

Relevamiento batimétrico, aforos y caracterización de los procesos hidráulicos en el río Paraná de las Palmas en correspondencia con la ciudad de Zárate

Informe hidrosedimentológico



Programa de Hidráulica Computacional
Subgerencia Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua

**Proyecto INA 406
Informe SLH 02-406-23
Ezeiza, enero de 2023**

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Ing. Juan Carlos BERTONI

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Lic. Máximo LANZETTA

SUBGERENTE LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Pablo D. SPALLETTI

Equipo de trabajo (por orden alfabético)

Programa Hidráulica Computacional – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua

Ing. Julián Cortese | Ing. Santiago Guizzardi | Mayra Morale | Lic. Nicolás Ortiz | Ing. Martín Sabarots Gerbec | Marina Sarti

Informe realizado por:

Martín Sabarots Gerbec

Julián Cortese

Santiago Guizzardi

Relevamiento batimétrico, aforos y caracterización de los procesos hidráulicos en el río Paraná de las Palmas en correspondencia con la ciudad de Zárate

Informe hidrosedimentológico

RESUMEN

Los aspectos hidráulicos y morfológicos que se desarrollan en la margen derecha del río Paraná de las Palmas en correspondencia con la ciudad de Zárate, y la necesidad de conocer el estado de estructuras localizadas en la margen y en el lecho del río, como ser el tablestacado del paseo costanero de Zárate, las pilas del puente de la Ruta Nacional N°12 (componente de la conexión vial Zárate – Brazo Largo), o la zona de desmoronamientos recientes aguas abajo del citado puente sobre margen derecha, motivan el requerimiento de una caracterización del lecho fluvial y de las principales variables hidrodinámicas en este tramo del río. Estos estudios son necesarios, a su vez, para la posterior definición y proyecto de eventuales intervenciones en la costa del río Paraná de las Palmas.

Descriptor temático: modelo numérico, erosión, sedimentación.

Descriptor geográfico: río Paraná, Bajo Delta, Zárate.

Índice

1	Contexto	5
2	Modelo hidrodinámico	6
2.1	Dominio de cálculo	6
2.2	Forzantes	7
2.3	Validación	8
3	Modelo sedimentológico.....	15
3.1	Caracterización de los sedimentos en suspensión	15
3.2	Caracterización de los sedimentos de fondo.....	15
3.3	Forzantes sedimentológicos	17
3.4	Validación	17
4	Escenarios.....	19
4.1	Tipo de información	19
4.2	Condiciones permanentes.....	19
4.2.1	Definición de escenarios	19
4.2.2	Resultados hidrodinámicos.....	21
4.2.3	Resultados morfológicos.....	23
4.3	Eventos	26
4.3.1	Definición de escenarios	26
4.3.2	Resultados hidrodinámicos.....	27
4.3.3	Resultados sedimentológicos.....	28
4.4	Erosión futura: perspectiva más desfavorable	29
5	Resumen y consideraciones	32
	Referencias	34

1 Contexto

El presente estudio se enmarca en un contexto de bajante hidrológica del río Paraná, lo cual ha derivado en distintos procesos morfológicos a lo largo del sistema fluvial, tanto de erosión/deslizamientos, como de sedimentación.

En el caso de la zona próxima a la localidad de Zárate, ambos procesos han sido registrados. Por un lado, aguas arriba del Puente Zárate se observa un proceso de sedimentación gradual frente al Paseo de la Ribera. Las condiciones de bajante del Paraná agravan este proceso ya que es esperable menores velocidades y por ende mayor deposición.

Por otra parte, aguas abajo del puente, se registró en el año 2020 un deslizamiento de la margen que puede estar asociado a un doble efecto: niveles bajos que favorecen la inestabilidad del talud y la acción de velocidades erosivas por estar el flujo recostado sobre esa margen.

2 Modelo hidrodinámico

Con el fin de analizar los procesos morfológicos que ocurren en las proximidades a la ciudad de Zárate, se desarrolló en primer lugar un modelo hidrodinámico al cual luego se le acoplará el módulo sedimentológico. Para ambos casos, se empleará el sistema de modelación numérica *Delft3D*, desarrollado por Deltares. Dicho sistema, ampliamente validado y empleado en una vasta gama de proyectos hidro-sedimentológicos, utiliza el método de diferencias finitas para resolver numéricamente tanto la ecuación de Navier-Stokes para la hidrodinámica como las correspondientes a los procesos de transportes a ser mencionadas en el Capítulo 3.

2.1 Dominio de cálculo

El dominio de cálculo del modelo numérico fue definido obteniendo una correcta representación de la hidrodinámica del curso en la región particular donde se presentan los diversos problemas en estudio. El dominio (Figura 2.1) comienza aproximadamente 4,5 km aguas arriba del puente de Zárate y 7 km aguas abajo del mismo, evitando de esta manera eventual comportamiento espurio introducido en la condición de borde.

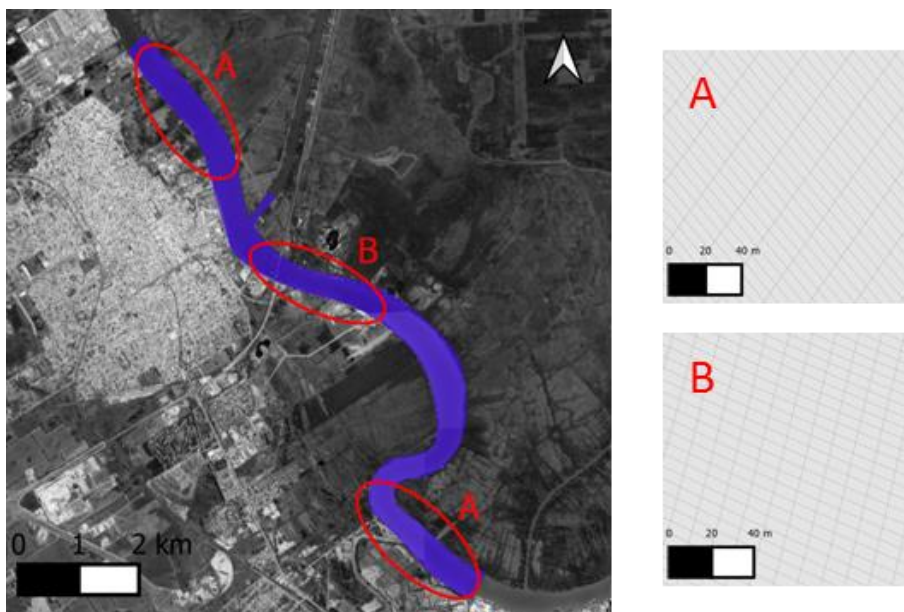


Figura 2.1. Extensión del dominio de cálculo y su discretización horizontal.

En lo que respecta al mallado propiamente dicho, se realizó a través de una malla curvilínea ortogonal, lo cual permite una muy buena adaptación de esta a la línea de costa. Para la discretización (Figura 2.1), se optó por una resolución espacial variable a lo largo del dominio obteniendo una mejor economía en el costo computacional de cada simulación. La dimensión transversal de la malla permanece constante (aproximadamente igual a 5 m), mientras que la longitudinal varía según la cercanía a la zona de estudio. Mientras que aguas arriba y aguas abajo de dicha región la longitud de las celdas oscila alrededor de los 20 m, en las inmediaciones del Puente Zárate – Brazo Largo dicho valor adopta valores cercanos a 10 m. Esto brinda una resolución adecuada para representar con mejor fidelidad, no sólo los procesos hidrodinámicos en sí sino también, la batimetría del curso. Por otra parte, en la dirección vertical se optó por el empleo de 10 capas de tipo *sigma*. Las principales características cuantitativas del mallado se sintetizan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características cualitativas del mallado definido.

Máxima cantidad de celdas	Dirección M	949
	Dirección N	199
Celdas		78303
Capas verticales		10

2.2 Forzantes

Para las tres condiciones de borde abiertas del modelo (Figura 2.2) se emplearán forzantes del tipo impermanentes, mediante series temporales. En el caso de las fronteras correspondientes al extremo de aguas arriba del modelo y al Canal Irigoyen, se empleó la variable caudal, mientras que aguas abajo sobre el río Paraná de las Palmas, el nivel de agua.

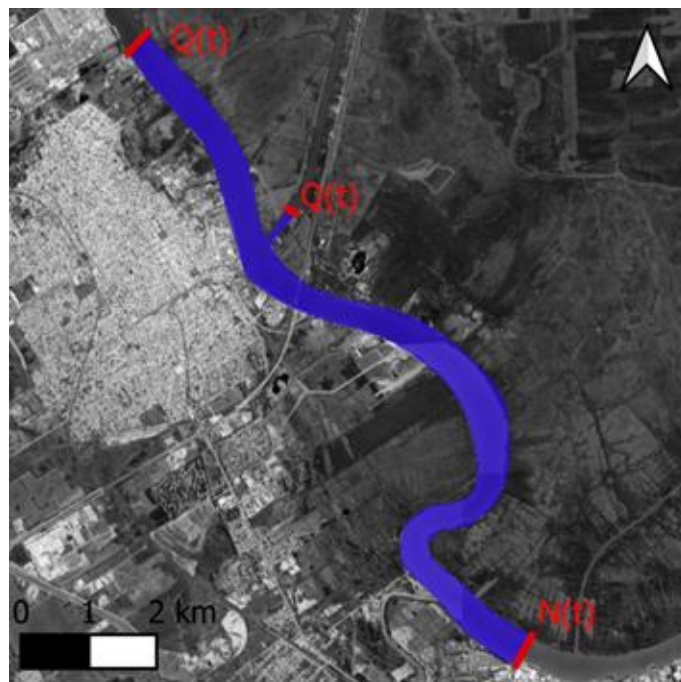


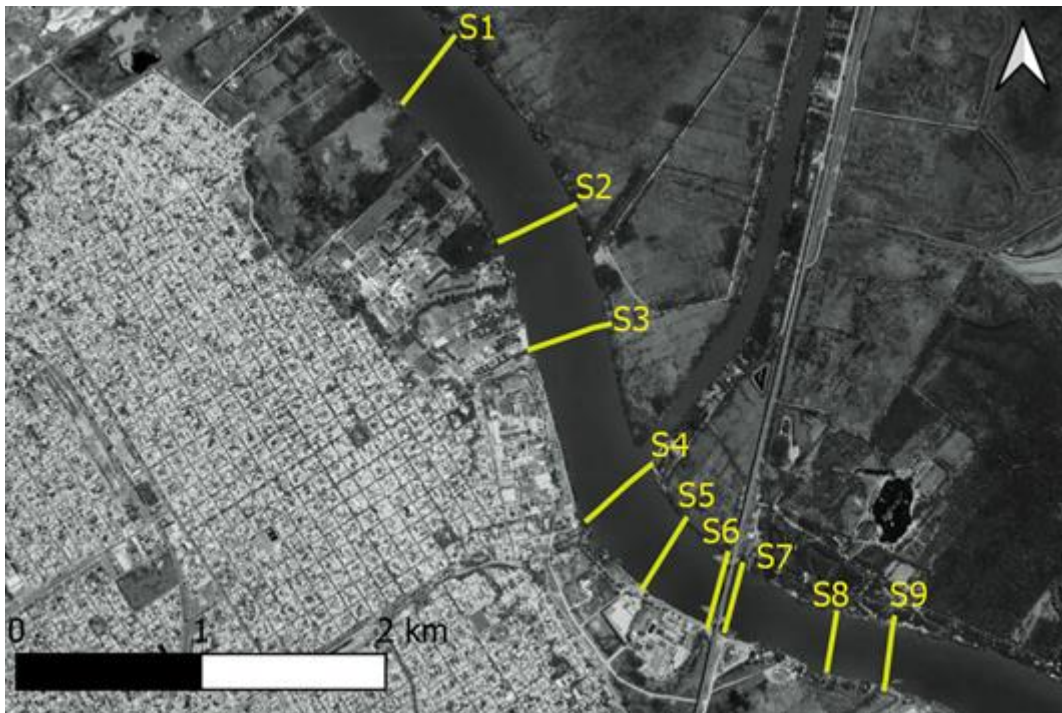
Figura 2.2. Condiciones de borde abiertas del dominio y sus forzantes.

Para determinar las series de caudales y niveles sobre el río Paraná de las Palmas se utilizó el modelo hidrodinámico del Delta del Paraná, que se encuentra actualmente operativo para fines de pronóstico en el INA. Por otra parte, el caudal del Canal Irigoyen fue adoptado constante e igual a $300 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual es compatible con las observaciones realizadas en campo.

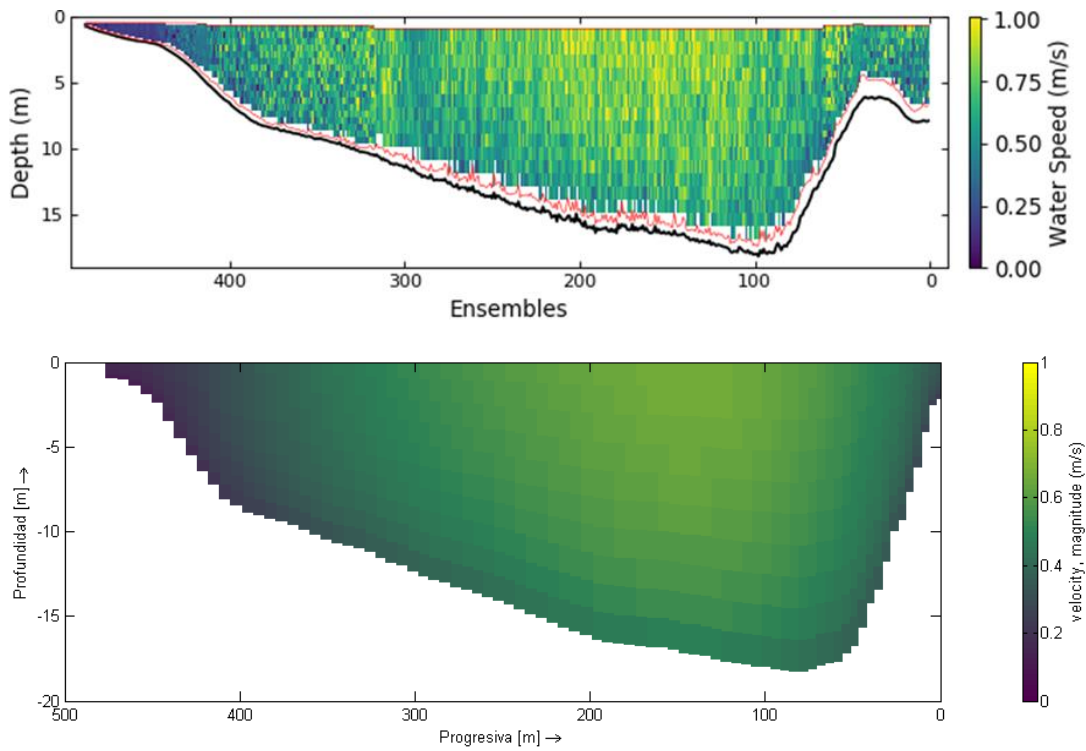
Adicionalmente, las series que resultaron del modelo hidrodinámico 1D del Delta del río Paraná fueron ajustadas con las mediciones llevadas a cabo durante la Campaña de Relevamiento del presente estudio, obteniendo series que representan mejor las condiciones hidrológicas (ver Capítulo 4).

2.3 Validación

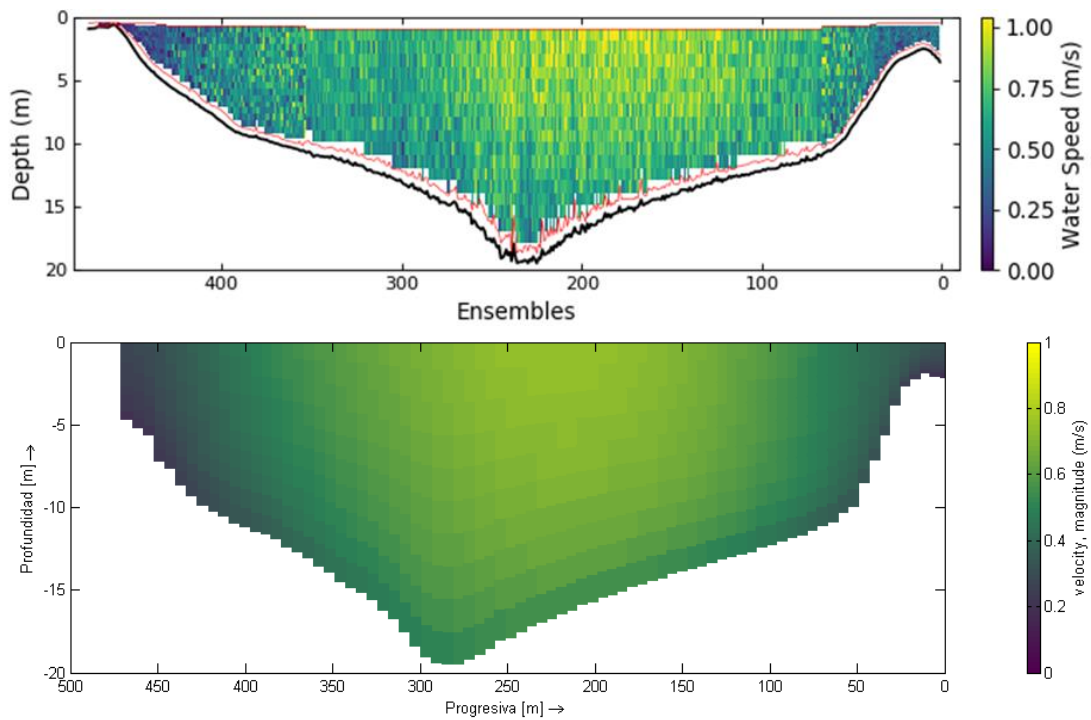
La validación del modelo hidrodinámico se realizó mediante la comparación de los perfiles de velocidad relevados en las distintas campañas con aquellos campos de velocidades simulados; la ubicación de las transectas analizadas y las comparaciones en cuestión se presentan en la Figura 2.3.



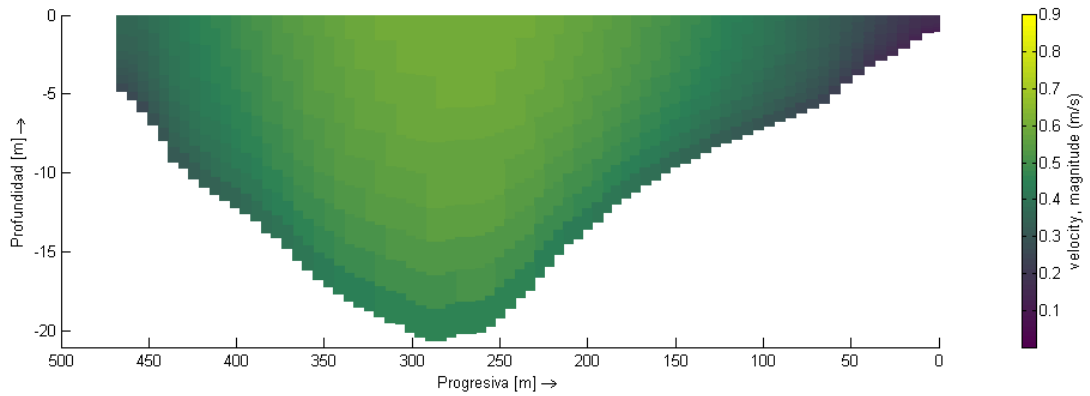
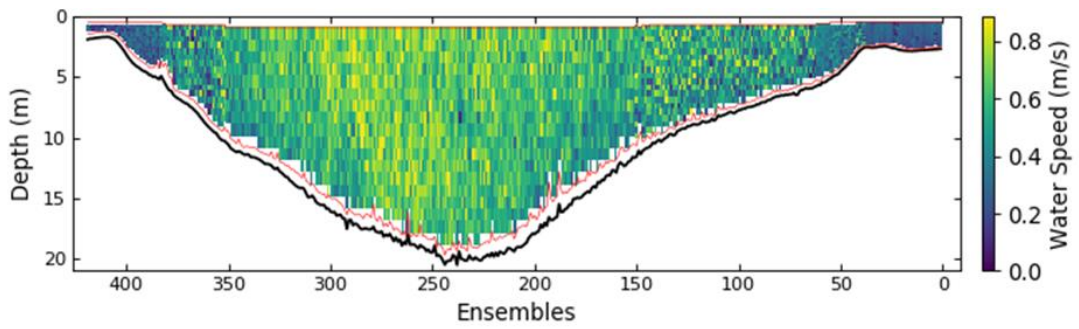
a. Ubicación de transectas empleadas en la validación.



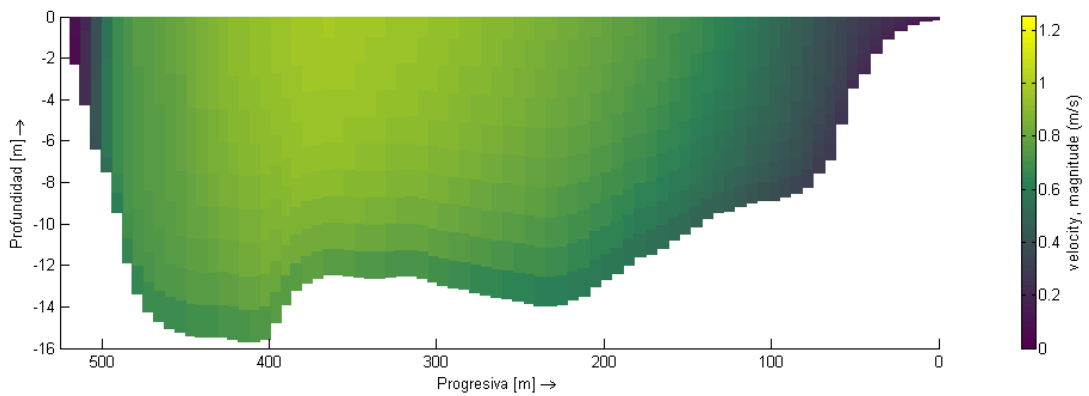
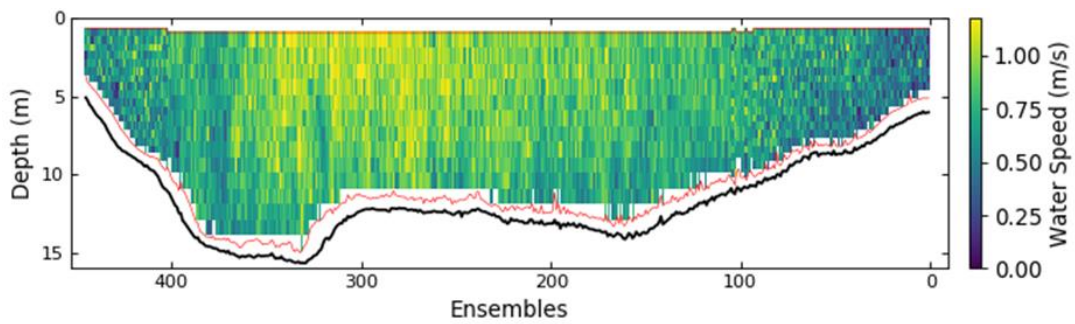
b. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 1.



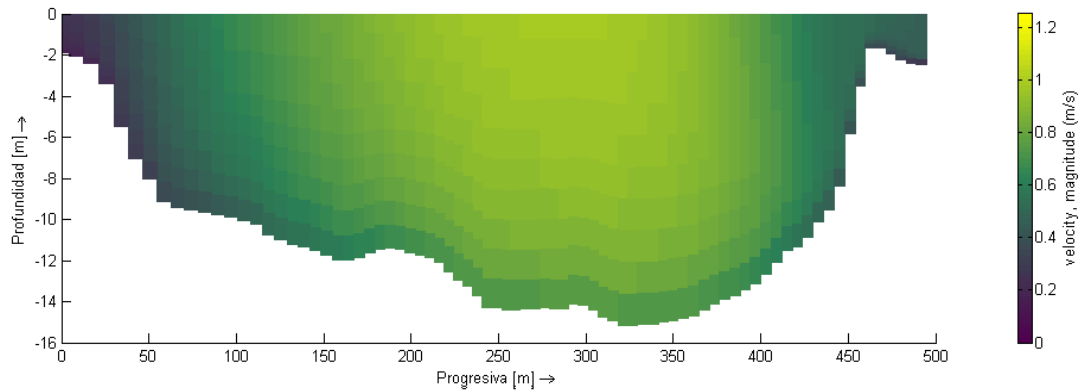
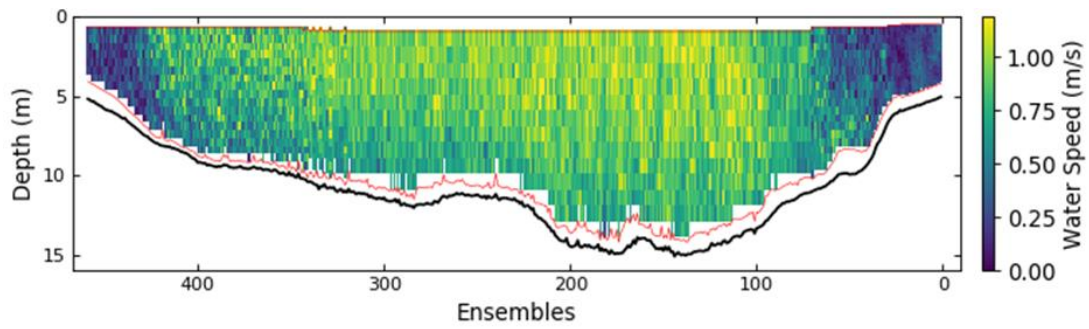
c. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 2.



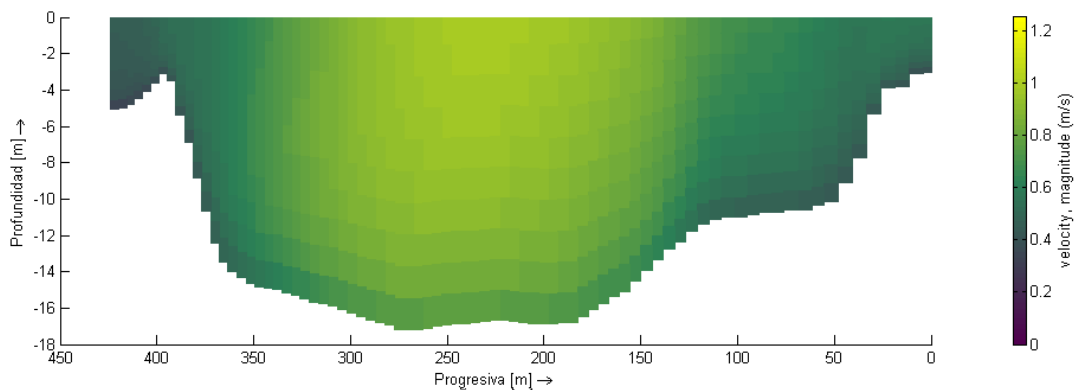
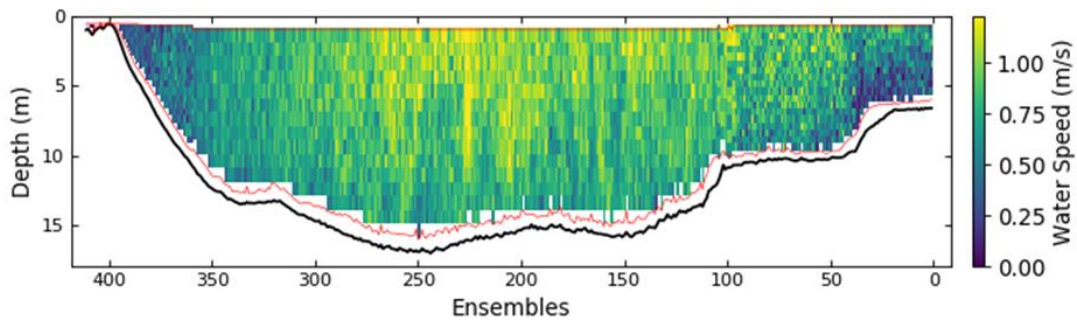
d. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 3.



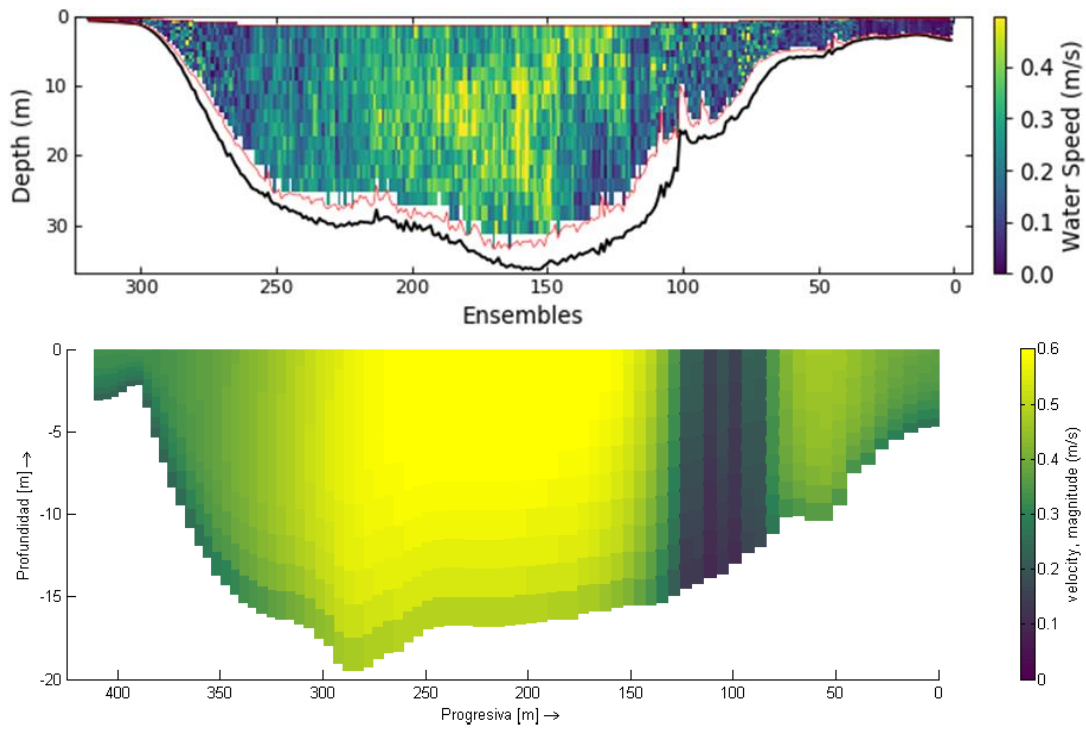
e. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 4.



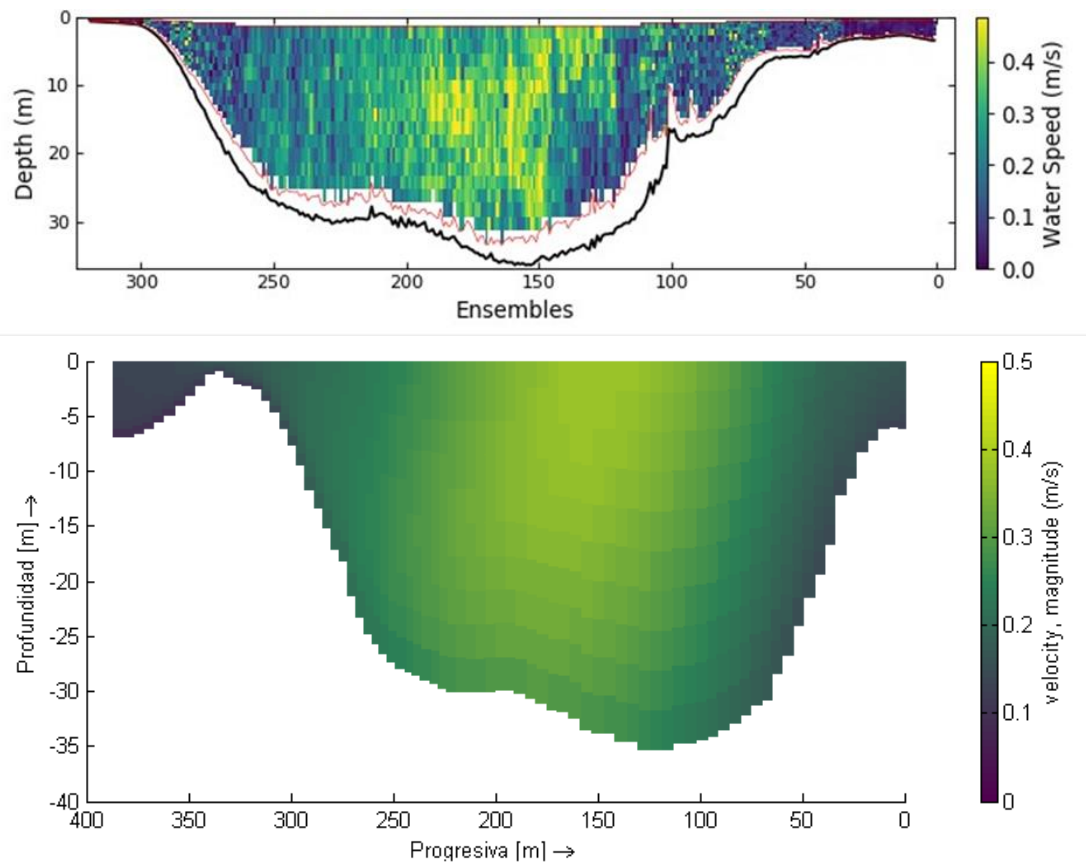
f. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 5.



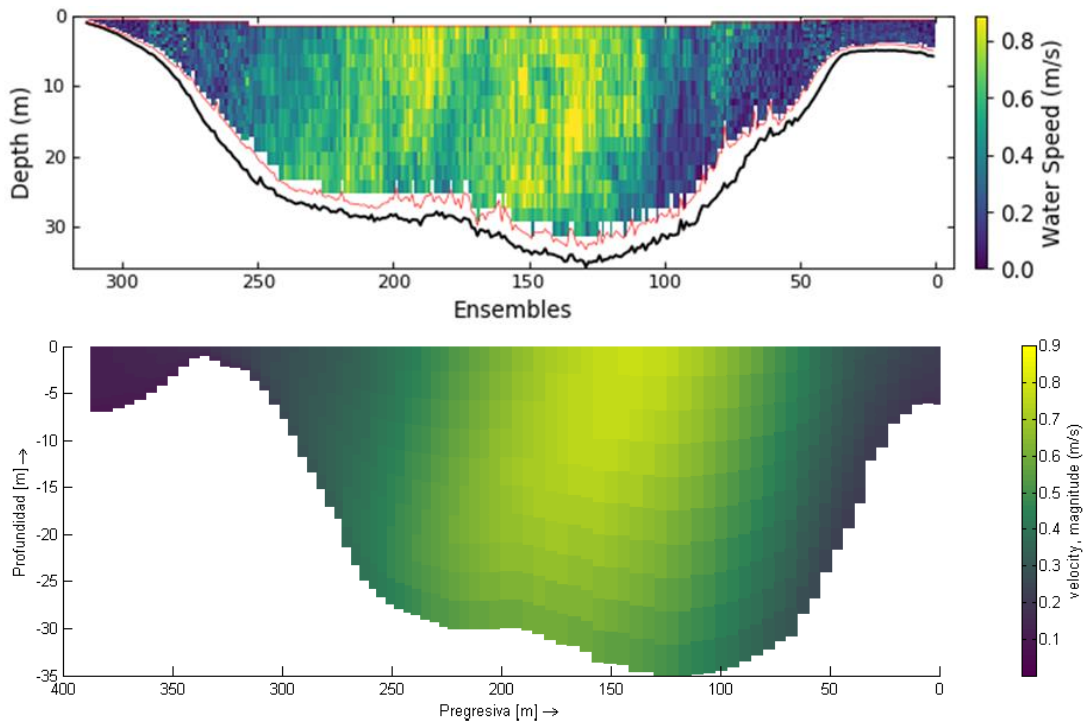
g. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 6.



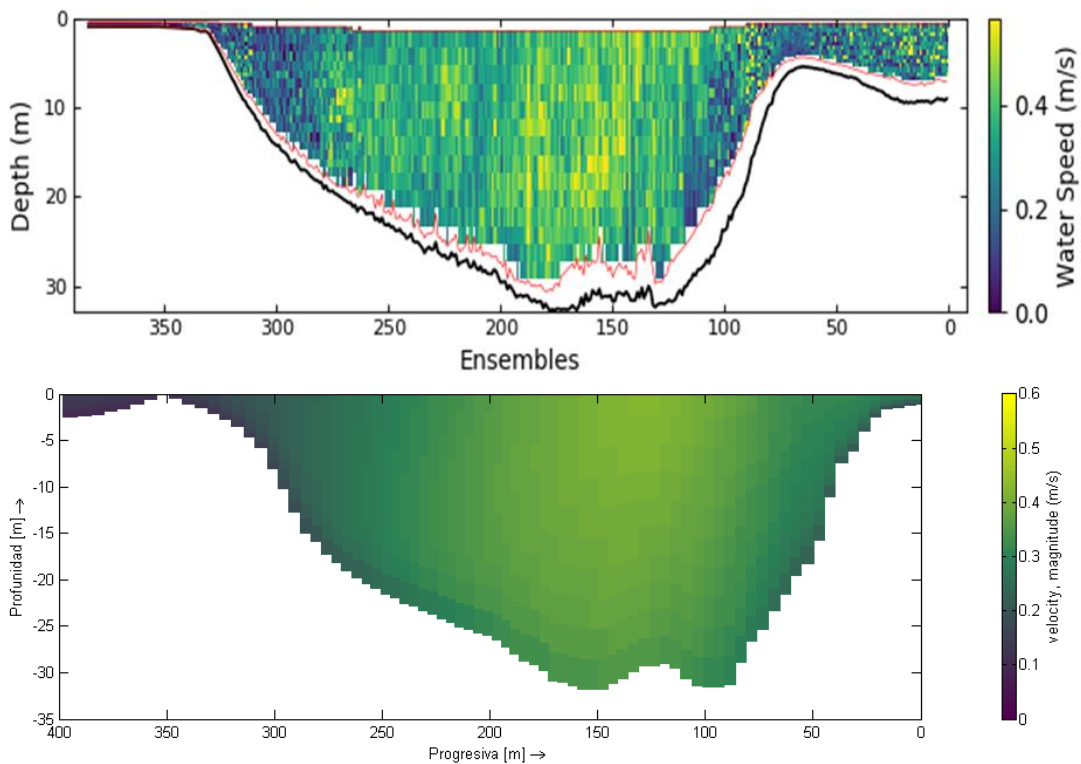
h. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 7.



i. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 8 (bajo caudal).



j. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 8 (alto caudal).



k. Campos de velocidad observado (arriba) y simulado (abajo) en la sección 9,

Figura 2.3. Comparación de velocidades medidas y simuladas.

A partir de la comparación de los campos de velocidad simulados con aquellos medidos *in situ* se concluye que el acuerdo es satisfactorio en tanto la magnitud del flujo está correctamente representada por el modelo.

3 Modelo sedimentológico

3.1 Caracterización de los sedimentos en suspensión

De acuerdo a los trabajos antecedentes recopilados previamente (INA, 2019), los sedimentos en suspensión del río Paraná de las Palmas se componen de materiales finos con una fracción mayoritaria de limos (56%), seguido por arcillas (28%) y arenas finas (16%), con diámetros medios de muestras recolectadas oscilantes entre 5 y 120 micrómetros con una media de 10 micrómetros, lo cual lo define como limos finos.

Respecto a la concentración total, la misma presenta una relativamente alta variabilidad estacional, con valores que oscilan entre los 50 mg/l y los 450 mg/l; se propusieron como concentraciones máxima y mínima representativas 250 mg/l y 80 mg/l, respectivamente. Sin embargo, en otros trabajos (Van Rijn, 2017) se han propuesto valores más elevados para la concentración de sedimentos total en el curso, aludiendo que observaciones de largo plazo indican valores de material suspendido cercana a los 300 mg/l.

3.2 Caracterización de los sedimentos de fondo

De los antecedentes recolectados, se determina que el lecho está compuesto mayoritariamente por arenas, con diámetro medio igual a 260 μm entre los kilómetros 117 y 136,6, aunque también se halla material más fino de diámetro medio comprendido entre 65 y 73 μm . Además, Van Rijn (2017) determina a partir de muestras de lecho de fondo que para profundidades mayores a 16 m en el Paraná de las Palmas el d_{50} adopta valores entre 300 y 400 μm , mientras que a profundidades menores a 13 m se corresponde un tamaño de grano comprendido entre 20 y 50 μm .

Adicionalmente al estudio de trabajos antecedentes, en las campañas realizadas en este mismo proyecto se tomaron diversas muestras de sedimento de fondo que luego fueron tamizadas en el laboratorio de sedimentología del Instituto Nacional del Agua. Para ello se emplearon diversos tamices (#1 a #250) vibrados mecánicamente. Se procesaron dos muestras, una correspondiente al centro del cauce y otra extraída en las inmediaciones de la margen derecha (Figura 3.1).



Figura 3.1. Tamizado de muestras colectadas en Campaña de Relevamiento 2022.

De las curvas granulométricas obtenidas mediante tamizado mecánico (Figura 3.2) se observa una clara diferencia entre ambas, notándose un claro incremento de material fino en la margen, donde prácticamente el 35% del material recolectado tiene un diámetro inferior a 53 μm , lo cual resulta compatible con lo establecido por Van Rijn (2017).

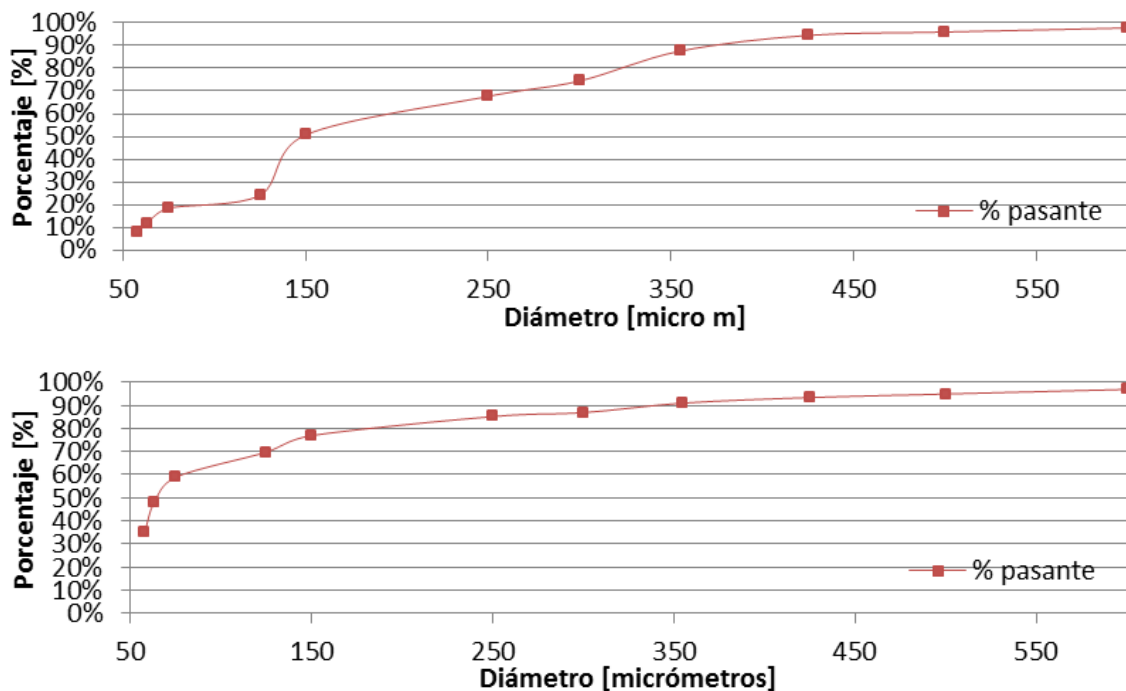


Figura 3.2. Curvas granulométricas.

A partir de los valores pasantes en cada tamiz obtenidos durante el tamizado de las muestras, se obtiene que para la muestra del centro del cauce el d_{50} resultó 150 μm y el d_{90} 375 μm y para la muestra de la margen derecha resultaron en 65 y 340 μm , respectivamente.

3.3 Forzantes sedimentológicos

Tras el estudio de la información recopilada por los distintos antecedentes ya presentada en los apartados previos, se determinó emplear como forzante del modelo en lo referido a material suspendido una mezcla de material fino compuesta por arcilla (35%), limo (50%) y arena fina (15%) con una concentración total igual a 250 mg/l.

Para los materiales cohesivos (es decir, arcillas y limos), se decidió emplear tensiones de corte críticas de sedimentación y erosión iguales entre sí, con un valor adoptado igual a 0,21 N/m². Por su parte, la velocidad de caída de las arcillas se fijó igual a 0,07 mm/s, mientras que la de los limos a 0,72 mm/s. Las arenas finas ingresantes al dominio se describieron como material no cohesivo con un d_{50} igual a 100 μm . La formulación de transporte empleada para el material no cohesivo fue *Engelund Hansen*, la cual presenta un buen ajuste al ser empleada en el río Paraná.

En lo referido al sedimento de lecho, se empleó una distribución espacial variable en el dominio para poder discriminar la composición en el centro del cauce y en las áreas someras. En las primeras regiones, se impuso un lecho de arenas de d_{50} igual a 400 μm ; el criterio de ubicación de esta fracción más gruesa fue la profundidad: en profundidades mayores a 16 m se adoptó dicho sedimento; para el resto del dominio, se impuso un lecho inicial compuesto por la misma fracción de limos que ingresan desde aguas arriba.

3.4 Validación

La simulación correspondiente a la validación del modelo hidrosedimentológico se realizó con forzantes hidrodinámicos correspondientes a una situación estadísticamente media constante en el tiempo; análogamente, la concentración ingresante de sedimentos en suspensión también fue invariable en el tiempo. El lecho inicial consistió en una distribución espacialmente variable de acuerdo a lo mencionado previamente, con un espesor igual a 1 m. Se adoptó un factor de aceleración igual a $f_a=10$, con el fin de acelerar los cambios morfológicos y homogeneizar las escalas temporales de los fenómenos hidrodinámico y sedimentológico y así lograr menor costo computacional. La ventana de simulación corresponde a 30 días.

La batimetría empleada fue construida a partir de datos relevados en campo tanto para el presente proyecto como previamente (INA, 2020). En la zona del deslizamiento ocurrido aguas abajo de la ciudad de Zárate se modificó lo relevado de forma tal de no tener aquella singularidad y poder simular correctamente la hidrodinámica circundante y de esta forma analizar qué situación pudo haber llevado a dicho desmoronamiento del talud costero.

Para el análisis de los resultados, se decidió estudiar las áreas del curso donde hubo sedimentación y erosión, independientemente de la magnitud de cada fenómeno (Figura 3.3). Se observa en primera instancia una importante preponderancia de las regiones erosionadas, salvo en el centro del curso (donde las profundidades son superiores) y en la margen interna de la curva aguas abajo del puente de Zárate. Cabe destacar que en este análisis se prescinde de analizar magnitudes, por lo que las regiones erosionadas pueden tener valores pequeños, los cuales no representan grandes cambios morfológicos bajo las condiciones simuladas.

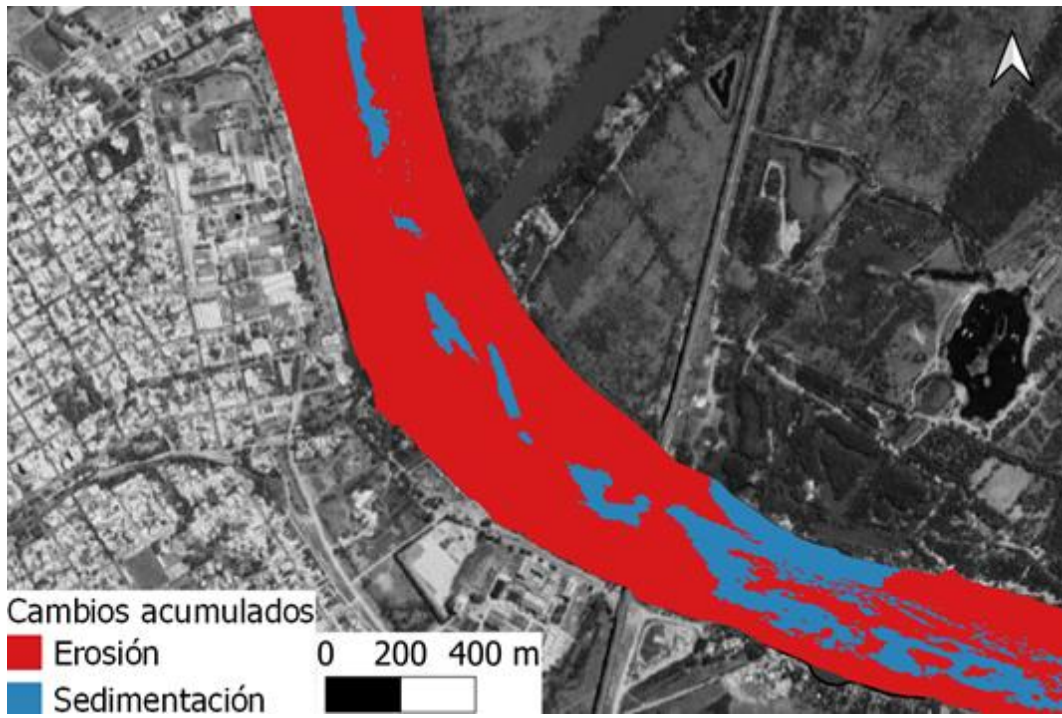


Figura 3.3. Zonas de sedimentación y erosión simuladas.

4 Escenarios

4.1 Tipo de información

A partir de la implementación y validación del modelo numérico, se cuenta con una herramienta para evaluar distintos escenarios y de esta forma tener tendencias de zonas de sedimentación/erosión.

En este sentido se plantean dos tipos de escenarios: en primer lugar:

- Escenarios con condiciones hidrodinámicas permanentes, para lo cual se definen caudales y niveles a partir de distintos percentiles. El objetivo de estos ensayos es la evaluación de efectos de duración prolongada, cuyo origen reside en la respuesta hidrológica (fluvial) de la cuenca del Paraná.
- Escenarios impermanentes, donde se identifican eventos puntuales que tienen en cuenta la influencia de bajantes y crecidas debidas al Río de la Plata. En este punto se podrá evaluar efectos impermanentes de corta duración.

4.2 Condiciones permanentes

4.2.1 Definición de escenarios

En los escenarios permanentes se tomaron tres condiciones hidrodinámicas asociadas a los cuantiles 0.1, 0.5 y 0.9. Para obtener los valores de niveles y caudales se procesó una serie de tiempo de estos obtenida a partir del modelo hidrodinámico 1D la cual se contrastó con los valores aforados en Zárate - Brazo Largo. La extensión de la serie es de 32 años (1990-2022) y la comparación entre caudales simulados y aforados se presenta en la Figura 4.1.

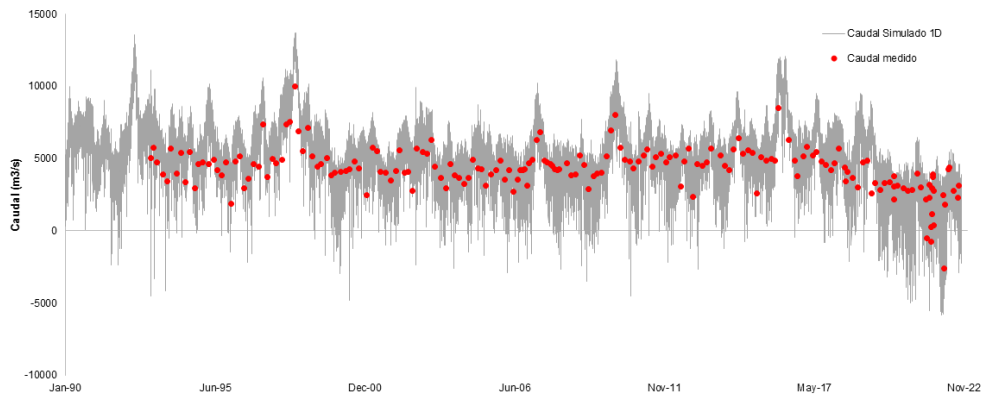


Figura 4.1. Validación de caudales 1D con aforos.

Luego, a partir de los datos históricos simulados se procedió a realizar una estadística de los mismos para obtener los cuantiles asociados a cada escenario. En la Tabla 4.1 se presentan los caudales y niveles asociados.

Tabla 4.1. Valores de caudales y niveles característicos.

Escenario	Cuantil	Caudal (m ³ /s)	Nivel (m IGN)
Estiaje	0.9	2693	0,65
Normal	0.5	5339	1,18
Crecida	0.1	7883	1,84

En la Figura 4.2 se presentan las curvas de excedencia de niveles y caudales.

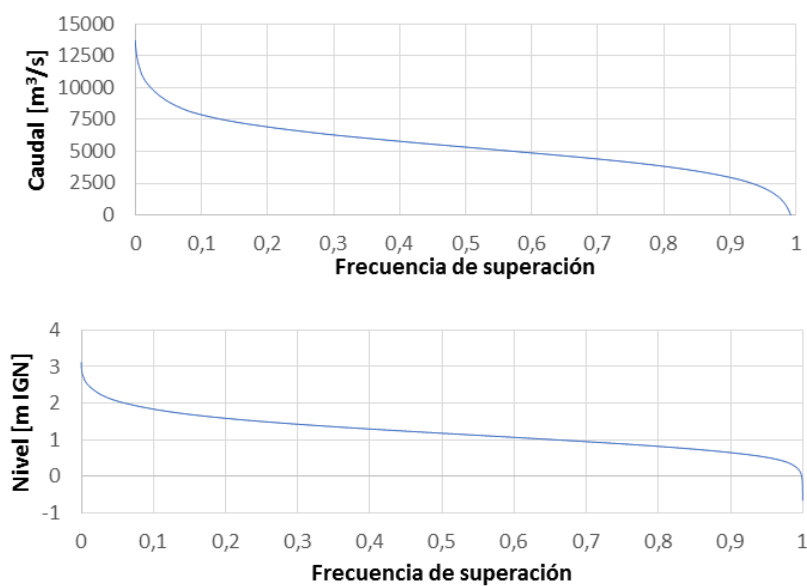


Figura 4.2. Curvas de permanencia de caudal (arriba) y nivel (abajo).

Para cada uno de los percentiles se procedió entonces a definir un escenario tanto hidrodinámico como sedimentológico con el modelo de forma tal de poder cuantificar la incidencia que la condición hidrológica del curso tiene tanto sobre la hidrodinámica general como en particular sobre los procesos morfodinámicos en la región.

Los relevamientos obtenidos fueron medidos en profundidad respecto del nivel de agua, para lo cual se debió referir a un único sistema de referencia altimétrico, en este caso el cero del IGN, como se explica a continuación.

4.2.2 Resultados hidrodinámicos

En primer lugar, se analizaron los resultados hidrodinámicos obtenidos de la simulación forzada con las condiciones hidrológicas correspondientes al cuantil 0,5 (Figura 4.3). Al analizar el total del dominio se observan velocidades que llegan hasta 1,2 m/s concentradas especialmente en el centro del curso.

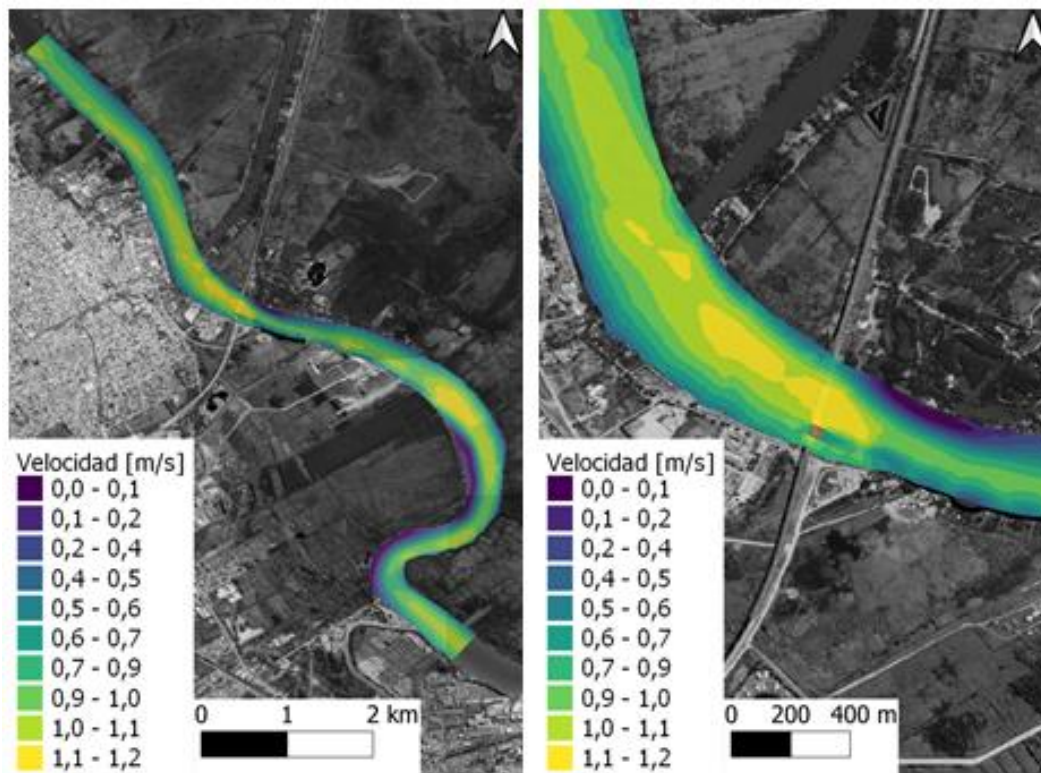


Figura 4.3. Campo de velocidades asociado al cuantil 0,5. Total del dominio (izquierda) y región en estudio (derecha).

Luego se compararon los resultados hidrodinámicos obtenidos entre los tres cuantiles considerados; para dicha comparación se calcularon las diferencias entre los campos de velocidades de cada escenario respecto al correspondiente con las condiciones medias. Para el caso del cuantil 0,9 (Figura 4.4) se aprecia claramente el sustancial descenso de velocidades que un menor caudal (y su nivel asociado) implica en el curso; las diferencias de velocidad entre

dicho escenario y la condición media se encuentre entre 1 m/s y 0,6 m/s en las regiones principales del curso, mientras que en las regiones de baja velocidad no se aprecian cambios importantes. Cabe aclarar que, tanto para este escenario hidrológico como para aquel correspondiente al cuantil 0,1, el caudal ingresante al dominio por el Canal Irigoyen permaneció constante e igual a 300 m³/s, motivo por el cual eventuales cambios de velocidad allí relacionados con la situación hidrológica no fueron tomados en cuenta.

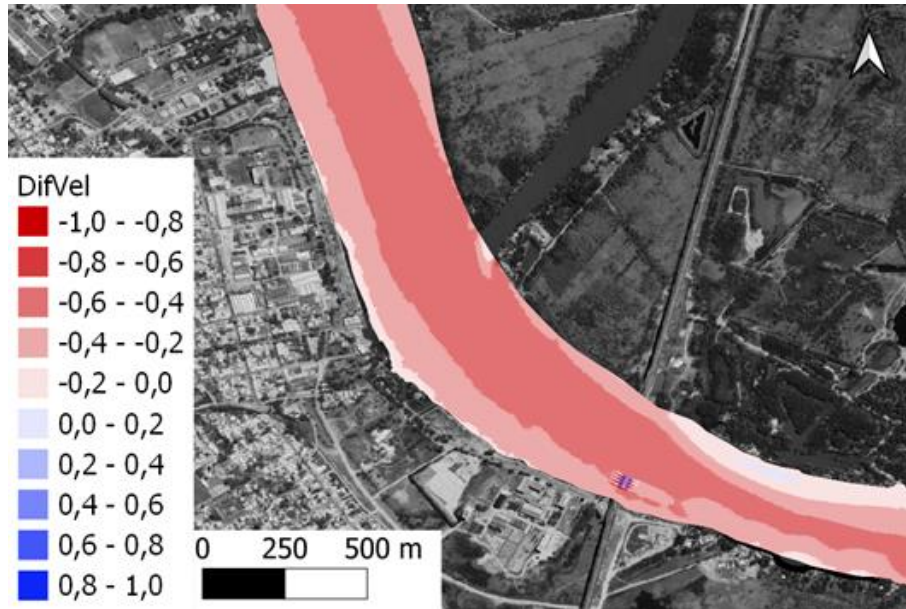


Figura 4.4. Diferencia de velocidad (m/s) entre cuantiles 0,9 y 0,5 (Estiaje vs Normal).

Para el caso del cuantil 0,1 (Figura 4.5), en el que las velocidades superan ampliamente a aquellas desarrolladas en el cuantil 0,5, las diferencias entre sendos campos escalares adquieren valores cercanos a los 0,8 m/s en las zonas centrales del curso, mientras que disminuyen en las regiones de menores velocidades como ser la margen interna de la costa y el área donde, sobre la costanera de Zárate, se observan procesos importantes de sedimentación.

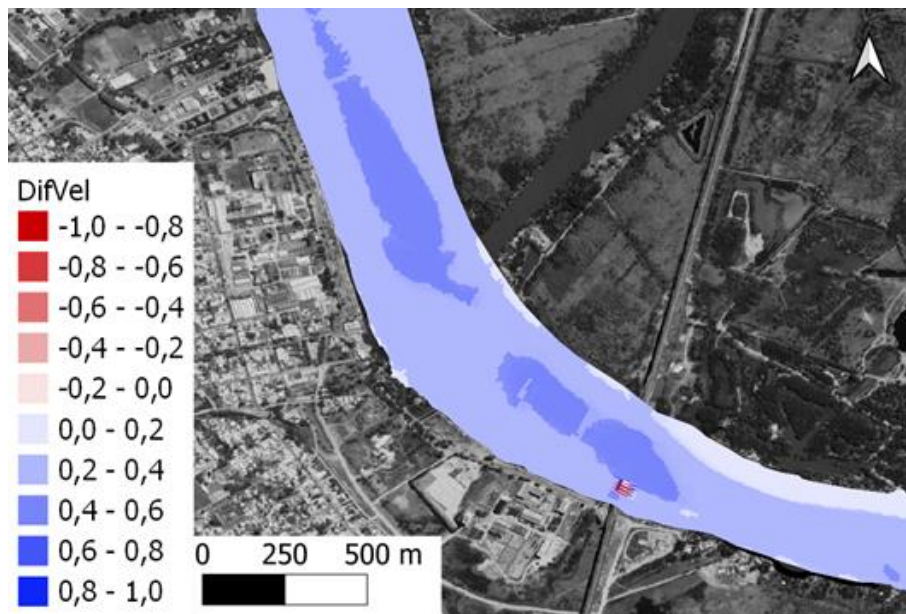


Figura 4.5. Diferencia de velocidad entre cuantiles 0,1 y 0,5 (Crecida vs Normal).

4.2.3 Resultados morfológicos

El primer resultado en ser estudiado fue el correspondiente al escenario Normal (cuantil 0,5). El análisis se realizó mediante la variable cambio morfológico acumulado, que permite determinar fácilmente los valores de erosión (negativos) o sedimentación (positivos) simulados en todo el dominio. Los resultados en cuestión (Figura 4.6) muestran valores de cambios morfológicos relativamente elevados en ambas márgenes al comienzo del dominio, con procesos moderados en el centro del curso donde el lecho resulta más grueso. Inmediatamente aguas abajo del puente de Zárate se observa una marcada región de sedimentación en el centro del curso, mientras que más aguas abajo de Zárate no se aprecian procesos erosivos generalizados de magnitud relevante, sino que se observan valores relativamente pequeños de cambios morfológicos (entre -0,4 y 0,3m) mayoritariamente, con algunas regiones esporádicas con sedimentación cercana a los 2m.

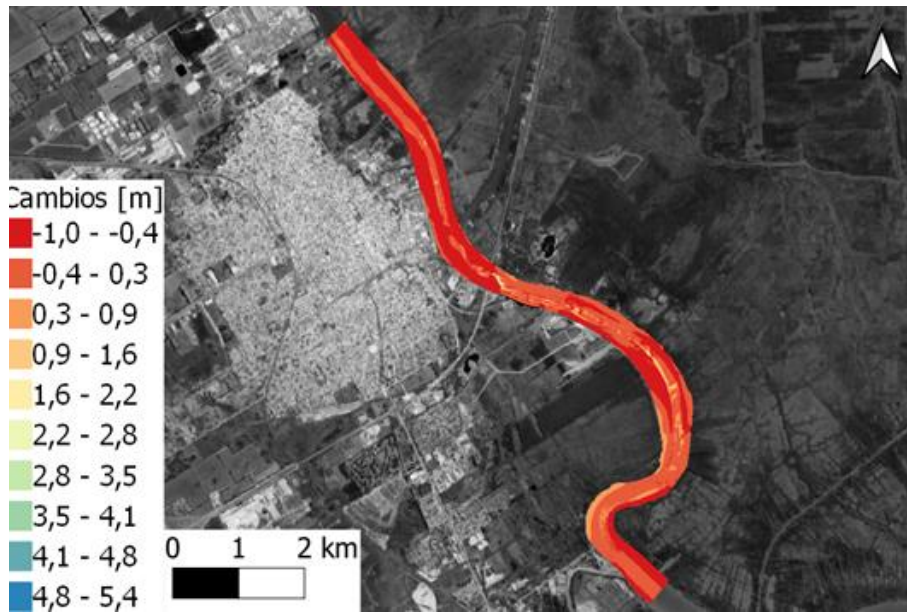


Figura 4.6. Cambios morfológicos en la totalidad del dominio.

Particularmente en la región en estudio (Figura 4.7) no se observan procesos morfológicos sustanciales. En la región de la costanera se observa sedimentación persistente, hasta aguas arriba del puente, a partir de donde por aproximadamente 500 m se observan procesos erosivos. Sin embargo, en la región circundante al área donde se dio el deslizamiento de tierra recientemente no se observan fenómenos erosivos de magnitud.

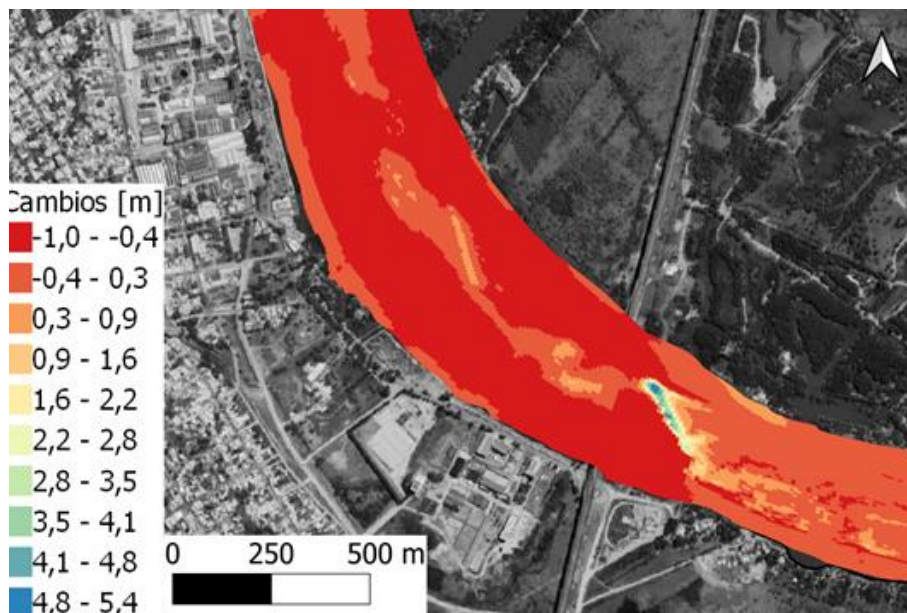


Figura 4.7. Cambios morfológicos en la región en estudio.

Para el análisis de la incidencia que las condiciones hidrológicas tienen sobre los procesos morfológicos en la región, se comparó la variable cambio morfológico acumulado de cada

escenario en relación a la condición Normal. El indicador a ser empleado para la visualización de los resultados se definió como el cociente del resultado para cada escenario con el correspondiente al de condiciones medias. En caso de que ambas simulaciones predijeran sedimentación el indicador adopta valores positivos y en el caso de erosión, negativos, mientras que, si el comportamiento cambia de un escenario al otro, no se grafica dicho valor. De esta manera se obtiene un indicador que permite describir en qué medida cada escenario magnifica los cambios producidos en condiciones Normales, dejando de lado cambios en el resultado morfodinámico neto.

En el caso del escenario de estiaje (Figura 4.8) se aprecia sedimentación en ambas áreas de interés salvo pequeñas regiones particulares aguas debajo del deslizamiento. En el resto del dominio las diferencias en el comportamiento morfológico son poco significativas, resultando erosión de menor intensidad que en el caso de condiciones medias.

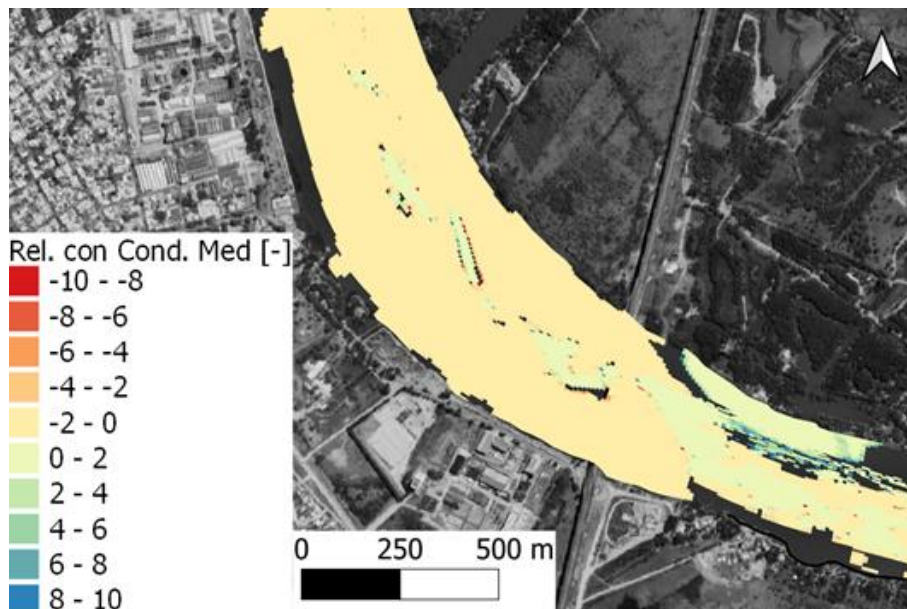


Figura 4.8. Cambios morfológicos del escenario de Estiaje en relación al escenario Normal.

Por su parte, el escenario de Crecida muestra un aumento relevante de la erosión prácticamente en todo el dominio, salvo en aquellas zonas de profundidad relativamente alta donde o bien el comportamiento sedimentológico es el opuesto al observado en condiciones medias o se produce una sedimentación sustancialmente mayor (debido a la mayor cantidad de sólidos erosionados aguas arriba que depositan allí).

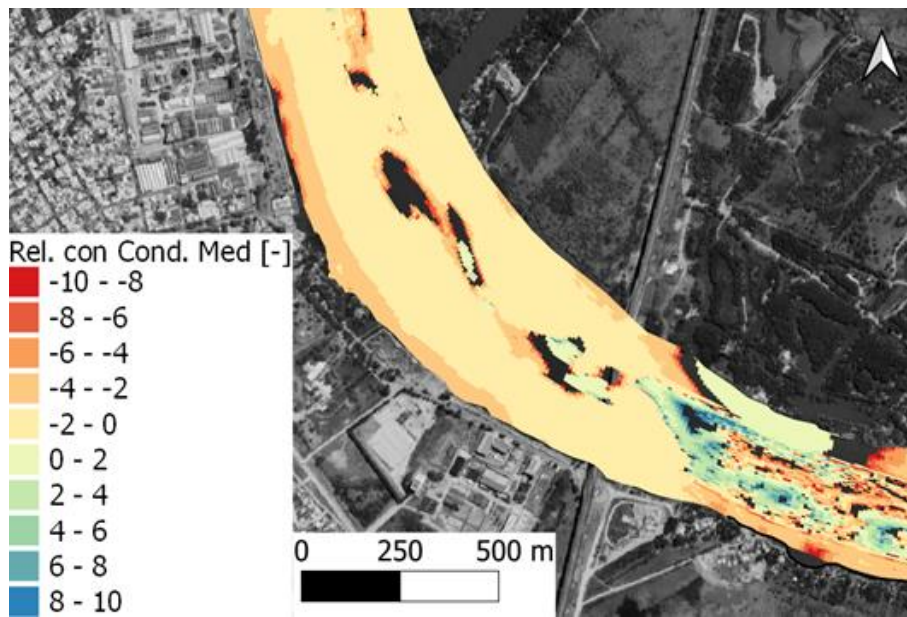


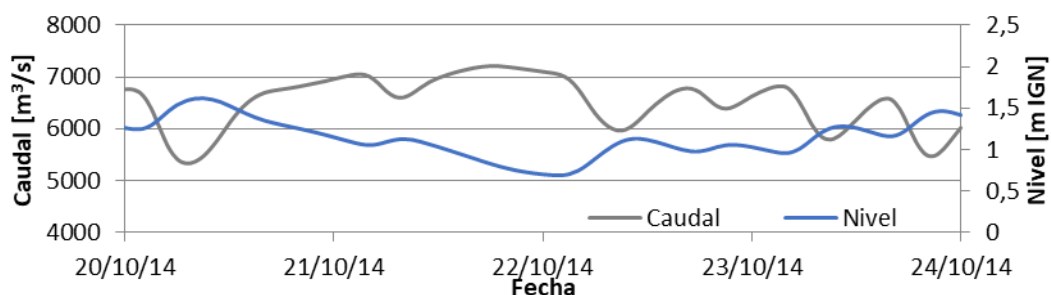
Figura 4.9. Cambios morfológicos del escenario de Crecida en relación al escenario Normal.

4.3 Eventos

4.3.1 Definición de escenarios

Para la definición de eventos se procedió a estudiar la serie de niveles y caudales históricos simulados por el modelo unidimensional del Delta. Tanto para eventos de sudestada como de bajante, se buscó definir situaciones de importantes cambios respecto a las condiciones medias, pero sin por ello emplear escenarios extraordinarios; de esta manera se espera poder representar correctamente una situación relativamente regular en el curso a pesar de no ser las medias.

Para el evento de bajante (Figura 4.10) se consideró relevante definir un período de tiempo para el cual el caudal fuera elevado a la vez que el nivel adquiriera valores relativamente bajos. Por lo tanto, se tomó el intervalo de tres días comprendido entre el 20/10/2014 y 24/10/2014, momento en el cual el caudal es de aproximadamente 7000 m³/s y el nivel mínimo 0,7 m IGN. Por su parte, para el evento de sudestada se buscó un nivel de agua relativamente alto simultáneo con un caudal bajo o incluso invertido, por lo que se definió el evento como lo sucedido entre los días 27/08/2022 y 30/08/2022.



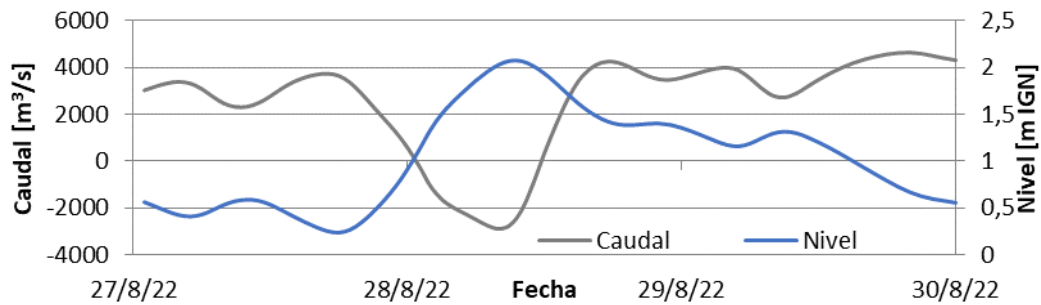


Figura 4.10. Escenarios de eventos de bajante (arriba) y sudestada (abajo).

4.3.2 Resultados hidrodinámicos

Para el caso de los escenarios correspondientes a eventos particulares, la comparación de velocidades respecto al escenario de condiciones normales se realizó en instantes puntuales de cada simulación a fin de poder comparar el momento más relevante de cada caso en lo que respecta a la dinámica sedimentológica. Para el caso del evento de bajante, donde la velocidad es elevada debido al alto caudal y al bajo nivel, se comparó el escenario Normal con el momento de mayor velocidad (donde consecuentemente se espera mayor erosión), mientras que para el evento de sudestada el instante a ser comparado será aquel de caudal prácticamente nulo, donde el campo de velocidades será mínimo.

En el caso del evento de sudestada, donde se analizó el momento de menor velocidad (Figura 4.11), se observa que mayoritariamente el campo de velocidad en dicho escenario es menor que el correspondiente a condiciones medias, salvo en las regiones de mayor profundidad que se encuentran aguas abajo del Puente de Zárate. Por otra parte, en la región frente a la costanera de la ciudad parecería no haber grandes cambios en lo referido al campo de velocidades.

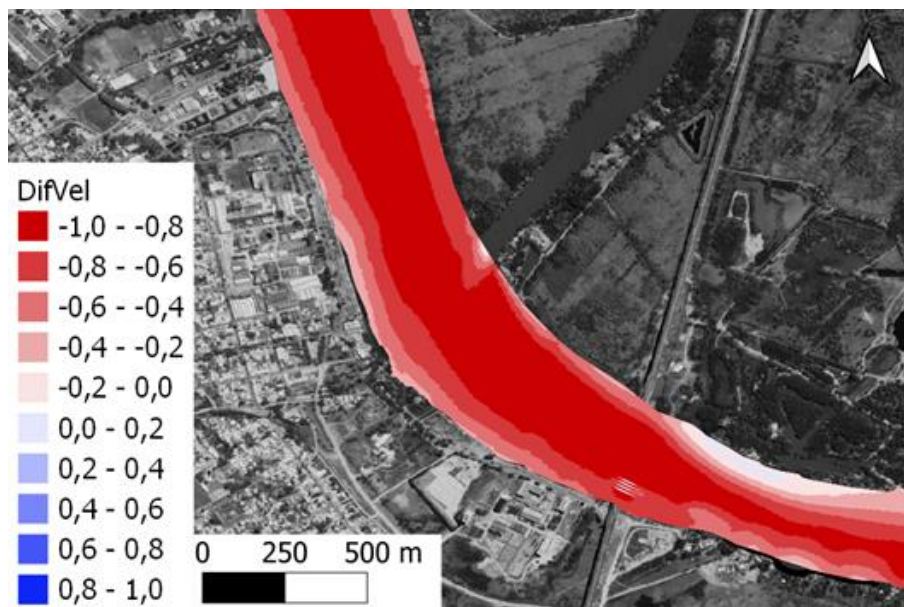


Figura 4.11. Diferencia de velocidad en el escenario de sudestada (respecto de la situación Normal).

En segundo lugar, el evento de bajante (Figura 4.12), para el cual se tomó como representativo el momento de mayor velocidad, presenta velocidades sustancialmente mayores a aquellas simuladas en el escenario medio (comprendidos entre 0,4 y 1 m/s según la zona), salvo en la región de mayor profundidad, donde las velocidades fueron sustancialmente menores.

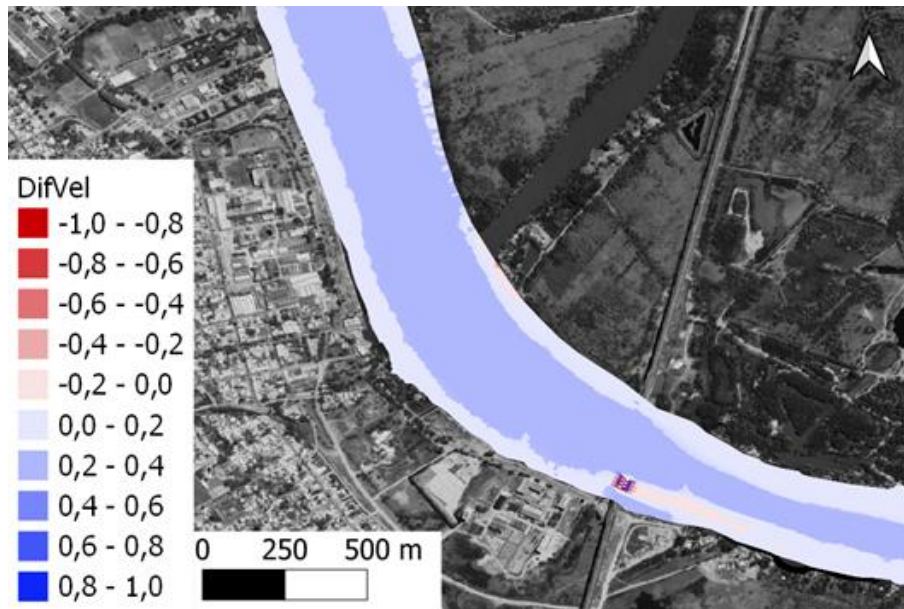


Figura 4.12. Diferencia de velocidad en el escenario de bajante (respecto de la situación Normal).

Del análisis de ambos escenarios resulta importante destacar en primera instancia la baja incidencia aparente que tienen los escenarios contemplados en la región donde se observó sedimentación frente a la costanera de Zárate. En segundo lugar, en la región del deslizamiento de la margen tampoco se observan cambios sustanciales en el campo de velocidades, aunque sí en las regiones circundantes. Por último, resulta importante señalar que en la comparación de los escenarios impermanentes tomó relevancia la batimetría del curso. Los cambios abruptos de velocidad, en ambos casos, muestran coincidencia con cambios importantes en la velocidad para ambos escenarios. Por ejemplo, en el área de mayor profundidad ubicada aguas abajo del Puente se puede observar una distinción clara del campo de velocidad.

4.3.3 Resultados sedimentológicos

Análogamente a lo realizado para el caso de los escenarios permanentes, se procedió a comparar la variable cambio morfológico acumulado simulada para los eventos de sudestada y bajante con aquellos obtenidos bajo condiciones Normales. Para el primer caso (Figura 4.13), se observa un aumento de la sedimentación en la margen del río donde se encuentra la Costanera de la ciudad. Así mismo, frente al área donde se desarrolló el deslizamiento se observa también un incremento de la sedimentación, aunque intercalado con regiones de pequeña extensión donde se erosionó el lecho respecto al escenario de condiciones medias. En el resto del dominio dichas diferencias son pequeñas o, si no, esporádicas.

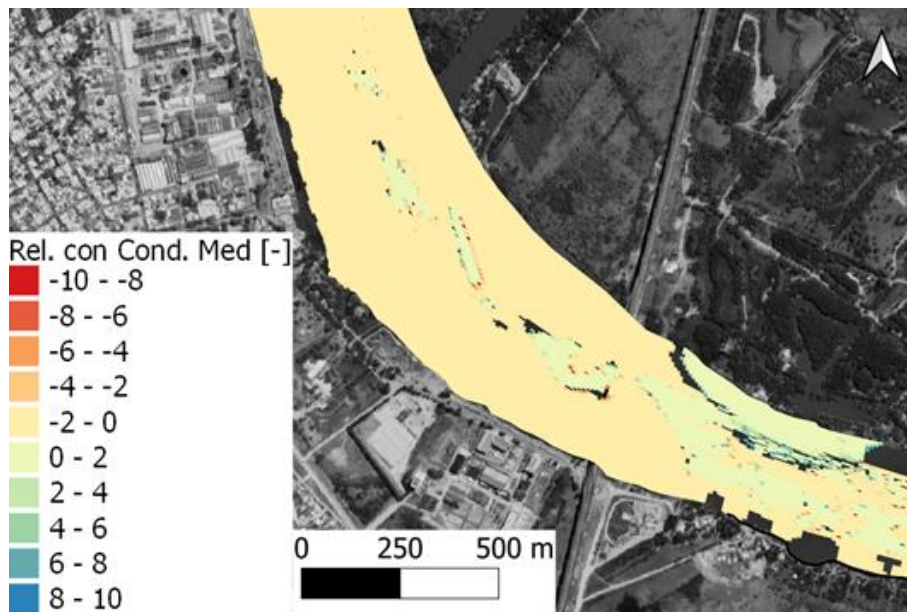


Figura 4.13. Cambios morfológicos del escenario de sudestada en relación al escenario Normal.

Por su parte, el escenario de bajante (Figura 4.14) se observa un aumento de la erosión respecto al de condiciones medias de características inversas a lo observado en el evento de sudestada: en la región de la costanera se observa un importante fenómeno erosivo, así como también en la zona del deslizamiento.

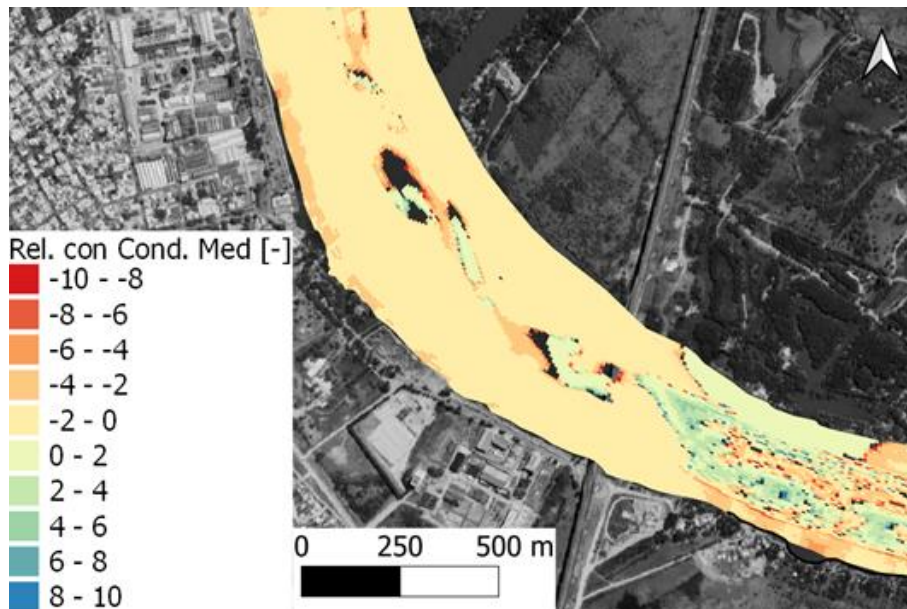


Figura 4.14. Cambios morfológicos del escenario de bajante en relación al escenario Normal.

4.4 Erosión futura: perspectiva más desfavorable

Con el objetivo de contar con el escenario más desfavorable a futuro se realizaron simulaciones teniendo en cuenta la batimetría actual (con el sector erosionado aguas abajo del puente). Para

esto los escenarios seleccionados fueron el “normal de condición permanente” que sirve como referencia y el de Bajante del Río de la Plata, que como se presentó en el apartado anterior muestra las mayores erosiones en el dominio.

Se centró el análisis de estos resultados en el área circundante al deslizamiento ocurrido en aguas abajo de la ciudad de Zárate, empleando la variable cambio morfológico acumulado para cada uno. Para el caso de condiciones medias hidrológicas del curso (Figura 4.15) se observa que en la región donde ocurrió el desmoronamiento de la costa se desarrolla un área de sedimentación de moderada intensidad, rodeada por regiones de muy baja erosión. Incluso se observa cierto desplazamiento del área de sedimentación aguas abajo de la región deslizada.

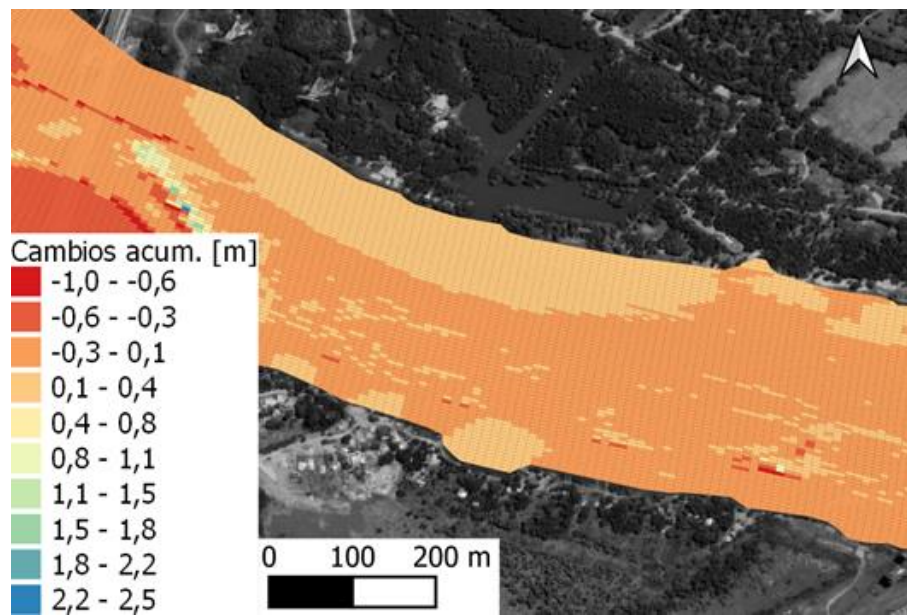


Figura 4.15. Cambios morfológicos acumulados en el escenario de condiciones medias considerando el deslizamiento de costa.

Por su parte, el escenario de bajante (Figura 4.16) también presenta sedimentación concentrada en el área deslizada. Sin embargo, en este caso se halla rodeada por regiones de mayor erosión costera, lo que parecería indicar un progresivo retroceso de la margen al suceder este tipo de eventos, especialmente aguas abajo del área de estudio.

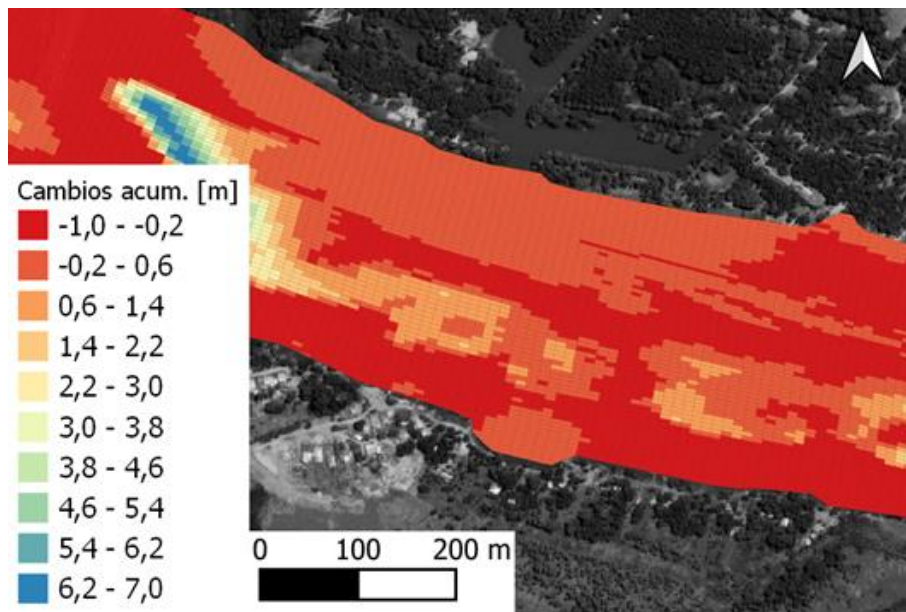


Figura 4.16. Cambios morfológicos acumulados en el escenario de bajante considerando el deslizamiento de costa.

5 Resumen y consideraciones

Relevamientos batimétricos

- De los relevamientos e imágenes satelitales se observa en primer lugar que la zona que tuvo un deslizamiento de la margen presenta el talweg cerca de esa margen sin embargo no parece el único motivo para registrar un fenómeno de este tipo, sino que se combina con una inestabilidad propia del talud debido a bajos niveles del río
- Por otra parte, los perfiles obtenidos muestran que hacia aguas abajo (del deslizamiento) la pendiente del perfil es más alta que las de aguas arriba lo que podría ser susceptible de futuras inestabilidades del talud (deslizamiento).
- En la zona en la que se observa sedimentación, el talweg se encuentra alejado de dicha margen, y la tendencia podría ser de progresiva acreción frente al Paseo de la Ribera.
- Las imágenes de barrido lateral de los pilotes del puente no muestran formas de fondo compatibles con erosiones locales significativas.

Aforos y velocidades

- Se realizaron aforos en condiciones hidrodinámicas diferentes y en ambos casos las mediciones muestran conclusiones que acompañan los relevamientos batimétricos, con concentración de velocidades en el centro de cauce aguas abajo del puente. Esto descarta la incidencia directa de velocidades erosivas sobre la zona donde se produjo el deslizamiento de la costa.
- Aguas arriba del puente, las bajas velocidades en la zona de sedimentación (margen derecha), indica que acreción podría continuar.
- Resulta interesante destacar el aumento significativo de caudales bajo condiciones de bajantes del Río de la Plata, que en este caso alcanzaron casi el 1.5 veces el caudal medido en condiciones normales.

Modelo hidrosedimentológico

- Se ha desarrollado una herramienta para la toma de decisiones, como por ejemplo la evaluación de medidas estructurales que busquen mitigar los fenómenos morfológicos que tienen lugar en la Costa de Zárate.
- Las simulaciones en condiciones permanentes muestran que para condiciones de Estiaje (cuantil 0,9) las velocidades se reducen entre 0,6 y 1 m/s respecto de la situación Normal (cuantil 0,5). Por el contrario, para Crecida (cuantil 0,1) las diferencias se revierten con incrementos medios de 0,8 m/s.
- Las simulaciones morfológicas muestran una tendencia a la sedimentación para condiciones de Estiaje (respecto de una situación Normal) y erosión en Crecida. Destacándose valores significativos de erosión en la zona coincidente con el deslizamiento.
- De los resultados obtenidos a partir del modelo numérico, se observa que, si bien los fenómenos de sedimentación son captados satisfactoriamente, el proceso que dio origen al deslizamiento de la margen derecha aguas abajo del puente no puede ser explicado enteramente mediante el modelo. Esto no radica en una limitación propia de la herramienta numérica, sino que deben tenerse en cuenta que los fenómenos de erosión próximos a la margen (como lo que se registran en el Escenario de Bajante del Río de la Plata), favorecen la inestabilidad de los taludes de la costa, que sumado a un escenario de bajante prolongado del río Paraná, derivan en una falla de la margen.
- Todos los elementos contribuyen a que los fenómenos morfológicos puedan incrementarse en el mismo sentido en el que se han desarrollado en los últimos años, en especial si se mantienen escenarios de bajante extrema del río Paraná.

Referencias

INA (2019) Modelo Hidro-Sedimentológico del río Paraná de las Palmas. Evaluación de la pluma de concentraciones por dragado de mantenimiento en la terminal Petromining S.A.

Re y otros (2009). Metodología para la generación de series temporales de descarga sólida de los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú

Servicio de consultoría para el estudio de factibilidad técnico – económica del próximo período de concesión del sistema de Navegación Troncal. Comitante: Cámara de Puertos Privados Comerciales – Bolsa de Comercio d Rosario Asoc. Civil – Cámara de Actividades Portuarias y Marítimas Asoc. Civil – Exolgan S.A. – LDC Argentina S.A. – Terminal Zárate S.A. – Aceitera General Deheza S.A. – Bunge Argentina S.A. – Ternum Argentina S.A. – Siderca S.A.I.C. – Acindar Industria Argentina de Aceros S.A. – Asociación de cooperativas Argentinas Coop. Ltda – Puerto de Asis. Institución Ejecutante: Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA), 2019 – 2020.

Van Rijn (2017) Siltation study of Euroamerica Terminal at Campana, Argentina