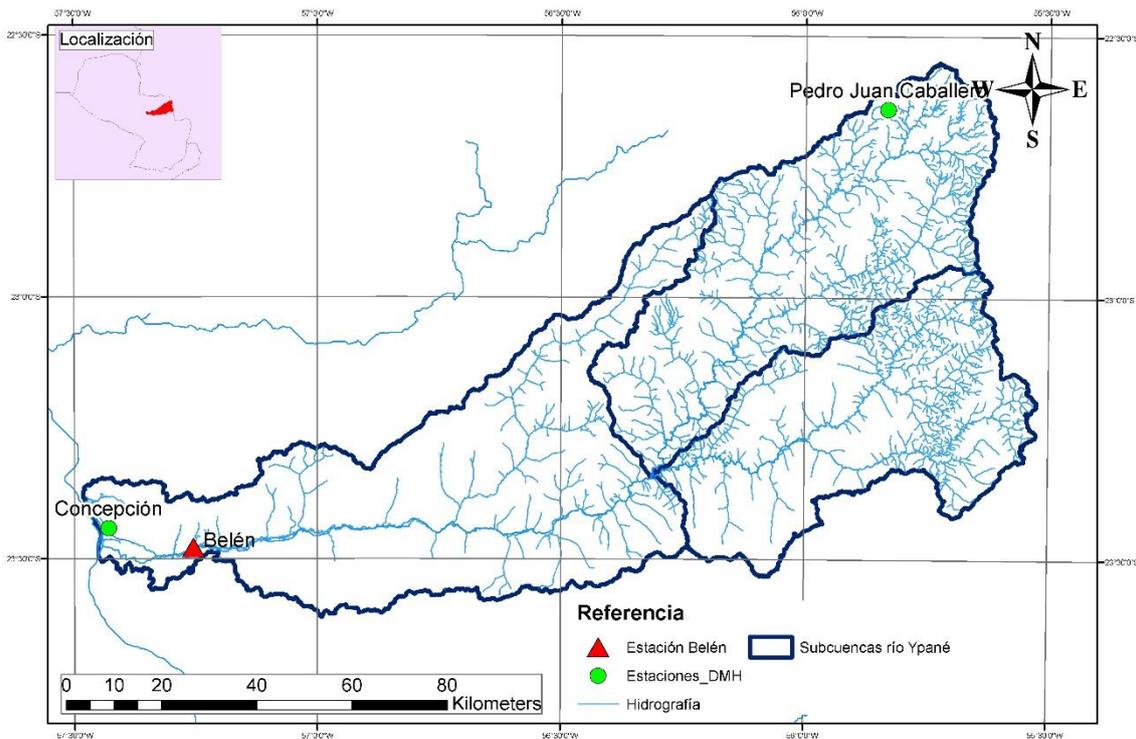


Figura x. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

Caudales sintéticos

Con los datos de nivel de la estación de Belén de la ANNP, se generaron los caudales sintéticos y estos se ajustaron con valores promedios mensuales estimados por el Proyecto RHPY (2013), los valores optimizados se muestran en la tabla x. Así, se generaron caudales sintéticos utilizados para calibrar el modelo hidrológico (figura x).

Mes	Q1 RHPY	Q2 Anuario
Ene	63.37	78.63
Feb	62.43	72.31
Mar	64.91	70.26
Abr.	69.37	59.08
May.	78.31	85.69
Jun.	77.40	63.45
Jul.	69.74	53.35
Ago.	57.37	48.65
Sep.	57.20	53.42
Oct.	70.80	63.56
Nov.	73.71	71.91
Dic.	65.60	89.94
Promedio	67.52	67.52

Tabla x. Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación Belén. Fuente: Elaboración propia.

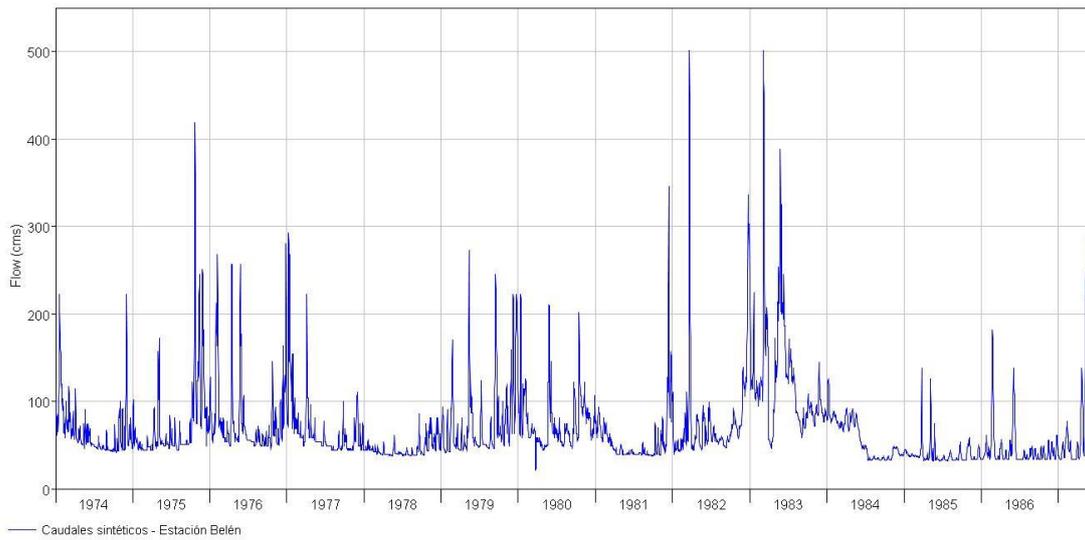


Figura x. Caudales sintéticos generados en la estación Belén. Fuente: Elaboración propia.

Calibración

El periodo seleccionado fue el del 02 de Enero de 1982 al 31 de Diciembre de 1983 , el resultado se muestra en la figura x. Se muestra un mejor ajuste al de la cuenca del Aquidabán, en los caudales sintéticos, se observan picos altos que el modelo no logra replicar y que tampoco se ajustan a los valores de referencia, de igual forma, ambos hidrogramas tienen un comportamiento similar. Nuevamente, se generan los caudales de aporte al río Paraguay con los parámetros estimados (figura x) en el periodo del 2006 al 2018.

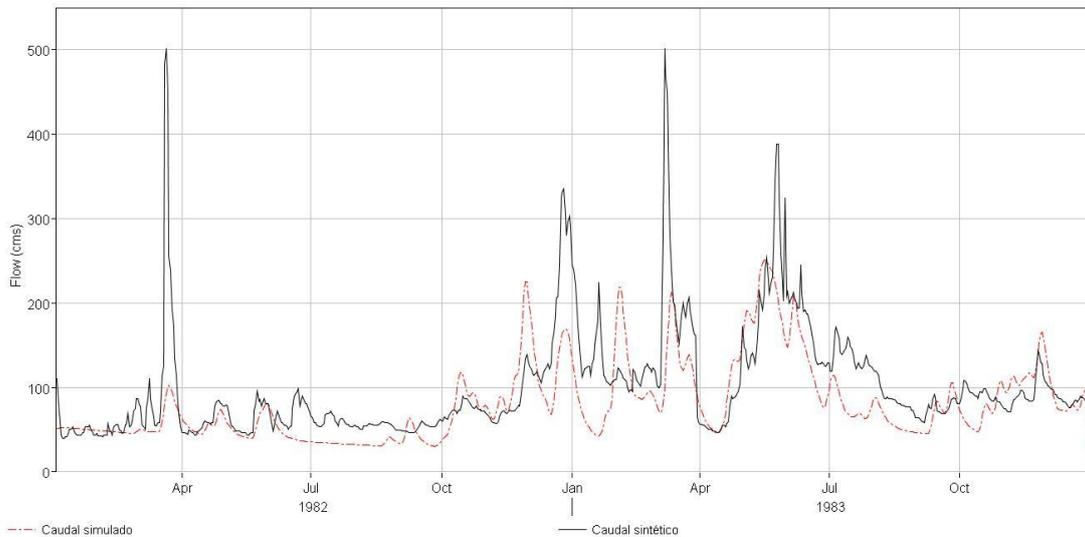


Figura x. Calibración del modelo hidrológico de la cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

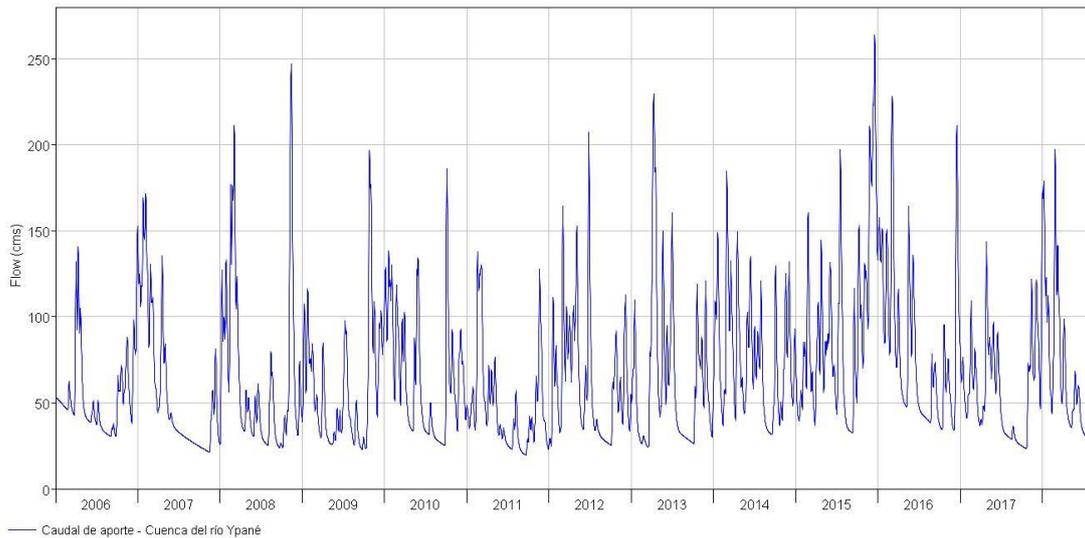


Figura x. Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico de la cuenca del río Ypane. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca del río Jejuí

Se utilizó la estación Cruce Ruta III de la ANNP (figura x) para el ajuste de parámetros.

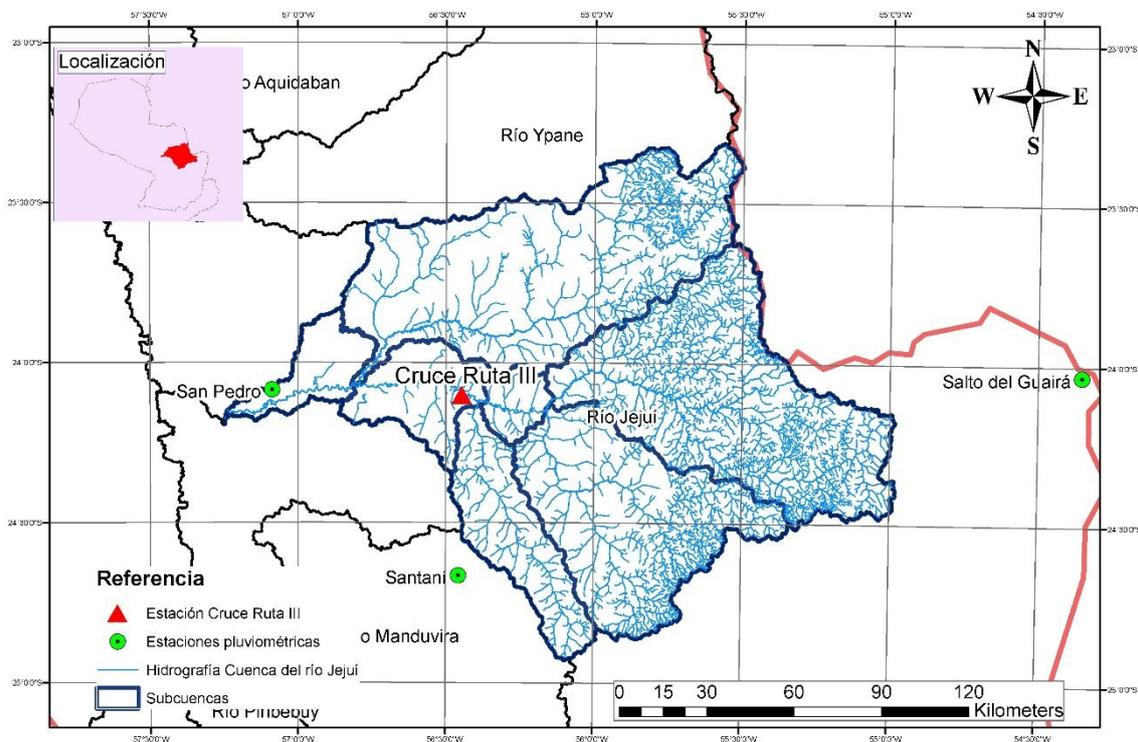


Figura x. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

Caudales sintéticos

Con el mismo procedimiento de las cuencas anteriores, se estimaron los caudales sintéticos a partir de los datos de nivel en la Estación Cruce Ruta III de la ANNP. Los resultados se ajustaron de acuerdo a caudales medios anuales provenientes de datos medidos de estaciones en la

cuenca del río Jejuí y determinados por el proyecto IPH MEN (tabla x), los caudales generados se muestran en la figura x.

Años	Qmed IPH	Qmed Anuario
1978	65.2071731	76.48
1979	145.87353	260.66
1980	113.062635	176.87
1981	97.7562625	146.83
1982	185.736977	192.19
1983	454.798944	345.65
1984	256.792166	232.25
1985	127.501235	163.78
1986	138.173799	228.06
1987	607.71496	260.31
1988	114.211116	162.05
1989	221.155038	154.87
1990	176.162085	203.45
1991	88.9805276	189.68
Promedio	199.509032	199.5092857

Tabla x. Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación Cruce Ruta 3. Fuente: Elaboración propia.

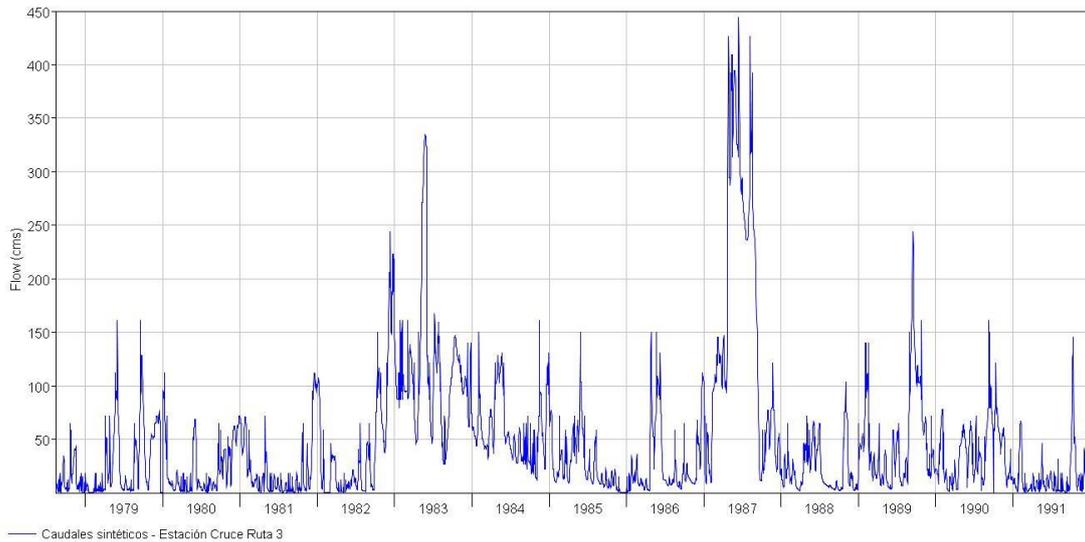


Figura x. Caudales sintéticos generados en la estación Cruce Ruta 3. Fuente: Elaboración propia.

Calibración

El periodo de calibración fue establecido entre el 02 de Enero de 1982 y el 31 de Diciembre de 1983. Se muestra el resultado del proceso en la figura x, en donde se tiene un ajuste adecuado a lo largo del periodo de simulación, acompañando en general la frecuencia de los caudales sintéticos. El ajuste se consideró satisfactorio y se generaron los caudales de aporte al río Paraguay en el periodo del 2006 al 2018 (figura x).

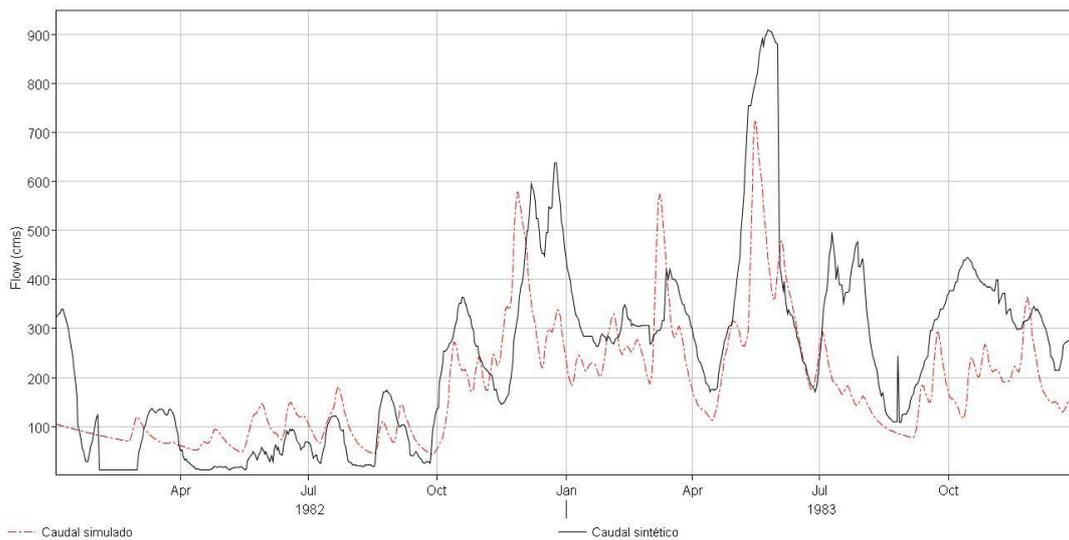


Figura x. Calibración del modelo hidrológico de la cuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

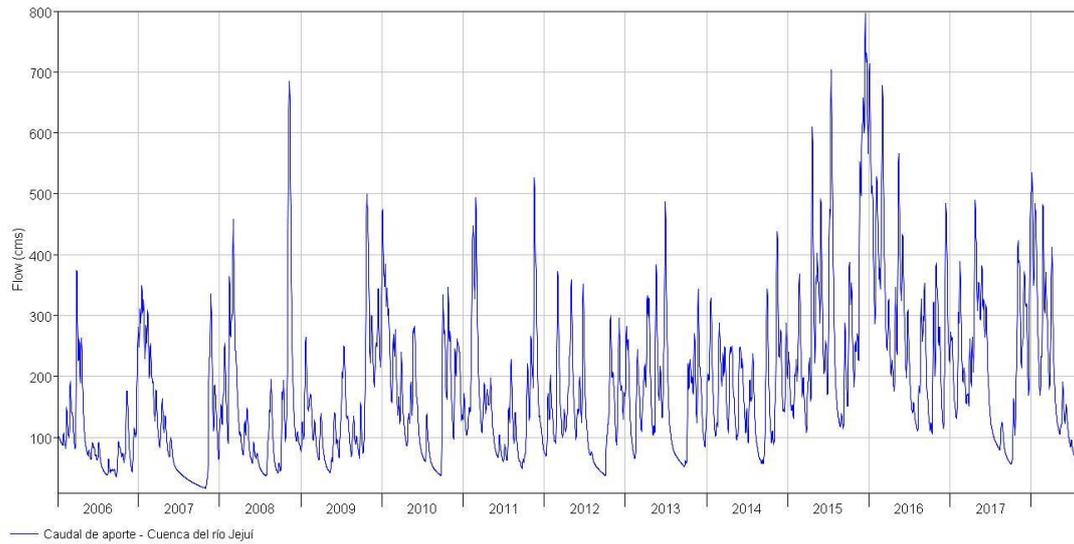


Figura x. Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico de la cuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca del río Manduvirá

La calibración se realizó con los datos de la estación ubicada en Tobatí Tuyá (figura x), recopilados del anuario hidrográfico.

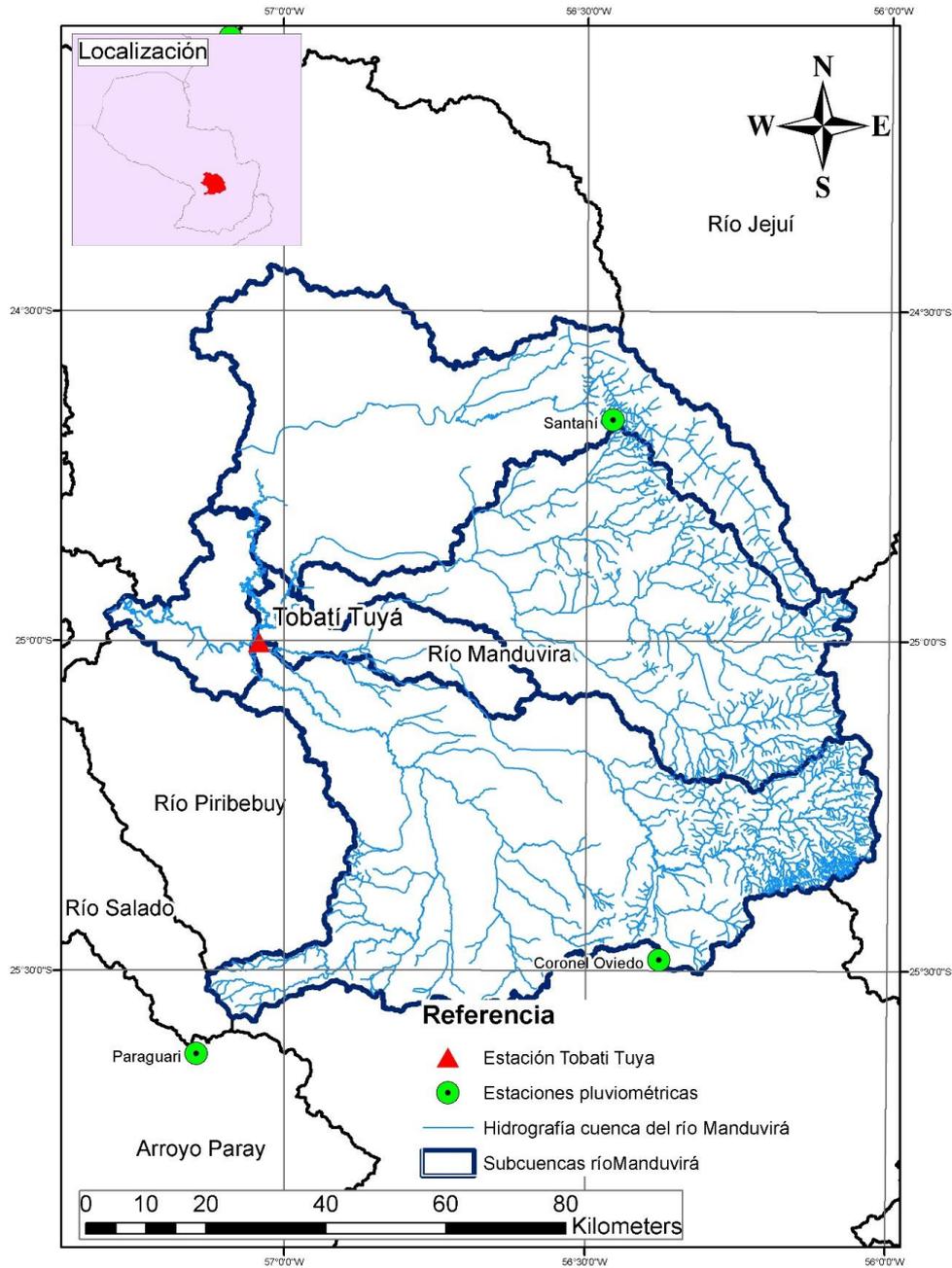


Figura x. Estaciones utilizadas en la cuenca del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

Caudales sintéticos

Se generaron caudales sintéticos a partir de los datos de nivel de la Estación Tobatí Tuyá, para el ajuste, no se tenían valores históricos de caudal como en los casos anteriores, sin embargo, se ajustaron los valores de acuerdo al valor promedio manejado en la bibliografía, donde el caudal promedio (17 años de registro - Balance Hídrico DINAC) del Río Manduvirá es $136 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a 456 mm de escorrentía (Toñánez, 2014), el resultado se muestra en la tabla x y la figura x.

Mes	Q Sintético
Ene	116.938427
Feb	93.11156
Mar.	97.3985096
Abr.	119.288242
May.	172.564779
Jun.	205.076664
Jul.	184.836818
Ago.	168.823859
Sep.	133.384107
Oct.	101.228839
Nov.	103.093826
Dic.	136.252955
Promedio	135.999882

Tabla x. Ajuste de caudales sintéticos generados en la estación Tobatí Tuyá. Fuente: Elaboración propia.

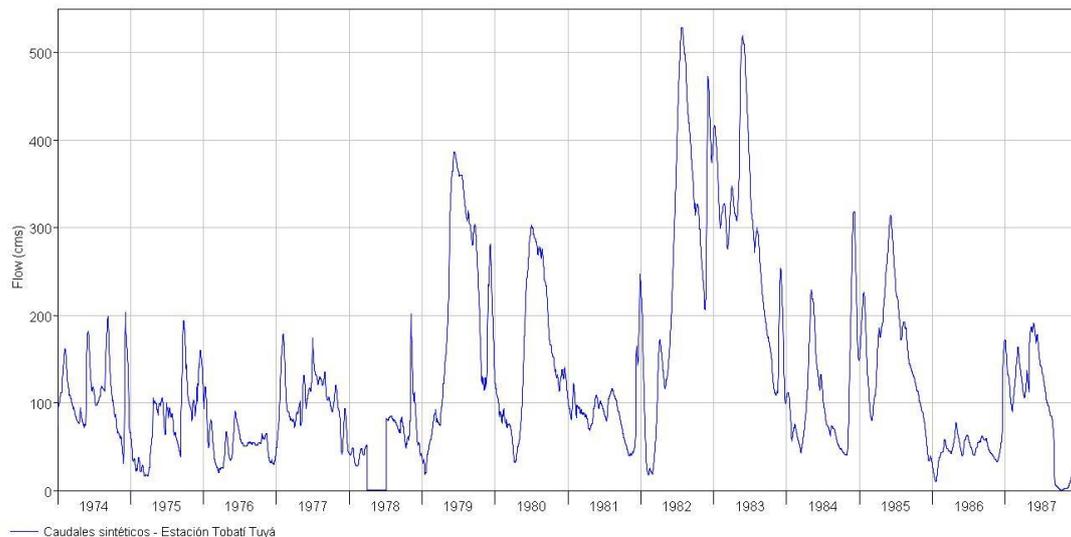


Figura x. Caudales sintéticos generados en la estación Tobatí Tuyá. Fuente: Elaboración propia.

Se tienen también datos de caudal medido en la misma estación, constanding de doce registros entre el año 1971 y el 1991, con lo cual fue posible establecer una curva H-Q y una ecuación que se ajuste a la misma, sin embargo, los caudales convertidos a partir de ésta superan el promedio establecido en casi $100 \text{ m}^3/\text{s}$, y al realizar la calibración, los resultados quedan muy por debajo de estos valores, por lo que se optó por utilizar los caudales determinados a partir del método Área – Pendiente, los cuales varían solo en magnitud, pero se ajustan mejor al modelo.

Calibración

De acuerdo a lo detallado, se ajustó el modelo con los datos de la estación Tobatí Tuyá, el periodo de simulación seleccionado fue del 04 de Enero de 1974 al 31 de Diciembre de 1975, el resultado se muestra en la figura x. Al inicio del periodo de simulación, se observa una frecuencia similar pero con una diferencia de magnitud notable, esto se puede deber a la escasez en los datos de precipitación, los cuales no logran representar correctamente la variabilidad que ocurre dentro de una cuenca de mayor tamaño como esta, el ajuste mejora al

final del periodo y en general, no es óptimo, pero se los considera aceptable para los efectos del proyecto, como se mencionó anteriormente, de haber desfases muy grandes, éstos se notan en el modelo hidráulico y se pueden corregir de esta forma. Con los parámetros establecidos, se generaron los caudales de aporte a dicho modelo (figura x).

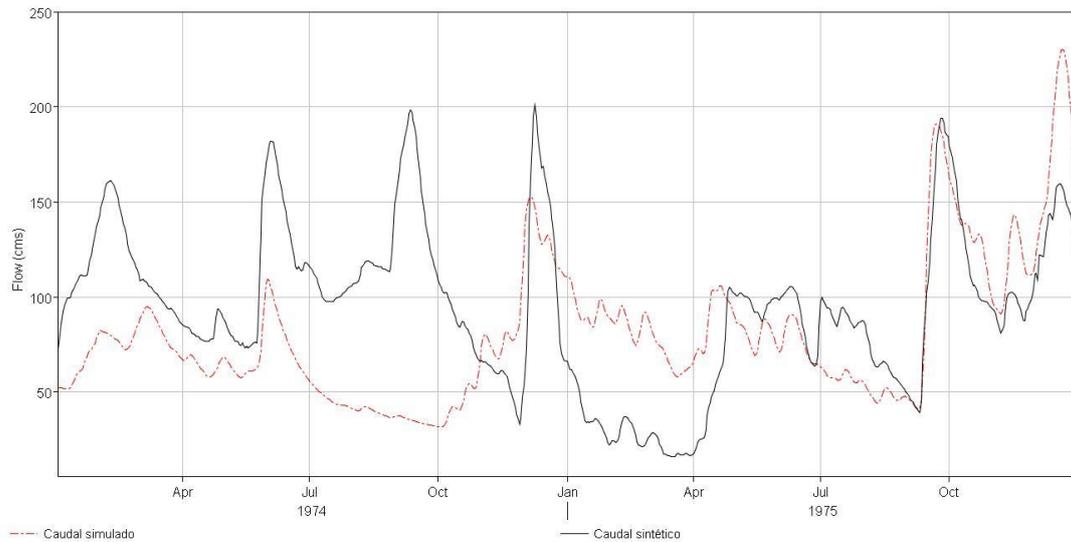


Figura x. Calibración del modelo hidrológico de la cuenca del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

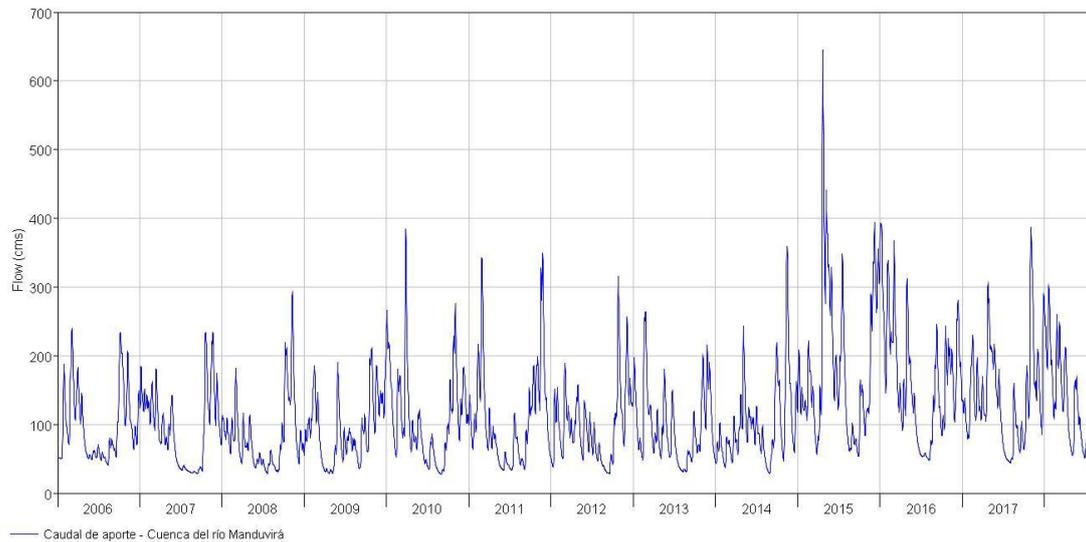


Figura x. Caudales de aporte generados por el modelo hidrológico de la cuenca del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones y Recomendaciones

Conforme se observaron, se alcanzaron resultados, en general, aceptables. Se obtuvieron resultados muy buenos en la cuenca del río Apa, con valores altos del coeficiente R², a pesar de la escasez de datos de precipitación. La calibración en las cuencas de los ríos Ypané y Manduvirá se consideraron buenos en el periodo de calibración, sin embargo, el ajuste no fue óptimo en las cuencas de los ríos Aquidabán y Manduvirá, pero, para los fines de esta componente del proyecto, se consideran suficientes.

Ante la ausencia de datos de caudal observado en la mayoría de las cuencas, se recurrió al método de Área-Pendiente para la generación de caudales sintéticos, con los cuales se ajustaron los modelos. Éstos no comprenden datos reales, por lo que se manejan teniendo en cuenta sus limitaciones, asimismo, esto hizo que la calibración consista en un ajuste aproximado a estos valores, manteniendo los resultados en un rango de valores aceptables. Es importante destacar la utilidad de este método para situaciones como las que se presentaron en este estudio.

Los hidrogramas se utilizaron como aporte lateral en el modelo hidráulico, y se evaluaron a la par de los resultados de este, de manera a identificar y enmendar errores. Por otro lado, se pudo estimar el nivel de influencia que tienen las cuencas estudiadas en el caudal del río Paraguay que llega a Asunción, según los resultados de las modelaciones, teniendo que de todo el caudal de entrada a Asunción, aproximadamente el 21% de éste representa el aporte de las cuencas de los ríos Apa, Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá. El aporte de cada una de estas cuencas en base a ese porcentaje se observa en la tabla x.

	Apa	Aquidabán	Ypané	Jejuí	Manduvirá
Aporte (%)	23.73	12.92	12.19	29.70	21.46

Tabla x. Aporte de caudal de las cuencas de estudio. Fuente: Elaboración propia

También es indispensable aumentar la densidad de las estaciones de monitoreo. La cantidad de estaciones pluviométricas para cada cuenca fue muy por debajo de lo recomendado, limitando considerablemente los resultados. De igual forma, no se contaron con datos de caudal observado en las cuencas; a excepción de la del río Apa, siendo lo óptimo realizar la calibración con datos reales y en periodos más recientes.

En trabajos posteriores, sería necesario evaluar los modelos utilizando métodos diferentes y realizando una mayor discretización en las cuencas, como lo realizado en la tesis “Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay (Aseretto, 2018)”

Por último, es necesario destacar que, con las limitaciones encontradas, se generaron modelos hidrológicos para cinco cuencas de gran importancia en la Región Oriental, los cuales constituyen un importante aporte del proyecto, facilitando la posibilidad de mejorarlos ante mayor cantidad y calidad de datos, en aplicaciones futuras.