



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA
Y POLÍTICA HÍDRICA
REPÚBLICA ARGENTINA

Modelación hidrodinámica del río Uruguay

**DELTA PARANA: Estudio hidrodinámico integrador
del Delta del río Paraná con fines múltiples**



Proyecto INA 373
Informe LHA 07-373-20
Ezeiza, enero de 2020

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Ing. Pablo D. SPALLETTI

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Julio C. DE LÍO a/c

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Lic. Nicolás ORTIZ

Mayra MORALE

Ing. Santiago GUIZZARDI

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Santiago GUIZZARDI

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Lic. Nicolás ORTIZ

DELTA PARANA: Estudio hidrodinámico integrador del Delta del río Paraná con fines múltiples

Modelación hidrodinámica del río Uruguay

RESUMEN

En el marco del proyecto interno INA “*DELTA PARANA: Estudio hidrodinámico integrador del Delta del río Paraná con fines múltiples*”, se construyó un modelo hidrodinámico operativo, actualizado y calibrado para el pronóstico de niveles y caudal en el río Uruguay. Desde la presa Salto Grande (Argentina/Uruguay) hasta la localidad de Nueva Palmira en el departamento de Colonia, Uruguay. Para el desarrollo del modelo, durante el año 2019 se realizaron distintas tareas coordinadas con la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU). En abril, una campaña de aforo de caudales en la zona de Nueva Palmira, la cual permitió comprobar que el comportamiento y las variaciones de caudales son correctamente representados por el modelo. En septiembre del mismo año, una campaña de relevamiento de ceros hidrométricos para actualizar la información de 5 escalas hidrométricas.

Para construir el modelo topo-batimétrico se utilizó el modelo *TanDEMx* y relevamientos de distintas fuentes brindados por la CARU. En cuanto a los datos de entrada al modelo, se contó con series de caudal y altura a paso horario, que permitieran representar las operaciones intradiarias de Salto Grande y la onda de marea del río de la Plata. Los valores de n de Manning adoptados para el modelo fueron 0.02 en el cauce y 0.2 en la llanura, excepto en la zona de islas entre el puente Gualeguaychú - Fray Bentos y Concepción del Uruguay, donde se adoptó un valor n de Manning de 0.3. Los resultados globales de calibración fueron satisfactorios obteniéndose índices de Nash y coeficientes de correlación superiores a 75 y 0.95 respectivamente. En relación al RMSE, se observa que los mayores errores se ubican aguas arriba con valores de hasta 1m. Hacia aguas abajo varía entre 0.2m y 0.5m, disminuyendo hacia la desembocadura en el río de la Plata. De la explotación del modelo sobre una ventana de 25 años, se pudo validar la adecuada performance del modelo con datos observados en Concepción del Uruguay donde el RMSE se mantiene en el orden de los 0.4m. En un análisis estadístico de los resultados de la simulación larga, se observa hasta donde penetra en el río Uruguay la influencia de la onda de marea del río de la Plata con reversiones de flujo hasta 216km aguas arriba de la desembocadura.

Descriptor temático: Modelación, campañas, aforos.

Descriptor geográfico: Río Uruguay, Bajo Delta, Argentina, Uruguay.

Índice

1. Introducción	5
2. Metodología	7
3. El río Uruguay	8
4. Modelo topo-batimétrico	12
5. Escalas hidrométricas y su referenciación	22
6. Modelo hidrodinámico	26
6.1. Esquema de modelación	26
6.2. Construcción del modelo	28
6.3. Condiciones de borde	31
7. Calibración y validación del modelo	33
8. Evaluación de performance	43
8.1. Análisis de performance	43
8.2. Indicadores de performance	43
8.3. Aforos en Nueva Palmira	44
8.4. Validación – Áreas inundadas	45
9. Resultados de la modelación	48
9.1. Diagrama de caja	51
9.2. Curvas de permanencia de niveles y caudales	54
10. Conclusiones	56
Referencias	58
Anexo I: Perfiles transversales	59
Anexo II: Indicadores de la calidad del ajuste	74
Anexo III: Curvas de Permanencia de Niveles y Caudales	76

1. Introducción

La Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico (SlyAH) del Instituto Nacional del Agua (INA) tiene como uno de sus objetivos principales el de comunicar, con la mayor antelación posible, la ocurrencia de crecidas y bajantes pronunciadas en la Cuenca del Plata a distintos organismos competentes del orden nacional y provincial, estableciéndose así como un eslabón de suma importancia en la cadena de alerta hidrológica de la región.

Una de las principales herramientas de este sistema es la simulación numérica. Para esto se cuenta con un modelo hidrodinámico unidimensional, en régimen impermanente de un tramo del río Uruguay, que se utiliza para pronóstico hidrológico. Este modelo propaga la onda de crecida proveniente de la alta cuenca en Brasil, donde se origina la mayor parte del caudal debido a las precipitaciones, y anticipa sus efectos aguas abajo.

En lo que respecta a la modelación hidrológica-hidráulica de la cuenca del río Uruguay, se cuenta con un modelo antecedente (Guizzardi et al., 2017), que se extiende desde la salida de la presa Foz do Chapecó (Santa Catarina, Brasil) hasta la localidad de Monte Caseros (provincia de Entre Ríos), cercana a la cola del embalse de Salto Grande.

Con el objetivo de extender el dominio modelado, el presente trabajo se centra en el tramo inferior del río, desde la presa Salto Grande (Argentina/Uruguay) hasta la localidad de Nueva Palmira en el departamento de Colonia, Uruguay. La región que abarca el modelo se muestra en la Figura 1, donde se identifica el cauce del río Uruguay.

Para el desarrollo del modelo, durante el año 2019 se realizaron distintas tareas coordinadas con la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU). En abril, una campaña de aforo de caudales en la zona de Nueva Palmira para relevar información sobre la condición de borde de aguas abajo del modelo. Es de interés comprender el efecto del Río de la Plata sobre el tramo inferior del río Uruguay. Luego, en septiembre, se realizó una campaña de relevamiento de ceros hidrométricos, los cuales son necesarios para la calibración y evaluación de performance del modelo.

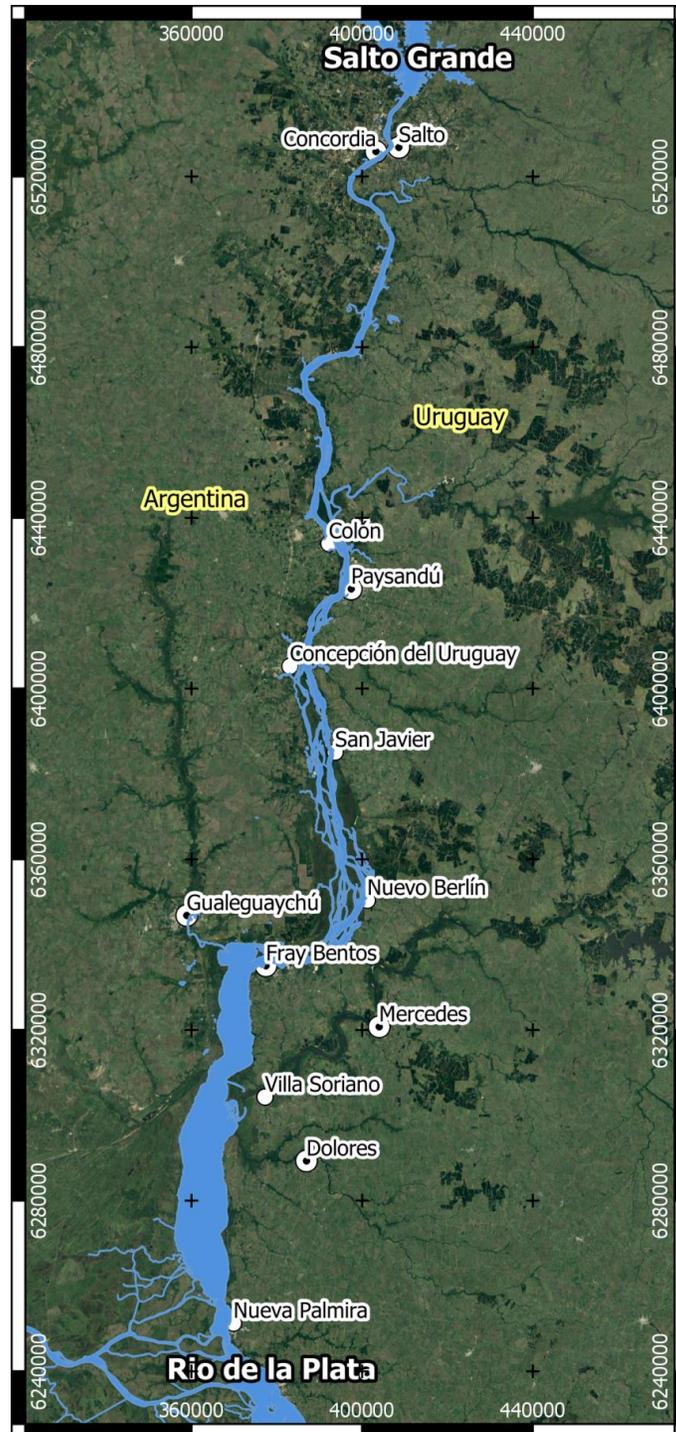


Figura 1 - Dominio del modelo

2. Metodología

El estudio tiene como finalidad obtener los valores de niveles de agua y velocidades en cualquier punto de la zona estudiada para las crecidas y bajantes de interés. Con este propósito, se implementa un modelo hidrodinámico continuo, en régimen impermanente, unidimensional, desde la presa Salto Grande (Argentina/Uruguay) hasta la localidad de Nueva Palmira en el departamento de Colonia, Uruguay. La longitud total del tramo modelado es de 351 km (Figura 1).

El programa que se utiliza es el HEC-RAS, versión 5.0.7. Este es un *software* de modelación hidrodinámica desarrollado por la USACE (United States Army Corps of Engineers), de libre distribución (disponible en <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/downloads.aspx>). Este *software*, ampliamente utilizado en el campo de la modelación hidrodinámica fluvial, tiene la ventaja (en sus últimas versiones) de permitir acoplar modelos 1D-2D, lo que en un futuro podría ser de utilidad.

El modelo implementado en el presente trabajo es unidimensional, de modo que la solución siempre es una aproximación o promedio de la real. La ecuación de la energía supone distribuciones hidrostáticas de presiones y la ecuación de fricción permanente de Manning. Por lo tanto, la solución es una simplificación y no se ajusta a la realidad en casos donde las presiones y las tensiones turbulentas se alejan del modelo lineal.

Aún con las limitaciones mencionadas, un modelo unidimensional permite el cálculo en dominios con escalas espaciales grandes, de modo que la simulación de kilómetros de río se realiza con una velocidad de cálculo del orden de segundos o pocos minutos. Este punto resulta muy importante para el objetivo del trabajo: optimizar el tiempo de aviso a los ocupantes de la planicie de inundación mediante el pronóstico de caudales y alturas limnimétricas. Esta rapidez también facilita la repetición y corrección del modelo. Es este un método sumamente adecuado para el estudio del tramo inferior del Río Uruguay

Para construir el modelo se debe disponer de la siguiente información de partida:

- Información básica de caracterización física del cauce y la llanura de inundación.
- Condiciones de contorno en el modelo hidráulico.
- Datos de caudales y niveles observados en el tramo de estudio.

3. El río Uruguay

El río Uruguay, con un módulo de aproximadamente 4.620 m³/s y una longitud de 1760 km, es un río de gran envergadura que conforma el límite del territorio nacional con Brasil y Uruguay. Su amplia cuenca de aporte tiene una extensión de 370.000 km², la cual se distribuye entre Uruguay (32 %), Brasil (50 %) y Argentina (28 %). De sus 1760 km de extensión, 500 km (28.4 %) transcurren en territorio brasileño, 720 km (40.9 %) en el límite entre Argentina y Brasil y los 540 km (30.7 %) restantes entre tierras uruguayas y argentinas.

El régimen de aporte de aguas es netamente pluvial. Su amplia cuenca se localiza entre las isoyetas anuales de 1.200 y 2.400 mm y entre las isotermas anuales de 16 y 24°C, aproximadamente.

En el presente trabajo, es estudio se centra en el tramo inferior del río desde la presa Salto Grande hasta la localidad de Nueva Palmira (Figura 2).

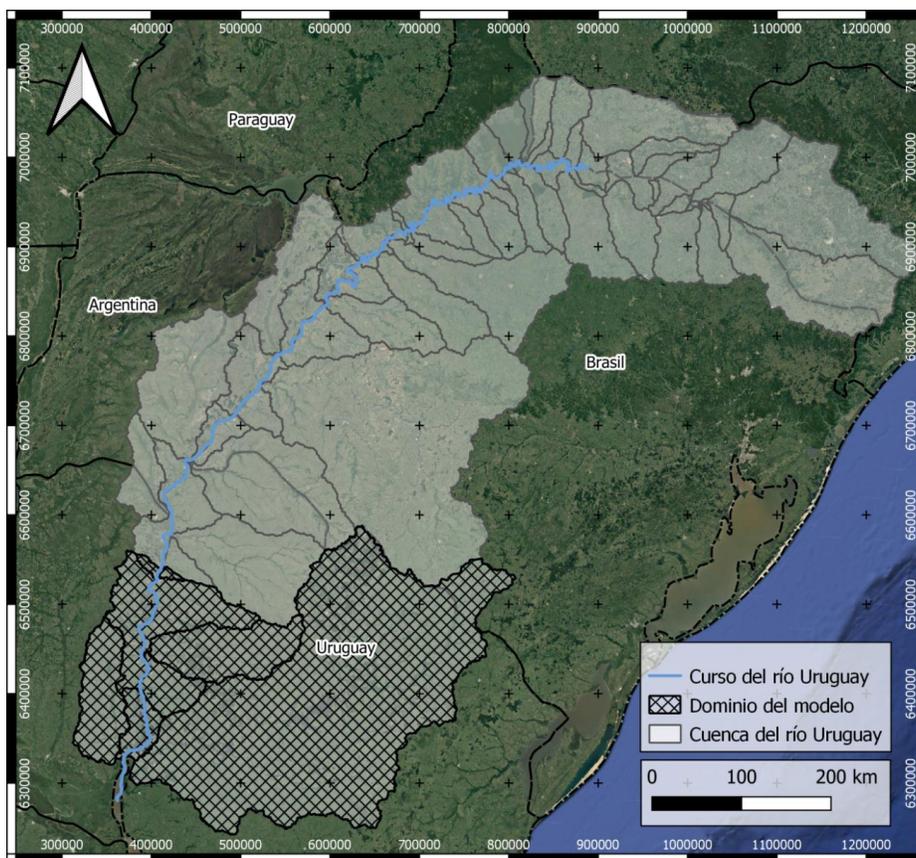


Figura 2 - Cuenca del río Uruguay

En cuanto a su geomorfología el tramo estudiado del río Uruguay se podría dividir en tres zonas (Figura 3):

La primera desde la presa Salto Grande hasta la Isla del Queguay Grande, aguas arriba de la localidad de Colón (Entre Ríos, Argentina). Allí el río, encajonado por la fisiografía del lugar, tiene un único cauce y está restringida su posibilidad de movimiento lateral. La pendiente del cauce y las velocidades del agua en este tramo son mayores que en los otros (Figura 4).

El segundo tramo, desde la Isla del Queguay Grande hasta el puente Gral. San Martín que conecta las localidades Gualeguaychú (Argentina) y Fray Bentos (Uruguay). La velocidad de las aguas se reduce, lo que favorece la deposición de sedimentos y la formación de islas. Al principio de este tramo se distinguen las primeras islas con gran extensión. Luego, se empiezan a ver los primeros rasgos de anastomosis. El río se divide formando ramas que luego se vuelve a unir. Al final del tramo, producto de las bajas velocidades, se forma un delta con múltiples brazos.

En el tercer tramo, desde el puente Gral. San Martín hasta la desembocadura en el Río de la Plata, el cauce se ensancha considerablemente, desde 1.5 km hasta un máximo de 12 km. Este tramo se comporta como un estuario; las mareas y los vientos tienen gran influencia en su comportamiento. Se podría decir que es una extensión del Río de la Plata.

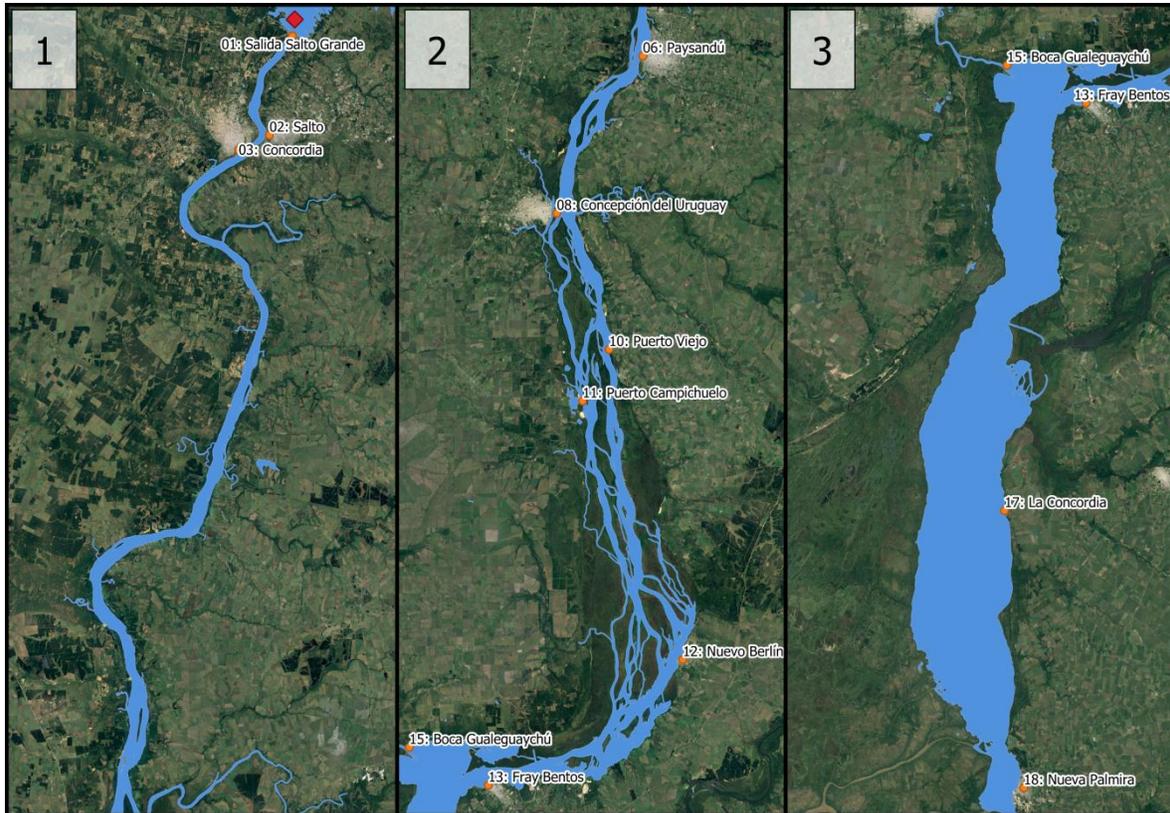


Figura 3 - Geomorfología del río Uruguay

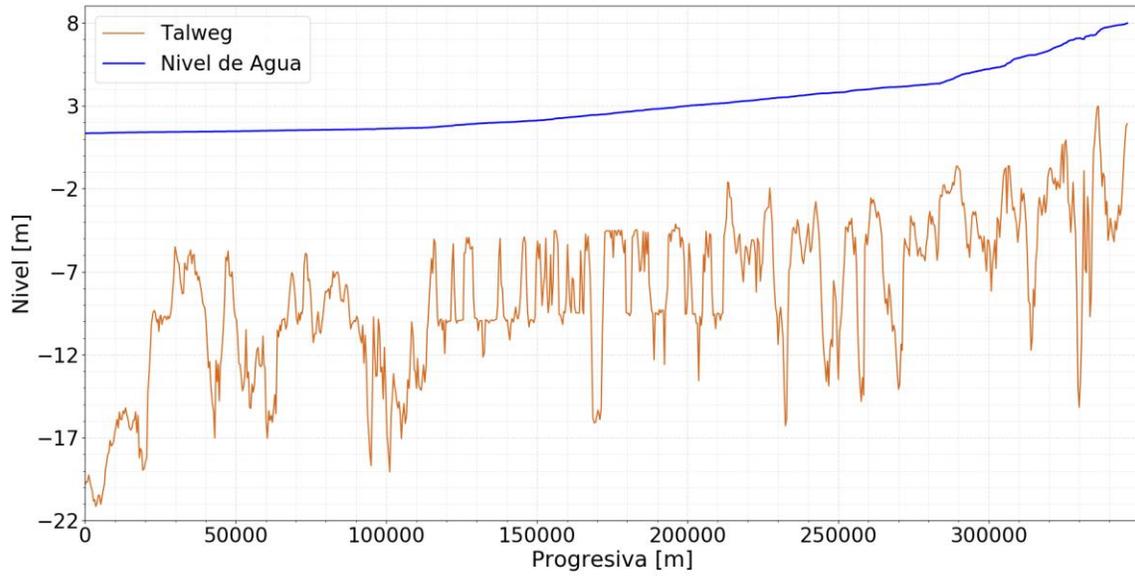


Figura 4 - Perfil longitudinal del tramo modelado

4. Modelo topo-batimétrico

La topología a modelar se define mediante una descripción geométrica del tramo del río en cuestión, es decir, las secciones transversales del cauce y sus planicies de inundación, la ubicación de las condiciones de borde y las secciones de control.

Para construir el modelo topo-batimétrico se trabajó con diversas fuentes de información. Como base se utilizó el modelo TanDEM-X (B. Wessel, 2018) que provee altitudes con una resolución espacial asociada a un pixel de 90 metros y 1 metro de resolución vertical. La adquisición de datos se completó en enero de 2015 y la producción del modelo digital de elevación (MDE) global se completó en septiembre de 2016.

El sistema de referencia horizontal y vertical (datum) de los productos TanDEM-X es el elipsoide WGS84. Las alturas de los productos TanDEM-X son alturas elipsoidales.

Cuando se determinan coordenadas por medio de satelitales, las alturas que se obtienen (h) están vinculadas a un marco de referencia determinado y a un elipsoide asociado y tienen un claro significado geométrico: h es la altura del punto relevado (P) respecto del elipsoide, medida a lo largo de la normal al mismo (Figura 5).

No es posible utilizar directamente las alturas que se obtienen con satélites cuando se pretende realizar una nivelación con la finalidad de determinar el movimiento del agua (IGN, 2017). Para calcular las alturas sobre el nivel medio del mar (H) a partir de las alturas elipsoidales (h) se dispone de un modelo de geoide, en este caso el Geoide-Ar 16 (Piñón, D. *et al.* 2006). El geoide permite calcular valores de N para cualquier sitio. Con este dato se convierten las alturas para todo el dominio: $H = h - N$. En otras palabras, al modelo TanDEM-X se le resta el Geoide-AR para obtener el modelo digital de elevación (MDE) base en cota IGN.

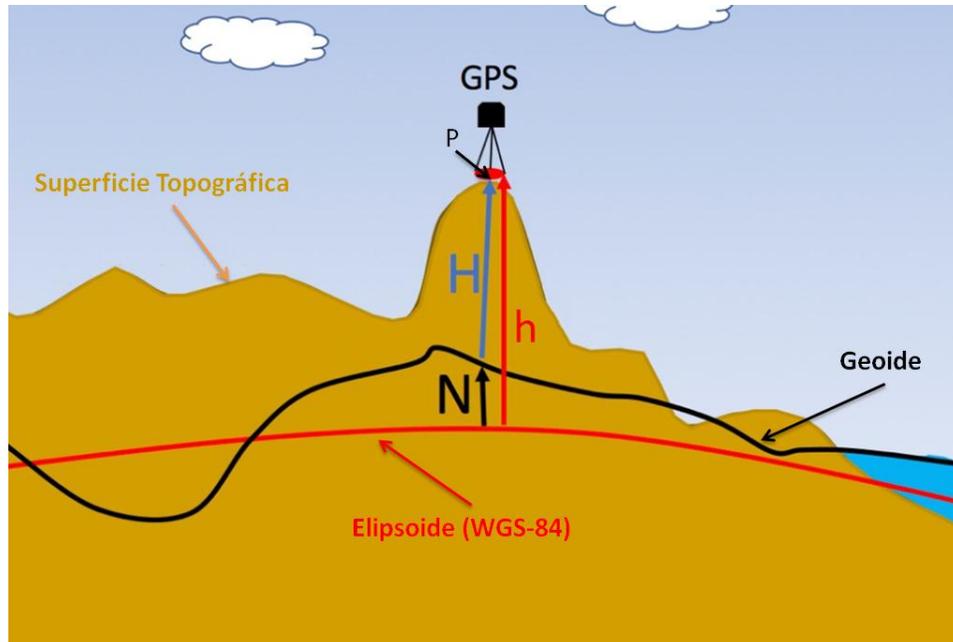


Figura 5 - Geoide y Elipsoide

Dado que para la modelación hidrodinámica es de interés cargar el terreno (planicie de inundación y cauce), se debieron realizar correcciones al MDE en la zona donde presenta vegetación de altura (forestación natural o no).

Sobre la planicie de inundación del río se realizó una corrección de las alturas en función del uso del suelo. En principio, usando información de Open Street Maps (OSM) que luego se completa mediante la observación de imágenes satelitales (Google Satélite). Estas correcciones se basan en filtrar, del MDE base, zonas de vegetación alta, principalmente bosques, para obtener el nivel del terreno.

Por otro lado, el modelo digital del cauce del río se generó con información brindada por la CARU. (Junes, 2019).

El modelo está compuesto por información de distintas fuentes:

- Digitalización de cartas náuticas del Servicios de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA).
- Relevamientos del SOHMA del proyecto de levantamiento integral del río Uruguay (que llegan desde Salto Grande hasta el norte de Paysandú).
- Relevamientos específicos de pasos de navegación hechos por la CARU.

- Información de segunda mano de los croquis del Río Uruguay de la Dirección Nacional de Vías Navegables (DNVN) en la zona de Fray Bentos (Casterá, 2015).

Esta información se presenta como una capa de puntos (.xyz), en cota PRH (Plano de Referencia Hidráulico Uruguayo o Cero Wharton). El PRH está 0.1367 m por debajo del plano MOP (del Ministerio de Obras Públicas argentino). Se realiza una interpolación de la nube de puntos para obtener una capa raster de la geometría del cauce (Figura 6). Luego, se convierte en cota IGN sumando -0.6925 m (Figura 7). Cabe resaltar que a partir de los relevamientos realizados en el mes de septiembre del 2019 (INA, 2020), la diferencia entre el cero MOP y cero IGN es de 0.80 m y no 0.55 m como se asumió para hacer la conversión. Para terminar de definir la relación entre MOP e IGN para todo el dominio del modelo, se prevé realizar una campaña más de relevamiento de ceros de las estaciones faltantes y luego corregir el modelo del cauce. De todos modos, estas diferencias no restan validez a los resultados obtenidos en este trabajo.

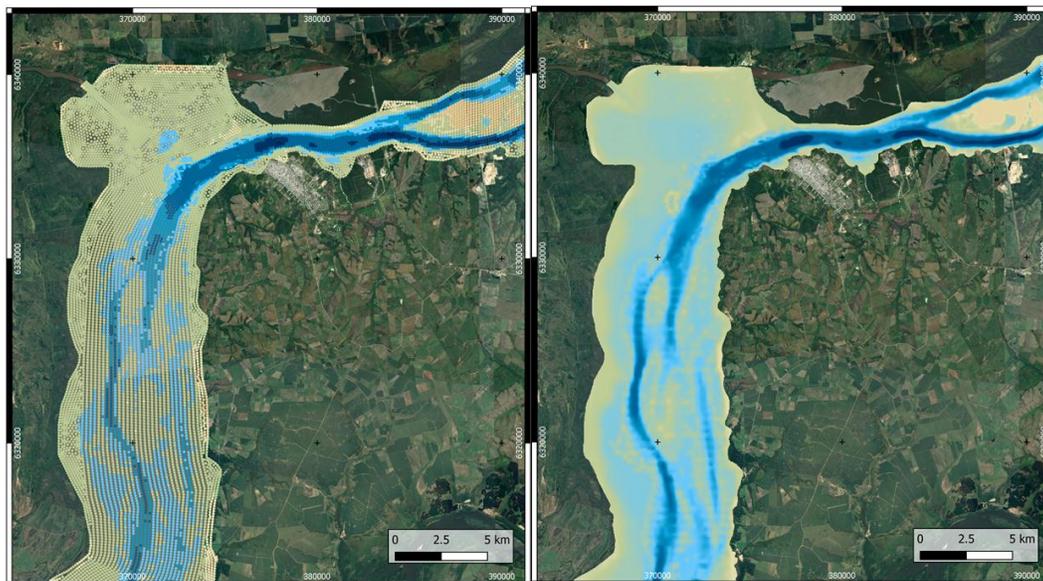


Figura 6 - Nube de puntos a Modelo digital del cauce

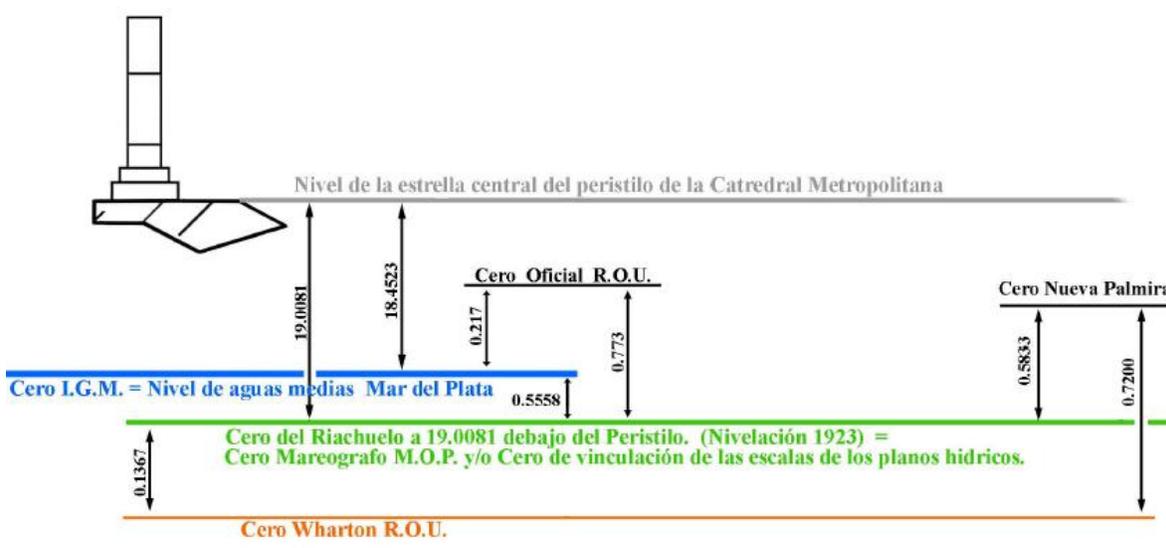


Figura 7 - Referencia de ceros

Por último se realiza una unión de los dos modelos: el modelo digital de elevación base y el modelo digital del cauce. Este último se monta sobre el MDE base para conformar el modelo topo-batimétrico en cota IGN [m.s.n.m] (Figura 8 a 12).

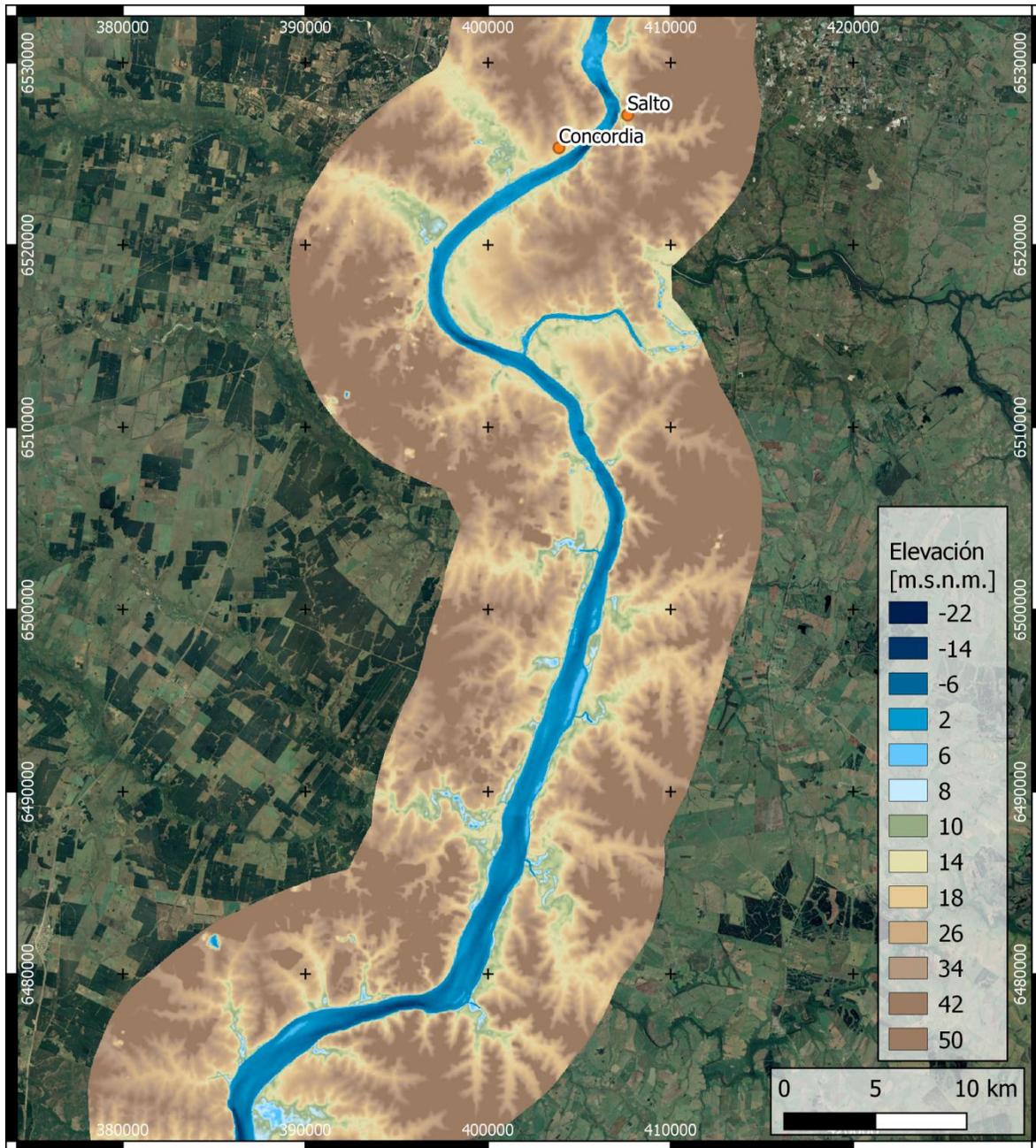


Figura 8 - Modelo topo-batimétrico (1/5)

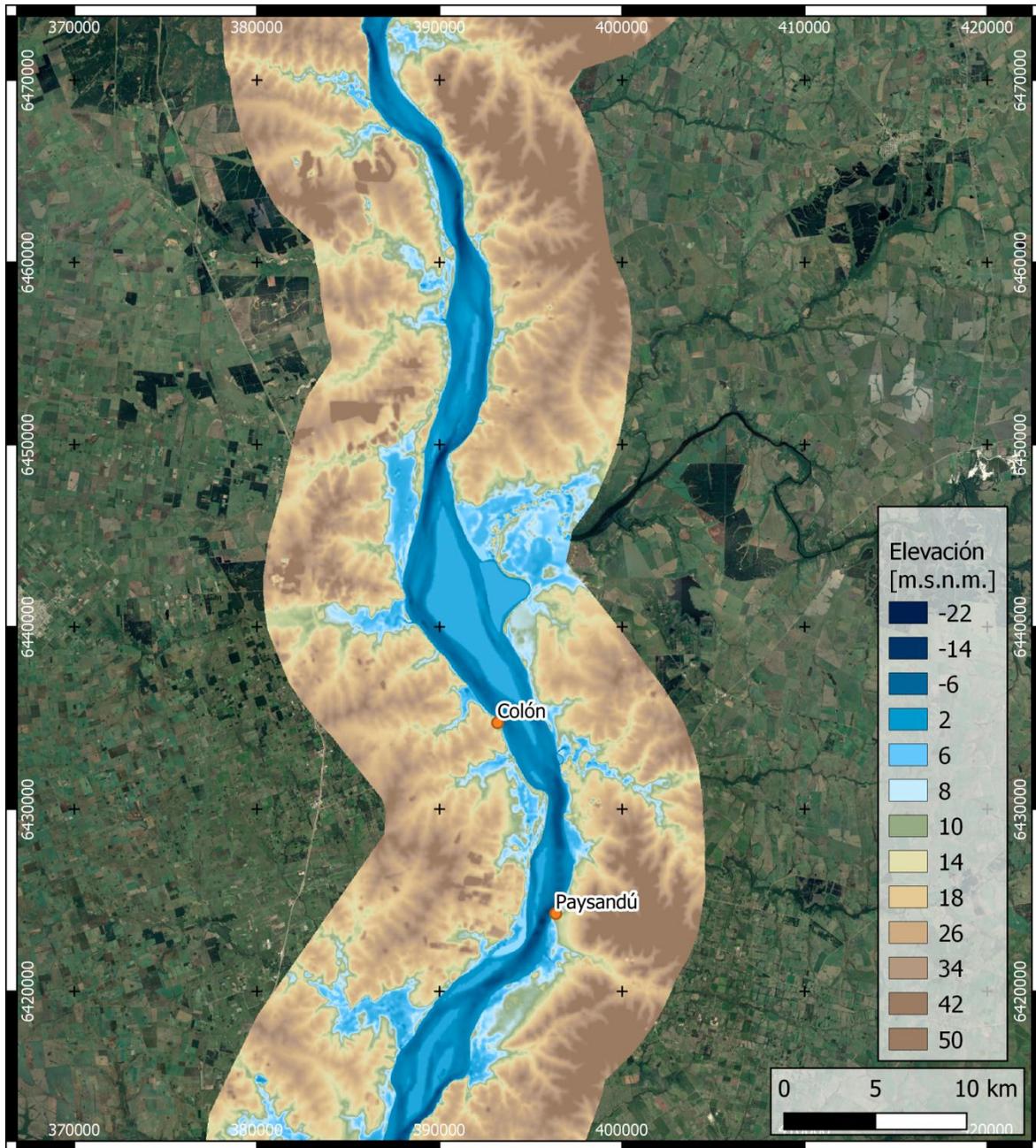


Figura 9 - Modelo topo-batimétrico (2/5)

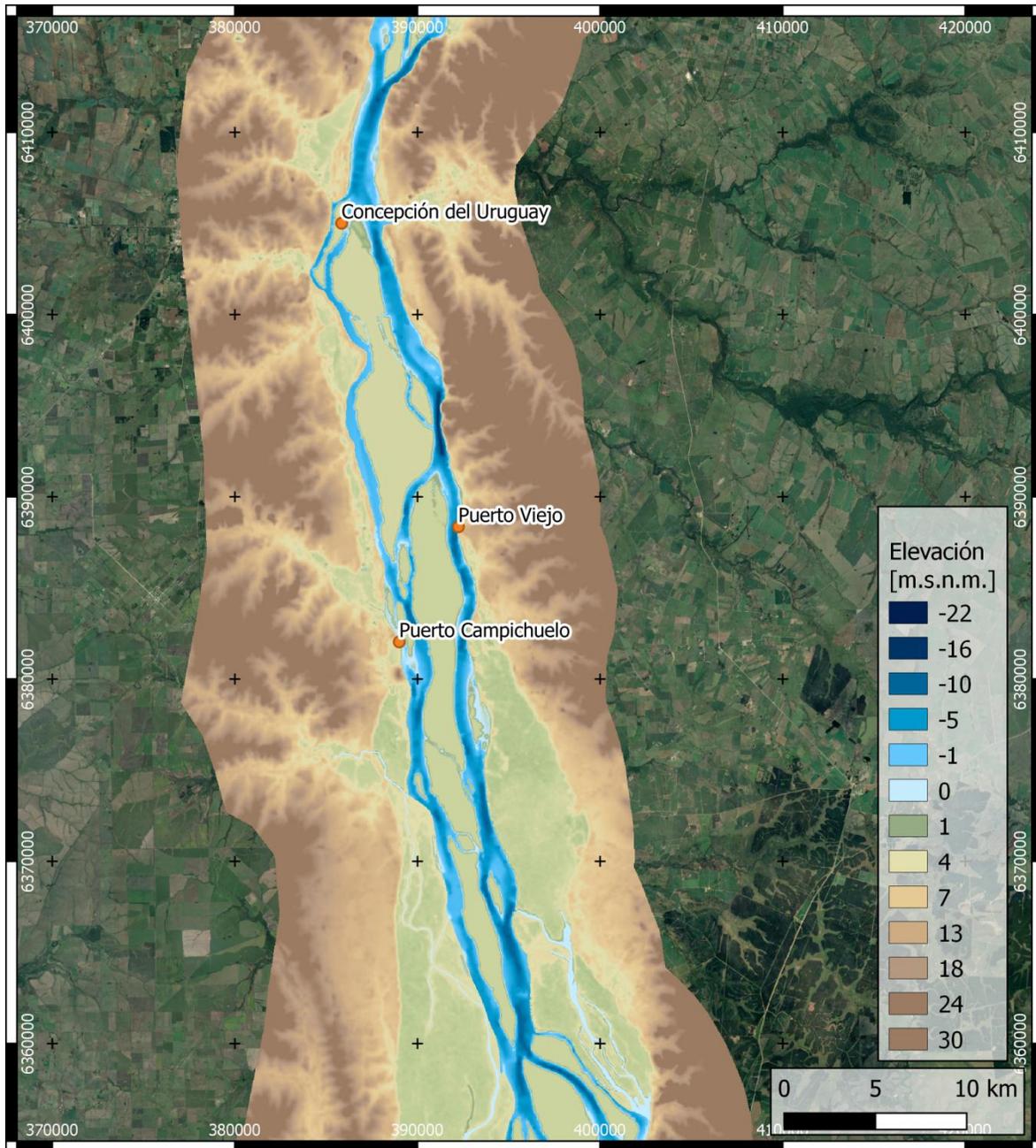


Figura 10 - Modelo topo-batimétrico (3/5)

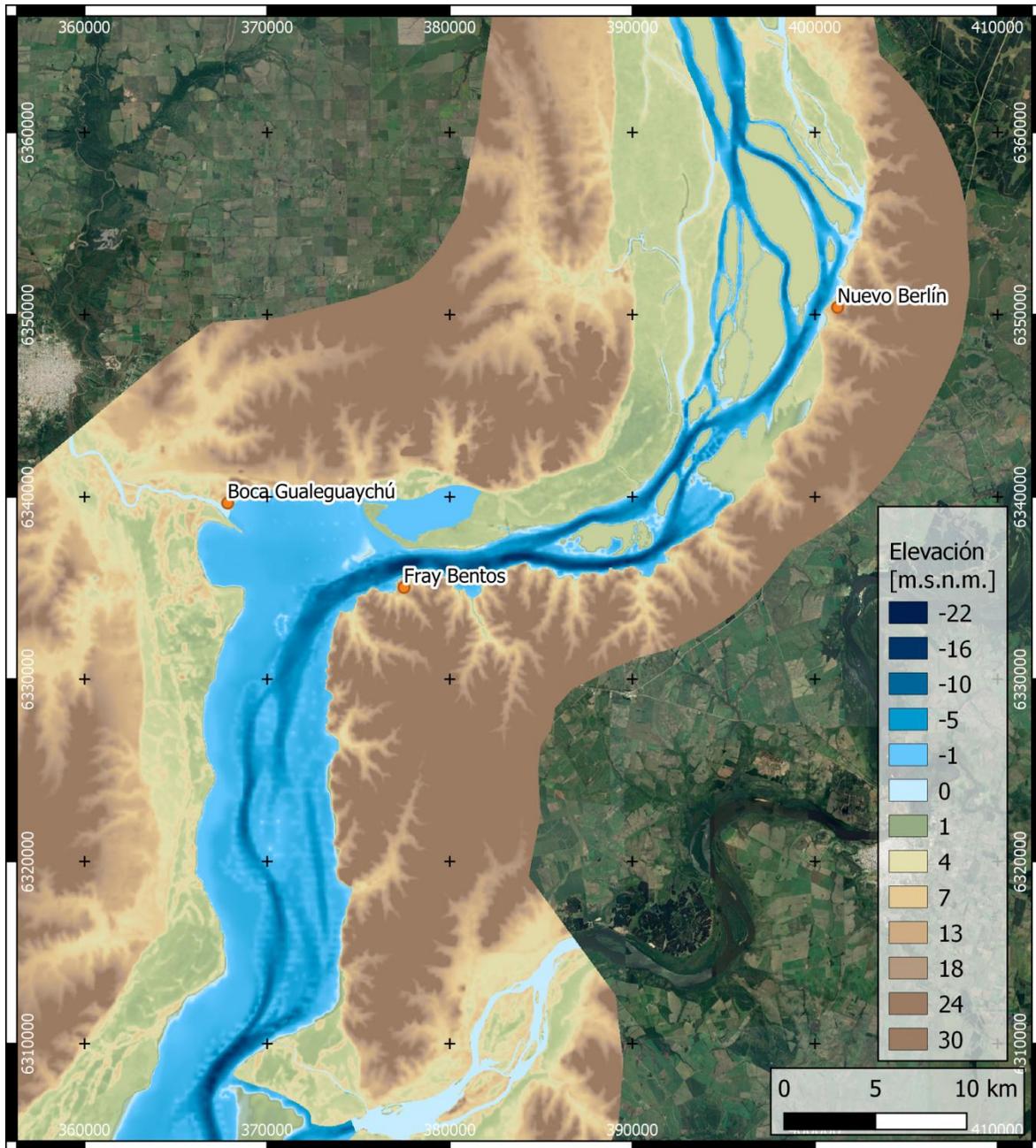


Figura 11 - Modelo topo-batimétrico (4/5)

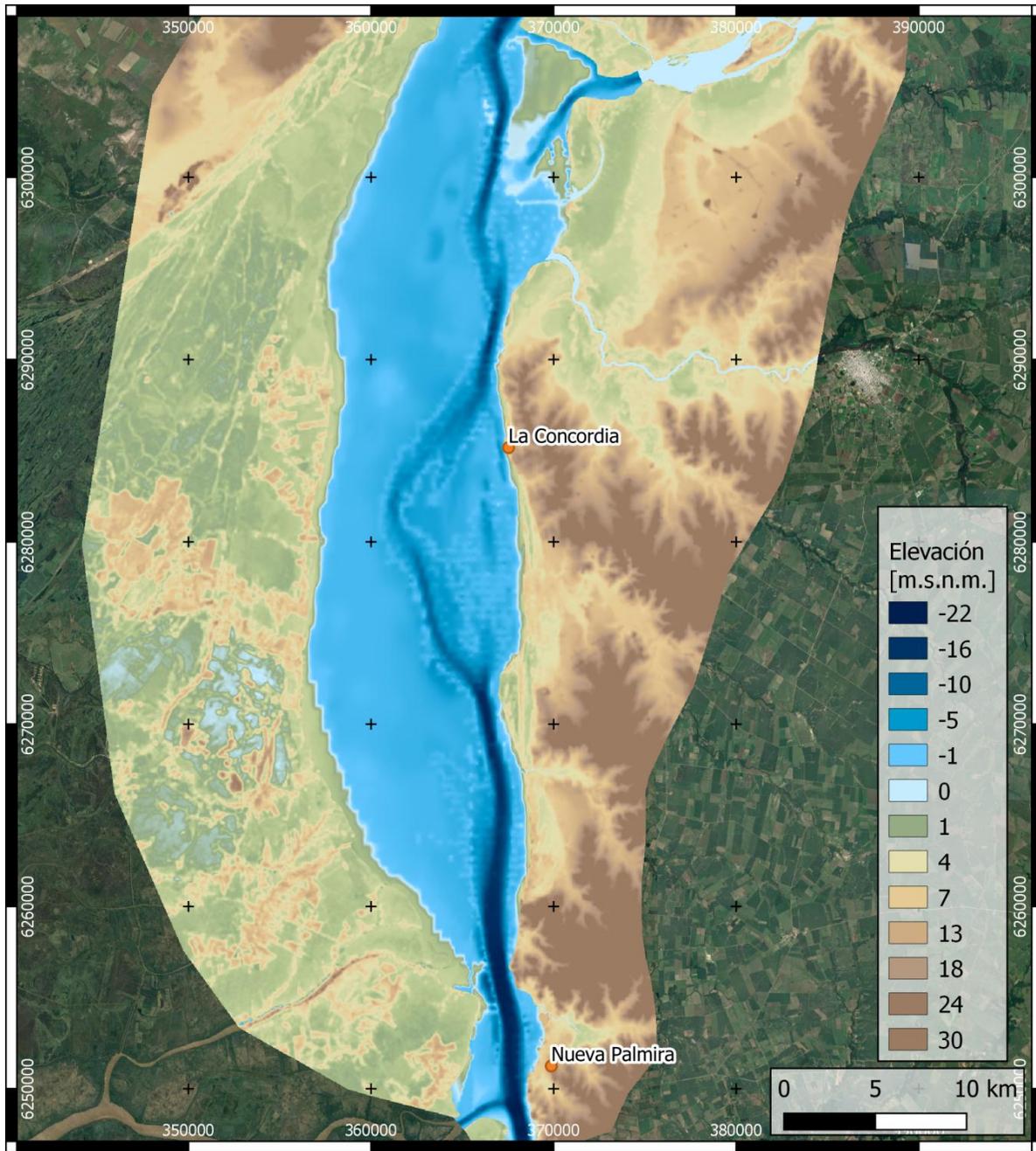


Figura 12 - Modelo topo-batimétrico (5/5)

A partir de los modelos topo-batimétricos se realizan los perfiles transversales de los principales centro poblados, desde Salto hasta Nueva Palmira. Los mismos se encuentran en el *Anexo I: Perfiles transversales*.

5. Escalas hidrométricas y su referenciación

Sobre el río Uruguay existen varias estaciones de seguimiento (Figura 13). En cada una de estas estaciones se dispone de series temporales de niveles hidrométricos, con distintos pasos temporales que se detallan en la Tabla 1.

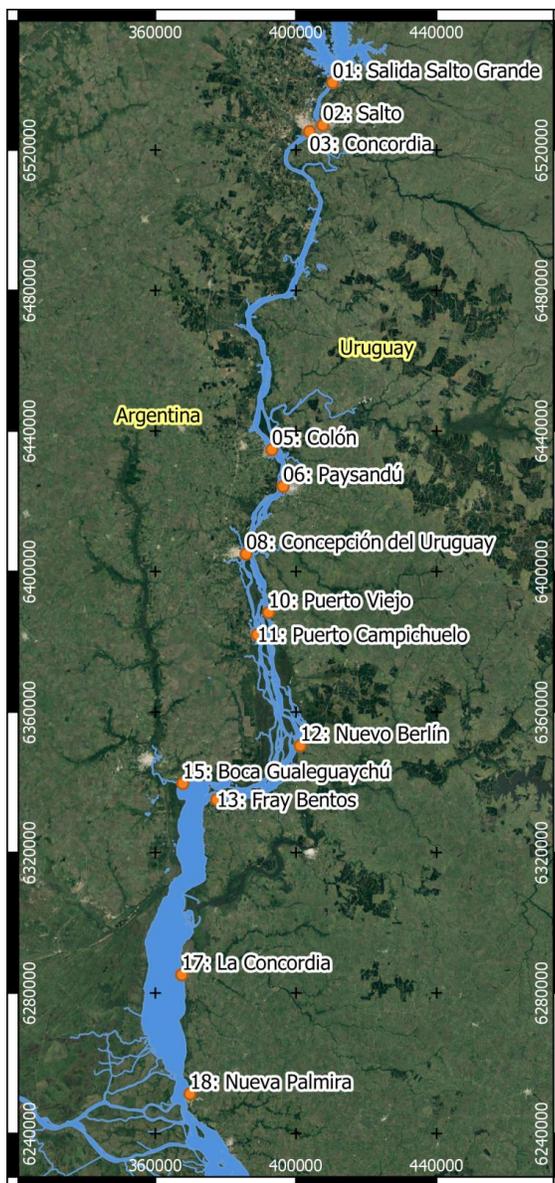


Figura 13 - Estaciones hidrométricas

En las estaciones de seguimiento ubicadas sobre el río Uruguay, doce más Salto Grande, se encuentran escalas hidrométricas que acusan el nivel del río en esos puntos (Figura 13). Estas series temporales fueron obtenidas de distintas fuentes: la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU), la Prefectura Naval Argentina (PNA) y el Instituto Nacional del Agua (INA) en Argentina.

Como se puede observar en la Tabla 1, en las estaciones de Concordia, Paysandú, Concepción del Uruguay, Fray Bentos, Boca del Gualeguaychú y Nueva Palmira se dispone de dos series de niveles con distinta resolución temporal. Cada una de estas series es tomada de forma independiente y se utilizan ambas para calibrar el modelo.

Id	Km	Estación	IGN	Wharton	País	Tipo	Frecuencia
1	341	Salida Salto Grande	-0.5225	0.170	A/U	Caudal	Diario
2	336	Salto	1.3175	2.010	Uruguay	Nivel	Diario
3	332	Concordia	1.2875	1.980	Argentina	Nivel	12hrs
4	332	Concordia	1.2875	1.980	Argentina	Nivel	15min
5	216	Colón	0.0275	0.720	Argentina	Nivel	12hrs
6	207	Paysandú	0.3275	1.020	Uruguay	Nivel	Diario
7	207	Paysandú	0.3275	1.020	Uruguay	Nivel	15min
8	183	Concepción del Uruguay	-0.0525	0.640	Argentina	Nivel	12hrs
9	183	Concepción del Uruguay	-0.0525	0.640	Argentina	Nivel	Horario
10	163	Puerto Viejo	-	-	Uruguay	Nivel	Horario
11	157	Campichuelo	-0.0825	0.610	Argentina	Nivel	12hrs
12	127	Nuevo Berlín	-	-	Uruguay	Nivel	Horario
13	99	Fray Bentos	-0.1425	0.550	Uruguay	Nivel	Diario
14	99	Fray Bentos	-0.1425	0.550	Uruguay	Nivel	Horario
15	94	Boca Gualeguaychú	-0.1825	0.510	Argentina	Nivel	12hrs
16	94	Boca Gualeguaychú	-0.1825	0.510	Argentina	Nivel	Horario
17	41	La Concordia Puerto Aldao	-0.1825	0.510	Uruguay	Nivel	Horario
18	5	Nueva Palmira	0.0275	0.720	Uruguay	Nivel	Diario
19	5	Nueva Palmira	0.0275	0.720	Uruguay	Nivel	Horario

Tabla 1 - Ceros de escala para las distintas estaciones de control.

La serie de datos observados conforma la información de referencia para la calibración y control de la performance del modelo. Ahora bien, dado que el modelo se construye bajo

un mismo plano de referencia (en este caso el del IGN) y las series observadas están referidas al cero local de la escala hidrométrica, es necesario vincular cada uno de esos ceros al plano de referencia global que utiliza el modelo. Para esto, se necesita conocer la cota del cada cero hidrométrico referida al cero IGN.

Respecto de este punto existe información antecedente, en la que los ceros de esta escala presentan distintos valores según la fuente que se consulte: Cero MOP (Ministerio de Obras Públicas), Cero IGM (Instituto Geográfico Militar; actualmente IGN, Instituto Geográfico Nacional), así como varían también los ceros de referencia a los que están relacionados.

A partir del relevamiento de ceros hidrométricos realizado junto a la CARU en 2019 (INA, 2020), se actualizó la información (estaciones resaltadas en celeste). En la Tabla 2 se presentan los ceros de escala adoptados para el modelo y las coordenadas correspondientes a dichas reglas (en el sistema UTM – 21S – WGS 84).

Id	Km	Estación	IGN	X	Y
1	341	Salida Salto Grande	-0.523	410460.6	6539252.6
2	336	Salto	1.3175	407649.5	6527131.2
3	332	Concordia	1.2875	403886.8	6525332.9
4	332	Concordia	1.2875	403886.8	6525332.9
5	216	Colón	-0.26	393179.9	6434738.8
6	207	Paysandú	0.04	396368.4	6424267
7	207	Paysandú	0.04	396368.4	6424267
8	183	Concepción del Uruguay	-0.37	385848.2	6405011.1
9	183	Concepción del Uruguay	-0.37	385848.2	6405011.1
10	163	Puerto Viejo	0	392241.8	6388353.2
11	157	Campichuelo	-0.39	389004.2	6382035.8
12	127	Nuevo Berlín	-0.36	401240.4	6350396.1
13	99	Fray Bentos	-0.143	377493	6335028.8
14	99	Fray Bentos	-0.143	377493	6335028.8
15	94	Boca Gualeguaychú	-0.43	367837.3	6339662.7
16	94	Boca Gualeguaychú	-0.43	367837.3	6339662.7
17	41	La Concordia - Puerto Aldao	-0.183	367533.2	6285166.9
18	5	Nueva Palmira	0.0275	369876	6251246.6
19	5	Nueva Palmira	0.0275	369876	6251246.6

Tabla 2 - Ceros de escala adoptados para el modelo

6. Modelo hidrodinámico

6.1. Esquema de modelación

Los datos de entrada al modelo que se utilizan como condición de borde son: aguas arriba, la serie de caudales horarios erogados de la presa de Salto Grande; y aguas abajo, la serie de niveles hidrométricos horarios registrados en la localidad de Nueva Palmira (Figura 14). Este esquema presenta las siguientes características:

- Forzar el modelo desde aguas arriba con datos de caudal conocidos y confiables, dado que provienen de la operación del embalse.
- Forzar el modelo desde aguas abajo con niveles que tienen en cuenta el comportamiento del estuario del Río de la Plata (mareas astronómicas y meteorológicas).
- Como primera aproximación al problema, y dada la falta de datos, no se tienen en cuenta los aportes en ruta, que serán considerados y analizados en etapas posteriores del estudio.



Figura 14 - Topología de modelación

La Tabla 3 presenta un resumen del tramo modelado:

Curso	río Uruguay
Longitud [km]	351
Cantidad de Secciones	864
Puntos de observación de nivel	12
Cantidad de localidades ribereñas	21
Población aproximada de localidades ribereñas	700.000
Cantidad de curvas HQ a lo largo del tramo	1
Condición de borde aguas arriba	caudal [m ³ /s]
Condición de borde aguas abajo	nivel [m]

Tabla 3 - Resumen del esquema de modelación

6.2. Construcción del modelo

Para la construcción del modelo se realizan hipótesis previas sobre el comportamiento del flujo y la forma que adoptan las líneas de corriente a lo largo del tramo estudiado. Puesto que se modela de forma unidimensional, las secciones de cálculo deben colocarse perpendiculares al flujo, tanto en el cauce como en la llanura de inundación.

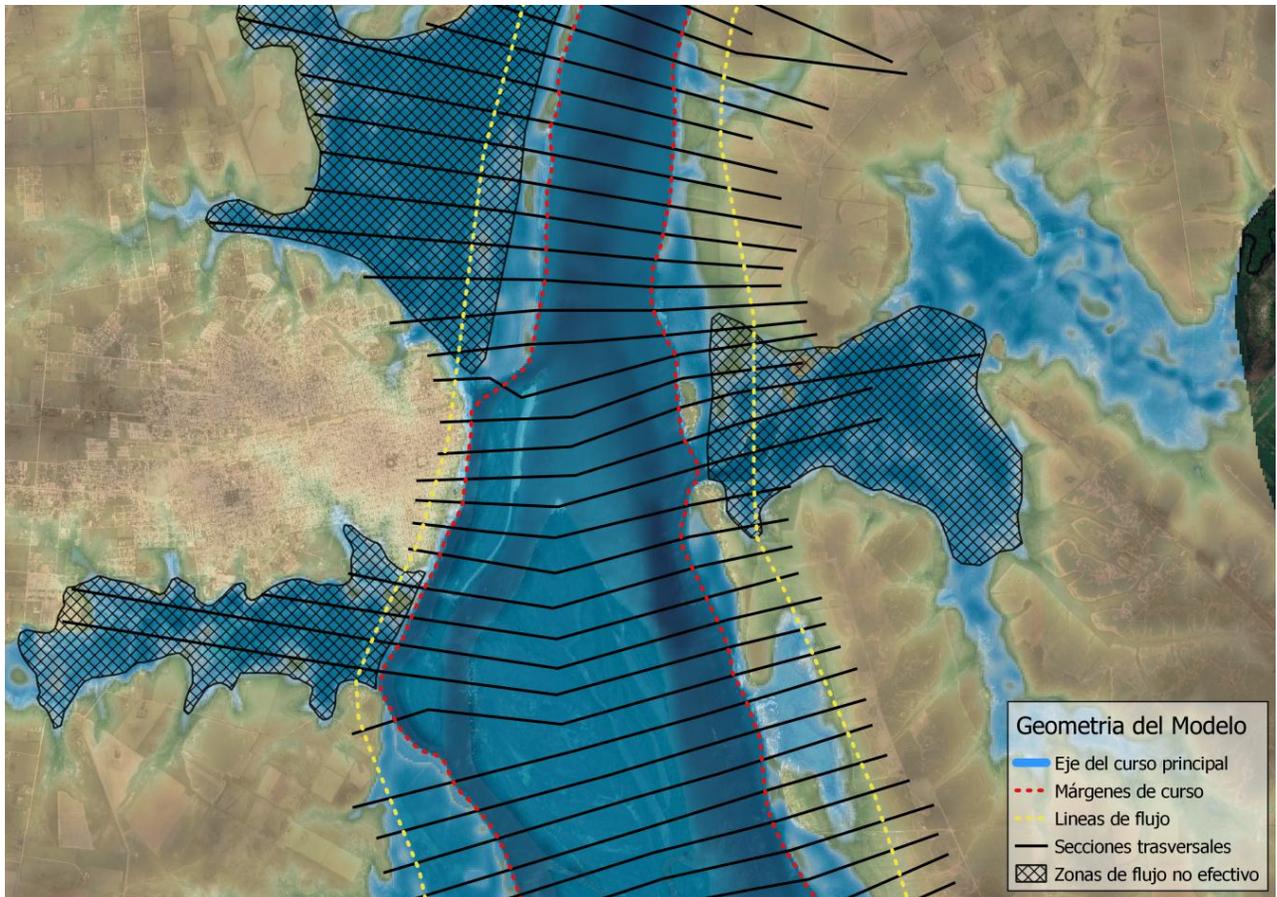


Figura 15 - Creación de la geometría del modelo

Se identifican:

- el eje y las márgenes del río: con esta información se define el cauce (Figura 15);
- las líneas de flujo que van a definir la distancia a la que se encuentran las secciones en la llanura de inundación (Figura 15);
- zonas en las que el flujo no tiene capacidad de transporte en sentido longitudinal (flujo no efectivo) (Figura 15 y 16).

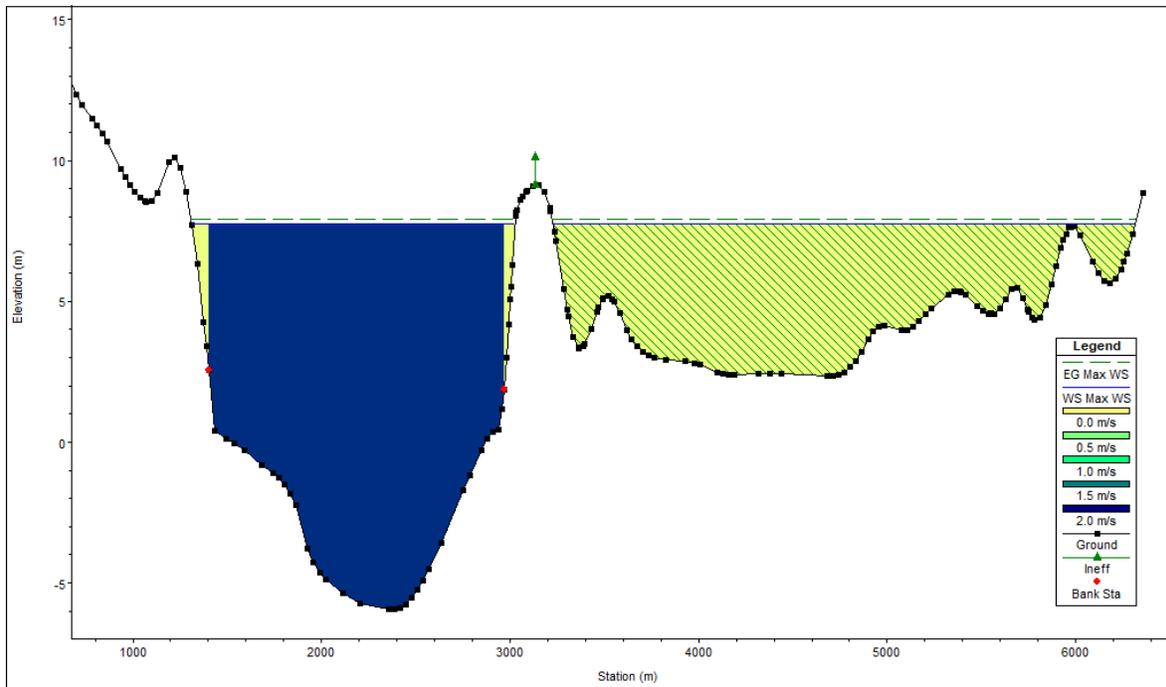


Figura 16 - Área inefectiva en HEC-RAS

La hipótesis de flujo unidimensional supone que la lámina de agua está a la misma cota a lo largo de toda la sección. En el modelo actual esta condición se asume. Sin embargo, cuando se producen situaciones de separación de caudales como sucede en el tramo dos, esta hipótesis puede no cumplirse. En la conclusión se retoma este punto y se analizan posibles formas de modelar esta condición.

En cuanto a las secciones transversales, se establece un paso de discretización espacial uniforme, tomando como distancia máxima entre una y otra el valor de 400 metros. Con esta distancia se logra una buena resolución, tanto para identificar los límites de la inundación como para obtener un campo de velocidades fiable. Al mismo tiempo se satisfacen las reglas generales que establece Samuels (Samuels, 1990) para la elección de una resolución espacial máxima:

$$\Delta x < 20 \cdot B \qquad \Delta x < \frac{1}{2 \cdot S_0} \qquad \Delta x < 0,2 \cdot \frac{h}{S_0}$$

Dónde:

- Δx es la distancia entre secciones (m)
- B es el ancho mojado de la sección (m)

- S_0 es la pendiente del tramo (m/m)
- h es el calado (m)

Mediante las herramientas del *software* HEC-RAS se crean secciones a una distancia uniforme, perpendiculares al eje del cauce. Luego se realizan los cambios necesarios: como se mencionó, la posición de las mismas debe ser tal que se verifique la hipótesis de flujo unidimensional y, por lo tanto, deben ser perpendiculares a las líneas de flujo en el cauce y en la llanura. Para esto pueden trazarse secciones quebradas (Figura 15).

Para evitar inestabilidades en el tiempo, el modelo ajusta internamente el paso de tiempo según el número de Courant. La inestabilidad, en este caso, también resulta proporcional a la resolución espacial; por ello, en situaciones en las que la separación entre secciones es relativamente pequeña con una gran variación de caudal en el tiempo, puede producir inestabilidad. Para una separación entre secciones de 400 mts, el paso de tiempo para el cálculo ronda los 60 segundos.

6.3. Condiciones de borde

Como se mencionó anteriormente, los datos de entrada al modelo son los caudales [m^3/s] en la salida de la presa Salto Grande (Figura 17) y los niveles [m] en la localidad de Nueva Palmira (Figura 18). Ambas series tienen una resolución temporal horaria. Esta discretización temporal es fundamental para poder reproducir las variaciones intradiarias en la política de operación de la presa y el registro de la onda de marea del estuario. Se dispone de datos desde 01/01/1985 hasta la actualidad, con excepción de algunas ventanas temporales para las que no se encuentran los datos de niveles en Nueva Palmira.

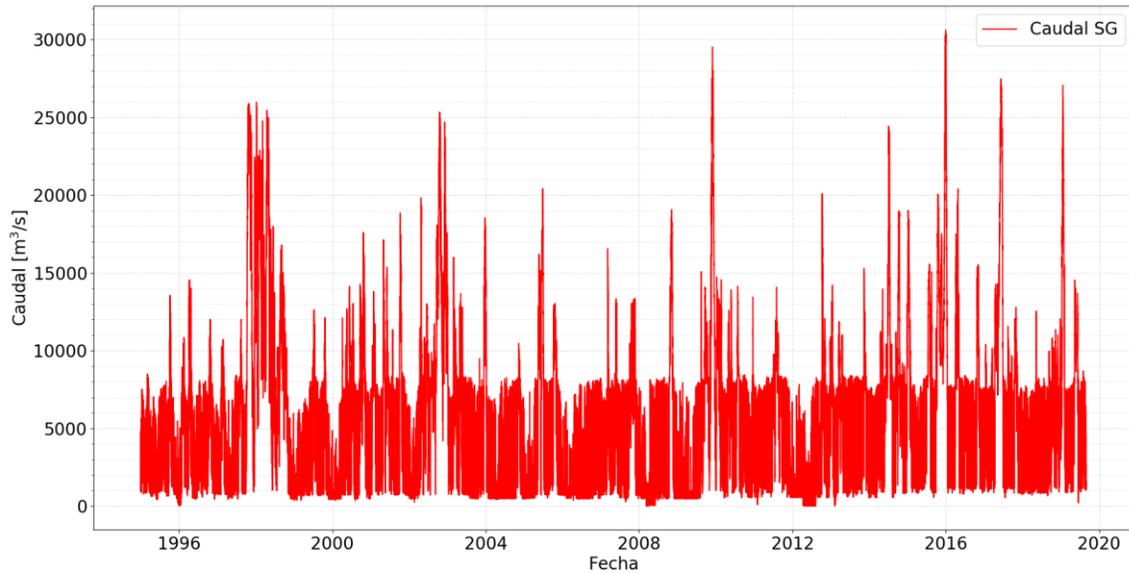


Figura 17 - Serie de caudales horarios en Salto Grande

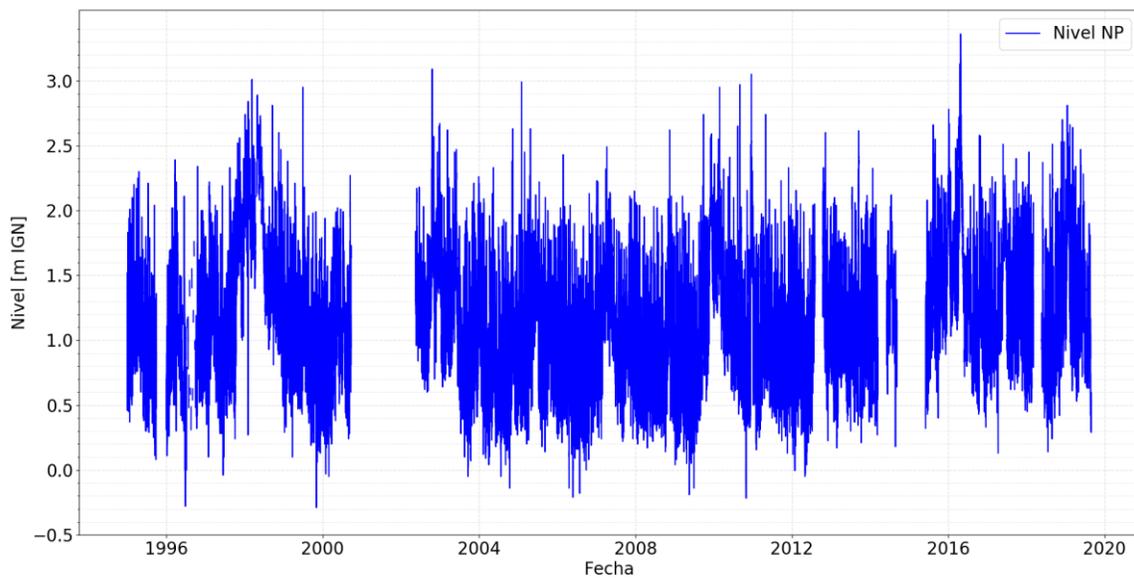


Figura 18 - Serie de niveles horarios en Nueva Palmira

7. Calibración y validación del modelo

En el desarrollo del modelo, los coeficientes de rugosidad del cauce y de la planicie de inundación se utilizan como parámetros de calibración. La selección de los mismos se efectúa a partir de la comparación de niveles registrados y simulados en las secciones de control. La calidad del ajuste se evalúa mediante los indicadores descritos en el *Anexo II: Indicadores de la calidad del ajuste*. Los indicadores utilizados son:

- Nash-Sutcliffe (E)
- coeficiente de correlación (r)
- error cuadrático medio (RMSE)
- simetría direccional especial (SPEDS)

Los valores de n de Manning utilizados son 0.02 en el cauce y 0.2 en la llanura, excepto en la zona de islas entre el puente Gualeguaychú - Fray Bentos y Concepción del Uruguay, donde se adopta un valor n de Manning de 0.3. Estos valores son tomados de la bibliografía y fue la rugosidad en islas la que tuvo mayores variaciones hasta alcanzar un ajuste satisfactorio.

Entre las figuras a continuación (Figura 20 a 35) se observa el nivel de acuerdo entre las series simuladas y observadas para el período 2016 - 2019.

En las estaciones de aguas arriba, inmediatamente por debajo de la presa Salto Grande, se observa que el modelo sobreestima los niveles normales y mínimos, apartándose aproximadamente 0.5 m sobre lo observado (Figura 20, 21 y 22). Para las mismas estaciones, en eventos de crecida, las simulaciones subestiman hasta 2 m los niveles pico.

Estos apartamientos se atribuyen a varios factores, principalmente a la calidad del modelo topo-batimétrico en esta zona, ya que la posibilidad de aumentar o disminuir los niveles para alcanzar un mejor acuerdo en algunos de los estados del río va en detrimento del ajuste del escenario hidrológico opuesto. En esta zona el cauce presenta varios saltos, como Salto Chico en Concordia (Figura 19) que no están bien representados en el modelo.

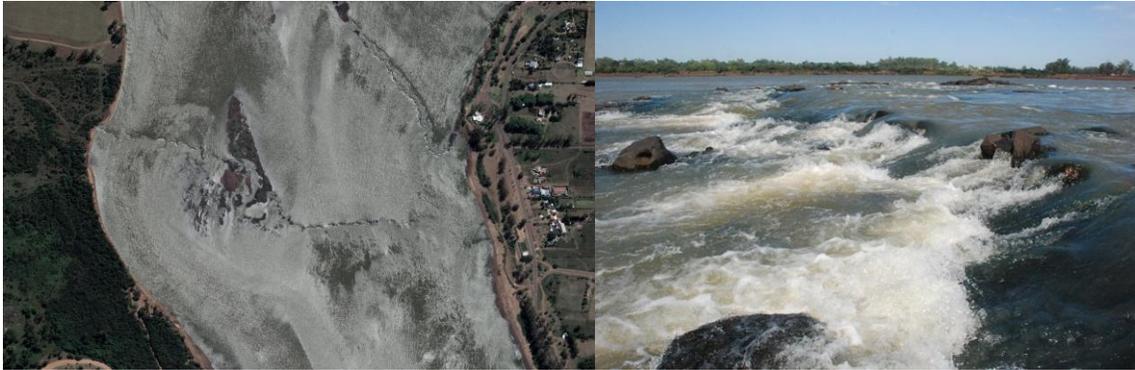


Figura 19 - Salto Chico, Concordia

Otro factor importante que puede explicar estas diferencias, principalmente en crecida, son los aportes en ruta. Como ya se comentó, el modelo actual no tiene en cuenta estos aportes, tomando como caudales de entrada únicamente los erogados por la presa Salto Grande.

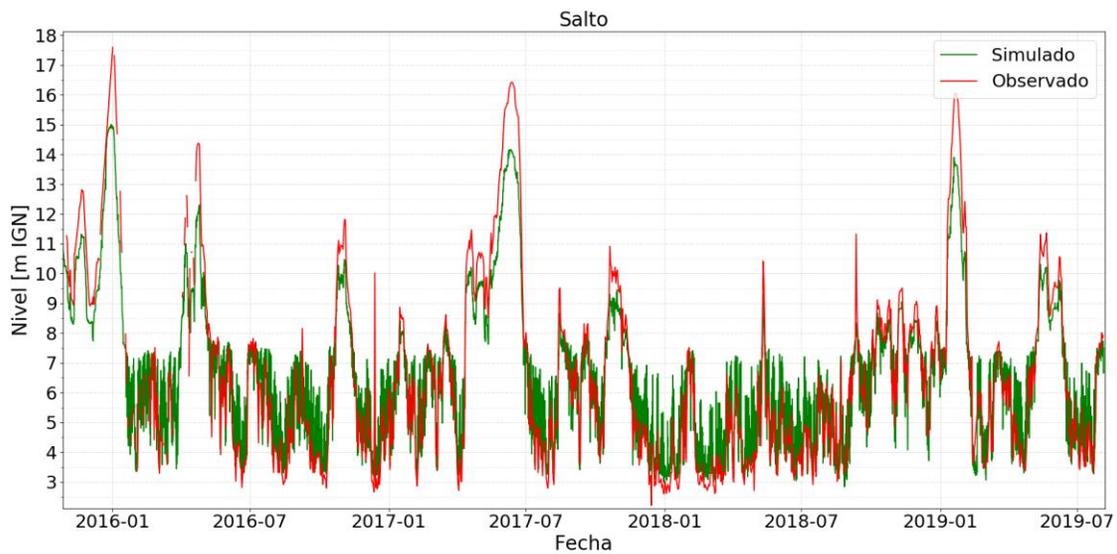


Figura 20 - Niveles observados y simulados en Salto. Frecuencia: diaria

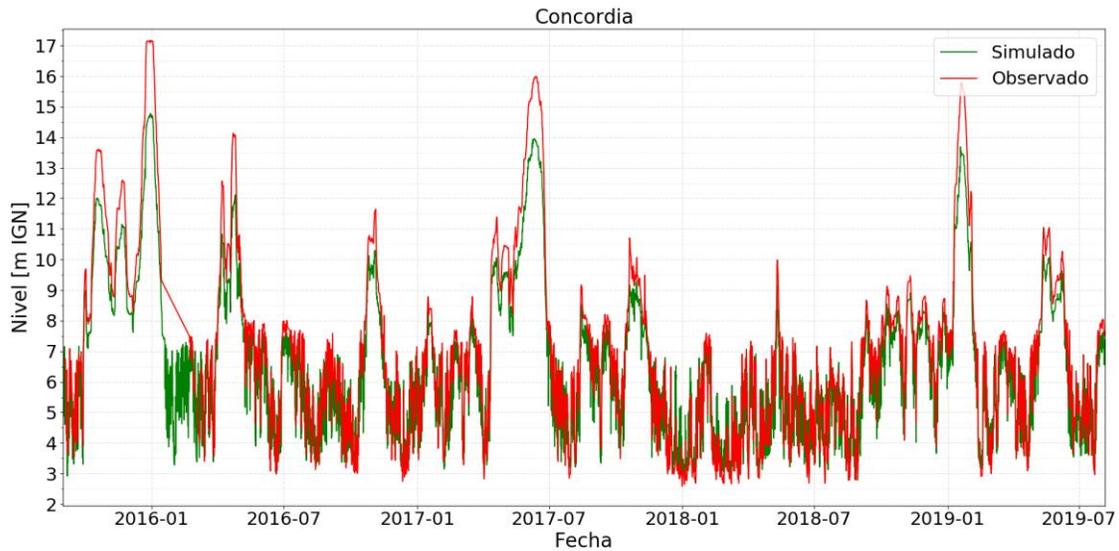


Figura 21 - Niveles observados y simulados en Concordia. Frecuencia: cada 12 hrs

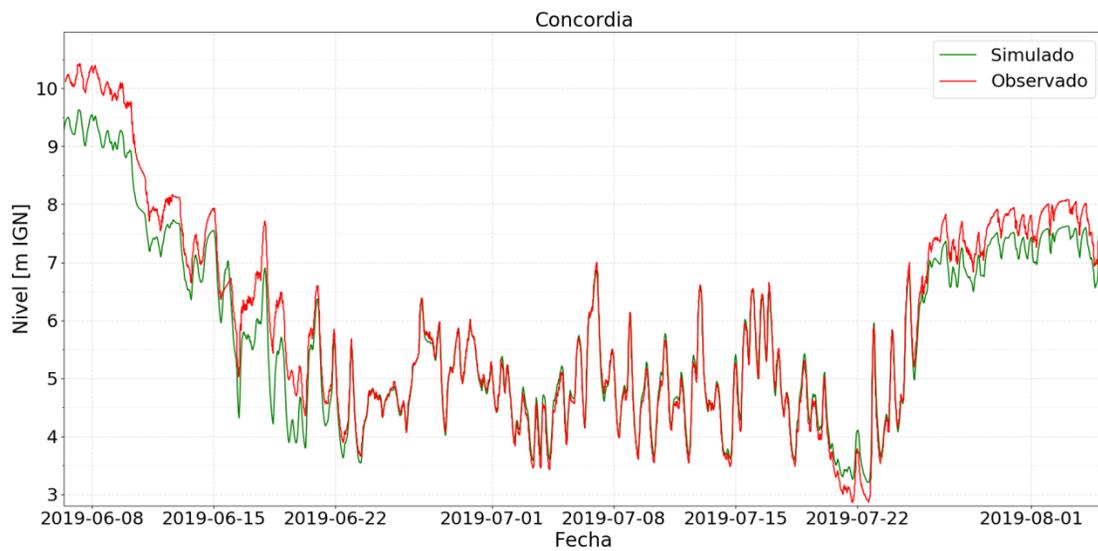


Figura 22 - Niveles observados y simulados en Concordia. Frecuencia: cada 15 min

Aguas abajo, en las estaciones de Colón, Paysandú y Concepción del Uruguay, se observan comportamientos similares a los anteriores, aunque con errores menores entre las series observadas y simuladas. En las crecidas, la diferencia entre el modelo y los picos está por debajo de un metro.

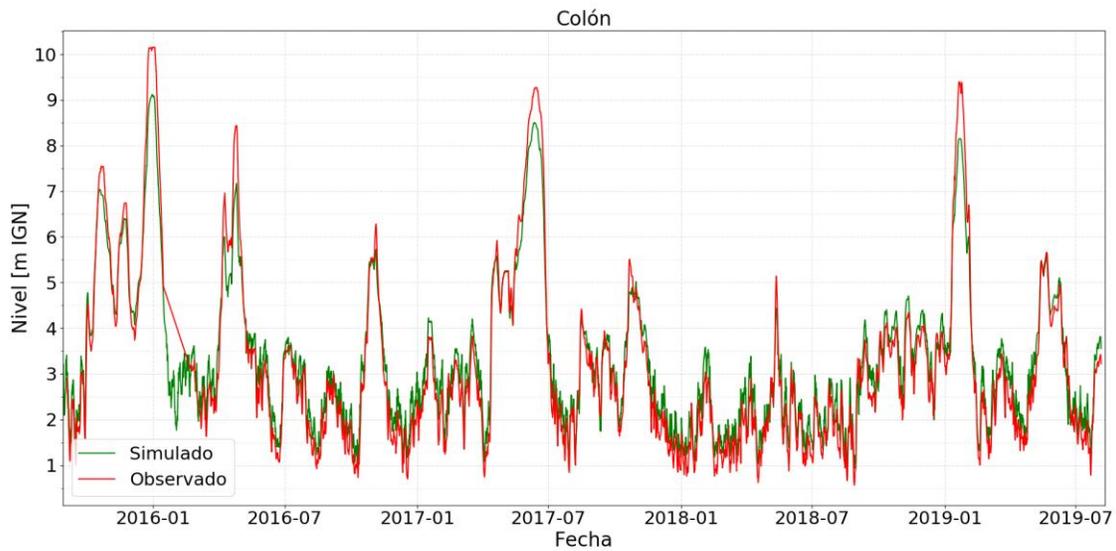


Figura 23 - Niveles observados y simulados en Colón. Frecuencia: cada 12 hrs

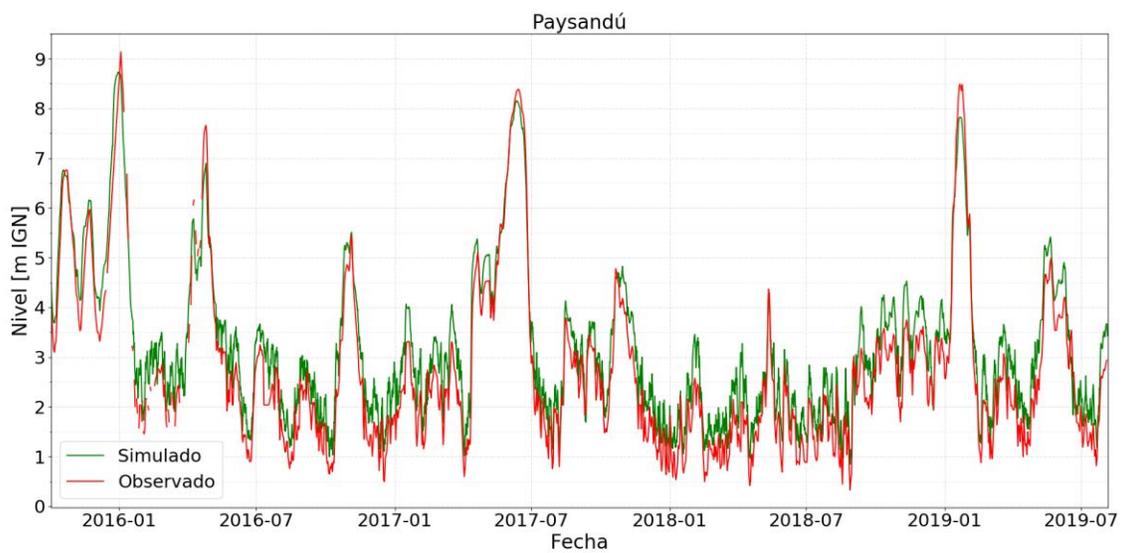


Figura 24 - Niveles observados y simulados en Paysandú. Frecuencia: diaria

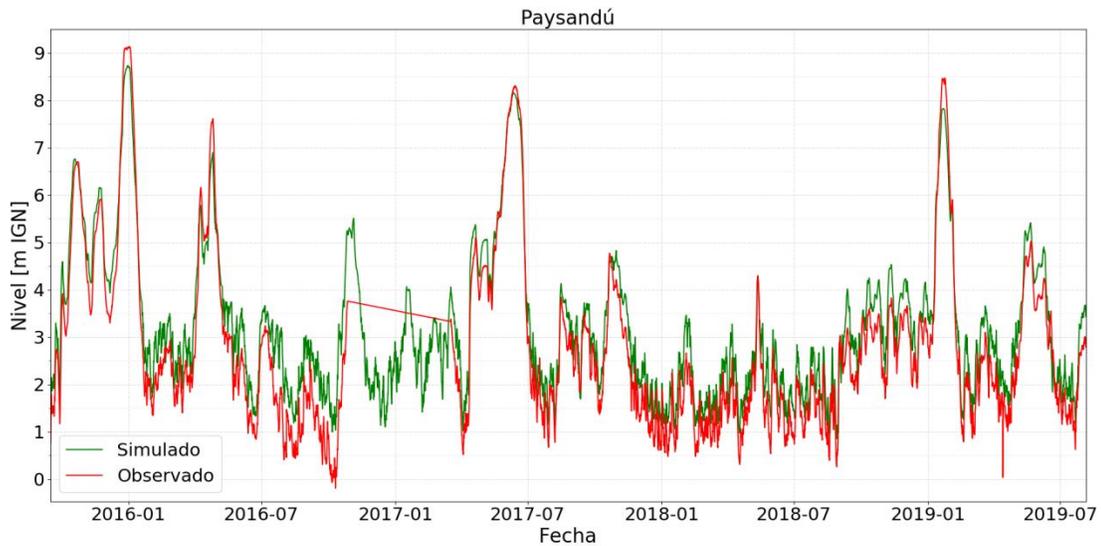


Figura 25 - Niveles observados y simulados en Paysandú. Frecuencia: cada 15 min

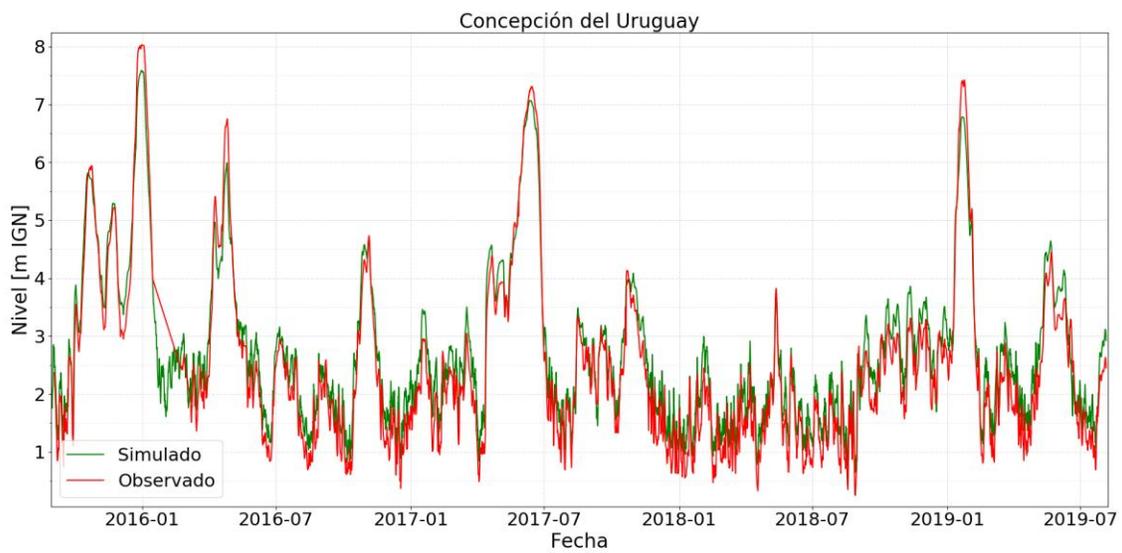


Figura 26 - Niveles observados y simulados en Concepción del Uruguay. Frecuencia: cada 12 hrs

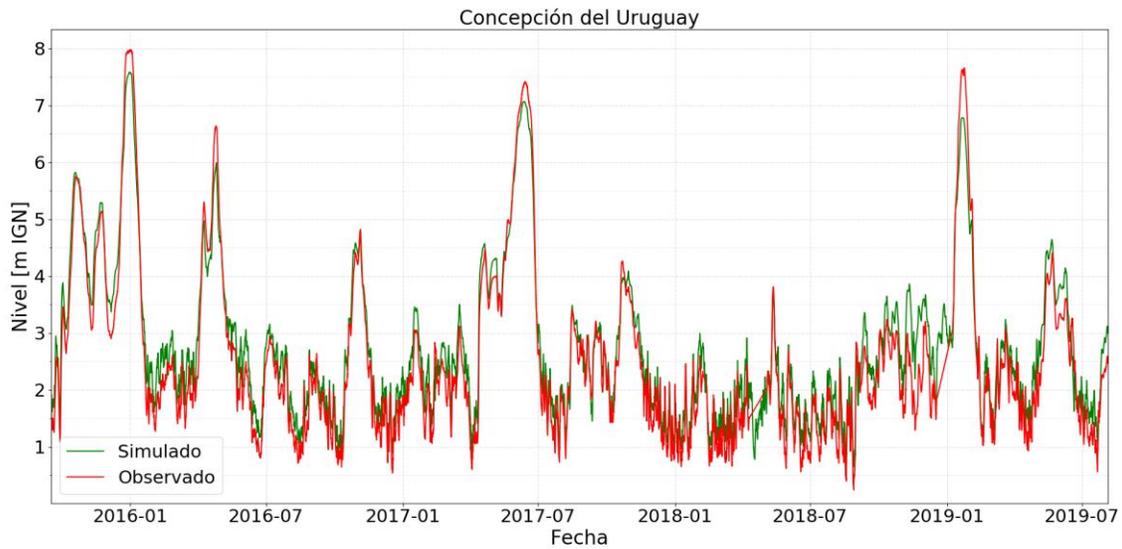


Figura 27 - Niveles observados y simulados en Concepción del Uruguay. Frecuencia: horaria

En las estaciones restantes, aguas abajo de Concepción del Uruguay, la diferencia disminuye aún más, hasta el orden de los 30 cm. Se empieza a apreciar el aumento de la influencia de las mareas a lo largo de este tramo.

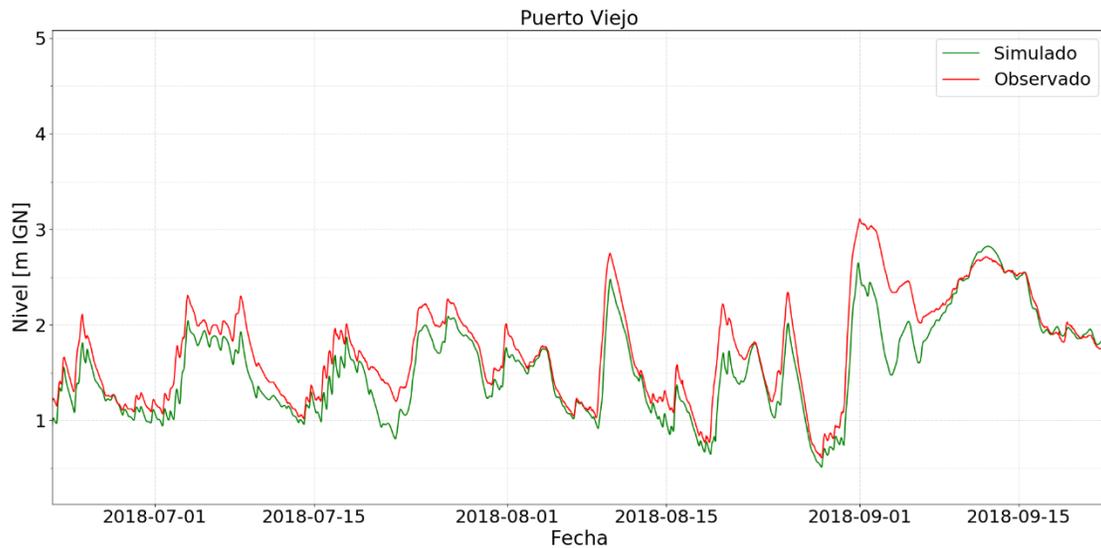


Figura 28 - Niveles observados y simulados en Puerto Viejo. Frecuencia: horaria

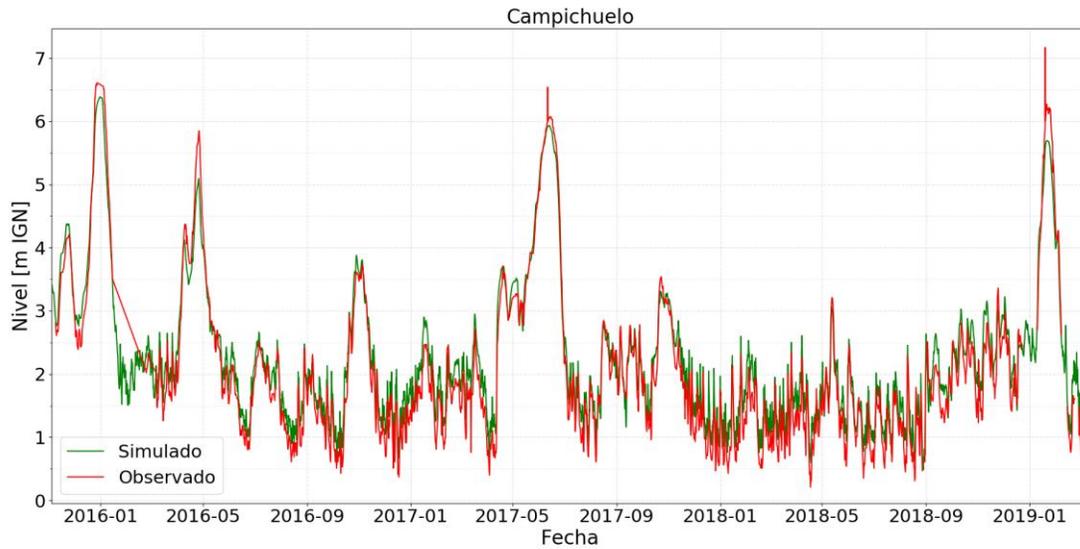


Figura 29 - Niveles observados y simulados en Campichuelo. Frecuencia: cada 12 hrs

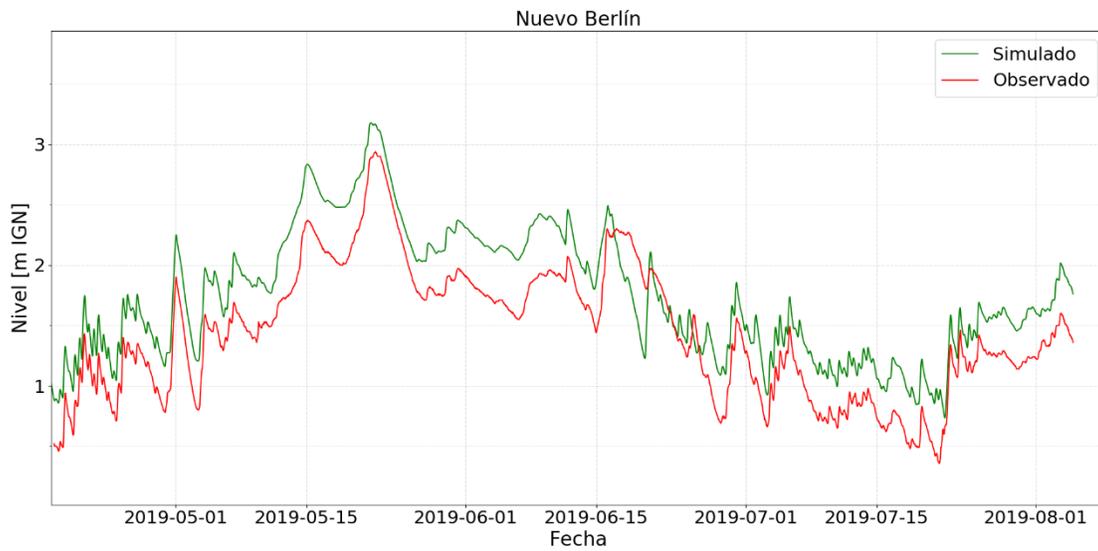


Figura 30 - Niveles observados y simulados en Nuevo Berlín. Frecuencia: horaria

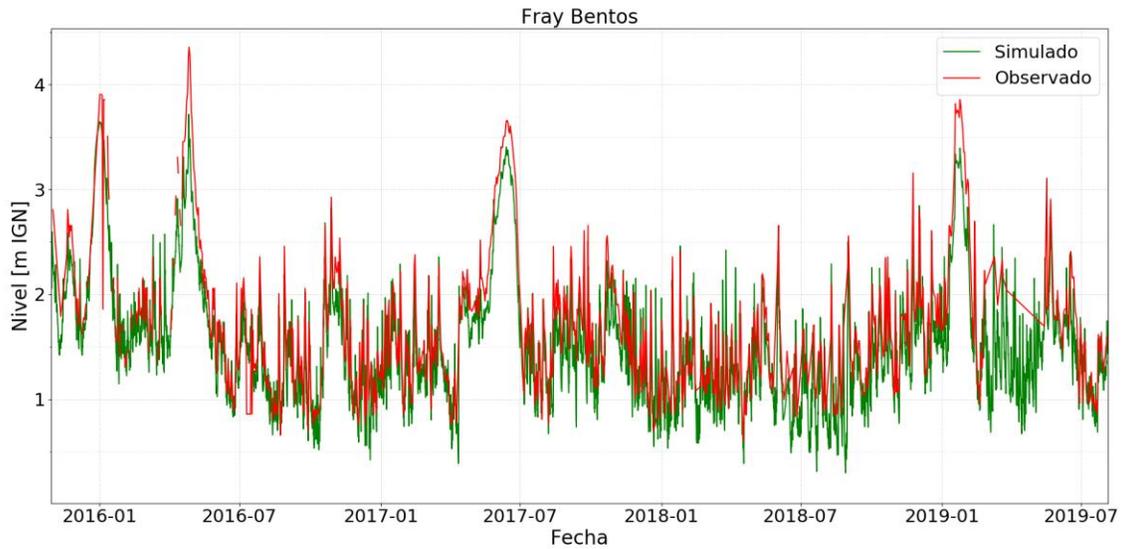


Figura 31 - Niveles observados y simulados en Fray Bentos. Frecuencia: diaria

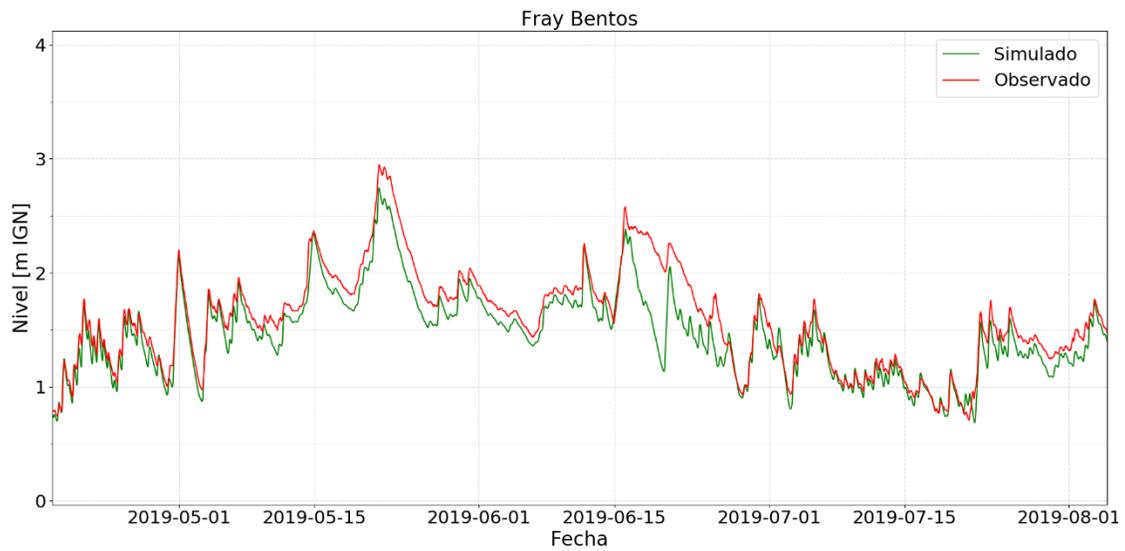


Figura 32 - Niveles observados y simulados en Fray Bentos. Frecuencia: horaria

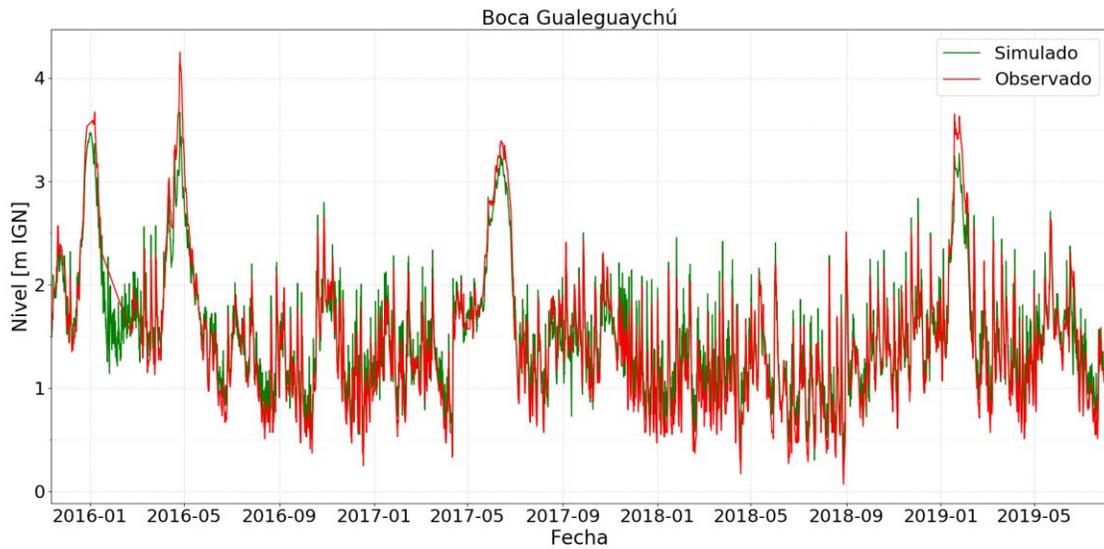


Figura 33 - Niveles observados y simulados en Boca del Gualeguaychú. Frecuencia: cada 12 hrs

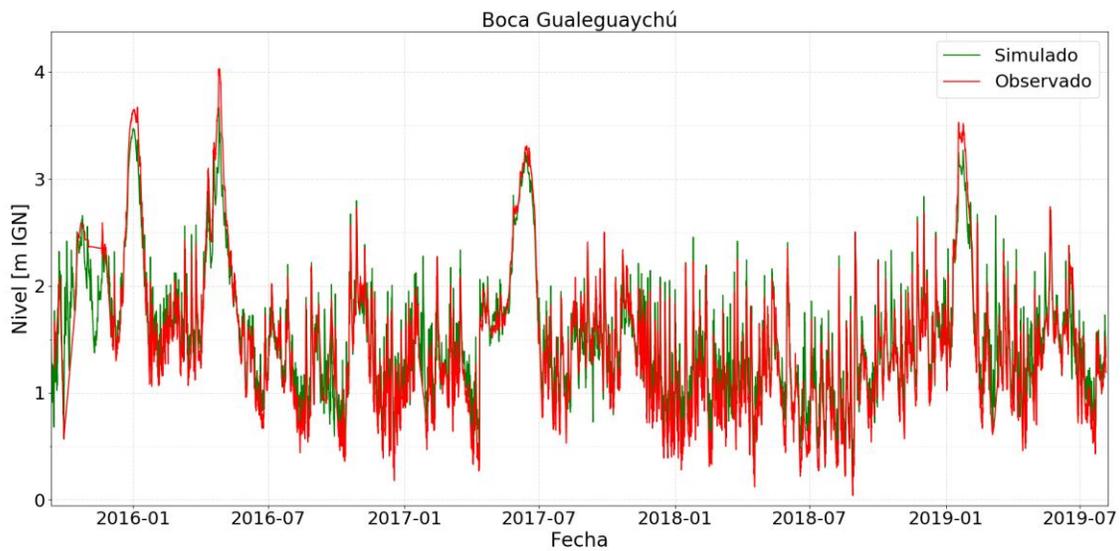


Figura 34 - Niveles observados y simulados en Boca del Gualeguaychú. Frecuencia: horaria

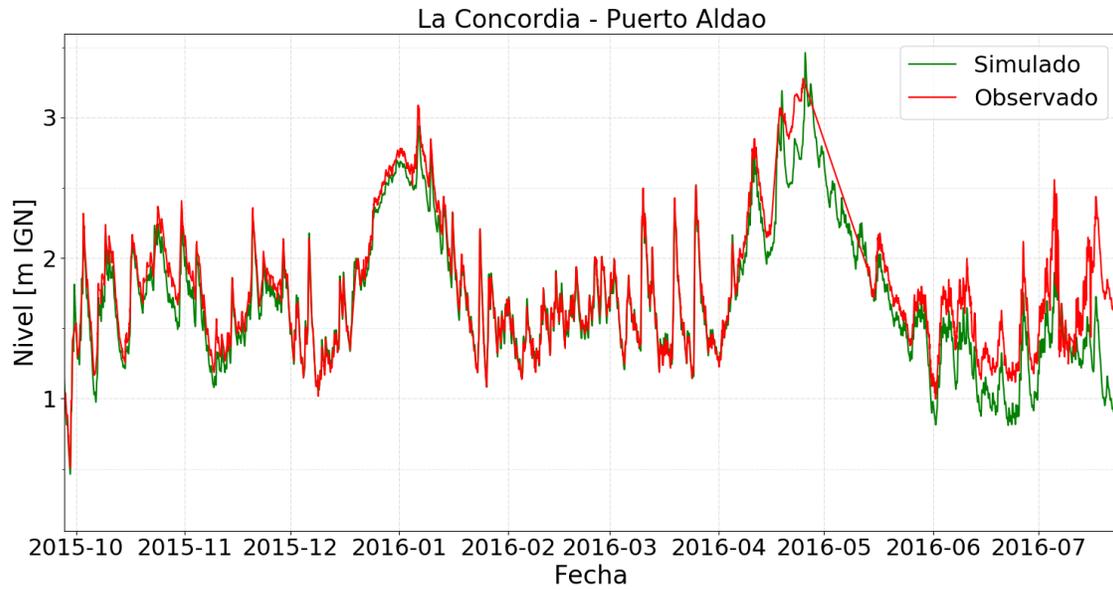


Figura 35 - Niveles observados y simulados en La Concordia. Frecuencia: horaria

8. Evaluación de performance

8.1. Análisis de performance

En general, se emplean dos métodos para determinar la bondad de ajuste de modelos numéricos para problemas hidrológicos o hidráulicos: la evaluación gráfica o visual y la valoración estadística. En este informe, además del primero, se utilizan criterios estadísticos de eficiencia en algunos nodos del modelo (estaciones de control) para evaluar la performance del modelo aplicado: se obtienen indicadores de performance (*Anexo II: Indicadores de la calidad del ajuste*) a partir de las diferencias entre los valores simulados y observados de los niveles del río. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Las series temporales disponibles para la aplicación de indicadores de performance corresponden a los niveles observados y simulados, en cada estación de seguimiento o control, para distintos períodos en la ventana temporal octubre 2015 – agosto 2019. La frecuencia de observación para cada estación de control se detalla en la Tabla 1.

8.2. Indicadores de performance

Id	Estación	Nash	Coefficiente de correlación	RMSE	SPEDS
2	Salto	89.86	0.99	0.797	88
3	Concordia	89.38	0.9978	1.028	93.6
4	Concordia	93.51	0.9909	0.397	97.2
5	Colón	93.41	0.9936	0.555	86.3
6	Paysandú	85.18	0.9828	0.585	84
7	Paysandú	87.02	0.9837	0.575	98
8	Concepción del Uruguay	94.93	0.9922	0.406	88.4
9	Concepción del Uruguay	91.28	0.9816	0.394	93.5
10	Puerto Viejo	75.78	0.9344	0.262	94.5
11	Campichuelo	94.54	0.9893	0.329	83.6
12	Nuevo Berlín	65.54	0.944	0.358	93.9
13	Fray Bentos	79.42	0.9544	0.268	84.5
14	Fray Bentos	76.66	0.9513	0.189	93
15	Boca Gualeguaychú	91.89	0.9875	0.209	86.1
16	Boca Gualeguaychú	91.77	0.9839	0.169	89.3
17	La Concordia / Puerto Aldao	79.06	0.9276	0.213	88.5

Tabla 4 - Indicadores de performance

8.3. Aforos en Nueva Palmira

El 23 y 24 de abril del 2019 se realizó una campaña de aforos de caudales líquidos (INA, 2020 ⁽²⁾) en la desembocadura del río Uruguay. Uno de los objetivos de esta campaña fue evaluar la variación de la descarga de este último por efecto de las mareas para obtener resultados más confiables en las simulaciones.

Esta variación de la descarga es de gran interés para el modelo. En la sección Nueva Palmira se impone una condición de borde de niveles hidrométricos. Si al mismo tiempo los caudales simulados y observados tienen una buena correlación, el comportamiento global del modelo se considera satisfactorio.

En la Figura 36 se presentan los caudales obtenidos durante la campaña de aforo y los resultados del modelo para la misma fecha. Se puede observar que si bien existen diferencias en cuanto a la cantidad, se puede afirmar que, para una primera versión del modelo, se reproducen de forma adecuada las variaciones de caudal en esta sección. El día 24 de abril a las 9:30 am se registró un caudal de 10.120 m³/s, ese mismo día a las 1:40 pm el caudal registrado fue de -5.125 m³/s. Es decir, se registró una variación de más de 15.000 m³/s en 5 horas. En el modelo, el caudal a las 9:00 am es de 7.232 m³/s y a las 2:00 pm de -10.942 m³/s. La variación es de 18.000 m³/s en 5 horas.

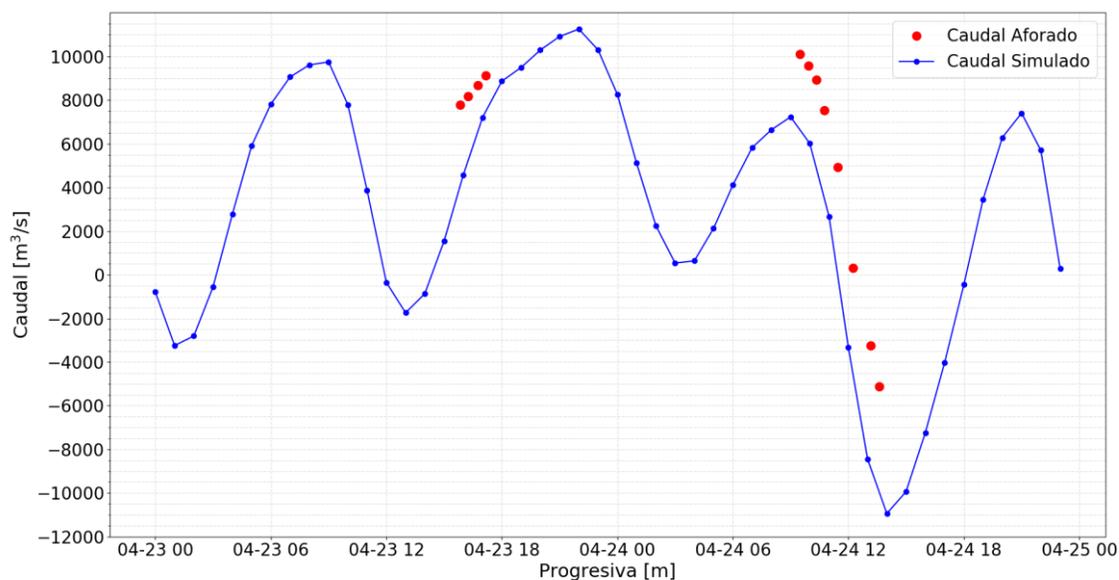


Figura 36 - Caudales simulados y aforados en Nueva Palmira

8.4. Validación – Áreas inundadas

Con el fin de validar espacialmente la performance del modelo, se realizó la comparación de áreas inundadas para el evento de crecida de diciembre 2015 - enero 2016. Para tal fin, se adquirieron imágenes Landsat8 correspondientes al 15 de enero de 2016 y se compararon con los resultados del modelo para la misma fecha.

Los resultados se presentan en las Figura 37 y 38, observándose una buena correspondencia.

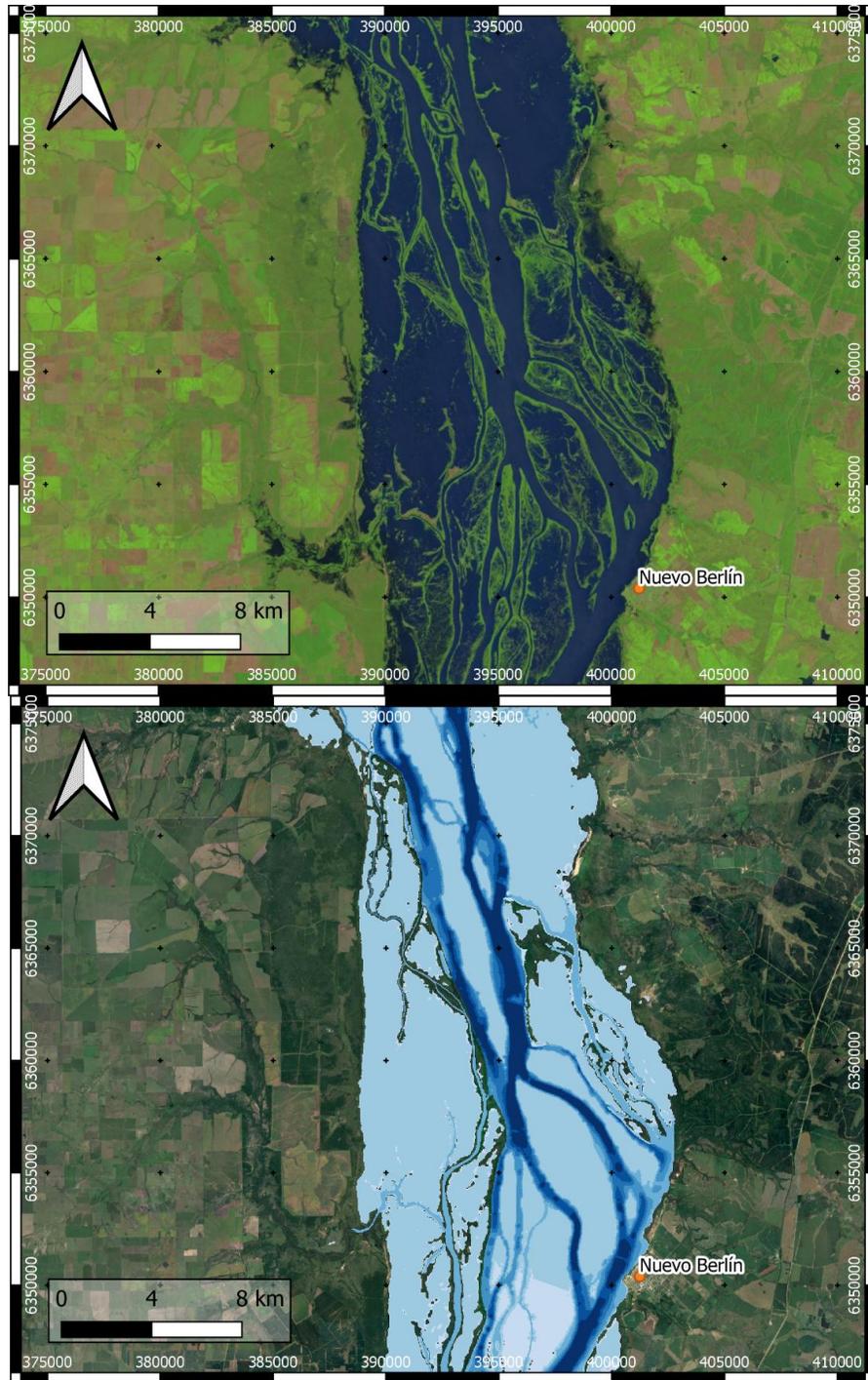


Figura 37 - Comparación de áreas inundadas simuladas y observadas para enero de 2016. Nuevo Berlín

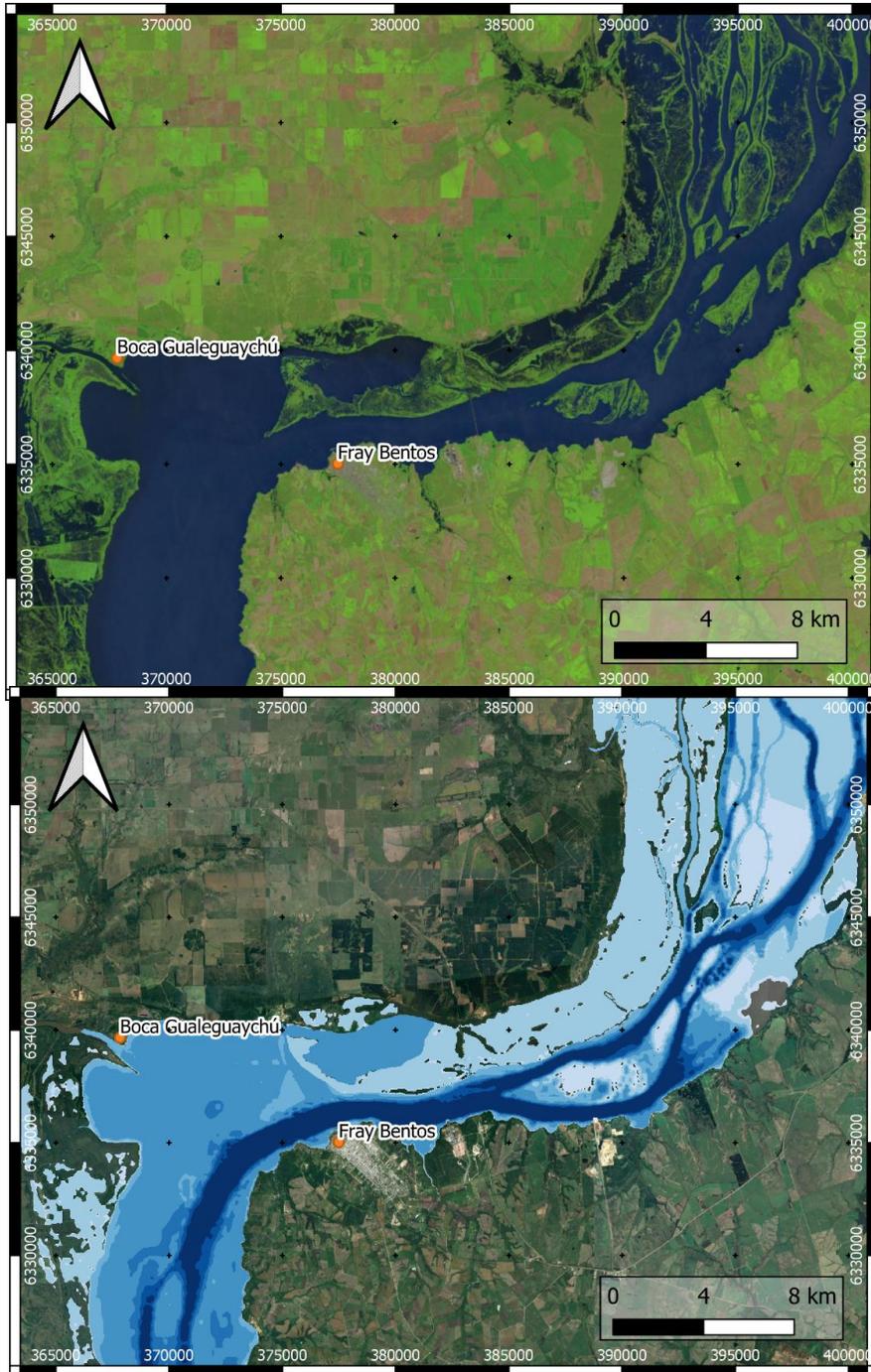


Figura 38 - Comparación de áreas inundadas simuladas y observadas para Enero de 2016. Gualeguaychú - Fray Bentos

9. Resultados de la modelación

Con el modelo calibrado con las series disponibles para el período octubre 2015 – noviembre 2019, se realiza una corrida larga desde el 1 de enero de 1995 hasta el 5 de agosto de 2019. En la estación hidrométrica de Concepción del Uruguay (Tabla 5) se dispone de una serie de niveles medidos para esta misma ventana temporal.

Red	Red Hidrometeorológica Nacional
Río	Uruguay
Estación	Concepción
Latitud	32° 28' 39,70"
Longitud	58° 13' 14,80"

Tabla 5 - Estación hidrométrica Concepción del Uruguay

En la Figura 39 se presentan los niveles simulados (línea azul) y los niveles medidos (puntos rojos) para esta estación.

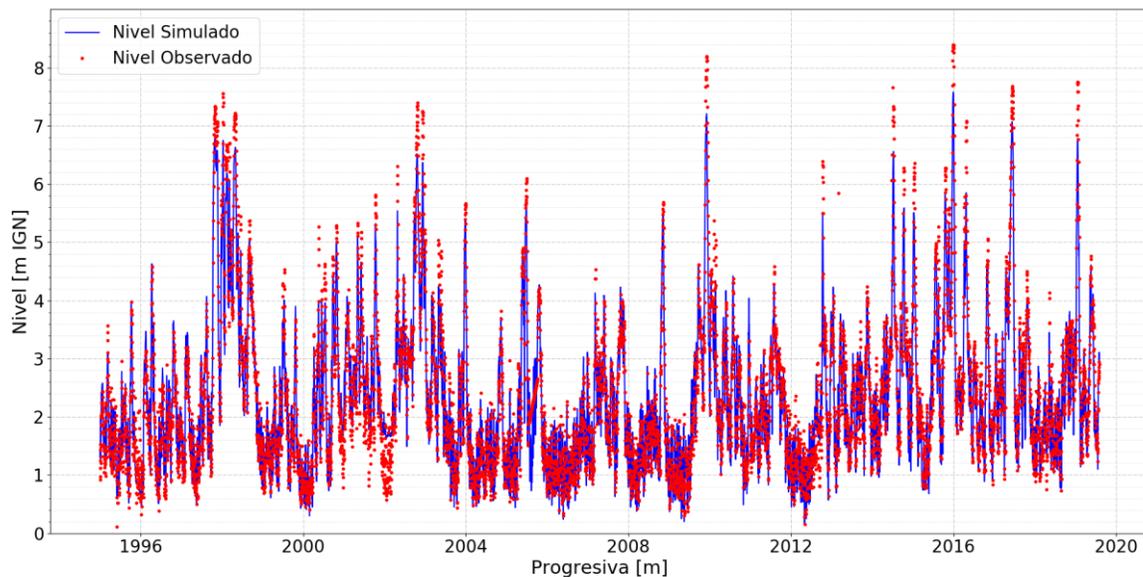


Figura 39 - Serie larga simulada en Concepción del Uruguay

Se vuelven a calcular los indicadores de calidad de ajuste (Tabla 6) para la serie completa y se obtienen los siguientes valores:

Estación	Concepción del Uruguay
Nash	90.99
Coef Corr	0.962
RMSE	0.38
SPEDS	68.8

Tabla 6 - Indicadores de calidad de ajuste

Las simulaciones que se obtienen se consideran satisfactorias en términos de correlación y fase entre series de descarga observadas y modeladas.

También, para esta estación se dispone de una serie de 182 aforos de altura y caudal líquido, desde 1993 hasta la actualidad, donde se registraron caudales entre 800 y 22.300 m³/s. La curva que relaciona altura y caudal (HQ) en una sección del cauce fluvial permite estimar un caudal a partir de un nivel medido. Esta curva se obtiene como producto de una serie de aforos.

Con las salidas del modelo (desde el 1 de enero de 1995 hasta el 5 de agosto de 2019) se construye la curva HQ simulada en la misma sección. En la Figura 40 se presenta la comparación entre las curvas altura caudal (HQ) simulada y observada. Se puede observar una buena correlación para los valores bajos y medios, mientras que se despegan para niveles mayores a 6 metros.

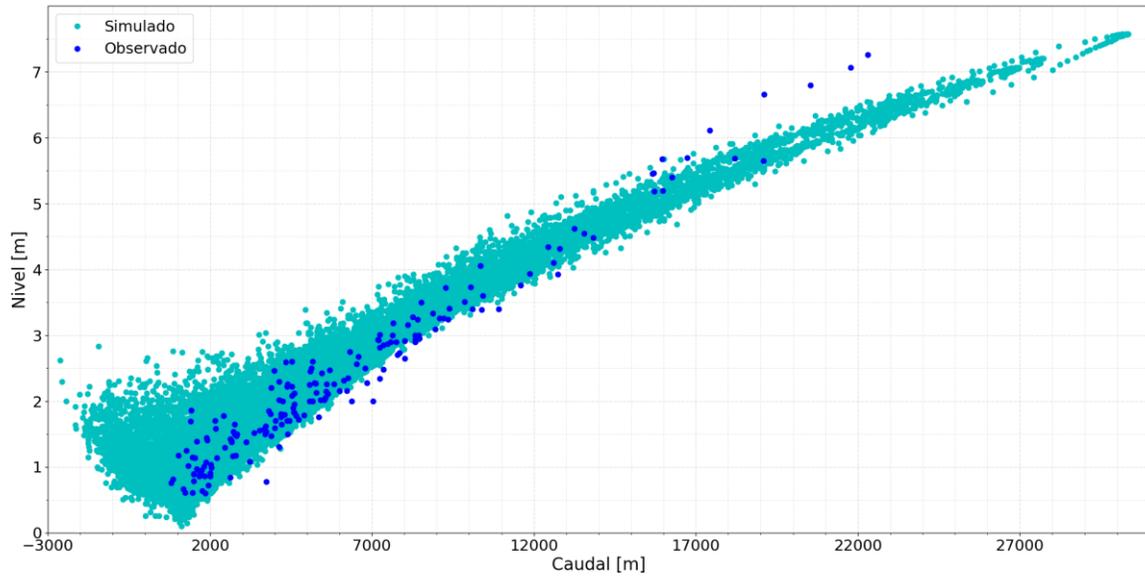


Figura 40 - Curva altura - caudal: series simulada y observada

En la Figura 41 se presenta un resumen del análisis para ésta sección. En la imagen central, se puede ver la curva HQ simulada. En la figura de la izquierda, las diferencias entre niveles simulados y observados para los niveles simulados. En la figura inferior, estas mismas diferencia pero en función de los caudales simulados. Por último, en la figura de la derecha, un corte de la sección transversal con un nivel de agua de 2 metros.

En esta figura se ve a partir de qué nivel y caudal aumentan las diferencias entre series observadas y simuladas. Al mismo tiempo, permite relacionar estas diferencias con la forma de la sección y vincularla con la influencia de la planicie de inundación sobre los niveles en crecida.

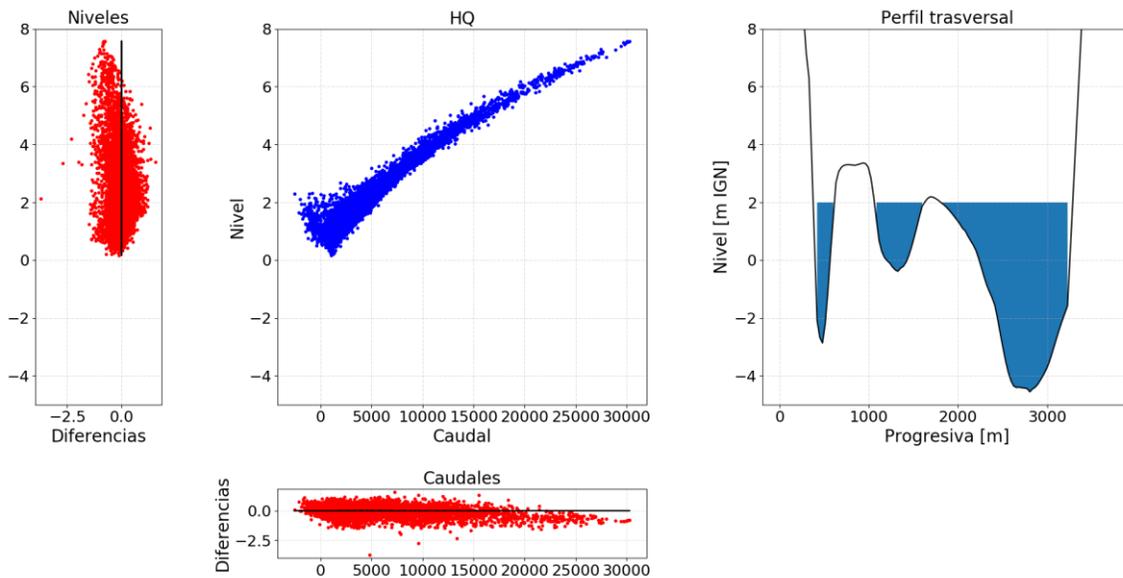


Figura 41 - Resumen estación Concepción del Uruguay

Estas mismas figuras se pueden realizar para cada estación donde se disponga de una serie de niveles observados. Permitiendo aumentar el grado de comprensión sobre el comportamiento del río y el grado de confianza sobre los resultados del modelo en relación al estado del río y su vinculación con los niveles de Alerta y Evacuación.

9.1. Diagrama de caja

Para presentar gráficamente las series simuladas en cada estación se utiliza el diagrama de caja. Este diagrama describe variables características como la dispersión y la simetría. Permite visualizar la mediana; los cuartiles 0.25, 0.75 en los extremos de la caja celeste; los cuartiles 0.1, 0.9 en los extremos de los 'bigotes' y los máximos y mínimos extremos registrados en los puntos blancos. El tamaño de la caja representa el rango intercuartílico $IQR = (Q_{0.75} - Q_{0.25})$ de cada serie.

Para obtener las series de niveles y caudales de cada estación, se simula desde el 1 de enero de 1995 hasta el 5 de agosto de 2019 utilizando el modelo previamente calibrado. En la Figura 42 se presentan los gráficos de caja para los niveles (m IGN) de cada estación y en la Figura 43 los gráficos para los caudales (m^3/s).

En la Figura 43 se puede observar el efecto de la marea sobre los valores mínimos de caudales. Este efecto va perdiendo influencia a medida que asciende aguas arriba. El modelo registra caudales negativos (reversión del flujo) hasta Colón (Entre Ríos, Argentina), localidad que se encuentra 216 km aguas arriba de la confluencia del río Uruguay con el río

de la Plata. En cambio, los valores característicos medios y máximos de los caudales se mantienen relativamente constantes a lo largo del tramo estudiado.

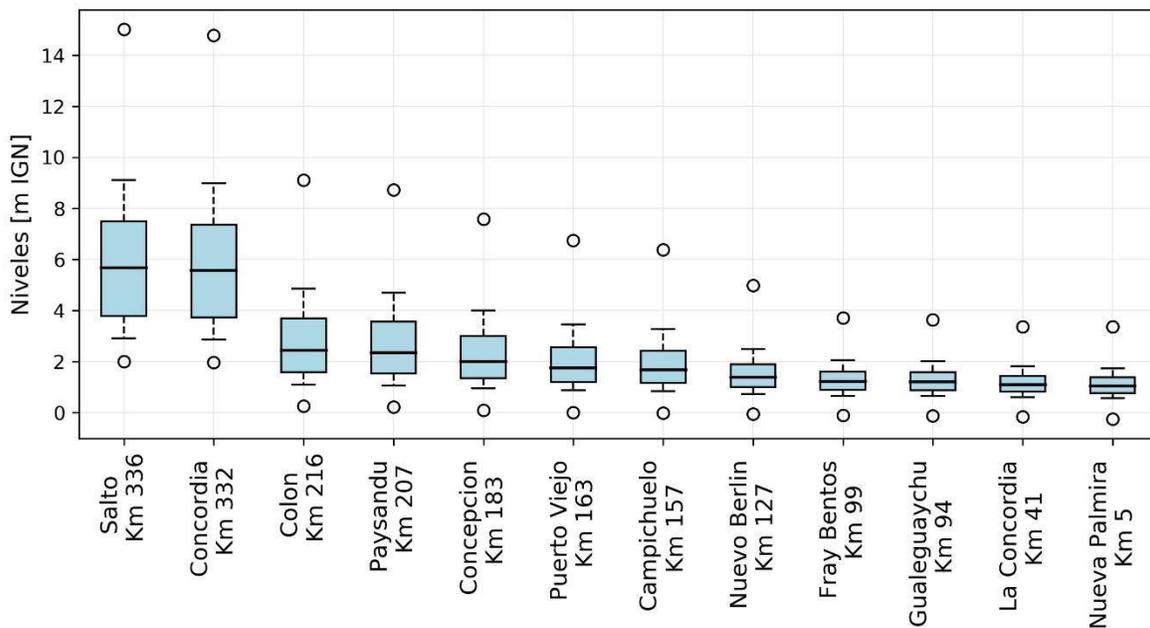


Figura 42 - Estadística descriptiva de niveles

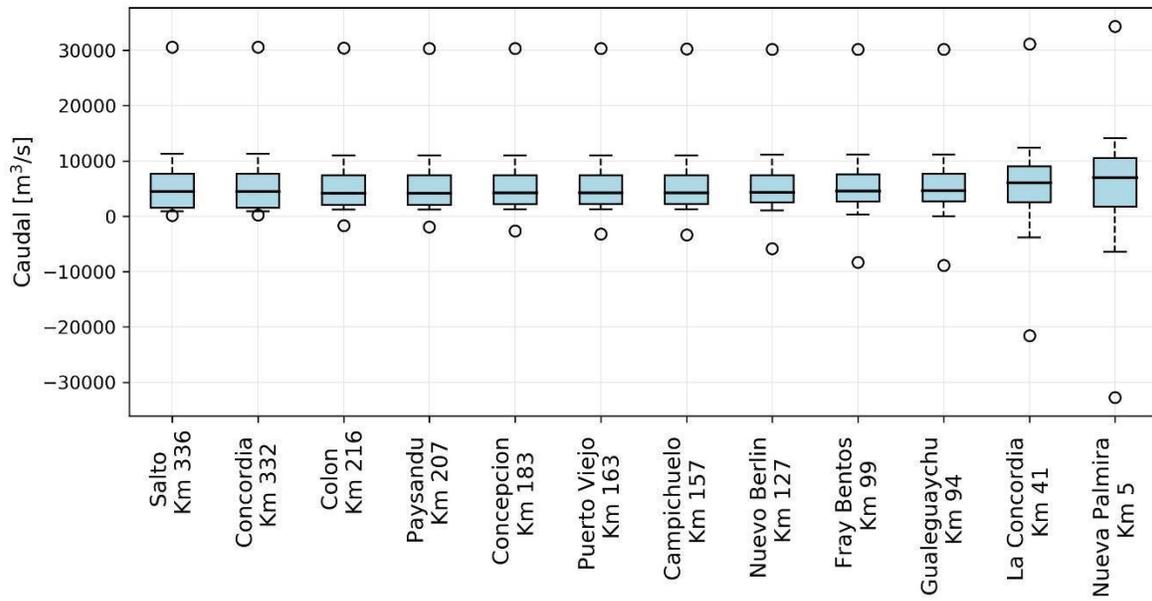


Figura 43 - Estadística descriptiva de caudales

9.2. Curvas de permanencia de niveles y caudales

La curva de duración o permanencia representa la cantidad de veces que se igualó o superó determinado nivel o caudal. Además, indica el valor del caudal en función de la frecuencia de su ocurrencia.

En base a las salidas del modelo, desde el 1 de enero de 1995 hasta el 5 de agosto de 2019, se construyen las curvas de permanencia para cada una de las estaciones a lo largo del tramo modelado. Las mismas se presentan en el *Anexo III: Curvas de Permanencia de Niveles y Caudales*. En las Tabla 7 y 8 se detallan los valores característicos de niveles y caudales para cada estación.

Estación	Mínimo Absoluto	Mínimo Característico	Semi Permanente	Máximo Característico	Máximo Absoluto	Alerta	Evacuación
Salto	0.65	1.38	4.36	9.28	13.69	10.00	12.00
Concordia	0.66	1.35	4.28	9.15	13.49	11.00	12.50
Colón	0.49	1.17	2.73	6.19	9.37	7.10	7.90
Paysandú	0.13	0.84	2.33	5.67	8.69	3.00	5.85
Concepción del Uruguay	0.44	1.16	2.38	5.27	7.96	5.30	6.30
Puerto Viejo	-0.01	0.71	1.76	4.3	6.74		
Campichuelo	0.37	1.09	2.08	4.46	6.78	5.30	6.30
Nuevo Berlín	0.27	0.96	1.76	3.5	5.35		
Fray Bentos	0.02	0.68	1.36	2.56	3.86		
Gualeguaychú	0.3	0.96	1.63	2.79	4.1	2.9	3.10
La Concordia	0.01	0.67	1.27	2.29	3.64		

Tabla 7 - Niveles característicos referidos al cero local

Estación	Mínimo Absoluto	Mínimo Característico	Semi Permanente	Máximo Característico	Máximo Absoluto
Salto	122.6	653.4	4464.32	15028.39	30592.72
Concordia	165.69	673.32	4445.05	15027.06	30588.42
Colón	-1771.38	843.21	4227.08	14989.03	30412
Paysandú	-1949.13	830.09	4232.23	14984.99	30400.71
Concepción del Uruguay	-2676.45	663.36	4239.58	14973.26	30361.09
Puerto Viejo	-3239.26	423.81	4253.88	14952.83	30317.09
Campichuelo	-3449.62	331.55	4260.15	14943.77	30298.39
Nuevo Berlín	-6017.45	-532.97	4353.18	14871.88	30208.86
Fray Bentos	-8292.69	-1423.36	4562.28	14899.65	30204.69
Gualedguaychú	-8886.62	-1878.77	4679.46	14904.9	30227.62
La Concordia	-21917.54	-7559.3	6172.82	15599.09	36562.29

Tabla 8 - Caudales característicos

10. Conclusiones

Se construyó un modelo hidrodinámico operativo, actualizado y calibrado para el pronóstico de niveles y caudal en el río Uruguay. A partir de la construcción de la geometría del modelo se obtuvo una base de datos georreferenciados con precisión de sus secciones, las escalas hidrométricas, las márgenes y el eje del río Uruguay. En el desarrollo de las tareas de modelación expuestas en el presente trabajo, se destacan:

- Si bien el modelo digital de elevación fue construido con la última información disponible de libre acceso y su calidad es aceptable, en el transcurso del estudio se detectó que la relación antecedente entre planos de referencia MOP e IGN no serían válidas para esta zona. Siendo aproximadamente 80cm la diferencia entre los planos. Esto obliga, en una etapa posterior, a revisar el MDE y consecuentemente el modelo hidrodinámico.
- Un aspecto importante para lograr una adecuada calibración del modelo fue contar con series de datos de entrada al modelo (caudal y altura) a paso horario, que permitieran representar las operaciones intradiarias de Salto Grande y la onda de marea del río de la Plata.
- Así mismo, contar con los valores correctos de ceros de escala es fundamental, por lo que se realizó entre el INA y CARU una campaña de relevamiento, la cual permitió actualizar la información de 5 escalas.
- A pesar de dudas sobre el MDE expuestas anteriormente, los resultados globales de calibración fueron satisfactorios obteniéndose índices de Nash y coeficientes de correlación superiores a 75 y 0.95 respectivamente. En relación al RMSE, se observa que los mayores errores se ubican aguas arriba con valores de hasta 1m, esto puede deberse a la calidad del MDE en esa zona y su deficiencia al representar los saltos batimétricos característicos de la zona de Concordia-Salto. Hacia aguas abajo el RMSE varía entre 0.2m y 0.5m, disminuyendo hacia la desembocadura en el río de la Plata, donde la influencia de la onda de marea condiciona el comportamiento fluvial.
- En relación a la influencia del comportamiento del estuario sobre el río Uruguay, se compararon los resultados del modelo con aforos realizados conjuntamente entre el INA y CARU en la zona próxima a Nueva Palmira. Allí se observa que si bien existe un desfase en el valor de caudal registrado y simulado, el comportamiento y las variaciones (amplitud) de caudales son correctamente representados por el modelo. Siendo este punto un aspecto a profundizar en futuras campañas aforo y tareas de modelación.

- En la comparación de los resultados simulados para la crecida de 2015-2016, se observa que espacialmente el modelo representa adecuadamente las áreas inundadas, en una comparación con datos de sensores remotos (Landsat8).
- De la explotación del modelo sobre una ventana de 25 años, se pudo validar la adecuada performance del modelo con datos observados en Concepción del Uruguay donde el RMSE se mantiene en el orden de los 0.4m. En esa misma ubicación se cuenta con una curva Altura-Caudal, la cual fue comparada con la simulada y se observa que las mayores diferencias se tienen en estados del río de crecida. Este patrón es común al resto de las estaciones y podría atribuirse en parte a la calidad del MDE, pero también al hecho de que en esta instancia no han sido incluidos los aportes en ruta en el tramos modelado.
- En un análisis estadístico de los resultados de la simulación larga, se observa hasta donde penetra en el río Uruguay la influencia de la onda de marea del río de la Plata con reversiones de flujo hasta 216km aguas arriba de la desembocadura.

A futuro se sugiere actualizar y completar la geometría con mejor información batimétrica tanto del cauce como de la planicie de inundación y verificar el nivel de referencia de las estaciones no relevadas sobre el cauce principal. Con las estaciones faltantes se podrá generar nuevamente el plano de referencia sobre el cual se monta el modelo.

Actualmente, el cauce del modelo tiene una única rama pero, dadas las características del tramo medio y la calidad del modelo topo-batimétrico se podría aumentar el número de ramas mediante una condición interna de contorno. De esta forma será posible obtener una optimización del flujo por cada rama. Otra posibilidad es modelar una parte del tramo de estudio de forma bidimensional, quedando el resto de carácter unidimensional.

Otras tareas relevantes para seguir avanzando en la modelación es cuantificar los aportes laterales en el tramo estudiado, es decir, construir los modelos hidrológicos para cada una de las principales subcuencas e incorporarlos al modelo hidrodinámico como aportes puntuales.

Referencias

- B. Wessel (2018). "TanDEM-X Ground Segment – DEM Products Specification Document", EOC, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany, Public Document TD-GS-PS-0021, Issue 3.2. <https://tandemx-science.dlr.de/>
- Piñón, D. A., Zhang, K., Wu, S., & Cimbaro, S. R. (2017). "A New Argentinean Gravimetric Geoid Model: GEOIDEAR", en *International Symposium on Earth and Environmental Sciences for Future Generations*, pp. 53-62. <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Geoide-Ar16>
- IGN (2017). *Curso de capacitación en Geodesia Satelital*. Instituto Geográfico Nacional, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Casterá, M. (2015). *Modelación numérica del transporte de efluentes en un curso fluvial: caso Río Uruguay*. Tesis de maestría. Universidad de la República (Uruguay), Facultad de Ingeniería.
- Guizzardi, S., & Gerbec, M. S. (2017). *Modelación Hidrológica e Hidrodinámica del Río Uruguay*. Trabajo Profesional de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.
- Samuels, P. G. (1990). *Cross section location in one-dimensional models*. White, W. R. (Ed.): International Conference on River Flood Hydraulics: pp. 339-350, John Wiley, Chichester.
- White, W. R. (Ed.) (1990): *International Conference on River Flood Hydraulics*. John Wiley, Chichester, pp. 339-350.
- Sánchez, F. J., & Lastra, J. (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- INA (2020). *Campaña topográfica de escalas hidrométricas sobre el río Uruguay 25 y 26 de septiembre de 2019*. Informe LHA 05-373-20. 2020.
- INA (2020). *Campaña de Aforos en la desembocadura del río Uruguay*. Informe LHA 06-373-20. 2020.
- Junes, R., (2019) *Capacidad de transporte de sedimentos en el canal de navegación del río Uruguay a partir de datos de campo y modelación hidrodinámica*. VI Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica. Paysandú, República Oriental del Uruguay, junio 2019.

Anexo I: Perfiles transversales

Perfiles transversales en los principales centro poblados.

Los perfiles en Salto y Concordia, aguas debajo de Salto Grande, presentan un cauce principal centrado, con talweg entre cotas -4 y -7m IGN.

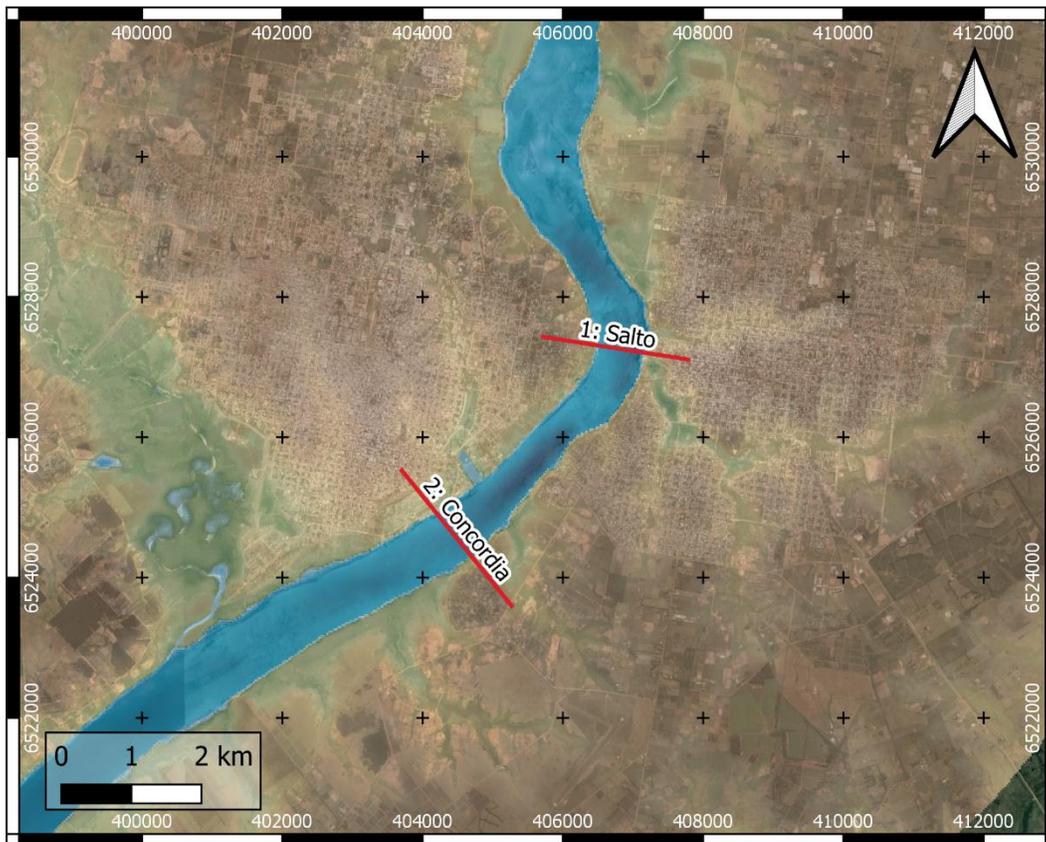


Figura 44 - Perfiles en Salto y Concordia: Planta

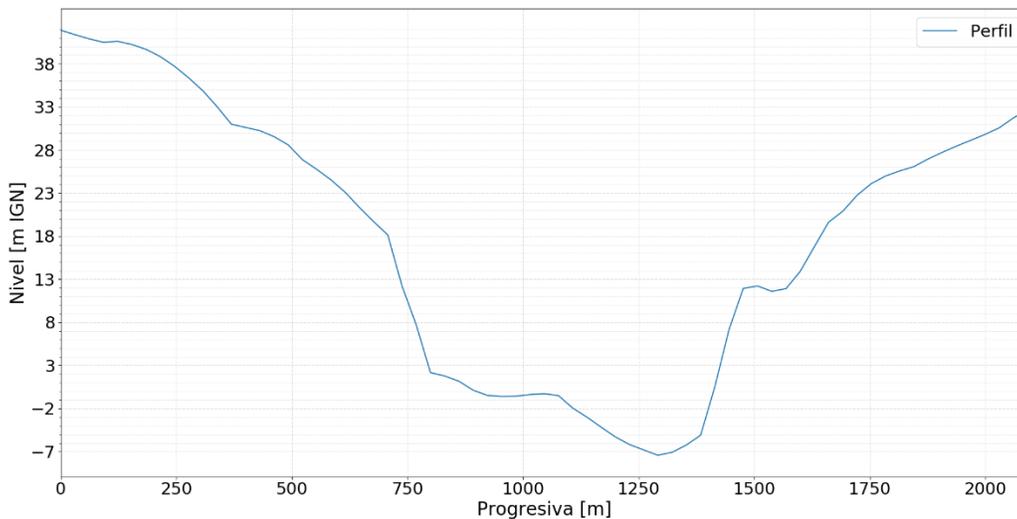


Figura 45 - Perfil transversal en Salto: Corte

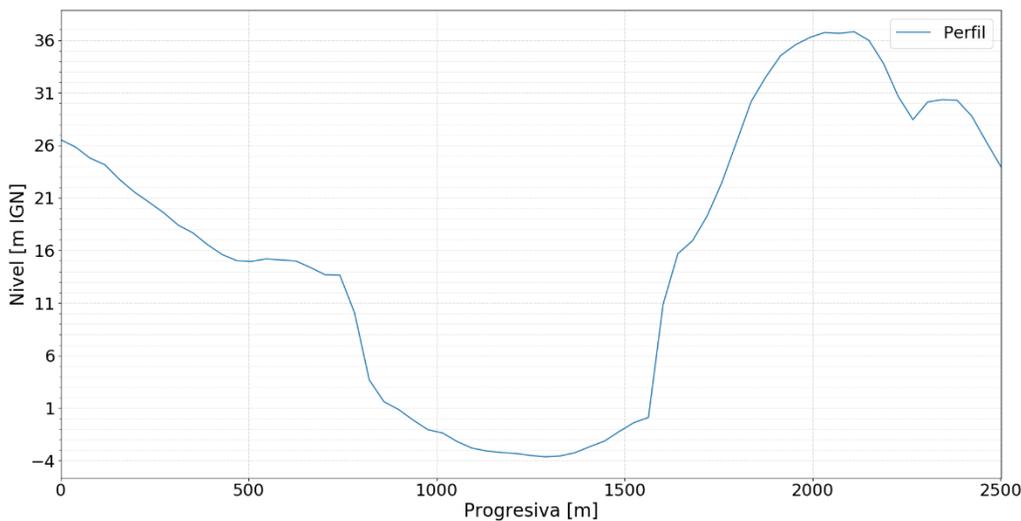


Figura 46 - Perfil transversal en Concordia: Corte

En el tramo próximo al enlace entre Colón y Paisandú, el cauce principal presenta islas (Figura 47).

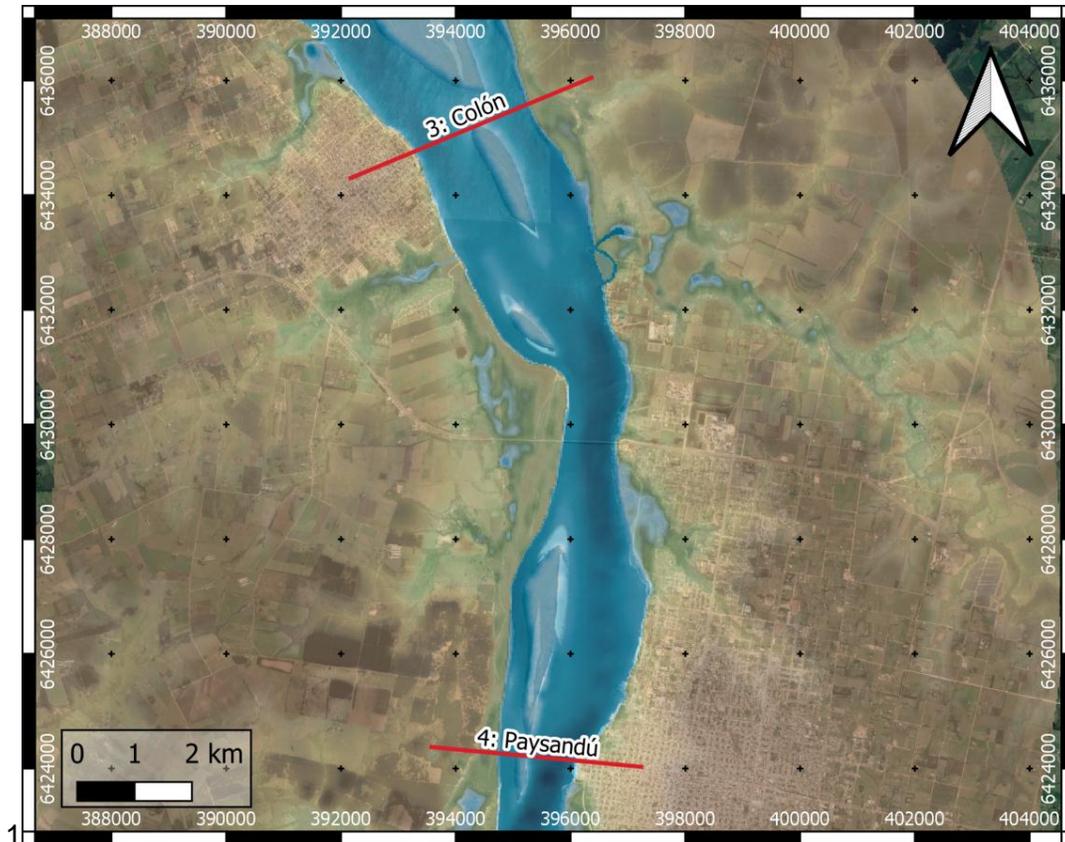


Figura 47 - Perfiles en Colón y Paysandú: Planta

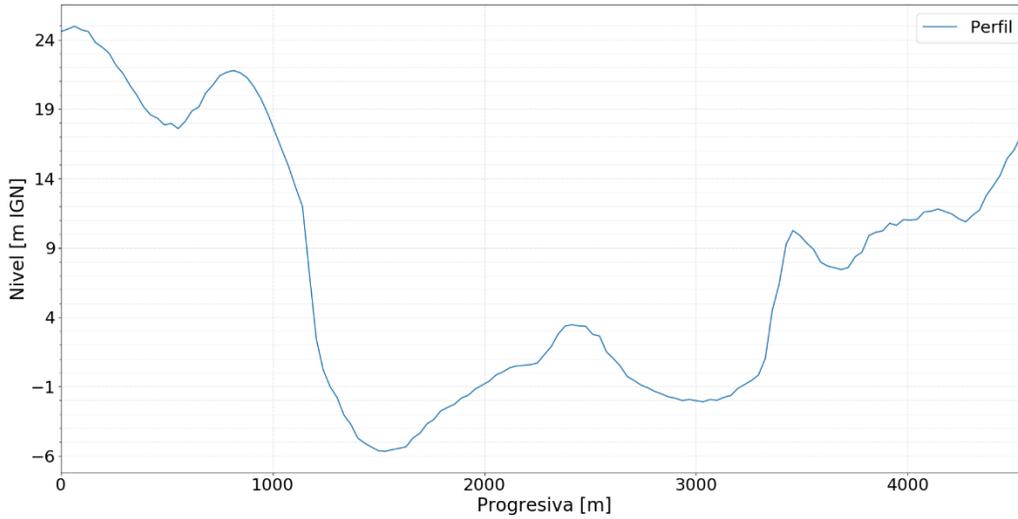


Figura 48 - Perfil transversal en Colón: Corte

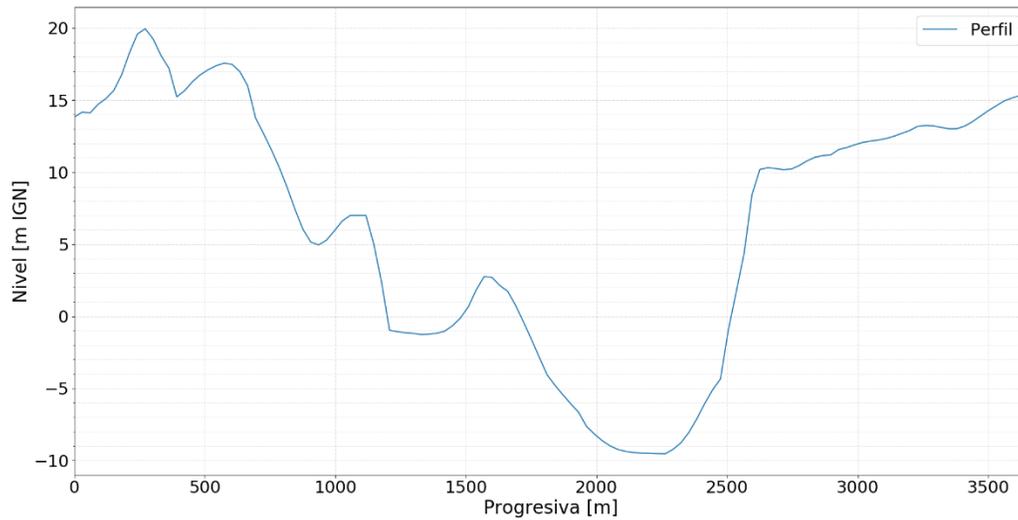


Figura 49 - Perfil transversal en Paysandú: Corte



Figura 50 - Perfil en Concepción del Uruguay

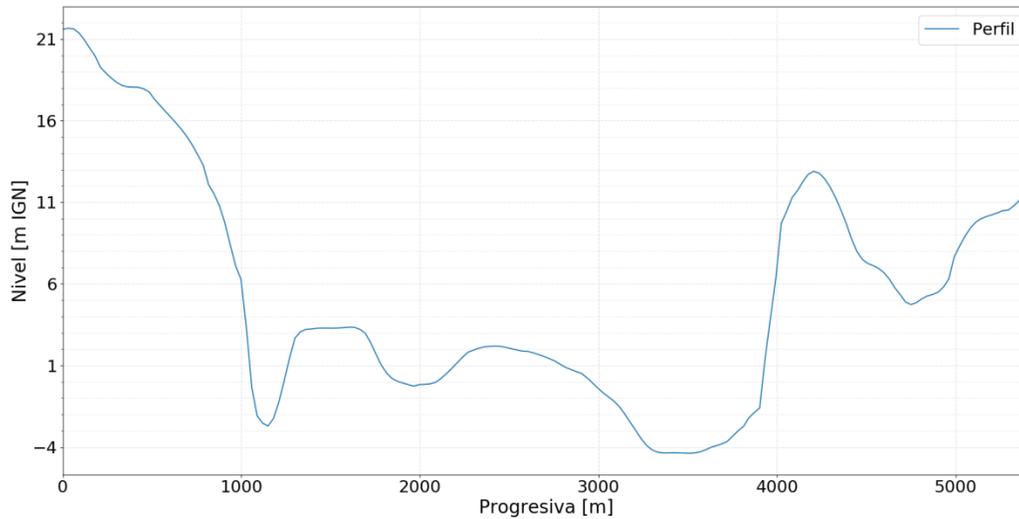


Figura 51 - Perfil transversal en Concepción del Uruguay

Los perfiles de Puerto Viejo y Campichuelo presentados en la Figura 52 muestran los cursos principales del Uruguay en el tramo, faltando detalle en brazos menores en zona de islas.

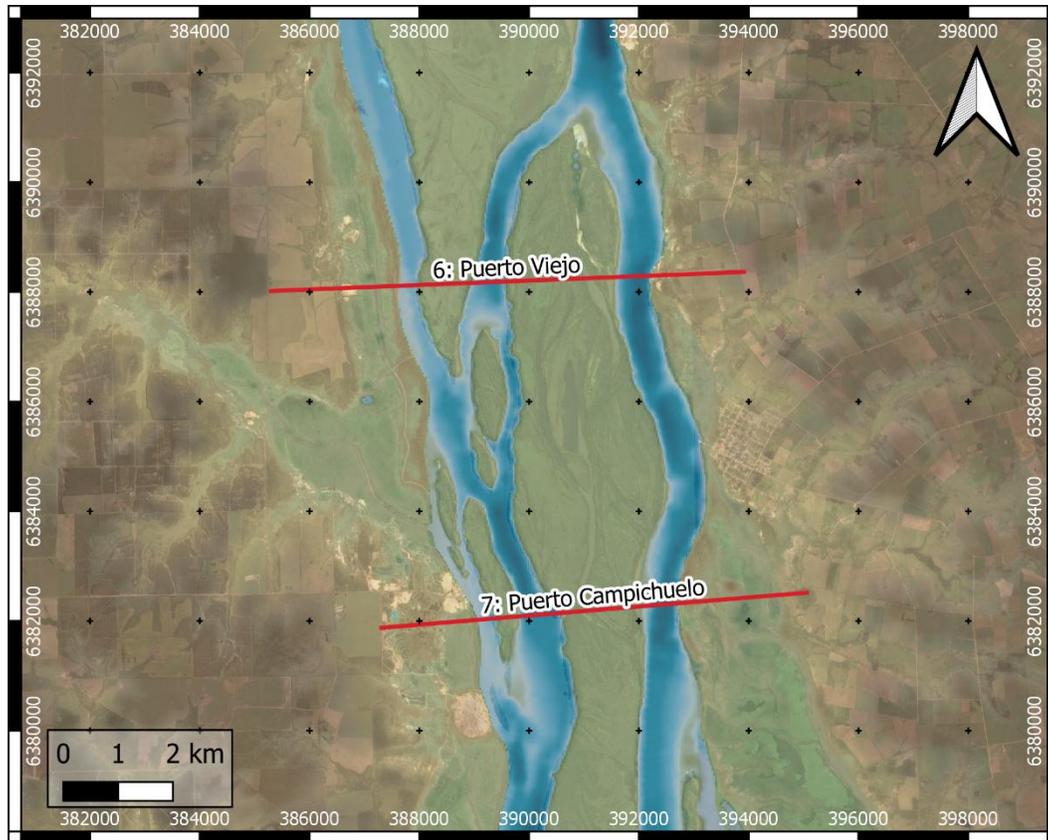


Figura 52 - Perfiles en Puerto Viejo y Puerto Campichuelo: Planta

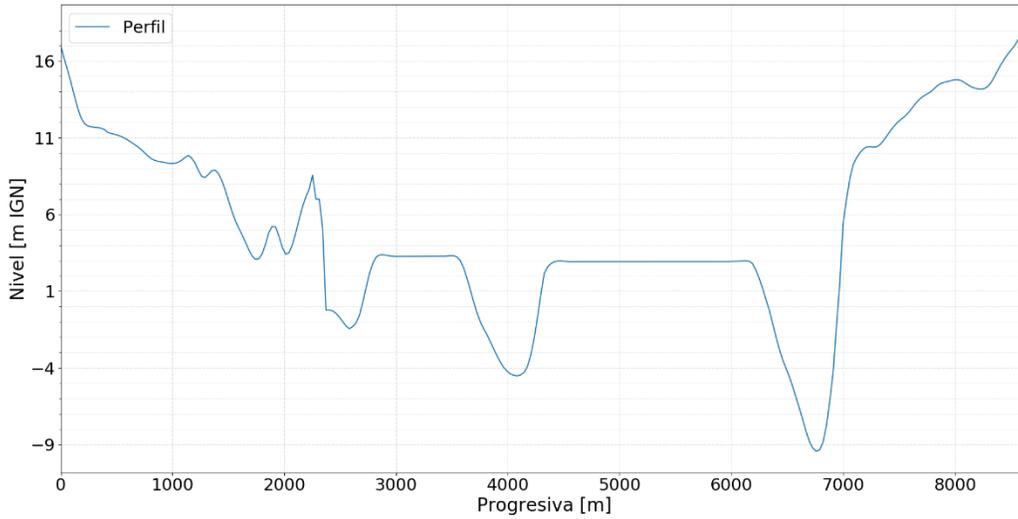


Figura 53 - Perfil transversal en Puerto Viejo: Corte

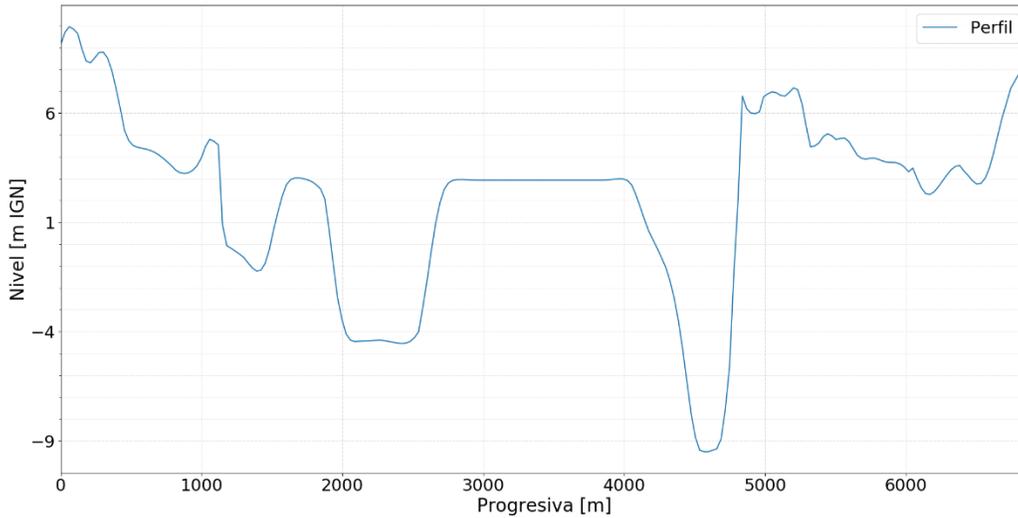


Figura 54 - Perfil transversal en Campichuelo: Corte



Figura 55 - Perfil en Nuevo Berlín: Planta

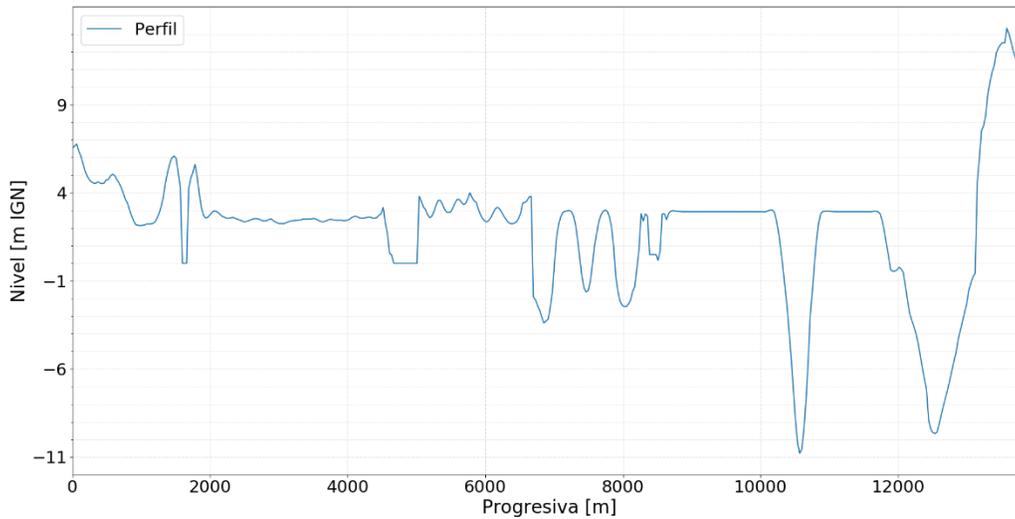


Figura 56 - Perfil transversal Nuevo Berlin: Corte

Las secciones de Gualeguaychú y Fray Bentos presentan nuevamente un cauce principal y único. Esta característica se repite en la sección de descarga hacia el Río de la Plata, próxima a Nueva Palmira. Esta característica se ve solo interrumpida por un ensanchamiento del río en el tramo inferior como se observa en el perfil de la Concordia.

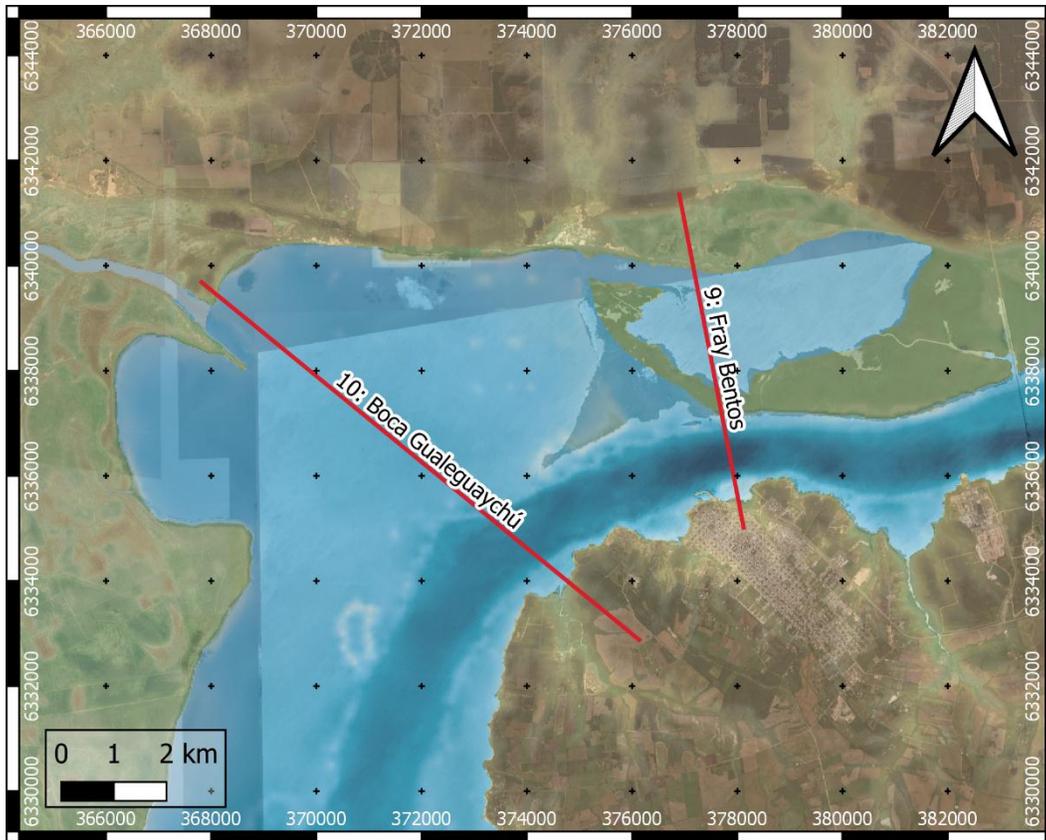


Figura 57 - Perfiles en Fray Bentos y Boca del Gualeguaychú: Planta

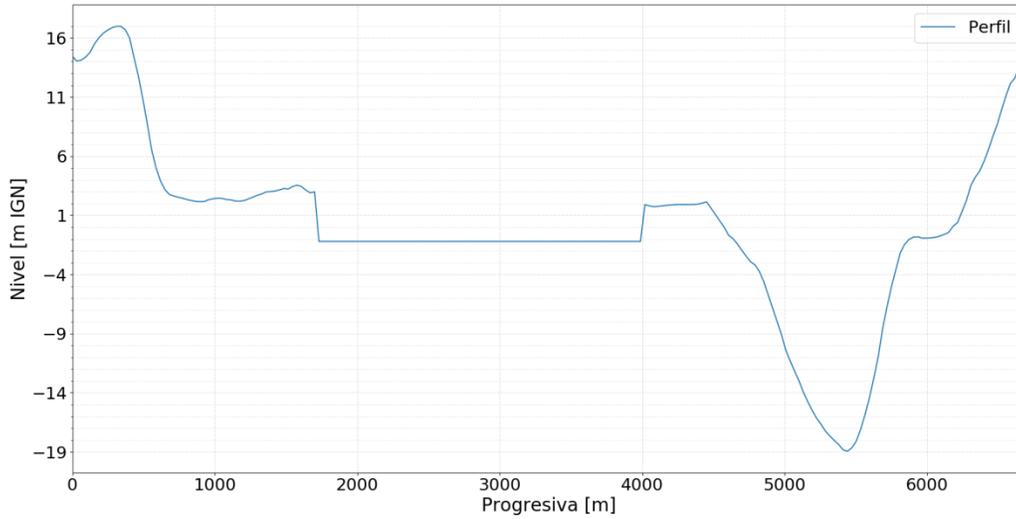


Figura 58 - Perfil transversal en Fray Bentos: Corte

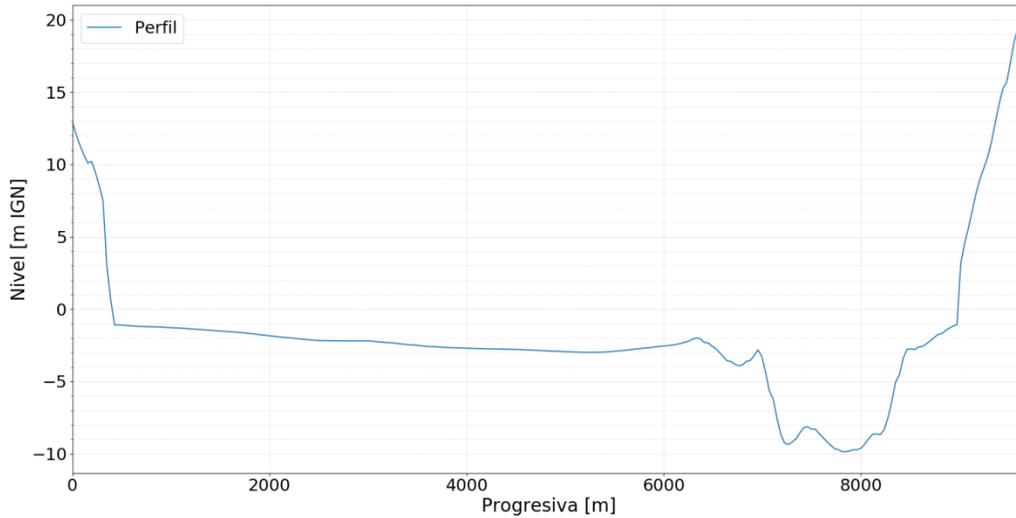


Figura 59 - Perfil transversal en Boca del Gualeguaychú: Corte



Figura 60 - Perfil en La Concordia: Planta

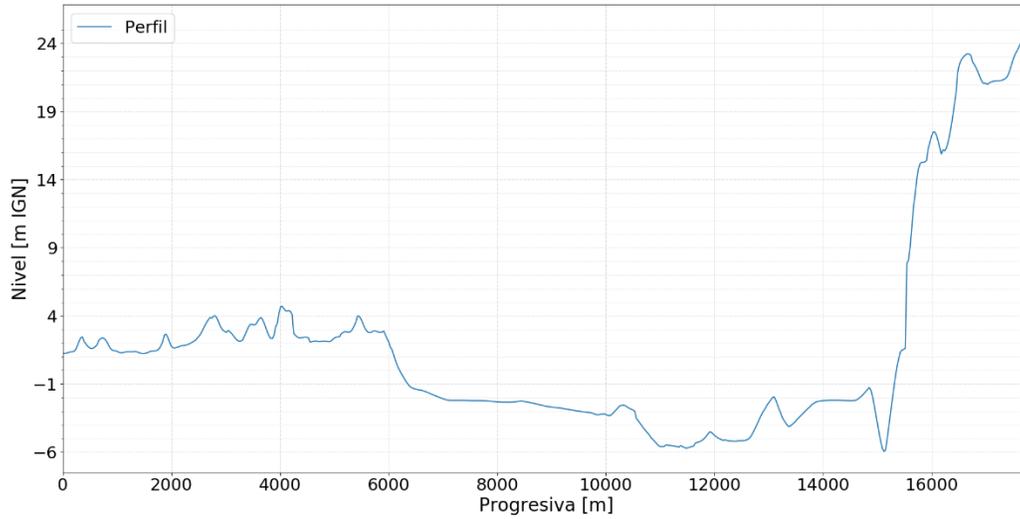


Figura 61 - Perfil transversal en La Concordia: Corte



Figura 62 - Perfil en Nueva Palmira: Planta

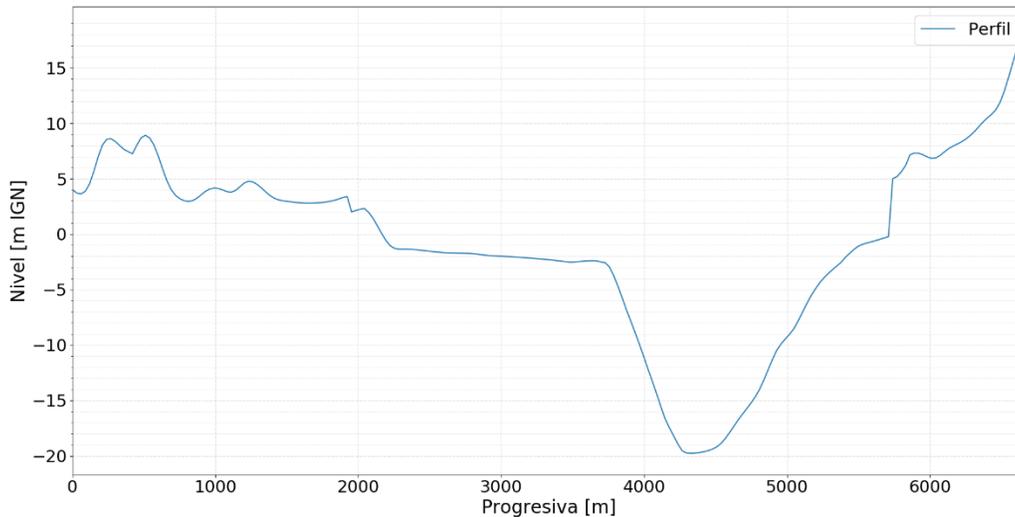


Figura 63 - Perfil transversal en Nueva Palmira: Corte

Anexo II: Indicadores de la calidad del ajuste

La calidad del ajuste se puede evaluar mediante distintos indicadores que agregan los errores de simulación. Tanto para el modelo hidrológico como el hidrodinámico, la verificación de la bondad del ajuste de sus respectivos parámetros se realiza mediante los siguientes indicadores: Nash-Sutcliffe (E), coeficiente de correlación (r), error cuadrático medio (RMSE), Simetría Direccional Especial (SPEDS) y el error volumétrico. (García et al. 2014).

Nash-Sutcliffe (E): Los criterios de eficiencia que expresan la precisión del modelo están generalmente vinculados con la función objetivo utilizada en la calibración para la optimización de parámetros. Una función objetivo comúnmente utilizada es la suma de los cuadrados de las diferencias entre las descargas observadas y simuladas. Esta suma tomada a lo largo de todo el período de calibración, es decir:

$$F = \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2 \quad [F] = (L^3 \cdot T^{-1})^2$$

donde n es el número de pasos de tiempo del período de calibración de parámetros, i es el índice de tiempo tal que $i = 1..n$, $Q_{obs,i}$ y $Q_{sim,i}$ son las descargas observadas y simuladas en el tiempo i, y F es la función objetivo. La cantidad F es un índice de error residual que refleja la medida en que un modelo tiene éxito en la reproducción de los caudales observados. Entonces, la calibración consiste en encontrar el conjunto de parámetros del modelo que minimiza el valor de esta función. F claramente no es adimensional; tiene las

dimensiones de la descarga cuadrada. Como tal, sólo es útil para la comparación de los diferentes modelos de rendimiento en la misma cuenca y con las mismas longitudes de registro. Esta restricción fue superada por Nash y Sutcliffe, que definieron la eficiencia del modelo E. Este coeficiente, ampliamente utilizado para evaluar el rendimiento de los modelos hidrológicos, calcula la proporción de la varianza inicial F_0 explicada por el coeficiente F definido anteriormente. La varianza inicial se calcula como:

$$F_0 = \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q})^2 \quad [F] = (L^3 \cdot T^{-1})^2$$

donde \bar{Q} es el promedio de la serie de descarga a lo largo del período de calibración (de longitud n) y las otras variables son como se definió previamente. Por lo tanto, el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe se calcula como la reducción proporcional de la varianza inicial por medio del modelo, tal que:

$$E = \frac{F_0 - F}{F_0} \quad [E] = 1$$

Este coeficiente es adimensional y oscila desde menos infinito (modelo pobre) a uno (modelo perfecto). Un valor unitario de E significa un rendimiento perfecto. Un valor de cero indica que la media (\bar{Q}) es un predictor tan bueno como el modelo, mientras que los valores negativos indican que la media es un mejor predictor que el propio modelo. El coeficiente E, cuando se aplica en el período de calibración, es idéntico al Coeficiente de Determinación y varía entre cero y uno. Sin embargo, cuando se aplica en el período de verificación, la varianza inicial debe calcularse todavía para el período de calibración, es decir, calculada con la definida anteriormente. Es aquí cuando E puede tomar valores negativos.

Coeficiente de correlación (r): una indicación del grado de dependencia lineal entre la serie observada y la serie modelada, tal que:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}) \cdot (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{(n-1) \cdot S_{Q_{obs}} \cdot S_{Q_{sim}}} \quad [r] = 1$$

donde n es el número de pasos de tiempo del período de simulación, i es el índice de tiempo tal que $i = 1..n$, $Q_{obs,i}$ y $Q_{sim,i}$ son las descargas observadas y simuladas en el paso i, \bar{Q}_{obs} y \bar{Q}_{sim} son las descargas medias simuladas y observadas, y $S_{Q_{obs}}$ y $S_{Q_{sim}}$ sus desviaciones estándar.

Error cuadrático medio (RMSE): este indicador establece cuán alejados están los puntos en el plano Q_{obs} vrs Q_{sim} de una recta de pendiente unitaria que pasa por el origen.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{n}} \quad [RMSE] = L^3 T^{-1}$$

Donde n es el número de etapas de tiempo del período de simulación, i es el índice de tiempo tal que, y $Q_{obs,i}$ y $Q_{sim,i}$ son las descargas observadas y simuladas en el paso i.

Simetría Direccional Especial (SPEDS): El otro indicador que fue utilizado es el SPEDS, que da una idea de en qué medida los valores observados y simulados de la variable varían con igual signo y, por tanto, mide la calidad de la puesta en fase.

El SPEDS brinda valores entre 0 y 100, indicando este último valor que en todos los pasos las variables observadas y simuladas varían con el mismo signo.

La calibración debe apuntar a la obtención de un valor lo más cercano posible a 100.

$$SPEDS = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N b_i$$

Con:

$$b_i = 1 \quad \text{si} \quad (Q_{obs,i} - Q_{obs,i-1}) \cdot (Q_{sim,i} - Q_{sim,i-1}) \geq 0$$

$$b_i = 0 \quad \text{en otro caso}$$

donde N es el número total de pasos en el período de simulación, i varía de 1 a N, $Q_{obs,i}$ y $Q_{sim,i}$ son los valores observados y simulados de los caudales, respectivamente, en el paso i.

Anexo III: Curvas de Permanencia de Niveles y Caudales

Niveles:

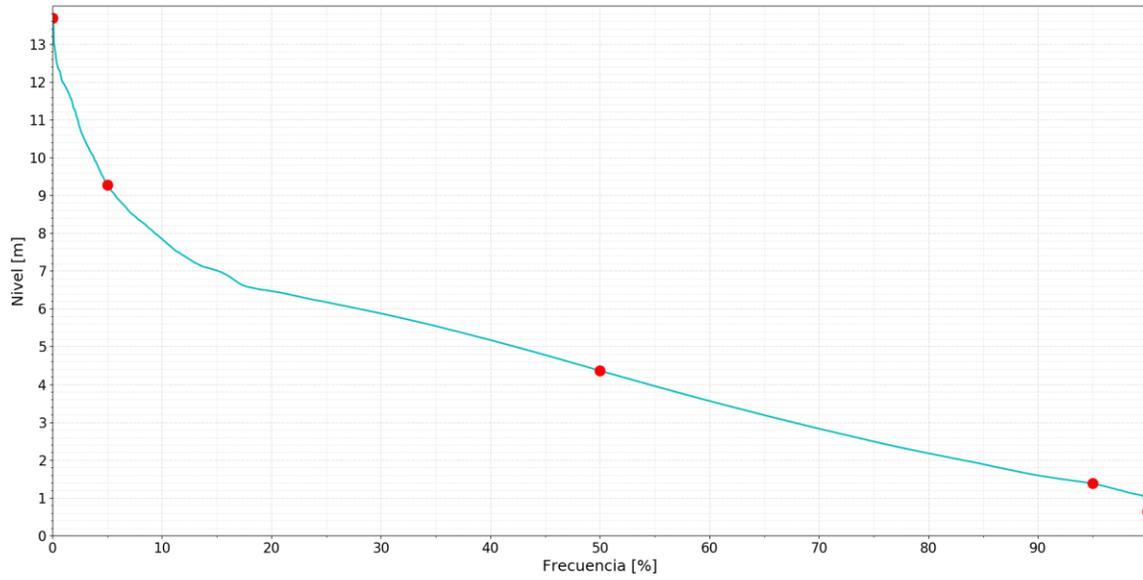


Figura 64 - Salto

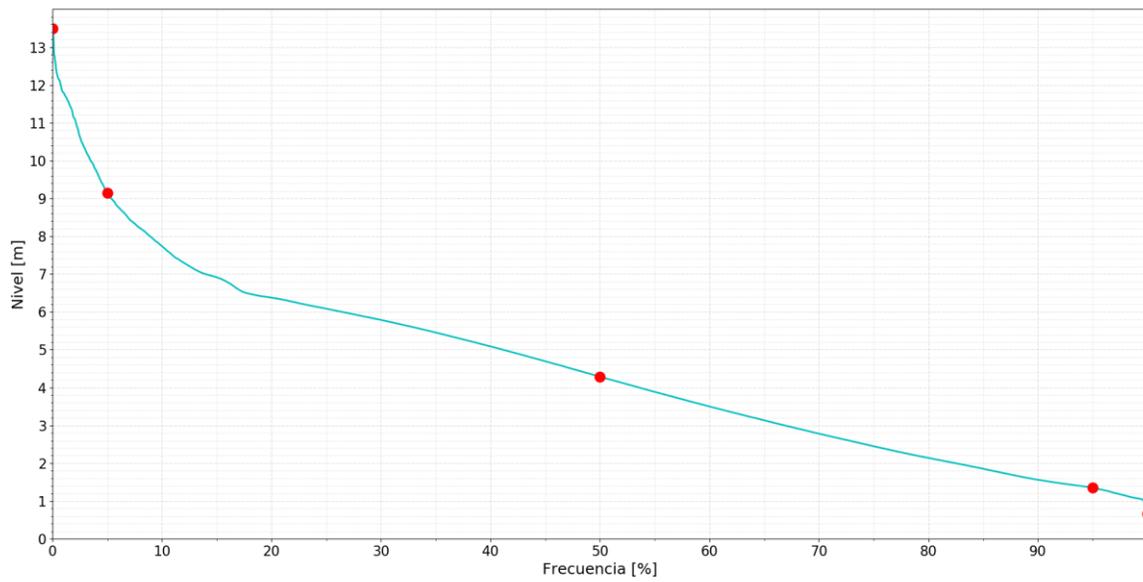


Figura 65 - Concordia

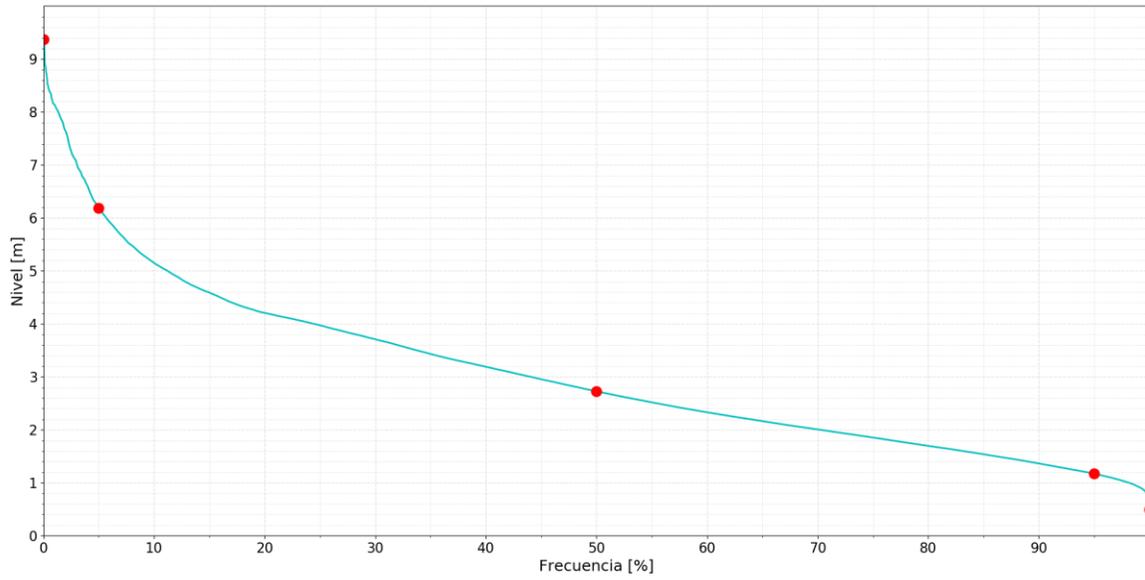


Figura 66 - Colón

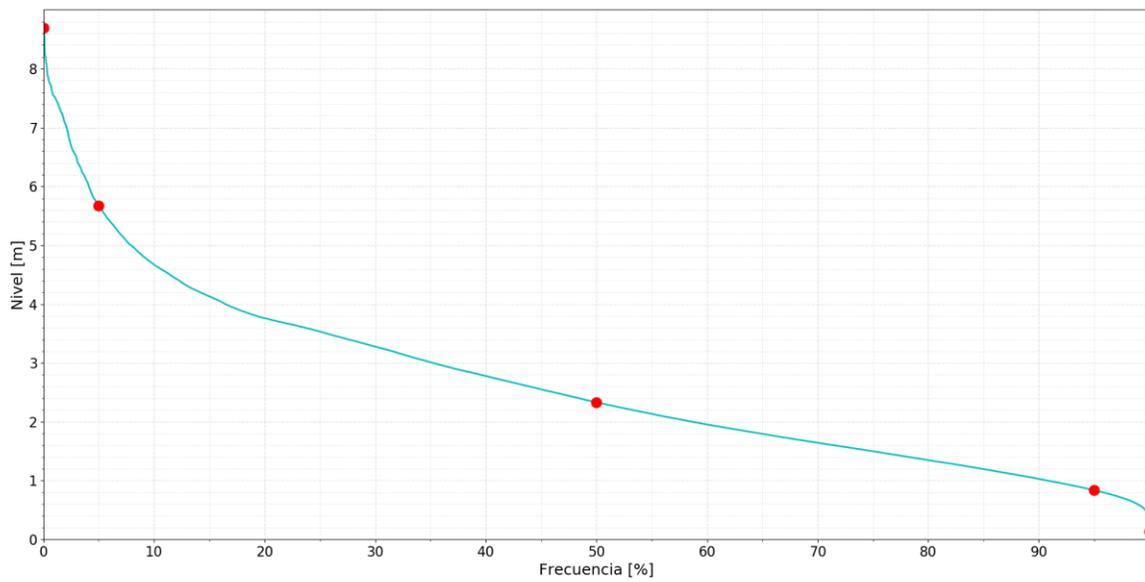


Figura 67 - Paysandú

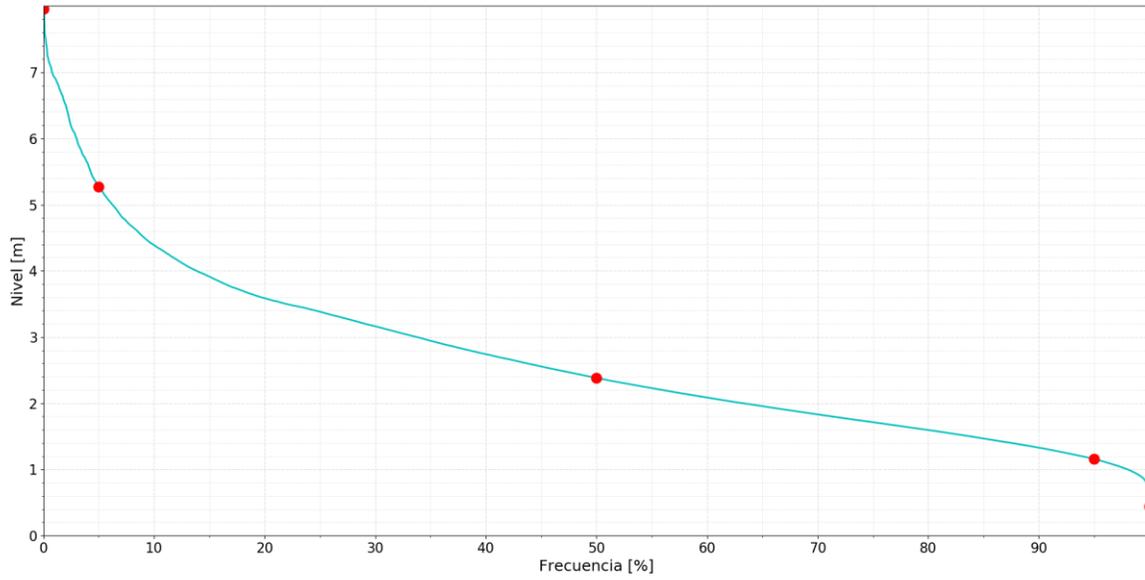


Figura 68 - Concepción del Uruguay

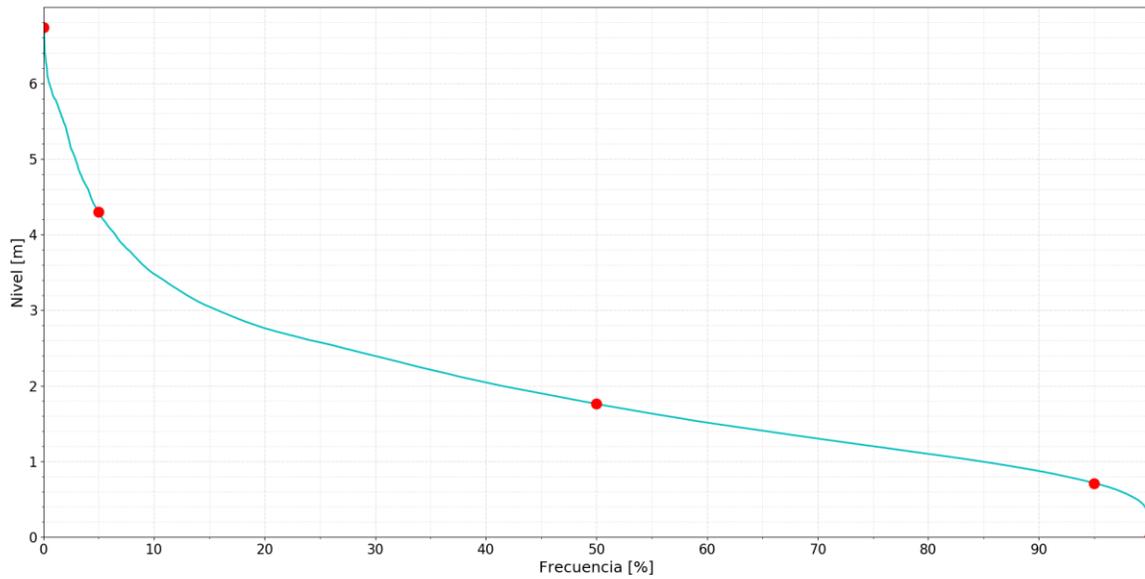


Figura 69 - Puerto Viejo

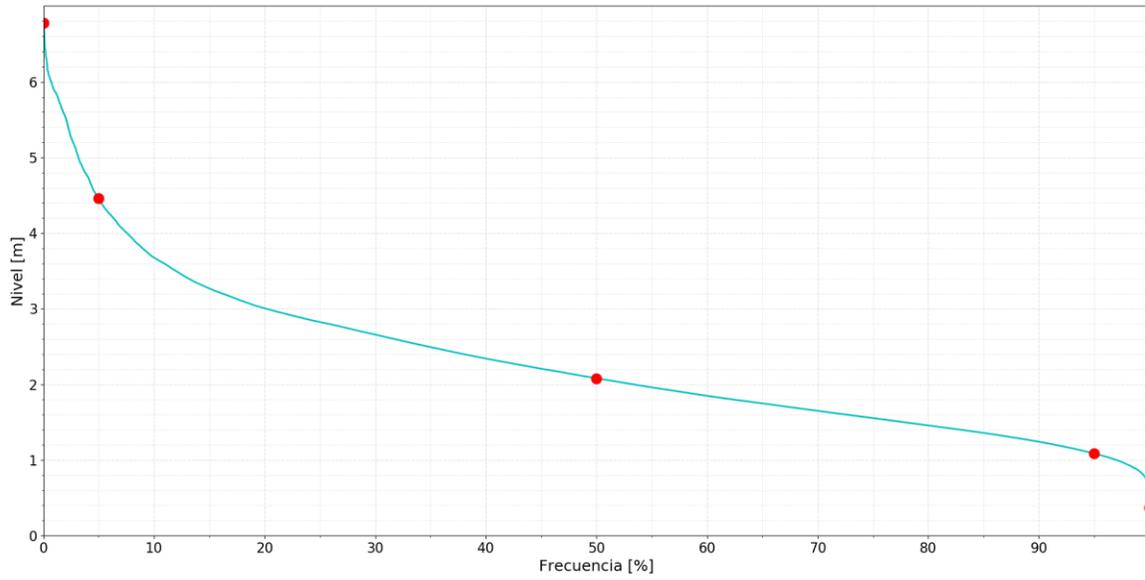


Figura 70 - Campichuelo

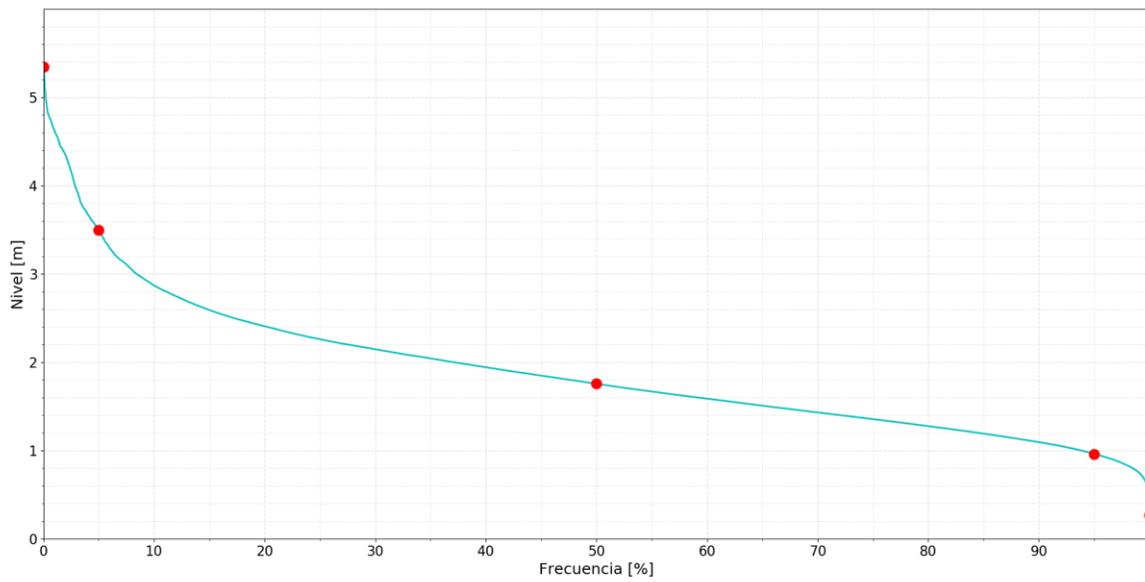


Figura 71 - Nuevo Berlin

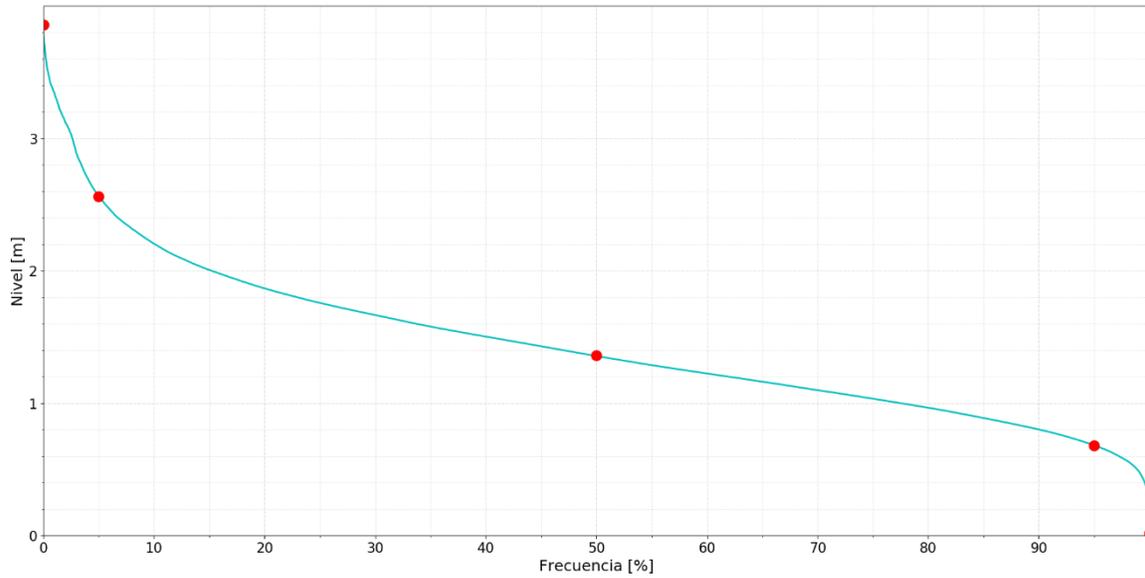


Figura 72 - Fray Bentos

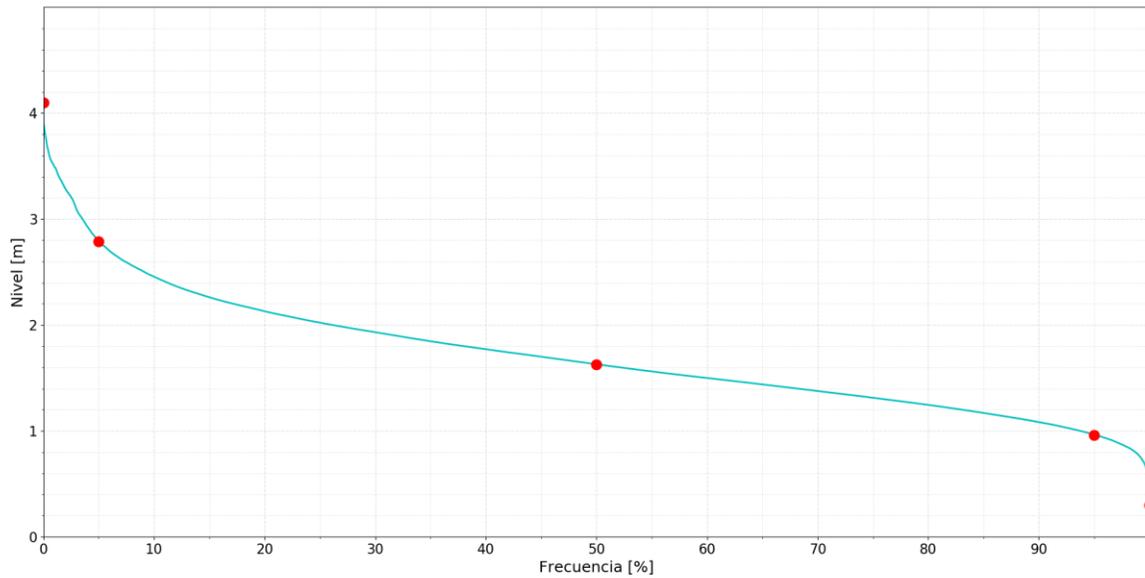


Figura 73 - Boca del Gualeguaychú

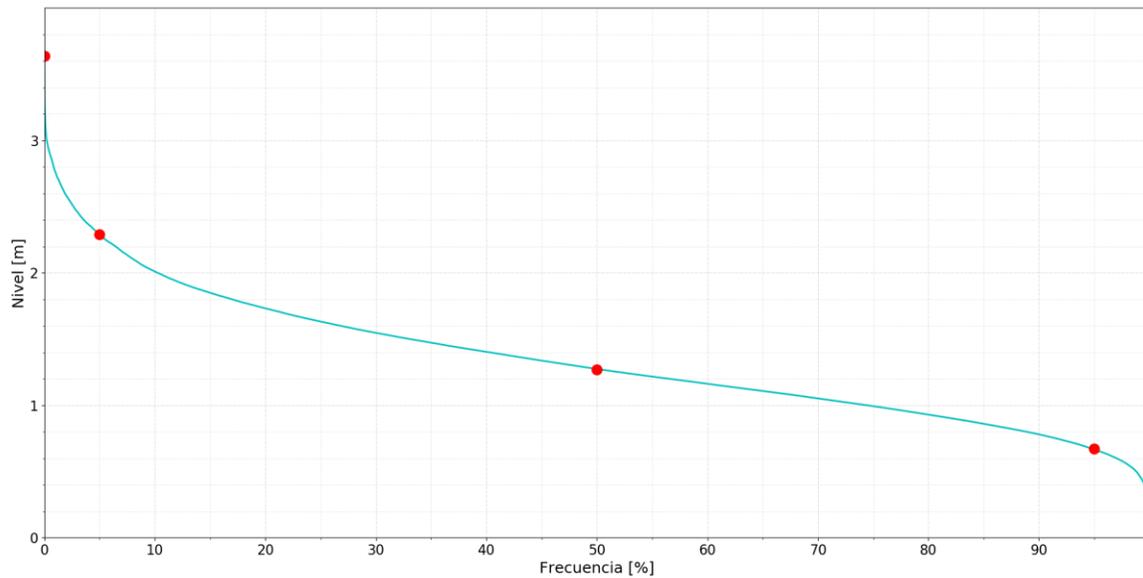


Figura 74 - La Concordia

Caudales

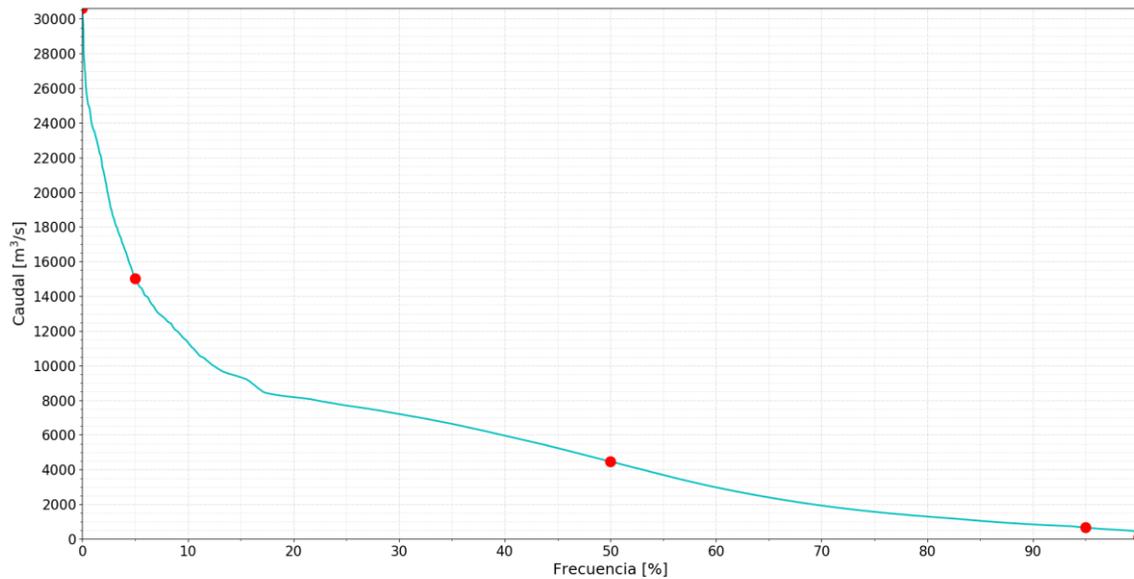


Figura 75 - Salto

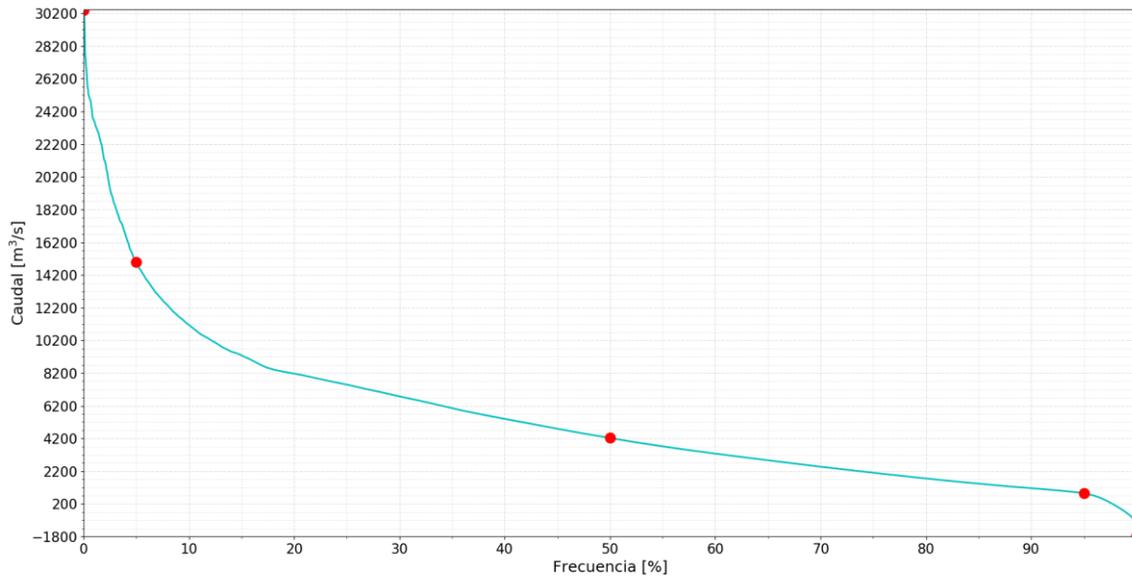


Figura 76 - Concordia

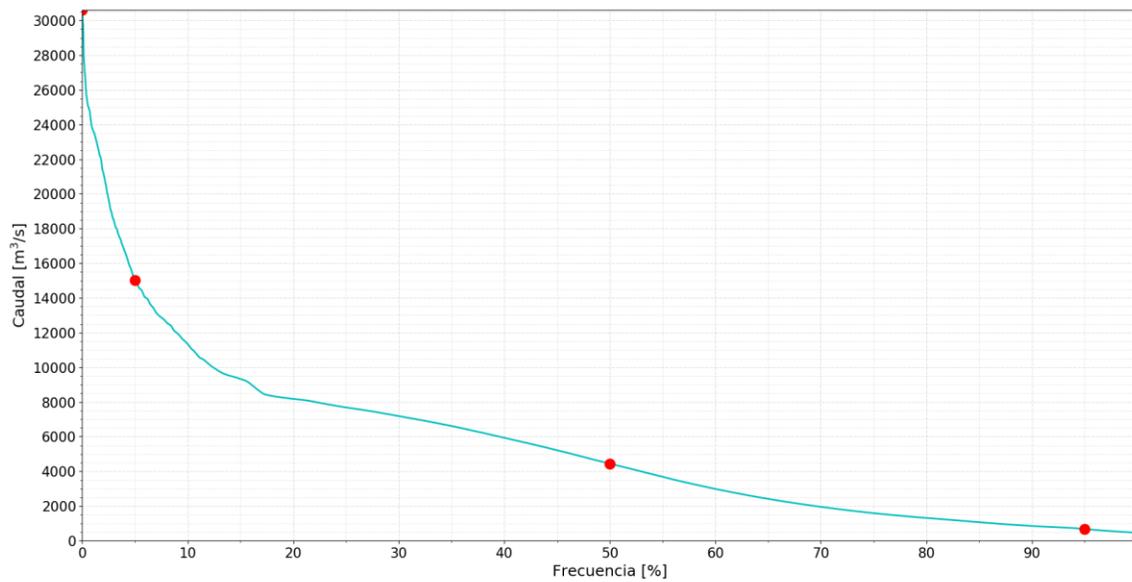


Figura 77 - Colón

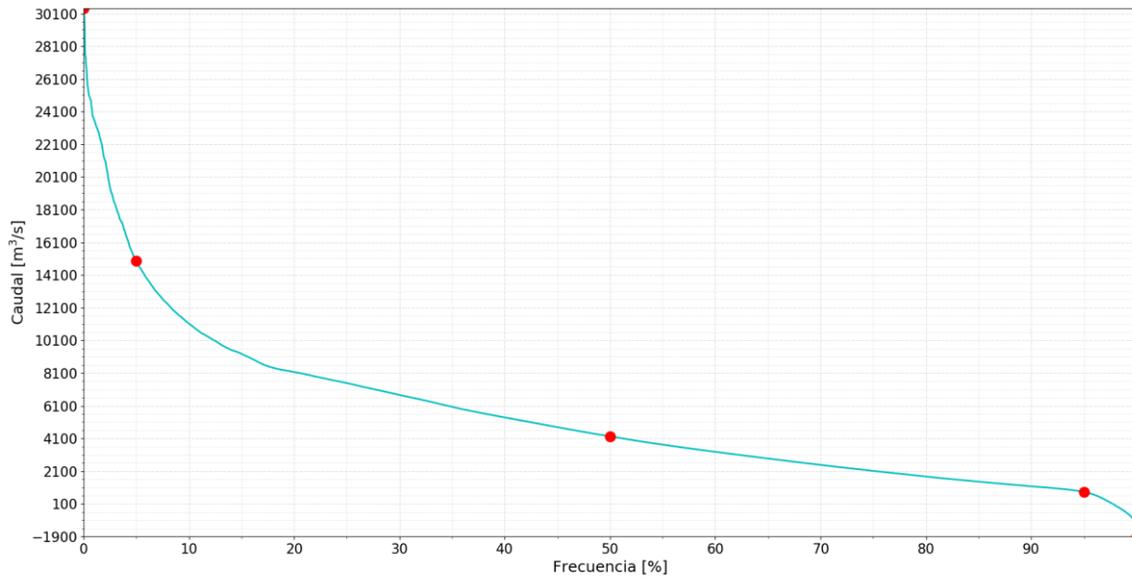


Figura 78 - Paysandú

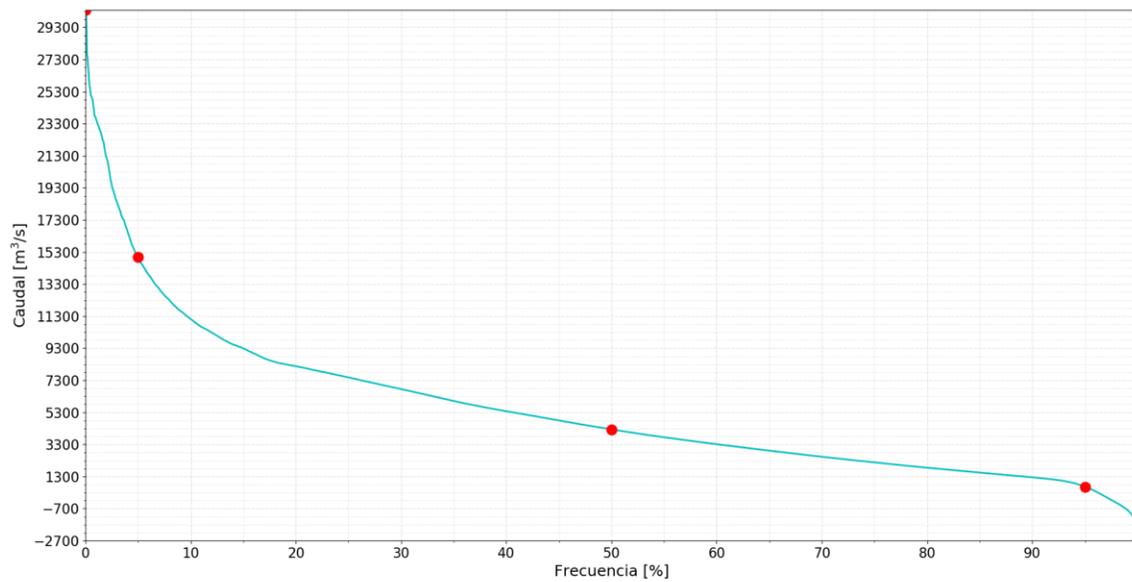


Figura 79 - Concepción de Uruguay

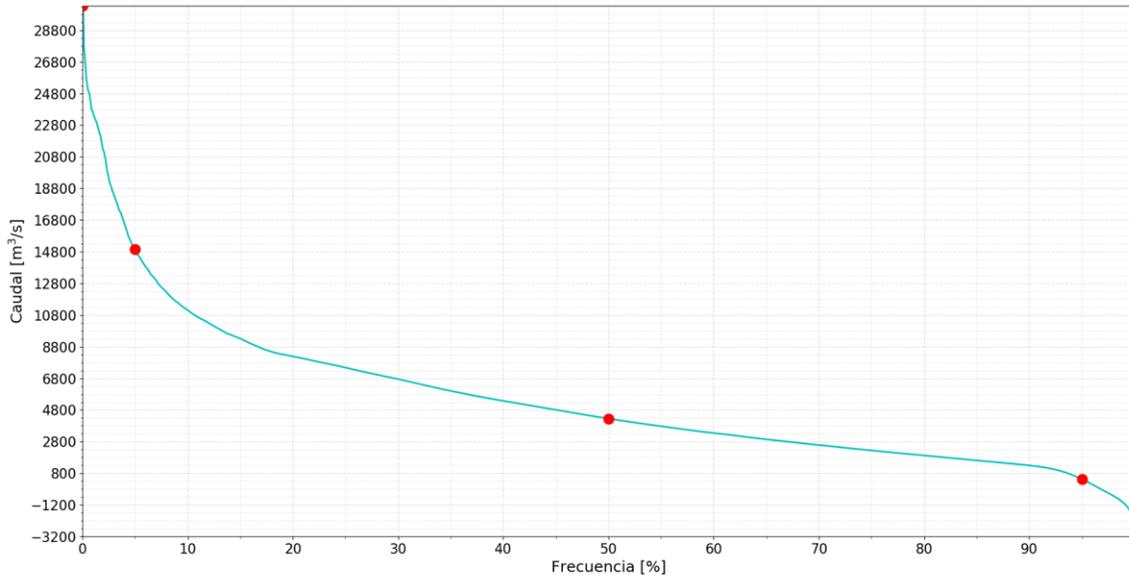


Figura 80 - Puerto Viejo

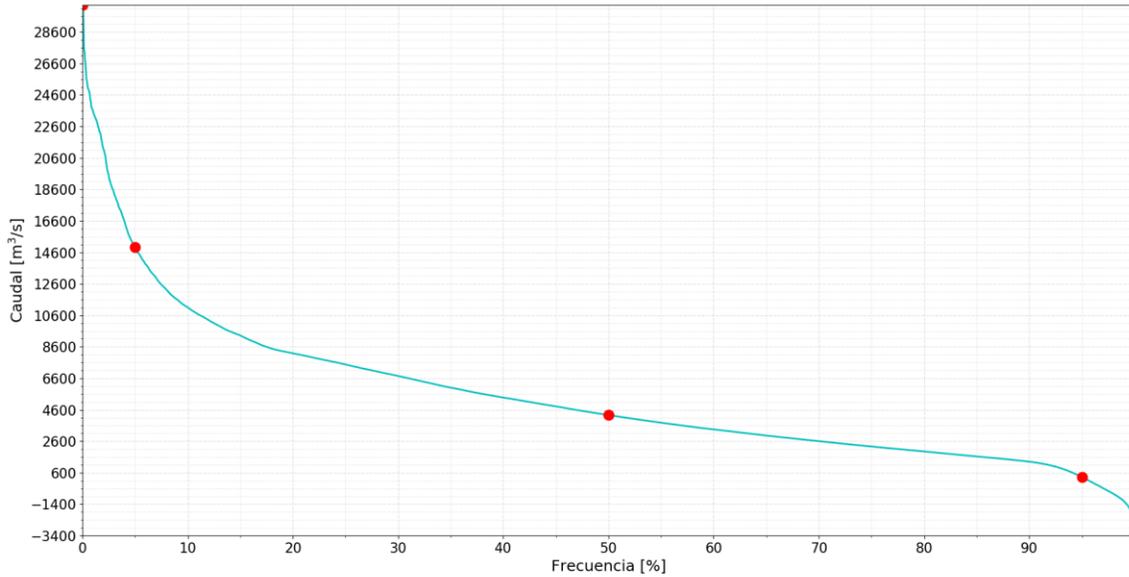


Figura 81 - Campichuelo

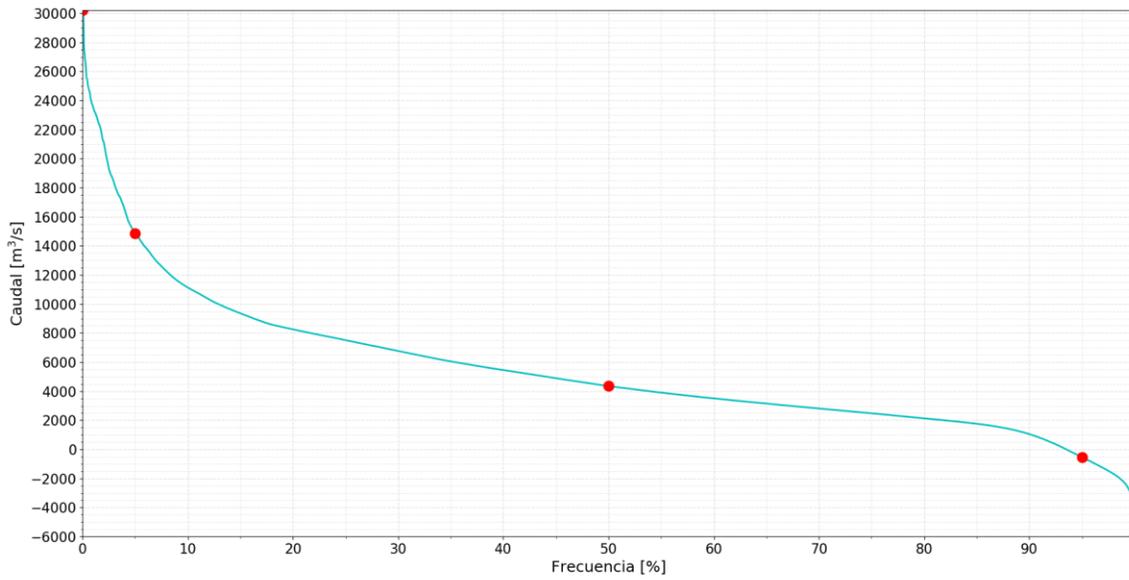


Figura 82 - Nuevo Berlin

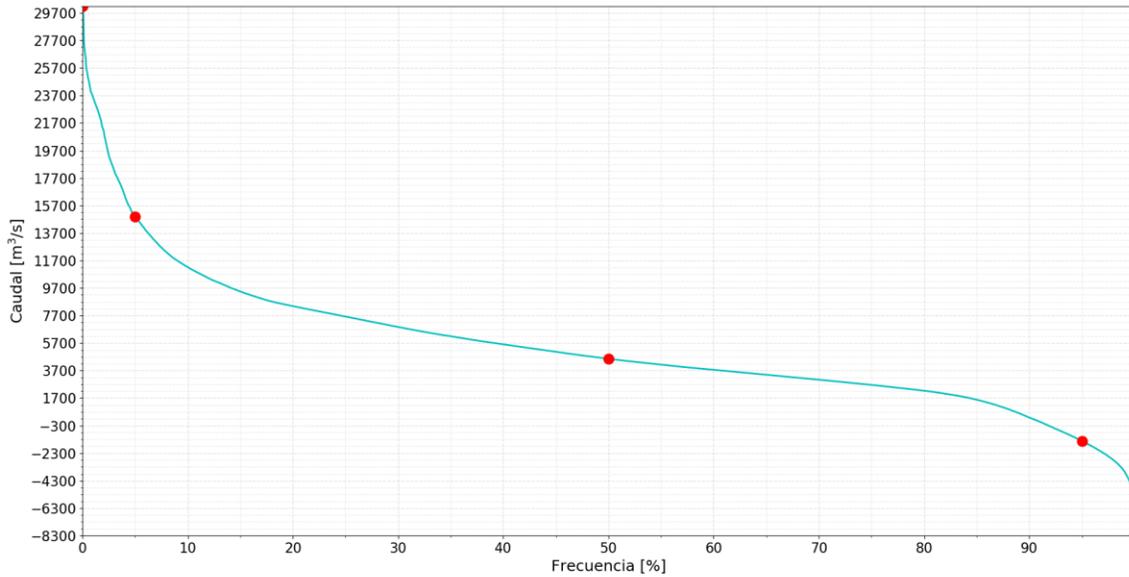


Figura 83 - Fray Bentos

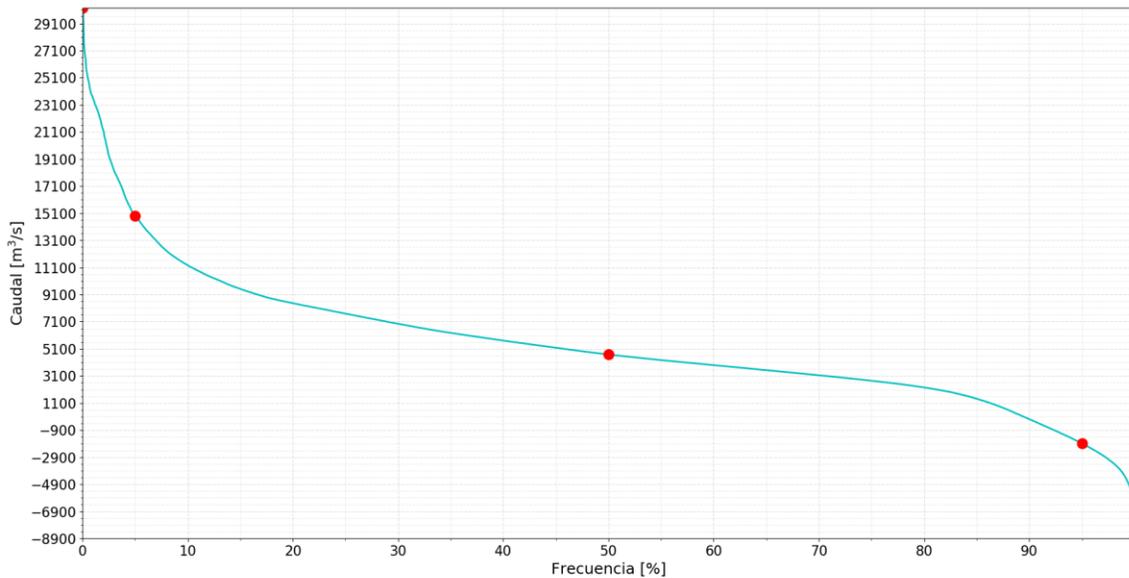


Figura 84 - Gualeguaychú

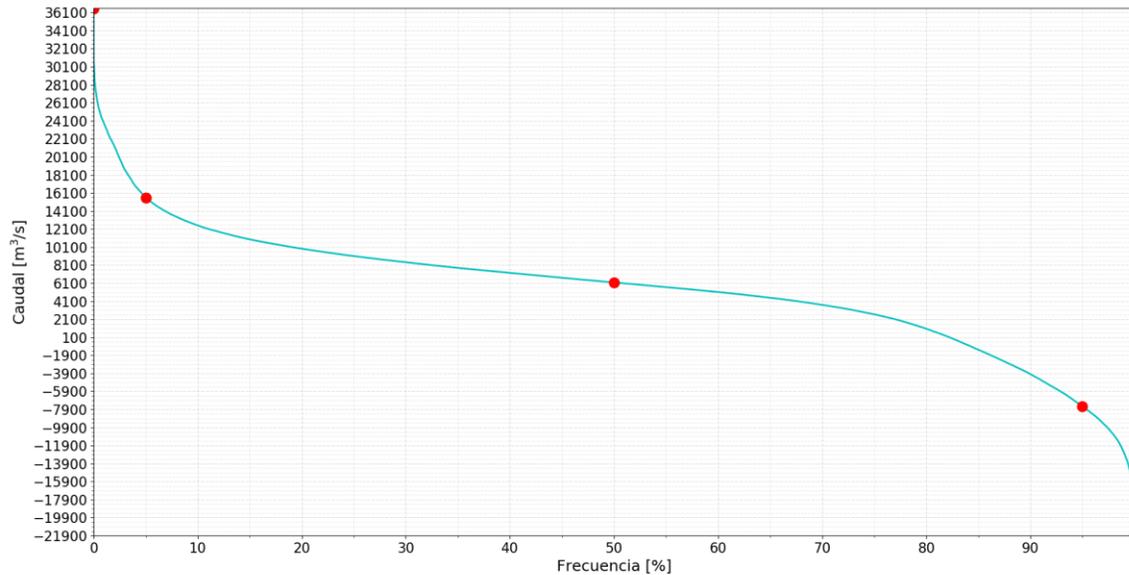


Figura 85 - La Concordia