

CRUCES DE RÍOS: INFLUENCIA DE LA MIGRACIÓN DE MEANDROS EN LA INTEGRIDAD DEL GASODUCTO

Ing. Martín Carnicero, Transportadora de Gas del Norte, martin.carnicero@tgn.com.ar

Sinopsis

Dentro del espectro de las amenazas naturales a los sistemas de transporte de gas, se encuentra en una posición preponderante, la integridad de los cruces de ríos. El sistema operado por TGN de más de 9.000 kilómetros de extensión cuenta con innumerables cruces, dentro de los cuales la migración de meandros toma mayor importancia en los cruces que se ubican al pie de los cerros. Es allí donde la pendiente toma un valor intermedio congruente con la transición del relieve que pasa de un ambiente de montaña a otro de llanura. Desde el punto de vista conceptual, se plantea el conflicto entre la interacción de una estructura fija como lo es el gasoducto y el río que presenta una gran movilidad, tanto en el sentido transversal a la corriente como en el longitudinal.

En los párrafos siguientes se presentarán casos concretos de problemas reales, en donde se revisarán los conceptos básicos de estabilidad fluvial, se enumerarán los lineamientos para efectuar el análisis de riesgo, se presentará el análisis de problemas experimentados y las correspondientes obras de adecuación implementadas. Finalmente, se darán recomendaciones para el diseño de cruces nuevos que permitan evitar la afectación futura o eventual, de acuerdo a la predicción del comportamiento del río.

Introducción

La formación de meandros presenta variados problemas en la integridad de los gasoductos, a saber:

Problema 1 - Erosiones de márgenes: en este caso lo más común es el destape de los cuellos de cisne. Este destape puede darse con el caño apoyado o no. Cuando no está apoyado, empiezan a intervenir de manera desfavorable los esfuerzos de torsión que ejerce la corriente y el peso propio de la cañería una vez que baja el agua, el cual es proporcional a longitud expuesta (ver Figura 9).

Problema 2 - Erosiones por migración lateral: en los casos en los cuales la traza del gasoducto no es perpendicular al río, los meandros tocan al gasoducto de manera tangencial, normalmente en tramos no diseñados como cruce especial (sin mayor espesor y sin contrapesado), (ver Figura 13).

Problema 3 - Erosiones de fondo: en el caso en que los meandros se cortan, el cauce recorre dos puntos de distinta cota, en una distancia más corta, aumentando la pendiente de fondo, la velocidad del agua y su correspondiente erosión. Es este caso, el río puede llegar a pasar por un tramo no contemplado originalmente como cruce especial (sin mayor espesor y sin contrapesado), (ver Figura 23).

Conceptos básicos de estabilidad de cauces y meandros

Grados de libertad

Las características de un cauce dependen del caudal y sus variaciones, del tipo de suelo de las márgenes y del lecho, y del caudal sólido de sedimentos que alimentan un tramo dado del cauce [1]. Si estas variables permanecen constantes por un período prolongado de tiempo, se llegará a una sección estable del río. Al variar, se llegará a otra configuración del río. Este cambio puede ser descripto por medio de tres grados de libertad que tiene el río, correspondientes a los siguientes parámetros:

1. Profundidad,
2. Pendiente,
3. Ancho.

Caudal formativo

En la realidad los caudales varían durante el año y a su vez, de año a año, según sea hidrológicamente rico o pobre. Además, en nuestro país resulta muy difícil conseguir aforos en los cursos de agua, obteniéndose en forma indirecta generalmente a partir de modelos de lluvia efectiva-caudal. Por ello, se tienen que tomar decisiones acerca de que caudal usar a los efectos de definir una configuración de cauce estable. En la práctica, se usa el llamado caudal formativo que se define como aquel caudal que de escurrir en forma constante formaría un cauce con la misma sección transversal y pendiente promedio que formarían los distintos caudales en función del tiempo a lo largo de un año (hidrograma anual). Si bien existen varias maneras de calcular este caudal, una de las más usadas es la de considerar el caudal para el cual el río escurre a sección llena. Este valor se puede obtener al realizar un relevamiento topográfico, obtener varias secciones transversales y usar ecuaciones o modelos de escurrimiento a superficie libre, corriéndolo para varios caudales hasta dar con aquel que no desborda las márgenes en el tramo considerado. Es importante notar que, tal vez contrariando el sentido común, los caudales correspondientes a sección llena no implican la ocurrencia de una crecida extraordinaria; en realidad se asocian a recurrencias o períodos de retorno entre 1 a 4 años.

Movimiento helicoidal y corrientes secundarias

A lo largo de la historia, los meandros han sido tema de investigación dentro de la comunidad científica, dada su presencia en todo el mundo y su influencia negativa en actividades humanas tales como la navegación o en las obras de infraestructura, como por ejemplo, los puentes o los ductos. El comportamiento del agua en las curvas de un río está caracterizado por la influencia de la fuerza centrífuga y la presencia de corrientes secundarias [4], que al componerse definen un movimiento helicoidal del agua (ver Figuras 1 y 2).

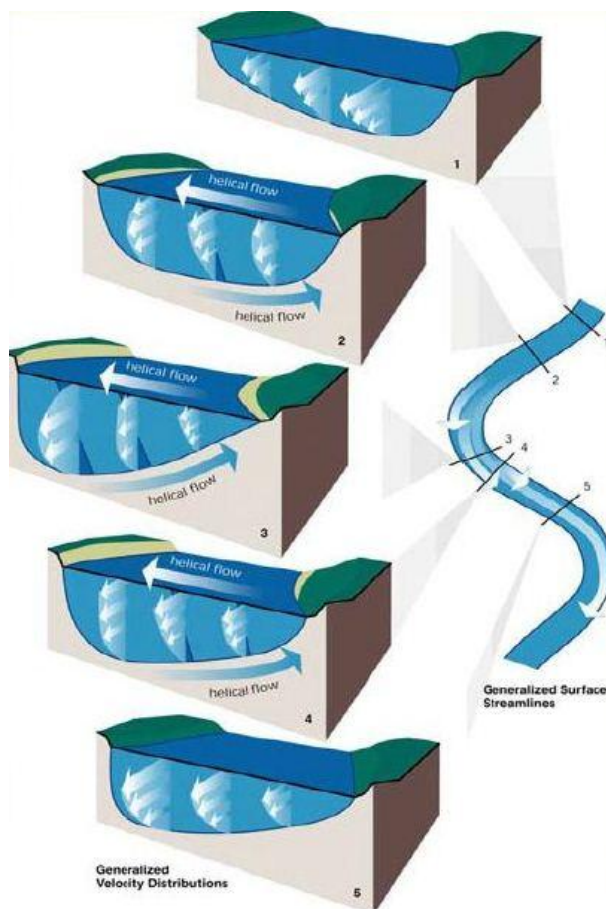


Figura 1. Flujo y corrientes secundarias en meandros

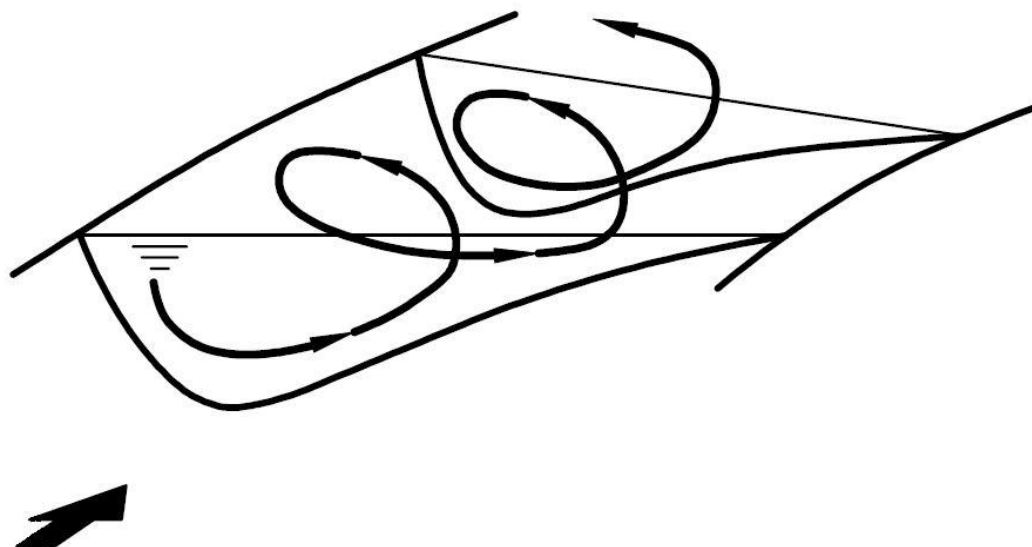


Figura 2. Flujo helicoidal resultante

Estas corrientes secundarias son las encargadas de erosionar la margen externa o cóncava, y de depositar esos sedimentos en la playa de la margen interna o convexa, como lo indican las flechas ascendentes ubicadas al fondo de la Figura 1.

Expresiones útiles para describir los meandros

A pesar de su alta movilidad, se han encontrado expresiones matemáticas que describen las características principales de los meandros. En 1908, el ingeniero francés Louis-Jérôme Fargue [2], en un trabajo sobre el Río Garona en Francia, define las relaciones principales entre la curvatura y la profundidad de los ríos meandrosos. Considerando la coordenada s como el eje central del cauce, el talweg como la línea de mayores profundidades y λ como la longitud de onda (Ver Figura 3) se obtiene que [3]:

- La mayor profundidad se da a una distancia de $\lambda/8$ del punto máxima curvatura,
- La menor profundidad se da aguas abajo del punto de inflexión,
- El perfil del fondo varía entre estos dos extremos siguiendo una curva del tipo sinusoidal, al igual que la curvatura en planta de los meandros.

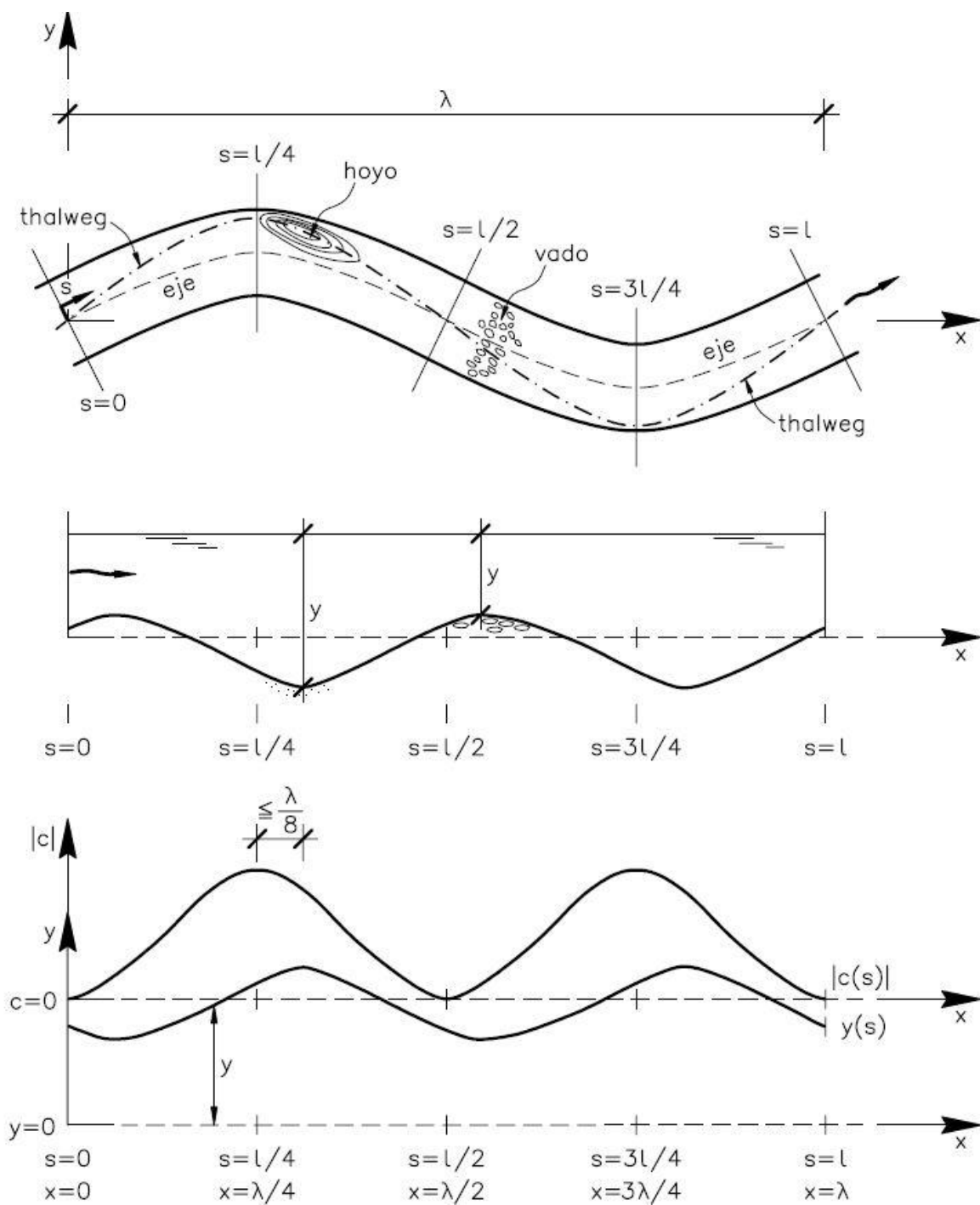


Figura 3. Relaciones entre la curvatura y la profundidad (Leyes de Fargue)

Expresada en forma matemática, las leyes de Fargue se pueden resumir en la ecuación:

$$\frac{dc}{ds} = K \cdot \frac{dy}{ds}$$

la cual implica que la pendiente del fondo a lo largo del talweg (dy/ds = profundidad/distancia) es proporcional a la curvatura del eje (dc/ds = curvatura/distancia). De allí, que se pueden enunciar las siguientes leyes empíricas:

- La profundidad del pozo es mayor a mayor curvatura de la curva,
- Cambios bruscos en curvatura implican cambios bruscos en las profundidades (e inversamente, cambios graduales en la curvatura resultan en un perfil longitudinal del fondo más continuo)
- Si se consideran dos curvas de igual longitud, la que tiene mayor curvatura tendrá mayor profundidad media

Relaciones entre el ancho del río, longitud de onda y la amplitud de los meandros

Varios investigadores [3] trataron de relacionar estas variables que se grafican en la Figura 4, llegando a las relaciones empíricas que se muestran en la Tabla 1.

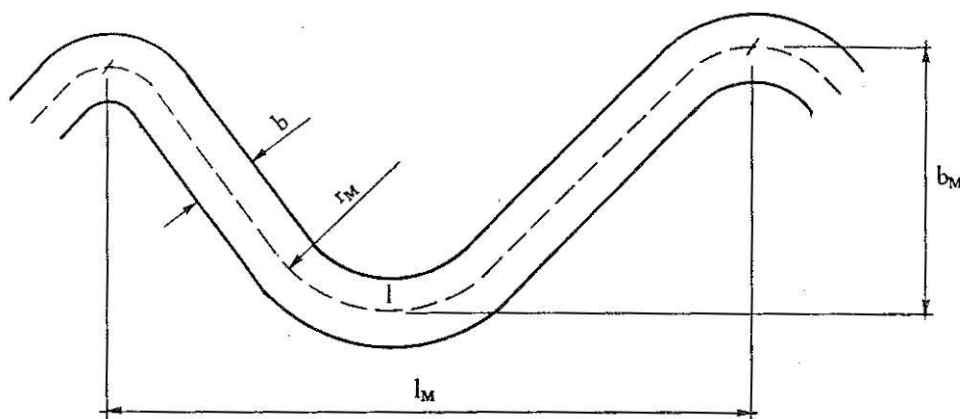


Figura 4. Relaciones empíricas para meandros

Inglis (1)	Leopold & Wolman (1)	Zeller (2)
$l_M = 6.6 b^{0.99}$	$l_M = 10.9 b^{1.01}$	$l_M = 10.0 b^{1.025}$
$b_M = 18.6 b^{0.99}$	$b_M = 2.7 b^{1.1}$	$b_M = 4.5 b^{1.0}$
$l_M = 0.4 b_M$	$l_M = 4.7 r_M^{0.98}$	

Notas:

(1) En unidades inglesas

(2) En unidades métricas

Tabla 1. Relaciones para meandros

Estas relaciones deben tomarse como indicativas para obtener valores referenciales, aunque exista una buena correlación entre los autores para la longitud y el ancho (7 a 10 veces). El análisis también debe contemplar la variación de los meandros con los distintos años hidrológicos. A tal efecto se incluye la expresión desarrollada por Anderson [3] que vincula la longitud del meandro con el caudal formativo.

$$l_M = 72 \left(\frac{Q}{\sqrt{gy}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Si se comparan las imágenes satelitales, se puede apreciar que en años pobres el ancho disminuye a expensas del crecimiento de la vegetación en bancos y playas. En un evento posterior correspondiente a un año rico, al venir una crecida significativa, el río volverá a tratar de ocupar un ancho mayor al disponible, ensanchando la sección y trasladando hacia aguas abajo los meandros cuya longitud será mayor y proporcional a la raíz cuadrada del caudal.

Relaciones entre el ancho y la curvatura (encauzamientos)

En los casos en que un meandro se pueda convertir en una amenaza a la integridad del cruce, la construcción de un encauzamiento temporario se convierte en una medida de rápida ejecución. Normalmente, el encauzamiento de ríos sinuosos se materializa mediante una serie de curvas que ubican al cauce principal en la parte central del río, compatible con las características constructivas del cruce original, es decir en el medio de los cuellos de cisne. Para ello, toma importancia el ancho y la curvatura del encauzamiento. Al definir estas variables se debe tener en cuenta la siguiente relación:

$$2B \leq r \leq 8B$$

siendo:

B: ancho del río

r: radio de curvatura de las curvas del encauzamiento y del río

Si bien esta relación se obtuvo para ríos de ancho no mayor a 150 metros, indica que para radios de curvatura pequeños (gran curvatura) se pueden cortar los meandros y para radios de curvatura grandes (menor curvatura) el río puede formar bancos que dividen el flujo y concentran la corriente en un lado [1]. Normalmente, en el encauzamiento se usan varios arcos de circunferencia de distintas curvaturas, siendo conveniente que los radios decrezcan hacia aguas abajo.

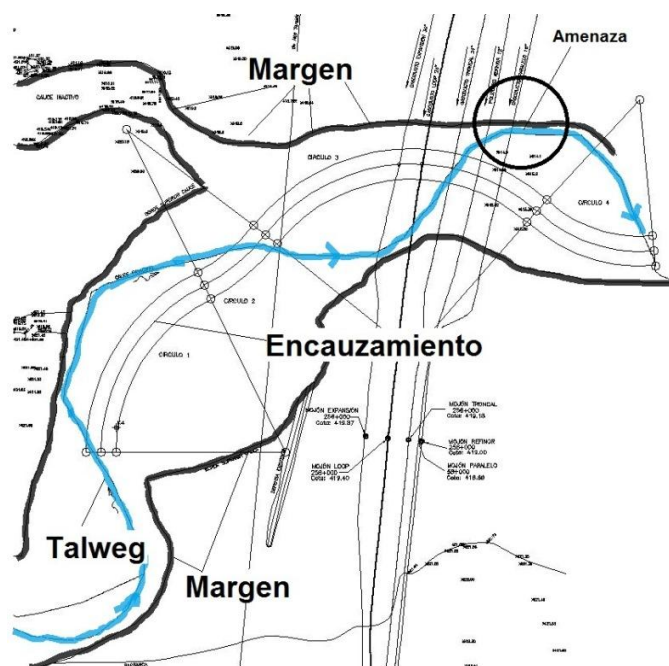


Figura 5. Encauzamiento temporario

De esta manera, se efectúa un procedimiento iterativo cuyas etapas son:

- Se define un caudal de diseño compatible con el caudal formativo que se puede obtener mediante de un estudio hidrológico para recurrencias de entre 1 y 4 años, que luego se verifica con aquel correspondiente a la condición de sección llena,
- Se adopta una sección geométrica de un ancho constante correspondiente al caudal de diseño,
- En base a un relevamiento topográfico, imágenes satelitales y fotos aéreas geo-referenciadas se obtienen las distintas curvaturas del río y de los sectores de círculos del encauzamiento. Con el valor del ancho del río se van definiendo los sectores de círculos del encauzamiento, tratando de mantener la relación entre el ancho y la curvatura, mencionada anteriormente.

En la Figura 5 se muestra un encauzamiento diseñado para prevenir el destape del cuello de cisne de la margen izquierda en la zona de los cruces.

Método de evaluación del riesgo asociado

Tal cual lo estipulado en los párrafos anteriores, la raíz del problema se encuentra en la interacción entre la movilidad de los meandros y la rigidez de la configuración correspondiente al diseño y construcción del cruce del gasoducto. Para evaluar correctamente el riesgo se necesita entender o predecir el comportamiento del río y compararlo con el esquema constructivo del cruce. En relación a este último aspecto, específicamente se necesita saber:

- Ancho constructivo del cruce: es necesario saber si el cruce fue construido con un ancho similar al ancho del río o si el mismo fue extendido a todo el valle de inundación. En este último caso, los meandros podrían migrar sin afectar el cuello de cisne. Sin embargo, pocas veces sucede ya que para salvar las barrancas y seguir con un cruce horizontal, la excavación de la zanja llega a profundidades significativas (7 a 12 metros), aumentando el volumen de excavación y la inestabilidad de la zanja, máxime cuando hay presencia de agua de napa que es el caso más común.
- Ubicación de los cuellos de cisne (si es que los hay): normalmente, los cuellos de cisne se ubican a pocos metros de las barrancas del cauce principal y son los primeros en ser alcanzados por los meandros, ya que no es necesario que el río erosione verticalmente tanto como lateralmente. En el caso de contrapesos puntuales (tipo abulonado o caballete), si el caño queda expuesto y sin apoyo (free span), existe un doble problema: uno es que la corriente ejerce esfuerzos de torsión y otro que el contrapeso aumenta el riesgo de rotura por peso propio luego de que la corriente bajó. En algunos cruces, no hay cuellos de cisne ya que el caño se colocó por flexión natural a lo largo de una longitud mayor.
- Tipos de contrapesos y su ubicación: se pueden dar contrapesos continuos o gunitados, o puntuales que, a su vez, pueden ser del tipo de dos semicírculos abulonados con espárragos, o del tipo caballete. Estos últimos, al quedar destapados, pueden volcar y perder su función. Los otros no, ya que quedan agarrados a la cañería. Por ello, resulta crítica su condición de exposición: si están parcialmente destapados, protegen al caño de la flotación y la vibración por efecto de vórtice, pero si están sin apoyo (free span) aumenta el riesgo de rotura del gasoducto.
- Profundidad y tapada: como en la mayoría de los casos en la naturaleza no se puede diferenciar estrictamente las erosiones de lecho de las de márgenes en el caso de los meandros. Normalmente, en la parte cóncava de la curva se producen las máximas erosiones y las máximas profundidades. De allí, que la existencia de mayores profundidades y tapadas, dan una mayor margen de seguridad ante las erosiones.

- Traza del cruce: es muy importante que el caño se construya lo más perpendicular posible al sentido general de la corriente o al valle de inundación. Esto implica que ante cualquier afectación del río (erosión lateral, de fondo, migración de márgenes y cortas de meandros) la longitud afectada sea menor, y con ello, menor el alcance de la obra de remediación. En el sentido opuesto, la peor configuración es aquella que cruza los meandros tangencialmente, ya que al mínimo movimiento lateral del río, más de un tramo de gasoducto queda expuesto (ver Figura 13).
- Espesor de la cañería: es importante ya que puede influir en el aspecto normativo. En el caso de cortas de meandros, puede ser que el río cruce al caño en un lugar donde originalmente no formaba parte del cruce. Es decir, se tiene un cruce nuevo sin mayor espesor y sin contrapesado.

En relación al comportamiento del río, el análisis de su evolución contempla individualizar los riesgos y tratar de prevenir sus consecuencias:

- Amplitud máxima de los meandros: este valor se puede medir de imágenes satelitales, fotografías aéreas geo-referenciadas y relevamientos topográficos. También se puede comparar con los valores calculados por las expresiones de la Tabla 1. Una vez obtenida se compara con el ancho constructivo del cruce. Si la amplitud es menor que el ancho constructivo, significa que el río puede divagar sin afectar al cruce. En caso contrario (la situación más probable), al avanzar el meandro es factible que destape alguno de los cuellos de cisne, o alternativamente a los dos.
- Distancia del meandro al cruce: el riesgo potencial individualizado según el punto anterior puede que no sea inmediato, sino que el meandro más cercano puede tardar mucho tiempo en llegar hasta la sección del cruce cuanto mayor sea la distancia entre ellos. Este dato también se obtiene de las mismas fuentes descriptas en el punto anterior.
- Análisis de los años hidrológicos secos y húmedos: si bien en nuestro país no existe una red de aforos que abarque a todos los ríos, mediante registros de lluvia se puede inferir la cantidad de agua que se traduce en caudales mayores o menores a lo largo de la temporada de crecidas. Registros fotográficos del personal afectado a tareas de mantenimiento, complementan estos datos.
- Análisis multitemporal: en la actualidad existe la posibilidad de acceder a imágenes satelitales y fotografías aéreas que permiten ver la evolución de los meandros y el ancho del río, y prever cuál podría ser su influencia con anticipación.
- Relevamiento de bancos e islas y el avance o retroceso de vegetación: estrechamente relacionado a la secuencia de años hidrológicos secos y húmedos, están los cambios en la sección transversal de escurrimiento disponible del río. Mediante el análisis multitemporal, se puede apreciar y medir aproximadamente, el ancho del río, la presencia de islotes y el crecimiento de la vegetación. A grandes rasgos, los años secos producen una disminución del ancho, el crecimiento de vegetación en ambas márgenes y la fijación de islotes que dividen el escurrimiento en 2 o más brazos, empujándolo hacia las márgenes y aumentando la erosión de las mismas. Eventualmente, cuando viene un año rico, el río necesita volver a tener un ancho mucho mayor, normalmente a expensas de un corrimiento de márgenes y cambios en su alineación en planta.
- Secciones de control: el caso más emblemático es la presencia de puentes carreteros que, a grandes rasgos apilan los meandros aguas arriba y alinean el río aguas abajo. El relevamiento de los vanos para verificar si están libres o tapados de vegetación, también impactan el escurrimiento del río.
- Intervenciones humanas: dentro de las mismas se destacan los encauzamientos, las cortas de meandros realizadas artificialmente para proteger áreas sembradas y extracciones de áridos que aumentan la capacidad erosiva del agua.

Si bien se describieron los factores que intervienen en la evaluación de riesgo para meandros, el método semi-cuantitativo descrito en [6] incluye una evaluación más amplia que toma en cuenta otros factores, dándole el peso correspondiente a cada uno de ellos.

Presentación de casos reales

A continuación se presentan de manera breve, aquellos casos reales que afectan o afectaron al sistema de gasoductos, con comentarios en relación a la obra de adecuación y su comportamiento en el tiempo. En la Tabla 2 se presentan dos parámetros geomorfológicos básicos que sirven para describir y comparar la características de los ríos y su comportamiento [5]. La cuenca hidrográfica calculada al lugar del cruce es indicativa de la cantidad de agua que puede escurrir por el río, mientras que la pendiente describe la alineación en planta del curso de agua (recto, trezado o meandros).

Río	Area [km ²]	Pendiente [%]
Río Santa María	428	0.15
Riacho Seco	128	0.55

Tabla 2. Parámetros geomorfológicos básicos

A modo de ejemplo las Figuras 6 y 7 muestran la cuenca hidrográfica y la pendiente en el tramo del cruce del Río Santa María. La cuenca se puede determinar sobre la base de una imagen satelital o carta topográfica. El área comprendida dentro la divisoria de agua es de aproximadamente 428 km². La pendiente se extrajo de un relevamiento topográfico en donde se midieron 80 secciones transversales (ver Figura 14). De cada una de ellas se extrajo el punto más bajo del cauce (talweg) y se formó la línea de máximas profundidades. La interpolación de los puntos indica una pendiente media de 0.15%.

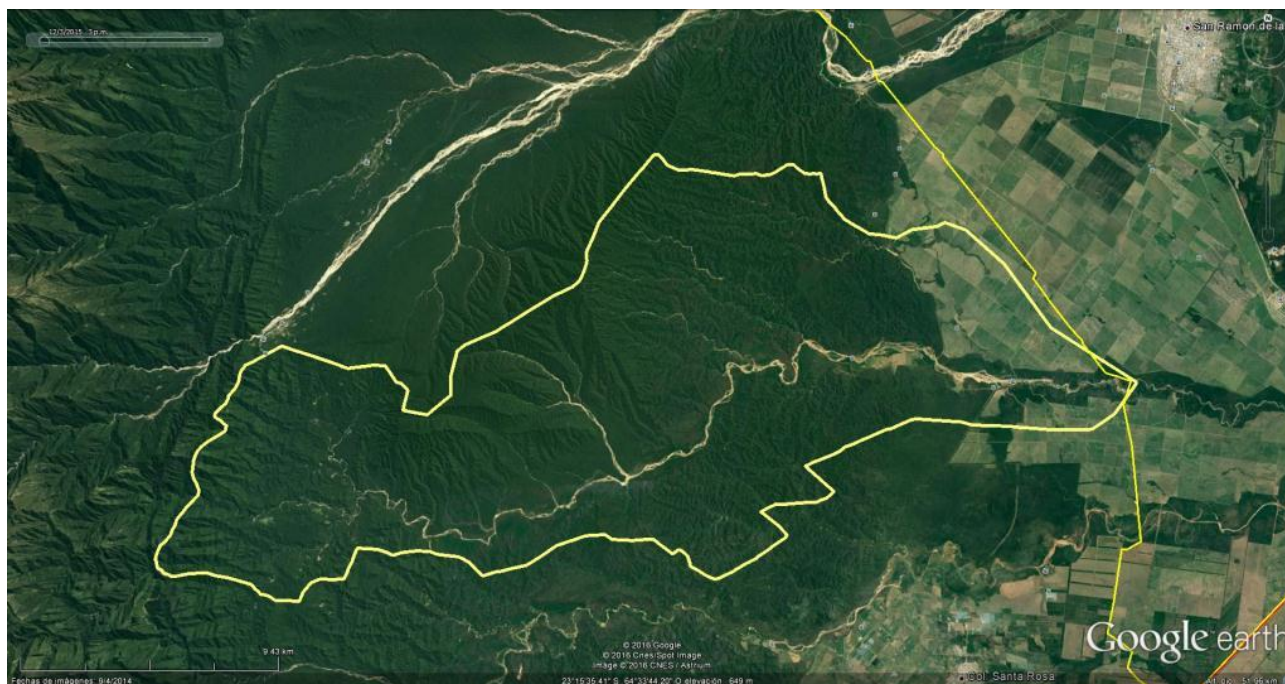


Figura 6. Cuenca hidrográfica del Río Santa María, Salta

Río Santa María

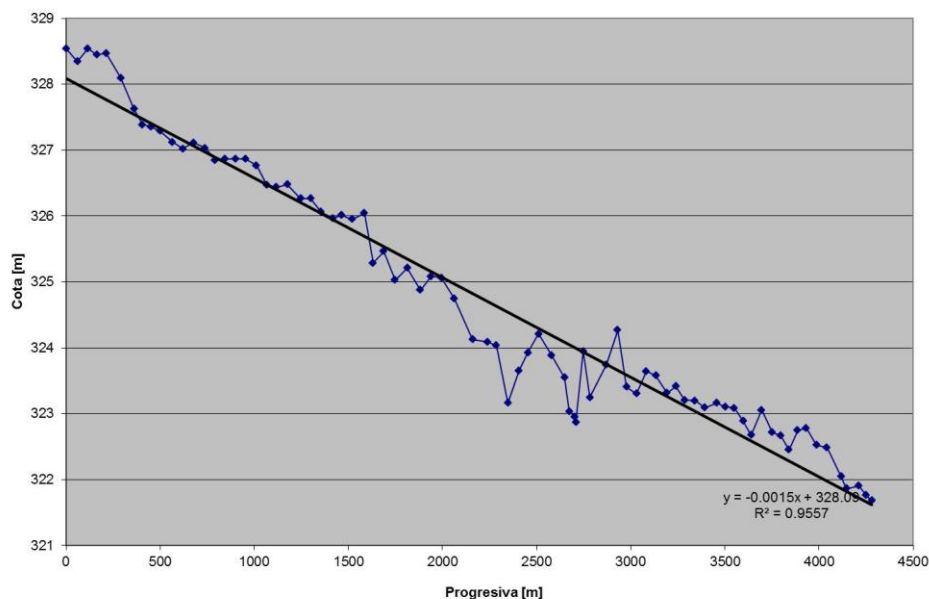


Figura 7. Pendiente del Río Santa María en la zona del cruce obtenida de un relevamiento topográfico

Riacho Seco

Este río se ubica cerca de la localidad de Urundel, Salta. El Riacho Seco escurre por un cauce principal que tiene una alineación en planta meandrosa con un ancho promedio de 100 a 150 metros y barrancas de 1 a 2 metros de alto. Sin embargo, posee un valle de inundación bien marcado con una alineación más recta, un ancho de 700 metros, y barrancas de 24 metros de altura (ver Figura 8). El comportamiento del río está caracterizado por la migración lateral y en sentido aguas abajo, dentro de los límites del valle de inundación.

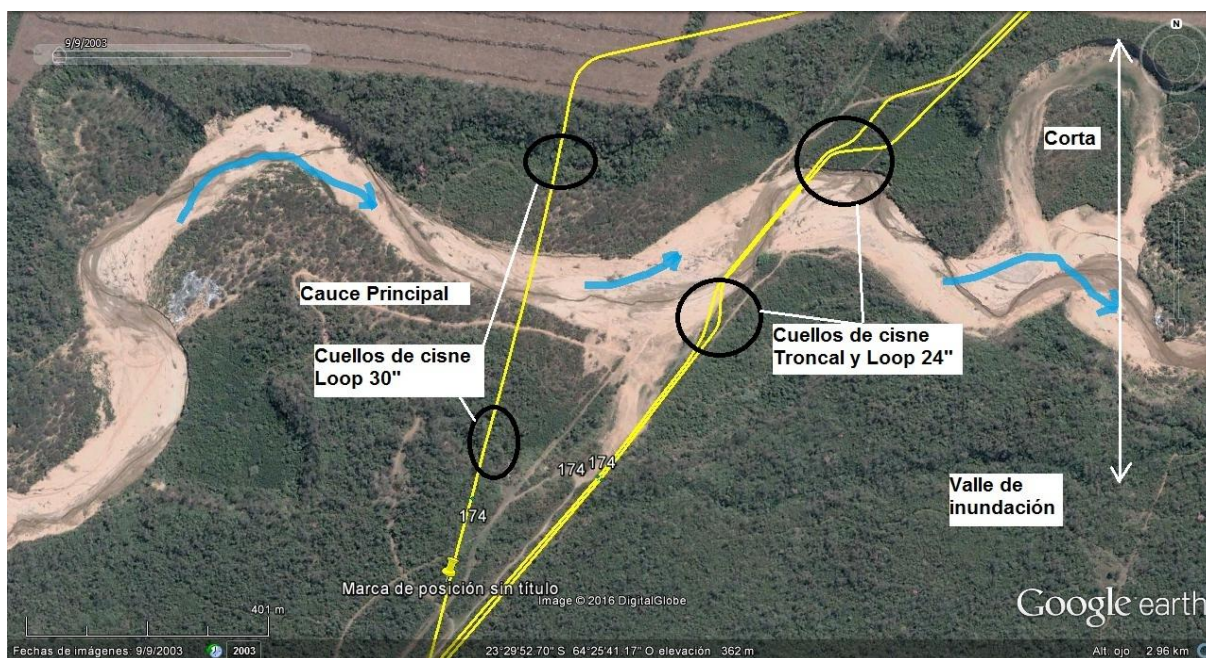


Figura 8 - Cruce del Riacho Seco – Características de las trazas del río y de los gasoductos según las características constructivas de cada uno.

Este río en el año 2001, presentó la exposición de los dos gasoductos en su margen derecha o sur (Ver Figura 9) en la zona de los cuellos de cisne, luego varias crecidas ocurridas en los meses de verano de un año hidrológicamente rico.



Figura 9. Cruce del Riacho Seco - Exposición del cuello de cisne en margen derecha o sur

La historia de obras de adecuación de este cruce abarca:

- Bajada de cañería por flexión natural con corte del gasoducto Troncal y Loop en el año 2002

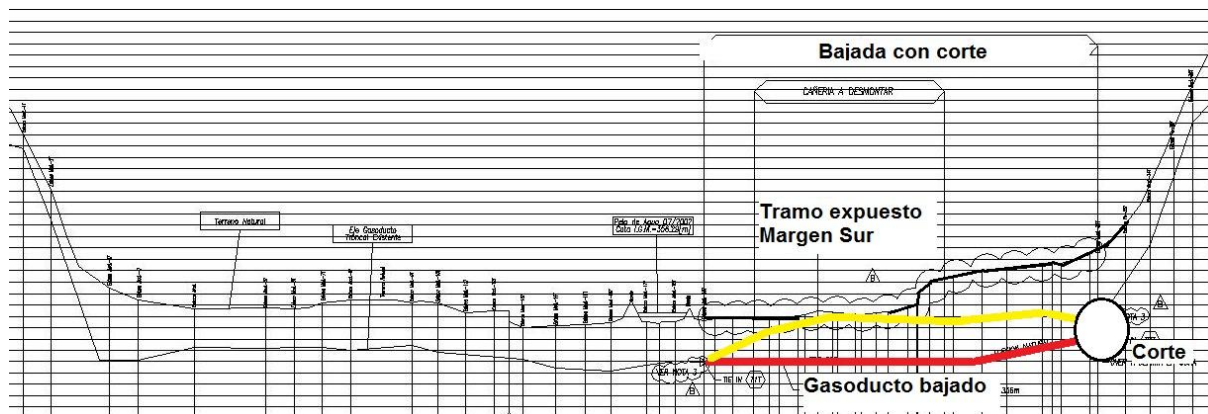


Figura 10. Cruce del Riacho Seco – Obra de bajada de cañería en margen sur

- Encauzamiento por el centro del río en la zona del cruce en el año 2005: aprovechando la corta natural de un meandro ubicado aguas abajo, se procedió a realizar un encauzamiento temporario que permitiera disminuir las migraciones laterales de los meandros, máxime considerando que la margen norte no fue modificada por la operación de bajada. Hasta la fecha, el río no ha impactado negativamente en el cruce.

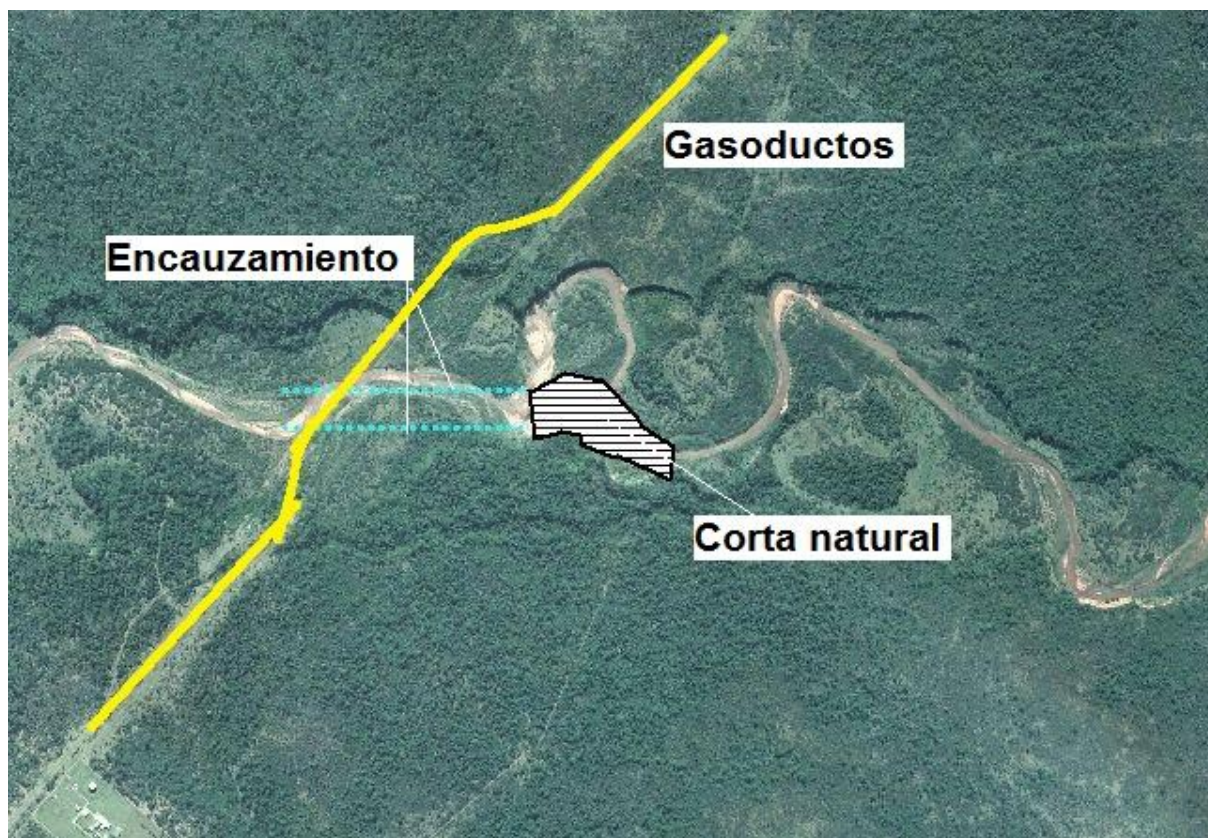


Figura 11. Cruce del Riacho Seco – Encauzamiento y corta natural

En el año 2005 se construyó un nuevo gasoducto de 30" dentro del proyecto de expansión del sistema operado por TGN, en cuyo diseño se tuvieron en cuenta:

- Traza: el gasoducto se tendió en forma más cercana a la perpendicular al valle de inundación que es recto.
- Ubicación de los cuellos de cisne: los mismos se ubicaron en los límites del valle de inundación, alejados de las márgenes del río.
- Profundidad, tapadas y excavación de la zanja: el gasoducto se colocó en el lecho a una cota constante de 350 m lo cual implica una tapada mínima de 7.40 metros en el cauce principal, compatible con la erosión potencial más una revancha [7]. Esta decisión implicó que en las márgenes, a medida que se alejaba de las barrancas del río y se acercaba al borde del valle de inundación, la excavación de la zanja llegó a 13 metros de profundidad. En forma correspondiente, el diseño de la zanja contempló la ejecución de varias terrazas hasta llegar a la cota y profundidad deseadas.

Este diseño permite al río erosionar en profundidad sin destaparlo y migrar lateralmente dentro del ancho del valle de inundación sin destapar los cuellos de cisne. La Figura 12 muestra la disposición del cruce según el plano conforme a obra. En ella se aprecia que la cañería fue colocada a una cota objetivo constante. Este detalle es muy importante, pues dada la magnitud de la excavación, cualquier apreciación sobre profundidades está desvirtuada por la cantidad de suelo removido. Por ello, en obra se debe medir topográficamente la cota de diseño del lomo, previo a tapar la zanja.

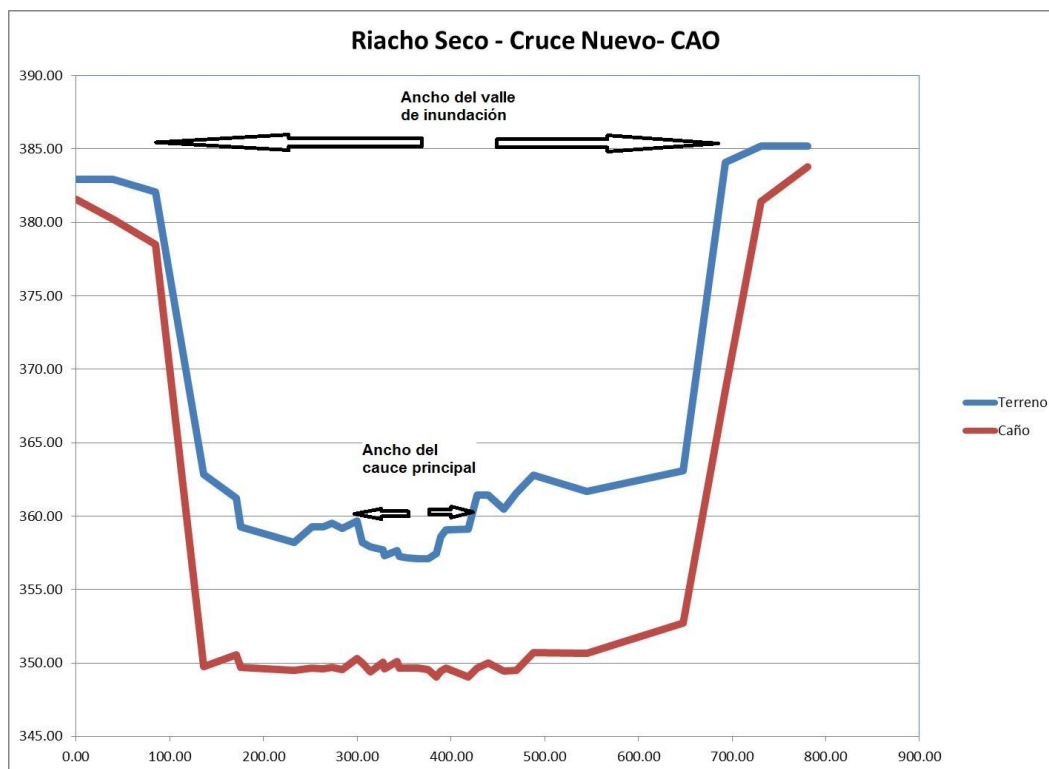


Figura 12. Cruce del Riacho Seco – Construcción del cruce nuevo – Conforme a obra

Río Santa María

Este río se ubica cerca de la localidad de Hipólito Yrigoyen, Salta. Se caracteriza por tener una traza constructiva que es tangente a la configuración de los meandros al momento de la construcción. Esta decisión de colocar el caño así, implicó que cualquier o todas las posibilidades de migración de meandros descriptas anteriormente como los problemas 1 a 3 pudieran eventualmente destapar la cañería, tanto en el tramo en donde fue contemplado el cruce especial (espesor y contrapesado), como sus cuellos de cisne y los tramos de acometida y salida del río. Las figuras 13 a 17 son indicativas de esta situación. La secuencia de amenazas a la integridad del cruce fue:

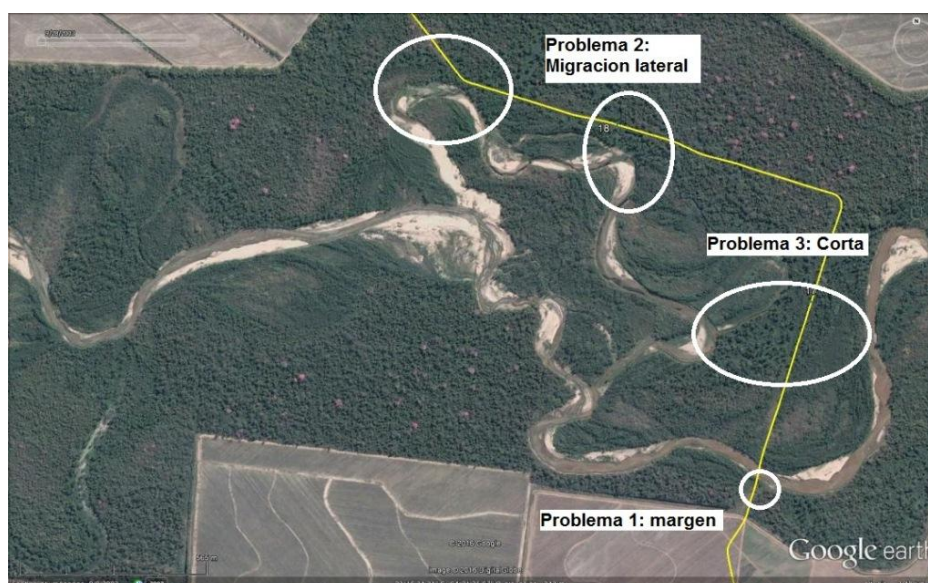


Figura 13. Cruce del Río Santa María – Cruce construido con una traza tangente a los meandros

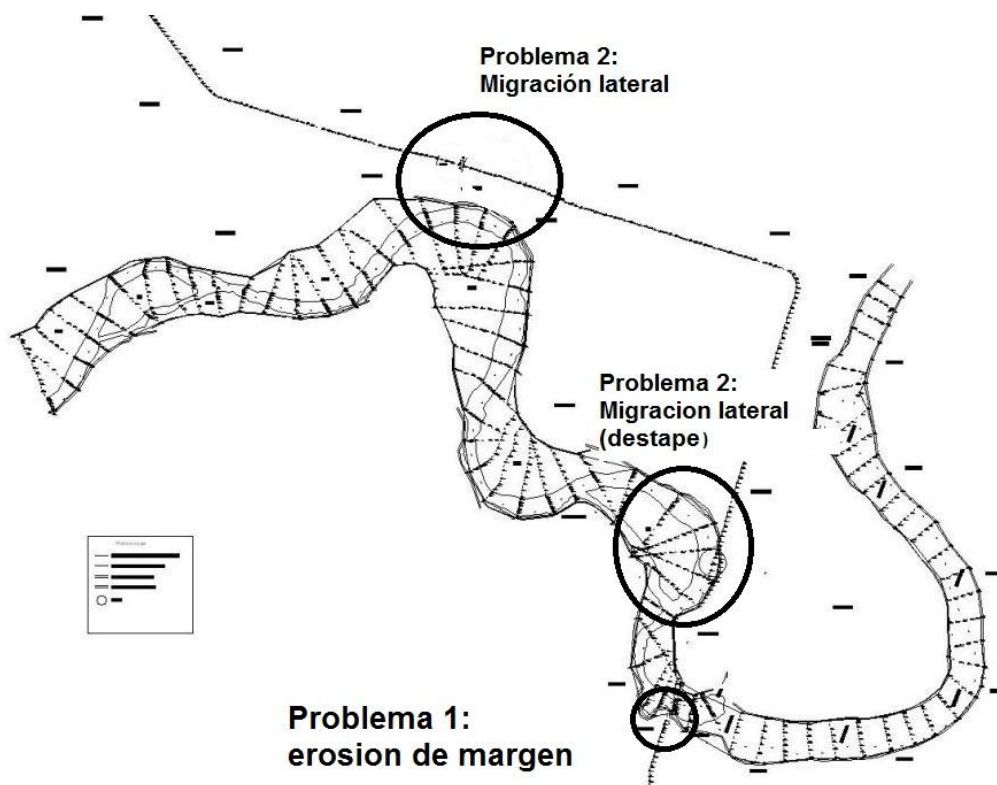


Figura 14. Cruce del Río Santa María - Migración lateral destapa el gasoducto luego del cruce especial

- Erosión de la margen sur en su cuello de cisne (Problema 1): mientras se mantuvo la configuración del río y del cruce similar a la de la época de la construcción, la principal amenaza fue el corrimiento de la margen sur y el eventual destape del cuello de cisne. Para ello se construyó una serie de espigones cuyo criterio de diseño es reconstituir la margen erosionada. Estos espigones por un tiempo cumplieron su función protegiéndolo y reconstituyendo la margen, que se cubrió de vegetación (ver Figura 15).



Figura 15. protección del cuello de cisne mediante espigones que reconstituyen la margen erosionada

- Intervención humana por medio de la construcción de un canal y el taponamiento del cauce principal con un terraplén de tierra: el ingenio azucarero decide abrir un pequeño canal que by pasea un meandro y taponar el cauce principal con el objetivo de proteger sus cultivos de caña de azúcar (ver Figura 16). Al principio, se pensó que su efectividad iba a ser menor, pero luego este canal se complementó con un terraplén que tapó completamente el meandro, derivando el agua y forzándola a realizar una curva de gran curvatura.

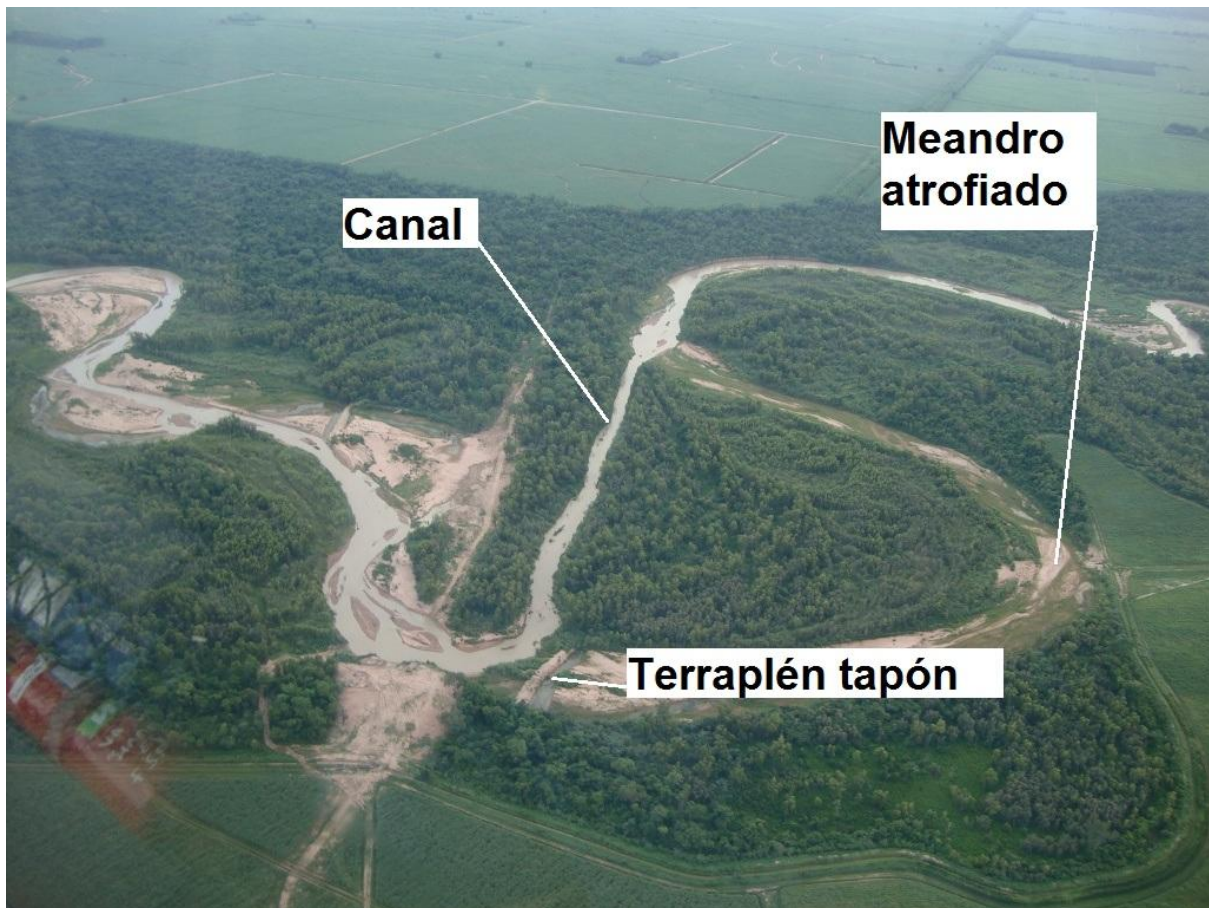


Figura 16. Corta artificial de un meandro

- Exposición en la margen norte por migración de meandros en la parte de aguas abajo del cruce especial (Problema 2): el cambio efectuado en el río produjo un apilamiento de los meandros aguas arriba, dada la poca sección de escurrimiento disponible para el río. Esto se tradujo en un desplazamiento lateral de los meandros, según se muestra en la Figura 14. Como consecuencia de ello se destapó un tramo del gasoducto a la salida del cruce especial, cuya vista aérea se aprecia en la Figura 17. En la misma se aprecian los pilotes de sujeción temporaria de la cañería, colocados para mantener el caño fijo durante la temporada de lluvias, hasta que se pudiera implementar una operación de bajada de cañería.



Figura 17. Destape del gasoducto aguas arriba del cruce

- Bajada de cañería por flexión: como consecuencia del destape del caño, se procedió a bajar la cañería por flexión para solucionar los tres problemas que se visualizaban:
 - la amenaza del cuello de cisne en la margen sur donde estaban los espigones,
 - la exposición por apilamiento de meandros,
 - la eventual corta del nuevo meandro formado por el río y el canal excavado por el Ingenio, dado el grado alto de inestabilidad de la configuración.

Por ello se diseñó la bajada con corte de cañería, colocándola a una profundidad mayor de la socavación potencial [7], de manera de que si la corta se producía, el caño estuviera por debajo.

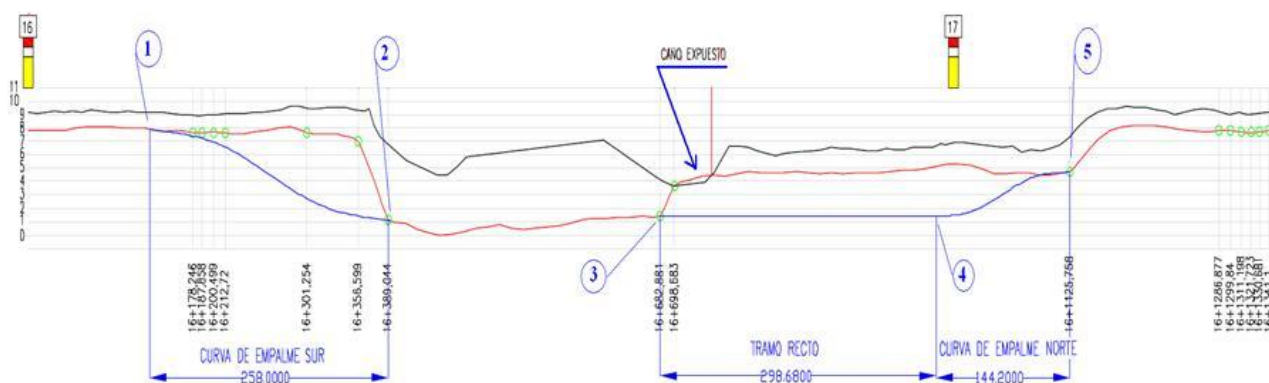


Figura 18. Esquema de bajada de cañería con corte

En la Figura 19 siguiente se aprecian las zonas en donde se excavó el terreno para la operación de bajada. También se aprecia el terraplén que tapona al río y dirige las aguas hacia el canal excavado de ancho mucho menor.



Figura 19. Situación del cruce luego de la bajada de cañería



Figura 20. Operación de bajada y posterior contrapesado

- Corta del meandro: tal cual lo anticipado, se produjo la corta del meandro según lo muestra la Figura 6, (Problema 3). En este caso, se puede deducir que el río en vez de recorrer el camino curvo más largo, lo hace siguiendo uno mucho más corto y recto entre los mismos puntos, aumentando la pendiente y con ella la velocidad del agua y el potencial de erosión.



Figura 21. Cruce del Río Santa María – Corta natural del meandro después del cruce especial

- Erosión lateral y acercamiento del río a la traza gas abajo de la margen norte: durante la caracterización de las amenazas al gasoducto, se visualizó este problema como el menos urgente.

Como muestra la Figura 22, el río se acerca a la traza de manera tangencial, migrando en el tiempo lateralmente y hacia adelante en la dirección del agua. Por ello, se compararon las cotas del fondo del lecho, las del lomo y la base de la cañería, y la distancia horizontal entre la traza y los meandros. Con esta información se diseñó una bajada para poner la cañería a una cota objetivo constante de manera que el gasoducto quede por debajo del río ante una eventual migración. En la Figura 23 se muestra la configuración de la cañería obtenida del navegador inercial, con la posición de las curvas en planta y en vertical a considerar durante la operación. También se muestran las curvas de empalme calculadas en función de las tensiones admisibles.



Figura 22. Vista hacia aguas abajo del río – Se aprecia la traza y el meandro que se acerca a la traza

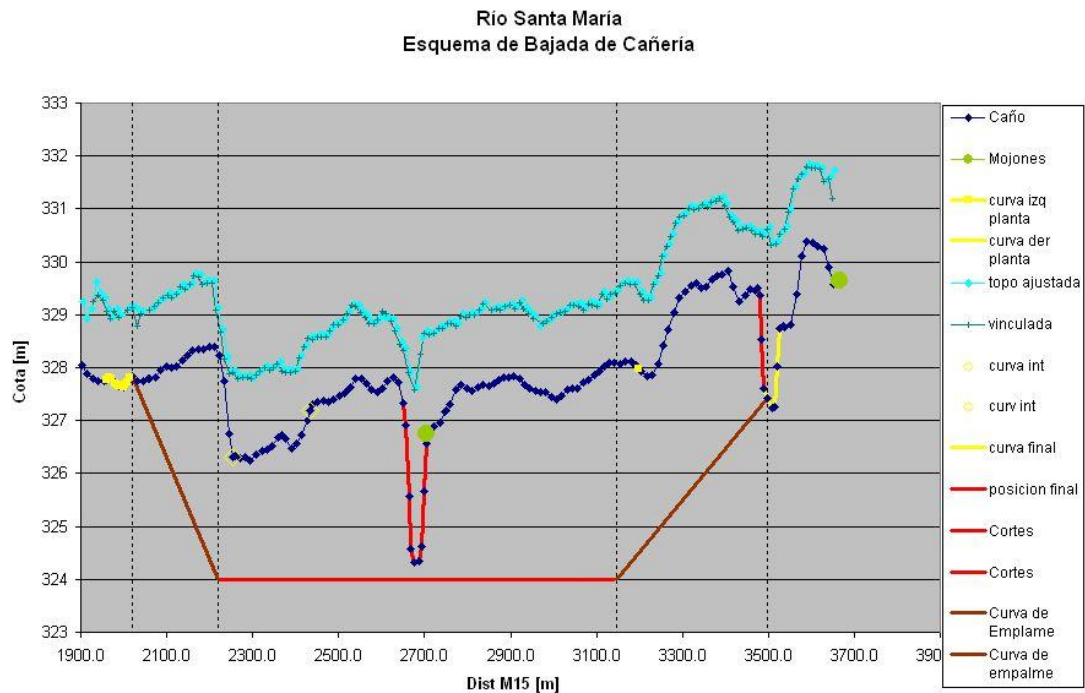


Figura 23. Esquema de bajada de cañería debido a un meandro tangente a la traza

Conclusiones

En función de la experiencia recogida en estos dos cruces y en otros cruces del sistema de TGN con la misma problemática, se listan las siguientes recomendaciones a tener en cuenta en la adecuación y en el diseño de cruces de ríos con meandros:

- Para el estudio de un cruce ubicado en la zona de piedemonte, es importante estimar el lugar en donde se produce el quiebre de pendiente entre el relieve montañoso y el llano. Si bien esto se da en forma gradual, influye en la alineación en planta de los cauces, pasando de cauces trenzados y rectos, a cauces sinuosos con meandros. Es decir, la pendiente definirá el comportamiento del río. La cuenca del río influirá en forma proporcional al caudal a escurrir por el cruce.
- Los problemas en cruces de ríos afectados por meandros son principalmente tres:
 - La erosión de una margen que destape el cuello de cisne del cruce,
 - La migración lateral del río que destape tramos del gasoducto no contemplados en el diseño original del cruce especial,
 - La corta de un meandro (natural o artificial) que destape tramos del gasoducto no contemplados en el diseño original del cruce especial.
- Entre las medidas de adecuación más usadas se encuentran:
 - Encauzamientos temporarios,
 - Bajadas de cañería por flexión (con o sin corte) y contrapesado.
- Para el caso de los encauzamientos y obras de restitución de márgenes, se deben contemplar en el diseño los conceptos básicos de estabilidad de cauces tales como el caudal formativo, las relaciones entre el ancho, el radio de curvatura y la longitud de los meandros tanto del río como de los encauzamientos.
- Para el caso de bajadas de cañerías, se debe contemplar la profundidad de socavación potencial y la amplitud máxima de los meandros, de manera de permitir al río migrar tanto lateralmente como en el sentido de la corriente, sin que destape ni el cruce ni los cuellos de cisne.
- Para evitar que los cuellos de cisne se destapen o que una corta (natural o artificial) destape un tramo no contemplado en el cruce, es necesario contemplar en el diseño de un cruce nuevo los siguientes aspectos:
 - la amplitud máxima de los meandros observados, principalmente hacia aguas arriba del cruce, para darle al cruce nuevo un ancho igual o mayor,
 - la distancia de los meandros a la sección transversal del cruce y su amplitud,
 - elegir una traza perpendicular a la dirección del valle de inundación,
 - colocar el ducto a una profundidad mayor a la socavación potencial más una revancha,
 - ubicar los cuellos de cisne bien alejados de las barrancas y cerca de los extremos del valle de inundación, para que al migrar los meandros lateralmente no destapen los cuellos de cisne,
 - considerar los espesores de los caños y el contrapesado de todo el tramo que abarque el ancho del valle de inundación para que en caso que la corriente destape un tramo fuera del cauce principal, no arrastre a la cañería,
 - Esta longitud extendida del cruce también sirve para que el mismo esté dentro de norma, independientemente del lugar que ocupe el río, en el tiempo.

Bibliografía

1. Estabilidad de cauces arenosos, Masa Alvarez, Jose Antonio y Cruickshank, Carlos, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
2. Hydraulique Fluvial: La forme du lit des rivières a fond mobile, Fargue Louis, Encyclopedie des Travaux Publics, 1908.
3. Principles of river hydraulics, Ghetti, Augusto, Centro Internazionali di idrologia Dino Tonini, Univesità degli Studi di Padova. Italia.
4. Apuntes de la Cátedra de Hidráulica Fluvial de los ingenieros Picandet, Brea y Bianchi, de la Facultad de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
5. Ingeniería de Ríos, Vide, Martín, Universidad Politécnica de Catalunya.
6. Aplicación de un método de análisis de riesgo a 10 cruces de ríos, Carnicero, Martín, Congreso de Integridad IAPG 2014.
7. Integridad de ductos en cruces de ríos, Carnicero, Martín, Congreso de Integridad IAPG 2010.

CV

El ingeniero Martín Carnicero es Ingeniero Hidráulico egresado de la Facultad de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Nacional de la Plata. Posee estudios de posgrado en hidrología en la Universidad de Pádova Italia y en Colorado State University de EEUU. Trabajó en la construcción de represas, sistemas de riego y minería antes de entrar en TGN. Allí se desempeña como Ingeniero Senior para Amenazas Naturales, dentro del Departamento de Integridad desde hace 16 años.