

CRUCE SUBFLUVIAL DE GASODUCTOS MODELACION MATEMATICA APLICADA AL CONTROL DE EROSION

Por

Julio Cardini, Demetrio Serman, Maribel Garea

SERMAN & asociados s.a. – Consultora. www.serman.com.ar mail: gerencia@serman.com.ar

ABSTRACT

Los cruces subfluviales de conductos existentes en Argentina son ocasionalmente afectados en su integridad debido a la variabilidad morfológica del cauce fluvial, la cual resulta especialmente significativa en los Ríos Paraná y Uruguay.

Cuando la integridad de un cruce puede ser afectada y el plazo de ejecución de las acciones de protección es elevado, resulta conveniente contar con una predicción de las futuras modificaciones morfológicas del cauce.

Las actuales herramientas de modelación matemática hidrodinámica y sedimentológica junto con la disponibilidad de potentes computadoras posibilitan la realización de simulaciones de la evolución morfológica fluvial, de gran utilidad para predecir las tendencias futuras.

A continuación se describen los estudios realizados para estudiar la evolución morfológica del área del cruce subfluvial al Río Paraná del Gasoducto Mesopotámico. Se presentan los antecedentes del problema, se describen los modelos matemáticos empleados, los procedimientos de ajuste de los mismos para reproducir adecuadamente la realidad histórica (calibración) y su explotación a fin de generar pronósticos de la evolución morfológica probable del lecho para horizontes de 5 y 10 años, ante diferentes escenarios hídricos posibles.

Los resultados obtenidos pueden ser empleados para planificar las pautas de acción con anticipación suficiente para preservar la integridad del cruce.

1. INTRODUCCION

En nuestro país existen numerosas obras de cruce de ríos por parte de conductos. En los cruces de cauces con una dinámica morfológica significativa, como los realizados en brazos de los Ríos Paraná y Uruguay, la integridad del ducto resulta altamente dependiente de la evolución del cauce fluvial en el cual se halla enterrado.

Para asegurar la integridad del gasoducto y la continuidad del servicio prestado, resulta necesario realizar un seguimiento de la evolución del cauce mediante la ejecución periódica de relevamientos topo-batimétricos para detectar así en forma temprana las tendencias que pueden llevar a la exposición y riesgo de colapso del ducto. Sobre esta base se pueden adoptar medidas correctivas, que van desde el mantenimiento de la tapada o protección del ducto hasta la ejecución de un nuevo cruce subfluvial.

Sin embargo, cuando la resolución de un potencial riesgo de colapso resulta compleja y/o prolongada, siendo probable la interrupción del servicio, resulta conveniente anticipar las tendencias futuras del lecho mediante una simulación numérica que permita calcular las máximas profundidades que pueden ser alcanzadas por la erosión hídrica.

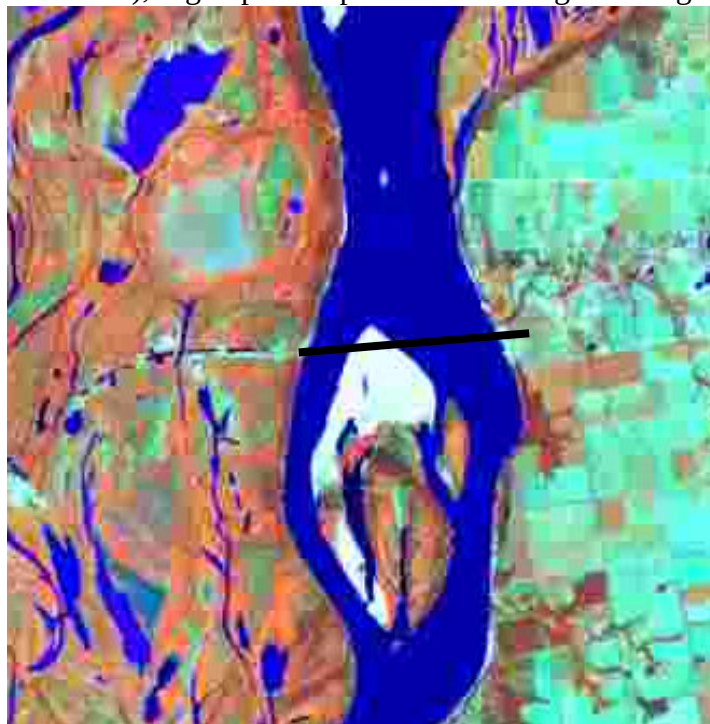
Los modelos matemáticos hidrodinámicos y sedimentológicos actuales, ajustados con información de base suficiente para representar adecuadamente la realidad, permiten reproducir aceptablemente los procesos evolutivos de los cauces fluviales en áreas de cruce. De esta forma pueden preverse las tendencias erosivas en el lecho y márgenes ante escenarios hídricos probables con proyección a horizontes dentro de la vida útil de la obra y planificar anticipadamente los procedimientos de contingencia.

Se presenta una aplicación de modelación hidromorfológica del cruce subfluvial del Gasoducto Mesopotámico al Río Paraná, el cual se produce entre las localidades de Paraná y General Alvear en proximidades de Aldea Brasileira – Entre Ríos, con un ancho de aproximadamente 3000 metros en el cauce principal (denominado Río Paraná Nuevo). El gasoducto consiste en una tubería de 24 pulgadas de diámetro revestida de concreto, que fue tendida en el año 1988.

El objeto principal del estudio fue pronosticar la evolución morfológica probable del lecho fluvial en el cauce principal del Río Paraná en el área vecina del cruce subfluvial, para horizontes de 5 y 10 años (2005 y 2010). Esta información posibilitó el estudio de las medidas a adoptar para garantizar la integridad del gasoducto en el cruce subfluvial.

2. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

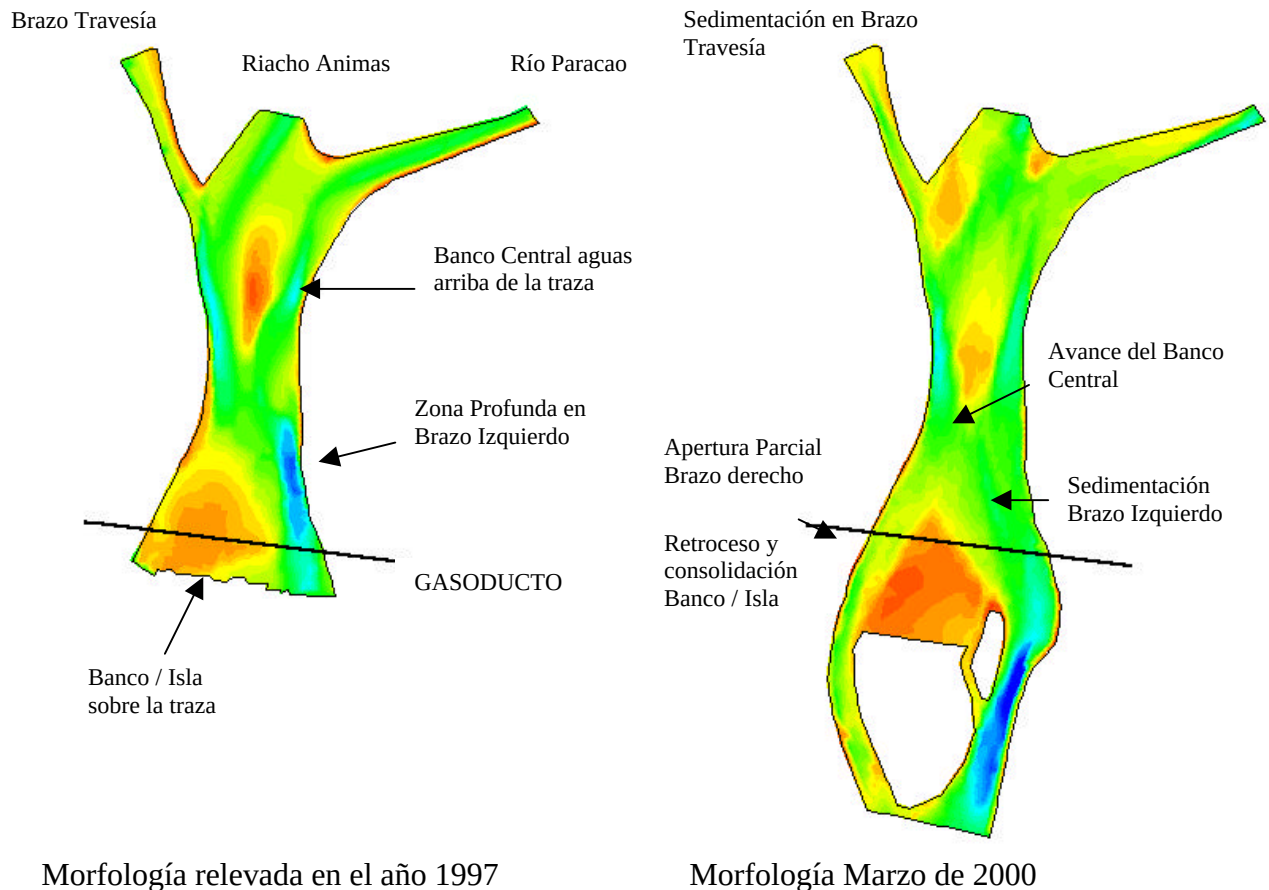
El tramo del Río Paraná Nuevo donde se encuentra el cruce está compuesto por dos brazos, uno hacia el oeste denominado brazo derecho, y el otro hacia el este denominado brazo izquierdo (adyacente a la costa entrerriana), según puede apreciarse en la siguiente figura.



Entre los dos brazos se encuentra una isla que es anegadiza y está sometida a una evolución morfológica que depende no sólo de las condiciones locales sino de la influencia de los gastos que se desarrollan hacia aguas arriba. Las condiciones de encauzamiento y profundización del brazo izquierdo están influenciadas por el escurrimiento en el otro brazo.

Desde la instalación de la tubería a comienzos de 1988, el curso principal del Río Paraná estuvo sujeto a importantes cambios morfológicos debido a procesos dinámicos fluviales generados en gran parte por modificaciones en la distribución de caudales en varios de los brazos del río que se extienden aguas abajo de la ciudad de Paraná.

Por ello, el río experimentó profundos cambios hidrográficos en la vecindad del trazado de la tubería en el cruce del Río Paraná Nuevo. A partir de la crecida ocurrida en 1992 el brazo izquierdo del río muestra profundidades nunca antes alcanzadas desde el comienzo del siglo XX; por el contrario, el brazo derecho muestra un proceso de sedimentación muy importante y actualmente se encuentra colmatado con tapadas sobre el gasoducto de más de 12 m. Las condiciones del lecho en los últimos años se ilustran a continuación:



Morfología relevada en el año 1997

Morfología Marzo de 2000

La mayor parte del caudal es conducida actualmente por el brazo izquierdo en una longitud de 1200 metros, y según relevamientos realizados en 1994 y 1997, el gasoducto tenía en esos momentos cortos tramos aparentemente descubiertos y sectores con tapada mínima en longitudes del orden de 500 metros. Los relevamientos recientes de Abril de 2000 muestran que el gasoducto se encontraba cubierto aunque en algunos puntos la tapada era relativamente baja.

Cabe mencionar que las tapadas se modifican permanentemente según la evolución hidromorfológica del Río Paraná y el pasaje de dunas, las cuales producen oscilaciones localizadas del lecho de hasta 3 o 4 m de amplitud (en condiciones de crecida).

3. MODELACION MATEMÁTICA BIDIMENSIONAL

3.1. Descripción de los modelos hidrodinámico y sedimentológico

Con el objeto de predecir la evolución morfodinámica del río en el área del cruce del gasoducto se aplicaron dos modelos matemáticos bidimensionales acoplados (hidrodinámico y sedimentológico), creados por el U.S. Army Corps y ampliamente validados en E.E.U.U. y otros países, incluyendo numerosas aplicaciones realizadas por *Serman & asociados S.A.* en el Río Paraná y el Río de la Plata. Estos modelos son el RMA2 (hidrodinámico) y el SED2D (sedimentológico) los cuales fueron operados en el contexto del Surface Modelling System (SMS) de Boss International.

La modelación hidrodinámica bidimensional se realizó con el programa RMA2 desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, Wicksburg Experimental Station, para simular flujos naturales a superficie libre, donde el movimiento es esencialmente horizontal y puede ser descripto por una aproximación bidimensional debido a que la aceleración vertical es pequeña en comparación con la componente horizontal.

RMA2 utiliza el método de elementos finitos para resolver un sistema de ecuaciones que describen las condiciones hidrodinámicas de un área determinada definida a través de una malla de elementos finitos, obteniéndose como resultado las velocidades medias del flujo y los niveles de agua. El modelo RMA2 calcula las elevaciones de la superficie del agua y las componentes horizontales de la velocidad para escurrimientos subcríticos a superficie libre teniendo en cuenta dos campos dimensionales del flujo.

Las soluciones están basadas en el desarrollo de las ecuaciones de Navier – Stokes para movimiento turbulento teniendo en cuenta los números de Reynolds. La fricción se calcula o bien utilizando la ecuación de Manning o bien la ecuación de Chezy y los coeficientes de viscosidad turbulenta se utilizan para definir las características en cuanto a la turbulencia del escurrimiento. Pueden ser analizados problemas a régimen permanente o impermanente.

El RMA2 original fue desarrollado por Norton, King y Orlob pertenecientes al cuerpo de Ingenieros del Distrito de Walla Walla y publicado en 1973. Otros desarrollos posteriores fueron llevados a cabo por King y Roig y, por la Universidad de California, Davis. Se han realizado continuamente mejoras por King y Norton pertenecientes a la Asociación de Manejo de Recursos (Resource Managements Associates (RMA)) y también por laboratorios de hidráulica de la Estación Experimental de Vías Navegables (Waterways Experiment Station (WES)).

El programa ha sido aplicado para calcular niveles de agua y distribuciones de caudal en la periferia de islas; caudales en puentes con uno o más vanos, en rías y estuarios, aguas arriba y aguas abajo de canales de centrales hidroeléctricas, canales de plantas de bombeo, circulación y transporte en cuerpos de agua y zonas costeras, embalses, etc.

RMA2 tiene las siguientes características:

- Identifica y permite corregir errores en la implementación de la malla de elementos finitos
- Permite reiniciar (*hotstart*) una simulación desde una corrida previa del RMA2 y continuar con la misma
- Permite tener en cuenta los efectos de rotación de la tierra (aceleración de Coriolis)
- Permite aplicar las tensiones originadas por el viento
- Permite usar alternativamente distintos coeficientes de intercambio turbulento, valores del n de Manning, temperatura, etc.:
 - utilizar ecuaciones que asignan automáticamente en forma dinámica valores del n de Manning de acuerdo a la profundidad de cada nodo de la malla
 - utilizar el número de Peclet para asignar automáticamente en forma dinámica los coeficientes de intercambio turbulento en cada nodo de la malla
- Permite modelar incluso hasta con 5 diferentes tipos de estructuras de control de flujo
- Permite calcular el caudal que atraviesa líneas de continuidad preseleccionadas
- Permite considerar los efectos de corrientes secundarias en curvas
- Permite simular el secado y vuelta a inundar de sectores del área modelada en función de las variaciones de nivel sin necesidad de generar una nueva grilla de elementos finitos
- Acepta una gran variedad de condiciones de borde:
 - magnitud de los ángulos/velocidades por nodos
 - componentes de velocidad por nodos

- elevación de la superficie libre del agua por nodos/líneas
- descarga por nodos/elementos/líneas
- niveles de Mareas impermanentes por líneas
- descarga como función de la altura del pelo de agua por líneas
- velocidad del viento y dirección por nodos/elementos o tipos del material de cada elemento

Las limitaciones que posee el RMA2 son las siguientes. Opera asumiendo condiciones hidrostáticas y que las principales aceleraciones en la dirección vertical son despreciables. Es bidimensional en el plano horizontal. No es recomendable utilizarlo para resolver problemas donde los vórtices, vibraciones o aceleraciones verticales sean de principal importancia. En el presente caso de estudio, estas limitaciones no resultan de importancia.

El modelo general RMA2 integra en profundidad las ecuaciones integrales de flujo de masa y conservación del momento en dos direcciones horizontales.

Las ecuaciones que resuelve el modelo se presentan a continuación.

$$\begin{aligned}
 & h \frac{\partial u}{\partial t} + h u \frac{\partial u}{\partial x} + h v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\
 & + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g u n^2}{(1.486 h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} \\
 & - \zeta V_a^2 \cos \varphi - 2 h \omega v \sin \phi = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 & h \frac{\partial v}{\partial t} + h u \frac{\partial v}{\partial x} + h v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\
 & + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g v n^2}{(1.486 h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} \\
 & - \zeta V_a^2 \sin \varphi + 2 h \omega u \sin \phi = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

donde:

- h = Profundidad
- u,v = Velocidades en las direcciones cartesianas
- x,y,t = Coordenadas cartesianas y tiempo
- r** = Densidad del fluido
- E = Coeficiente de viscosidad de remolino
 - para xx = dirección normal en la superficie del eje x
 - para yy = dirección normal en la superficie del eje y
 - para xy e yx = dirección de corte en cada superficie
- g = aceleración de la gravedad
- a = cota del fondo del lecho
- n = coeficiente de rugosidad de Manning
- 1,486 = coeficiente de conversión de unidades

x	= Coeficiente empírico de la tensión del viento
Va	= Velocidad del viento
y	= Dirección del viento
w	= Velocidad de rotación angular de la tierra
f	= Latitud local

Las ecuaciones (1) (2) y (3) se resuelven por medio de una aproximación por elementos finitos utilizando el método de la compensación de residuos de Galerkin. Los elementos pueden ser líneas unidimensionales o cuadriláteros o triángulos bidimensionales, y pueden tener lados curvos. Las funciones de forma son cuadráticas para las velocidades y lineales para las profundidades. La integración en el espacio se realiza por medio de integración Gaussiana. Las derivadas en el tiempo son reemplazadas por una aproximación por diferencias finitas no lineal. Se asume que las variables varían para cada intervalo de tiempo de la siguiente forma:

$$f(t) = f(0) + at + bt^c \quad t_0 \leq t \leq Dt$$

Esta ecuación se diferencia con respecto al tiempo y se hace en forma de elementos finitos. Las variables a, b y c son constantes.

La solución es completamente implícita y el conjunto de ecuaciones simultáneas se resuelve por medio de las iteraciones no lineales de Newton – Raphson.

El modelo sedimentológico aplicado es el SED2D-WES, para simulación bidimensional del transporte de sedimento promedio en la vertical.

El programa se basa en las siguientes hipótesis:

- Los procesos básicos en sedimentación pueden agruparse en erosión, puesta en suspensión, transporte y deposición.
- El flujo de agua posee el potencial para erosionar y transportar sedimentos, estén o no presentes partículas de sedimento.
- El sedimento en el lecho queda inmóvil mientras que los esfuerzos generados por el flujo son inferiores a la tensión crítica de erosión.
- Aunque las partículas se muevan, no se producen cambios en las cotas del lecho, a menos que existan tasas de erosión y deposición diferentes, siendo ambos procesos continuos e independientes.
- La mayor parte del transporte de sedimento se realiza en suspensión, aunque una fracción del mismo se produzca en cercanías del lecho.

El modelo resuelve la ecuación de convección – difusión presentada por Ariathurai, MacArthur y Krone en 1977. La información hidrodinámica es calculada por el modelo RMA2 para la misma malla de elementos finitos.

El esfuerzo de corte en el fondo puede calcularse a través de diferentes formulaciones, habiéndose seleccionado la de Manning, coincidentemente con lo realizado en el modelo hidrodinámico.

La erosión de sedimentos desde el lecho (S) se controla en función de la diferencia entre la capacidad de transporte (caracterizada por la concentración C_{eq}) y la cantidad de material transportado en la columna de agua (C), a través de un tiempo característico t_c , que afecta la transición:

$$S = (C_{eq} - C) / t_c$$

El valor de C_{eq} se calcula a través de la fórmula de Ackers-White (1).

El tiempo t_c es el intervalo requerido para que la concentración media cambie entre C_{eq} y C .

En el caso de la deposición se determina como el mayor valor entre $C_d * h / W$ y el intervalo de tiempo Δt , donde C_d es el coeficiente de deposición, h la profundidad local y W la velocidad de caída.

En el caso de la erosión se determina como el mayor valor entre $C_e * h / V$ y el intervalo de tiempo Δt , donde C_e es el coeficiente de erosión, h la profundidad local y V la velocidad del flujo.

La condición de borde que debe ingresarse al modelo es la concentración de sedimentos en suspensión que ingresa en el extremo de aguas arriba. Si la misma está sobrevaluada o subvaluada en relación con la concentración calculada por el modelo aguas abajo se producirá una deposición o erosión en las cercanías de este extremo, que eventualmente puede afectar los resultados en el área de interés, si la misma se encuentra muy cercana al sector afectado.

Típicamente, el modelo sedimentológico se corre simulando un período de tiempo prolongado (1 semana o más), durante el cual las variaciones del lecho no afectan significativamente el campo de velocidades (en general se acepta un cambio en el tirante de agua de hasta un 25%). Luego se corrigen las cotas del lecho en función de las erosiones y sedimentaciones calculadas y se adapta la malla de elementos finitos para realizar una nueva corrida del modelo hidrodinámico. El proceso se repite la cantidad de veces necesaria para completar el período de simulación deseado.

La velocidad de caída a especificar no es la correspondiente al material del lecho sino al material en suspensión, la cual se estimó utilizando los conceptos establecidos por van Rijn (1). El valor de la velocidad de caída se utilizó además como un parámetro de ajuste de la modelación.

3.2. Implementación y calibración de los modelos hidrodinámico y sedimentológico

Para permitir la implementación de los modelos, se ha realizado una extensa campaña de mediciones de campo, consistentes en relevamientos batimétricos (100 perfiles transversales de los cauces), topográficos, hidrométricos, sedimentológicos y corridas de flotadores (para conocer las características del flujo fluvial), en el área comprendida entre las ciudades de Paraná y General Alvear. También se realizó un análisis de estos datos y de los antecedentes disponibles, incluyendo una evaluación de la evolución morfológica reciente basada en la comparación de batimetrías e imágenes.

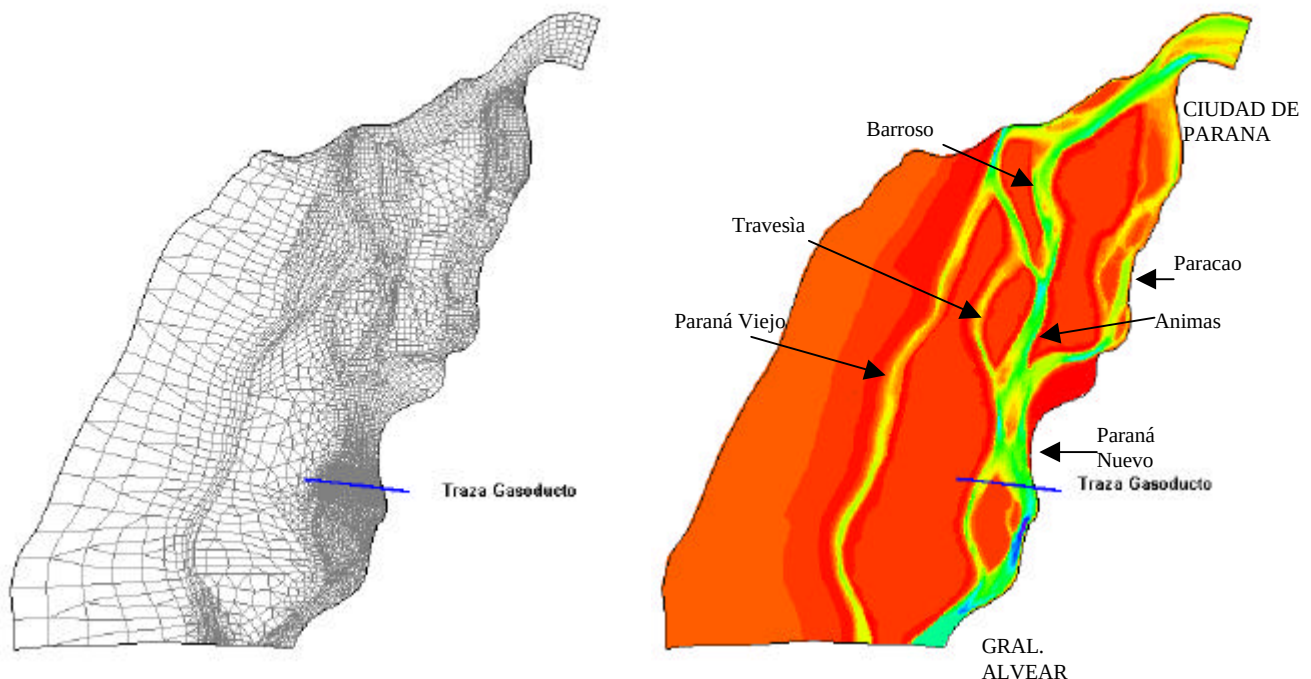
Se realizaron estudios de Unidades Fisiográficas para definir los coeficientes de rugosidad de la planicie inundable y estudios de Dinámica Hídrica para la crecida de 1998, a fin de definir las ramas de escurrimiento en lámina para aguas altas, con base en el procesamiento de imágenes satelitales.

A partir de la información batimétrica y topográfica relevada y con el apoyo de imágenes satelitales se implementó una grilla de elementos finitos, con un grado de discretización variable que alcanza su mayor detalle en la zona de interés alrededor del cruce del Gasoducto. Dado que el modelo debe simular adecuadamente las condiciones de escurrimiento en crecidas extraordinarias como la ocurrida en el año 1998, el mismo debe incluir en la malla de elementos finitos las islas y el valle aluvial ubicado al Oeste del Río Paraná Viejo.

Dado que no existen datos de aforos líquidos en la zona para dichas condiciones extraordinarias, a los efectos de validar el funcionamiento del modelo se realizó un estudio de dinámica hídrica, basado en el análisis de la imagen satelital Landsat 5 del 27/5/98, TM 227-82 (cerca del pico de la crecida extraordinaria de 1998, con un nivel hidrométrico en Paraná de 6,1 m).

Las rugosidades de la planicie e islas fueron asignadas en base al estudio del tipo y distribución de la vegetación (Unidades Fisiográficas), aplicando la experiencia previa obtenida por la Consultora en la simulación del valle aluvial para el Proyecto Hidráulico de la Conexión Vial Rosario – Victoria (3).

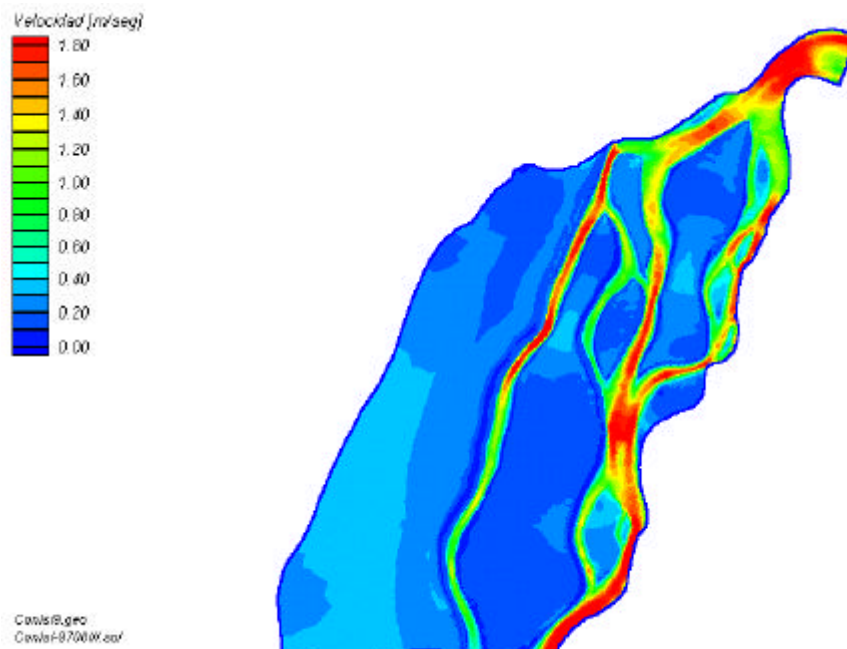
La malla de elementos finitos y la topografía del modelo generada (situación al año 2000), entre Paraná y General Alvear se presentan a continuación:



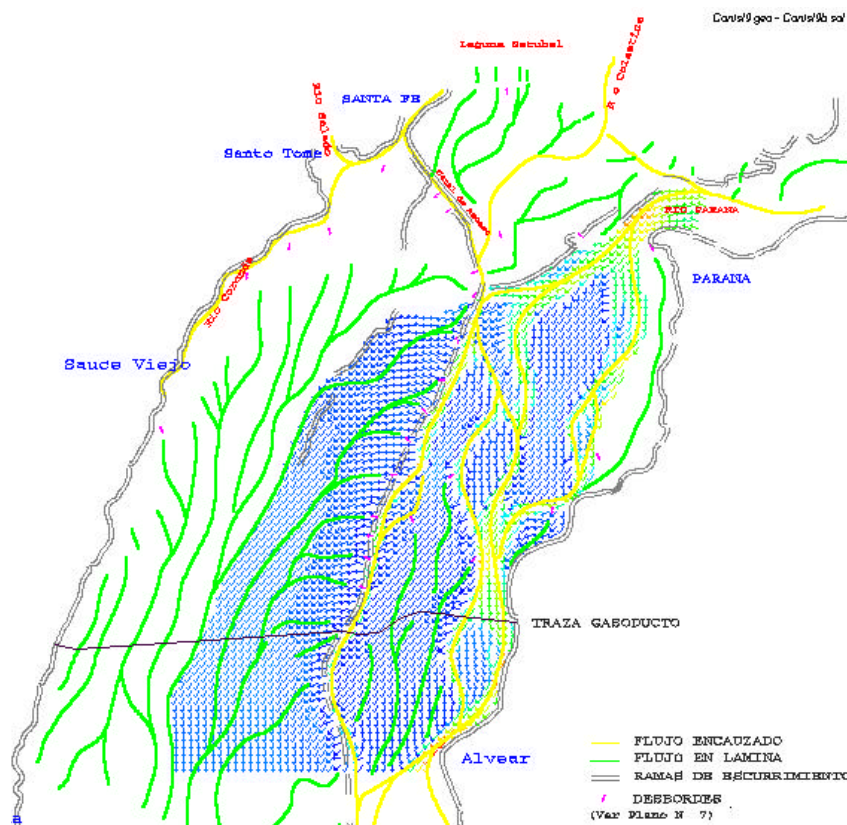
Para realizar las simulaciones de la evolución sedimentológica del área de cruce se consideró adecuado generar un submodelo (o modelo particular) que tuviera en cuenta un sector del cauce principal ubicado entre los tres cauces que aportan desde aguas arriba (Paracao, Animas y Travesía) y la localidad de Gral. Alvear (límite del modelo general). Dado que no existe información batimétrica histórica que permita determinar con suficiente precisión la evolución de la zona ubicada más aguas arriba del tramo relevado en 1997 (que cubrió poco más de la desembocadura de estos tres brazos), no tiene sentido incorporar este sector en la modelación sedimentológica, dado que no es posible calibrarlo.

La variación estimada de la distribución de los caudales entre los tres brazos que ocurrió en el período de análisis, se simuló considerando el Riacho Barroso y el Animas más cerrados en 1997 que en 2000, efectuando el cambio o apertura de los mismos durante la crecida de 1998.

La calibración del modelo hidrodinámico se realizó ajustando los coeficientes de rugosidad para representar la distribución de caudales y las direcciones del flujo medidas en los cauces mediante corridas de flotadores (año 2000) y se validó para condiciones de crecidas simulando las direcciones del flujo en la planicie ocurridas durante la crecida extraordinaria de 1998. En las figuras siguientes se ilustra el campo de intensidades de velocidad y las direcciones del flujo según el modelo comparadas con los resultados del estudio de dinámica hídrica efectuado.



Campo de velocidades del flujo para una crecida



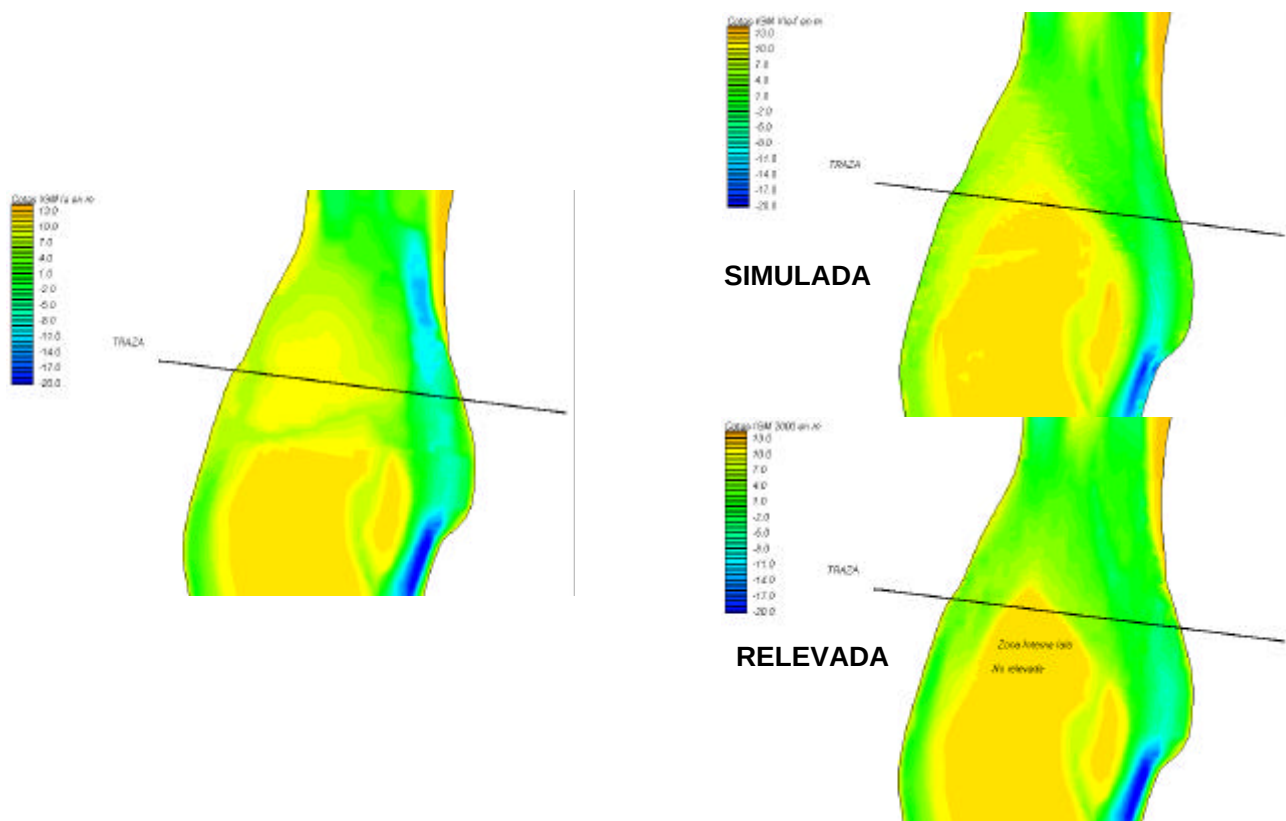
Comparación de las direcciones del flujo en la planicie con los resultados obtenidos del estudio de dinámica hídrica para la crecida de 1998.

La calibración del modelo sedimentológico es un proceso laborioso debido a la necesidad de limitar los intervalos de tiempo en que se calculan las variaciones del lecho, de forma tal de mantener siempre una condición hidráulica representativa. Los intervalos de tiempo utilizados se encuentran en el orden de 7 a 60 días, con un valor típico de 30 días (15 días durante la crecida de 1998).

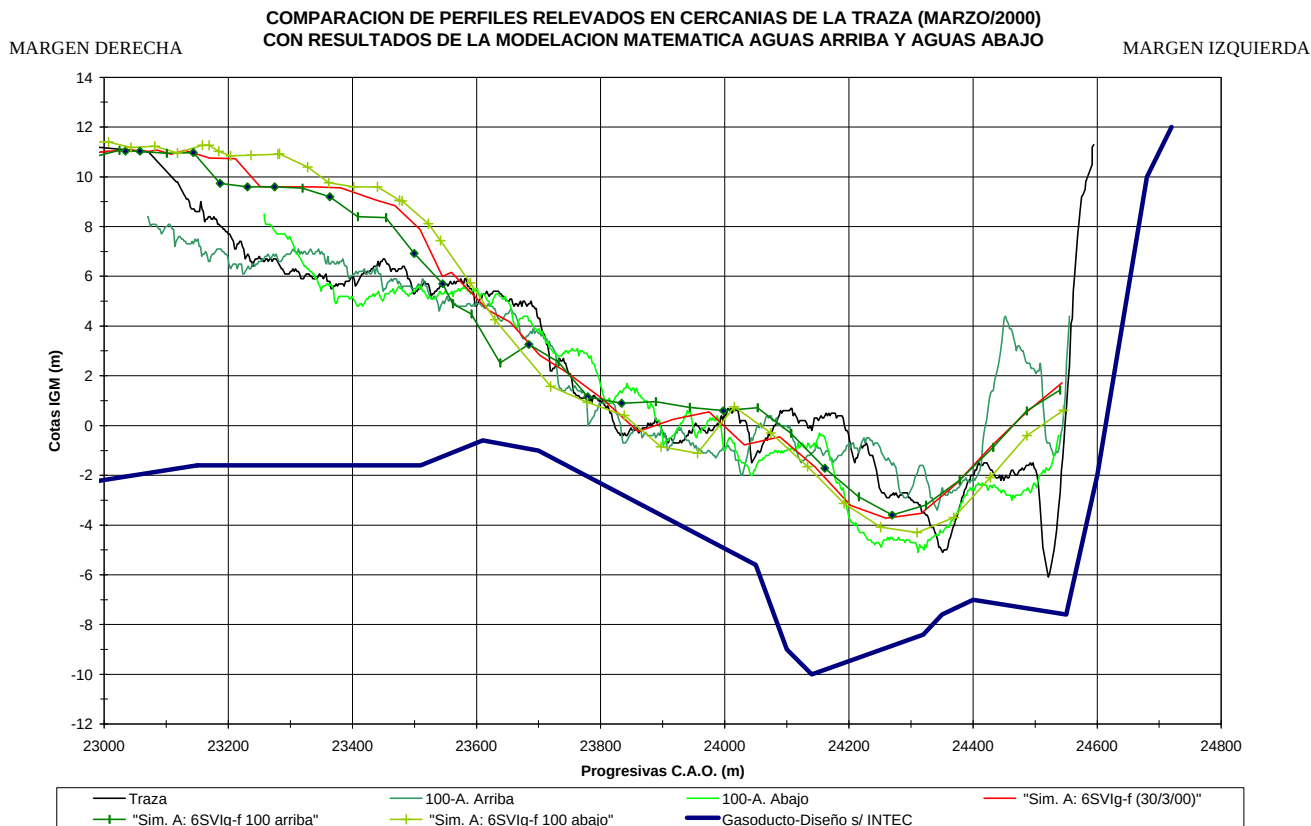
La validación de los modelos para el área de interés se realizó reproduciendo satisfactoriamente los cambios batimétricos históricos ocurridos en el período 1997 – 2000 (que incluye condiciones de crecida y estiajes extraordinarias), así como la distribución del escurrimiento entre los distintos brazos del río y el detalle del campo de velocidades de la corriente en ambos brazos de la zona cercana al cruce.

La siguiente figura muestra los resultados obtenidos en la calibración. El área interior de la isla central que sufre un intenso proceso de sedimentación no fue relevada en el año 2000 debido a la presencia de vegetación densa.

Se puede apreciar la adecuada representación de las variaciones morfológicas fundamentales del área de estudio durante un período que incluye desde una crecida extraordinaria en 1998 hasta una condición de estiaje (aguas bajas) excepcional en 1999.



Un esquema del corte de las profundidades relevadas y simuladas a lo largo de la traza en Marzo de 2000 se presenta en la siguiente figura. Cabe mencionar que las fuertes oscilaciones en los perfiles relevados aguas arriba y abajo en inmediaciones de la margen entrerrriana se deben a un aporte transitorio del arroyo El Salto.



Las oscilaciones de los perfiles medidos que poseen una longitud de onda del orden o inferior a los 50 m y que se deben al pasaje de dunas, no son representadas por el modelo, por lo que a los valores modelados se debe agregar un “ruido” o variabilidad localizada de corta longitud y una amplitud media del orden de 3 m, que puede alcanzar los 4 m en condiciones de crecida.

3.3 Explotación de los modelos y pronóstico de la evolución del lecho en el período 2000 - 2010

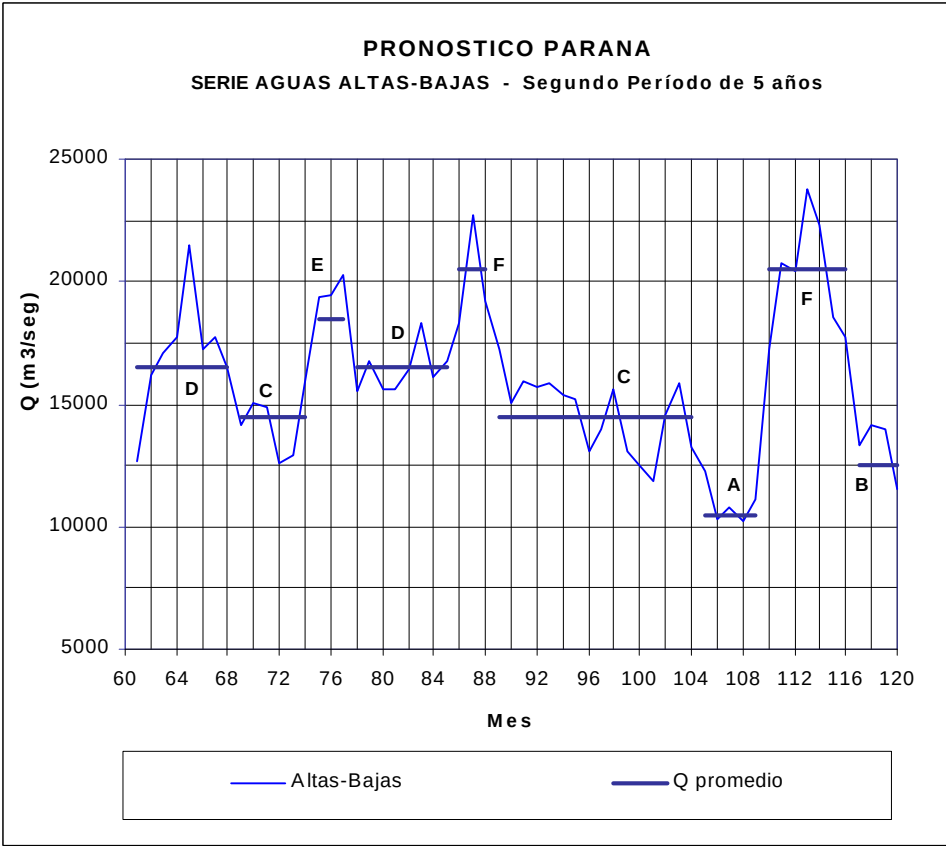
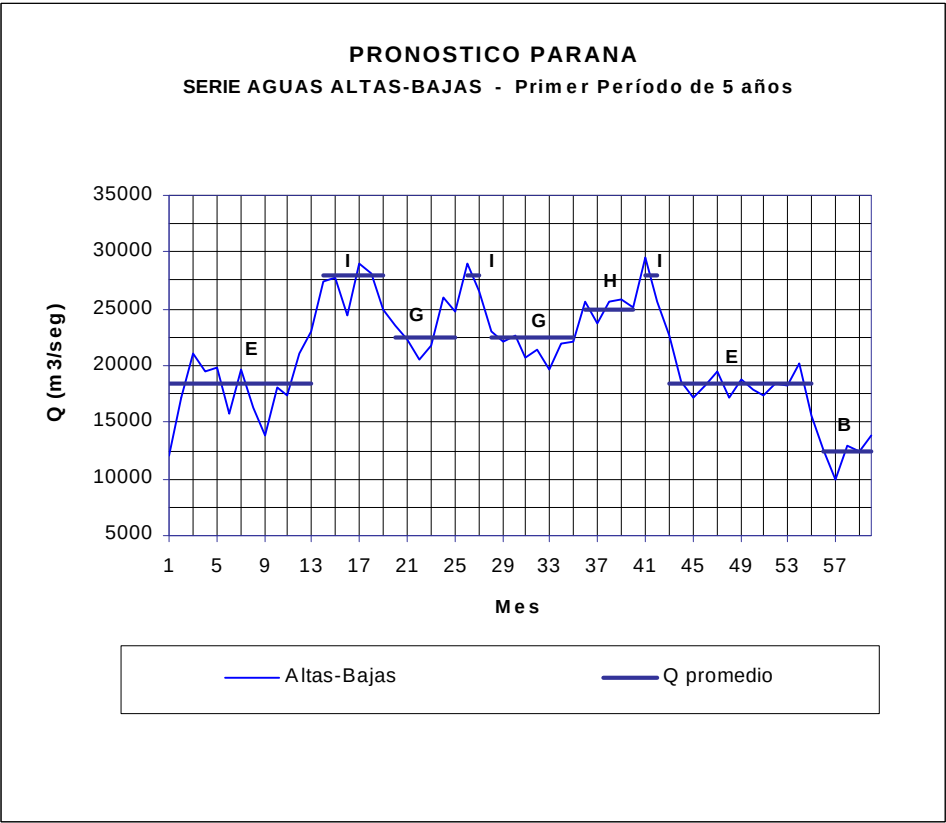
Las condiciones hídricas para el período de pronóstico (años 2000 a 2010) fueron obtenidas a través de la generación de series sintéticas de caudales y niveles de agua, cuyos parámetros se obtuvieron mediante los niveles diarios de la escala Paraná correspondientes al período 1/1/1970 - 16/5/2000. Se eligió el período posterior a 1970 debido al cambio de régimen fluvial registrado a partir de la década del 70.

Se consideró que el caudal en Paraná es la resultante de la superposición de una componente determinística (que depende del caudal del mes anterior) y otra aleatoria con distribución normal, media cero y desvío estándar calculado para cada mes del año.

Partiendo de un valor inicial para diciembre de 1999 se realizaron 20 pronósticos, cada uno de longitud $T = 10$ años. De las 20 series se seleccionaron 3 por ser las más representativas de las condiciones hídricas de interés en la explotación, a saber:

- Caso 1: Aguas **Altas** en los primeros 5 años y luego **Bajas** en los siguientes 5 años
- Caso 2: Aguas **Bajas** en los primeros 5 años y luego **Altas** en los siguientes 5 años
- Caso 3: Aguas **Medias**

Un ejemplo de las condiciones representadas para el Caso 1 se presenta en las siguientes figuras. Las líneas horizontales identificadas con letras representan los caudales esquematizados para la modelación.



En la secuencia que se simuló con aguas medias, se agregó al final de los primeros 5 años una condición como la de la crecida de 1998, simulado con un caudal medio en el Túnel Hernandarias de $31.700 \text{ m}^3/\text{s}$ (25 años de recurrencia mensual), durante un período prolongado de 4 meses para ver el efecto que tendría esta situación extraordinaria sobre el lecho.

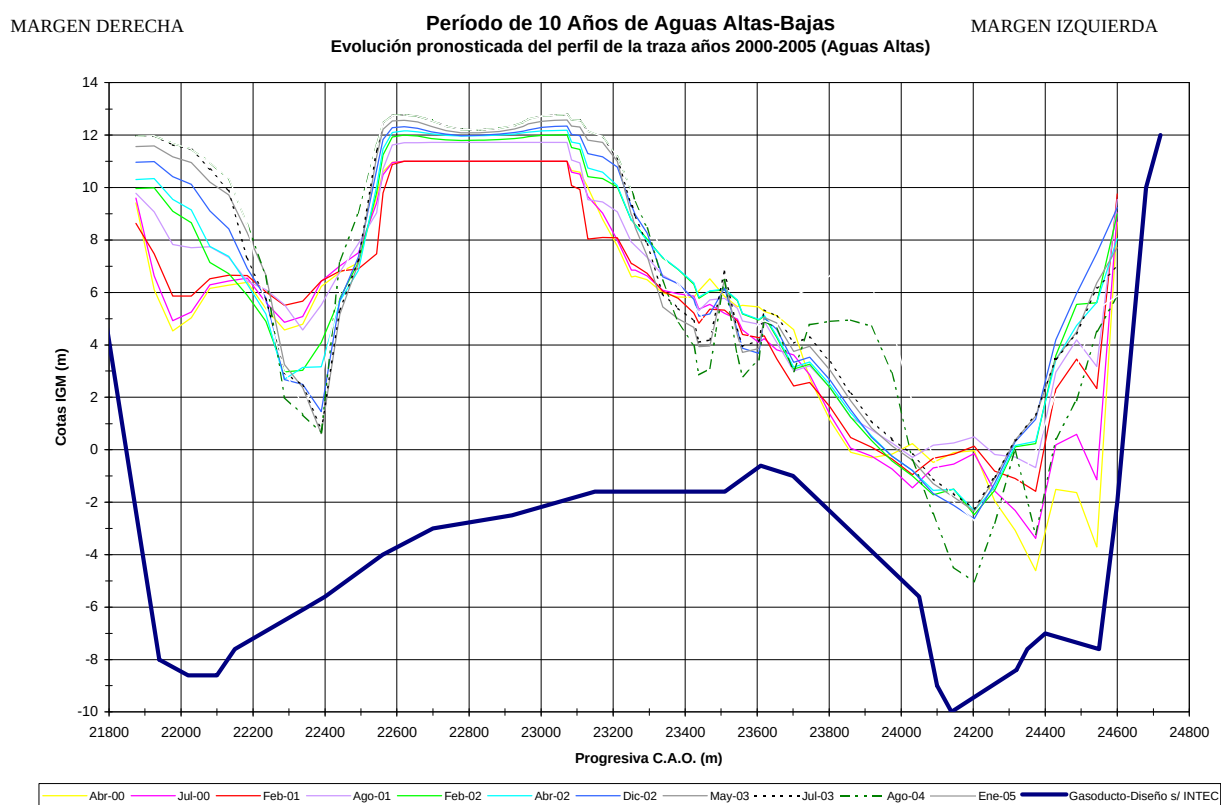
La aplicación de los modelos para simular posibles escenarios hidráulicos futuros permitió evaluar las condiciones de erosión y sedimentación a lo largo de la traza del cruce, obteniendo pronósticos de las profundidades del lecho posibles en períodos de 5 y 10 años de evolución.

Todas las simulaciones efectuadas predicen un avance y crecimiento del banco ubicado aguas arriba de la traza, en mayor o menor medida y con diferente velocidad según las condiciones hídricas asumidas en cada serie hidrológica posible. Resulta evidente que a mayor caudal se acelera el proceso de crecimiento y traslación hacia aguas abajo de este banco. Aparentemente, este proceso sólo podría ser modificado si las condiciones de distribución de caudal en los tres brazos existentes aguas arriba (Paracao, Animas y Travesía) se modificaran en forma significativa debido a los procesos morfológicos que están sufriendo, lo cual no parece probable en el mediano plazo, aunque sí podría ocurrir de aquí a 10 años, especialmente si se producen crecidas de importancia.

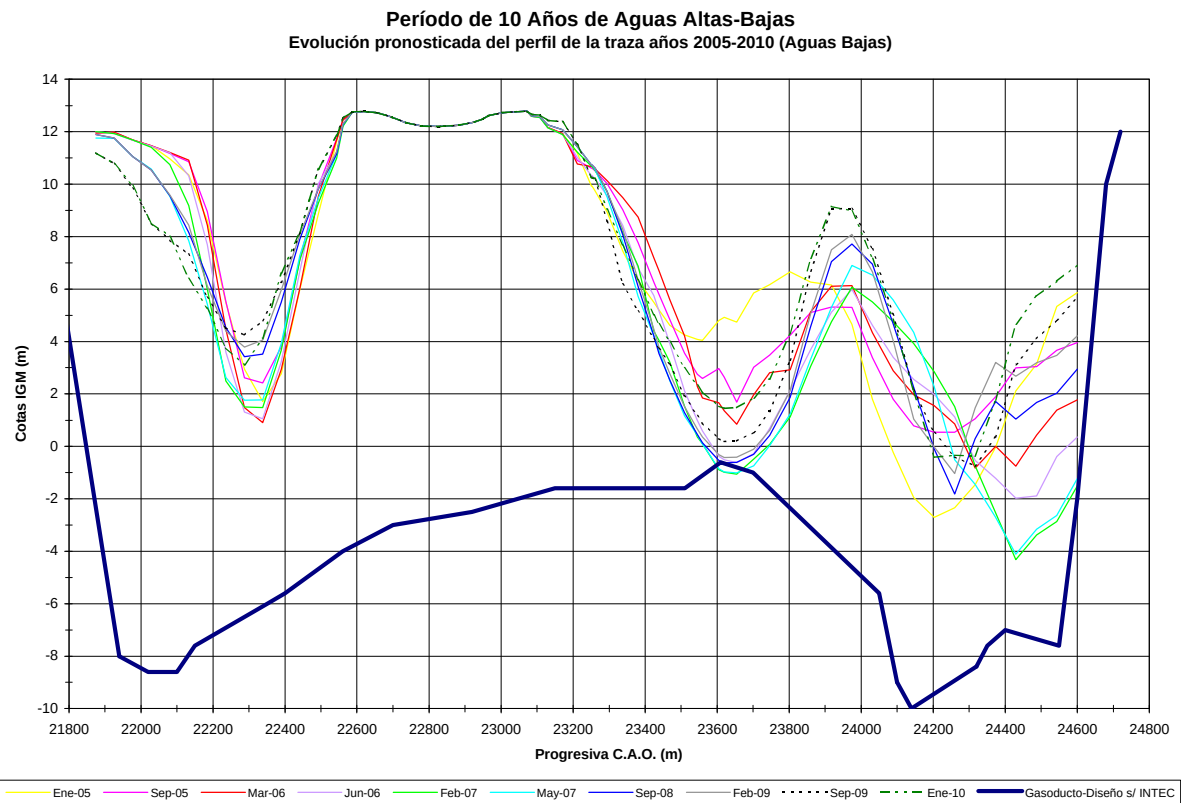
Por otro lado, en aguas altas el banco existente a la altura del cruce se consolida en su parte central (progresivas 22.600 a 23.100) creciendo y evolucionando hacia una isla con albardones.

Caso 1:

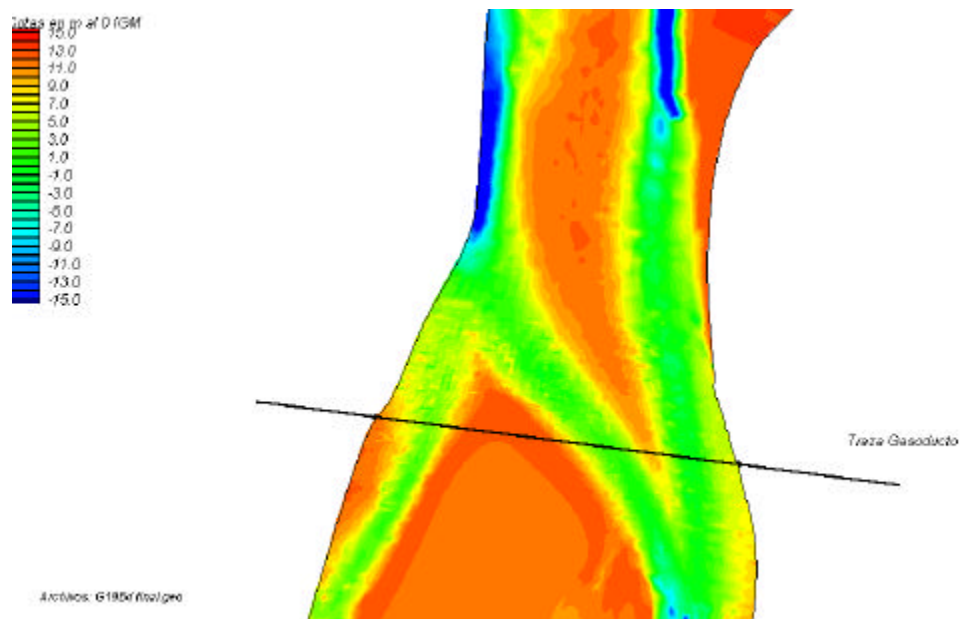
En el caso de ocurrir un primer período de **5 años de aguas altas** se daría una tendencia a la apertura del brazo derecho, que conlleva una disminución de las tasas de erosión en el brazo izquierdo (actualmente más crítico), con un desplazamiento de la zona más profunda de este brazo hacia el banco intermedio, cuyo talud oscila hacia el este y el oeste según la sucesión de estados hidrométricos, como puede apreciarse en las siguientes figuras.



Evolución del perfil transversal del cruce durante los primeros 5 años de Aguas Altas (2000-2005).



Evolución del perfil transversal del cruce durante los segundos 5 años de Aguas Bajas (2005-2010).



Topografía Final luego de 5 años de Aguas Altas y 5 años de Aguas Bajas.

También se observa que en el caso de ocurrir crecidas el banco central que es cruzado por la traza tiende a consolidarse en su parte más elevada elevando sus cotas y generando albardones perimetrales.

El área con mayor riesgo de destape debido al pasaje de dunas sería la correspondiente al tramo de 300 m entre progresivas 23.800 y 24.100, además de algunas oscilaciones que se pueden producir en el tramo adyacente a la margen entrerrriana.

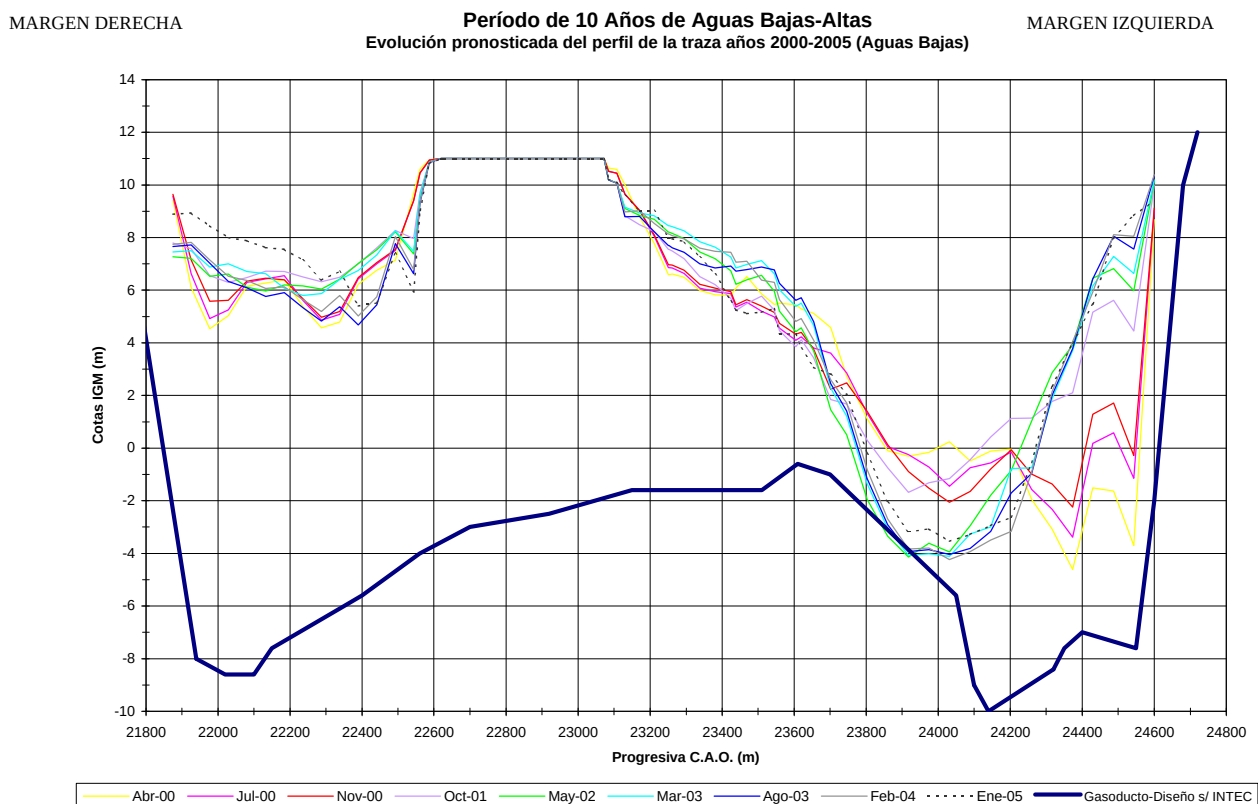
Al final del período de 5 años, luego de una situación sostenida de aguas altas se sucede un período de **5 años de aguas medias/bajas hasta completar 10 años de evolución**, en el cual se produce un franco encauzamiento del flujo por el brazo izquierdo desde aguas arriba (debido al avance del banco superior), con lo cual durante un período de unos 2 años se erosionaría la barranca de la costa entrerriana y el tramo de 200 m entre progresivas 24.400 a 24.600. Aquí se observa un elevado riesgo de destape del gasoducto en la acometida costera durante un período de tiempo limitado.

Asimismo, el canal de vinculación entre los brazos derecho e izquierdo se socavaría debido a que queda confinado entre el banco actual y el extremo sur del banco que avanza desde aguas arriba, provocándose erosiones que destaparían en forma limitada el gasoducto en alrededores de la progresiva 23.600.

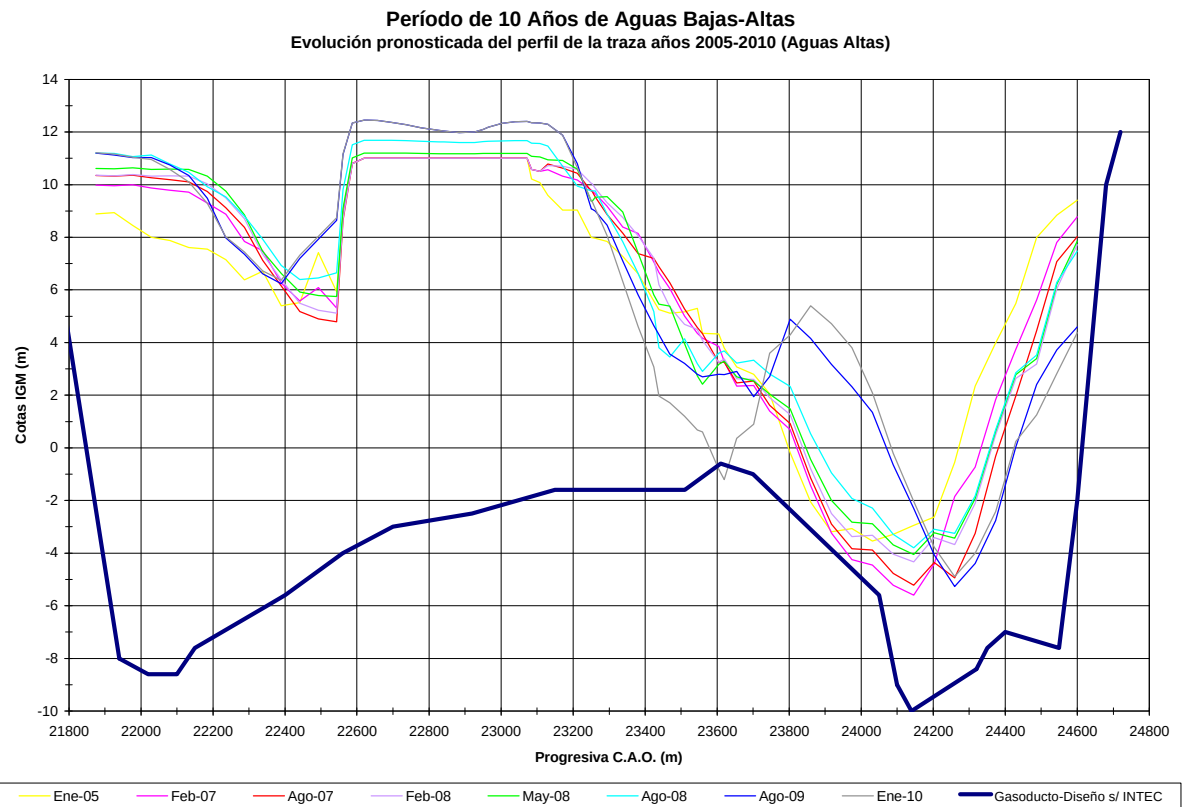
Caso 2:

Para el **período que se inicia con 5 años de Aguas Bajas**, que se considera de ocurrencia más probable en la actualidad que la hipótesis anterior, el brazo derecho se mantiene sin grandes alteraciones mientras que en el brazo izquierdo se produce un desplazamiento de la zona profunda hacia el oeste, produciéndose el destape limitado de la tubería en inmediaciones de la progresiva 23.800 a 24.000, tal como ocurrió en el período 1992-1995.

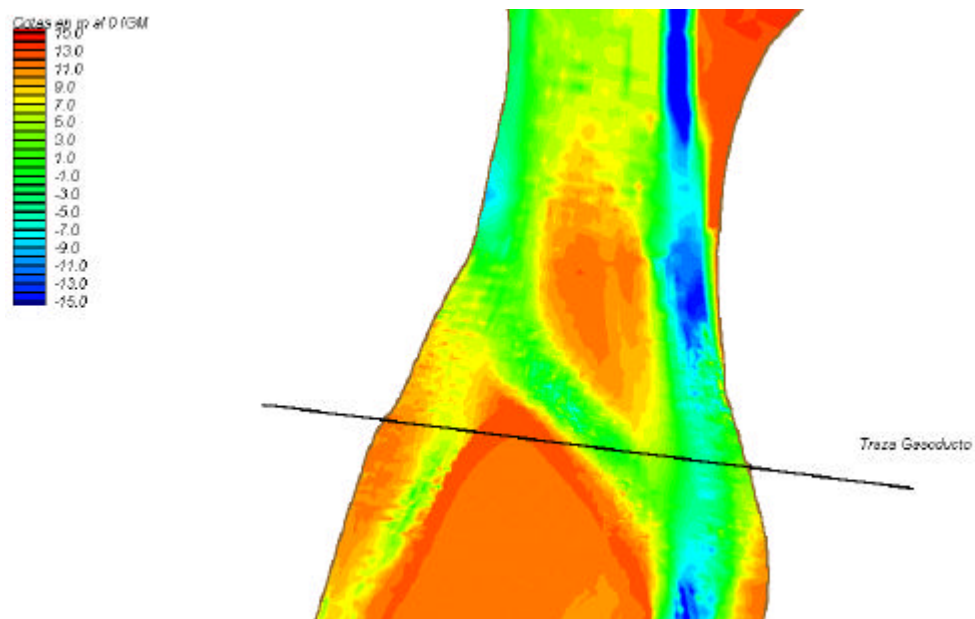
Durante el **período posterior de 5 años de Aguas Altas**, que se considera probable en función de la ocurrencia de un nuevo fenómeno “El Niño”, se registra una profundización moderada del brazo izquierdo y se mantiene durante mucho tiempo la zona de riesgo anterior hasta que el avance del banco que llega desde aguas arriba produce la excavación del canal de vinculación cruzado que atraviesa la progresiva 23.600 destapando localmente el gasoducto.



Evolución del perfil transversal del cruce durante los primeros 5 años de Aguas Bajas (2000-2005).

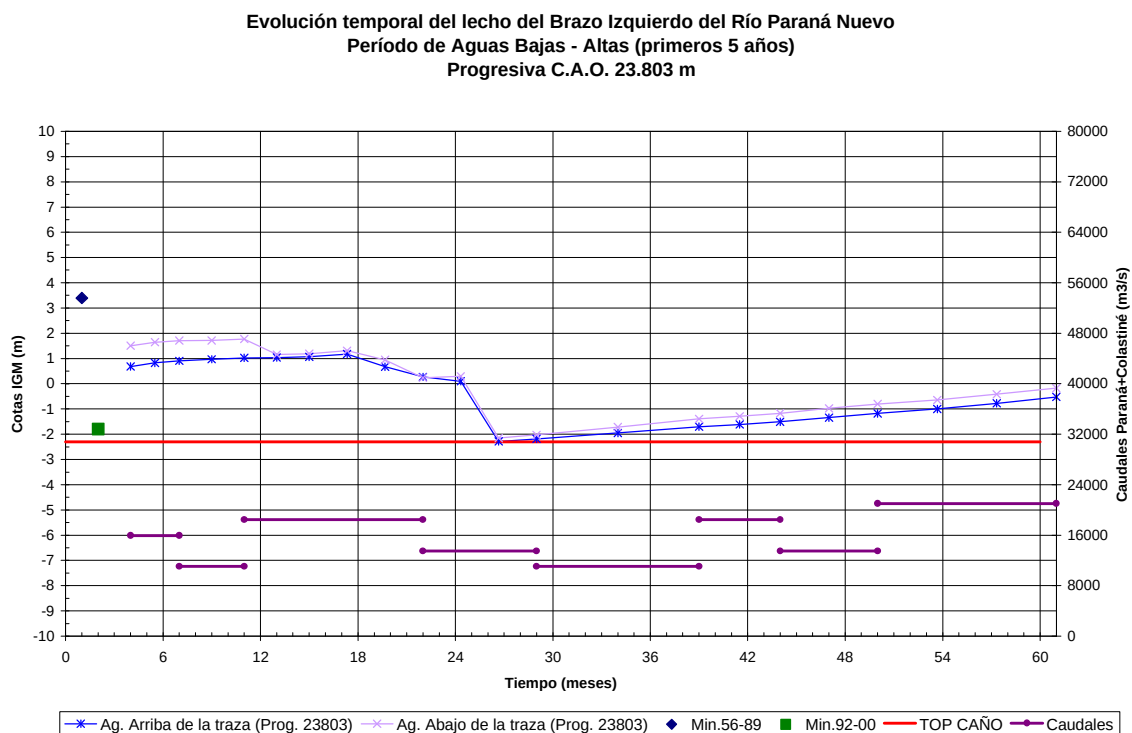
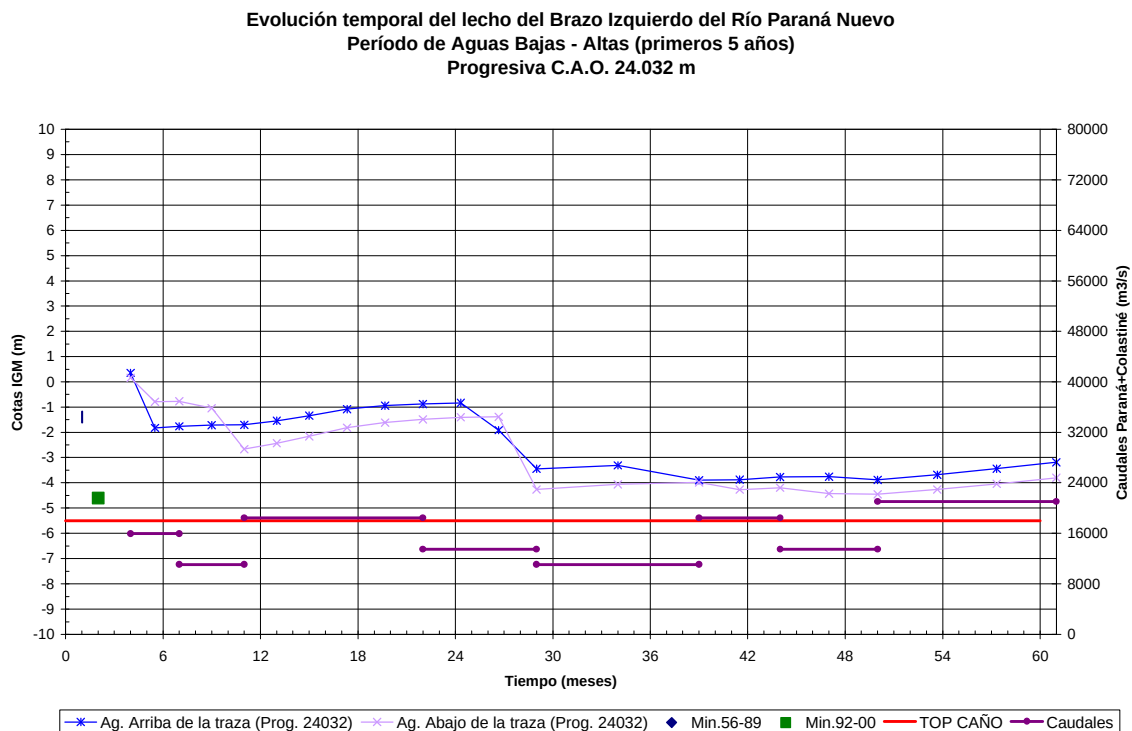


Evolución del perfil transversal del cruce durante los segundos 5 años de Aguas Altas (2005-2010).



Topografía Final luego de 5 años de Aguas Bajas y 5 años de Aguas Altas.

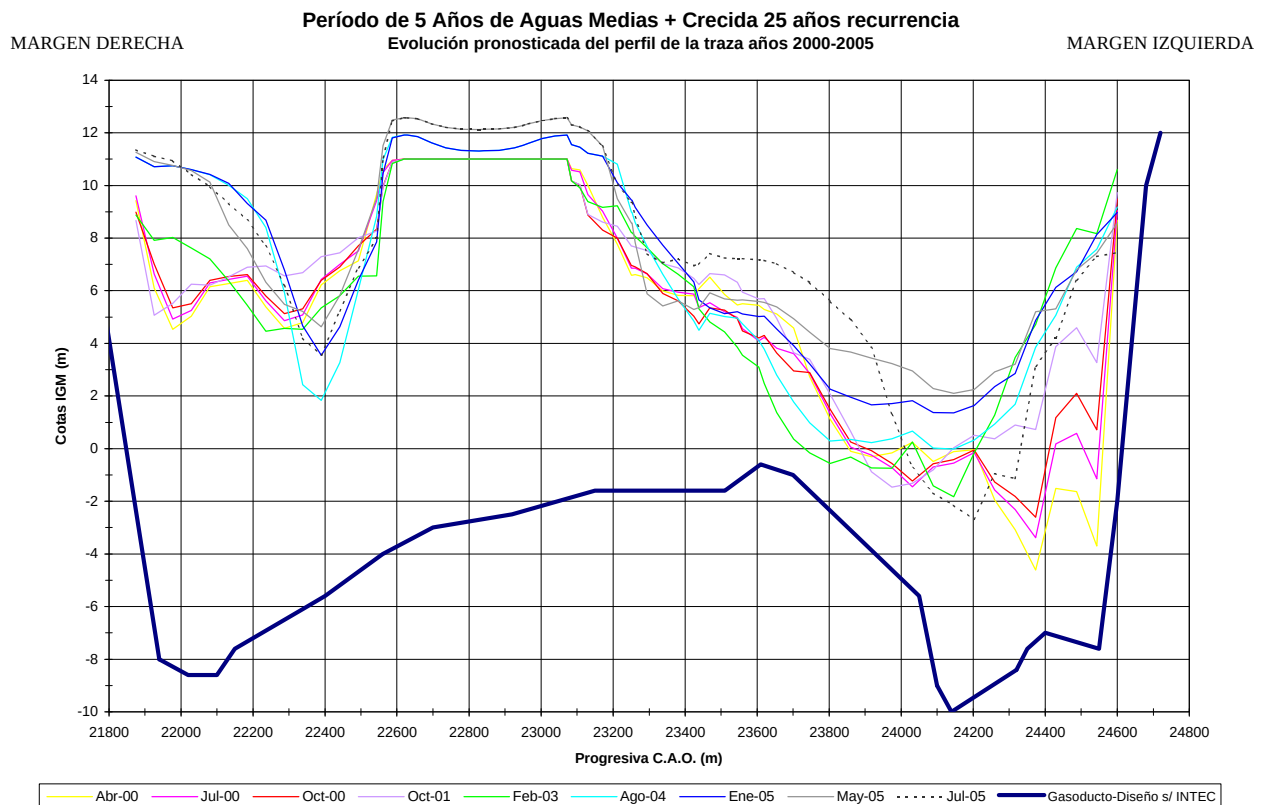
En los siguientes gráficos se presenta la evolución cronológica de las profundidades en progresivas seleccionadas del perfil transversal.



Caso 3:

La simulación para un **período de Aguas Medias seguido de una crecida** muestra un lecho oscilante en el brazo izquierdo que resulta más crítico en alrededores de las progresivas 23.600 a 23.800 a principios del año 2003. La ocurrencia de una crecida extraordinaria luego del 2005 modificaría la morfología del sector pero no alteraría significativamente la situación de riesgo preexistente.

Las condiciones morfológicas finales para los 10 años simulados son las siguientes:



Evolución del perfil transversal del cruce durante 5 años de Aguas Medias (2005-2010) más Crecida de 25 años de recurrencia.

Si bien todas las simulaciones muestran condiciones del lecho fluctuando en cercanías de la cota del gasoducto en diferentes progresivas, por lo que el mismo sería expuesto principalmente por el valle de las dunas que lo crucen, debe destacarse que a una distancia no muy elevada aguas arriba y aguas abajo de la zona de cruce el modelo predice la ocurrencia de profundidades significativamente más elevadas, debido a que la sección del brazo izquierdo es más estrecha en esos sitios.

Si el banco ubicado en el centro de la traza de cruce creciera hacia el Este, se provocaría un efecto similar de contracción del brazo izquierdo, que podría causar un descenso del lecho mayor al pronosticado y por lo tanto un destape del gasoducto más pronunciado. Si bien este proceso no fue pronosticado por la modelación, no puede descartarse totalmente como hipótesis a futuro pues es posible que una condición hidrológica diferente de los tres Casos simulados pueda generar un incremento del ancho de la isla a la altura de la traza.

En general los pronósticos de socavaciones que se han desarrollado para condiciones de Aguas Bajas, Medias, Altas y Crecidas indican que las zonas del gasoducto actual que resultan afectadas por una tapada insuficiente y con alto riesgo de destape, son localizadas y no generalizadas en grandes tramos.

Por ejemplo, puede apreciarse que para diferentes hipótesis hídricas los sectores críticos pueden hallarse en:

- progresivas 23.600 y 24.500 considerando 5 años de Aguas Altas y 5 de Aguas Bajas
- entre 23.800 y 24.100 considerando 5 años de Aguas Bajas y 5 de Aguas Altas
- en cercanías de la progresiva 23.700 considerando Aguas Medias y luego una Crecida

4. CONCLUSIONES

Se ha verificado que las técnicas modernas de modelación matemática hidrosedimentológica, pueden ser aplicadas para la predicción de la evolución de un cauce fluvial complejo, cuando están apoyadas en una cantidad suficiente de información de base y en la experiencia en cuanto al conocimiento de los procesos morfológicos fluviales que producen las modificaciones del lecho.

La posibilidad de reproducir adecuadamente las evoluciones históricas del río como ha sido mostrado en el caso particular el cruce subfluvial del Gasoducto Mesopotámico, valida a la modelación matemática como una herramienta apta para predecir la evolución futura, ante diferentes estados hídricos posibles.

Ello permite disponer de una importante herramienta de planificación para implementar en tiempo y forma eventuales medidas correctivas o mitigadoras, ante cambios del lecho que puedan poner en riesgo la integridad del ducto.

5. REFERENCIAS

- (1) "Sediment Transport: New Approach and Analysis", Ackers, P. and White, W.R., Journal of the Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers, No HYII, 1973
- (2) "Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas", Leo C. van Rijn, Aqua Publications, 1993
- (3) "Conexión Física Rosario – Victoria. Estudio de la distribución y las luces de los Puentes en la Planicie Inundable", Informe G-G-ME-212 Rev.0, Puentes del Litoral S.A., Serman & Asociados S.A. Consultora, Nov. 1999.