Volver

Evaluación de la integridad de gasoductos en cruces de ríos

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

1. Sinopsis

A lo largo de sus 7.000 kilómetros de red, Transportadora de Gas del Norte (TGN) enfrenta el problema de garantizar la integridad del gasoducto a través de los numerosos cruces de ríos distribuidos en todo el país. Para ello, la Empresa ha desarrollado un programa orientado a la detección y solución de aquellos cruces de ríos que presentan un riesgo a la operación del sistema.

El objetivo de este trabajo es describir la manera en que se genera y procesa la información con el propósito de decidir la necesidad de realizar una obra de protección.

Complementariamente, se compartirá la experiencia adquirida en la ejecución de más de 100 obras de remediación a lo largo de 10 años. De esta manera se podrá evaluar la eficiencia de las mismas en relación a su función principal de protección del gasoducto, y revisando también los criterios de diseño para respetar los principios básicos de la hidráulica fluvial.

2. Introducción

A los efectos de garantizar la integridad de los gasoductos en todo su sistema, TGN ha implementado un Programa de Cruces de Ríos (PCR). Este programa ofrece las siguientes ventajas:

- Desarrollo de conocimiento en ríos ubicados en ambientes similares
- Confección de diseños específicos
- Evitar gastar dinero en obras no apropiadas
- Tener la posibilidad de aprender de los errores y revisar los criterios y parámetros de diseño

La asignación de recursos humanos y financieros enfocados en las tareas específicas garantiza un seguimiento de este tema que en el sistema de TGN es una de las principales causas de interrupción de transporte de gas cuando ocurren eventos extremos.

3. Programa de cruces de ríos

El programa consta de las siguientes partes componentes:

3.1 Sistema de monitoreo: se define un formulario electrónico que se corresponde con un instructivo de monitoreo, para poder registrar en el tiempo la evolución de todos los factores naturales y antrópicos que intervienen en un cruce. Se confeccionan listado de ríos más importantes y se definen las frecuencias de monitoreo teniendo cuenta el régimen de lluvias y la ocurrencia de eventos extremos.

3.2 Estudios de integridad: una vez identificado un cruce al cual se deberá adecuar, se realizan una serie de relevamientos de campo y estudios de gabinete tendientes a evaluar cómo los procesos erosivos podrían afectar la integridad de un cruce.

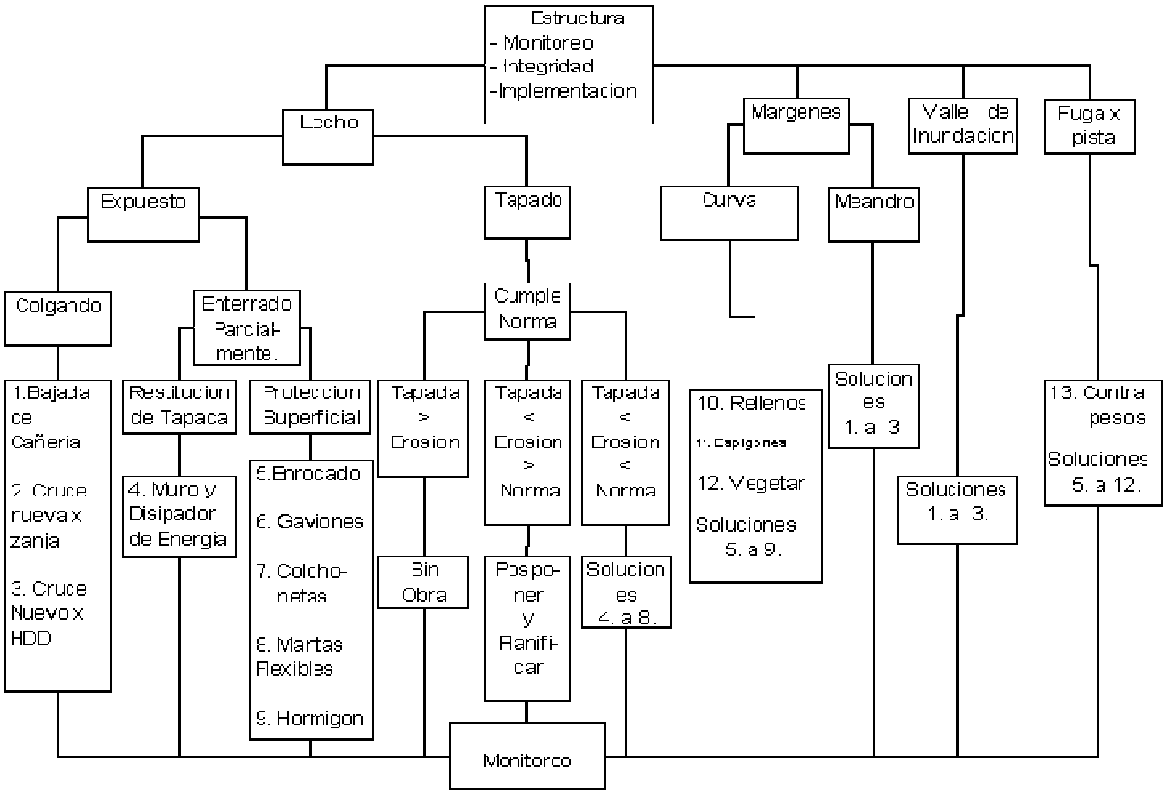
3.3 Implementación de obras de remediación: la información recopilada y elaborada por los estudios de integridad es la base del diseño de las obras de remediación. Las mismas se plasman de dos documentos: la memoria técnica que sirve además para obtener los permisos ante las autoridades de aplicación, y la memoria descriptiva de las obras que es el documento usado para licitar los trabajos que incluye la información de base, planos de detalle, procedimientos constructivos, especificaciones técnicas de los materiales.

3.4 Desarrollo de una base de datos: es importante que toda la información referente a los cruces a lo largo del tiempo se guarde en una base de datos que garantice su acceso de manera confiable. La historia de un cruce y el funcionamiento de las obras son factores preponderantes en la toma de decisiones en relación a la alternativa de obra de remediación a efectuar.

3.5 Previsión de recursos financieros mediante un presupuesto anual: la problemática de los cruces de ríos está íntimamente asociada con la ocurrencia de fenómenos naturales de muy difícil predicción en cuanto a su magnitud y ocurrencia en el tiempo. Esto implica que en forma permanente nuevas necesidades de adecuación de cruces surgen a medida que avanza la temporada de lluvias. Esto impacta en forma directa que cualquier previsión financiera ya que nuevos trabajos no previstos deben ser abarcados por obras que necesitan ser financiadas, u obras previstas dejan de ser prioritarias, siendo desplazadas por los nuevos acontecimientos. Así, se puede enfocar esta cuestión definiendo dos componentes: una programada relacionada con trabajos preventivos o de carácter proactivo; y otra no programada que atienda las urgencias que surjan puntualmente. La consecuencia lógica de este enfoque es que a lo largo del tiempo se parte de un presupuesto básico anual el cual en los años hidrológicamente secos permite trabajar en forma proactiva y constante, que es alterado en los años hidrológicamente húmedos con picos de gastos no previstos.

4. Caracterización de problemas en cruces de ríos

En trabajos presentados ante este y otros foros en años anteriores, se desarrolló un esquema básico de los problemas típicos que se presentan en cruce de ríos que se reproduce a continuación.



Del mismo se desprenden los siguientes casos, aclarando que pueden darse en forma concurrente y combinada. Se agregan para cada caso una breve descripción de los esfuerzos que actúan sobre la cañería.

4.1 Erosiones en lecho: en este caso la situación más crítica se produce cuando el caño se encuentra expuesto y sin apoyo (free span) ya que a los esfuerzos inducidos por la corriente (flexión por arrastre, vibración por vórtices y fatiga) se le suman el precio propio y, eventualmente, los contrapesos. Otras situaciones de menor implicancia son caños expuestos, pero apoyados, y por último caños con baja tapada. Es importante aclarar que desde el punto de vista tensional de la cañería, los caños con baja tapada no sufren esfuerzo inducido, por lo que el problema pasa a ser el de mejor o peor cumplimiento de la normativa de aplicación si que exista un riesgo real a la integridad del caño.

4.2 Erosiones de margen: en este caso se puede hacer una división entre erosiones en márgenes curvas que se corren en el tiempo manteniendo la geometría del curso y la correspondiente a la formación de meandros, en cuyo caso la posición de las márgenes cambia en el tiempo. Ante la verificación del corrimiento de márgenes, la corriente de agua puede inducir esfuerzos en el cuello de cisne ó, si este no existe, en el tramo en el cual la cañería levanta su posición a medida que se aleja de la margen. Por ello, es muy usual que la cañería quede sin apoyo y expuesta a tensiones de flexión y torsión ya sea de la corriente de agua misma o del material de troncos, ramas y detritos que se acumulan en la cara aguas arriba del caño.

4.3 Erosiones en el valle de inundación: en algunas ocasiones los ríos presentan un cauce principal de mediana envergadura y otros que se activan en las inundaciones de un ancho mucho mayor. Ese curso más ancho se denomina valle de inundación y normalmente se caracterizan por la presencia de vegetación, cauces y brazos inactivos o atrofiados. En ocasiones el diseño del cruce especial no contempla profundidades de la misma magnitud que el cauce principal, y por ello puede exponerse. En otras oportunidades, existen cambios en la dirección de la traza dentro del valle que implican que el agua no escurra perpendicular sino paralela a la traza, produciendo eventuales destapes en longitudes significativas.

4.4 Fuga del río por la pista de mantenimiento: en oportunidades en donde el cauce principal del río se obstruye (colmatación, construcción de dique, estrechamientos, etc.) el agua puede torcer su curso y tomar a la pista de mantenimiento como vía preferencial de escurrimiento. Si se producen erosiones en tramos en donde el caño fue construido a profundidades cercanas a un metro, es probable que ante situaciones de crecidas e inundación se produzcan destapes en longitudes significativas quedando el caño destapado y flotando.

4.5 Flujo de detritos: en zonas montañosas los ríos poseen una fuerte pendiente del orden del 10% o mayor. Los tipos de escurrimientos en estos ríos van de aguas claras, aguas con sedimentos, crecidas de barro, flujos de detritos e hiperconcentrados, listados en orden de una concentración creciente de sedimentos. La propiedad distintiva es la densidad que al ser mayor que la del agua clara, permite transportar todo tipo de materiales tales como rocas, árboles y ramas. Las tensiones inducidas son de muy difícil cuantificación pero a las ya mencionadas en párrafos anteriores se suman los impactos de grandes rocas y la presión ejercida por la acumulación de troncos y ramas sobre la cara aguas arriba de la cañería.

5. Estructura de un estudio de integridad de cruces de ríos

Cuando los relevamientos de campo indican que en un río existe una amenaza a la integridad del gasoducto, se decide encarar un estudio de integridad para evaluar el riesgo y estimar la necesidad o no de realizar una obra de remediación, su alcance y su proyección en el tiempo. A continuación se enumeran las distintas tareas llevadas a cabo en estos estudios.

5.1 Definición de escalas

A los efectos se entender un problema en un determinado cruce, su enfoque debe contemplar el análisis de la información en diferentes escalas:

- **Escala regional**: incluye todos los datos referentes a la cuenca hidrográfica de aportes, tales como sus características geomorfológicas, el uso del suelo, y el régimen de lluvias y caudales del río.

- **Escala local**: se refiere a las dimensiones de la sección del río por donde cruza el caño, la geometría de su lecho, la pendiente, los suelos que forman las márgenes y lecho.

- **Escala constructiva**: las características constructivas del cruce del gasoducto propiamente dicho, tales como su tapada original, si está contrapesado, el espesor de la cañería, la ubicación del cuello de cisne o el tramo de bajada y subida de la cañería en las acometidas al cauce.

- **Escala temporal**: como en toda obra de infraestructura, la determinación de la recurrencia o período medio de tiempo entre dos eventos fija el alcance de los estudios y del correspondiente diseño. TGN utiliza para sus proyectos de remediación una recurrencia de 50 años, aplicado a caudales o tormentas de lluvia en cuencas no aforadas. Sin embargo, cabe aclarar que normalmente la capacidad de los cauces es sobrepasada para recurrencias menores, de alrededor de 2 a 5 años.

5.2 Parte componentes del estudio

5.2.1 Estudios hidrológicos

El objetivo principal de estos estudios es calcular el caudal de diseño para la recurrencia asumida. Para ello, se efectúa un inventario de datos en la región, específicamente imágenes satelitales, cartas topográficas y caudales, o en su defecto lluvias, que es el caso más normal dado que pocos ríos se encuentran aforados.

De las imágenes satelitales y cartas topográficas se obtienen las características de la cuenca, tales como superficie, pendiente, número de tributarios y tiempo de concentración.

Si se tienen caudales disponibles se efectúa un análisis estadístico de eventos extremos (máximos anuales) en donde se asigna a cada valor un período de retorno, para poder elegir aquel correspondiente a 50 años. De lo contrario, se infiere el caudal a partir de la lluvia, mediante la definición de una tormenta de diseño y un modelo de lluvia-escurrimiento superficial, cuyo resultado es el hidrograma de crecida (Caudal vs. Tiempo). Se trata de usar modelos matemáticos de dominio público que permitan actualizar sus datos en el tiempo incluyendo cambios en el uso de suelo, inclusión de tormentas registradas, u otro dato que afecte el caudal de diseño.

5.2.2 Estudios topográficos

Se realizan en la sección del cruce en una longitud aproximada de 400 metros con centro en el eje del gasoducto. De él se extraen el ancho, la pendiente del lecho, la altura de las márgenes, y las características del valle de inundación y de la geometría del río. Es muy importante geo-referenciar la topografía a un único sistema de referencia para poder comparar distintos relevamientos en el tiempo. Dentro de su alcance debe incluirse las secciones de control dadas por puentes, alcantarillas y demás condicionantes del escurrimiento del agua.

5.2.3 Estudios hidráulicos

Una vez obtenido el caudal de diseño se procede a estimar la capacidad de transporte de agua que tiene el río en la sección del cruce. Para ello se usan modelos numéricos de flujo en canales abiertos de donde se obtiene la elevación a la que alcanza el agua y su distribución de velocidades, a lo ancho del río. Al igual que en la modelación hidrológica, se trata de usar modelos matemáticos de dominio público que permitan actualizar sus datos en el tiempo incluyendo cambios en la topografía del río u obras de infraestructura construidas.

5.2.4 Estudios geotécnicos

Dadas las características geológicas de cada río, se tiene distintas disposiciones de suelos en las márgenes y lecho, de donde se toman muestras y se realizan ensayos. Los ensayos de laboratorio son: granulometría, densidad natural y óptima, límites de Atterberg y eventualmente triaxiales para el caso se la estabilidad de márgenes altas. In situ se realiza principalmente el de penetración normal. Estos datos también sirven para los cálculos de control de erosión y, en la construcción de las obras, para que los contratistas evalúen el rendimiento de la maquinaria de movimientos de suelos a emplear en la remediación.

5.2.5 Medición de tapada

Uno de los parámetros más importantes en la evaluación del riesgo asociado a los cruces de ríos es la tapada de suelo existente. Se realiza por medio de un instrumento especial, y el resultado a obtener es el perfil continuo con puntos del caño con coordenadas x,y,z del terreno , y la tapada a lo largo de todo el cruce. Normalmente se lo realiza en conjunto con la topografía para referenciar los puntos de medición de tapada y conocer la traza con exactitud. Este dato es de relevancia durante las obras para evitar impactos en las excavaciones.

5.2.6 Estudios de socavación

Estos estudios de dividen en dos partes. La socavación en profundidad se evalúa por medio de fórmulas empíricas o semi-empíricas en donde en función de la velocidad y el suelo del lecho, se estima la profundidad de erosión la cual se compara con la mínima tapada existente.

Sin embargo, otra manera de analizar la erosión en márgenes y lecho en forma cuantitativa es por comparación de imágenes satelitales y fotografías aéreas georeferenciadas tomadas en distintas fechas, relevamiento topográficos sucesivos y de los monitoreos anuales de campo.

6. Análisis de riesgo

El análisis de riesgo se ha constituido en una disciplina de gran importancia en la planificación de las actividades de operación y mantenimiento de ductos, existiendo una gran variedad de software que realizan su evaluación de manera semi-cuantitativa, tomado como base tanto la afectación que resulta de un escenario de rotura como la probabilidad de ocurrencia.

En la práctica TGN se realiza una evaluación amplia que abarca toda la información recabada en el estudio de integridad y se la combina con la historia de adecuaciones de un cruce, más la experiencia acumulada por personal especializado. Normalmente los ríos más problemáticos han sido sujeto de obras menores de adecuación, luego obras mayores y cruces nuevos, siendo esta cronología de hechos un factor de peso al decidir los trabajos a realizar.

Es importante aclarar que los cálculos de erosión basados en fórmulas deben ser tomados solo como valores referenciales, ya que las hipótesis para las que fueron desarrolladas no siempre se cumplen en la realidad o son desconocidas. Por ello no es conveniente realizar un análisis de riesgo basado únicamente en comparaciones de la tapada real contra la calculada luego de la erosión. En mucha ocasiones, la erosión se detiene solo cuando se encuentra un estrato más resistente de suelo y no como consecuencias de una aumento de las sección de escurrimiento. Existen trabajos que toman este criterio de manera aislada, resultando en un enfoque conservador cuyo cumplimiento en sistemas de miles de kilómetros implicaría grandes erogaciones incompatibles con valores realistas. Es recomendable que independientemente del criterio a seguir, realizar un análisis de tensiones para evaluar el nivel de riesgo efectivo que se tienen sobre la cañería.

7. Casos prácticos de obras de remediación: teoría y experiencia de funcionamiento

A continuación se tratará de exponer los casos más representativos que surgen de la aplicación de Programa de Cruces de Ríos por 10 años y más de 100 obras de adecuación. La intención es dar un sustento teórico a cada una de las soluciones y compartir la experiencia acumulada que incluye detalles constructivos y eficiencia en el funcionamiento de cada alternativa.

7.1 Bajada de cañería por flexión de su peso propio

Como consecuencia de la erosión de lecho durante las crecidas, los gasoductos aparecen expuestos parcialmente o sin apoyo (free span). Si se elije la alternativa de bajada de cañería como solución, surge la pregunta de a qué profundidad debería bajarse.

Normalmente los cálculos se hacen usando la fórmula desarrollada por Litchvan-Lebediev la cual se adjunta a continuación:

(1)
$$h_s = \left[\frac{\alpha * h_0^{\frac{5}{3}}}{0.68 * \beta * \mu * \phi * d_m^{0.28}} \right]^{\frac{1}{1+x}}$$

Siendo:

hs: profundidad después de la socavación
ho: profundidad inicial en régimen uniforme
dm: diámetro promedio de las partículas del material del lecho
Alpha: factor de corrección para la distribución del flujo en la sección transversal
Betha: coeficiente de período de retorno
Mu: coeficiente de contracción de flujo
Phi: coeficiente de densidad que considera la carga de sedimentos
X: depende del tamaño de la partícula del material del lecho

Sin embargo esta fórmula se basa en la hipótesis de que una vez que la sección transversal de escurrimiento se agranda por la erosión, a velocidad del agua disminuye y la socavación se detiene. Sin embargo si lo suelos son finos y no cohesivos, la profundidad calculada no es representativa y la erosión progresa sin cesar hasta encontrar un estrato de suelo más duro. Se puede dar el caso de que una vez bajada la cañería se destape otra vez. Entonces la bajada de cañería debe ser combinada con una protección superficial aumentando los costos de las obras de adecuación.

En otros casos, la pérdida de tapada no está asociada a la erosión sino a la sobre excavación de canales existentes para darle mayor capacidad. Esto sucede con los canales de drenaje de agua en la pampa húmeda donde se cultiva soja en terrenos inundables donde las pendientes son bajas.

Las recomendaciones para esta alternativa son: es una solución válida si existe suelo cohesivo o un estrato geológico que pueda parar la erosión a una profundidad dada no por cálculos sino por su ubicación natural. Sino, debe ponerse una protección de lecho para controlar la erosión. Esta protección también sirve como protección mecánica contra eventuales impactos de equipos de excavación como retroexcavadoras. Como el proceso de bajada de cañería se basa en la flexión natural, la excavación de la zanja se realiza por grandes longitudes mayores a los 100 metros, aumentando el costo de esta solución, especialmente donde hay más de un caño ubicados en uno al lado del otro debido, a que las dimensiones de las zanjas son muy anchas para garantizar su estabilidad. El transporte de gas nunca es interrumpido, pudiéndose programar con tiempo para que el acondicionamiento de presiones tenga un impacto mínimo.

Figuras 1 a 4. Cañería descendida, Cañerías expuestas, Protección superficial después del descenso

7.2 Perforación dirigida

La perforación dirigida ofrece la alternativa de ubicar el gasoducto a grandes profundidades, normalmente mayores a 10 metros del lecho. En el sistema operado por TGN los cruces dirigidos son efectuados en ríos en donde los caudales permanentes impiden la excavación de una trinchera, en donde las altas velocidades alcanzadas por el agua inhabilitan el uso de los materiales de control de erosión como colchonetas, gaviones o mantas con dados de hormigón, y en cruces afectados por flujos de detritos en ríos de montaña o al pie de las mismas. Al igual que en el caso anterior, la profundidad del cruce debe ser cuidadosamente estudiada por medio de ensayos de suelos y estimación de la profundidad de socavación. En algunos casos la disponibilidad de una máquina perforadora puede llegar a ser un factor importante en la decisión de realizar o no este tipo de cruce, especialmente por el costo de traer una máquina del exterior. El ancho del río también puede ser un factor limitante ya que a mayor ancho mayor deberá ser la potencia de la máquina perforadora. También en ríos con presencia de grande piedras o bochones, puede no ser una alternativa viable.

Las recomendaciones para esta solución son: si la erosión en suelos finos no cohesivos es el problema que afecta al cruce, entonces debe existir un estrato de suelo más consolidado o resistente para que esta solución sea factible. En una situación de emergencia, ofrece una alternativa rápida para la construcción de un cruce nuevo, si hay una máquina disponible. Es importante considerar el tiempo de compra de la tubería ya que la misma debe ser de un espesor considerable para resistir los esfuerzos de flexión durante las maniobras de perforación y tendido. El transporte de gas es afectado solo en las maniobras de conexión del nuevo cruce con el gasoducto.

Figuras 5 y 6: Máquina perforadora y pileta de lodos bentoníticos

7.3 Cruces aéreos

Cuando los gasoductos quedan expuestos, una solución que se ha implementado durante años en ríos de pequeño ancho es la construcción de muros transversales con un cuenco disipador de energía a resalto hidráulico. Su funcionamiento ha sido bueno en años secos o normales siguiendo las reglas de la hidráulica clásica. Desgraciadamente en tormentas intensas, deslizamientos de laderas en las sierras escurren por el río afectando negativamente en obras de infraestructura como puentes y cañerías. Toman la forma de flujos densos que acarrean grandes piedras y troncos. Eventualmente, la presión ejercida sobre la cañería puede llevar a la rotura de la misma.

Figura 7: flujo de detritos en ríos de montaña

Figura 8: troncos y ramas sobre gasoducto

Siguiendo un enfoque cuantitativo las variables más importantes a determinar son la carga de sedimentos y la tensión de corte ejercida por el flujo. La carga de sedimento aumenta desde aguas claras (menor a 20% en volumen), crecidas de barro con un rango de que va de 20% a 40% en volumen, hasta flujos hiperconcentrados con un valor cercano a los 50%. Las mayores concentraciones tienen la capacidad de movilizar grandes bloques de piedras. Los flujos hiperconcentrados se comportan como fluidos no-newtonianos en donde la tensión de corte tiene cuatro componentes debido a: cohesión, viscosidad de la mezcla, turbulencia y colisión entre particular grandes. Construir una obra hidráulica capaz de que sea los suficientemente fuerte como para soportar estos esfuerzos lleva a valores de inversión que son mucho mayores que los correspondientes a cruces aéreos. Independientemente del tipo de flujo que pase por el río, es mejor que el cruce no se oponga a dichas fuerzas de la naturaleza, incrementando las probabilidades de que dura más tiempo en operación.

Figura 9: cruce aéreo de 200 m de luz

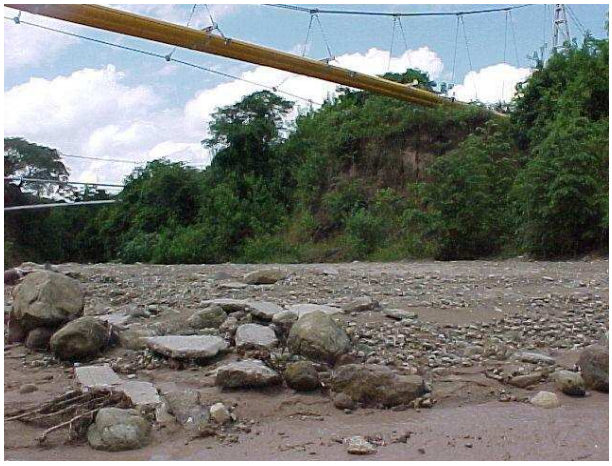


Figure 10: cruce aéreo de 110 m de luz

Las recomendaciones para esta solución son: cuando el costo de un cuenco disipador o un cruce dirigido son muy altos, el cruce aéreo se presenta como más económico. También, elimina la incertidumbre asociada a los posibles esfuerzos que tendría que soportar una obra de adecuación frente a los flujos densos. Especial cuidado debe tenerse en la ubicación de las torres, lejos de la amplitud de los meandros y también en cuanto a su altura porque más allá de la profundidad del flujo denso que aumenta con la mayor densidad de la corriente. Una desventaja es que este tipo de cruce está muy expuesto a acciones de robo y vandalismo en lugares aislados. El tiempo de compra de la tubería de espesor especial deberá ser tenido en cuenta.

7.4 Diques transversales con cuencos disipadores

Una vez que se expone una tubería, una solución muy popular es elevar el lecho del río para forzar a los sedimentos a que decanten hasta que la tubería quede cubierta, creando un salto hidráulico aguas abajo. Los problemas típicos de esta solución se encuentras en el ingreso, asegurándose de que agua no pase por el costado de la estructura y al final aguas abajo, donde la erosión en la transición entre el final de la obra con el lecho del río no puede ser controlada.

De acuerdo con manuales de hidráulica de canales abiertos, el cálculo de la longitud del cuenco disipador de energía sigue un procedimiento básico que se basa en experiencias de laboratorio. Sin embargo, nuestra experiencia nos dice que en los ríos con suelos no cohesivos, la velocidad de agua al final de la pileta es todavía lo suficientemente alta para erosionar aguas abajo de ella.

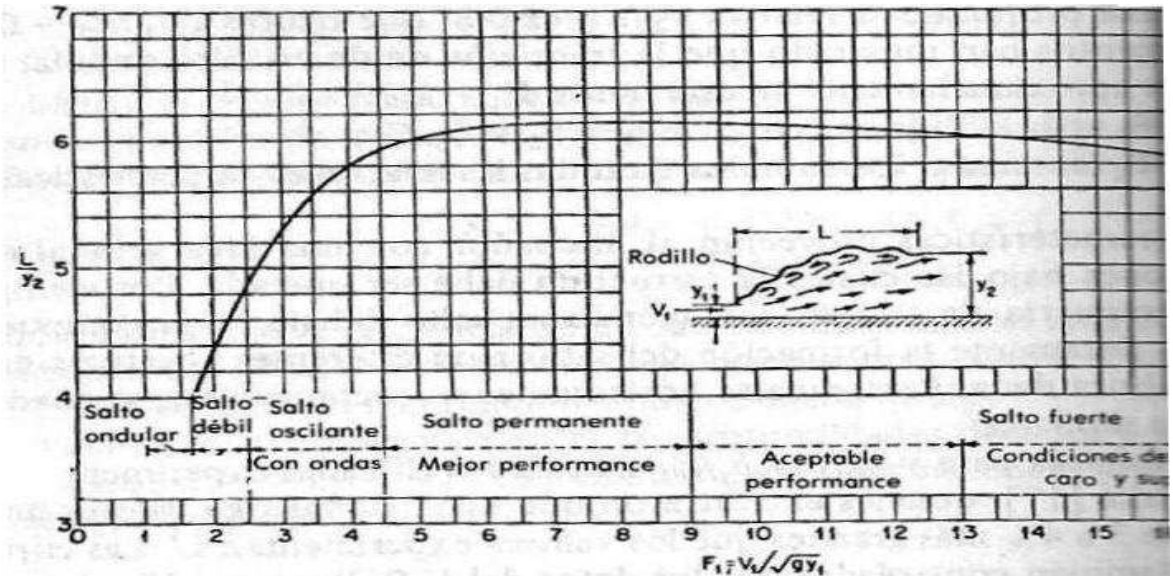


Figura 11: cálculo de la longitud del resalto hidráulico

(2) $$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8F_1^2} - 1\right)$$

(3) $$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$$

Siendo:

y2, y1: profundidades aguas arriba y abajo del resalto
F: número de fraude de entrada
V1: velocidad de entrada

Por lo tanto, durante años normales o secos, este esquema funciona bastante bien, aunque un segundo salto comienza a formarse al final del cuenco disipador. Nuestros esfuerzos para controlar la erosión al final de la pileta disipadora de energía incluyeron revestimiento rip-rap y un diseño típico con bloques de hormigón, para forzar la turbulencia a que se disipe dentro del cuenco. Por desgracia, la erosión aguas abajo creció con el tiempo, y la necesidad de un segundo cuenco de disipación resultó necesaria. Luego de producirse una crecida o un flujo de detritos, el salto o diferencia de nivel entre el lecho y los caños creció a 10 metros. Por ello, la magnitud de las obras de adecuación dentro de este esquema de saltos y cuencos, y su costo se tornaron excesivos sin que además garanticen su estabilidad en el tiempo. Por ello, una solución conceptual diferente era necesaria como cruce dirigido o aéreo, ya que ahora compiten en precio y ofrecen una solución más segura.

Recomendaciones para esta solución son: son apropiados para pequeños caudales con agua clara y donde el material del lecho es grueso. Debe tenerse cuidado para extender el cuenco de disipación para una longitud que es significativamente mayor que la proporcionada por los ensayos de laboratorio y manuales de diseño. Se debe tener especial cuidado para evitar que el agua pase por los costados de la estructura en la entrada y por debajo ya que el flujo subterráneo también existe. Estas estructuras no están diseñadas recibir entradas de agua laterales, que también pueden ser causa de falla si se dejan sin controlar. A medida que el tamaño de la estructura crece, un análisis de costo preciso debe ser hecho para comparar este esquema frente a otras soluciones como cruces aéreos o cruces de dirigidos, si los tubos están expuestos sin apoyo. En ocasiones es más conveniente una serie de saltos pequeños que uno grande.

Figuras 12 a 15: ejemplos de cuencos disipadores

7.5 Protecciones de lecho

En nuestro sistema, se instalaron cinco tipos diferentes de protección. Tienen como su propiedad principal el hecho de ser flexible y en algunos casos, incorporan peso, garantizando su estabilidad. Son enumeradas en un orden de menor a mayor grado de sofisticación de los revestimientos: protección de rip-rap, colchonetas de piedra encanastada, bloques de hormigón fijados a un geotextil, protección mecánica de hormigón armado y mantas de refuerzo de vegetación (Turf Reinforcement Mattress: TRM).

En teoría, los parámetros básicos que se utiliza para seleccionar la mejor alternativa están dados por la velocidad y la tensión de corte. La velocidad en régimen uniforme y permanente está definida por la fórmula empírica de Manning:

$$V[m/\sec] = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S} \qquad (4)$$

Donde

n: coeficiente de rugosidad
R: radio hidráulico (perímetro mojado/sección transversal)
S: pendiente de la línea energía, aunque normalmente se usa la del río

Luego simplemente por comparación se procede a cotejar la velocidad calculada en el río contra la que puede resistir un determinado tipo de revestimiento, dada por ensayos suministrados por los proveedores.

La distribución del esfuerzo cortante en un canal trapezoidal rectilíneo muestra que valores máximos se encuentran en la parte inferior de las márgenes y casi uniformemente distribuidos en el lecho del río. Las variables que interviene en la magnitud del esfuerzo cortante de valores son: profundidad (y), peso específico del agua (w) y pendiente del canal (S).

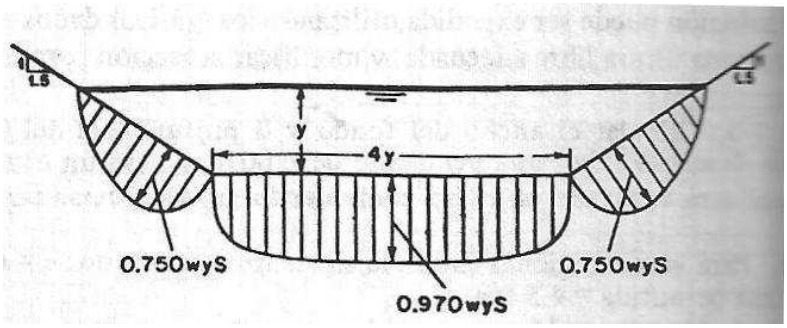


Figura 16: distribución de esfuerzos de corte en la sección transversal de un canal rectilíneo

Siendo:

y: profundidad
w: peso específico del agua
S: pendiente del río

Al igual que en el caso anterior, por comparación se procede a cotejar el valor del esfuerzo cortante calculado en el río contra el que puede resistir un determinado tipo de revestimiento, dada por ensayos suministrados por los proveedores.

Sin embargo, cada material sigue un procedimiento de cálculo diferente. El cálculo del rip-rap se basa en el tamaño de la roca que es lo suficientemente grande para permanecer estable por su propio peso contra el arrastre y empuje del agua. Debe tenerse cuidado al examinar la carga de sedimentos, ya que aumentar la densidad del agua y disminuye la estabilidad de la protección. El diámetro medio del enrocado viene dado por la ecuación:

(5)
$$D_{50} = 0.001 \frac{V_a^{\,3}}{\left(d_{avg}^{\;0.5} K_1^{\;1.5}\right)}$$

Siendo:

D50: mediana del tamaño de partícula del rip-rap
Va: velocidad promedio en el canal principal
d avg: profundidad promedio en el canal principal
K1:

- factor que depende del ángulo que forma la margen con la horizontal
- Ángulo de reposo del material de rip-rap
- Factores de corrección: régimen del escurrimiento, olas, turbulencia, detritos y peso específico

Aparte de este parámetro es importante que el enrocado tenga piedras más grandes y más pequeñas para que llene los espacios intermedios y provea trabazón entre piedras. La disponibilidad, el tamaño y el transporte de la piedra también deben considerarse, ya que afectan el costo de esta solución, que en principio parece ser barato.

TGN aplica esta solución en los ríos que tienen una amplia sección transversal, donde la velocidad no se concentra, y cuando los sedimentos finos llenan el espacio de poro del material graduado. Por otro lado, cuando

se usó en ríos estrechos con altas velocidades el rip-rap fue arrastrado hacia aguas abajo después de la primera crecida.

Figuras 17 y 18: ejemplos de revestimientos de rip-rap

Las colchonetas de piedra encanastadas ofrecen una alternativa que ha sido implementada con éxito. Operan bajo una amplia gama de velocidades que alcanzan los 5 m/seg, sin deformación excesiva y hasta 6,4 m/seg como límite, para un espesor de 30 cm.

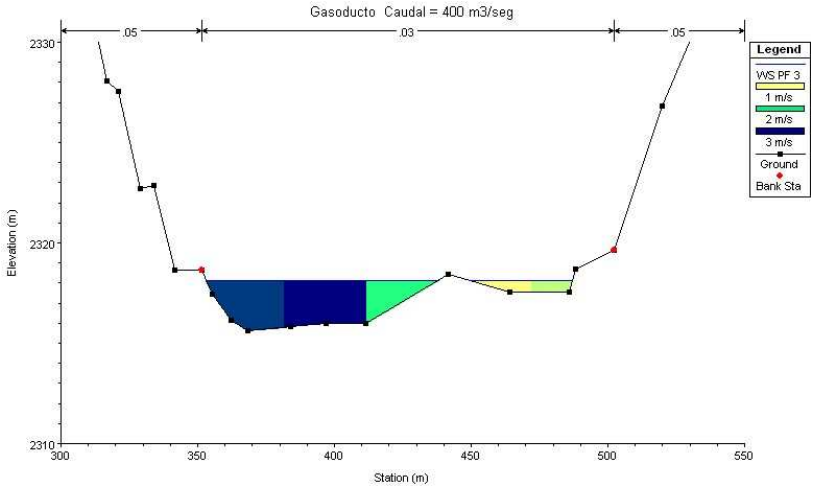


Figura 19. Distribución de velocidades calculada para la sección del cruce

Tab. 2 - Espessuras indicativas dos revestimentos em colchões Reno e gabiões em função da velocidade da correnteza.

Tab. 2 - Indicative Reno Mattress and gabion thicknesses in relation to water velocities

Tab. 2 - Espesores indicativos de los revestimientos en colchones Reno y en gaviones en función de la velocidad de la corriente

Tipo Type Tipo	Espessura Thickness Espesor m	Pedras de enchimento Filling stones Pedrisco de relleno Dimensões Stone size Dimensiones mm	d_{50}	Velocidade crítica Critical velocity Velocidad crítica m/s	Velocidade limite Limit velocity Velocidad límite m/s
Colchões Reno Reno mattress Colchones Reno	0,15 e 0,17	70 a 100	0,085	3,5	4,2
		70 a 150	0,110	4,2	4,5
	0,23 e 0,25	70 a 100	0,085	3,6	5,5
		70 a 150	0,120	4,5	6,1
	0,30	70 a 120	0,100	4,2	5,5
		100 a 150	0,125	5,0	6,4
Gabiões Gabions Gaviones	0,50	100 a 200	0,150	5,8	7,6
		120 a 250	0,190	6,4	8,0

Figura 20. Tabla provista por el fabricante con velocidades admisibles

Los sedimentos finos llenan el espacio entre las piedras, aumentando el peso por unidad de área. Como desventaja, esta solución necesita mano de obra intensiva que últimamente ha aumentado su costo, y que están sujetos a robo en lugares aislados.

Figuras 21 y 22: ejemplos de colchonetas antes y después de su colocación.

Los bloques de hormigón fijados en un geotextil trabajaban satisfactoriamente en condiciones normales. La vinculación se produce por medio de pins o rulos en el cuerpo de la manta. El problema radica en la definición de la altura del bloque. El cálculo se realiza mediante una fórmula que incorpora un número de coeficientes empíricos que son difíciles de evaluar. El cálculo de la altura del bloque se efectúa por medio de la ecuación de Pilarczyk.

(6)
$$\Delta D_n = \left(\frac{0.035}{\psi_{cr}}\right)\Phi_s K_h K_s^{-1} K_t \left(\frac{U^2}{2g}\right)$$

Donde:

DDn: altura del bloque
Ycr: factor que considera el inicio del movimiento de la partícula
Fs: factor de estabilidad
Kh: considera la profundidad del flujo y la rugosidad del material del lecho
Ks: considera la pendiente de la margen y el ángulo de reposo del material

Kt: factor de turbulencia
U: velocidad media a lo largo de la vertical en el canal principal

En la práctica, operan bien durante los años normales. Durante crecidas importantes se ha superado su estabilidad, quedando enrollado el geotextil junto con los bloques de hormigón conectados. TGN todavía utiliza esta alternativa porque la instalación es más rápida y en lugares donde no hay piedras disponibles para usar colchonetas. También se colocan en el caso de que exista tráfico vehicular por el cauce del río, en la sección del cruce. Los bloques de hormigón pueden ser colados in situ, aunque la calidad de las mantas no es la misma en comparación con las construidas en una fábrica en condiciones controladas.

Figura 23: colocación de mantas

Figure 24: mantas con bloques deformadas

Una alternativa exitosa para el caso de una tubería descubierta parcialmente en su parte superior, es la que combina una protección mecánica de hormigón armado alrededor de la tubería con mantas colocadas aguas abajo para controlar la turbulencia generada. La cubierta de hormigón armado sigue un perfil hidráulico que se usa en la cresta de los vertederos. La ventaja de esta solución es que no se crea un salto y la intrusión de la cresta de hormigón es mínima. Si existen sedimentos finos, estos sedimentan aguas arriba de la cresta. Otra propiedad de esta solución, es que el hormigón proporciona una protección robusta contra flujo de detritos, especialmente de piedras grandes. Una vez más, se debe extender la protección aguas debajo de la cresta lejos de la cañería para hacer frente a la transición con material del natural del lecho.

Figura 25: coraza de hormigón

Figura 26: obra en funcionamiento

Por último, una "solución verde" fue implementada con mantas geotextiles de refuerzo de césped (Turf Reinforcement Mattres: TRM). Están hechos de un número de capas y cuadrículas de geosintéticos (o material biodegradable) que pueden resistir velocidades de agua hasta 5,5 m/seg. Este material favorece la revegetación aumentando su vida útil y fundiéndose con el medio ambiente. Los criterios de diseño son, al igual que las colchonetas, las velocidades calculadas y las tensiones de corte.

LANDLOK® TURF REINFORCEMENT MAT PERFORMANCE VALUES ENGLISH & METRIC UNITS

MATERIAL	FUNCTIONAL LONGEVITY	SHORT-TERM MAXIMUM SHEAR STRESS AND VELOCITY						MANNING'S "n"		
		VEGETATED[4, 7]		PARTIALLY[5]		UNVEGETATED[6]		0"-6"	6"-12"	12"-24"
LANDLOK® 450	PERMANENT	10 lb/ft² 479 N/m²	18 ft/sec 5.5 m/sec	8 lb/ft² 383 N/m²	15 ft/sec 4.6 m/sec	5 lb/ft² 239 N/m²	12 ft/sec 3.7 m/sec	0.035	0.025	0.021
LANDLOK 1051	PERMANENT	10 lb/ft² 479 N/m²	18 ft/sec 5.5 m/sec	n/a	n/a	5 lb/ft² 239 N/m²	12 ft/sec 3.7 m/sec	0.036	0.026	0.020
LANDLOK 300	PERMANENT	12 lb/ft² 576 N/m²	20 ft/sec 6.1 m/sec	–	–	–	–	0.030	0.028	0.018

Figura 27: Tabla de velocidades y tensiones de corte admisibles para TRM

TGN utiliza este material en lugares donde la vegetación natural crece fácilmente y cuando la protección mecánica del caño no es prioritaria.

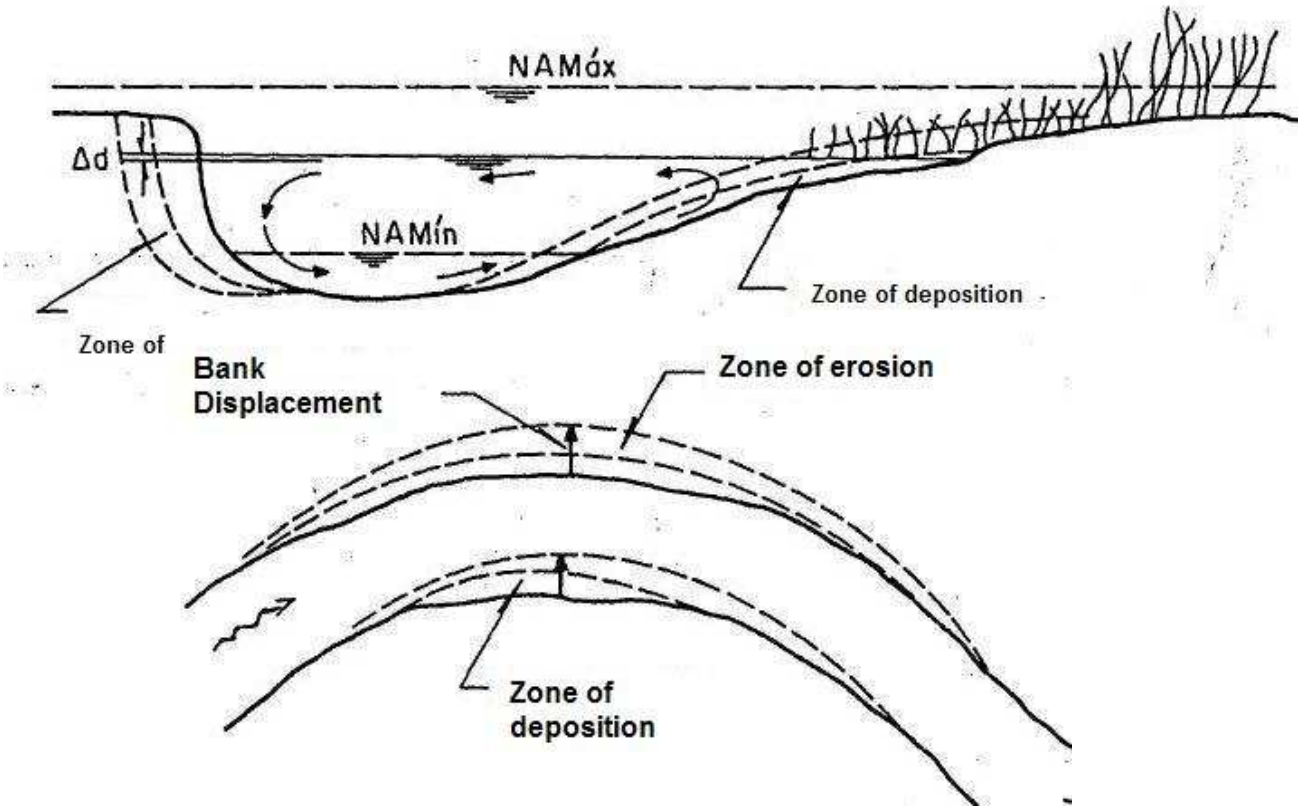
Figura 27: revestimiento de TRM

Figura 28: TRM revegetado

7.6 Protecciones de margen

Las alternativas son similares a las descritas en el capítulo anterior en términos de materiales, a pesar de que las estructuras de control varían dependiendo de cada caso en particular. Una vez más, se identificaron cinco casos: protección de rip-rap, colchonetas de piedra encanastada, muros de gaviones, espigones y geotubos.

En teoría, uno de los principales factores que afectan a la erosión de márgenes es la geometría del río, específicamente su curvatura y el ancho. Esto condiciona que tan grande es el impacto de la velocidad del agua en la orilla. Conocido es el hecho de que debido a las fuerzas centrífugas las velocidades mayores se concentran hacia la orilla cóncava, existiendo un en proceso de erosión en esa margen y sedimentación en la curva convexa opuesta, debido a la existencia de corrientes secundarias.



Figuras 30 y 31: sección transversal y planta de una curva

Dependiendo de la curvatura, un corte transversal típico podría cambiar de forma de "v" a uno más rectangular. En cualquier caso, se debe considerar que el mayor esfuerzo cortante tiene lugar en la intersección entre la margen y el lecho. Por lo tanto, es tan importante para la estabilidad de la margen, proteger su cuerpo como su pie o zona más profunda en el lecho, para evitar el colapso de la misma por desmoronamiento. La selección del material a emplear se basa en qué tan fuerte o robusta debe ser la protección.

Protección de Rip-rap es una solución simple y barata cuando las piedras están fácilmente disponibles en el sitio. Los detalles de diseño incluyen: una curva granulométrica bien graduada para proporcionar peso y tamaños más pequeños para rellenar el volumen de poros dejado por las partículas más grandes. También se debe hincar un pie en el lecho y colocar un geotextil para separar y filtrar el rip-rap de los materiales naturales de lecho y margen.

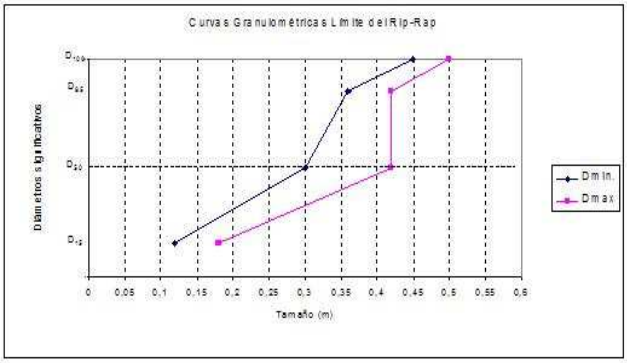


Figura 32: curva granulométrica del rip-rap

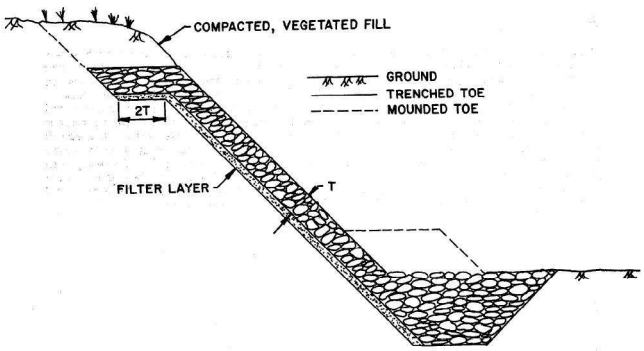


Figura 33: esquema de protección de margen

TGN obtuvo buenos resultados en los ríos que tienen curvaturas leves, geometrías rectilíneas y anchos considerables.

Figura 34: protección de margen

Figura 35: esquema terminado de rip-rap y colchonetas

Las protecciones de colchonetas de piedra encanastada son una solución confiable para ríos que ofrecen anchos considerables y curvas suaves. Normalmente, este tipo de sección transversal no puede dar cabida a las crecidas y las inundaciones indefectiblemente suceden. Por lo tanto, deben extenderse en la parte superior de la sección transversal para convivir con las inundaciones. También, como se mencionó antes, deben extenderse desde el extremo más profundo de la margen a lo largo del lecho del río, para evitar el colapso a sus pies por erosión.

Figura 36: protección de margen con colchonetas

Figura 37: derrumbe por erosión al pie

Una regla es extender horizontalmente un mínimo de 4 veces la altura de la protección de margen. Detalles constructivos a tener en cuenta deben incluir transiciones de rip-rap entre la parte ascendente de la colchoneta y la margen natural para evitar que el agua de pase por atrás de la estructura, y aguas abajo para minimizar la erosión al final de la protección, donde la margen natural se está sujeta a la erosión. Además, se recomienda un ángulo de pendiente suave para dar estabilidad a la colchoneta y disminuir la tensión de corte.

Los muros de gaviones presentan una alternativa más robusta para los ríos con un corte transversal sesgado en forma de v con curvas cóncavas profundas y sedimentación en la orilla opuesta. Por lo general están asociados con curvaturas mayores. Como se mencionó antes, debe colocarse una colchoneta de longitud generosa en el

lecho del río desde el pie del muro para evitar el colapso de la pared de gaviones. Detalles de construcción deben incluir los espigones aguas arriba y aguas abajo para evitar que el agua pase por detrás del muro, así como las transiciones de rip-rap en ambos extremos.

Figura 38: muro de gaviones y espigones de transición

Figura 39: muros de gaviones en ambas márgenes

Los espigones son una solución muy popular, aunque su diseño no es una tarea sencilla. Generalmente, cuando las márgenes curvas se desarrollan durante una distancia (más de un 100 m, como un número tentativo) es muy caro proteger toda la extensión de la margen. Por lo tanto, un número discreto de espigones ofrece una alternativa más barata. La curvatura y el ancho del río son las variables principales utilizadas en la definición de la longitud, el espaciamiento y la orientación de los espigones. Las reglas de diseño se basan en experiencias de campo y de laboratorio. La experiencia de TGN con estas estructuras, incluyen espigones de troncos, y de gaviones sobre colchonetas. Los espigones de troncos han brindado protección solo a corto plazo y, dependiendo de cómo son construidos, ninguna protección si el espaciamiento entre los troncos es grande.

Para superar este problema, espigones de gaviones puestos sobre una colchoneta de piedra encanastada, han proporcionado una solución de más largo plazo, incluso después de deformación severa o parcial. Detalles de diseño deben incluir la definición de la longitud de la estructura tanto hacia adentro (empotramiento) y hacia afuera de la margen, orientación, una elevación descendente hacia el centro del río, contrafuertes o refuerzos para evitar el volcamiento y una colchoneta en la base para distribuir su peso. En ríos con sedimentos finos, este último aspecto es muy importante para evitar el hundimiento de la estructura.

Figura 40: espigones de gaviones

Figura 41: espigones tipo “paras de gallo”

Últimamente, se han implementado protecciones de márgenes con geotubos. Vienen como una alternativa a las protecciones de muros de gaviones y colchones. Consisten en una bolsa de geotextil rellena de suelo. Originalmente desarrollados para utilizar en ríos arenoso, el procedimiento de llenado involucraba el bombeo de una mezcla de agua y sedimento por refulado. Sin embargo, nuestra experiencia fue desarrollada utilizando suelo local. La idea es disminuir los costos asociados con el transporte de piedra y la mano de obra intensiva necesaria para llenar los gaviones y colchonetas. Por lo general, se complementa con una capa de hormigón para proteger los geotubos contra impacto de árboles, ramas y robo por vandalismo. El rendimiento de largo plazo de este tipo de obra queda aún por determinarse, dependiendo de las características de las temporadas de lluvias futuras.

Figura 42: relleno y cierra de geotubos

Figura 43: obra terminada con gunitado

7.7 Fuga del río por la pista de mantenimiento

Cuando los ríos abandonan el ambiente montañoso y llegan a las llanuras, viajan con pendientes muy leves. Cada año, se producen inundaciones en su valle ya que sus secciones transversales se colmatan por el depósito de sus sedimentos finos. Bajo esta condición, la pista del gasoducto ofrece una ruta de escurrimiento preferencial al agua, cuando los ríos se encuentran obstruidos, produciendo una erosión a lo largo de la tubería. Así, la flotabilidad de la tubería se convierte en un problema cuando involucra a largas distancias. Ocasionalmente, el agua va por caminos rurales, aislando a pequeños poblados, pagando un costo social importante ya que la gente asocia este problema con el caño que flota. TGN ha intentado dos enfoques diferentes. En una situación de emergencia, se realizó un cruce dirigido para hacer frente a las napas de agua elevadas que resultan de las inundaciones que imposibilitaba la excavación de la zanja. Como complemento, en un enfoque más proactivo, una serie de contrapesos se instalaron por unos pocos kilómetros en el valle de inundación.

Figura 44: tubería flotando

Figura 45: colocación de contrapesos

8. Conclusiones

TGN ha abordado el tema de los cruces de ríos como un problema relevante dentro de su Departamento de Integridad. Durante los últimos años, se ha implementado un número considerable de obras de remediación, reflejando este compromiso. Un esquema básico para caracterizar los problemas asociados con cruces fue desarrollado para proporcionar un enfoque sistemático. Sin embargo, como es una actividad que depende de los ciclos naturales, la información recolectada sobre el funcionamiento de las obras existentes es crítica. Por lo tanto, el monitoreo periódico de campo alimenta el esquema original y permite realizar ajustes permanentes, con cada estación lluviosas que pasa año tras año.

La experiencia recopilada por TGN en estos años puede sintetizarse de la siguiente manera:

1. Crear la estructura con los medios profesionales y físicos para implementar un Programa de Cruces de Ríos, con todos sus elementos componentes,

2. Se deben proveer los recursos financieros para responder a dos componentes: una planificada que se corresponde con un enfoque proactivo de prevención, y otra aleatoria o que depende de la ocurrencia de eventos de lluvia y crecidas extremos ante los cuales hay que responder de manera imprevista.

3. Implementar un sistema de monitoreo frecuente para evaluar los cambios naturales en la morfología de los ríos en la sección del cruce, las intervenciones antrópicas y el funcionamiento de las obras,

4. Realizar una lectura correcta de lo que la naturaleza está tratando de decir, basado en el tipo de escurrimiento en cada cruce (agua clara, crecidas de barro, flujo de detritos y/o hiperconcentrados),

5. Tratar de oponerse lo menos posible a las fuerzas naturales, diseñando obras de adecuación que tengan un impacto mínimo en el escurrimiento del río,

6. Considerar los principios de la hidráulica que no pueden ser dejados de lado como una manera de extender la vida útil de un cruce

7. Correlacionar el funcionamiento de las obras de adecuación con las características de los años hidrológicos para estimar de manera realista cuanto tiempo puede durar,

8. Alternativas que son igualmente válidas desde el punto de vista técnico pueden cambiar su prioridad por razones económicas, dependiendo del peso relativo de factores tales como mano de obra o materiales,