Global Gateway

Cofinanciado por la Unión Europea

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

PROGRAMA EUROCLIMA

Informe de entrega de productos

Producto 6: Modelación Hidrodinámica

Nombre de la consultoría: Modelación hidrológica e hidrodinámica del río Paraná y modelo de detalle de calidad de agua en la Toma Hernández para distintos escenarios de clima futuro

Fecha: 30 de marzo de 2026

País: Argentina

Producido: Instituto Nacional del Agua

Este informe se ha elaborado para el Programa EUROCLIMA de la Unión Europea,

Se enmarca en la acción Apoyo a la *Territorialización de la Acción Ambiental con foco en Adaptación al Cambio Climático*, que se desarrolla dentro del proyecto "Estudios para mejorar la gestión del agua en un contexto de cambio climático"

AUTORIDADES del INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA

PRESIDENTE (A/C del despacho)
Lic. Bernardo Bartolomé HEREDIA

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS
Lic. Mercedes CURBELLO

SUBGERENTE LABORATORIO DE HIDRÁULICA
Dr. Ing. Pablo Ezequiel GARCÍA

SUBGERENTE LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS
Bioq. Yanina EL KASSISSE

SUBGERENTE CENTRO REGIONAL LITORAL
Ing. Jorge COLLINS

PERSONAL PARTICIPANTE EN LA REALIZACIÓN DEL SIGUIENTE TRABAJO

SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Programa de Hidráulica Computacional

Mag. Lic. Nicolás E. ORTIZ
Dr. Ing. Pablo E. GARCIA
Ing. Martín SABAROTS GERBEC
Ing. Santiago GUIZZARDI
Mag. Ing. Martiano RE

SUBGERENCIA LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS

Laboratorio Experimental de Tecnologías Sustentables

Lic. Bárbara GOMEZ
Lic. Marisol REALE
Téc. Qca. Lorena MARQUINA
Sra. Silvia MOYANO
Lic. Valeria RODRIGUEZ SALEMI
Doc. Virginia ZAPLARA
Téc. Qco. Nelson DIAZ
Lic. Carolina MUJICA
Sr. Germán LOZA

SUBGERENCIA CENTRO REGIONAL LITORAL

Lic. Esteban COLLINS
Ing. Rosana MAZZON
Sr. Guido STORANI
Ing. Jorge COLLINS
Dra. Silvia RAFAELLI

INFORME ELABORADO POR:

Ing. Santiago GUIZZARDI
Ing. Martín SABAROTS GERBEC
Dr. Ing. Lucas DOMINGUEZ

1. INTRODUCCIÓN 6

2. OBJETIVOS GENERALES 7

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 7

4. UBICACIÓN 9

5. INFORMACIÓN DE BASE 10

5.1. Modelos Digitales de Elevación 10

5.1.1. Metodología de construcción del MDE 12

5.2. Series de Niveles y Caudales 13

6. MODELO HIDRODINÁMICO 15

6.1. Implementación 15

6.1.1. HEC-RAS 15

6.1.2. Geometría 16

6.1.3. Modelo Paraná 19

6.1.4. Modelo Santa Fe 21

6.1.5. Modelo Delta 24

6.2. Calibración 26

6.2.1. Modelo Paraná 27

6.2.2. Modelo Santa Fe 29

6.2.2.1. Modelo Delta 31

7. CONCLUSIONES 32

8. REFERENCIAS 33

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde al Producto 6 de la consultoría “Modelización Hidrológica e Hidrodinámica del Río Paraná y Modelo de Detalle de Calidad de Agua en la Toma Hernández para distintos Escenarios del Clima Futuro”, financiada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y coordinada por la Universidad Nacional de Quilmes.

Frente a los desafíos que plantea la creciente variabilidad hidrológica y climática sobre los sistemas de abastecimiento, resulta clave contar con información detallada sobre las condiciones actuales y proyectadas de la calidad del agua. En ese sentido, este componente integra tareas de relevamiento hidrométrico, muestreo intensivo, modelación ambiental y relevamiento de empresas prestatarias a fin de anticipar escenarios de riesgo para la operación de tomas de agua potable y aportar evidencia para la planificación de medidas de adaptación.

El sistema hídrico del río Paraná constituye uno de los sistemas fluviales más complejos y extensos de América del Sur, caracterizado por una intrincada red de cauces secundarios, llanuras de inundación y áreas de humedales que interactúan de manera dinámica con el cauce principal. La comprensión y modelación de su comportamiento hidráulico representa un desafío técnico de considerable magnitud, tanto por la escala espacial involucrada como por la complejidad de los intercambios entre el sistema principal y su planicie aluvial.
En este contexto, el presente informe resume el procedimiento llevado a cabo para la formulación de un modelo numérico unidimensional mediante el software de cálculo HEC-RAS (Hec Ras, 2010). Esta herramienta, ampliamente utilizada a nivel

internacional para la simulación hidráulica en ríos y sistemas fluviales, permite representar el comportamiento del flujo en régimen permanente y no permanente, constituyendo una solución adecuada para el tipo de sistema analizado.

2. OBJETIVOS GENERALES

- Implementar un modelo hidrodinámico de la cuenca del río Paraná para simular condiciones actuales y futuras. Esta actividad se orienta a la generación de un modelo hidrodinámico numérico del tramo argentino del río Paraná, desde la confluencia con el río Paraguay hasta la ciudad de Santa Fe. El objetivo es caracterizar la evolución de niveles, velocidades y caudales en escenarios actuales y de cambio climático, generando insumos esenciales para el forzamiento de modelos locales (modelo de detalle y modelo de calidad de agua).

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para poder implementar un modelo numérico de calidad de agua para condiciones de clima futuro se debe contar previamente con un modelo hidrodinámico calibrado y validado para luego implementar el modelo de calidad de agua y validarlo cuando sea posible. En este sentido, las tareas documentadas en el presente informe tuvieron los siguientes objetivos específicos:

- Construcción del dominio de simulación a partir de información topográfica y batimétrica, integrando canales principales, brazos secundarios y áreas de

llanura de inundación.

- Definición de condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo, utilizando los resultados del modelo hidrológico (Producto 2) y series históricas disponibles.
- Calibración hidrodinámica con datos observados de niveles y caudales en estaciones hidrométricas a lo largo del tramo modelado.
- Validación cruzada con períodos alternativos.
- Implementación de escenarios de cambio climático, usando series de caudales y niveles sintéticos generadas a partir del modelo hidrológico forzado con proyecciones climáticas (escenarios SSP1-2.6 (emisiones bajas), SSP2-4.5 (emisiones medias) y SSP5-8.5 (emisiones altas), en horizontes 2021-2040 (corto plazo), 2041-2060 (mediano plazo) y 2081-2100 (largo plazo).. Vale aclarar que se usarán estos escenarios en caso de que se cuente con los valores diarios, caso contrario se reducirá a los escenarios disponibles para los que se cuente con estos datos.
- Simulación de condiciones estacionarias y transitorias bajo distintos percentiles (10, 50 y 90), para representar condiciones seca, media y húmeda.

Este informe presenta los resultados finales de la implementación del sistema de modelos hidrodinámicos, forzado con series de caudales que surgen del modelo hidrológico de la cuenca del río Paraná. Se presentan además la validación del mismo en comparación con datos observados.

4. UBICACIÓN

El sistema modelado corresponde al tramo inferior de la cuenca del Plata, abarcando el eje principal de los ríos Paraguay–Paraná y sus principales aportes en cabecera (Figura 1). El dominio del modelo hidrodinámico incluye:

- El río Río Paraguay desde la zona de Asunción hacia el sur, hasta su confluencia con el río Paraná.
- El río Río Iguazú desde el sector de Cataratas del Iguazú hasta su desembocadura en el Paraná.
- El río Paraná desde la represa de Itaipú aguas abajo, extendiéndose a lo largo de todo su curso medio e inferior hasta su desembocadura en el Río de la Plata.

En términos de extensión, el tramo modelado del río Paraná comprende del orden de 1.500 a 2.000 km, considerando desde Itaipú hasta el estuario. Desde el punto de vista territorial, el sistema atraviesa tres países: Brasil, Paraguay y Argentina, actuando en varios tramos como límite internacional. Dentro de Argentina, el modelo involucra al menos siete provincias: Misiones, Corrientes, Chaco, Formosa (en el sistema Paraguay), Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires, incluyendo el tramo deltaico y la desembocadura.

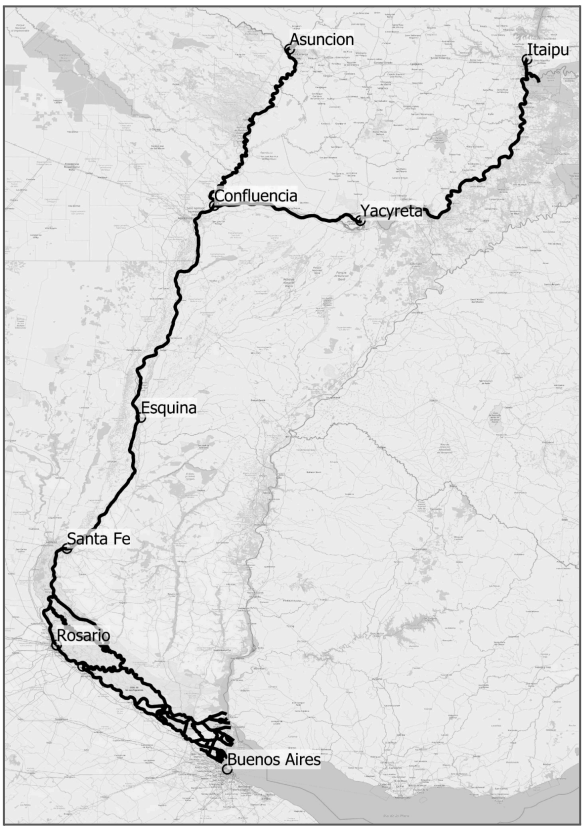


Figura 1. Ubicación del área de modelación

5. INFORMACIÓN DE BASE

5.1. Modelos Digitales de Elevación

Para la construcción del modelo digital de elevación (MDE) del área de estudio se integraron múltiples fuentes de información topográfica y batimétrica, priorizando aquellas de mayor resolución y confiabilidad, y asegurando su compatibilidad en términos de referencia vertical, horizontal y continuidad espacial.

En primer lugar, se utilizaron modelos digitales de terreno generados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) correspondientes al año 2021, los cuales cubren la planicie

aluvial del río Paraná en el tramo comprendido entre Iguazú y el Delta del Paraná. Estos modelos constituyen la base regional del análisis, aportando una cobertura homogénea y consistente para amplias extensiones del área de estudio.

Adicionalmente, se incorporó información de alta resolución proveniente de relevamientos Lidar disponibles en tres sectores específicos: Resistencia–Corrientes, Santa Fe–Paraná y Rosario–Victoria. En cada uno de estos casos, los datos Lidar fueron utilizados tanto para mejorar la representación del terreno como para realizar comparaciones y validaciones respecto de los modelos derivados de vuelos aerofotogramétricos, permitiendo evaluar diferencias sistemáticas y ajustar localmente la topografía.

En aquellos sectores donde no se dispone de modelos de elevación de alta resolución, se recurrió al modelo global MERIT (Multi-Error-Removed Improved Terrain), el cual permite completar la cobertura espacial del dominio de modelación. Dado que este producto presenta limitaciones en áreas de llanura aluvial y zonas con densa vegetación, se procedió a su corrección mediante la incorporación de puntos acotados provenientes de distintas fuentes. Esta corrección permite ajustar los niveles absolutos del MERIT y mejorar su coherencia con los datos locales de mayor precisión.

A partir de esta integración, se generó un empalme entre las distintas fuentes de información, priorizando los datos de mayor calidad (Lidar y puntos acotados) pero manteniendo la continuidad espacial y el nivel de detalle del MDE en toda el área. Este proceso permitió obtener una superficie topográfica consistente, continua y representativa de las condiciones reales del terreno.

En lo que respecta a la componente batimétrica, se integró información proveniente de la Vía Navegable Troncal, incluyendo el canal de navegación desde Corrientes hasta el Río de la Plata. Esta base fue complementada con relevamientos puntuales de alta resolución, entre los que se destacan los estudios desarrollados por FICH para la

modelación del Delta Superior, así como campañas específicas realizadas en el marco del presente proyecto.

Finalmente, se incorporó información adicional del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), en particular mediante la digitalización de curvas de nivel y puntos acotados contenidos en cartas náuticas. Esta información permitió mejorar la representación del fondo en sectores donde no se disponía de relevamientos recientes o de alta resolución.

La integración de todas estas fuentes dio lugar a un modelo digital de elevación unificado, que combina información topográfica y batimétrica, y que constituye la base para los análisis hidrodinámicos posteriores.

5.1.1. Metodología de construcción del MDE

A continuación, se describe de manera resumida el procedimiento seguido para la formulación del modelo:

Compilación de fondo de cauces secundarios. Se recopilaron y procesaron distintas fuentes información topobatimétrica en el área de estudio, los cuales constituyeron la base de información para la caracterización del fondo de los cauces y planicies.

Generación de fondo de cauces en tramos sin relevamiento. En aquellos sectores donde no se contaba con información batimétrica, se estimó la geometría del fondo mediante técnicas de interpolación y pseudo-verificación (medido contra generado), garantizando la continuidad de la red de drenaje modelada. Empleando la herramienta PyRiverBed (Li y Garcia, 2018).

Integración de modelos digitales de elevación. Se integraron las distintas fuentes de información topográfica y batimétrica disponibles con el fin de obtener un Modelo Digital de Elevación (MDE) unificado y consistente para todo el dominio de estudio.

Formulación del modelo numérico 1D. A partir del MDE generado, se desarrolló el modelo hidráulico unidimensional en el software HEC-RAS, definiendo la geometría de los cauces, la topología de la red y las condiciones de contorno correspondientes.
Calibración del modelo 1D. Se llevó a cabo una calibración inicial del modelo mediante la comparación de los resultados simulados con información hidrométrica disponible (niveles de superficie de agua), ajustando los parámetros de rugosidad para mejorar la representación del comportamiento hidráulico del sistema.

5.2. Series de Niveles y Caudales

Para la caracterización hidrológica del área de estudio se empleó un conjunto integrado de series de niveles y caudales provenientes de diversas fuentes de información (Figura 2). En particular, se utilizaron registros de niveles correspondientes a estaciones de la red hidrológica nacional y de la Prefectura Naval Argentina, complementados con series de caudales de la red hidrológica nacional y datos provistos por el Instituto Nacional del Agua (INA). Asimismo, se incorporaron antecedentes disponibles de estudios previos y mediciones específicas relevadas en el marco del presente trabajo.
Adicionalmente a la información observada, se utilizaron series de caudales generadas mediante la modelación hidrológica desarrollada en el contexto de este proyecto (Producto 2). Estas series modeladas abarcan el período 2005–2025 y permiten complementar y homogeneizar la información disponible, aportando continuidad temporal y consistencia espacial para los análisis realizados.

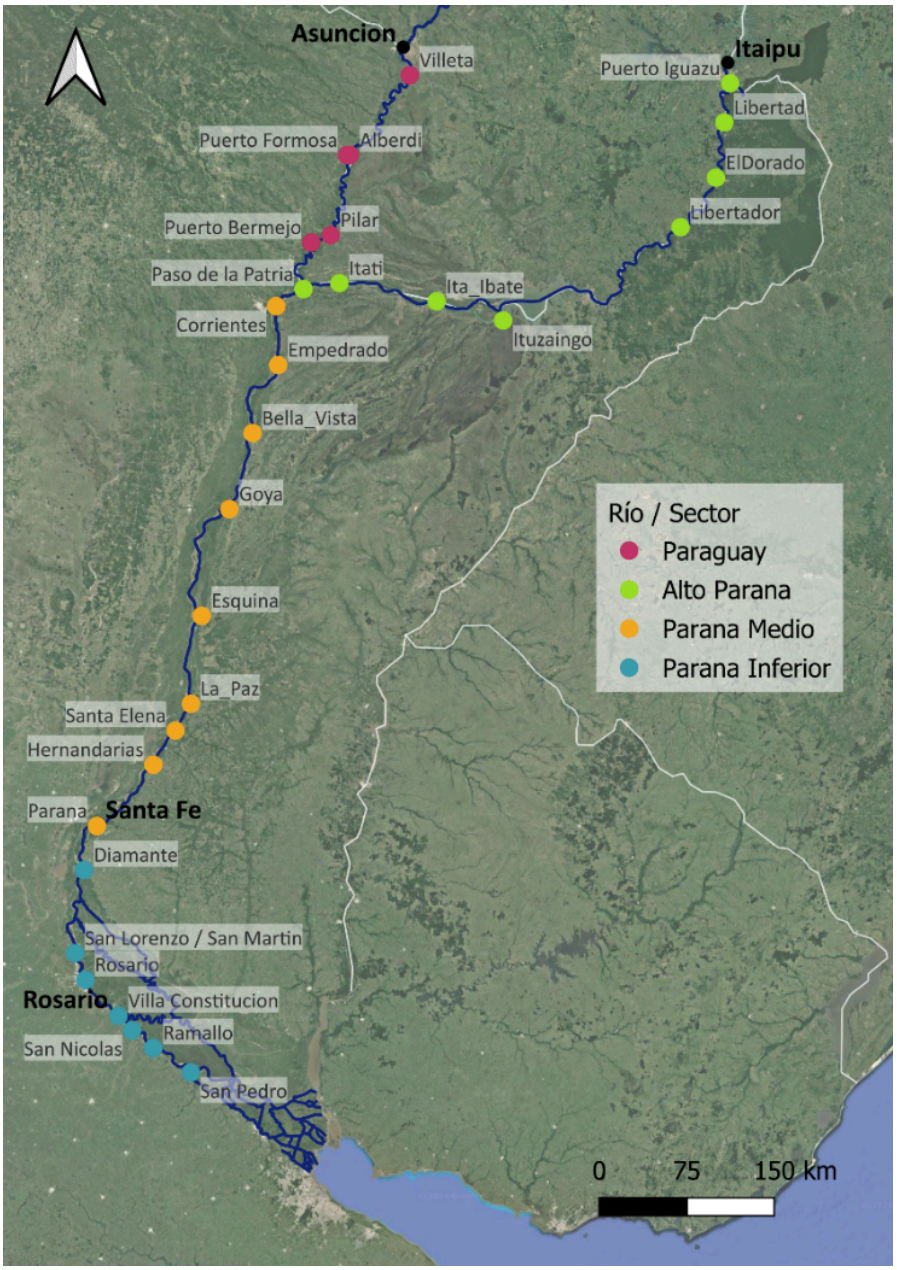


Figura 2. Estaciones con datos observados

6. MODELO HIDRODINÁMICO

6.1. Implementación

6.1.1. HEC-RAS

Para la implementación de los modelos hidrodinámicos se utilizó el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers. Este modelo es una herramienta ampliamente difundida a nivel internacional para la simulación del flujo en ríos y canales, permitiendo resolver tanto condiciones de régimen permanente como no permanente. En particular, HEC-RAS resuelve las ecuaciones de Saint-Venant (conservación de masa y cantidad de movimiento), lo que permite representar la propagación de ondas de crecida, la variación de niveles y caudales a lo largo de un sistema fluvial, así como la interacción entre distintos tramos hidráulicos.

El modelo ha sido implementado en el Instituto Nacional del Agua (INA) en el marco de diversos desarrollos operativos, incluyendo los sistemas de pronóstico hidrológico del río Paraná, Paraguay y el Delta del Paraná. En estos sistemas, HEC-RAS se encuentra integrado a rutinas automáticas de cálculo que permiten generar pronósticos en distintos horizontes temporales, a partir de la actualización continua de condiciones de borde y forzantes hidrológicos.

La versión utilizada corresponde a la rama 6.4.1 del *software*, que incorpora mejoras en la resolución numérica, estabilidad del cálculo y capacidades de integración con sistemas de información geográfica. Para su implementación, el modelo requiere como datos de entrada la geometría del sistema (secciones transversales, perfiles longitudinales, relaciones área–cota), condiciones de contorno (hidrogramas de caudal o nivel en los extremos del dominio), parámetros hidráulicos (coeficientes de

rugosidad de *Manning*, coeficientes de pérdida), y, en el caso de simulaciones no permanentes, condiciones iniciales del sistema.

Cabe destacar que la modelación adoptada en este estudio es de tipo unidimensional (1D), lo que implica que las variables hidráulicas principales (nivel, caudal, velocidad media) se representan como funciones de la coordenada longitudinal del cauce y del tiempo. Este enfoque resulta adecuado para la escala de análisis considerada, permitiendo una representación eficiente y robusta de la dinámica hidrológica del sistema fluvial.

6.1.2. Geometría

La geometría del modelo unidimensional fue construida a partir de secciones transversales generadas con una discretización espacial variable, definida en función de las características hidráulicas y geomorfológicas de cada tramo. En sectores de cauce principal, con mayores gradientes y variabilidad en la sección, se adoptó una mayor densidad de secciones, mientras que en tramos más uniformes o de menor complejidad hidráulica la discretización fue más espaciada.

La información geométrica se extrajo a partir de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) previamente generados y compatibilizados. A partir de estos, se definieron las secciones transversales del cauce y de la planicie de inundación, diferenciando ambas unidades mediante la generación de shapes específicos. Esta separación permite representar de manera más adecuada los procesos de almacenamiento y transporte en la planicie durante eventos de crecida.

La rugosidad hidráulica fue considerada como un parámetro de ajuste del modelo, asignándose valores iniciales en función de las características del terreno y cobertura,

y posteriormente calibrados en función de la comparación entre resultados simulados y observados.

Dada la gran extensión del sistema modelado, se optó por dividir la geometría en tres modelos independientes (ver Figura 3), permitiendo una mejor gestión computacional y un tratamiento más detallado de cada subregión:

1. Modelo de la alta cuenca y tramo medio: comprende el río Paraguay desde Asunción, el río Paraná desde Itaipú y el río Iguazú desde su tramo inferior, convergiendo hasta el eje Santa Fe–Paraná. En este esquema no se incluye la planicie de inundación en el entorno de Santa Fe.
2. Modelo de la planicie de inundación de Santa Fe: incluye la representación detallada de los sistemas vinculados a la llanura aluvial en este sector, incorporando el sistema San Javier, el sistema Setúbal, la conexión con el Colastiné y su descarga hacia el río Coronda. En este caso se modelan explícitamente los intercambios laterales entre cauces y planicies.
3. Modelo del Delta del Paraná: abarca desde el eje Santa Fe–Paraná hasta la desembocadura en el Río de la Plata, incluyendo la compleja red de distributarios y planicies de inundación características del delta.

Esta estrategia de partición permitió trabajar con geometrías acordes a la escala de cada sistema, optimizando tanto la representación de los procesos hidrodinámicos como los tiempos de cálculo.

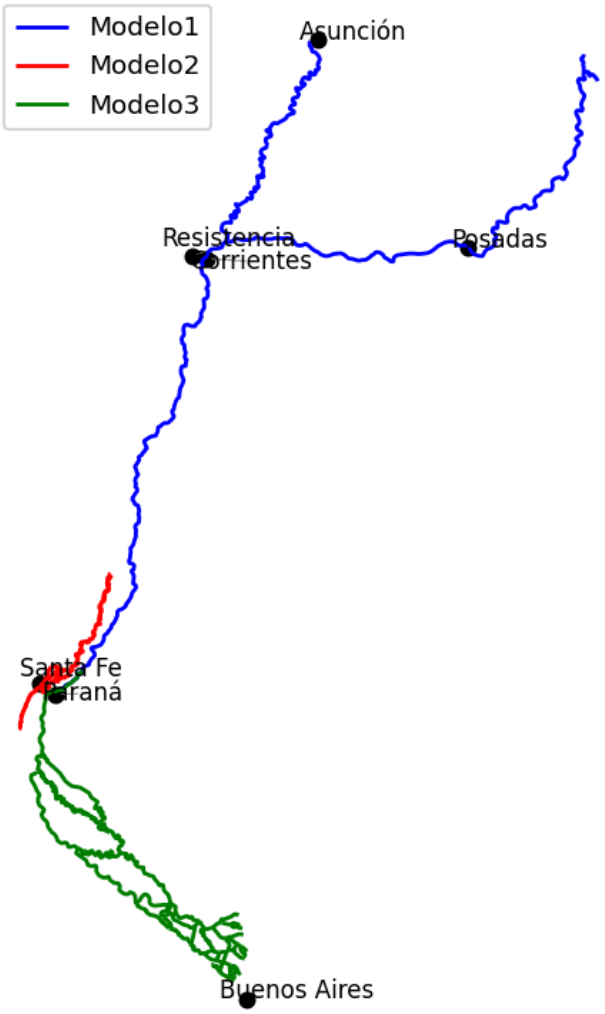


Figura 3. Sub-modelos hidrodinámicos

6.1.3. Modelo Paraná

La topología de modelación del Modelo 1: Paraná se estructura a partir de un esquema unidimensional compuesto por filamentos que representan los principales cursos fluviales del sistema: los ríos Paraná, Paraguay e Iguazú. Esta configuración permite capturar la dinámica longitudinal del escurrimiento, así como las interacciones en los puntos de encuentro entre los distintos cursos.

El modelo cuenta con nodos de vinculación en las principales confluencias, destacándose la unión en el punto trifinio (Argentina–Brasil–Paraguay) y la confluencia entre los ríos Paraná y Paraguay. Estos puntos resultan clave para la correcta representación de los intercambios de caudal y niveles entre los distintos ejes fluviales.

Las secciones transversales fueron definidas de manera tal de abarcar no sólo el cauce principal, sino también la planicie de inundación asociada, permitiendo representar adecuadamente los procesos de desborde y almacenamiento lateral. Para la caracterización de la geometría y la asignación de rugosidades, se emplearon modelos digitales de elevación (MDE) y cartografía de líneas de costa, lo que permitió discriminar distintos dominios hidráulicos dentro de cada sección.

En la Figura 4 se presentan las secciones transversales correspondientes a los cursos modelados, superpuestas sobre el MDE utilizado como base topográfica. A partir de este modelo de terreno se extrajeron las cotas que definen la geometría hidráulica del sistema, constituyendo un insumo fundamental para la implementación del modelo hidrodinámico.

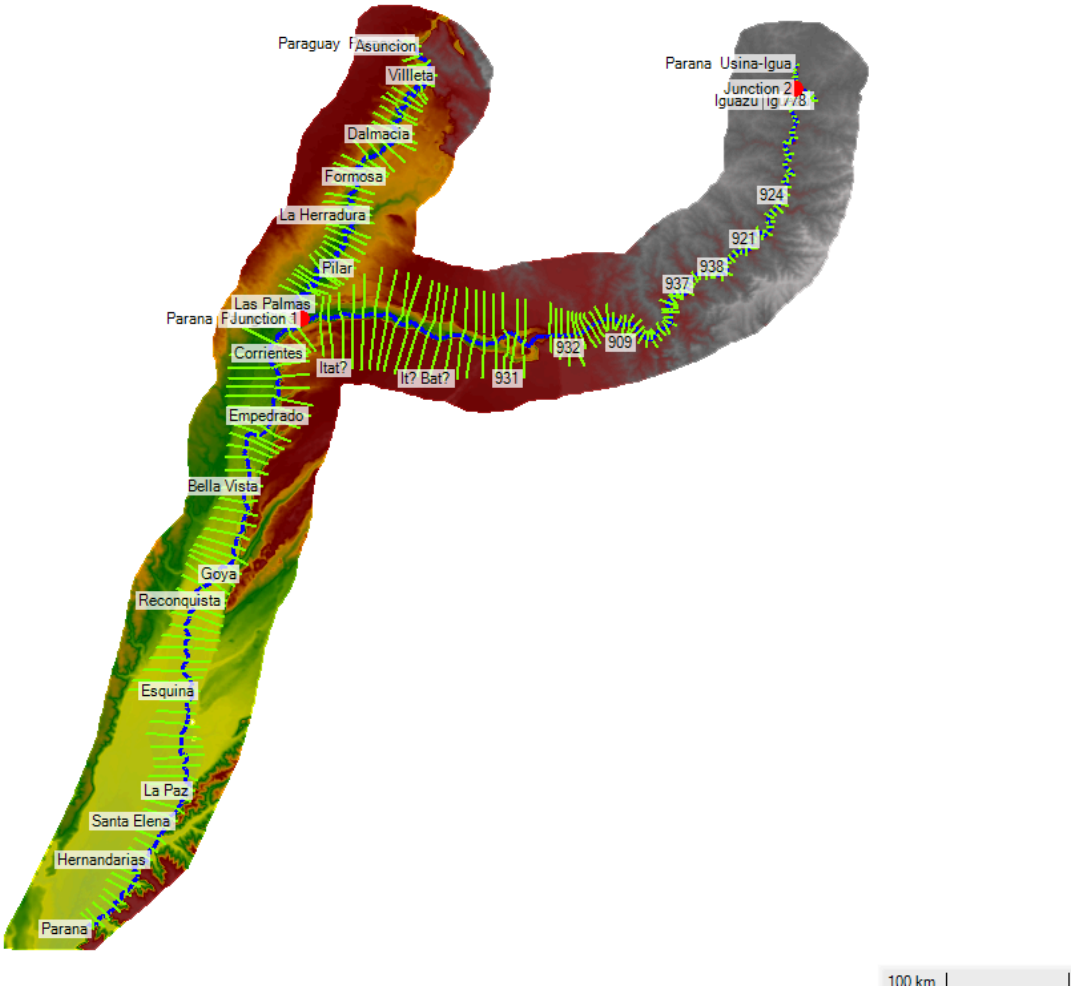


Figura 4. Modelo 1: Paraná

Las condiciones de borde del sistema hidrodinámico del río Paraná se definen a partir de la combinación de caudales impuestos en los extremos aguas arriba y de niveles impuestos aguas abajo, junto con aportes laterales tanto concentrados como distribuidos a lo largo del dominio modelado.

En primer lugar, los caudales se representan mediante dos tipos de aportes: puntuales y distribuidos. Los caudales puntuales incluyen, por un lado, los ingresos en las cabeceras principales del sistema. Estos corresponden al río Paraguay en Asunción, al río Paraná en Itaipú y al río Iguazú en Puerto Iguazú, los cuales

constituyen las principales condiciones de entrada al modelo y controlan en gran medida la dinámica hidrológica aguas abajo. Por otro lado, dentro de los caudales puntuales también se consideran los aportes de ríos tributarios de importancia, tales como los ríos Bermejo, Tebicuary, Santa Lucía, Feliciano y Corriente, entre otros, los cuales se incorporan como ingresos localizados a lo largo del sistema principal.

Adicionalmente, se incluyen caudales distribuidos que representan el aporte difuso de las cuencas intermedias que drenan directamente hacia el río principal y sus brazos secundarios. Estos aportes permiten capturar de manera más realista la generación de caudal a lo largo de toda la traza del modelo, especialmente en sectores donde no existen mediciones directas de tributarios definidos.

6.1.4. Modelo Santa Fe

La modelación del sistema San Javier – Setúbal – Coronda se centra en la representación de la interconexión entre distintos cursos y lagunas que resultan clave para reproducir su dinámica hidrodinámica. Esta configuración permite capturar los intercambios de caudal y niveles entre los distintos ramales, aspecto fundamental para la correcta estimación de variables hidráulicas que luego serán utilizadas como condiciones de borde en un modelo de mayor detalle.

Cabe destacar que este esquema no se encuentra acoplado hidráulicamente de manera directa con el eje principal del río Paraná dentro de la misma topología de cálculo. En su lugar, el modelo utiliza como entrada las condiciones hidrológicas del Paraná, a partir de las cuales se definen los aportes en los distintos cursos que integran el sistema. De esta manera, se logra representar de forma consistente la influencia del río principal sobre la dinámica interna del sistema, manteniendo al mismo tiempo una estructura de modelación independiente.

Para la implementación se digitalizaron un total de 12 cauces, los cuales se enumeran a continuación:

- San Javier (tramo San Javier – confluencia Arroyo Leyes)
- Arroyo Leyes
- Arroyo Potrero
- Zanja Brava
- Correntoso
- Aliviadores
- Ubajay
- Laguna Setúbal
- Río Colastiné
- Canal de acceso
- Río Salado (tramo final)
- Coronda (tramo Santa Fe – Coronda)

Dentro del entorno de HEC-RAS se definieron las secciones transversales de trabajo a lo largo de cada cauce digitalizado (Figura 5), respetando la geometría extraída del MDE y ajustando aquellas secciones donde se contaba con relevamientos de campo adicionales. Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación del rendimiento del modelo unidimensional mediante el contraste de resultados en estaciones de medición internas.

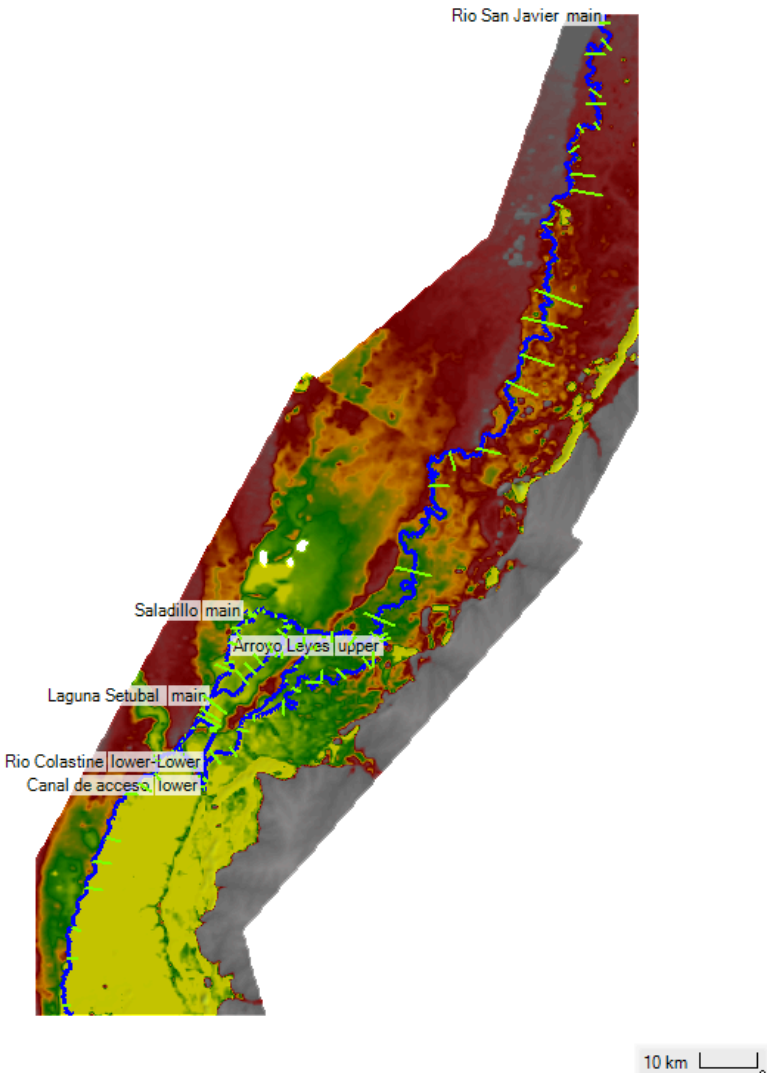


Figura 5. Modelo 2: Santa Fe

En cuanto a las condiciones de borde aguas abajo, se imponen niveles hidrométricos en el sector definido por el eje Santa Fe–Paraná. Estos niveles permiten cerrar el sistema desde el punto de vista hidráulico, y su consistencia se verifica mediante la relación altura–caudal (curva H–Q), asegurando que los caudales simulados sean coherentes con los niveles observados.

Para el modelo específico del tramo Santa Fe, se incorporan condiciones de borde adicionales que contemplan caudales en los principales brazos y derivaciones, tales como el río San Javier, el Colastiné y el Saladillo. Asimismo, se imponen niveles aguas abajo en puntos de control relevantes, como el retorno del Colastiné y el río Coronda, lo cual permite representar adecuadamente las interacciones hidráulicas entre los distintos cauces del sistema.

6.1.5. Modelo Delta

La geometría del modelo del Delta se define a partir de una red de canales interconectados que representa los principales cursos del sistema. Se incluyen los grandes ríos, como el Paraná, Paraná Pavón, Paraná de las Palmas, Guazú y Bravo, así como cursos de menor jerarquía pero relevantes para la dinámica hidrodinámica general. La representación de la red completa constituye un factor determinante para la simulación no solo de niveles, sino también de caudales (Sabarots Gerbec, 2019).

Las secciones transversales fueron definidas de manera de abarcar la totalidad de la planicie de inundación, permitiendo representar tanto el escurrimiento en cauce como los procesos de desborde. Para la definición de la geometría se empleó el modelo digital de elevación (MDE) topobatimétrico desarrollado, del cual se extrajeron las cotas utilizadas en las secciones transversales.

Asimismo, el modelo incorpora elementos específicos que representan los albardones naturales, los cuales resultan fundamentales para reproducir la

dinámica del sistema durante períodos de aguas altas, condicionando los procesos de almacenamiento y circulación sobre la planicie.

La Figura 6 presenta la red completa de modelación.

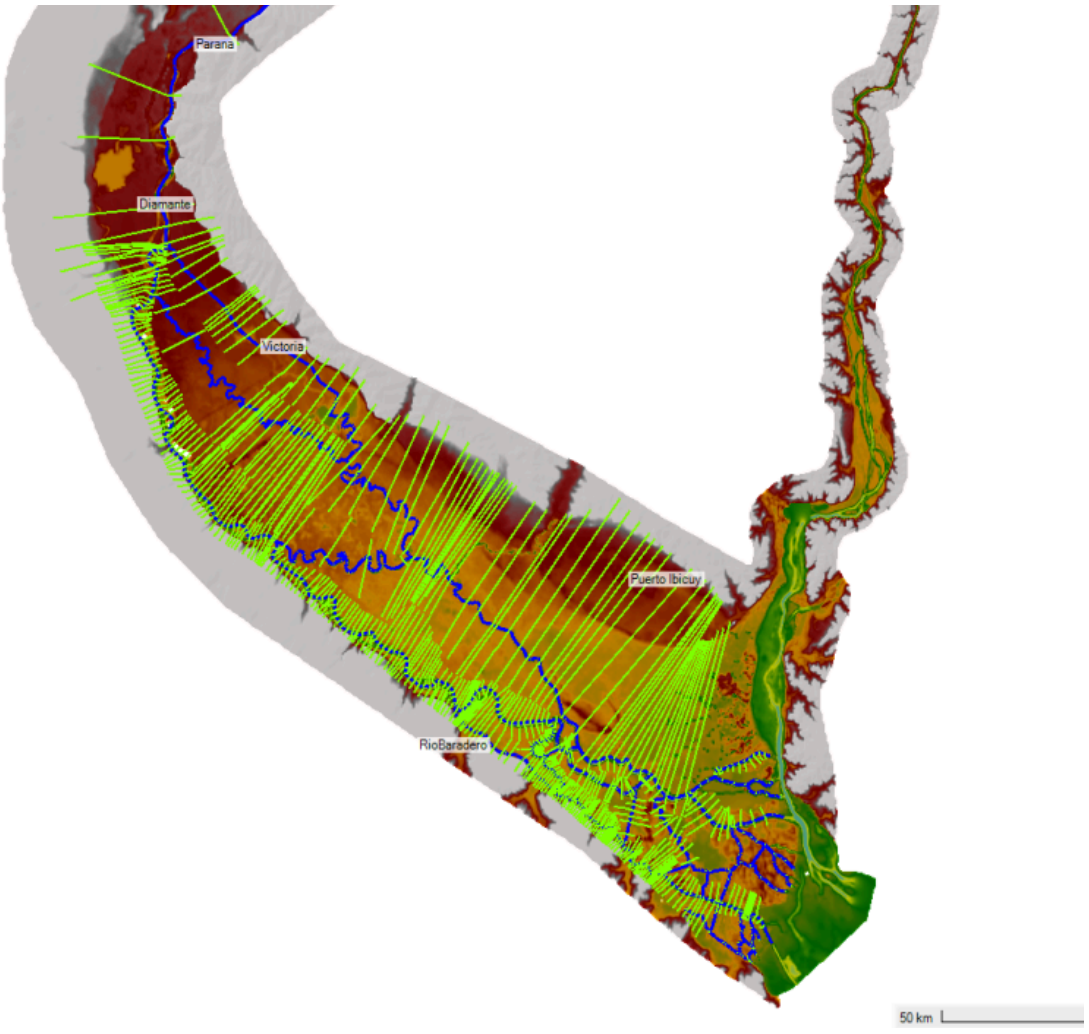


Figura 6. Modelo 3: Delta del Paraná

En el caso del modelo del Delta del Paraná, las condiciones de borde aguas arriba se definen mediante caudales que son validados a partir de curvas altura–caudal, con el

objetivo de garantizar un ingreso de caudal consistente sin perder los efectos de histéresis característicos del sistema. Aguas abajo, se imponen niveles hidrométricos representativos del Río de la Plata. Debido a la escala temporal de las simulaciones, estos niveles se consideran como valores medios, aunque idealmente deberían definirse a resolución horaria para capturar adecuadamente la dinámica asociada a la doble onda de marea característica del estuario.

6.2. Calibración

La validación de la modelación, en el caso de los tres modelos desarrollados, se realizó a partir de observaciones de niveles hidrométricos. Este criterio permitió ajustar los parámetros hidráulicos de manera consistente con la respuesta observada del sistema.

En los modelos del Paraná y del Delta, la calibración se llevó a cabo mediante simulaciones en régimen no permanente, considerando la variabilidad temporal de los caudales y niveles, lo que permitió representar adecuadamente la propagación de ondas de crecida y bajante a lo largo del sistema.

Por su parte, en el modelo del sistema San Javier- Setúbal - Coronda (modelo Santa Fe), el enfoque de calibración se basó en simulaciones en régimen permanente, utilizando forzantes que representan condiciones hidrológicas puntuales de carácter histórico. Este enfoque resulta adecuado para analizar configuraciones específicas del sistema bajo estados hidrológicos representativos.

A continuación, se presentan comparaciones entre resultados modelados y observados en algunos de los puntos de control evaluados.

El proceso de calibración consistió en el ajuste iterativo de los parámetros de rugosidad de Manning asignados a cada cauce y a la planicie aluvial, buscando

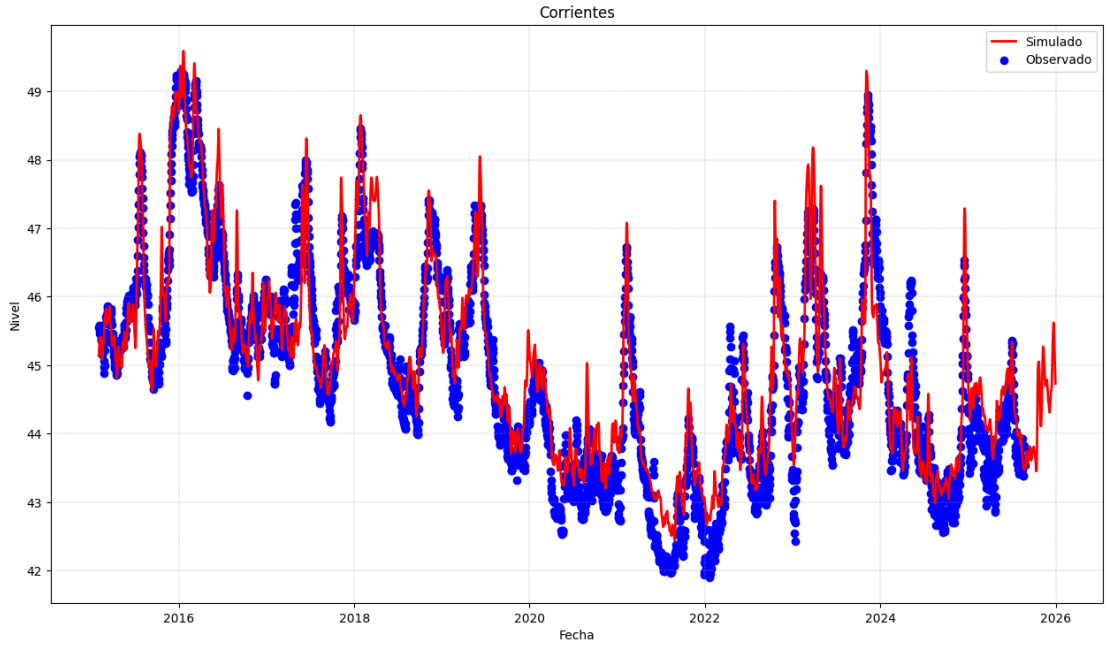
minimizar la diferencia entre los niveles observados y simulados en las estaciones de control. Los valores de rugosidad resultantes son consistentes con los reportados en la bibliografía para cauces meandriformes de llanura con vegetación riparia densa.

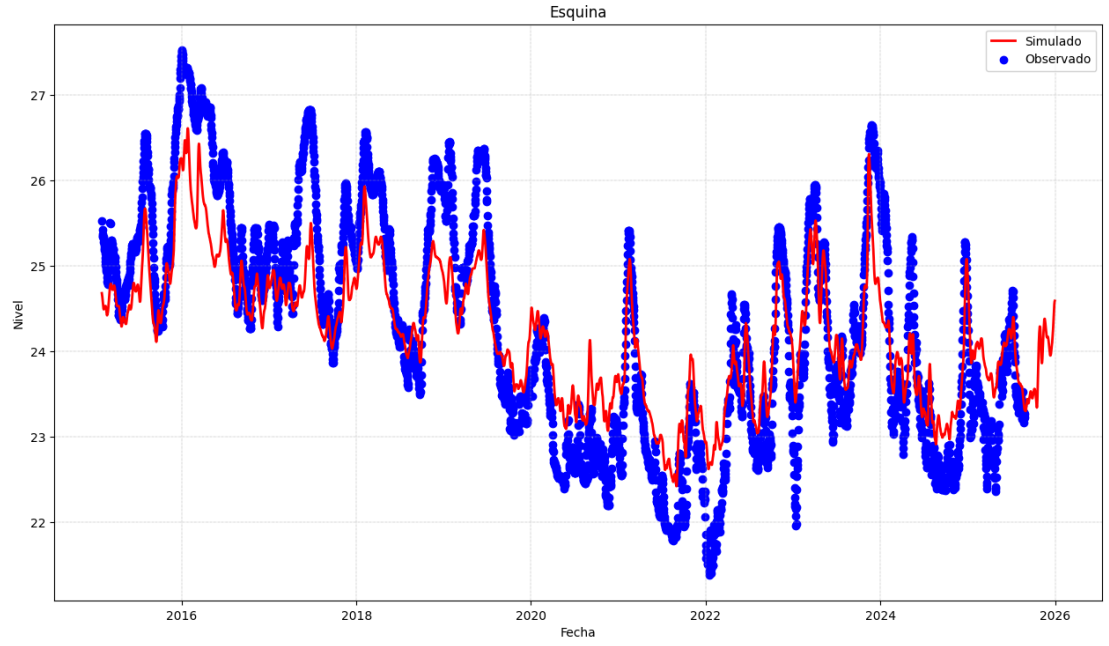
6.2.1. Modelo Paraná

Para el caso del modelo Paraná se observa un buen acuerdo general en la reproducción de los niveles hidrométricos observados (Figura 7). No obstante, en algunos puntos se identifican discrepancias sistemáticas; por ejemplo, en Corrientes se evidencian diferencias consistentes que se atribuyen principalmente a problemas asociados a los ceros de escala de las estaciones.

En la estación Esquina se obtiene una buena respuesta del modelo en términos de fase y tendencia, aunque con una amplitud ligeramente menor a la observada. Por su parte, en Paraná se logra una mejor representación de los niveles, lo cual se encuentra fuertemente condicionado por su proximidad y vinculación directa con las condiciones de borde del modelo.

En la etapa de evaluación de escenarios de condiciones de contorno se prevé la realización de ajustes adicionales orientados a mejorar la compatibilidad entre resultados modelados y observados. Estos ajustes consistirán en la corrección sistemática del error, lo que permitirá, entre otros aspectos, mitigar inconsistencias asociadas a los ceros de escala y mejorar la calidad global de la calibración.


Corrientes
Simulado
Observado
Nivel
Fecha
42
43
44
45
46
47
48
49
2016
2018
2020
2022
2024
2026


Esquina
Simulado
Observado
Nivel
Fecha
22
23
24
25
26
27
2016
2018
2020
2022
2024
2026

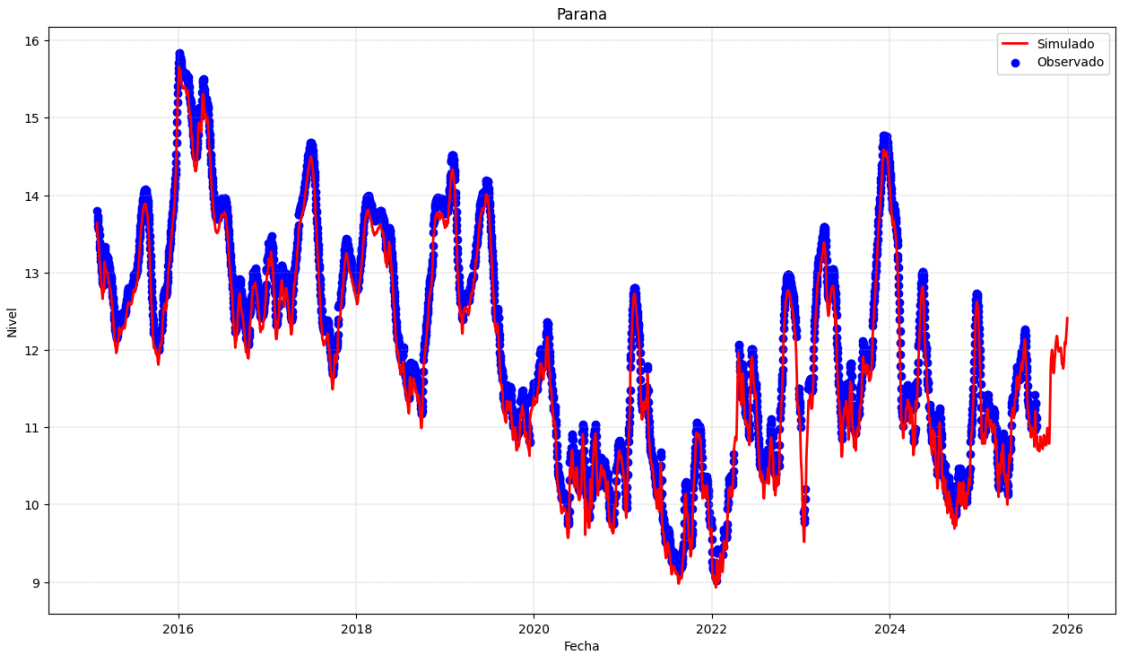


Figura 7. Comparaciones Simulado Observado

6.2.2. Modelo Santa Fe

Se evaluaron cuatro condiciones hidrológicas representativas del espectro de variabilidad del sistema: dos correspondientes a crecidas ordinarias, una a una condición de caudal medio y una a una condición extrema baja. Las estaciones tomadas como referencia para la calibración fueron las siguientes: Arroyo Leyes, Arroyo Potrero, río Colastiné, Laguna Setúbal y río Coronda.

En la siguiente tabla (Tabla 1) se resumen los escenarios de calibración evaluados, tomando como parámetro de referencia el caudal que atraviesa el cauce principal del río Paraná, el cual determina en gran medida las condiciones de contorno del sistema secundario modelado.

Tabla 1.- Escenarios seleccionados para calibración preliminar.

Escenario	Caudal río Paraná (cauce principal) [m3/s]	Descripción
Escenario 0	7303	Bajante extraordinaria (11/01/2022). Desconexión sistema secundario Arroyo Leyes.
Escenario 1	14828	Situación media (22/10/2018)
Escenario 2	22192	Crecida ordinaria (08/12/2023)
Escenario 3	26793	Crecida media (08/01/2016)

El modelo fue implementado bajo condición de flujo permanente, lo que permite representar el comportamiento hidráulico del sistema para cada escenario hidrológico definido como un estado estacionario. Si bien esta aproximación implica ciertas simplificaciones respecto al carácter transitorio del flujo natural, resulta adecuada para los objetivos de la presente etapa, dado que se busca caracterizar los niveles medios asociados a cada condición analizada.

A partir de los resultados obtenidos, se analizaron los niveles de agua simulados en las estaciones de control seleccionadas y se los contrastó con los valores observados para los mismos períodos. A continuación, se presentan los resultados de dicho contraste, expresando para cada estación y escenario tanto el nivel observado como el nivel modelado y su diferencia absoluta, a fin de evaluar el ajuste del modelo y la representatividad de los parámetros de calibración adoptados.

Tabla 2.- Resultados preliminares de la calibración alcanzada medido, modelado y diferencias porcentuales.

Escalas	Escenario 0 11/1/2022 Med.	Mod.	Dif	Escenario 1 22/10/2018 Med.	Mod.	Dif	Escenario 2 8/12/2023 Med.	Mod.	Dif.	Escenario 3 8/1/2016 Med.	Mod.	Dif
Colastiné	8	9	-5%	11.9	12.0	-1%	14.3	14.4	-1%	15.5	15.0	3%
Leyes	11	11	-5%	13.5	12.9	5%	15.5	14.3	8%	16.7	16.2	3%
Setúbal	8	8	-1%	11.3	12.1	-7%	13.7	13.7	0%	15.1	15.8	-4%
Coronda	8	8	1%	11.2	12.1	-8%	13.3	13.5	-1%	14.5	15.4	-6%
Potrero	11	11	-3%	13.5	12.8	6%						

6.2.2.1. Modelo Delta

La calibración del modelo del Delta se realizó bajo condiciones no permanentes, manteniendo condiciones permanentes en la desembocadura en el Río de la Plata, en concordancia con el esquema adoptado para la posterior evaluación de escenarios de condiciones de contorno. En este sentido, los resultados obtenidos se consideran representativos principalmente en los tramos ubicados aguas arriba de San Pedro, donde la influencia de la doble onda de marea presenta una incidencia reducida (Re, 2018).

En la Figura 8 se presenta la comparación entre los niveles simulados y observados en la estación Rosario, observándose un buen acuerdo general tanto en la evolución temporal como en los valores alcanzados.

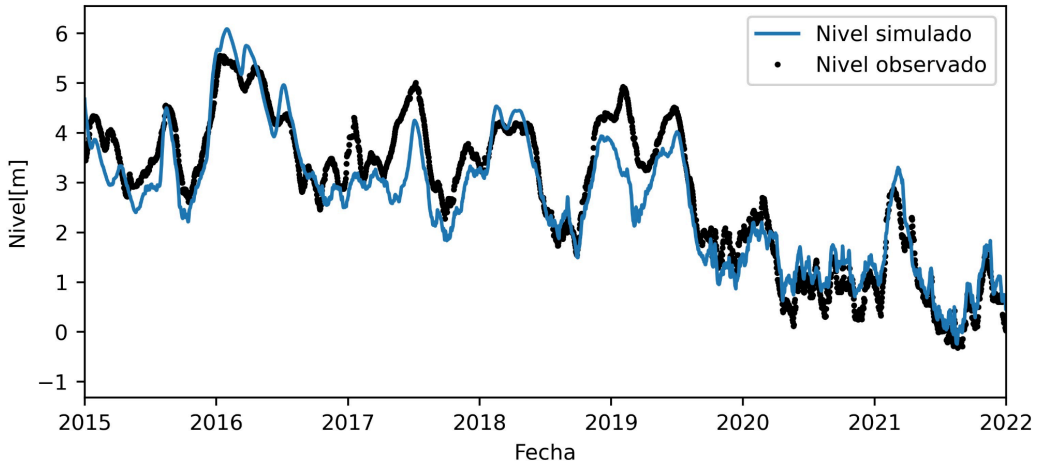


Figura 8. Comparaciones Simulado Observado - Rosario

7. CONCLUSIONES

- Se desarrollaron tres modelos hidrodinámicos complementarios (Paraná, Delta y sistema San Javier – Setúbal – Coronda), cada uno con un nivel de detalle y alcance acorde a los objetivos específicos de análisis.
- La geometría de los modelos se basó en un modelo digital de elevación (MDE) topobatimétrico integrado con cartografía de líneas de costa, lo que permitió representar de manera consistente la planicie de inundación y los distintos dominios hidráulicos.
- La calibración se realizó a partir de niveles hidrométricos observados, empleando enfoques en régimen no permanente para los modelos del Paraná y del Delta, y en régimen permanente para el sistema San Javier – Setúbal – Coronda.

- En general, se obtuvo un buen acuerdo entre niveles simulados y observados, reproduciendo adecuadamente la dinámica del sistema en términos de fase y tendencia.
- Se identificaron discrepancias sistemáticas en algunos puntos, asociadas principalmente a problemas en los ceros de escala de las estaciones hidrométricas, así como diferencias en amplitud en ciertos tramos.
- En el caso del Delta, los resultados son especialmente confiables aguas arriba de San Pedro, donde la influencia de la marea es menor y el esquema de condiciones de borde adoptado resulta más consistente.
- La estrategia de modelación desacoplada entre sistemas (por ejemplo, Delta y sistema San Javier respecto del Paraná) permite una mayor flexibilidad en el análisis, manteniendo coherencia mediante el uso de condiciones hidrológicas de entrada.
- Se prevé la realización de ajustes adicionales en etapas posteriores, particularmente en el marco de la evaluación de escenarios de condiciones de contorno, mediante la corrección sistemática de errores para mejorar la compatibilidad con datos observados.

8. REFERENCIAS

INA (2023). SDP Nº 23/2022 - “Estudio sobre variables de diseño para la provisión de agua potable en las principales localidades sobre el Río Paraná para distintos escenarios de clima futuro (etapa 1) - Proyecto ARG 19003: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático”.

Dominguez Ruben, L., Szupiany, R., Ramonell, C. y García Marcelo (2023), Hydro-geomorphological and sedimentological processes along the major

fluvial-lacustrine delta of the Paraná River (Argentina): Their role in floodplain construction, Earth Surface Processes and Landforms, DOI: 10.1002/esp.5570.
HEC-RAS Manual (2010) HEC-RAS, Hydraulic, Reference Manual, Hydrologic Engineering Centre, Davis. Version 4.1.

Li, Z. y García, M.H. (2021), pyRiverBed: A Python framework to generate synthetic riverbed topography for constant-width meandering rivers, Computers & Geosciences, https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104755.

Re, M., Sabarots Gerbec, M., & Storto, L. (2015). Estadística de niveles en el Delta del río Paraná mediante modelación hidrodinámica. In VII Simposio Regional sobre Hidráulica de RIOS.

Sabarots Gerbec, M., Re, M., Storto, L. Análisis de repartición de caudales en bifurcaciones del delta del río Paraná. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina, 2018.