



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA

ESTUDIO DE EROSIÓN PARA LA COLA DE LA ISLA GUÁSCARAS

Informe Final



Proyecto LHA 341
Informe LHA 03-341-14
Ezeiza, Enero de 2014

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Emilio A. LECERTÚA

INFORME PRODUCIDO POR

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

ESTUDIO DE EROSIÓN PARA LA COLA DE LA ISLA GUÁSCARAS

Informe Final

RESUMEN

Se presenta un análisis de la evolución morfológica reciente en torno a la cola de la Isla Guáscaras, que discrimina cambios regionales asociados a la dinámica del flujo de cambios locales relacionados a la obra de recomposición construida en 2008. Se describe la implementación y validación de un modelo hidrodinámico bidimensional para representar a las corrientes en ambos brazos del río. Se implementa y aplica un modelo morfológico para analizar el rol de protección del espigón para la margen derecha recompuesta, sobre la que se detectaron erosiones extendidas al pie de obra. En base a los resultados del análisis, se efectúan recomendaciones para aumentar el grado de estabilidad de la obra.

Descriptor temático: Morfología Fluvial, Erosión Local, Modelación Numérica, Modelación Morfológica.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
2	ANÁLISIS MORFOLÓGICO	4
2.1	Antecedentes	4
2.2	Obra de Recomposición	6
2.3	Relevamientos batimétricos	7
2.4	Evolución hidrológica	20
2.5	Erosión al pie de la obra	23
2.6	Granulometría	24
3	MODELACIÓN	30
3.1	Estrategia de modelación	30
3.2	Modelo hidrodinámico	31
3.3	Modelación morfológica	43
3.4	Erosión local	45
3.5	Ensayos preliminares	48
3.6	Validación del modelo morfológico	53
4	ANÁLISIS DE EROSIÓN	57
4.1	Diagnóstico	57
4.2	Acciones complementarias	60
5	CONCLUSIONES	65

1 INTRODUCCIÓN

La Torre 465 de la LEAT (Línea de Alta Tensión) de 500 kV entre la ET (Estación Transformadora) Paso de la Patria y la ET Resistencia, que transporta energía desde la central hidroeléctrica de Yacyretá, fue fundada sobre la punta de la cola de la Isla Guáscaras, ubicada sobre el río Paraná entre la localidad de Paso de la Patria, Prov. de Corrientes, y la Isla del Cerrito, Prov. del Chaco. La construcción de la torre data de 1994.

Desde fines de la década del 90 se observó un proceso de erosión de esa punta. Este se tornó particularmente acelerado durante la primera parte de la década del 2000, provocando prácticamente la desaparición de la parte de la isla donde se asienta la torre, dejando a ésta esencialmente en aguas abiertas, lo cual la tornaba más vulnerable a una falla estructural frente tanto a la acción hidrodinámica durante las crecientes, como al peligro por la colisión de una embarcación. En función de los estudios llevados a cabo durante 2006, en el año 2008 se construyó una obra para recomponer la cola de la isla. En la Figura 1.1 se muestra una imagen satelital actual de la cola de la isla.

Esta obra cumplió con el objetivo de recomposición propuesto. No obstante, en el año 2012 se detectó una erosión significativa sobre la margen del riacho Guáscaras, lo cual plantea una nueva amenaza.

El objetivo de este estudio es efectuar un diagnóstico sobre el problema de erosión observado, y un análisis de la eficacia de eventuales obras complementarias destinadas a incrementar la seguridad. Para ello se utilizan técnicas de modelación numérica.

Previo al presente Informe Final, se produjeron dos informes parciales. En el Primer Informe, de agosto de 2013, se efectuó un análisis de la evolución morfológica del río Paraná en el entorno de la obra, se presentó la modelación preliminar de la hidrodinámica en torno a la Isla Guáscaras, y se llevaron a cabo cálculos de erosión local en torno a los espigones de la obra mediante una fórmula empírica. En el Segundo Informe, de octubre de 2013, se llevó a cabo una actualización del análisis de la evolución morfológica reciente, se presentó el modelo hidrodinámico definitivo, y se implementó y aplicó un modelo morfológico para analizar el rol de protección de margen del espigón sobre la margen derecha recompuesta.

Este Informe Final es integrador, es decir, incluye todo el trabajo realizado, constituyendo al mismo tiempo una versión superadora, en el sentido de que se han efectuado filtrados y correcciones del material presentado en los informes parciales. En el capítulo 2 se desarrolla el análisis de la evolución morfológica observada. El capítulo 3 describe y valida los modelos hidrodinámico y morfológico utilizados. El análisis de diagnóstico del efecto de la obra construida, y el análisis de la eficacia de eventuales obras complementarias, se presenta en el capítulo 4. Las Conclusiones del estudio se vierten en el capítulo 5.



Figura 1.1. Imagen de la cola de la Isla Guáscaras.

2 ANÁLISIS MORFOLÓGICO

2.1 Antecedentes

En uno de los estudios antecedentes se llevó a cabo un detallado análisis de la evolución morfológica histórica de la Isla Guáscaras¹. En base a ella se forjó una interpretación de esa evolución, válida hasta el 2006, que a continuación se repite (ver Figura 2.1):

- El tramo del río Paraná que contiene a la Isla Guáscaras muestra una *alta actividad geomorfológica* desde que se dispone de registros (1921). Ha habido formación y destrucción de islas (Islas Tres Hermanas), evolución de riachos hacia la conformación de un brazo (riacho Guáscaras y brazo secundario del Paraná) o hacia su casi desaparición (riacho Sequito), y erosión o recuperación de márgenes (Isla Guáscaras).
- Esta actividad debe responder a *cambios en la distribución de corrientes y carga sedimentaria ingresantes* al tramo, que muy probablemente estén asociados a variaciones que se producen en la *confluencia de los ríos Paraguay y Paraná*. Es decir, lo que se observa en el tramo en estudio es la respuesta del sistema a sollicitaciones que provienen de aguas arriba.
- El *riacho Guáscaras* pasó de ser un curso casi insignificante (1921) a constituirse en un *brazo significativo* del río Paraná, que transporta entre el 10 y el 20% del caudal total. Sufre *sedimentación* ante la persistencia de *bajos caudales* (como en el presente²), debido a la alta concentración de finos que transporta el agua sobre esa margen, que es por donde el Paraná receipta al Paraguay, y por donde éste recibe al Bermejo, fuente primaria de esos sedimentos. Pero también se erosiona ante el pasaje de una crecida (como en 2004).
- En la confluencia del riacho Guáscaras con el río Paraná se desarrolla un *escalón de fondo*, con una caída brusca de al menos 6 m. Esto produce la formación de un torbellino de eje longitudinal que mantiene una *hoya erosiva* al pie del escalón (hoya menor).

¹ Menéndez, A.N., Pelliccia, C.A., "Estudio de la Protección de la Fundación de la Torre 465 de la Línea de 55 kV de YACYLEC. Diagnóstico sobre la evolución morfológica de la cola de la Isla Guáscaras y recomendaciones para su control", Informe para YACYLEC S.A., octubre 2006.

² Se refiere al año 2006.

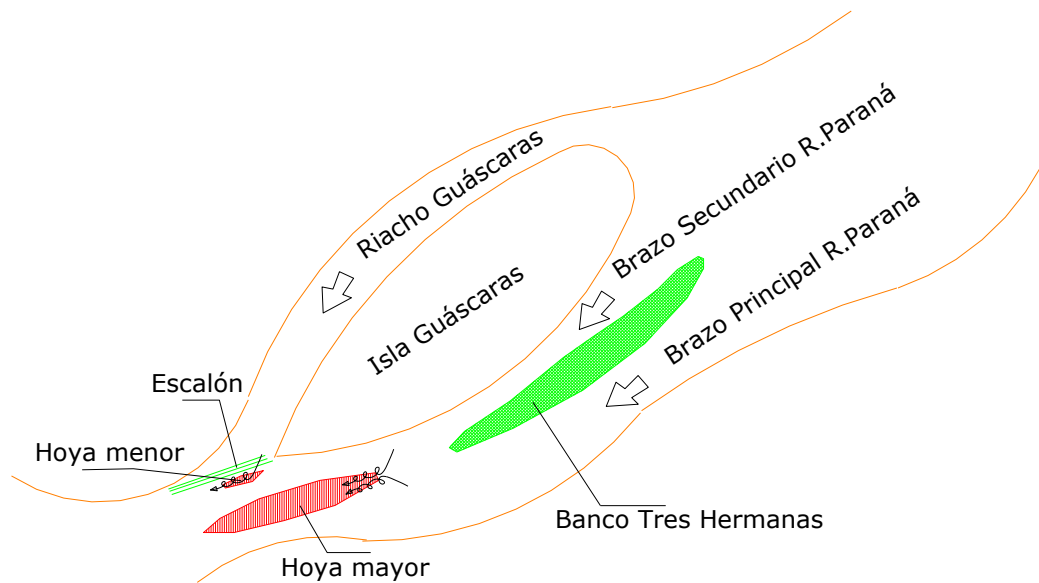


Figura 2.1. Características morfológicas en torno a la Isla Guáscaras.

- Las *Islas Tres Hermanas* se conformaron como *afloramientos de bancos*, para luego erosionarse y desaparecer como tales. Actualmente *permanecen como bancos* que crecen o decrecen en función de la evolución hidrológica del río y que dividen a éste en los dos brazos: el secundario que va por el centro, y se usa como canal navegable, y el primario que corre adyacente a la margen correntina (margen izquierda). En el encuentro de esos dos brazos, y por efecto de torbellinos de eje longitudinal, también se conforma una *hoya de erosión* (hoya mayor), cuya profundidad es variable en función de la evolución del régimen hidrológico.
- La *desaparición* de las Islas Tres Hermanas puede deberse a la acción de los *mayores caudales* que se registraron desde la década os años 70 en el río Paraná. En particular, se desarrolló el *Brazo Secundario* del río Paraná (entre las Islas Tres Hermanas y la Isla Guáscaras), que en 1985 pasó a conducir sólo un 8% menos que el Brazo Principal. La persistencia de bajos caudales, como los que se registran usualmente desde 1999³, podría dar lugar a una reversión al menos parcial de esta tendencia.
- La forma actual de la *Isla Guáscaras* ya aparece bien definida 30 años atrás. Pero ha mostrado una tendencia continua hacia el *afinamiento*, es decir, ha habido una erosión neta de sus márgenes, compatible con la persistencia de relativamente altos caudales.
- La *punta de la cola* de la Isla Guáscaras se había mantenido *relativamente estable* desde al menos los años 70. La inestabilidad parece dispararse con el pasaje de la *gran onda de crecida de 1998*.

³ Esta observación era válida para el año 2006.

- La erosión posterior de la punta posiblemente sólo sea el desarrollo de esa crisis, en la *búsqueda de una nueva situación de equilibrio medio* entre las fuerzas erosivas de la corriente y las resistivas del suelo, moduladas continuamente en función del régimen hidrológico. Es decir, se busca una nueva punta.
- La *falla de la margen izquierda de la cola*, que se detecta en el relevamiento de 2005, puede haber sido disparada por la *crecida* (ordinaria) de 2004, que ya estaba dejando su marca en el relevamiento de 2004 como una canalización adyacente a la margen izquierda de la cola que comunicaba con la hoya menor.
- La *erosión continua de la barranca subacuática* sobre la que estaba asentada la torre en 2003, que se produce en los últimos años⁴, es seguramente el resultado de la acción conjunta del torbellino de eje longitudinal al escalón de fondo, los vórtices de estela al final de la isla y los torbellinos de eje vertical producidos por las propias pilas de la torre, que terminarán de 'limpiar' esos residuos arenosos del desmoronamiento de la punta.

2.2 Obra de Reconstrucción

La obra propuesta en 2006 para la reconstrucción de la cola de la Isla Guáscaras⁵ se construyó en el año 2008 (Figura 2.2). En esencia, consiste en un relleno por refulado de arena de río, protegido por espigones deflectores de roca de tamaño graduado (uno a cada lado de la isla), sobre un núcleo conformado por geotubos.

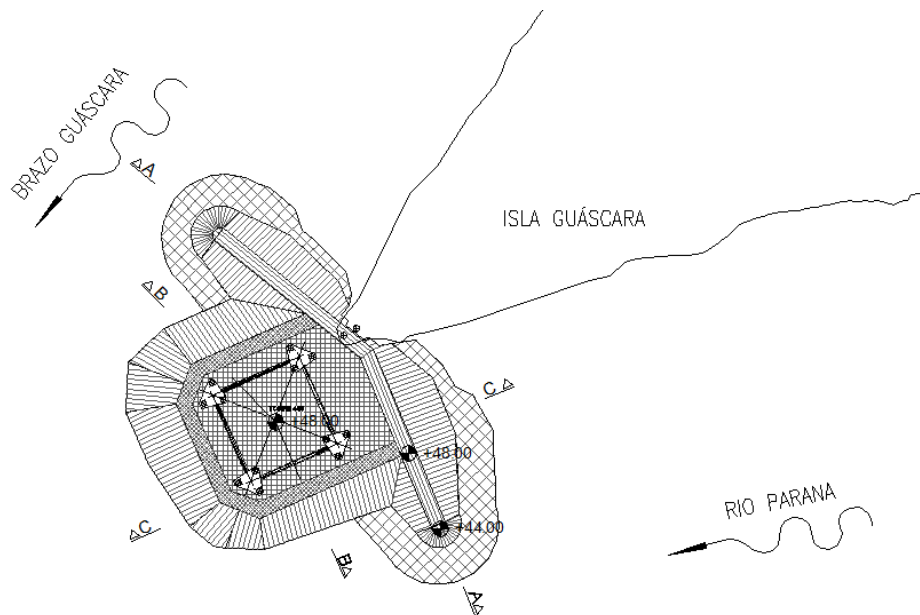


Figura 2.2. Obra de reconstrucción de la cola de la Isla Guáscaras.

⁴ Se refiere al periodo anterior a 2006.

⁵ Menéndez, A.N., Pelliccia, C.A., "Estudio de la Protección de la Fundación de la Torre 465 de la Línea de 55 kV de YACYLEC. Diagnóstico sobre la evolución morfológica de la cola de la Isla Guáscaras y recomendaciones para su control", Informe para YACYLEC S.A., octubre 2006.

2.3 Relevamientos batimétricos

Se analizaron los datos de relevamientos batimétricos efectuados entre 2006 y 2013 en torno a la cola de la Isla Guáscaras, de modo de llevar a cabo una interpretación de la evolución morfológica reciente. Específicamente, se utilizaron los efectuados en las siguientes fechas:

- i. 15/Nov/06, a cargo de EVARSA
- ii. 30/Ene/08, a cargo de EVARSA
- iii. 18/Ago/08, a cargo de EVARSA
- iv. 25/Feb/09, a cargo de EVARSA
- v. 08/Feb/12, a cargo de EVARSA
- vi. 12/Oct/12, a cargo de Mesa Gómez Operaciones Fluviales
- vii. 23-30/Jul/13, a cargo de EVARSA

Los primeros dos son anteriores a la ejecución de la obra.

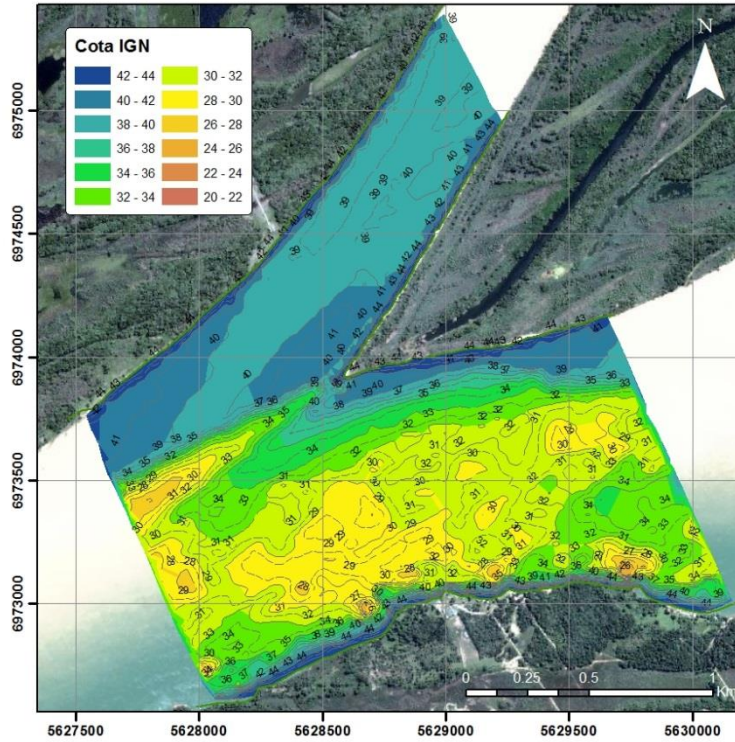
Para lograr una interpretación significativa, los datos fueron incorporados a un GIS (Sistema de Información Geográfica), sobre el cual se produjeron mapas de elevación en formato color. El procesamiento para alcanzar este producto requirió de una laboriosa tarea manual, ya que los datos fueron suministrados en formato AutoCAD como curvas de nivel discontinuas, y con la elevación especificada como números adjuntos. Los resultados se muestran en la Figura 2.3, donde se representan las curvas de nivel provistas (en línea continua para las elevaciones pares y punteada para las impares), junto con las zonas de nivel (espaciadas cada 2 m) que surgen del procesamiento efectuado con el GIS sobre un MDE (Modelo Digital de Elevación) construido en base a la técnica de TIN ('Triangulated Irregular Network'). Se observa que ambas resultan muy consistentes entre sí. En el caso del último relevamiento (julio del 13) se recurrió a los registros originales para regenerar la batimetría, ya que se detectaron errores en los datos procesados provistos⁶.

El relevamiento batimétrico de julio del 13 se llevó a cabo sobre una extensión mayor, ya que también debía servir para construir el MDE (Modelo Digital de Elevación) del lecho a ser utilizado en el modelo hidrodinámico (ver próximo capítulo); en la Figura 2.3g se presenta la batimetría sobre una ventana espacial similar a la de los relevamientos antecedentes.

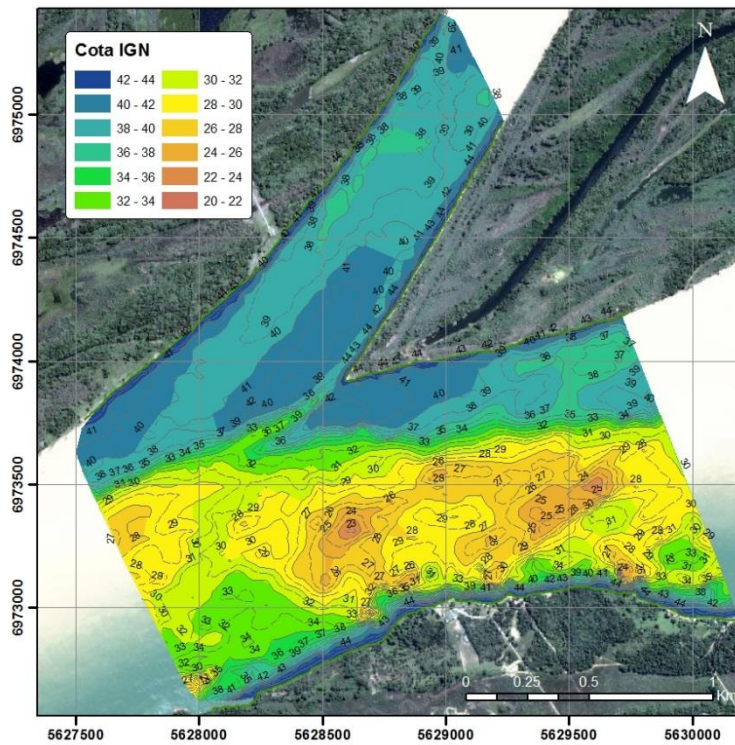
Para noviembre de 2006 (Figura 2.3a) se observa:

- La hoya mayor sobre el río Paraná, con una cota mínima menor a 28 m IGN.
- Cotas del orden de 40 m IGN sobre la margen izquierda de la Isla Guáscaras.
- La desembocadura del riacho Guáscaras, con un canal principal central a cota del orden de 39 m IGN, y un muy angosto canal secundario sobre la margen izquierda de la Isla Guáscaras, que alcanza profundidades algo menores.
- El escalón en la desembocadura del riacho Guáscaras.
- La hoya menor, con una cota mínima del orden de 28 m IGN.

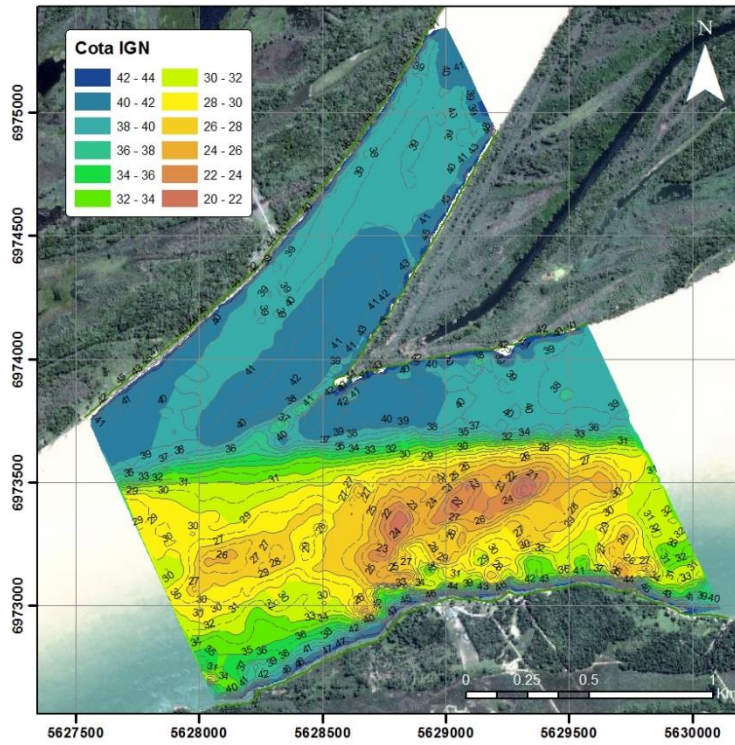
⁶ Los errores detectados se concentraron especialmente en torno a la zona de obra, donde una cantidad significativa de puntos no había sido considerada en el procesamiento, con lo cual los resultados inducían a interpretar que se había producido una gran sedimentación en esa zona, tal como fue expresado en el Segundo Informe, lo cual a la postre se comprobó que no era cierto.



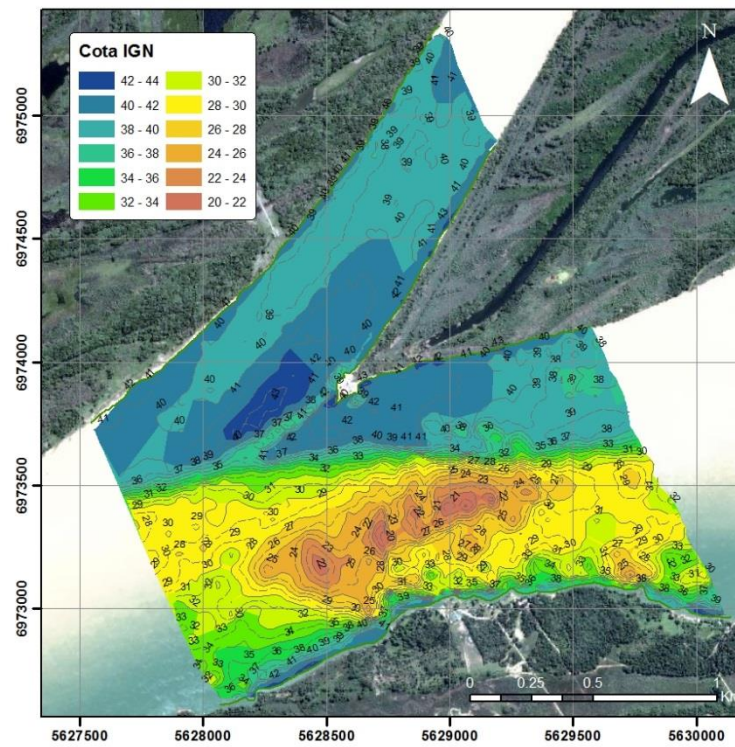
a) Noviembre de 2006



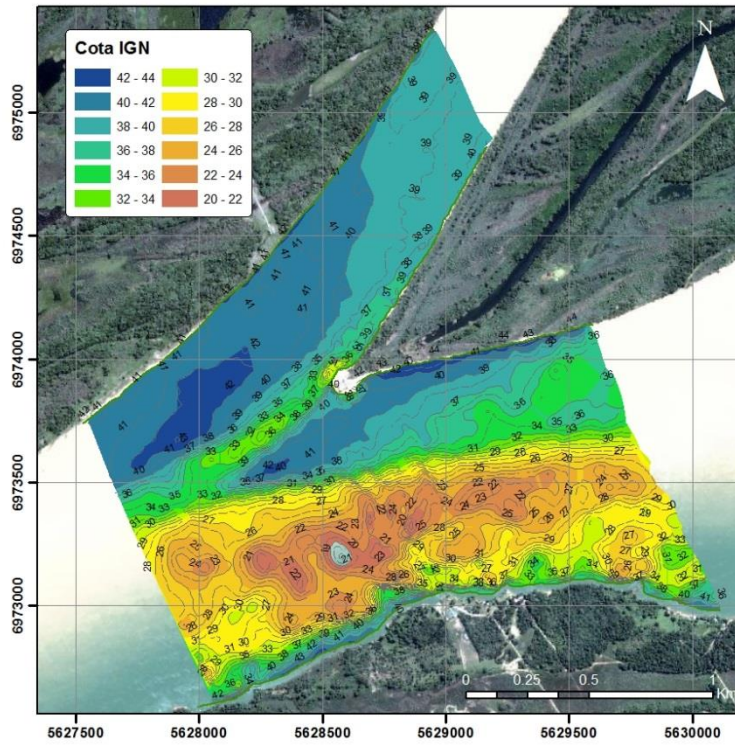
b) Enero de 2008



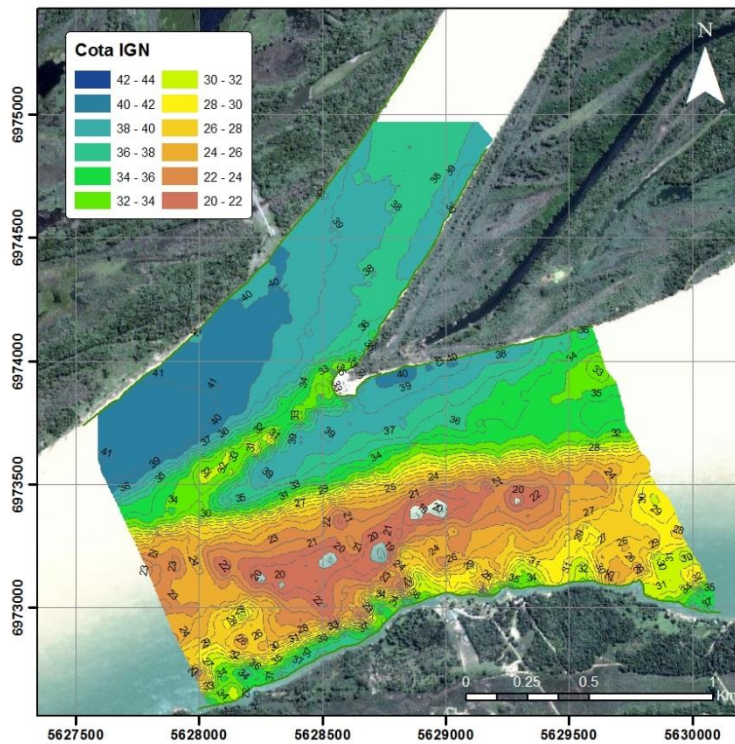
c) Agosto de 2008



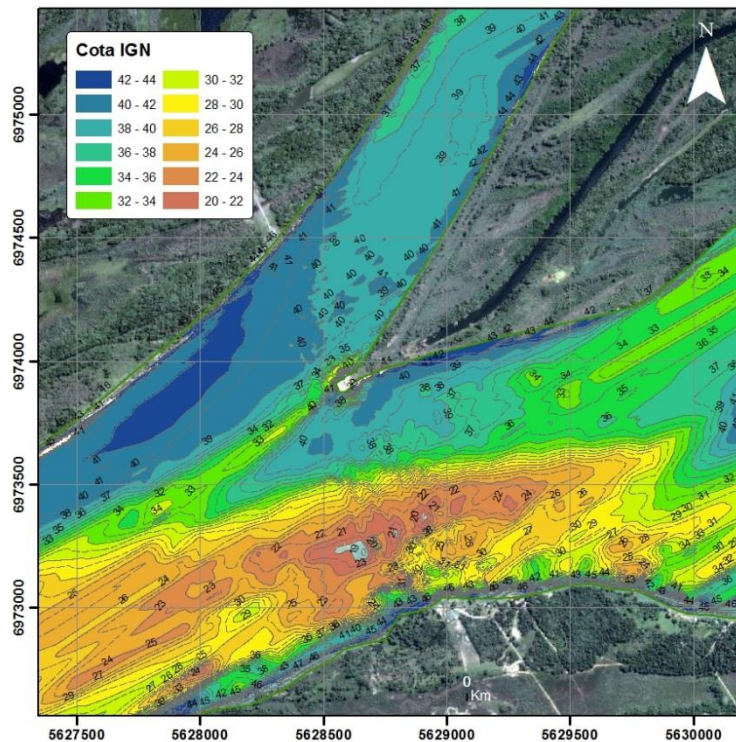
d) Febrero de 2009



e) Febrero de 2012



f) Octubre de 2012



g) Julio de 2013

Figura 2.3. Relevamientos batimétricos.

En enero de 2008 (Figura 2.3b) se distinguen los siguientes cambios:

- Un angostamiento y profundización de la hoya mayor, que alcanza cotas mínimas menores a 23 m IGN.
- Sedimentación hacia la izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Sedimentación entre el canal principal y el secundario del riacho Guáscaras.
- Ensanchamiento del canal secundario del riacho Guáscaras.
- Un corrimiento hacia aguas abajo del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras.
- Un corrimiento consecuente de la hoya menor hacia el centro del río Paraná.

En agosto de 2008 (Figura 2.3c), con la obra recién construida, se observa:

- Un mayor angostamiento y profundización de la hoya mayor, que alcanza cotas mínimas menores a 21 m IGN.
- Cotas algo menores sobre la izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Mayor sedimentación entre el canal principal y el secundario del riacho Guáscaras.
- Un angostamiento del canal principal y del secundario del riacho Guáscaras; en este último además se produce sedimentación.
- Un nuevo corrimiento hacia aguas abajo del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras.

- Un nuevo corrimiento consecuente de la hoya menor hacia el centro del río Paraná, que prácticamente la alinea con la hoya mayor, y su profundización hasta cotas mínimas menores a 26 m IGN.

Para febrero de 2009 (Figura 2.3d) se identifican los siguientes rasgos:

- Un corrimiento de la hoya mayor hacia aguas abajo.
- Sedimentación sobre la izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Incremento de la sedimentación entre el canal principal y el secundario del riacho Guáscaras.
- Relativamente poco cambio en los canales principal y secundario del riacho Guáscaras.
- Un empinamiento del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras.
- Un colapso de la hoya menor con la hoya mayor, y un atisbo de formación de una nueva hoya menor, con cotas mínimas inferiores a 28 m IGN.

En febrero de 2012 (Figura 2.3e) se producen los siguientes cambios:

- Una expansión en ambas direcciones y una profundización de la hoya mayor, que alcanza cotas mínimas inferiores a 19 m IGN.
- Erosión sobre la izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Desplazamiento del canal principal del riacho Guáscaras hacia la margen izquierda, hasta prácticamente colapsar con el secundario.
- Profundización del canal secundario del riacho Guáscaras, que alcanza cotas mínimas inferiores a 35 m IGN cerca de la punta de la Isla Guáscaras.
- Un desplazamiento hacia aguas abajo del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras.
- Una profundización de la nueva hoya menor, que alcanza cotas mínimas inferiores a 23 m IGN, y su desplazamiento hacia el centro del río Paraná hasta casi alinearse con la hoya mayor.

Para octubre de 2012 (Figura 2.3f) se observa:

- Una leve profundización de la hoya mayor.
- Erosión sobre la izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Profundización del canal del riacho Guáscaras (en el que colapsaron los canales primarios y secundarios) y tendencia a desplazarse hacia el centro del riacho.
- Poca variación del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras.
- Tendencia a conformación de una nueva hoya menor.

Finalmente, de la batimetría de julio de 2013 (Figura 2.3g) se observa:

- Una hoya mayor similar.
- Sedimentación sobre la margen izquierda de la cola de la Isla Guáscaras.
- Sedimentación general sobre todo el riacho Guáscaras.
- Poco cambio en la hoya menor.

Ahora bien, se observa un relativamente elevado grado de compatibilidad entre las batimetrías de Feb/12 y Jul/13. Las diferencias con el relevamiento intermedio, de Oct/12, pueden deberse a que esta última fue obtenida por otra empresa, con una metodología de procesamiento diferente. Esto permitiría concluir que ha habido relativamente poco cambio batimétrico al menos desde febrero de 2012.

Nótese que el cambio morfológico cualitativo más significativo en el riacho Guáscaras se da entre Feb/09 y Feb/12, cuando se produce la concentración del flujo sobre su margen izquierda, acompañada de una profundización significativa – del orden de los 4 m – del canal secundario.

La descripción anterior corresponde a la configuración morfológica sobre una escala espacial del orden del ancho del río. Para analizar el comportamiento morfológico de detalle en torno a la cola de la isla – zona de la obra –, en la Figura 2.4 se presentan ampliaciones para esa zona. Se observa claramente la aparición de la cola recompuesta desde agosto de 2008; la variación posterior de su forma representa el cambio de área seca por la variación del nivel de agua del río (para octubre de 2012 se copió la forma de febrero de ese año).

En noviembre de 2006 (Figura 2.4a) se observa:

- Barrancas relativamente extendidas hacia ambos márgenes de la isla.
- Hacia el río Paraná, cotas superiores a 41 m IGN al final de la barranca adyacente a la isla, y una pequeña hoya con cotas mínimas inferiores a 38 m IGN adyacente a la torre.
- Hacia el riacho Guáscaras, cotas inferiores a 40 m IGN sobre el canal secundario.

Para enero de 2008 (Figura 2.4b) se observa:

- Un empinamiento de la barranca sobre la margen izquierda de la isla.
- Sedimentación hacia el río Paraná, desapareciendo la pequeña hoya adyacente a la torre.
- Hacia el riacho Guáscaras, ampliación del canal secundario.

Del primer relevamiento luego de la construcción de la obra, en agosto de 2008 (Figura 2.4c), surgen las siguientes observaciones:

- Empinamiento de las barrancas en ambos márgenes.
- Hacia el río Paraná, formación de una pequeña fosa adyacente a la obra, con cota mínima menor a 39 m IGN.
- Hacia el riacho Guáscaras, angostamiento del canal secundario y aparición de una pequeña fosa sobre éste, adyacente a la obra, donde la cota mínima también es menor a 39 m IGN.

Para febrero de 2009 (Figura 2.4d) se observa:

- La casi desaparición de barrancas extendidas sobre ambos márgenes de la isla, salvo por la zona de playa aguas arriba del espigón de margen izquierda.
- La fosa del lado del río Paraná se agranda y profundiza, llegando a una cota mínima menor a 38 m IGN – es decir, una erosión de alrededor de 1 m respecto de agosto de 2008.
- La fosa del lado del riacho Guáscaras también se agranda y se profundiza, alcanzando una cota mínima menor a 37 m IGN – es decir, una erosión de alrededor de 2 m respecto de agosto de 2008.

En febrero de 2012 (Figura 2.4e) se observa:

- Reparación de una barranca extendida sobre margen izquierda de la isla, aguas arriba de la obra.
- Concentración de la fosa del lado del río Paraná hacia aguas abajo del espigón, alcanzando una cota mínima algo menor a 34 m IGN – es decir, una erosión de alrededor de 4 m respecto de febrero de 2009 y de 5 m respecto de agosto de 2008.
- Análogamente, concentración de la fosa del lado del riacho Guáscaras hacia aguas abajo del correspondiente espigón, llegando a una cota mínima menor a 30 m IGN – es decir, una erosión de alrededor de 7 m respecto de febrero de 2009 y de 9 m respecto de agosto de 2008 –, pero dentro de una tendencia en la que todo el canal secundario del riacho se profundizó aproximadamente 4 m – por lo que la profundización efectiva total desde 2008 sería de aproximadamente 5 m.

Del relevamiento de octubre de 2012 (Figura 2.4f) se observa:

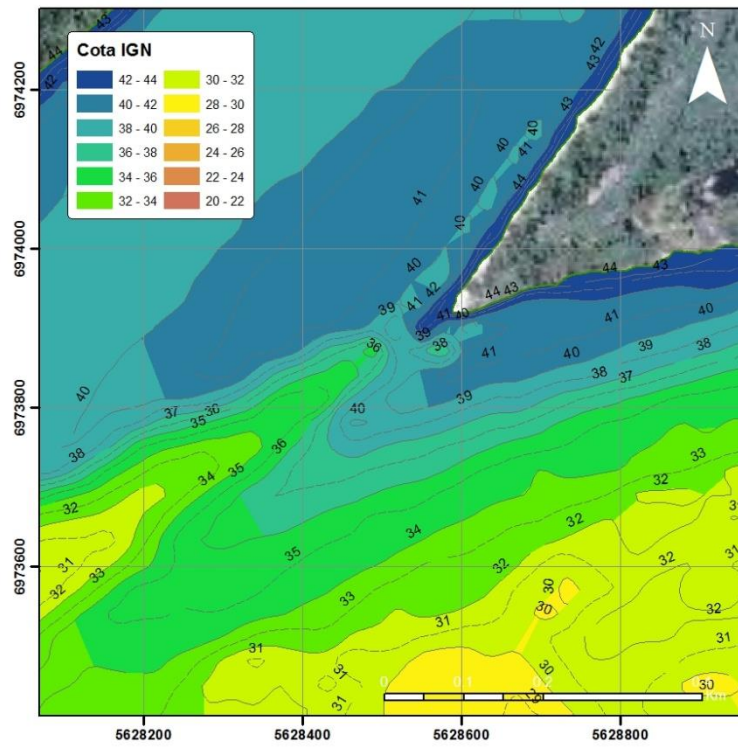
- Erosión de la barranca extendida sobre margen izquierda de la isla, aguas arriba de la obra.
- Erosión del fondo sobre ambos márgenes de la isla en la zona de la obra.
- De todos modos, tal como se comentó más arriba, estas tendencias pueden estar sesgadas por diferencias de procesamiento respecto de la batimetría de Feb/12.

Para la batimetría de julio de 2013 (Figura 2.4g) se observa, comparándola con la de febrero de 2012 (Figura 2.4e):

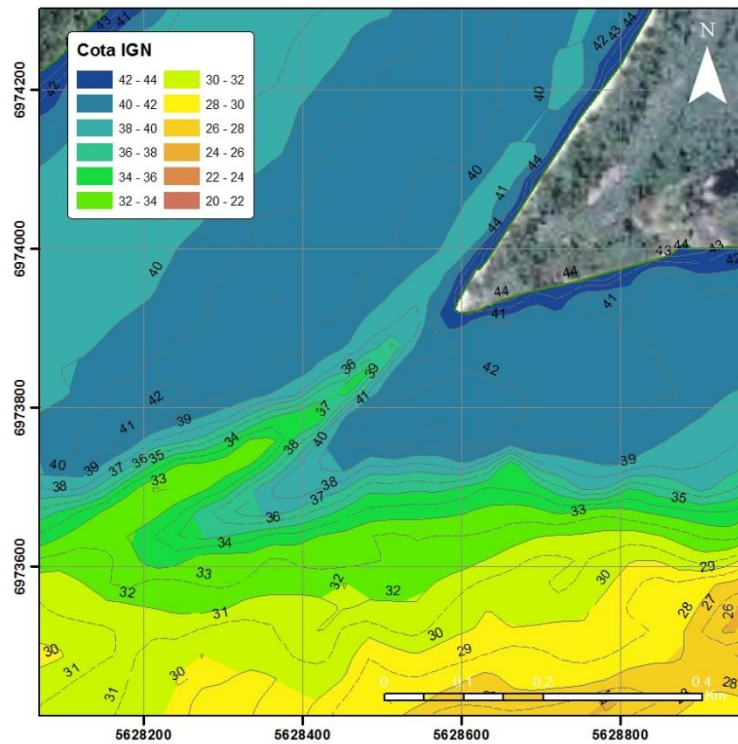
- Una compatibilidad general relativamente alta.
- Sedimentación en el canal secundario del riacho Guáscaras, aguas arriba de la obra.
- Relativamente poco cambio en las fosas de aguas abajo de los dos espigones (sobre el río Paraná y el riacho Guáscaras).
- Una leve profundización de la hoya menor.

En síntesis, luego de una etapa de tendencias esencialmente erosivas en torno a la zona de obra, que se extiende entre noviembre de 2006 y febrero de 2012, se detecta una relativa estabilización morfológica, acompañada incluso de una relativamente leve sedimentación en el canal del riacho Guáscaras.

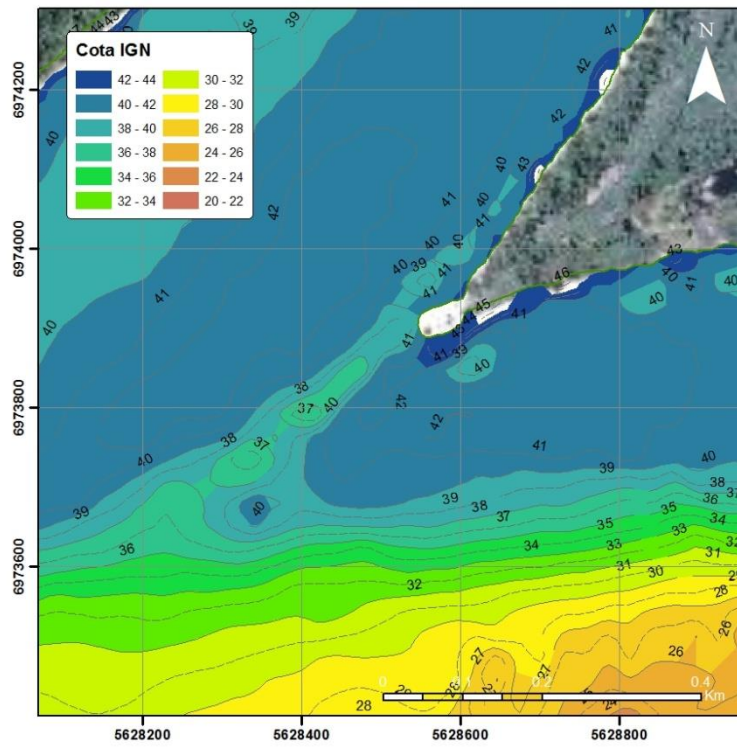
Las dos fosas de erosión están asociadas a la presencia de los respectivos espigones. Desde su detección, en agosto de 2008, hasta el relevamiento de febrero de 2012, estas fosas se consolidaron y profundizaron en alrededor de 5 m. No puede descartarse que la formación de la fosa asociada al espigón de la margen del riacho Guáscaras haya incentivado la concentración del flujo sobre su margen izquierda, y la consiguiente profundización del canal secundario.



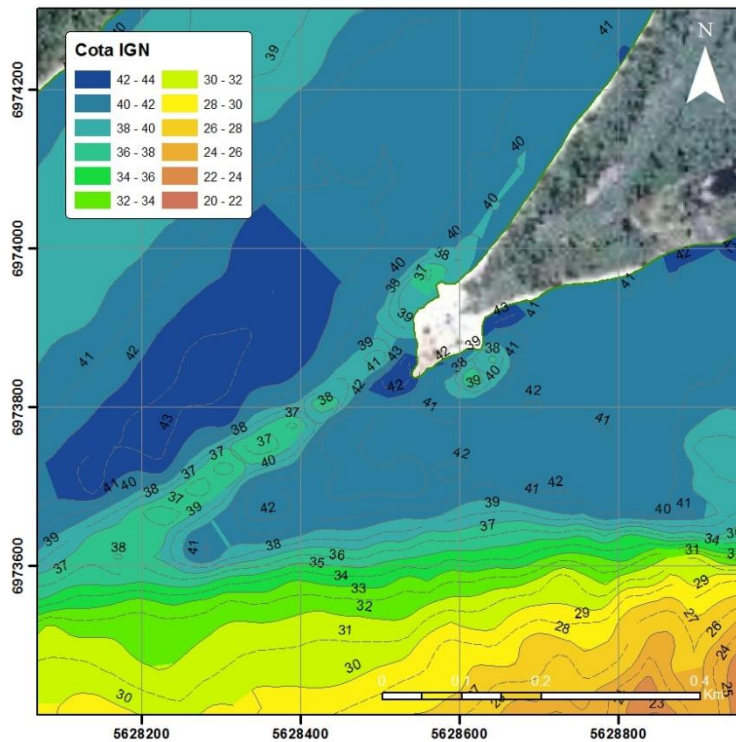
a) Noviembre de 2006



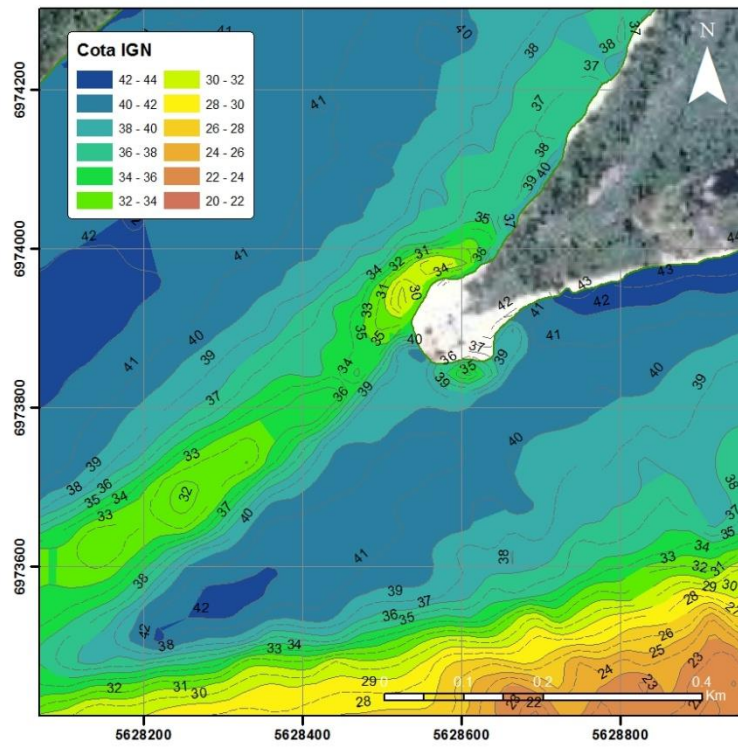
b) Enero de 2008



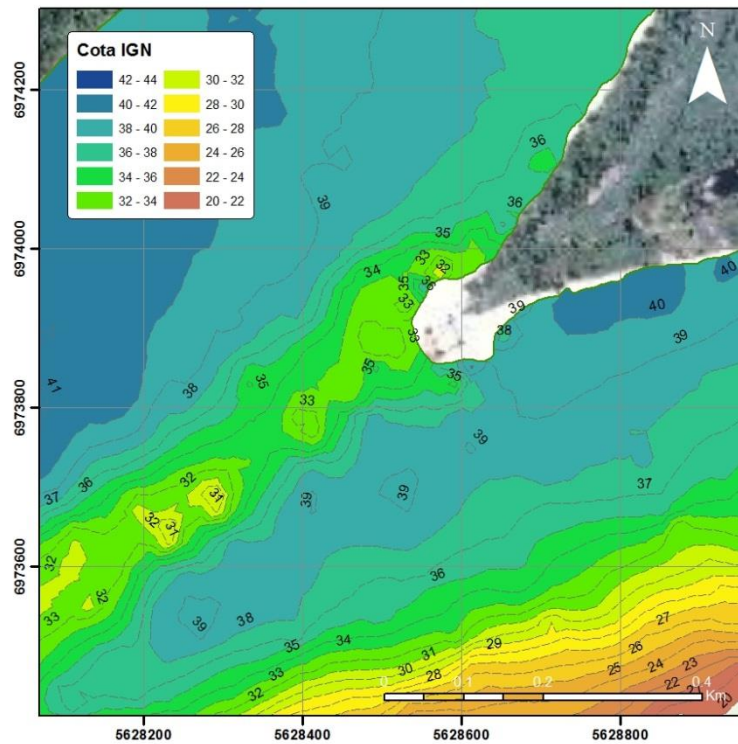
c) Agosto de 2008



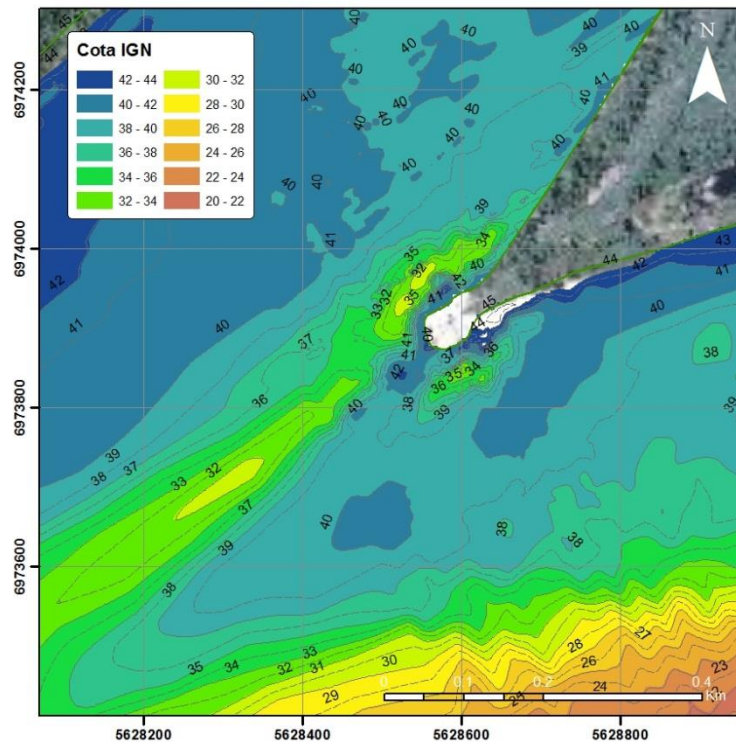
d) Febrero de 2009



e) Febrero de 2012



f) Octubre de 2012

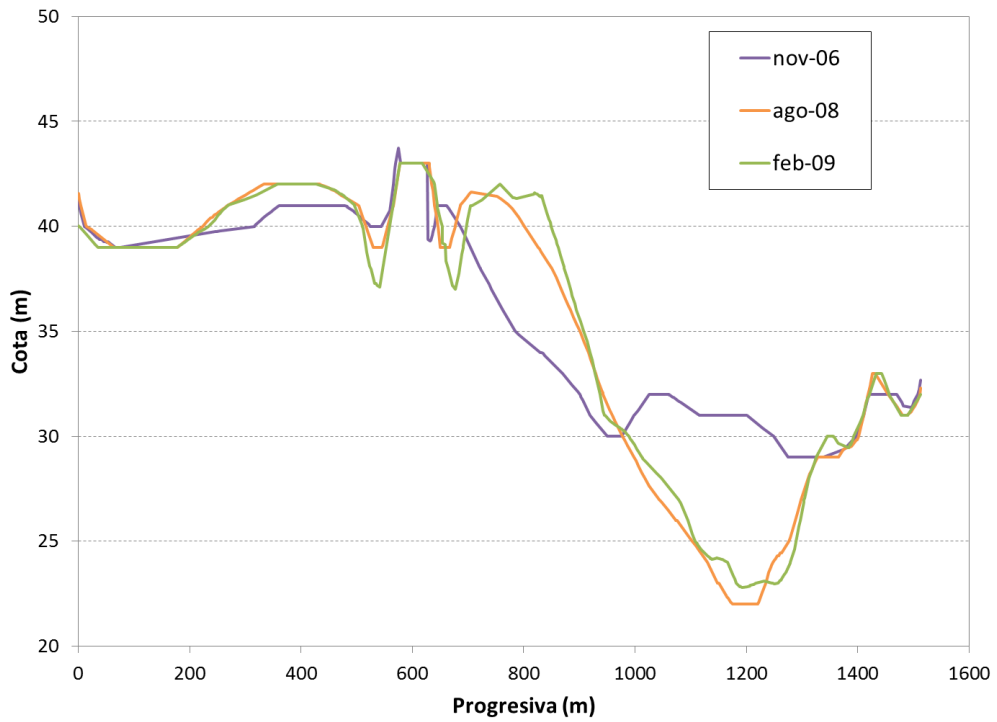


g) Julio de 2013

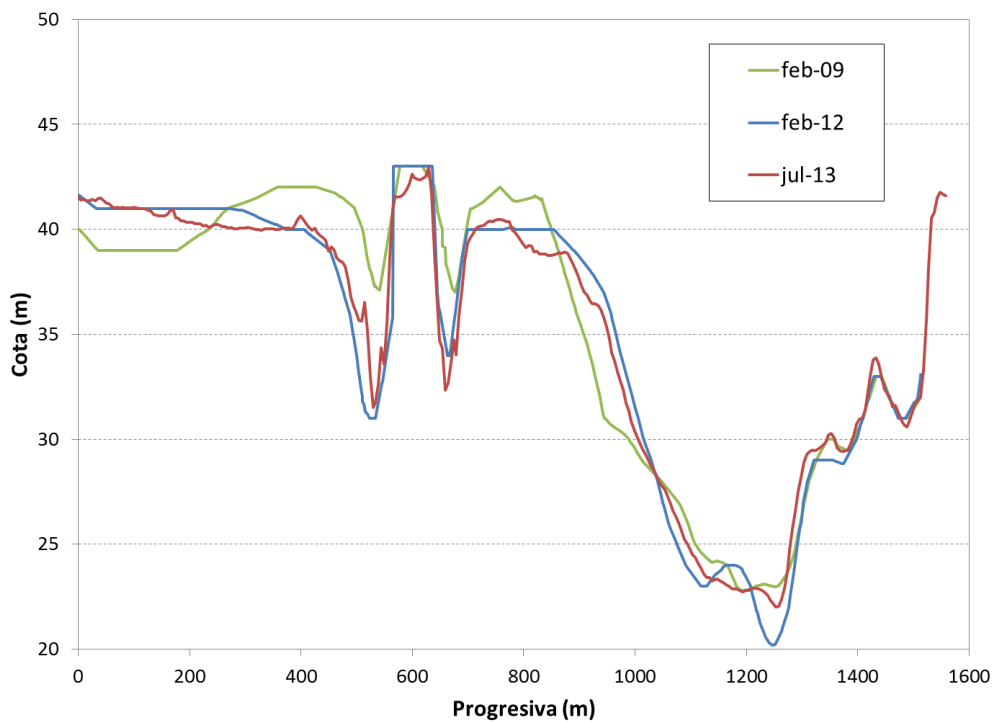
Figura 2.4. Detalle de relevamientos batimétricos en torno a la obra.

Como complemento, en la Figura 2.5 se muestra la comparación de la sección transversal que atraviesa la torre para algunos de los relevamientos. La progresiva transversal tiene origen cerca de la margen derecha del riacho Guáscaras. Se observa:

- La involución del canal derecho del riacho Guáscaras.
- La profundización y estabilización de la hoya mayor.
- La ocupación del canal izquierdo del riacho Guáscaras por la fosa de erosión del espigón correspondiente.
- El desarrollo y estabilización de las fosas de erosión asociadas a los espigones.



a) 2006/2009



b) 2009/2013

Figura 2.5. Comparación de sección transversal que atraviesa la torre..

2.4 Evolución hidrológica

En la Figura 2.6 se muestra la evolución diaria del caudal del río Paraná y el nivel de agua (referido al cero local) en la estación Corrientes desde comienzos de 2003 hasta julio de 2013. Allí se indican los instantes correspondientes a las siete campañas de relevamiento batimétrico analizadas. Se observa que:

- Entre las campañas de noviembre de 2006 y enero de 2008 se produjo una crecida relevante del río Paraná, con un pico principal de alrededor de 29.600 m³/s (marzo de 2007), que seguramente es la causa principal de los cambios morfológicos más significativos observados entre esos dos relevamientos.
- La obra fue construida en una etapa de caudales medios del río Paraná (2008), de entre 15.000 y 20.000 m³/s.
- Entre las campañas de febrero de 2009 y febrero de 2012 se produjeron tres crecidas relevantes del río Paraná, que alcanzaron caudales pico de alrededor de 30.900 m³/s (enero de 2010), 29.400 m³/s (marzo de 2011) y 25.800 m³/s (agosto de 2011), las cuales seguramente son las causas principales de los cambios morfológicos más significativos observados entre esos dos relevamientos.
- Entre las campañas de febrero y octubre de 2012 se produjo una crecida ordinaria del río Paraná, con un pico principal algo menor a 25.000 m³/s (junio de 2012), que podría ser la causa de la tendencia erosiva detectada, en la medida en que se considere que esta tendencia es genuina y no un sesgo producto de la diferencia de procesamiento entre ambas campañas (ver más arriba).
- Entre las campañas de octubre de 2012 y julio de 2013 se desarrolló una etapa relativamente prolongada de caudales medios (aproximadamente entre 15.000 y 20.000 m³/s), seguida de un agudo pico de crecida que alcanzó algo más de 35.000 m³/s (4 de julio de 2013). La relativa estabilidad morfológica, con incluso alguna leve tendencia de sedimentación, seguramente está ligada a la ausencia de altos caudales; la relativamente corta duración de la crecida (típica de las originadas por los aportes del río Iguazú) no resultó suficiente como para revertir esa tendencia.

Durante las distintas campañas de relevamiento llevadas adelante por EVARSA se efectuaron aforos de caudal. En particular, se determinó la partición entre el riacho Guáscaras y el río Paraná. Los valores se indican en la Tabla 2.1 y se representan en la Figura 2.7, junto con curvas de ajuste (que se fuerzan a pasar por el origen). Se observa que el caudal del riacho Guáscaras representa entre aproximadamente el 10 y el 20% del caudal total, dentro del rango de medición, y que muestra una correlación significativa – sobre todo su caudal absoluto – con el caudal total. Esto último indica que los cambios batimétricos observados en el riacho Guáscaras no llegan a influir significativamente sobre su resistencia hidráulica, que depende esencialmente del nivel del río.

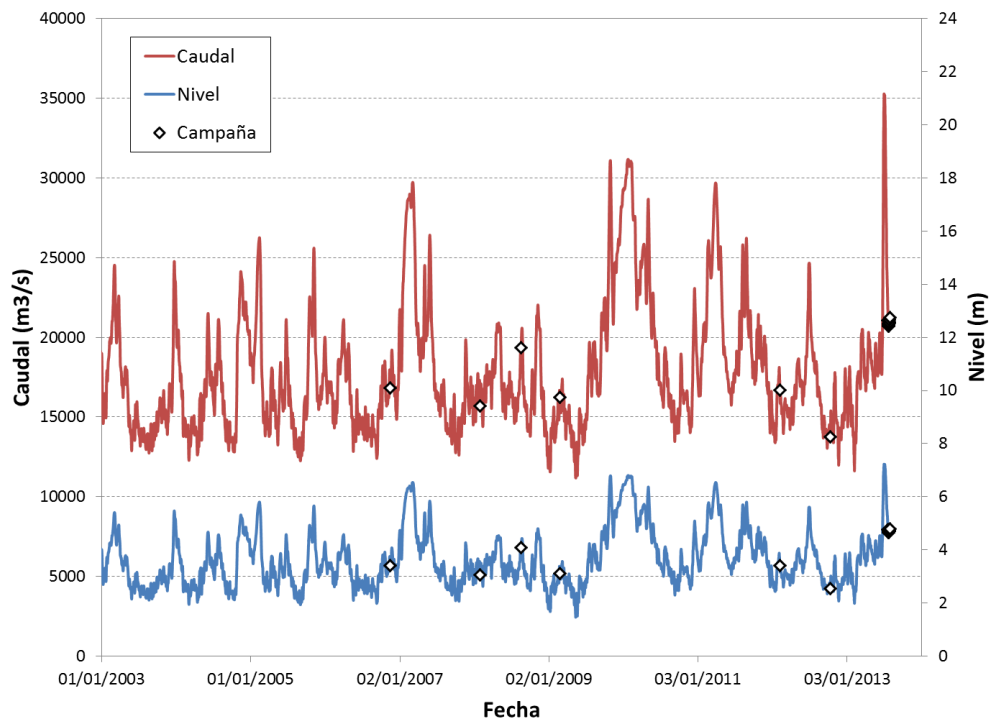
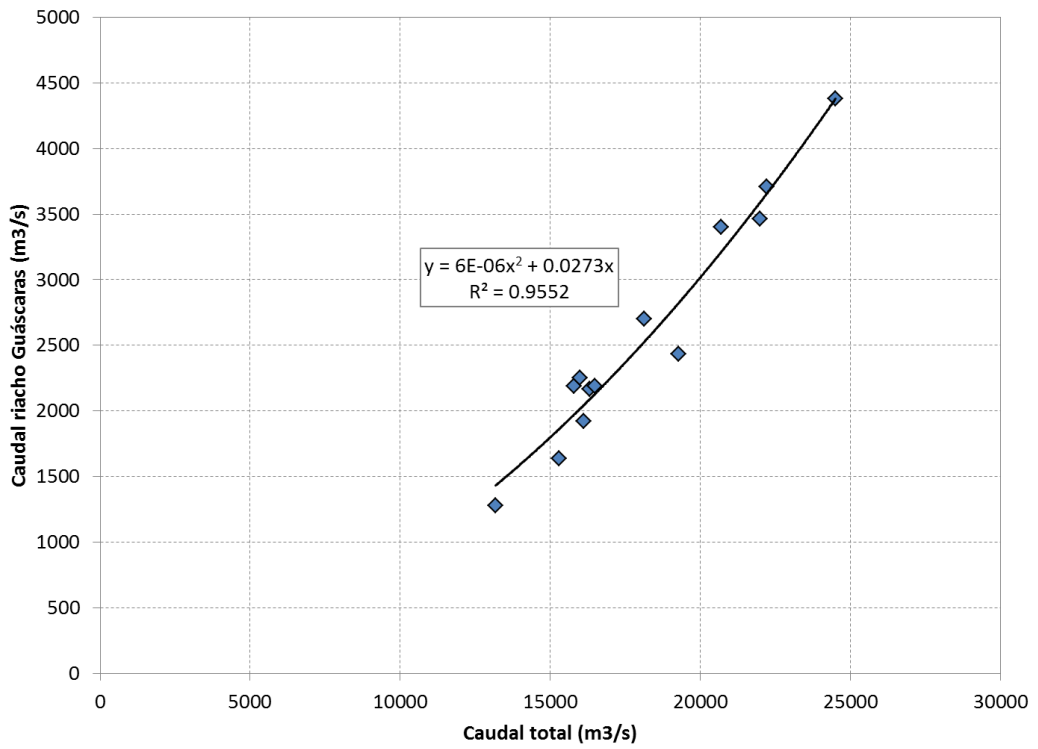


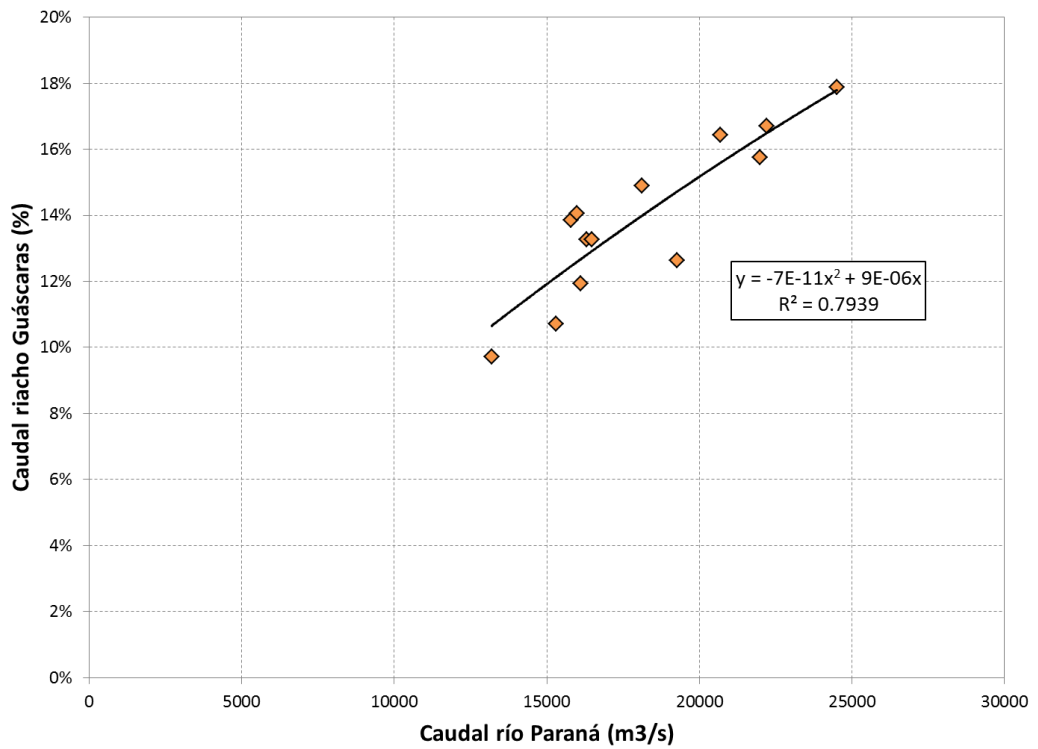
Figura 2.6. Serie temporal de caudal y nivel en Corrientes.

Tabla 2.1. Caudales aforados.

Fecha	Caudal (m ³ /s)			Fracción Guáscaras
	Guáscaras	Paraná	Total	
set-85	4380	20120	24500	17.9%
set-87	2190	13610	15800	13.9%
ene-03	2250	13750	16000	14.1%
jun-04	3400	17300	20700	16.4%
ago-05	1282	11906	13188	9.7%
mar-06	2700	15430	18130	14.9%
nov-06	2166	14149	16315	13.3%
ene-08	1922	14192	16114	11.9%
ago-08	2436	16831	19267	12.6%
feb-09	1639	13661	15300	10.7%
feb-12	2188	14294	16482	13.3%
jul-12	3710	18509	22219	16.7%
jul-12	3462	18526	21988	15.7%



a) Caudal absoluto



b) Caudal relativo

Figura 2.7. Relación entre caudales del riacho Guáscaras y del total del río Paraná.

2.5 Erosión al pie de la obra

Con fecha 12 de octubre de 2012, la empresa MG Operaciones Fluviales llevó a cabo una inspección subacuática de la protección del basamento de la torre de alta tensión. En esa oportunidad la altura hidrométrica del río en Corrientes era de 2,71 m.

En la Figura 2.8 se indican los 14 puntos de inspección.

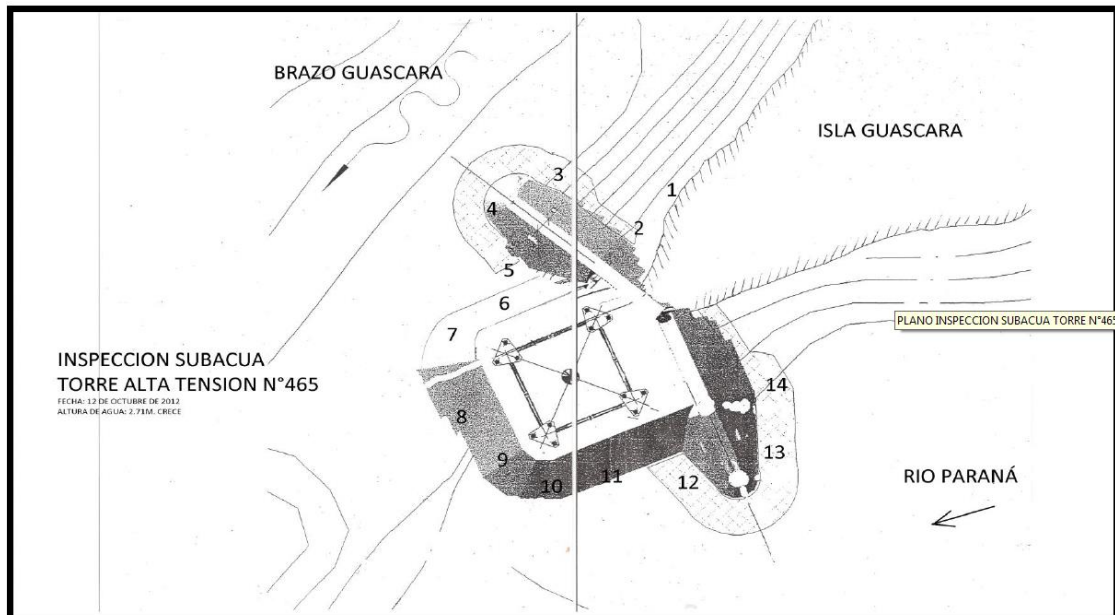


Figura 2.8. Puntos de inspección subacuática.

Las observaciones para cada uno de los puntos fueron las siguientes:

1. Desmoronamiento pronunciado, formándose una barranca de arena donde se visualiza la manta de geotextil; geotubos al descubierto, socavados alrededor de 0,50 m, terminando en una barranca de fango de alrededor de 6 m a pique.
2. Geotubos al descubierto; barranca de alrededor de 6 m a pique.
3. Buen pie a 12 m de profundidad; troncos y árboles en el fondo.
4. Desmoronamiento del talud de piedra, de aproximadamente 3 m sobre la superficie; geotubos al descubierto siguiendo la línea transversal del espigón.
5. Geotubos al descubierto en la línea longitudinal de aproximadamente 6 m; desmoronamiento pronunciado a alrededor de 20 m aguas abajo sobre la misma línea, que llega hasta la base.
6. 8 brazas de geotubo al descubierto (a alrededor de 30 m del espigón).
7. Desmoronamiento de piedra superficial hasta la base del lecho.
8. Casi toda la línea de geotubos al descubierto; desmoronamiento de piedra llegando al Paraná.
9. Sedimentación, formando una playada sobre la curva.
10. Aproximadamente 4 m de geotubos al descubierto.

11. Piedras y sedimentación en el fondo.
12. Aumulación de sedimento, formando un banco de arena con declive suave hacia el canal.
13. Aproximadamente 8 m de geotubos al descubierto.
14. Playada con buen pie.

En síntesis, se detectó erosión al pie de la obra a todo lo largo de la margen del riacho Guáscaras y la cara de aguas abajo de la obra, mientras que sobre la margen del río Paraná las erosiones son puntuales, localizadas en el extremo de aguas arriba del espigón (punto 13), y en el extremo de aguas abajo de la cola de la isla (punto 10). Las erosiones puntuales sobre la margen del río Paraná están seguramente ligadas a las altas velocidades locales de la corriente en esos puntos, que son inevitables, por lo que la única acción posible es un adecuado mantenimiento. Por su parte, la erosión al pie de la obra sobre la margen del riacho Guáscaras es concomitante con la profundización del canal secundario y con la formación de la fosa de erosión por el espigón, de modo que habrá que establecer hasta qué punto ha influido cada uno de esos dos procesos (es decir, diagnosticar) para plantear cursos de acción adecuados para su control. Uno de los objetivos de la modelación numérica llevada adelante es dilucidar esta cuestión (ver más abajo).

2.6 Granulometría

En marzo de 2006, durante la campaña de relevamiento batimétrico llevada adelante por EVARSA, se tomaron muestras de sedimento de fondo, las cuales fueron analizadas para determinar su composición granulométrica. Los puntos de toma de muestra se indican en la Figura 2.9.

Las curvas granulométricas resultantes de los análisis se muestran en la Figura 2.10. La muestra BG-1 se considera anómala, ya que resulta inconsistente con las restantes, por lo que se la descarta como representativa. Las restantes indican distribuciones concentradas, con los diámetros medios indicados en la Tabla 2.2 (obtenidos mediante interpolación logarítmica), indicativos de arenas finas a medianas.

Tabla 2.2. Diámetro medio de muestras de sedimento de fondo del 2006.

Muestra	d50 (um)
BP-1	242
BP-2	95
BP-Isla	444
BG-Isla	340
BG-2	188

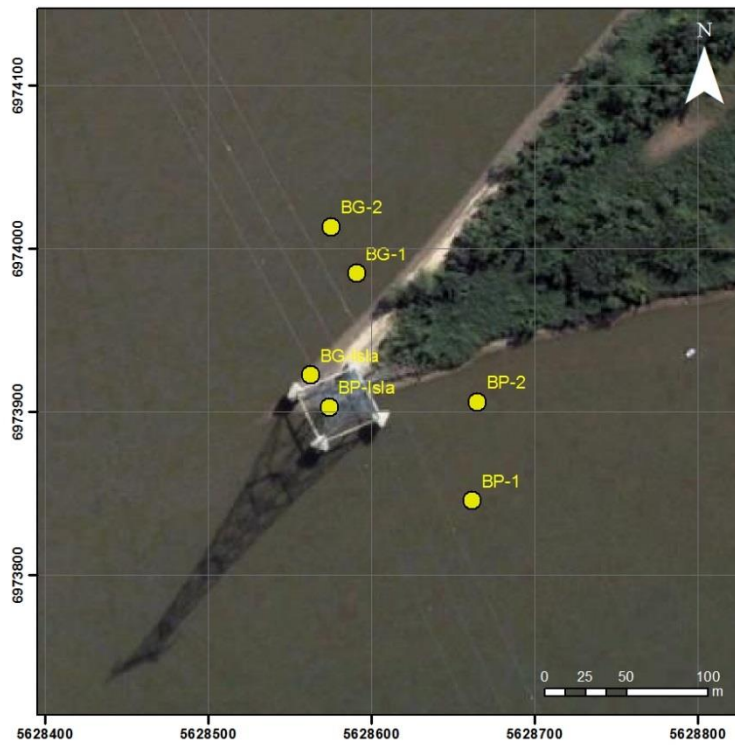


Figura 2.9. Puntos de toma de muestras de sedimento de fondo en marzo de 2006.

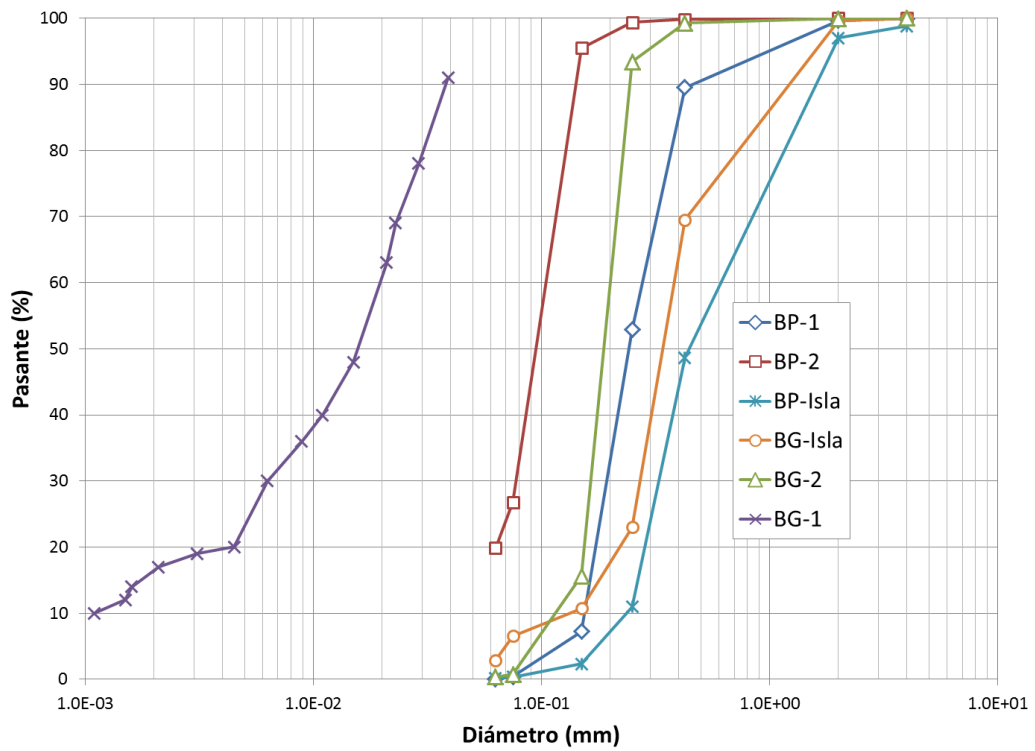


Figura 2.10. Granulometría de muestras de sedimento de fondo del 2006.

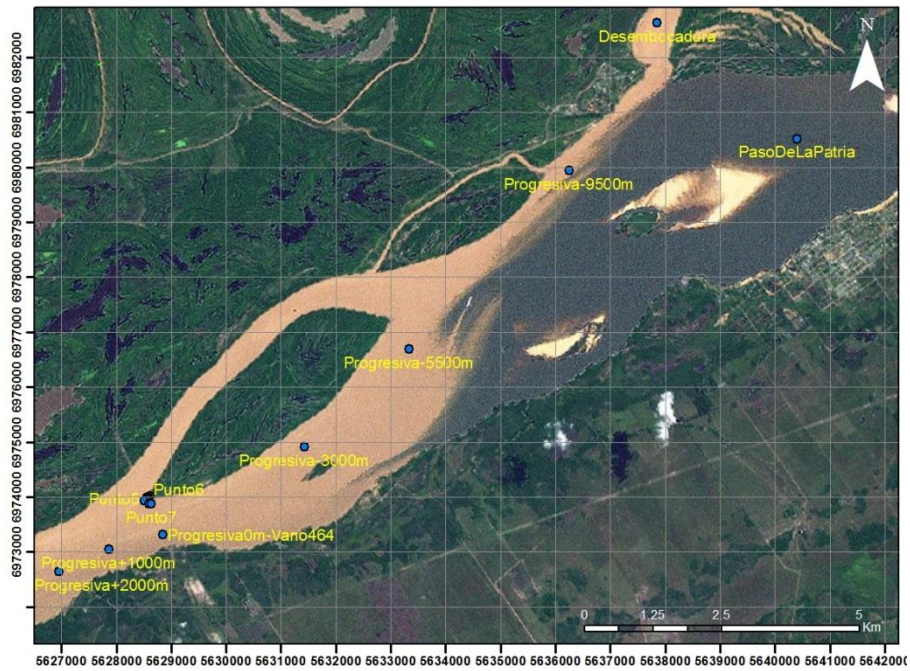
Durante la campaña de relevamiento batimétrico de julio de 2013, EVARSA efectuó nuevamente una toma de muestras de sedimento de fondo, aunque esta vez sobre un dominio mayor. Los 15 puntos de toma de muestra se presentan en la Figura 2.11, donde se distingue entre los correspondientes al talweg (Figura 2.11a) y al entorno de la cola de la isla (Figura 2.11b). En la Tabla 2.3 se indican los códigos de las muestras.

Tabla 2.3. Código y diámetro medio de muestras de sedimento de fondo del 2013.

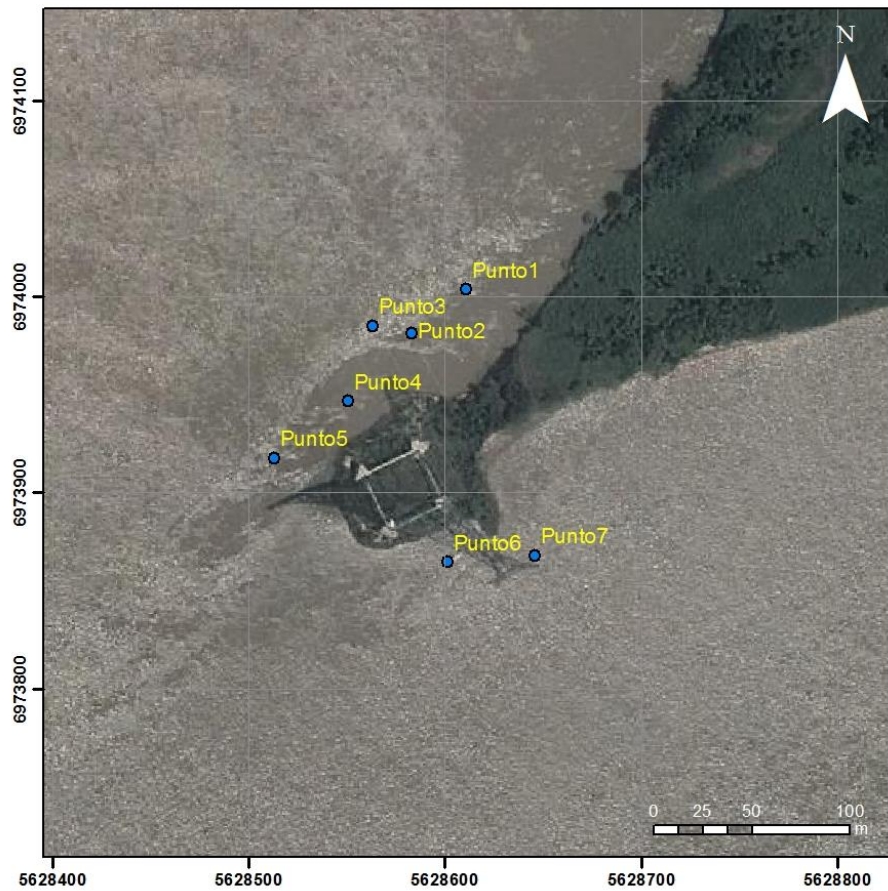
Río	Lugar	Muestra	d ₅₀ (µm)
Paraguay	Desembocadura	8038	135
Paraná	Paso de la Patria	0131	266
Paraná	Progresiva -9500m	3544	343
Paraná	Progresiva -5500m	390	132
Paraná	Progresiva -3000m	1017	405
Paraná	Progresiva 0m - Vano	0173	541
Paraná	Progresiva +1000m	1750	471
Paraná	Progresiva +2000m	4304	568
Zona Torre	Punto 1	3263	119
Zona Torre	Punto 2	1053	121
Zona Torre	Punto 3	4125	142
Zona Torre	Punto 4	0517	132
Zona Torre	Punto 5	0039	393
Zona Torre	Punto 6	3881	89
Zona Torre	Punto 7	3763	100

Las Figuras 2.12a y 2.12b muestran las curvas granulométricas correspondientes al talweg y al entorno de la cola (en esta última se repite la curva de la muestra 541 como referencia). Todas las curvas indican distribuciones concentradas. Los diámetros medios asociados se indican en la Tabla 2.4 (obtenidos mediante interpolación logarítmica), y se grafican en la Figura 2.13. Se observa que las muestras asociadas al talweg tienden a ser arenas medianas, con una gradación en general creciente hacia aguas abajo. Por su parte, las correspondientes al entorno de la cola – donde la dinámica es menor – tienden a ser arenas finas, con diámetros medios inferiores a 150 µm, descartando el Punto 5, donde la velocidad puede ser mayor.

En la Figura 2.14 se presenta la comparación entre muestras de 2006 y de 2013. Se observa un acuerdo razonable entre los dos grupos con correspondencia geográfica, a saber, BG-2 (2006) con Puntos 1 a 4 (2013), y BP-2 con Puntos 6 y 7.

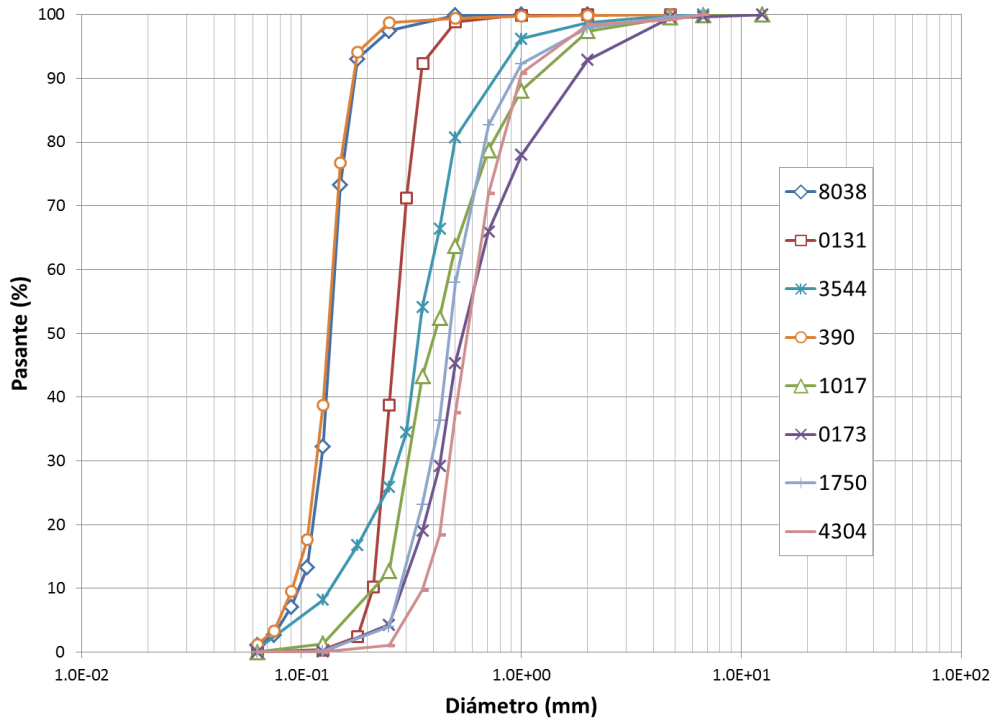


a) Zona completa

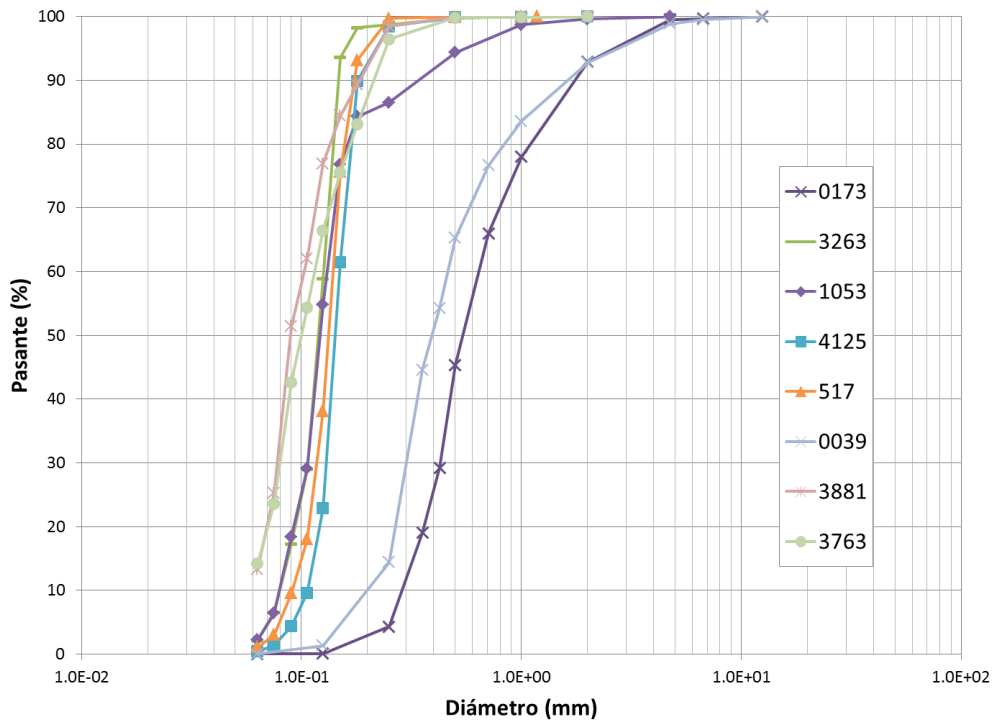


b) Zona de la cola

Figura 2.11. Puntos de toma de muestras de sedimento de fondo del 2013.



a) Zona completa



b) Zona de la cola

Figura 2.12. Granulometría de muestras de sedimento de fondo del 2013.

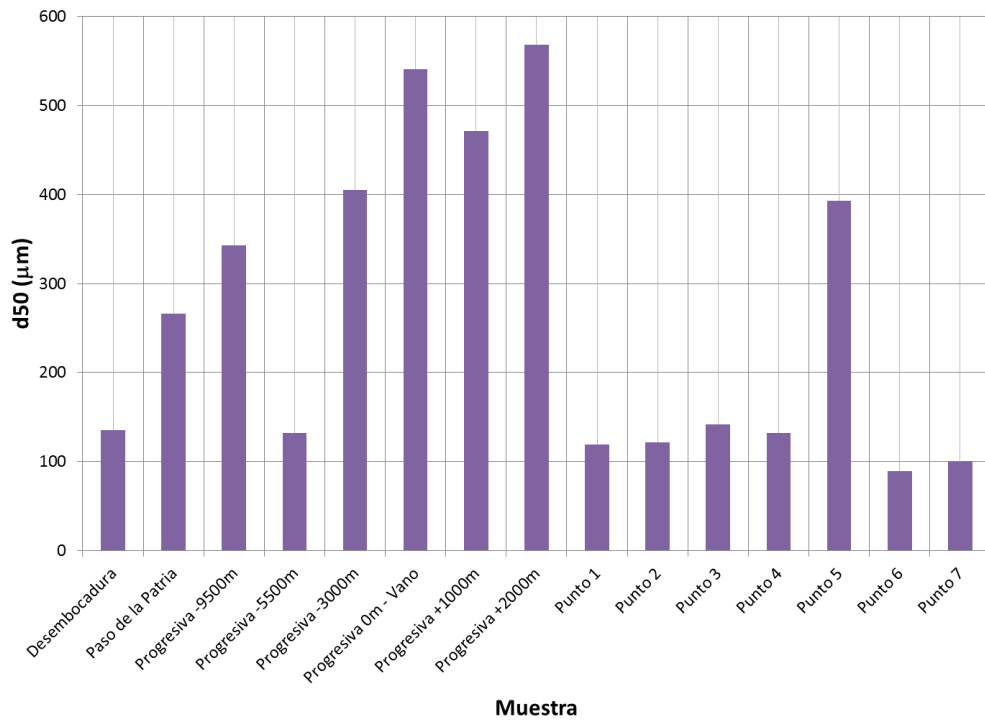


Figura 2.13. Diámetro medio de sedimento de fondo para muestras del 2013.

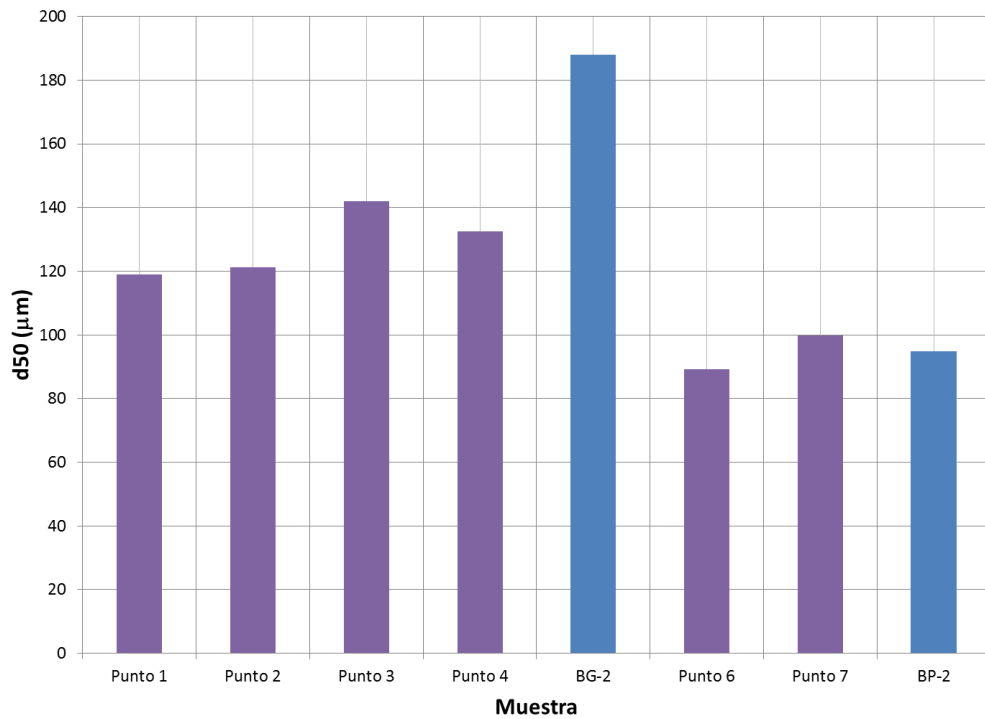


Figura 2.14. Comparación de diámetro medio de sedimento de fondo.

3 MODELACIÓN

3.1 Estrategia de modelación

Para simular numéricamente el problema se plantean dos escalas de modelación:

- Una escala regional, incluyendo la isla completa, sobre la cual se implementa un modelo hidrodinámico bidimensional (2D) en planta, de modo de resolver la partición de caudales entre el río Paraná y el riacho Guáscaras, y proveer condiciones de borde al modelo local.
- Una escala local, en torno a la zona-problema, donde se plantea un modelo morfológico.

Se utiliza el código abierto de dominio público OpenFOAM⁷. Este código puede simular una gran variedad de problemas (flujos de fluidos involucrando reacciones químicas, turbulencia, transferencia de calor, etc.). Consiste en un conjunto de módulos, que incluye *solvers* (“solucionadores”) para problemas específicos, utilidades para efectuar pre y posprocesamientos, librerías, etc. Resuelve sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales mediante el método de los volúmenes finitos. Efectúa procesamiento en paralelo, mediante descomposición de dominio.

Para la modelación hidrodinámica se resuelven numéricamente las ecuaciones para aguas poco profundas. El *solver* se basa en el método PISO⁸.

El modelo morfológico se basa en la ecuación de Exner (balance de sedimento), utilizando para el cálculo del caudal sólido la fórmula de Engelund-Hansen para el transporte total (de fondo y suspendido), cuya adecuación al río Paraná es conocida. Además, se tiene en cuenta el proceso de desmoronamiento a través de la introducción de una componente del transporte en el sentido de la máxima pendiente⁹. La ecuación se resuelve numéricamente por el Método de los Volúmenes Finitos, utilizando un esquema ‘upwind’ explícito para el término advectivo, uno centrado implícito para el término difusivo, y el de Euler implícito para la coordenada temporal.

⁷ <http://www.openfoam.com/>

⁸ Badano, N.D., Sabarots Gerbec, M., Re, M, Menéndez, A.N., *A coupled hydro-sedimentologic model to assess the advance of the Parana River Delta Front*, River Flow 2012, Proceedings of the Sixth International Conference on Fluvial Hydraulics, 5-7 September, 2012, San José, Costa Rica.

⁹ Liu, X., García, M.H., “Three-Dimensional Numerical Model with Free Water Surface and Mesh Deformation for Local Sediment Scour”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 134, No. 4, July 1, 2008.

Para la construcción de la grilla de cálculo se aplicó el utilitario Gmsh¹⁰. Es un generador automático de mallas bi ó tridimensionales, con un motor tipo CAD y un posprocesador.

3.2 Modelo hidrodinámico

La Figura 3.1 indica, sobre una imagen satelital, el dominio seleccionado para la modelación hidrodinámica. Se extiende desde sendas zonas de estrechamiento del río ubicadas aguas arriba y aguas abajo de la Isla Guáscaras. La elección de zonas de estrechamiento resulta recomendable, ya que allí suelen producirse condiciones de flujo totalmente desarrolladas, es decir, sin zonas de separación en las márgenes.

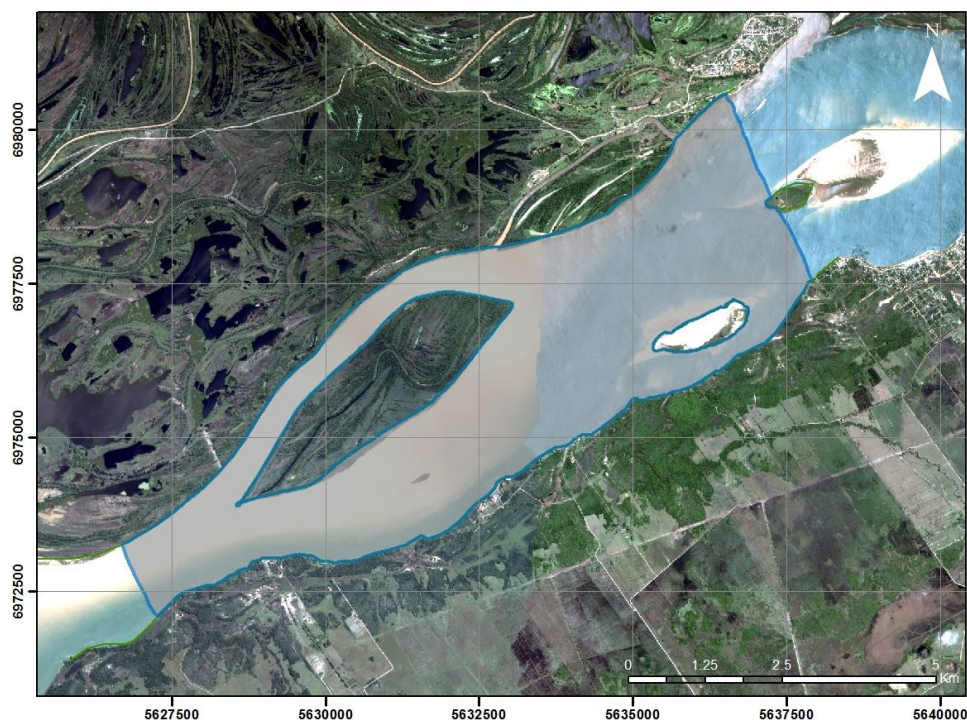


Figura 3.1. Dominio del modelo hidrodinámico.

Se dispuso del relevamiento batimétrico especialmente efectuado por EVARSA durante julio de 2013 para construir el MDE (Modelo Digital de Elevación) del lecho, el cual se ilustra en la Figura 3.2.

La grilla de cálculo está conformada por 160.000 elementos triangulares. Se impuso una mayor densificación en torno a las márgenes de la Isla Guáscaras. El paso medio de malla es de 20 m hasta una distancia de alrededor de 500 m de la costa de la Isla Guáscaras, y crece al alejarse de la isla hasta alcanzar 30 m a los 1500 m de la costa. En la Figura 3.3 se muestra la grilla sobre una ampliación de la zona en torno a la obra (ya que a la escala del dominio total no se llega a distinguir por lo densa).

¹⁰ <http://geuz.org/gmsh/>

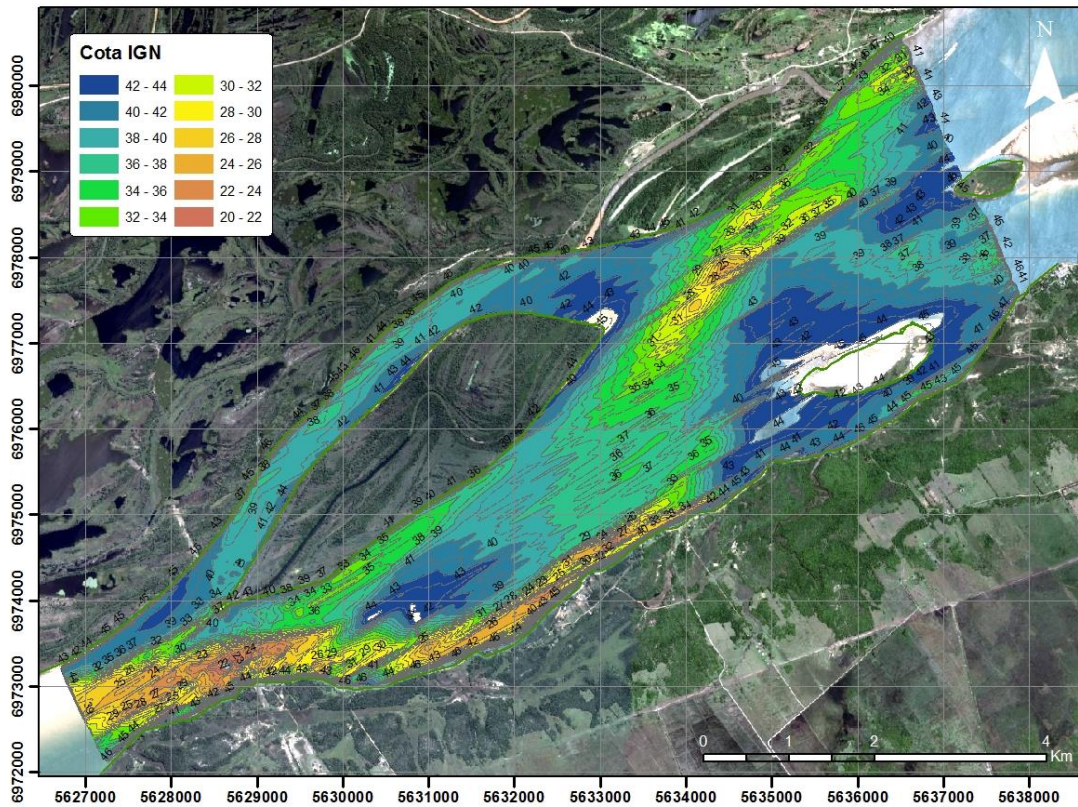


Figura 3.2. MDE del lecho.

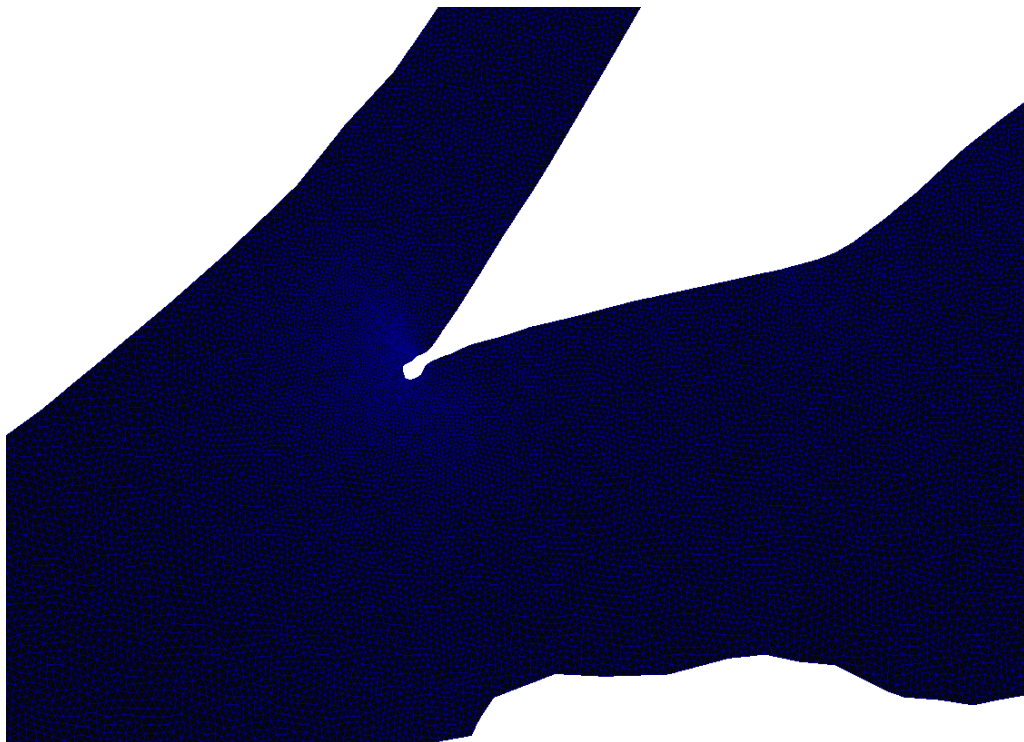


Figura 3.3. Grilla de cálculo.

La resistencia hidráulica se parametrizó por medio del coeficiente de rugosidad de Manning. A este se le asignó a priori un valor de 0,020, que no hizo falta ajustar durante la calibración. La viscosidad de torbellino se fijó en 5 m²/s, que conduce a números de Reynolds de malla de orden 1 (necesario para disipar la energía de escalas sub-grilla).

Las condiciones de borde son el caudal en el contorno de aguas arriba, que actúa como forzante del flujo (y que se distribuye lateralmente en base al método de la distribución lateral¹¹), y el nivel aguas abajo, que actúa como un condicionante del flujo. Estos no son independientes. Para obtener la relación entre ellos se procedió de la siguiente manera:

- Se utilizan los datos existentes de aforos en la estación Corrientes (sobre el período 1980-2012) para establecer, mediante ajuste, una curva altura-caudal. Esta se indica en la Figura 3.4 (la altura está referida al cero local), y es válida para el rango de medición.
- Se utilizaron los resultados del modelo hidrodinámico unidimensional *MOAGAB* del INA¹², que incluye el Alto Paraná y el Paraná Medio hasta la estación Empedrado, para establecer, mediante ajuste, una relación entre los niveles de agua en las estaciones Paso de la Patria – representativa de la zona de estudio – y Corrientes. Esta se indica en la Figura 3.5, y es válida en el rango de medición.
- Combinando ambas curvas, se obtuvo la relación entre el caudal y el nivel en Paso de la Patria, mostrado en la Figura 3.6, junto a la similar para Corrientes como referencia.

Para la calibración del modelo se utilizó como referencia la curva de partición de caudales entre el riacho Guáscaras y el río Paraná, presentada en la sección 2.4. Se efectuaron ensayos para tres caudales, dentro del rango de las mediciones: 14.000 m³/s, 18,400 m³/s (representativo de condiciones medias) y 22.000 m³/s. Los niveles de aguas abajo correspondientes se obtuvieron de la curva de la Figura 3.6. En la Figura 3.7 se presentan, a título ilustrativo, las distribuciones de distintas variables provistas por el modelo para el caso del caudal medio. La Figura 3.8 muestra la partición de caudal entre los dos brazos de acuerdo al modelo, superpuesta sobre los resultados de las mediciones en términos del caudal absoluto del riacho Guáscaras (que es el que presenta mejor nivel de correlación con el caudal total). Se observa un acuerdo muy satisfactorio, por lo que el modelo se considera calibrado. Esto no sólo es indicativo de la buena performance del modelo, sino que también reafirma la robustez de la partición frente al detalle de la batimetría del riacho Guáscaras.

¹¹ Weber, J.F., Menéndez, A.N., Tarrab, L., *Distribución Lateral de Velocidades en Cauces Naturales*, Ingeniería del Agua, Vol. 12, Nº 3, Setiembre 2005, 277-289

¹² Desarrollado para estudios relacionados al Plan de Acción frente a Emergencias de la Entidad Binacional Yacyretá.

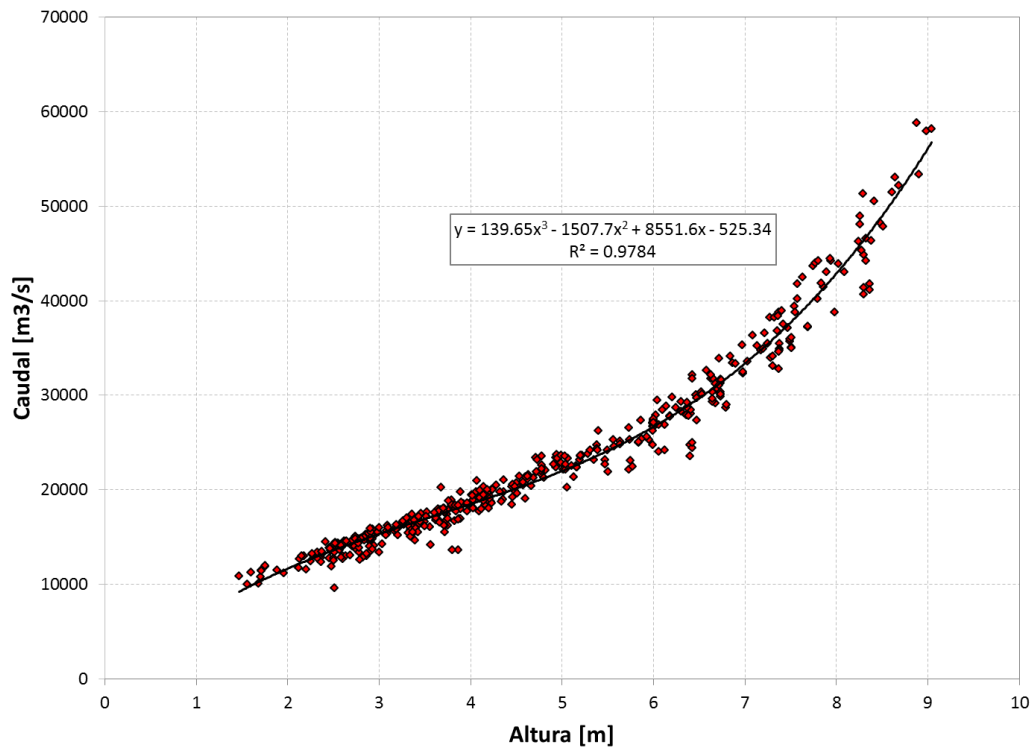


Figura 3.4. Relación altura-caudal en Corrientes.

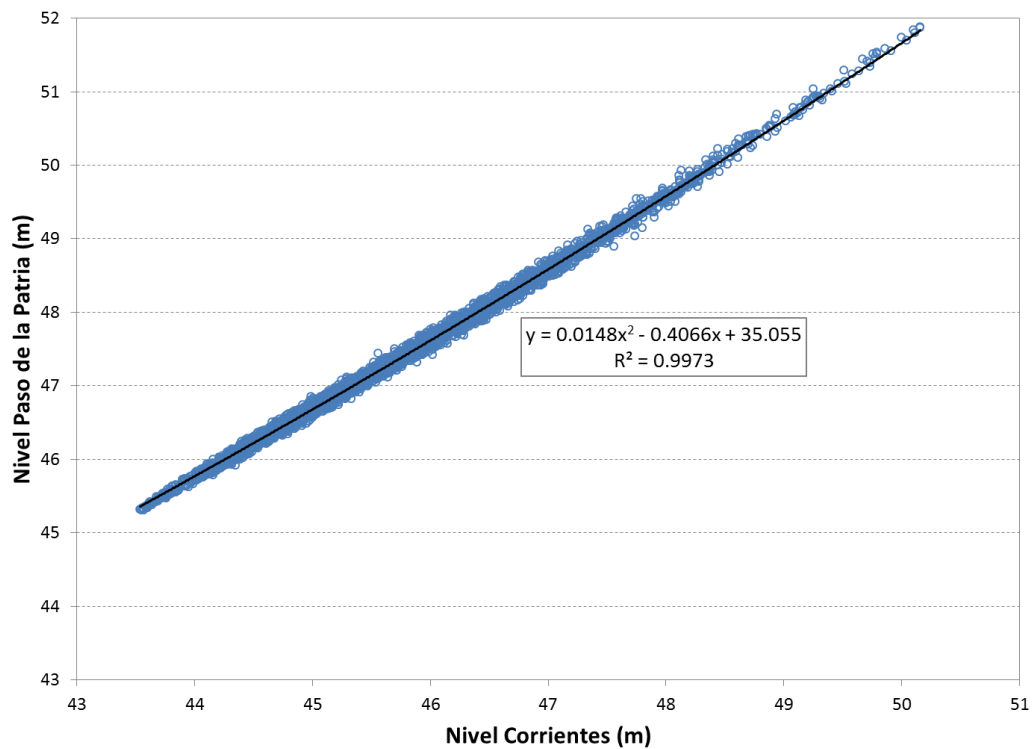


Figura 3.5. Relación entre niveles en Paso de la Patria y en Corrientes.

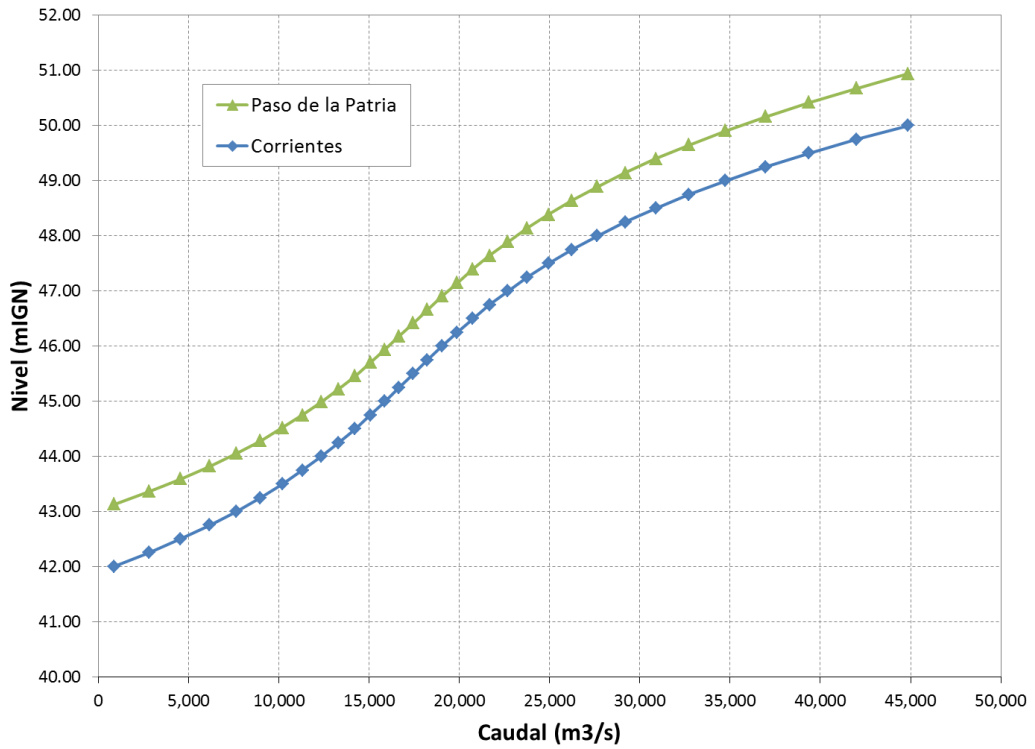
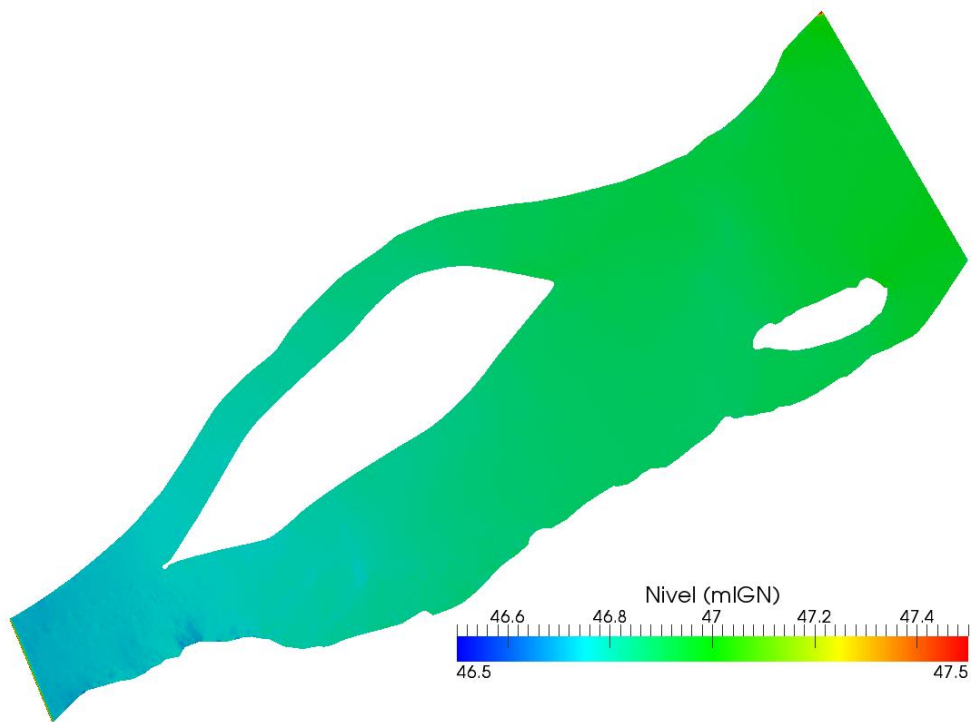
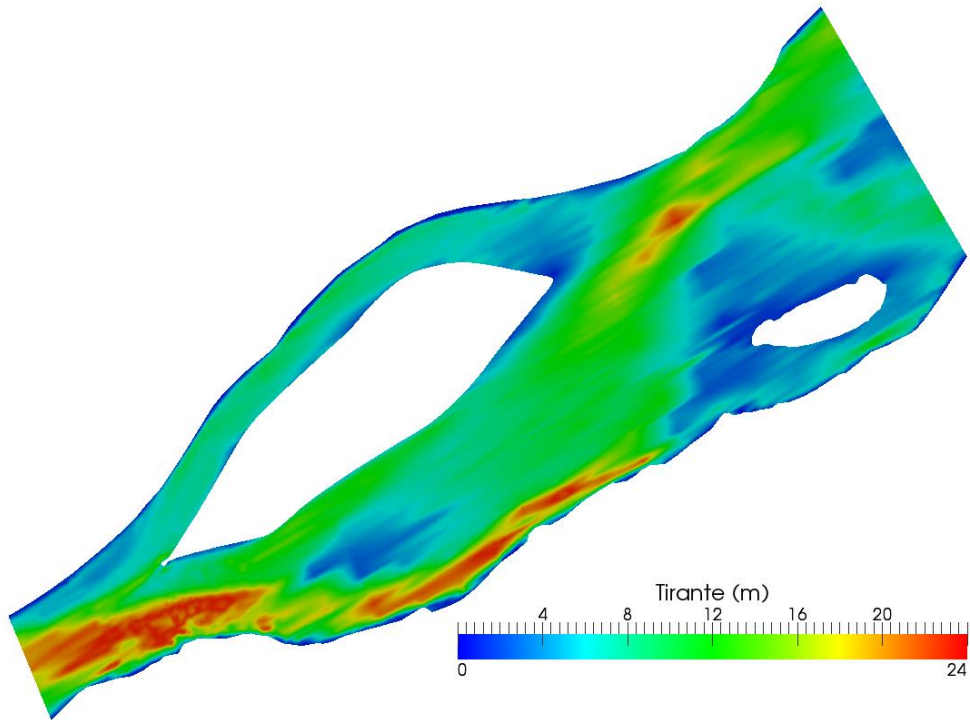


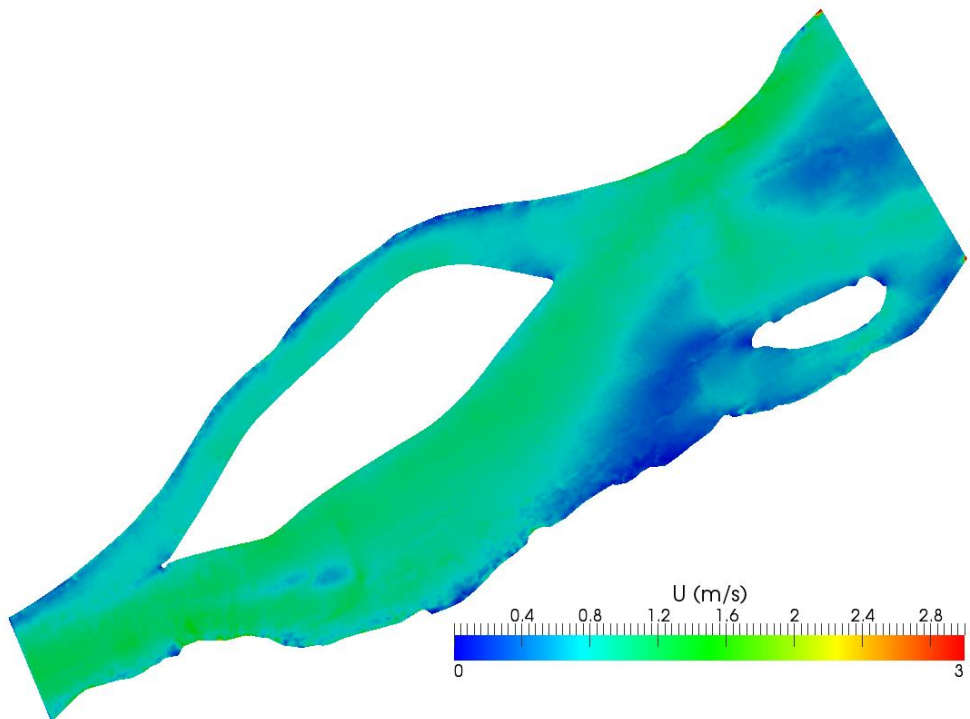
Figura 3.6. Relación entre nivel y caudal.



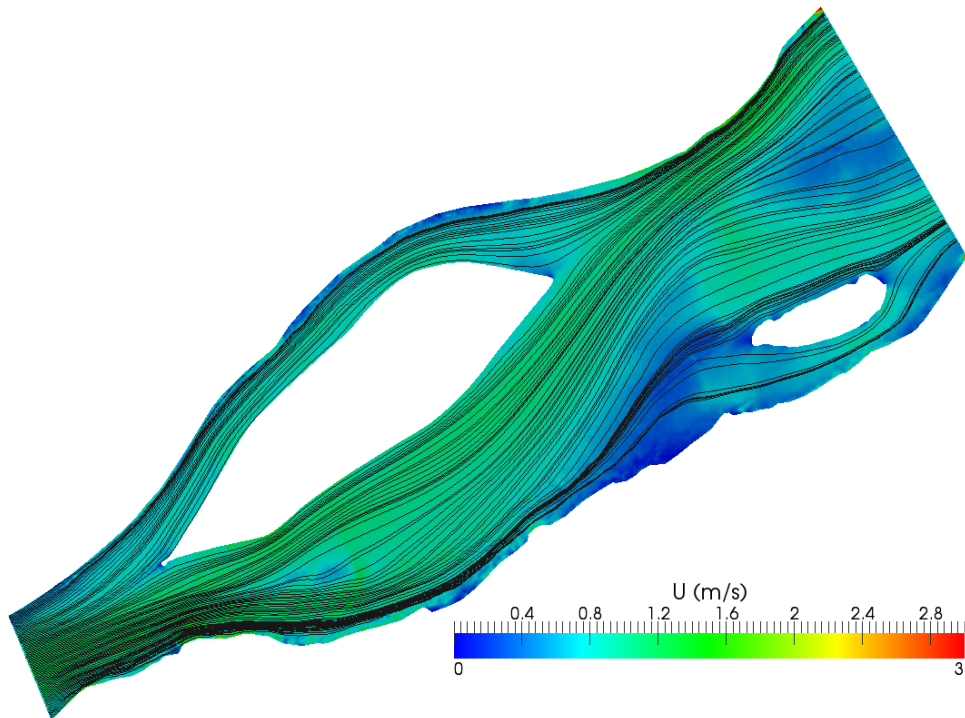
a) Nivel de la superficie libre



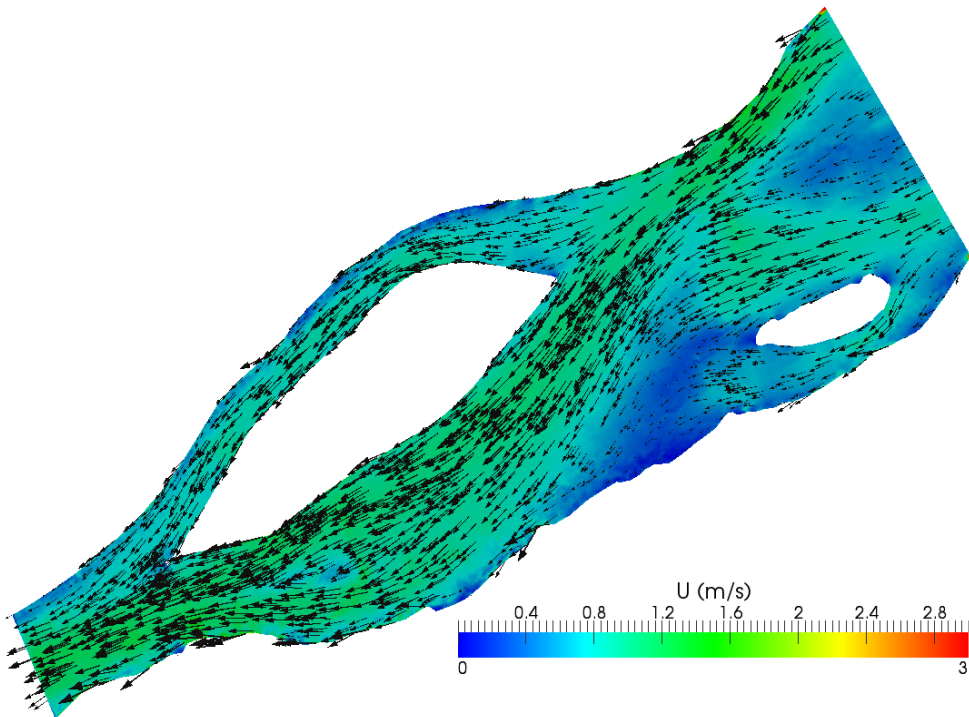
b) Tirante



c) Velocidad



d) Velocidad y líneas de corriente



e) Velocidad y campo de velocidades

Figura 3.7. Distribución de variables hidrodinámicas de acuerdo al modelo para un caudal de $18.400 \text{ m}^3/\text{s}$.

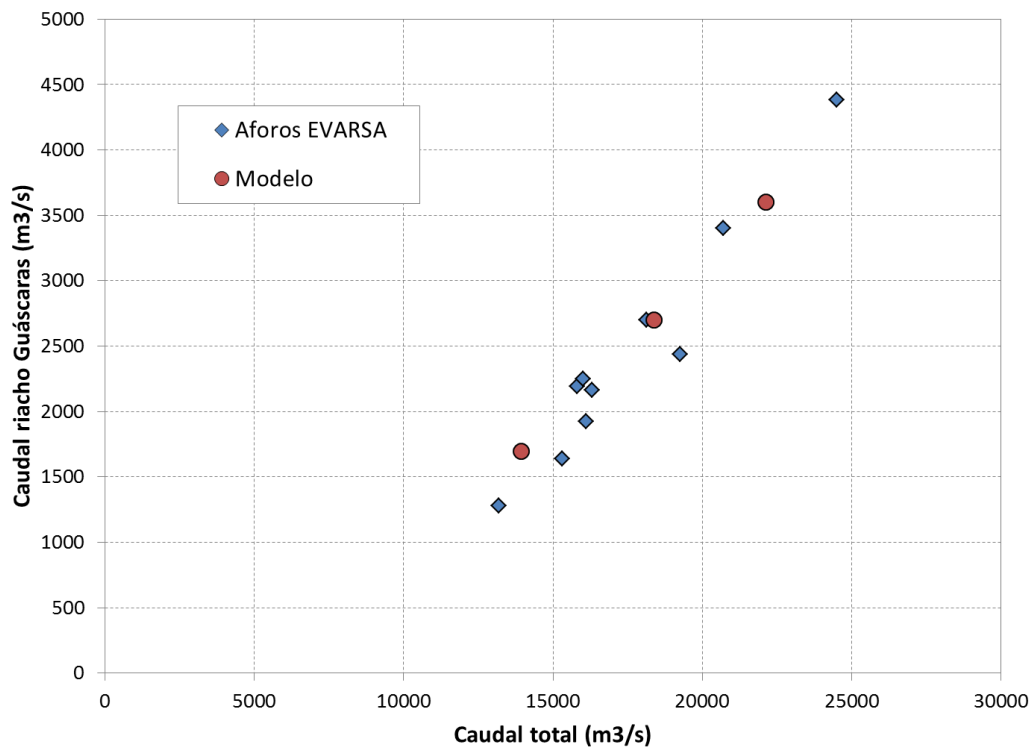


Figura 3.8. Resultados del modelo hidrodinámico para la partición de caudales.

A título de verificación del modelo se utilizaron los datos de mediciones de velocidad relevados por EVARSA durante la campaña de julio de 2013. Se trata de perfiles transversales de velocidades medias sobre la profundidad que surgen de las mediciones en las 7 secciones de relevamiento. El modelo proveyó los perfiles mostrados en la Figura 3.9, que indican un acuerdo general satisfactorio con los medidos.

Por su parte, la Figura 3.10 muestra la comparación entre los perfiles verticales de velocidad medidos por EVARSA en los 7 puntos coincidentes con los de tomas de muestra de sedimento en torno a la cola de la isla (Figura 2.11b), y los valores provistos por el modelo para la velocidad media sobre la vertical. La dispersión de valores es un indicador de la incertidumbre asociada a las mediciones. Se observa que las velocidades medias del modelo resultan consistentes con las observaciones. Más aún, son en general representativas del promedio de las mediciones.

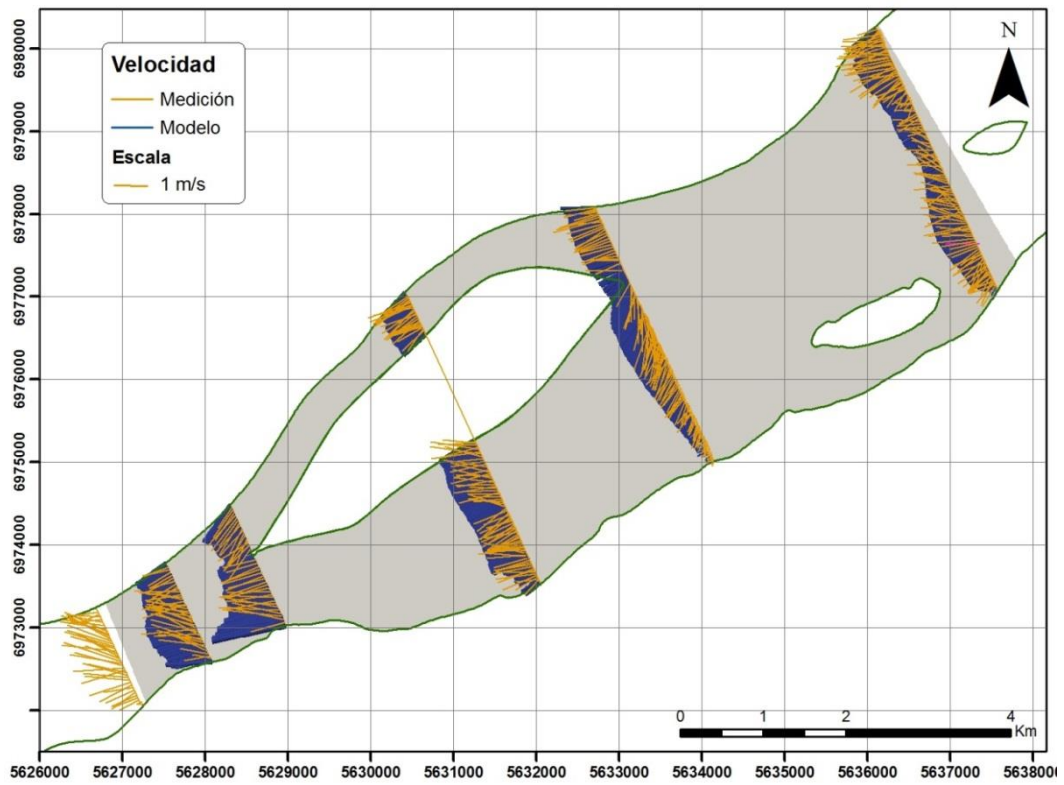
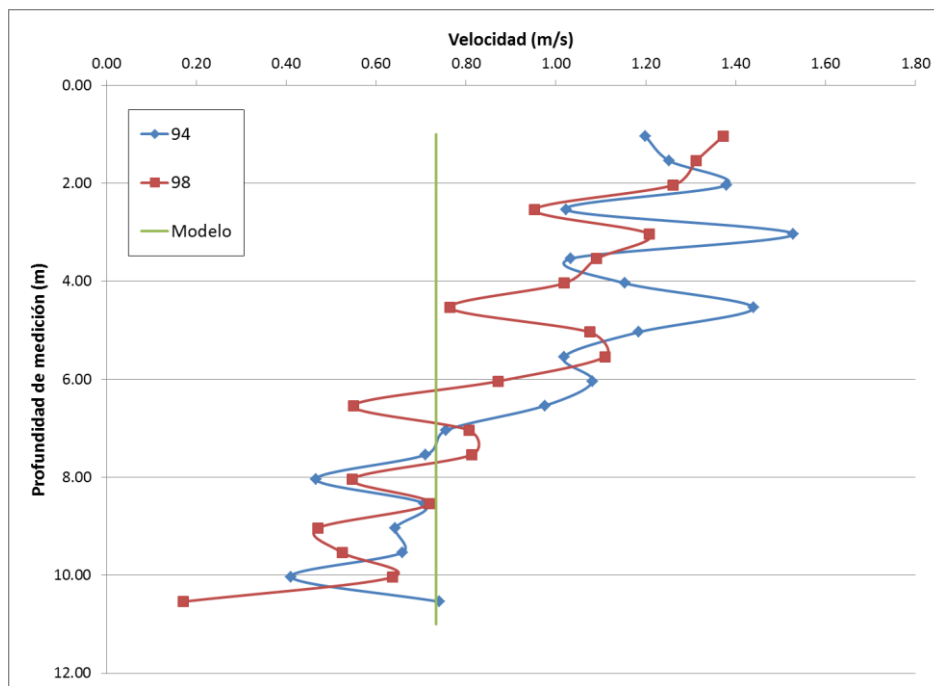
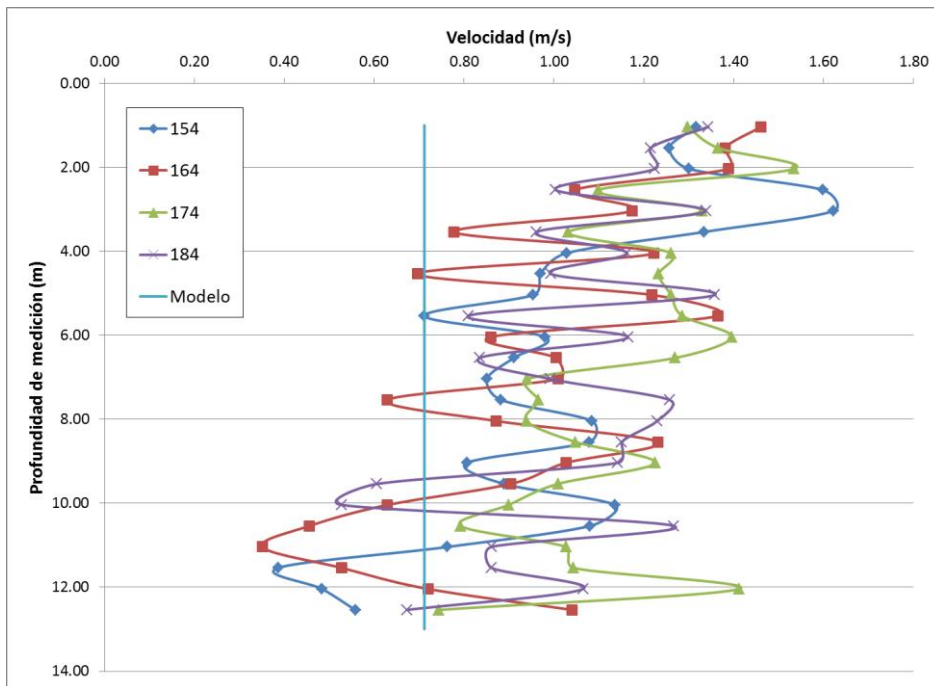


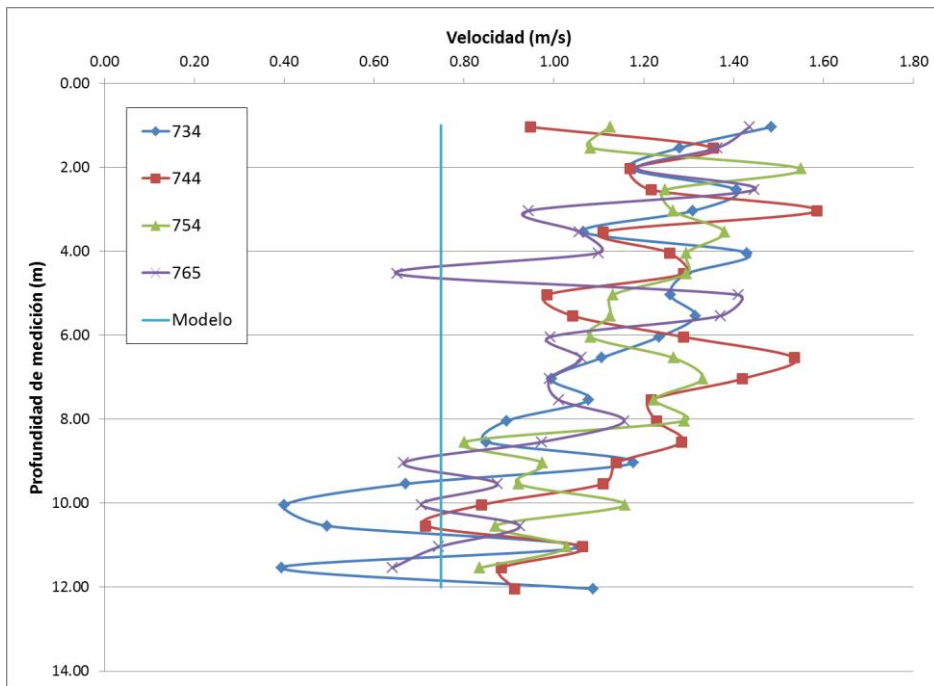
Figura 3.9. Comparación entre perfiles transversales de velocidades medias medidas y modeladas.



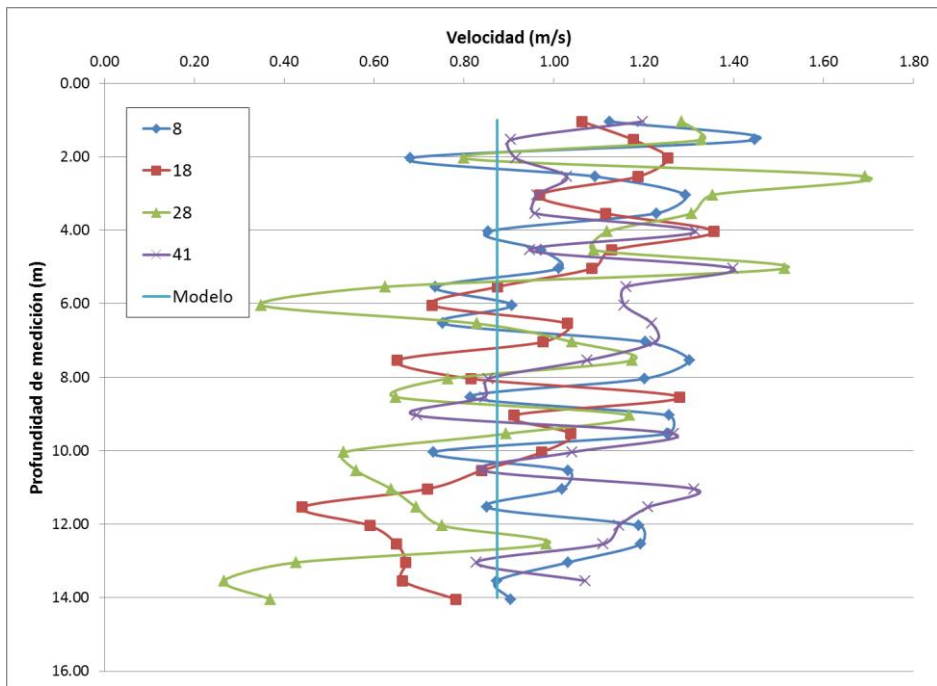
a) Punto 1



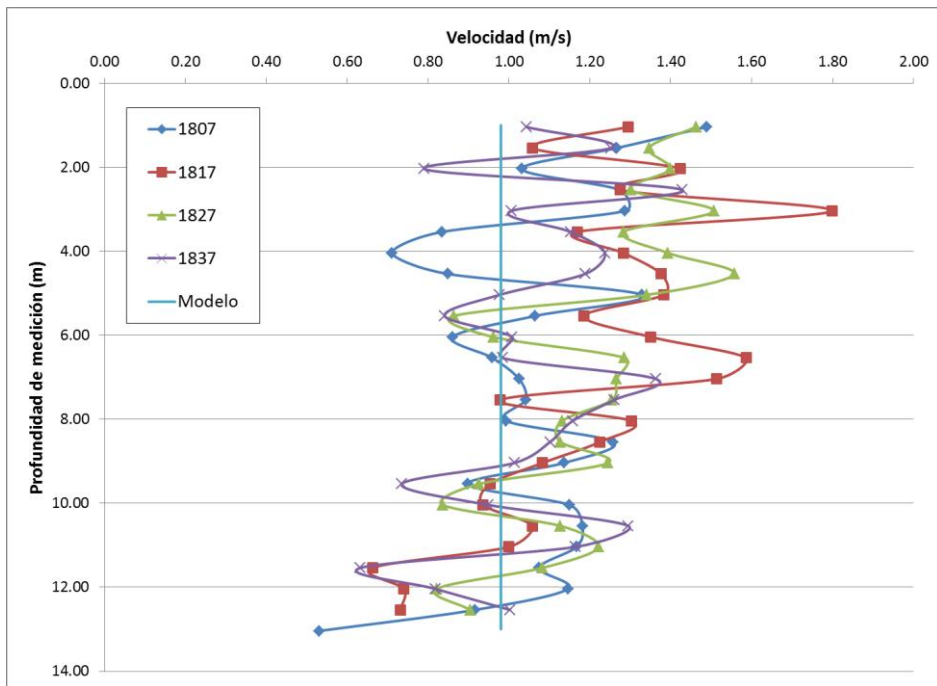
b) Punto 2



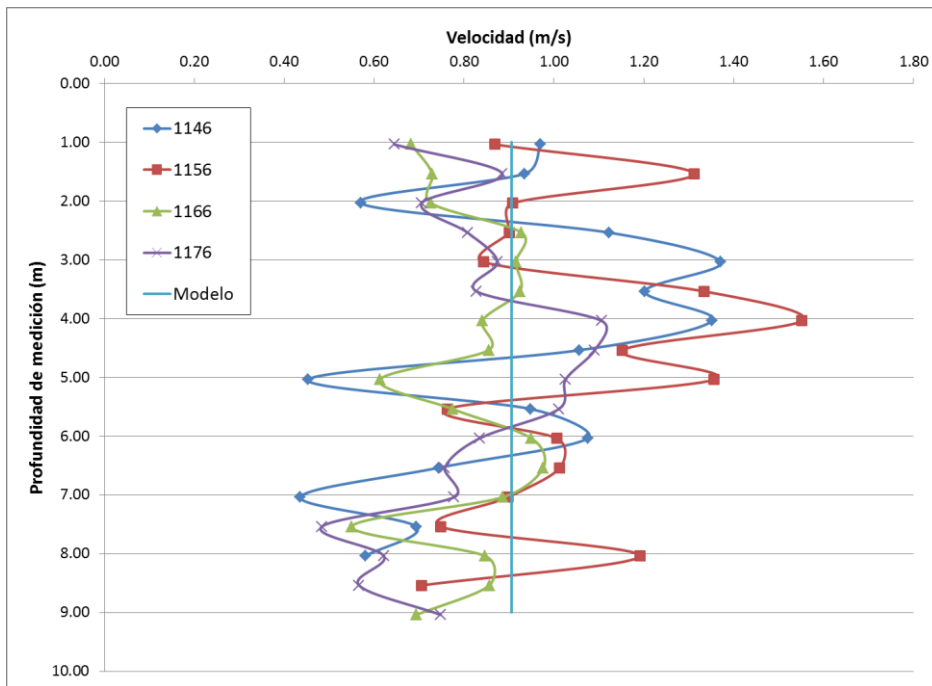
c) Punto 3



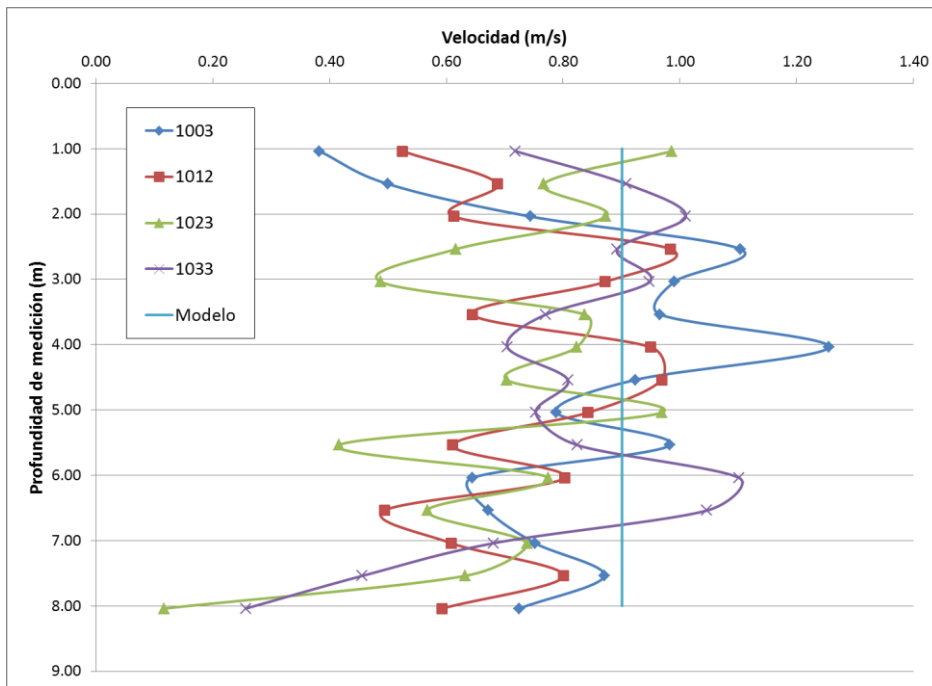
d) Punto 4



e) Punto 5



f) Punto 6



g) Punto 7

Figura 3.10. Comparación entre perfiles verticales de velocidades medidos y velocidades medias modeladas.

3.3 Modelación morfológica

La evolución morfológica de la zona de estudio está motorizada por las variaciones del caudal y de la carga de sedimentos, y condicionada por la estabilidad de las márgenes y las estructuras de defensa. Se distinguirá entre la evolución morfológica 'regional', con su estructura de canales, hoyas, bancos, etc., y la 'local', asociada a la presencia de los espigones de defensa. Los espigones tienen como función reducir la velocidad de la corriente – y, entonces, su acción erosiva – sobre las márgenes de la zona reconstituida, pero tienden a producir una fosa de erosión en torno a su extremo.

El problema que se plantea modelar es el de la evolución morfológica local sobre la margen derecha reconstituida de la Isla Guáscaras, donde se observaron erosiones significativas extendidas. La pregunta a contestar por el modelo morfológico es la siguiente: ¿está el espigón cumpliendo con su rol de protección?; más específicamente: la fosa erosiva que se conforma al pie del extremo del espigón, ¿llega a afectar esa margen (que es la que pretende proteger)?

El modelo morfológico se concentra, entonces, sobre la margen derecha de la zona de obra, de modo que el dominio es un tubo de flujo adyacente a esa margen, tal como se muestra en la Figura 3.11. Este se discretizó con una malla de 46.000 elementos triangulares, con lados de entre 1 y 10 m, con mayor densidad sobre la zona costera, tal como ilustra la Figura 3.12.

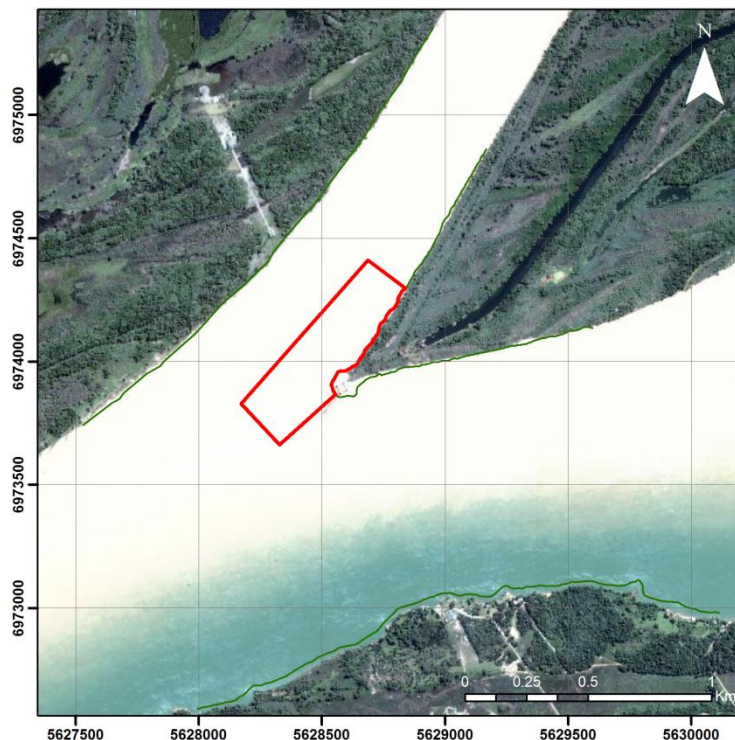


Figura 3.11. Dominio de modelación morfológica.

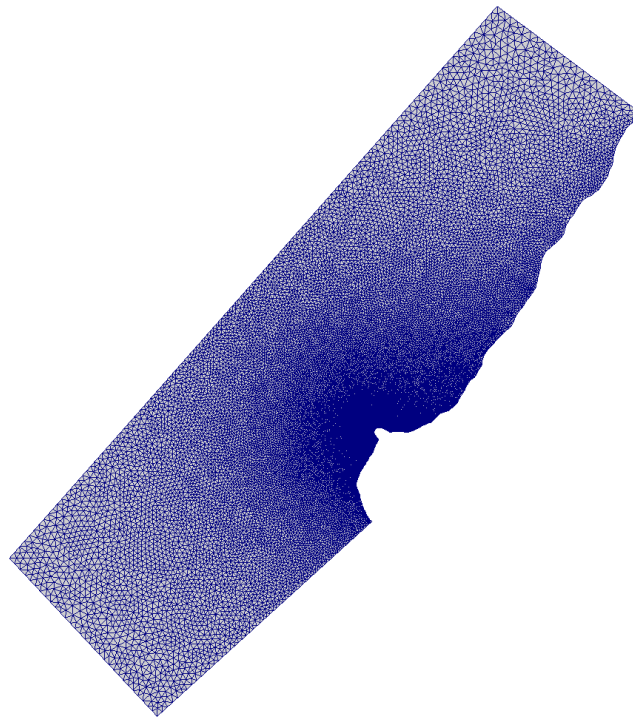


Figura 3.12. Malla de discretización.

El modelo morfológico está condicionado por la morfología regional y la situación hidrológica. La primera interviene a través de la condición inicial, para la cual se plantea por simplicidad un fondo horizontal, cuya cota podría eventualmente variar en función de la evolución de la morfología regional. La situación hidrológica, por su parte, ingresa como condición de borde de caudal para el tubo de flujo, asociada a un caudal total del río Paraná a través de lo que informa el modelo hidrodinámico.

Se impuso como cota de fondo un valor de 40 m IGN, representativo del nivel del lecho del riacho Guáscaras, tal cual surge de la Figura 2.5. Se efectuaron ensayos para caudales de 18.400, 25.000, 30.000 y 35.000 m³/s por el río Paraná (a los que le corresponden caudales de 1.440, 2.380, 3.100 y 3.900 m³/s por el tubo de flujo, respectivamente); el primero representa la situación de caudal medio; los dos siguientes corresponden a caudales relativamente altos, que se alcanzaron durante el período de tiempo de análisis (ver Figura 2.6); el último representa el caudal pico para un tiempo de retorno de aproximadamente 5 años. Los niveles de agua del río correspondientes a los cuatro escenarios, que se imponen como condiciones de borde aguas abajo, son de 46,70m, 48,40m, 49,30m y 49,90m IGN, respectivamente, tal cual también surge del modelo hidrodinámico. Como diámetro medio del sedimento (d_{50}) se tomó 125 μm (valor representativo para la zona, tal como se mostró en la sección 2.6), con una densidad de 2650 kg/m³ y una porosidad de 0,4. Para el cálculo de la tensión de corte se utilizó el coeficiente de fricción asociado al grano; considerando $d_{90} \approx 200 \mu\text{m}$ (tal cual surge de los datos provistos por EVARSA), se obtiene un coeficiente de Manning efectivo de 0,017. La viscosidad de torbellino se fijó en 0,5 m²/s, compatible con valores adimensionales típicos¹³;

¹³ Vionnet, C.A., Tassi, P.A. and Martín Vide, J.P., "Estimates of flow resistance and eddy viscosity coefficients for 2D modelling on vegetated floodplains", *Hydrol. Process.* 18, 2907–2926 (2004)

3.4 Erosión local

La erosión local máxima al pie de estructuras hidráulicas ha sido estimada históricamente en base a fórmulas empíricas, la mayoría de las cuales surgieron de estudios experimentales en canales de laboratorio.

Como paso preliminar a la aplicación del modelo morfológico, se llevó a cabo una estimación de profundidad de erosión local esperable en torno a los espigones construidos en la cola de la Isla Guáscaras utilizando la fórmula de Melville para estribos de puentes¹⁴. Esta indica que la máxima profundidad de erosión esperable, d_s , se calcula como:

$$d_s = K_{yL}K_IK_dK_sK_\theta K_GK_t \quad (3.1)$$

donde K_{yL} es el coeficiente de escala de profundidad, K_I el de intensidad de la corriente, K_d el de tamaño de grano, K_s el de forma del estribo, K_θ el de alineación del estribo, K_G el de geometría del canal, y K_t el de tiempo.

El coeficiente de escala de profundidad surge para las siguientes condiciones:

- Velocidad de la corriente igual a la velocidad crítica de erosión
- Sedimento grueso: $L / d_{50} > 50$, donde L es la longitud del estribo y d_{50} el diámetro medio del sedimento.
- Sedimento uniforme, es decir, $\sigma_g < 1,3$, donde σ_g es la desviación estándar geométrica de la distribución de tamaño de grano.
- Estribo de pared vertical.
- Estribo alineado con la corriente (a 90°).
- Canal rectangular.
- Condición de equilibrio final.

Entonces, la fórmula que representa el límite superior esperado es la siguiente:

$$K_{yL} = \begin{cases} 2L & \text{si } \frac{L}{h} < 1 \\ 2\sqrt{hL} & \text{si } 1 < \frac{L}{h} < 25 \\ 10h & \text{si } \frac{L}{h} > 25 \end{cases} \quad (3.2)$$

El coeficiente de intensidad de la corriente se calcula como

¹⁴ Melville, B.W., Coleman, S.E., "Bridge Scour", Water Resources Publications, LLC, 2000.

$$K_I = \begin{cases} \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} & \text{si } \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} < 1 \\ 1 & \text{si } \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} \geq 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

donde V es la velocidad de la corriente, V_c la velocidad crítica de erosión y V_a la velocidad para el pico de acorazamiento.

El coeficiente de tamaño de grano se evalúa como

$$K_d = \begin{cases} 0,57 \log(2,24 \frac{L}{d_{50}}) & \text{si } \frac{L}{d_{50}} \leq 25 \\ 1.0 & \text{si } \frac{L}{d_{50}} > 25 \end{cases} \quad (3.4)$$

Para estribos cuya área horizontal se encoge hacia arriba, como el presente, se sugiere un valor de base del coeficiente de forma del estribo $K_{s0} = 0,76$, que luego debe ser corregido de acuerdo a

$$K_s = \begin{cases} K_{s0} & \text{si } \frac{L}{h} \leq 10 \\ K_{s0} + 0,667(1 - K_{s0})(0,1 \frac{L}{h} - 1) & \text{si } 10 < \frac{L}{h} < 25 \\ 1.0 & \text{si } \frac{L}{h} \geq 25 \end{cases} \quad (3.5)$$

En el caso de estribos alineados a 60° y 120° respecto de la corriente, se sugieren valores de base del coeficiente de alineación del estribo de $K_{\theta 0} = 0,98$ y $K_{\theta 0} = 1,05$, respectivamente, que luego debe ser corregido de acuerdo a

$$K_\theta = \begin{cases} K_{\theta 0} & \text{si } \frac{L}{h} \geq 3 \\ K_{\theta 0} + (1 - K_{\theta 0}) \left(1,5 - 0,5 \frac{L}{h}\right) & \text{si } 1 < \frac{L}{h} < 3 \\ 1.0 & \text{si } \frac{L}{h} \leq 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

El coeficiente de geometría del canal se establece en $K_G = 1.0$ para un canal simple (sin tramo de planicie de inundación), como en el presente caso.

Para condiciones de lecho vivo, como en el presente caso, el coeficiente de tiempo puede tomarse como $K_t = 1.0$.

Se aplicó la fórmula de Melville al presente problema. Los datos utilizados fueron los

siguientes:

- Se consideraron condiciones medias de flujo, infiriéndose valores de las variables hidrodinámicas a partir de los resultados del modelo hidrodinámico para condiciones de caudal medio, a saber, $h = 9,5$ m/s para el riacho Guáscaras, $h = 7,5$ m para el río Paraná, y $V = 1$ m/s para ambos. Utilizando el valor de rugosidad de Manning establecido para el modelo 2D surge una velocidad de corte $u_* = 0,034$ m/s.
- A partir de las distribuciones granulométricas mostradas en la sección 2.6, se estimó $d_{50} \approx 125$ μm y se consideró sedimento uniforme ($\sigma_g < 1,3$), con lo cual $V_a = V_c$ (no hay acorazamiento). El número de Reynolds asociado al tamaño medio, en términos de la velocidad de corte, es entonces $Re_* = 4,3$. Esto conduce a un valor de factor de movilidad crítico¹⁵ $\theta_{sc} = 0,067$, que corresponde a una velocidad crítica de erosión de $V_c = 0,27$ m/s, indicando que se está en condiciones de lecho vivo.
- La longitud del estribo se estima en $L = 40$ m. Entonces $L / h = 4,2$ y $5,3$, respectivamente, y $L / d_{50} = 1,6 \times 10^5$.

Los resultados, discriminando los distintos coeficientes, se presentan en la Tabla 3.1. Se observa que el coeficiente de escala de profundidad es muy alto, y que sólo es reducido por el coeficiente de forma del estribo. Los valores finales, del orden de los 25 m, resultan robustos frente a análisis de sensibilidad a variaciones en los datos de entrada. Nótese que los valores calculados son mucho mayores a los observados hasta el presente. Más allá de las incertidumbres del método de cálculo, que puede conducir a desviaciones considerables, esos valores indican que pueden esperarse grandes profundidades para las fosas de erosión local adyacentes a los espigones.

Tabla 3.1. Cálculo de erosión local

Factor	Valor	
	Guáscaras	Paraná
K_{yL}	39 m	35 m
K_f	1,0	1,0
K_d	1,0	1,0
K_s	0,76	0,76
K_θ	1,0	1,0
K_G	1,0	1,0
K_t	1,0	1,0
d_s	30 m	26 m

¹⁵ Van Rijn, L.C., "Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas", Aqua Publications, 1993.

3.5 Ensayos preliminares

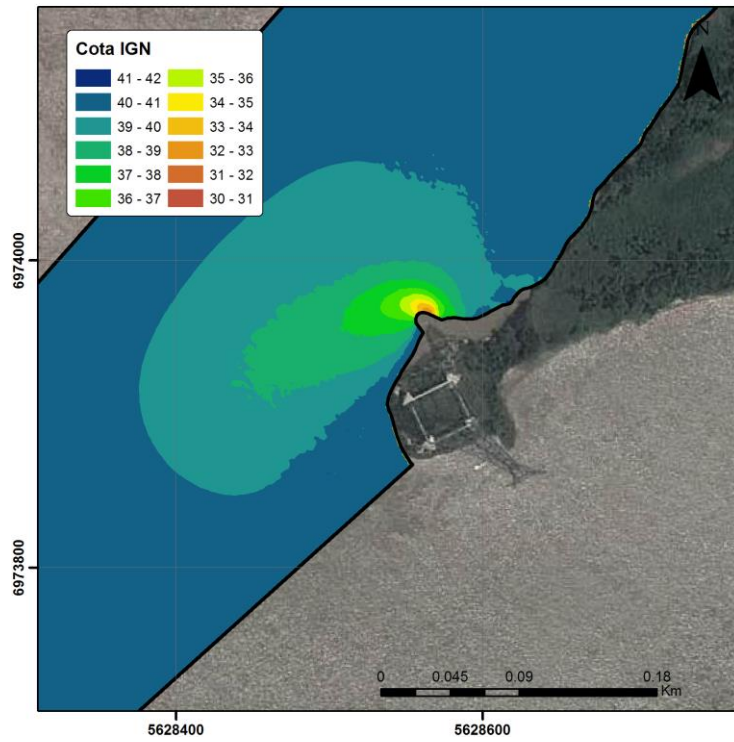
Se efectuó una primera serie de ensayos preliminares con el modelo morfológico, de modo de, por un lado, establecer el alcance de las fosas de erosión y, por el otro, efectuar análisis de sensibilidad de la solución. La longitud efectiva del espigón representado en esta etapa a la postre resultó demasiado corta, de modo que estos resultados preliminares sólo deben considerarse como indicativos.

La Figura 3.13 muestra las hoyas de erosión resultantes para tres (de los cuatro) escenarios de caudal luego de 35 días, cuando se han alcanzado condiciones relativamente estabilizadas. Se observa que si bien las dimensiones horizontales de la fosa son relativamente significativas, las mayores profundidades se concentran en las inmediaciones del espigón. Comparando con la Figura 2.5, se observa que la cota de fondo de la fosa es del orden de la observada en los últimos relevamientos, lo cual constituye un primer paso de validación del modelo. Como era de esperarse, la fosa de erosión se expande y profundiza cuando aumenta el caudal.

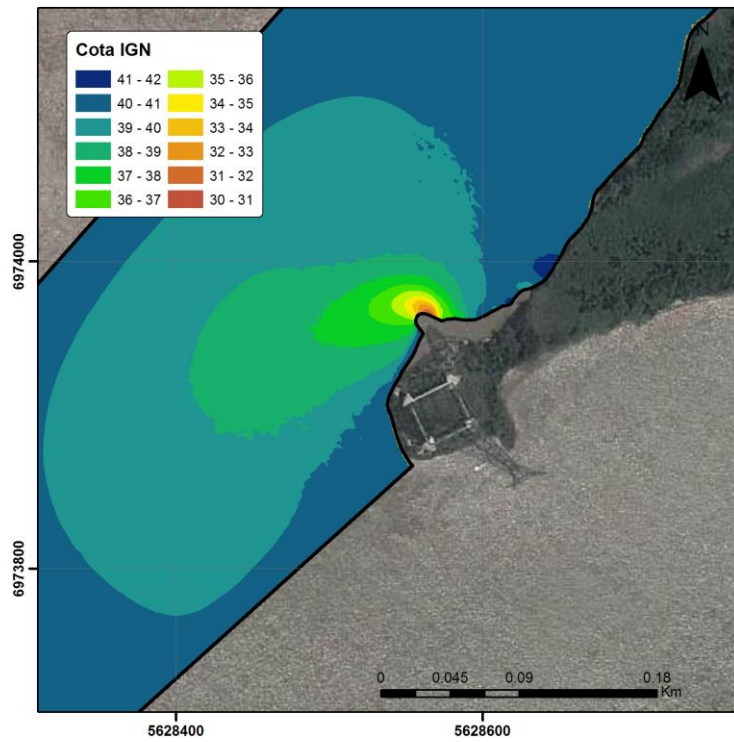
La primera prueba de sensibilidad consistió en incrementar el valor del coeficiente de Manning utilizado para el cálculo de la tensión de corte desde 0,017 a 0,020, que es el valor aplicado en el modelo hidrodinámico (que incluye la resistencia por forma). Los resultados se presentan en la Figura 3.14. La fosa de erosión se expande (como era de esperarse por el aumento de la tensión de corte), pero el incremento es relativamente poco significativo y se manifiesta poco cambio en la zona de mayor profundidad.

Para el segundo análisis de sensibilidad se mantuvo el incremento del valor del coeficiente de Manning, y se incrementó el diámetro medio de sedimento desde 125 a 250 μm (valor representativo de zonas más profundas, de acuerdo a lo presentado en la sección 2.6). La Figura 3.15 muestra los resultados. Se observa que ahora hay una retracción de la fosa de erosión respecto del caso anterior (de acuerdo a lo esperado, ya que aumenta la resistencia a la erosión), aunque tampoco es considerable y tampoco los son los cambios en la zona de mayor profundidad.

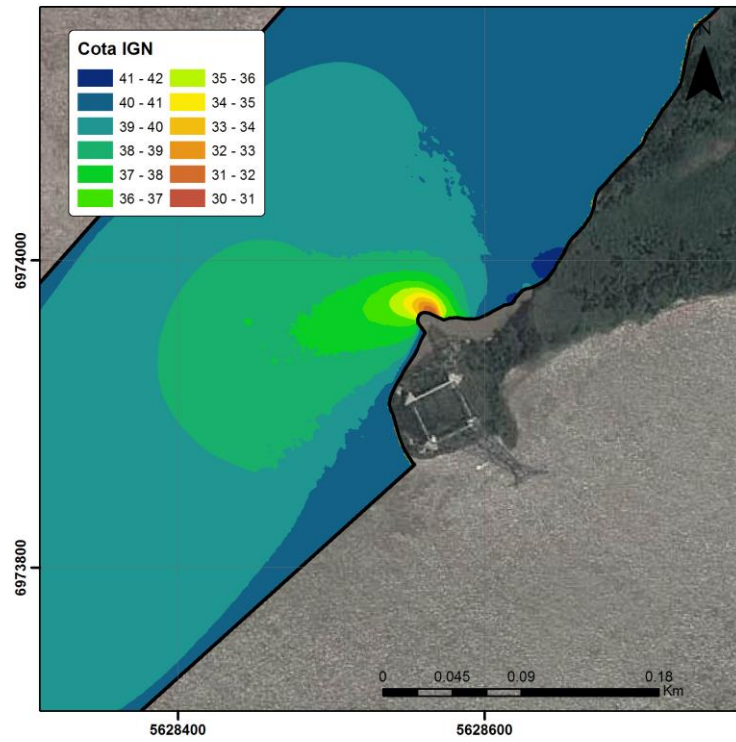
Estos ensayos de sensibilidad indican, entonces, que los resultados del modelo morfológico serán relativamente robustos.



a) 18.400 m³/s

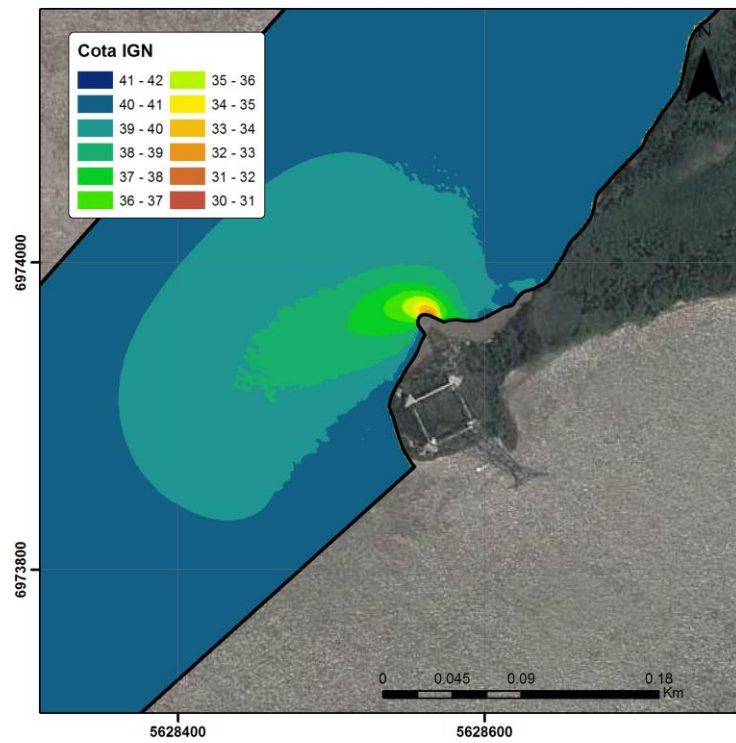


b) 25.000 m³/s

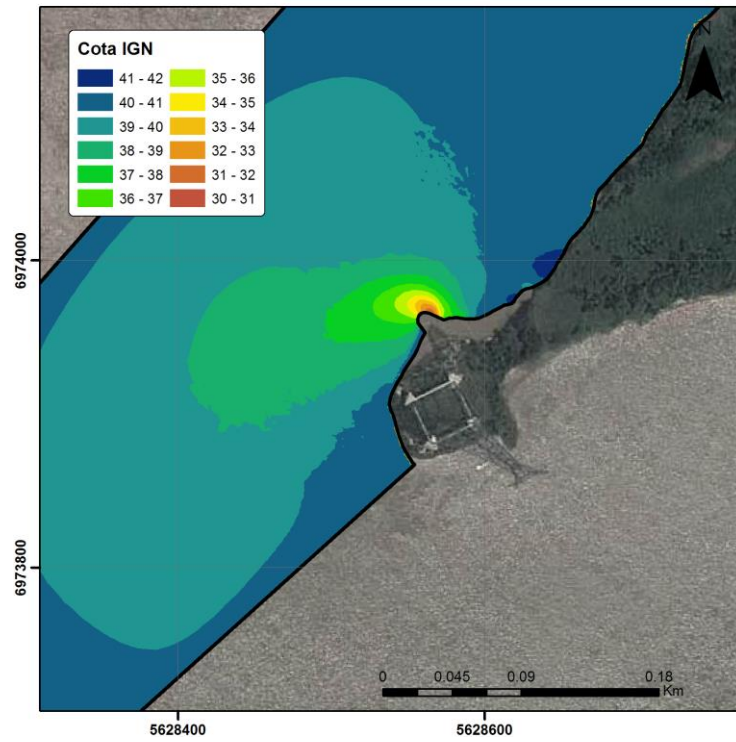


c) 30.000 m³/s

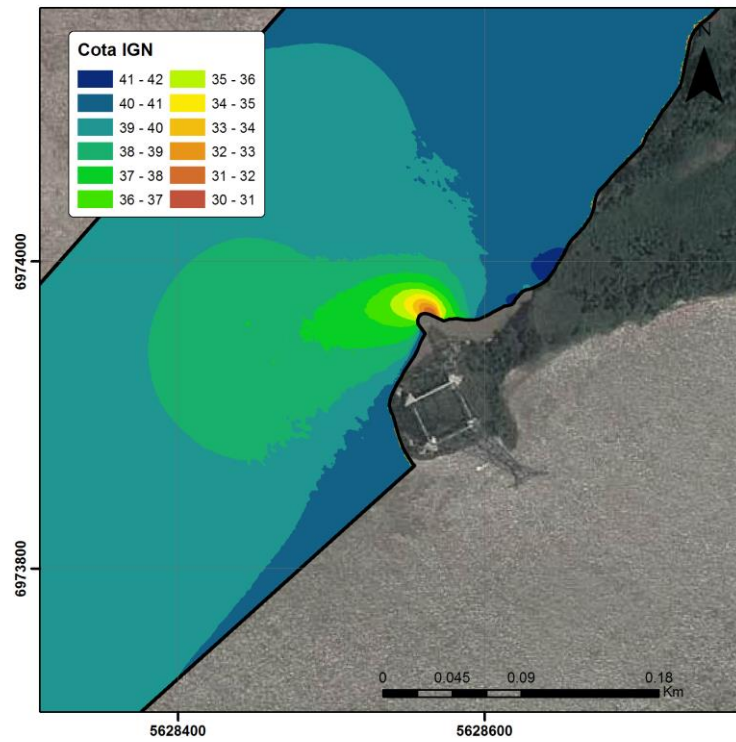
Figura 3.13. Fosa de erosión asociada al espigón.



a) 18.400 m³/s

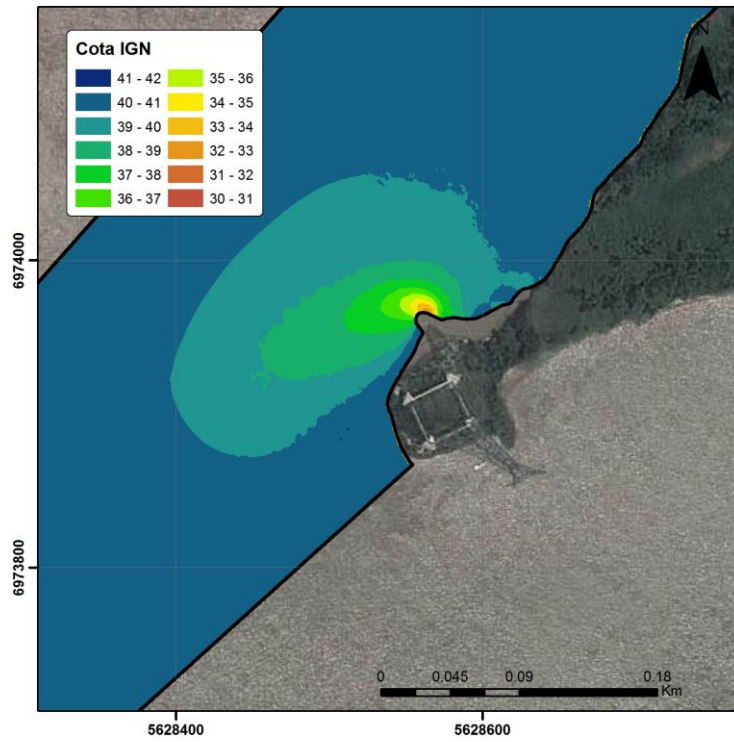


b) 25.000 m³/s

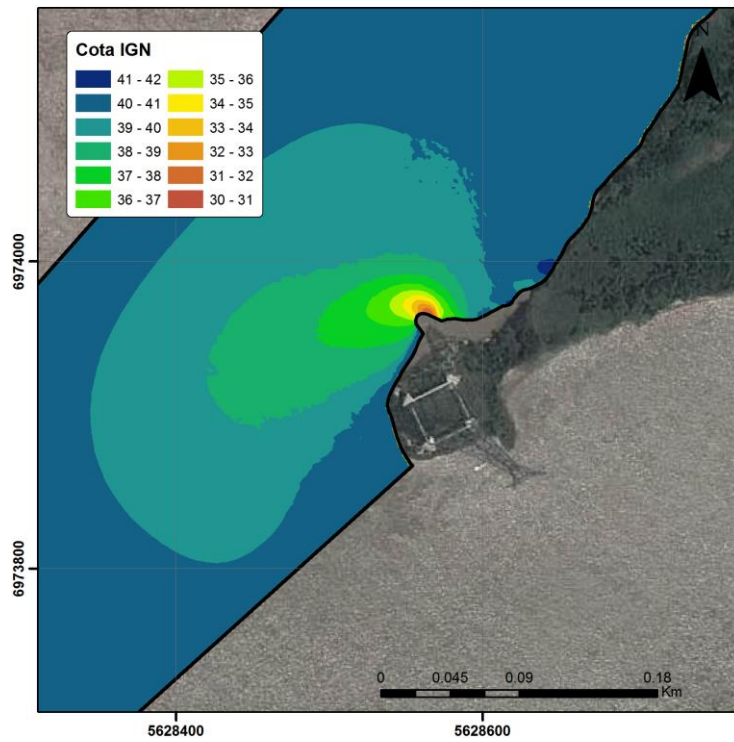


c) 30.000 m³/s

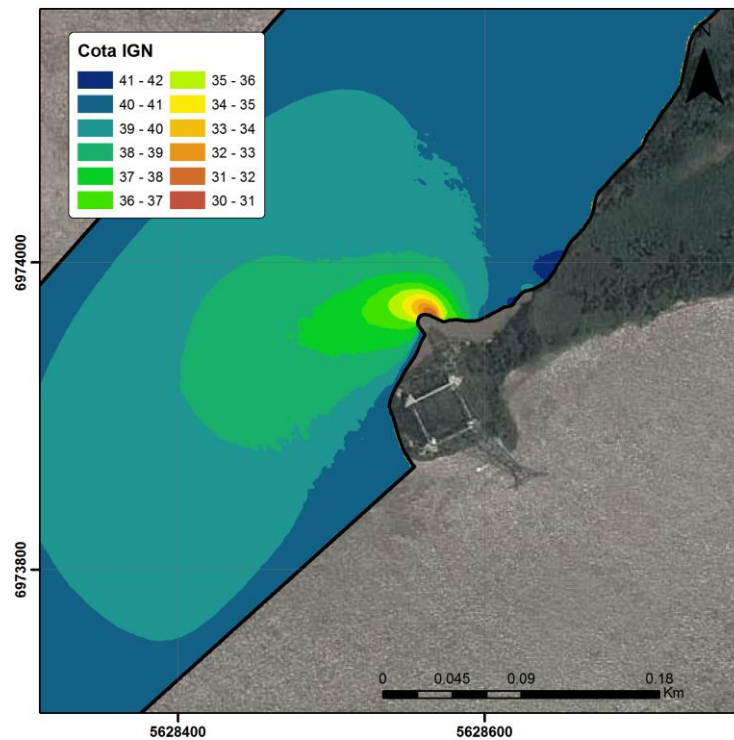
Figura 3.14. Fosa de erosión asociada al espigón incrementando el coeficiente de Manning.



a) 18.400 m³/s



b) 25.000 m³/s



c) 30.000 m³/s

Figura 3.15. Fosa de erosión asociada al espigón incrementando el coeficiente de Manning y el diámetro medio del sedimento.

3.6 Validación del modelo morfológico

Una vez introducida la longitud efectiva correcta del espigón, se procedió a efectuar una validación del modelo morfológico comparando sus predicciones con las observaciones. Dado que el modelo no tiene en cuenta el detalle de la morfología general del entorno, la comparación sólo apunta a determinar si el modelo es capaz de reproducir aproximadamente la forma y extensión general de la hoya de erosión asociada al espigón y el orden de magnitud de las profundidades máximas. De todos modos, para esta comparación, en lugar de considerar como condición inicial un fondo plano, se esquematizó la batimetría para acercarse a la morfología general observada en Feb/12, con el fondo del canal del riacho Guáscaras por debajo de la cota 40 m IGN, tal como se muestra en la Figura 3.16.

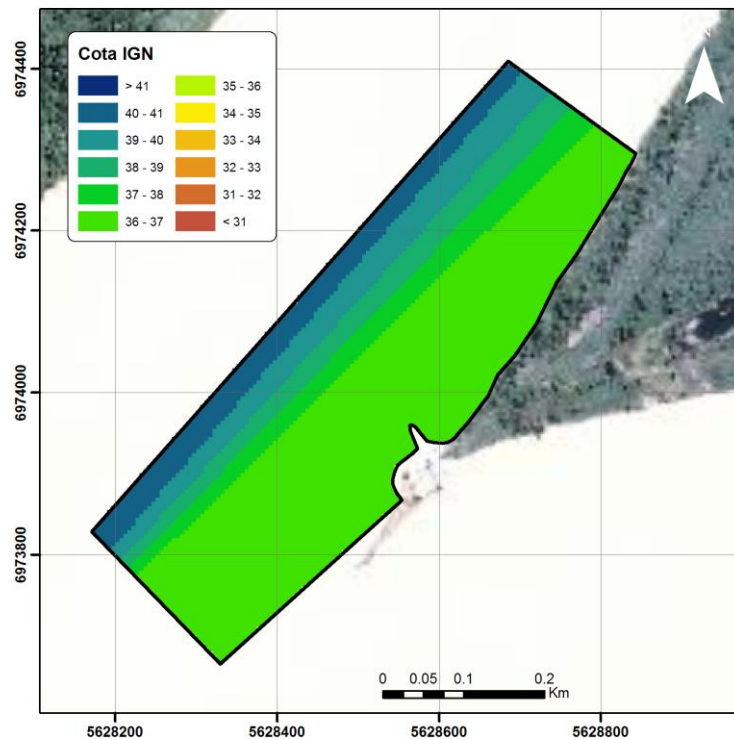
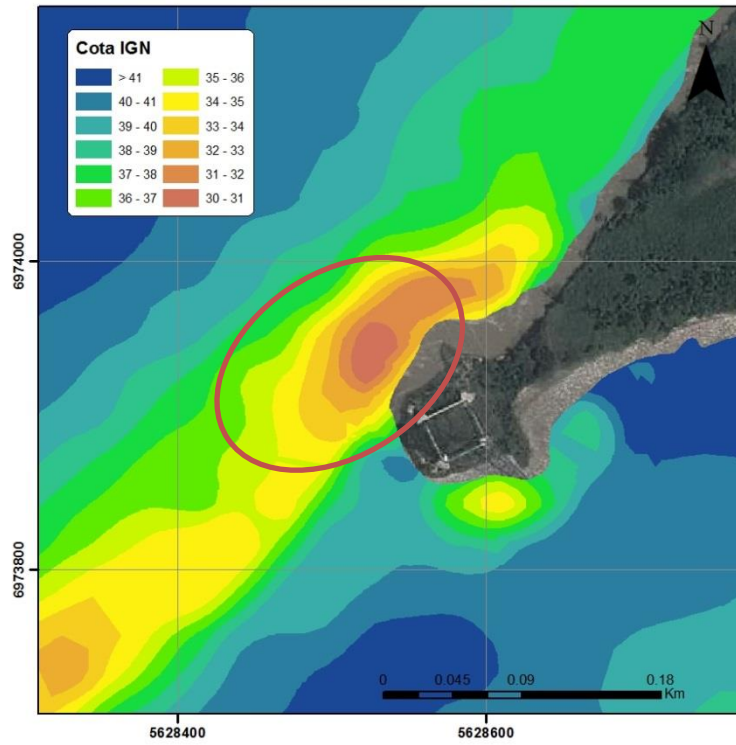


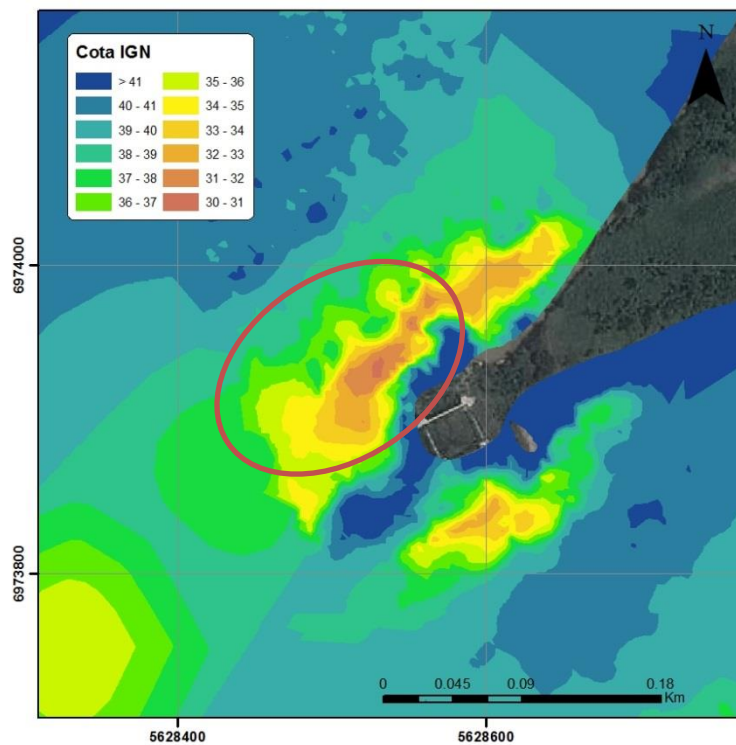
Figura 3.16. Batimetría inicial para ensayo de validación.

Se tomó como referencia observacional a las batimetrías relevadas en Feb/12 y Jul/13, representativas del estado de máximo desarrollo de las fosas erosivas asociadas a los espigones. Estas se repiten en las Figuras 3.17a y 3.17b, donde se identifica la ventana de comparación seleccionada, que abarca la parte principal de la hoya de erosión. Se observa que ambas resultan relativamente similares entre sí, siendo la primera algo más suave y extendida, seguramente en parte debido a los diferentes métodos de procesamiento de los datos relevados (recuérdese que para Jul/13 se efectuó un procesamiento propio).

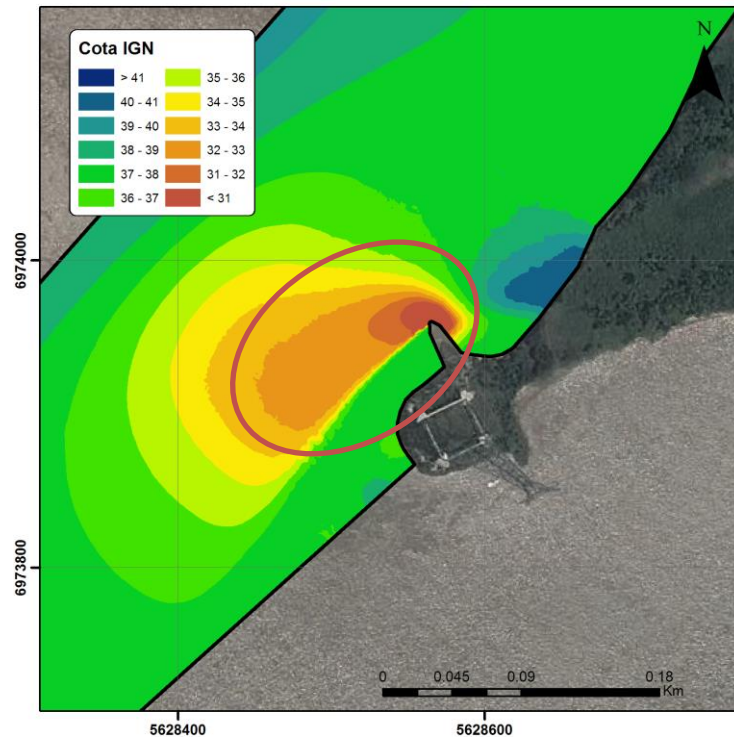
La Figura 3.17c muestra el resultado del modelo para el máximo caudal ensayado (35.000 m³/s), identificándose también la misma ventana de comparación. Se observa que el modelo representa adecuadamente la estructura, extensión y orden de profundidad de la fosa erosiva, con lo cual se lo considera validado.



a) Relevamiento de Febrero de 2012



b) Relevamiento de Julio de 2013



c) Modelo para caudal de 35.000 m³/s

Figura 3.16. Comparación de fosas de erosión asociadas al espigón de acuerdo a los relevamientos y al modelo.

4 ANÁLISIS DE EROSIÓN

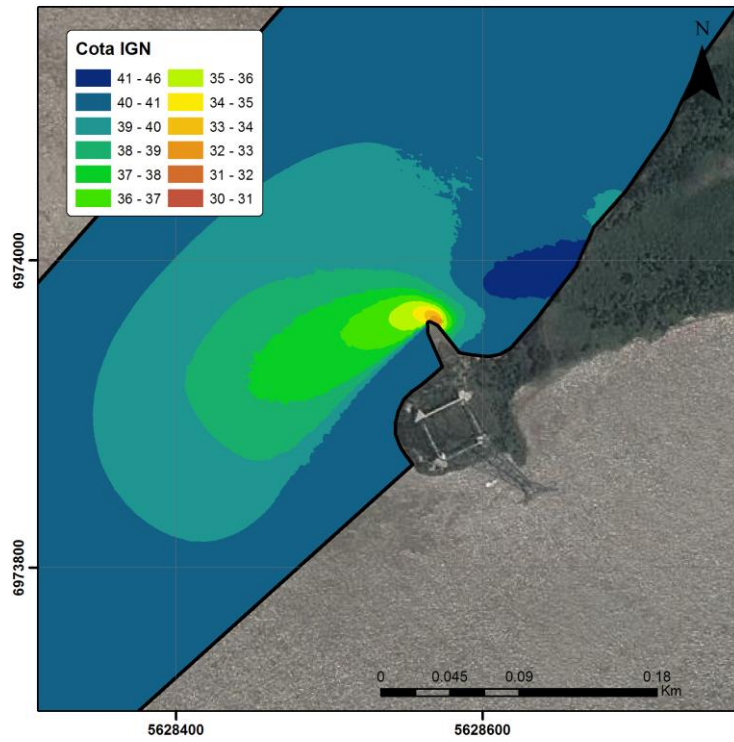
4.1 Diagnóstico

La Figura 4.1 muestra las fosas de erosión resultantes por la presencia del espigón para los cuatro escenarios de análisis luego de 35 días, cuando se han alcanzado condiciones relativamente estabilizadas. Se observa que:

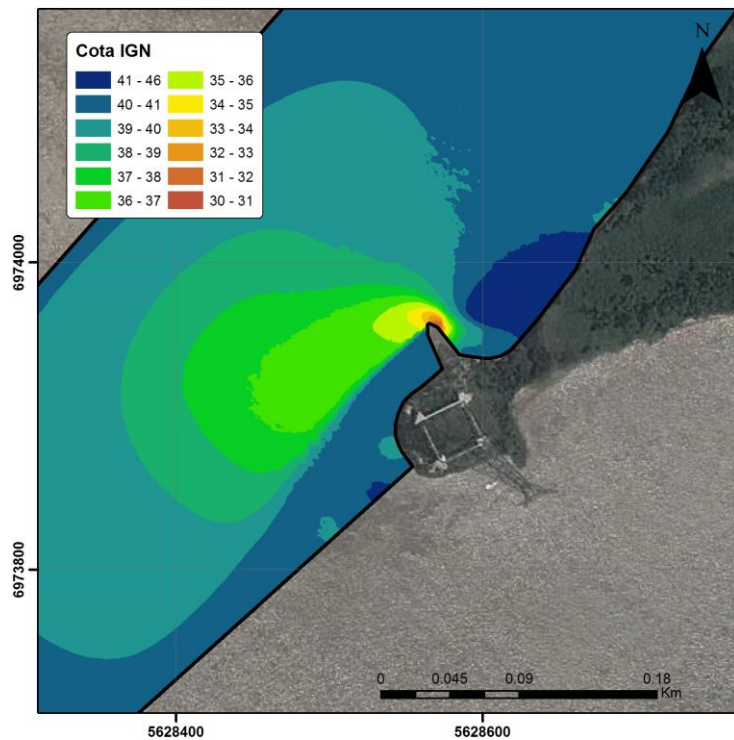
- Como era de esperarse, la fosa de erosión se expande y profundiza cuando aumenta el caudal, tal como ya se indicó en relación a los escenarios preliminares.
- La fosa de erosión alcanza una profundidad máxima del orden de los 8 a 9 metros al pie del espigón.
- Para los caudales más altos se desarrolla una fosa secundaria apenas aguas abajo del extremo de la isla.
- El espigón protege la margen derecha recompuesta de la cola de la isla, donde se mantiene la cota de fondo inicial.
- Si bien se manifiesta una leve tendencia erosiva sobre la margen del extremo de la isla para caudales crecientes, esta es eventualmente contrarrestada por una tendencia más intensa de sedimentación para el caudal mayor.

Estos resultados indican, entonces, que el espigón está cumpliendo con su rol de proteger la margen recompuesta de la cola de la isla sobre el riacho Guáscaras, es decir, que la fosa de erosión local que produce nunca alcanza la envergadura suficiente como para generar una erosión significativa al pie de la obra de protección de esa margen. En consecuencia, la erosión detectada al pie de esa obra debe asignarse al cambio morfológico regional que tuvo lugar en el riacho Guáscaras bajo la acción de altos caudales, que se manifestó en la concentración del flujo sobre la margen izquierda de la isla, con la consecuente bajada general del nivel del lecho de ese canal, tal como se describió en la sección 2.3.

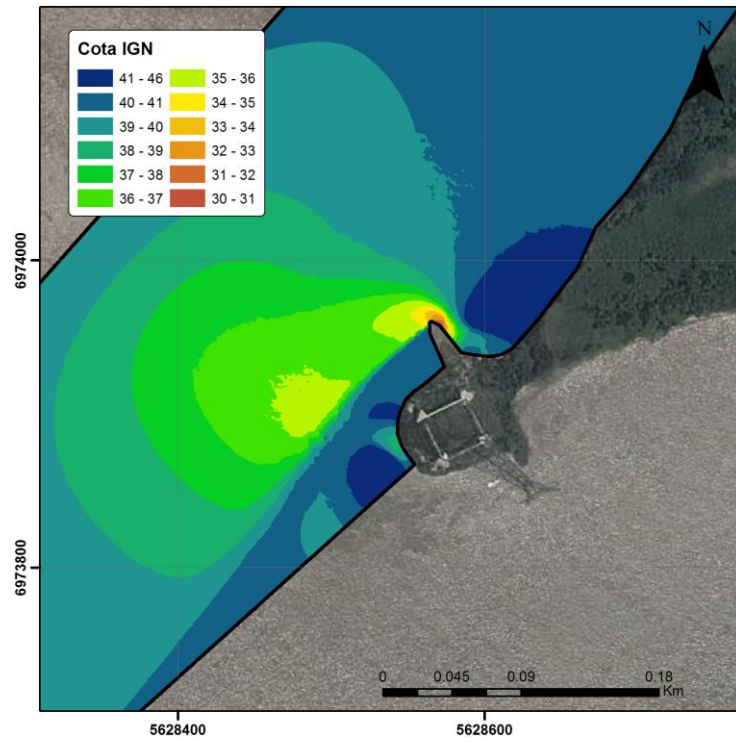
Esa bajada general del nivel del lecho del canal constituye un hecho inesperado a priori, que ha puesto a prueba la capacidad de resistencia de la obra de protección. Puede concluirse que la obra ha salido airosa de ese desafío, aunque al mismo tiempo reclama acciones complementarias para garantizar su estabilidad.



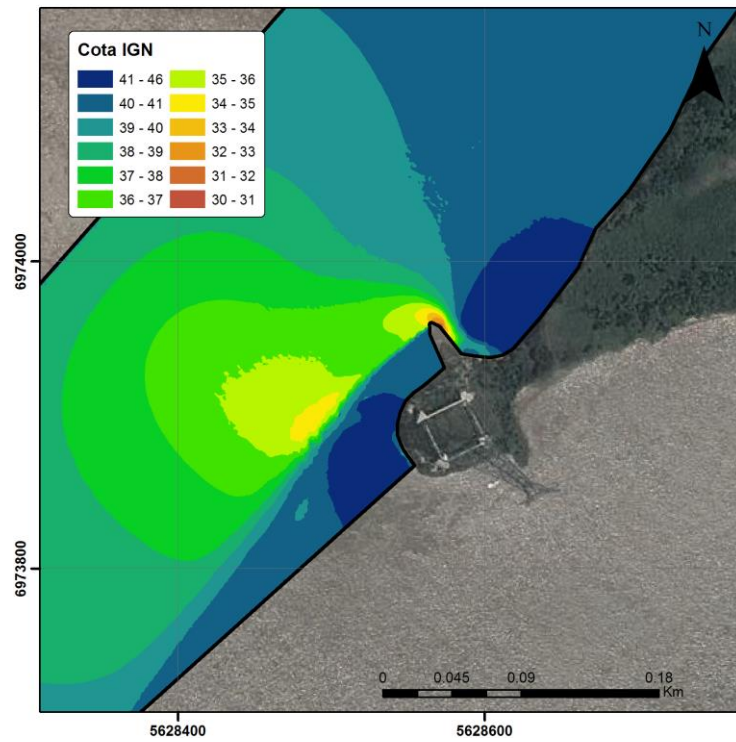
a) 18.400 m³/s



b) 25.000 m³/s



c) 30.000 m³/s



d) 35.000 m³/s

Figura 4.1. Fosas de erosión producidas por el espigón para distintos caudales del río Paraná.

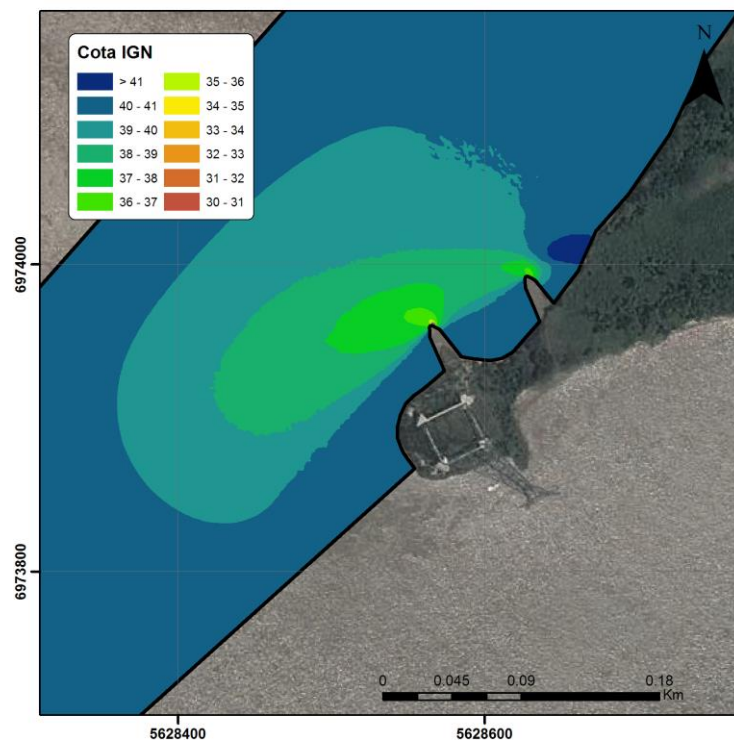
4.2 Acciones complementarias

Una primera acción complementaria evidente es la necesidad de remediar los daños causados por la erosión extendida al pie de obra, incluyendo el espigón. Esto significa recomponer ese pie de obra, que ahora tiene un nivel de referencia del lecho inferior al original.

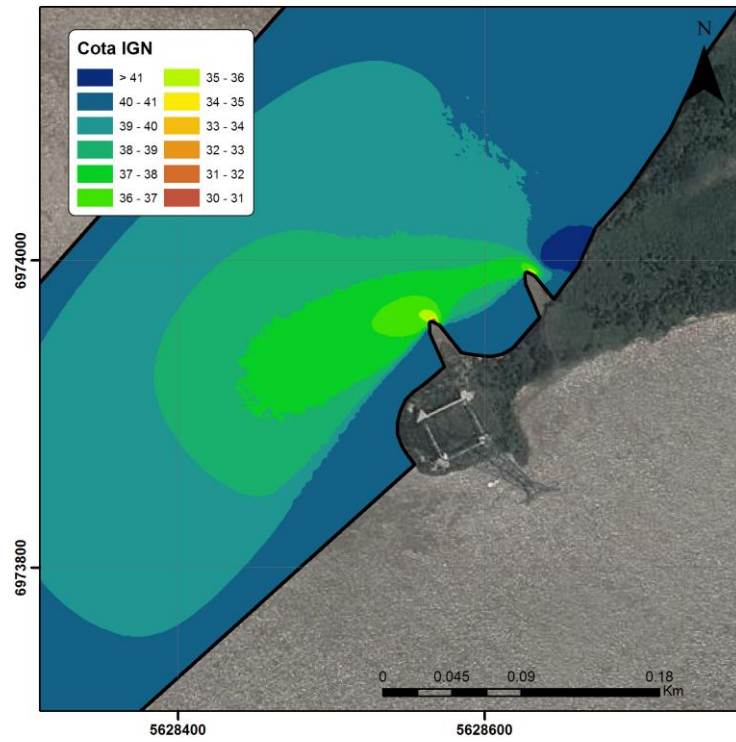
Como segunda acción complementaria se recomienda efectuar un seguimiento continuo de la estabilidad del pie de la obra mediante inspección por medio de buzos, de modo de detectar tempranamente eventuales nuevas erosiones que comprometan su estabilidad. Específicamente, esta debería llevarse a cabo luego de cada crecida extraordinaria del río Paraná (caudales pico del orden o superiores a 30.000 m³/s).

Como tercera acción complementaria, se analizó la posibilidad de defender el espigón del impacto directo de la corriente, que actúa como un mecanismo desestabilizador de esa estructura, mediante la construcción de un segundo espigón aguas arriba. Para ello se utilizó el modelo morfológico.

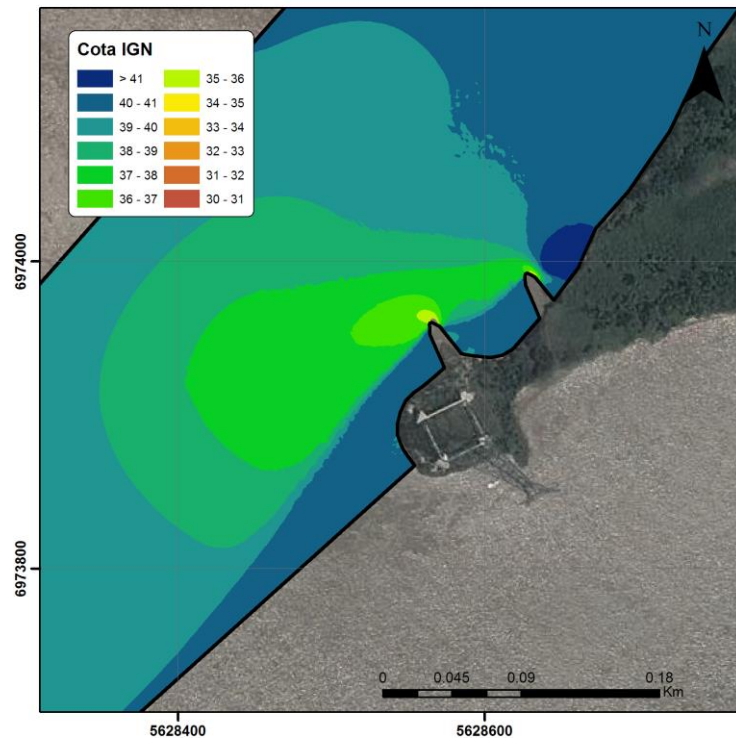
Luego de algunas pruebas preliminares, al segundo espigón se lo localizó a 70 m de distancia, y se le asignó una extensión de aproximadamente 30 m. Los resultados se muestran en la Figura 4.2. Se observa que la presencia del segundo espigón conduce a fosas de erosión mucho menos significativas para el primer espigón. Además, las fosas de erosión asociadas al segundo espigón son incluso menos significativas que para el primero. De esta manera, las dos obras resultan en conjunto más estables que el actual espigón en solitario.



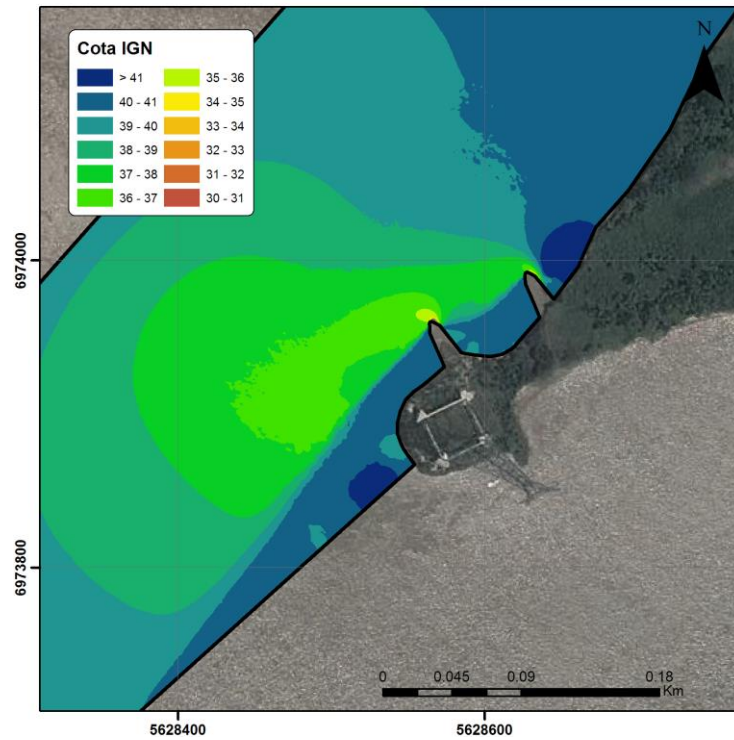
a) 18.400 m³/s



b) 25.000 m³/s



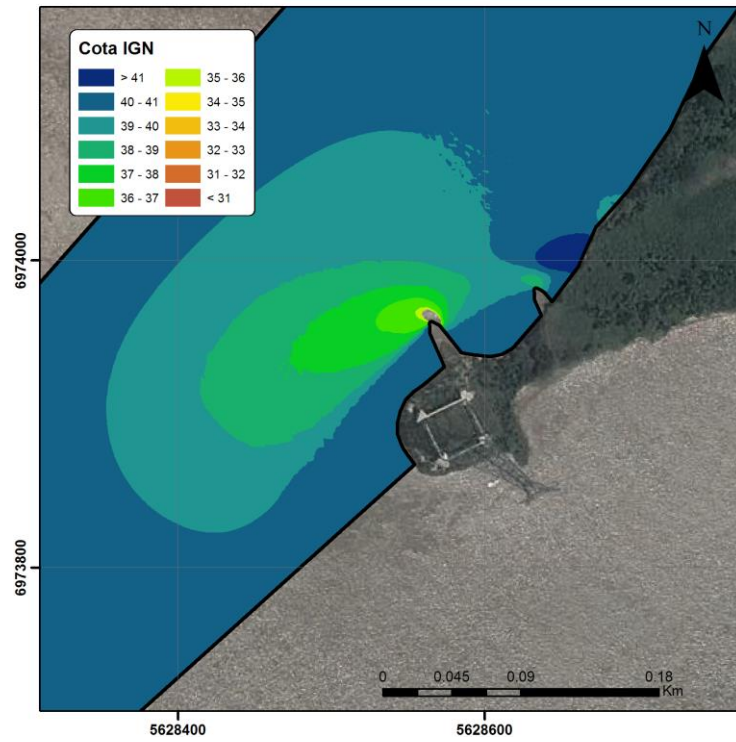
c) 30.000 m³/s



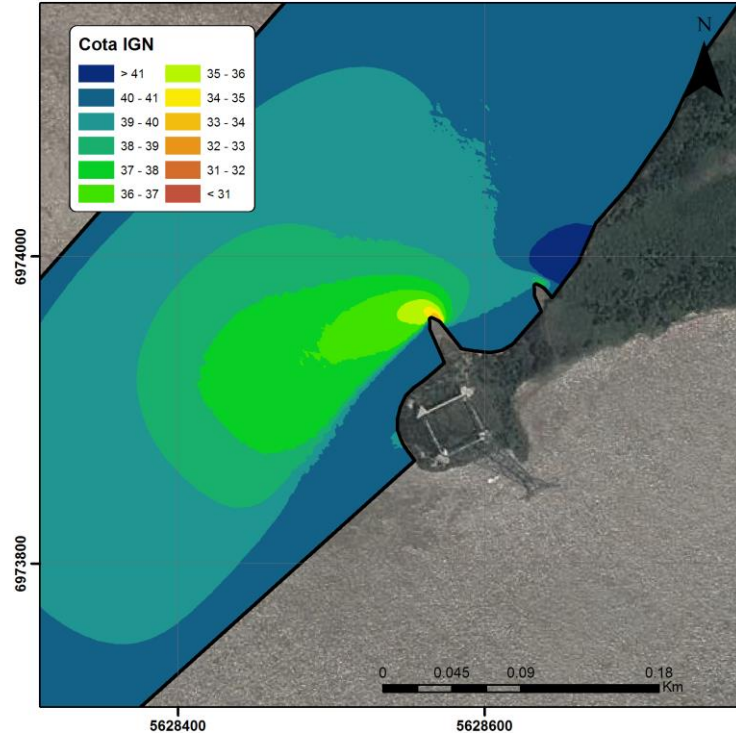
d) 35.000 m³/s

Figura 4.2. Fosas de erosión con el segundo espigón.

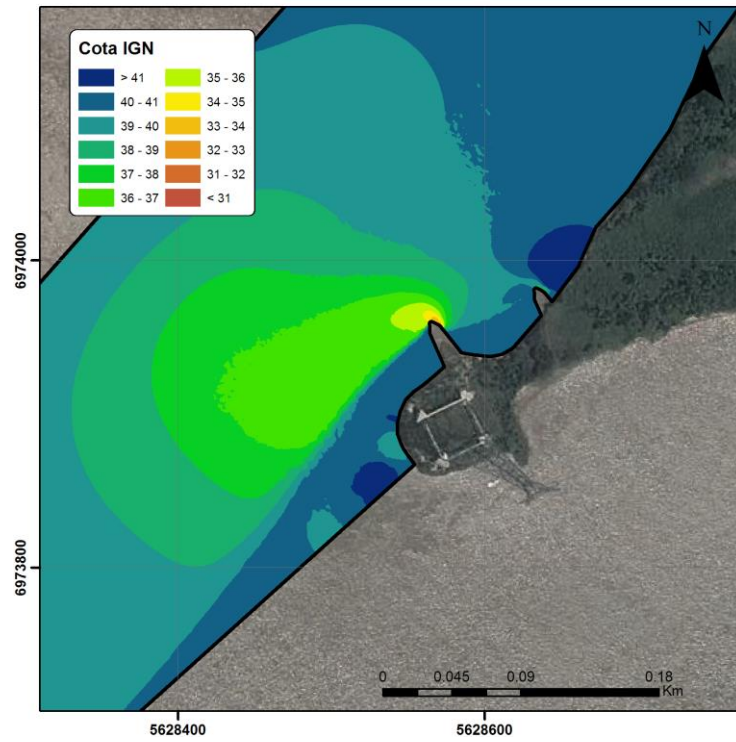
Para analizar la sensibilidad del resultado obtenido a la extensión del segundo espigón, se efectuaron ensayos reduciendo esa extensión a la mitad (15 m). Los resultados se presentan en la Figura 4.3. Tal cual era de esperarse, se observa un menor grado de protección del primer espigón (fosas de erosión más significativas) y una mayor estabilidad del segundo espigón. En función del importante rol del primer espigón, como protector de la erosión al pie de la obra de recomposición de la cola de la isla, se recomienda la primera opción (segundo espigón de 30 m de largo).



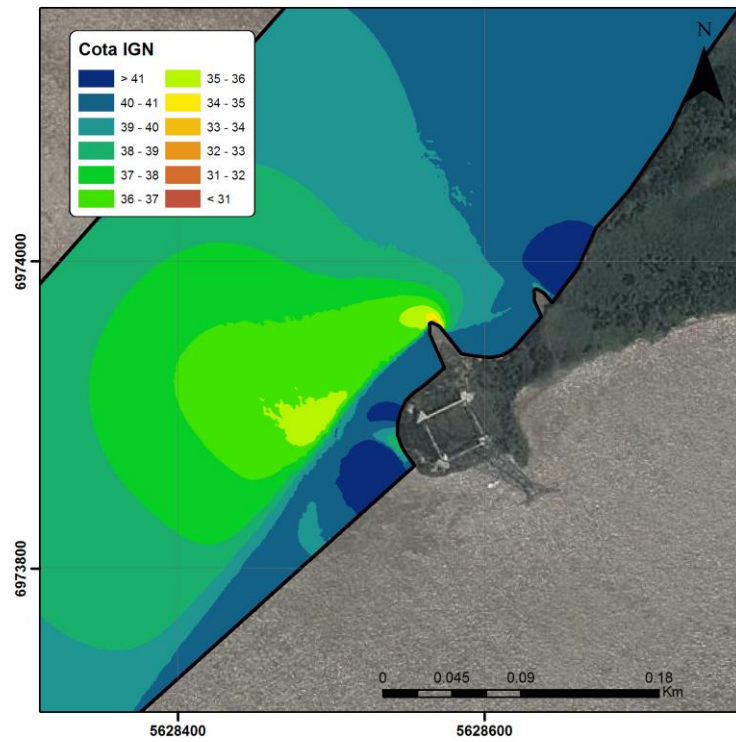
a) 18.400 m³/s



b) 25.000 m³/s



c) 30.000 m³/s



d) 35.000 m³/s

Figura 4.3. Fosas de erosión con el segundo espigón acortado.

5 CONCLUSIONES

Las siguiente es la síntesis del conocimiento adquirido durante este estudio:

- Se producen *cambios morfológicos naturales significativos* en torno a la cola de la Isla Guáscaras, que condicionan la estabilidad de la obra de recomposición. En particular, se producen variaciones en la extensión y profundidad de la hoya mayor de erosión sobre el río Paraná, en la alineación del canal principal del riacho Guáscaras, en el ancho y profundidad del canal secundario del riacho Guáscaras, en la ubicación y empinamiento del escalón a la desembocadura del riacho Guáscaras, y en la localización y profundidad de la hoya de erosión menor al pie del escalón. **Esto indica que la obra está insertada en un ambiente fluvial agresivo, por lo que es necesario un seguimiento continuo de su estado.**
- Las mayores variaciones se producen *por efecto de las crecidas del río Paraná*. En particular, luego de la crecida de 2007 se registró una profundización significativa de la hoya mayor – del orden de los 5 m – y un ensanchamiento notable del canal secundario del riacho Guáscaras, mientras que luego de las crecidas de 2010 y las dos de 2011 se verificó una nueva profundización significativa de la hoya mayor, y un cambio en el patrón de flujo sobre el riacho Guáscaras, acompañado de una profundización significativa – del orden de los 4 m – del canal secundario. **De esto surge que es importante efectuar un relevamiento batimétrico al menos a posteriori de cada crecida.**
- Luego de una etapa de tendencias esencialmente *erosivas* en torno a la zona de obra, que se extiende entre noviembre de 2006 y febrero de 2012 – período durante el cual se produjeron crecidas significativas del río Paraná –, se detecta del relevamiento de julio de 2013 una relativa *estabilización morfológica*, acompañada incluso de una relativamente leve sedimentación en el canal secundario del riacho Guáscaras aguas arriba de la obra. Este último período corresponde a una situación de caudales medios del río Paraná (aproximadamente entre 15.000 y 20.000 m³/s), sobre la cual el agudo pico de crecida previo al relevamiento – generado en la cuenca del río Iguazú – no produjo un efecto significativo debido a su relativamente corta duración. **Esto indica que la ausencia de crecidas significativas del río Paraná (originadas en su alta cuenca) conducen a estabilidad morfológica y eventualmente a sedimentación en el entorno de la obra. Pero no significa que necesariamente se haya alcanzado un techo a los niveles de erosión.**
- En el período entre 2006 y 2009 la cola de la Isla Guáscaras sufrió un *empinamiento de las barrancas* sobre ambas márgenes, aguas arriba de la obra, hasta la casi desaparición de barrancas extendidas, salvo por la zona de playa aguas arriba del espigón de margen izquierda generada por la acción de ese espigón. En febrero de 2012 se produjo la *reaparición de una barranca extendida* sobre la margen izquierda de la isla, aguas arriba de la obra; pero esto podría estar asociado a un desmornamiento de la margen. **El empinamiento de las barrancas se interpreta como un indicador de tendencia erosiva general de la cola de la Isla Guáscaras, aguas arriba de la obra.**

- Luego de la construcción de la obra se conformaron sendas *fosas de erosión* en torno al extremo de los dos espigones, tal cual era de esperarse. Estas se agrandaron y profundizaron, registrándose una erosión de entre 1 y 2 m entre agosto de 2008 y febrero de 2009 – que representa una tasa media de erosión de entre 35 y 70 cm/mes –, y de alrededor de 5 m entre agosto de 2008 y febrero de 2012 (descontándole a la fosa del riacho Guáscaras los 4 m de reducción de la cota de fondo del canal secundario, sobre el que se asienta) – que representa una tasa media de erosión de alrededor de 15 cm/mes. Las fosas se mostraron relativamente estables entre febrero de 2012 y julio de 2013, aunque esto no garantiza que hayan alcanzado su estabilización, ya que en ese período no ocurrieron grandes crecidas del río Paraná. **La formación de fosas de erosión en torno al extremo de los espigones es un fenómeno conocido, sobre cuya evolución debe hacerse un seguimiento para determinar cuándo alcanza su estabilización.**
- La *partición de caudal* entre el riacho Guáscaras y el río Paraná depende esencialmente del *nivel del río*, no detectándose la influencia de los cambios batimétricos del riacho Guáscaras. **Esta observación es importante porque indica una estabilidad global del riacho Guáscaras como curso de agua, a pesar de sus variaciones batimétricas.**
- Las *erosiones puntuales al pie de obra* sobre la margen del río Paraná (extremo de aguas arriba del espigón y extremo de aguas abajo de la cola de la isla) están ligadas a las altas velocidades locales de la corriente en esos puntos. **Estas erosiones puntuales son inevitables, y se deben manejar mediante un adecuado mantenimiento, como el que necesita cualquier obra hidráulica.**
- Las *erosiones extendidas al pie de obra* a todo lo largo de la margen del riacho Guáscaras y la cara de aguas abajo de la obra son concomitantes con la profundización del canal secundario y con la formación de la fosa de erosión por el espigón. **Uno de los objetivos de la modelación numérica fue el de establecer hasta qué punto ha influido cada uno de esos dos mecanismos en aquel proceso erosivo (es decir, diagnosticar), de modo de plantear cursos de acción adecuados para su control.**
- Los resultados del modelo morfológico indican que *el espigón está cumpliendo con su rol de proteger la margen recompuesta* de la cola de la isla sobre el riacho Guáscaras, es decir, que la fosa de erosión local que produce nunca alcanza la envergadura suficiente como para generar una erosión significativa al pie de la obra de protección de esa margen. **En consecuencia, la erosión extendida detectada al pie de esa obra debe asignarse al cambio morfológico regional que tuvo lugar en el riacho Guáscaras bajo la acción de altos caudales, que se manifestó en la concentración del flujo sobre la margen izquierda de la isla, con la consecuente bajada general del nivel del lecho de ese canal.**
- Esa *bajada general del nivel del lecho del canal* constituye un hecho inesperado a priori. **A pesar de ello, la obra ha evidenciado una gran capacidad de resistencia, aunque al mismo tiempo reclama acciones complementarias para garantizar su estabilidad.**
- La primera acción complementaria necesaria consiste en *remediar los daños causados por la erosión extendida al pie de obra*, incluyendo el espigón. **Esto significa recomponer ese pie de obra, que ahora tiene un nivel de referencia del lecho inferior al original.**
- Como segunda acción complementaria se recomienda efectuar un *seguimiento continuo de la estabilidad del pie de la obra* mediante inspección por medio de

buzos, de modo de detectar tempranamente eventuales nuevas erosiones que comprometan su estabilidad. **La inspección del pie de obra debería llevarse a cabo luego de cada crecida extraordinaria del río Paraná (caudales pico del orden o superiores a 30.000 m³/s).**

- Como tercera acción complementaria, se recomienda *construir un segundo espigón aguas arriba del actual*, a una distancia de alrededor de 70 m y con una extensión de alrededor de 30 m, de modo de defender a este último del impacto directo de la corriente – que actúa como un mecanismo desestabilizador de esa estructura –, dado que así se logra disminuir la envergadura de la fosa de erosión. Además, la fosa de erosión asociada al segundo espigón resulta incluso menos significativa. **La construcción del segundo espigón aumentará el grado de estabilidad del conjunto de la obra de protección.**

Las principales conclusiones y recomendaciones que surgen de este conocimiento se sintetizan a continuación:

- Efectuar un **relevamiento batimétrico** al menos a posteriori de cada crecida.
- Las erosiones puntuales al pie de obra sobre la margen del río Paraná (extremo de aguas arriba del espigón y extremo de aguas abajo de la cola de la isla) se deben manejar mediante un **adecuado mantenimiento**.
- Para atacar el problema de las erosiones extendidas al pie de obra a todo lo largo de la margen del riacho Guáscaras se recomiendan **tres acciones complementarias**.
- La primera acción complementaria consiste en **remediar los daños** causados por la erosión extendida al pie de obra, incluyendo el espigón.
- La segunda acción complementaria consiste en efectuar una **inspección por medio de buzos** luego de cada crecida extraordinaria del río Paraná (caudales pico del orden o superiores a 30.000 m³/s).
- La tercera acción complementaria consiste en la **construcción de un segundo espigón** aguas arriba del actual, a una distancia de alrededor de 70 m y con una extensión de alrededor de 30 m.