

## Control del meandro Trementino en el río Sinú con estructuras sumergidas

Carlos Rodríguez Amaya  
Ingeniero Civil, MSc., PhD.  
Socio y Gerente Técnico, Hidroconsulta Ltda.,  
Bogotá, D.C.,  
[hidroconsulta@hidroconsulta.com](mailto:hidroconsulta@hidroconsulta.com)

**Resumen.** Este artículo presenta los resultados de la aplicación de la tecnología de estructuras sumergidas en el control del meandro Trementino en el río Sinú, en el departamento de Córdoba, Colombia, cuya evolución, que afectaba la carretera Lórica – San Bernardo del Viento, al destruir media banca de la vía en una longitud de 160 m, aproximadamente, pretendió ser controlada mediante soluciones convencionales de protección de orillas y construcción de espolones direccionales en bolsacretos, con altos costos. El comportamiento del campo de paneles sumergidos diseñado y construido para el meandro Trementino es exitoso y altamente recomendable. Está conformado por 46 paneles, de 3,0m x 6,0m, fabricados en celosía metálica cubierta con polietileno, distribuidos en trece conjuntos de tres y cuatro paneles. El efecto del mismo se compara razonablemente con la predicción del diseño; sus costos están en proporción de 1:6 y 1:8, con respecto de soluciones convencionales de espolones.

**Palabra clave:** estructuras sumergidas; paneles sumergidos; control de erosión; río Sinú; sedimentación.

## **Control del meandro Trementino en el río Sinú con estructuras sumergidas**

Por Carlos Rodríguez Amaya<sup>1</sup>

(Artículo publicado en la Revista EINAR, Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, N0. 5, 2006)

### **1. Introducción**

El río Sinú en el sector de Trementino tiene un amplio meandro en proceso permanente de evolución por la gran dinámica fluvial dentro de una zona de material aluvial de muy baja resistencia. La tasa de evolución lateral de los últimos 15 años asciende a 3m/año, determinada con base en los análisis geomorfológicos y de dinámica fluvial realizados (Hidroconsulta Ltda., 2004). Dicha evolución es la consecuencia de los fenómenos de erosión del talud del río y de socavación en su pata, por efecto de las fuerzas secundarias que se generan por la curvatura de las líneas de corriente, como resultado de las cuales se sucede el transporte del material hacia el interior del meandro, la modificación de la pendiente transversal del lecho del río, la ampliación de la sección hidráulica y el incremento de la sinuosidad.

Debido a lo anterior, la carretera San Bernardo del Viento – Lorica ha sido afectada de manera directa, con la destrucción total de media banca de la vía en un tramo de 160m, aproximadamente, dentro de las abscisas K0+710 el K0+420 (Figura 1). La seguridad vial así como el medio ambiente local son seriamente afectados.



---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, MSc., PhD., Socio y Gerente Técnico, Hidroconsulta LTDA., Bogotá, D.C., [hidroconsulta@hidroconsulta.com](mailto:hidroconsulta@hidroconsulta.com)

Figura 1. Vista general de la situación de la carretera Lorica-San Bernardo del Viento, afectada por la erosión de la margen izquierda del río Sinú, al momento del diseño.

Algunos de los métodos tradicionales para contrarrestar los fenómenos de erosión y socavación mencionados son, entre otros: 1) la protección directa de orillas por medio de gaviones, enrocados, placas de concreto y otros elementos; 2) la construcción de espolones direccionales que favorezcan la deposición del material y alejen el flujo erosivo hacia el centro del cauce; 3) la construcción de variantes viales, como una medida de evadir el problema. En términos generales, es muy conveniente considerar la utilización combinada de varios métodos, pero los altos costos y otras razones dificultan la adopción de tal tipo de solución; se emplea, por lo tanto, uno u otro en forma independiente.

Con miras a solucionar el problema en Trementino, se ensayaron previamente varias posibilidades, desde la protección directa del talud con pilotes de mangle hasta la construcción de espolones. En 1998 se construyeron cinco espolones direccionales en bolsacretos a un costo de \$835,1 millones para proteger 240m de orilla, equivalente a \$3,48 millones por metro (Posada, 1997; INCCO, 1998a; 1998b), los efectos esperados, razón por la cual se contrató lo que se consideraba podría ser la solución definitiva, consistente en la construcción de tres espolones, espaciados a 60m, conformados por dos líneas de tubería de acero, hincada bajo el lecho entre 6m y 8m, dependiendo de su posición; los pilotes estarían separados entre sí a 1,0m y el espacio entre las dos líneas de pilotes sería rellenado con mortero en bolsas de polipropileno. Estos espolones, sumados a los remanentes de los espolones en bolsacreto, protegerían un total de 320m de la orilla (INEICA LTDA., 2001). El costo estimado de esta complementación de la solución de 1998 era \$653,9 millones a precios de diciembre de 2003, para una longitud prevista de protección de 150m es decir, a razón de \$4,4 millones por metro (Hidroconsulta Ltda., 2004).

Durante los últimos 20 años, aproximadamente, se vienen utilizando estructuras sumergidas para proteger los taludes de los ríos contra la erosión, promoviendo la sedimentación del material transportado por el río y desplazando la vaguada hacia el centro del cauce, a una posición conveniente, previamente establecida a través del diseño correspondiente. La utilización de los paneles sumergidos, cuyo diseño está suficientemente respaldado por la teoría y verificada su aplicación en modelos hidráulicos y prototipos (Odgaard and Kennedy, 1983; Odgaard and Mosconi, 1987; Odgaard and Wang, 1991; Hidroconsulta Ltda., 1991; Hidroconsulta Ltda., 1995; Monroy, 1997) se constituye en una muy buena opción de relativo bajo costo, si se compara con las opciones convencionales, para controlar el fenómeno de erosión, la evolución del meandro en Trementino y rehabilitar la vía actualmente deteriorada.

La solución con estructuras sumergidas fue propuesta al INVIAS en 2003, diseñada en 2004 (Hidroconsulta Ltda.) y construida en ese mismo año por el Consorcio Hidroconsulta Ltda.-Hernando Pinilla Patiño (INVIAS, (2004), con resultados altamente satisfactorios. Por lo mismo, el presente artículo tiene como propósito presentar los siguientes aspectos relativos al campo de paneles sumergidos empleado para el control de la erosión del talud izquierdo del río Sinú en el meandro Trementino:

- 1) El diseño del campo de paneles, con base en las consideraciones técnicas que más adelante se describen.

- 2) Algunos aspectos relativos a la construcción y al efecto producido sobre la erosión del talud y relocalización de la vaguada.

## 2. El diseño

Los paneles sumergidos son placas instaladas verticalmente sobre el lecho del río, en conjuntos paralelos y con un reducido ángulo de ataque con relación al flujo, con las cuales se generan movimientos circulares que causan cambios en la distribución de la velocidad, en la profundidad y en el transporte de sedimentos a su rededor, al contrarrestar las fuerzas secundarias erosivas sobre el talud. Por lo tanto, la sección transversal del río se modifica por agradación o sedimentación en un lado y por degradación o erosión en el otro, de la manera como esquemáticamente se presenta en la Figura 2 (Rodríguez A., 2005).

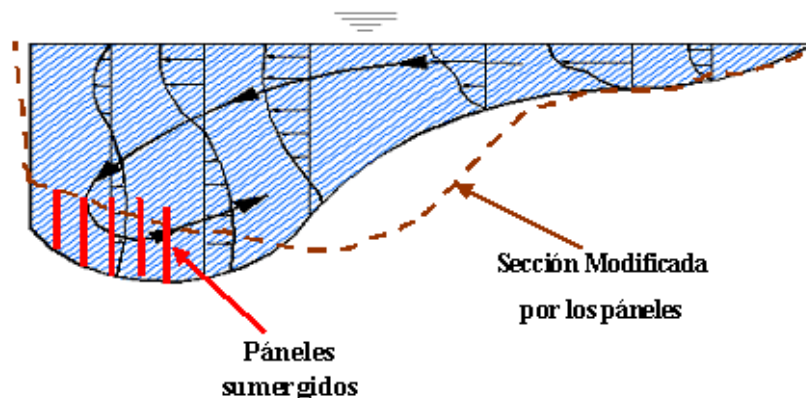
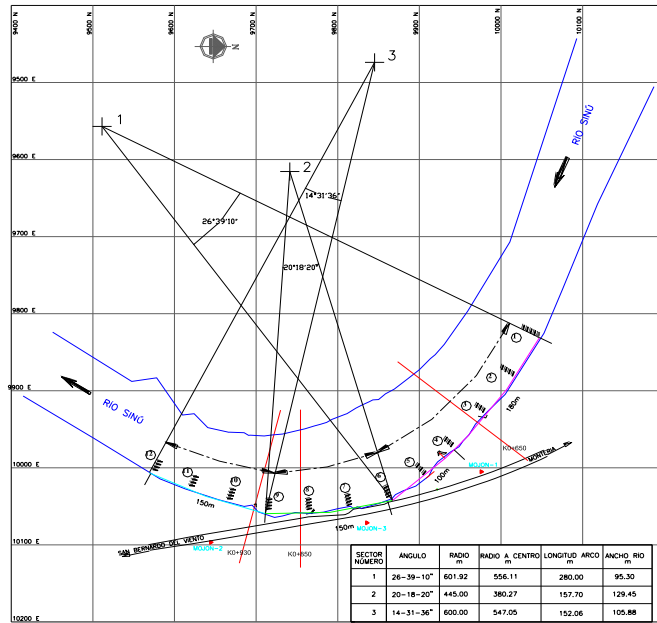


Figura 2. Esquema de la acción resultante de las fuerzas secundarias erosivas del talud y del efecto directo de los paneles en el control de la erosión del talud izquierdo, por redistribución de los sedimentos en la sección con modificación de la sección transversal.

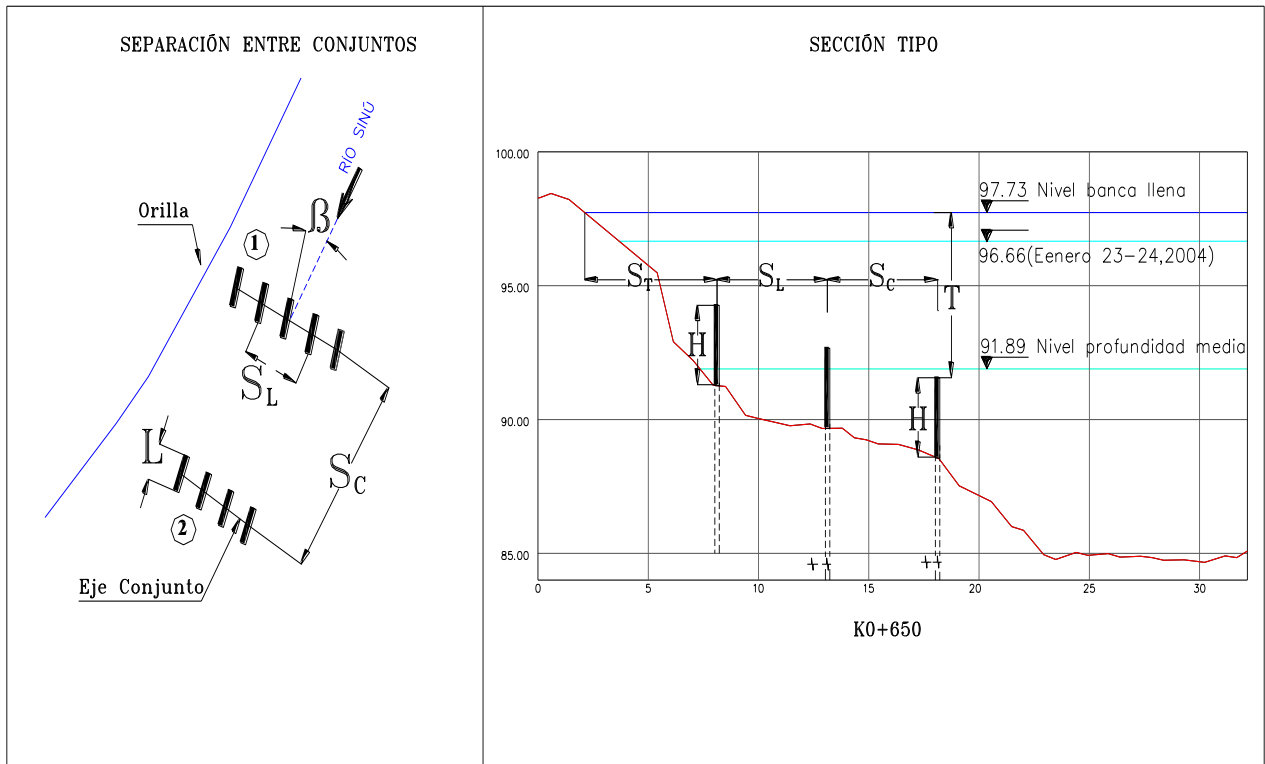
En la Figura 3 se muestran: La geometría representativa del meandro Trementino, los tres sectores en los que se ha subdividido el meandro para fines del diseño, con los parámetros típicos de cada curva, y la distribución general de los varios conjuntos de paneles que conforman el campo de estructuras sumergidas. Dicha figura contiene, además, las variables geométricas de diseño: altura del panel,  $H$ , y longitud del mismo,  $L$ ; ángulo de ataque con respecto al flujo,  $\beta^\circ$ ; sumergencia del panel,  $T$ ; separación entre paneles,  $s_i$ , y entre conjuntos,  $s_c$ , y la distancia al talud,  $s_t$ . Otros parámetros y consideraciones para el diseño son el producto de estudios básicos de geomorfología e hidrología y el análisis hidráulico; éste y aquellos se ejecutaron mediante simulación con el sistema HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (HEC-RAS, 1998) y procedimientos estándar, respectivamente. Elementos adicionales para el diseño lo constituyen la geometría y la hidráulica de cada sector: radio de curvatura; ancho del canal; profundidades y velocidades del flujo; pendiente de la línea de energía; y, número de Froude del sedimento y otros, entre los cuales están: Temperatura del agua,  $25^\circ\text{C}$ ; caudal a banca llena,  $645 \text{ m}^3/\text{s}$  y pendiente del nivel de agua,  $S_0$ ,  $1,74 \times 10^{-4}(\text{m/m})$ .

Un aspecto de la mayor importancia para el diseño de la solución para Trementino es el hecho de que para una amplia variación en los caudales del río, es muy baja la fluctuación de sus niveles; durante los levantamientos batimétricos realizados para el diseño, en enero de 2004, con caudales medios de  $208,0$

m3/s se observaron profundidades de 11,50m. Por lo mismo, en general, en el sector de Trementino la



profundidad de los flujos es grande; éstas ascienden, en ciertos casos, a más de 13 m y 15 m (Hidroconsulta



Ltda., 2004).

Figura 3A. Geometría del río Sinú en el sector de Trementino.

Figura 3B. Geometría de los paneles, y sus conjuntos.

En términos generales, el procedimiento de diseño es el siguiente: Una vez determinadas las condiciones hidráulicas, es decir, establecidos los valores de velocidad media del flujo,  $v_m$ , profundidad media,  $D_0$ , y radio de curvatura,  $R_c$ , entre otros, se calculan parámetros adicionales como son: el exponente de velocidad o parámetro de resistencia del canal,  $m = k(8/f)^{1/2}$ , el número de Froude del material del lecho,  $F_D = v_m/(gd_{50})^{1/2}$ , y se define el cambio deseado para la sección transversal, en términos de desplazamiento de la vaguada y cota del lecho sedimentado alrededor de las estructuras. Posteriormente, se fijan las dimensiones de los paneles, en cuanto a altura,  $H$ , y longitud,  $L$ , y ángulo de ataque con respecto al flujo,  $\beta^\circ$ ; se calculan los parámetros de sumergencia relativa de los paneles,  $T/D_0$ , y  $H/L$ . Con estos y con parámetros obtenidos mediante evaluaciones específicas de cada sector, haciendo uso de los resultados de los modelos hidráulicos (Odgaard, 1991) se seleccionan: El ángulo de incidencia, el número de paneles por conjunto, la separación transversal entre paneles y la separación longitudinal entre conjuntos de paneles, para la longitud pre-establecida del arco de meandro a proteger.

Para la definición de las opciones de paneles más adecuados a los objetivos del proyecto, se realizó un tamizado inicial de posibilidades mediante el empleo del modelo BVANE (Odgaard, 1996), considerando alturas de paneles de 1,75m, 2,00m y 3,00m, con ángulos con respecto al flujo,  $\beta^\circ$ , de  $12^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ , longitud del panel de 5,25m y 6,00m, y demás parámetros relacionados definidos en función de la altura. El análisis y la evaluación de los resultados indicaron la mayor conveniencia de emplear paneles de 3,0m x 6,0m, con ángulos de incidencia de  $20^\circ$ , en conjuntos de tres y cuatro paneles, espaciados entre 4,0m y 5,0m, dependiendo del sector; el diseño definitivo se relaciona en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseño del campo de paneles sumergidos para el río Sinú en Trementino, Córdoba. (Hidroconsulta Ltda., 2004).

SECTOR	DIMENSIÓN H (m) x L (m) x e(m); $\beta^\circ$	PANELES/ CONJUNTO (Número)	SEPARACIÓN PANELES(m) /CONJUNTO(m)	LONGITUD DE PROTECCIÓN (m)	CONJUNTOS (No.)	TOTAL PANELES
1A	3,00 x 6,00 x 0,165; $20^\circ$	3	5,0 / 60,0	180,0	4	15*
1B	3,00 x 6,00 x 0,165; $20^\circ$	3	5,0 / 50,0	100,0	1	3
2	3,00 x 6,00 x 0,165; $20^\circ$	4	4,0 / 50,0	150,0	4	16
3	3,00 x 6,00 x 0,165; $20^\circ$	4	4,0 / 50,0	200,0	3	12
			<b>TOTAL</b>	<b>630,0</b>	<b>12</b>	<b>46</b>

\* Incluye paneles adicionales para los dos primeros conjuntos.

En total se emplearon 46 paneles con los cuales se protegió una longitud de arco total de 630,0m, por medio de doce conjuntos, espaciados entre 40,0m y 50,0m. La distribución espacial de los paneles según el diseño se muestra en la Figura 3

El efecto teórico esperado en términos de retracción de la línea de vaguada y de altura de sedimentación para la sección representativa de dos de los tres sectores se muestra en la Figura 4, en la cual la condición actual se refiere a los levantamientos batimétricos previos al diseño. Paneles de mayor altura, que podrían ser necesarios por la gran profundidad de los flujos en la zona del meandro, resultan poco prácticos, por las dificultades de fabricación, manejo e instalación.

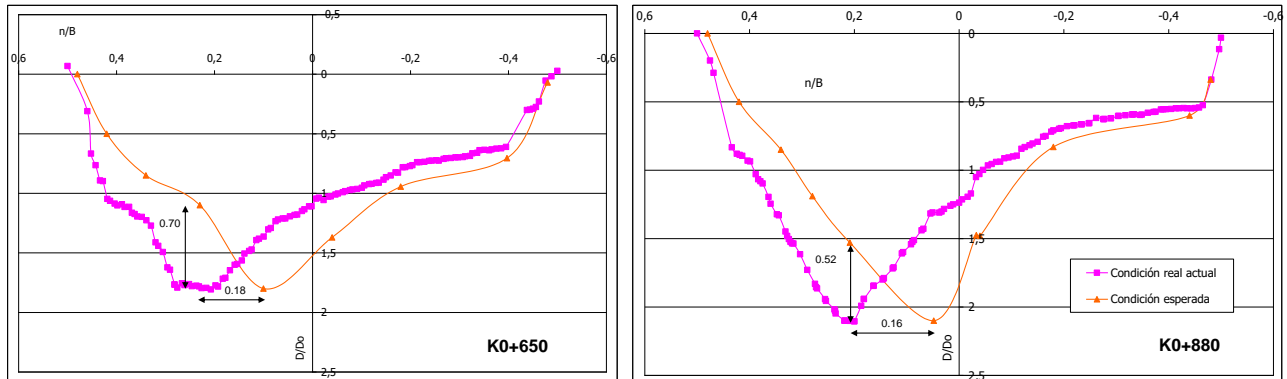


Figura 4. Resultados esperados con el modelo BVANE (Odgaard, 1996), para dos de las secciones utilizadas en el diseño: K0+650 y K0+880.

Los paneles pueden ser fabricados de cualquier material, siempre y cuando produzcan una superficie lisa y plana; de lo contrario, la efectividad hidráulica del sistema se reduce radicalmente. El diseño estructural inicial se realizó con concreto reforzado, para paneles de 6,0m x 3,0m x 0,165m, para un peso de 7,13 toneladas, a instalar en el lecho del río mediante pilotes metálicos de 15,2 cm (6") de diámetro, Posteriormente, se optó por paneles en celosía metálica recubierta con una lámina de polietileno de alta densidad, con lo cual su peso fue de tan sólo 780 Kg, facilitándose así las operaciones de manejo e instalación.

### 3. La construcción

La imposibilidad de trasladar desde Cartagena el equipo de hinca de los pilotes de soporte de los paneles, en razón del bajo calado del río Sinú en su desembocadura, en la Boca de Tinajones, motivó un ajuste al diseño, descrito previamente, consistente en el cambio de paneles de concreto reforzado por los de celosía metálica con lámina de prolipropileno; estos fueron fabricados en planta y trasladados al sitio de obra. La instalación de los paneles se realizó entre mediados de septiembre y de diciembre de 2004, bajo condiciones extremas de caudal y de nivel de agua, en un total de 85 días efectivos, lo que significó un rendimiento promedio de instalación de 0,54 paneles por día, adecuado si se considera la dimensión de los paneles y las condiciones referidas. Excepto por la suspensión durante los días de intensa lluvia, por razones de seguridad del personal y del equipo, las condiciones anotadas no impidieron la continuidad de la obra, pues una de las ventajas de los paneles sumergidos es su posibilidad de instalación en cualquier época, independiente del ciclo hidrológico local.

La Figura 5 presenta dos detalles de la fase de construcción en Trementino: a) Los paneles en el sitio de almacenamiento en proximidades del río, y b) el manejo previo a su transporte al lugar de instalación. Puesto que la efectividad del sistema de paneles depende directamente del ángulo con respecto al flujo que para estos se establece por los diseños, se realizó un estricto control topográfico durante la construcción, así que estos fueron localizados exactamente según lo indicado en los planos para construcción; no obstante, en razón de la dinámica fluvial local, durante la construcción fue necesario reubicar algunos conjuntos e aumentar su número a trece, sin incrementar el total de 46 paneles.

El presupuesto de obra para la protección del meandro Trementino con el campo de 46 paneles sumergidos diseñados fue de \$348,7 millones, equivalente a \$553.504/m de orilla protegida.



Figura 5. Paneles fabricados listos para su instalación y transporte al sitio.

#### 4. Resultados

Al corto tiempo después del inicio de la instalación del campo de paneles sumergidos en Trementino se observó el alejamiento de la vaguada hacia el centro del cauce, por la sedimentación producida a lo largo de la orilla izquierda. Con tan sólo la mitad de los paneles colocados, los residentes del sector manifestaron su complacencia, al notar la drástica reducción en las velocidades de flujo a lo largo del campo de paneles. El efecto del campo de estructuras sumergidas, instaladas de acuerdo con el diseño y con las modificaciones introducidas durante el proceso, se evidencia para dos secciones representativas mediante la comparación de su evolución con el tiempo que se presenta en la Figura 6.

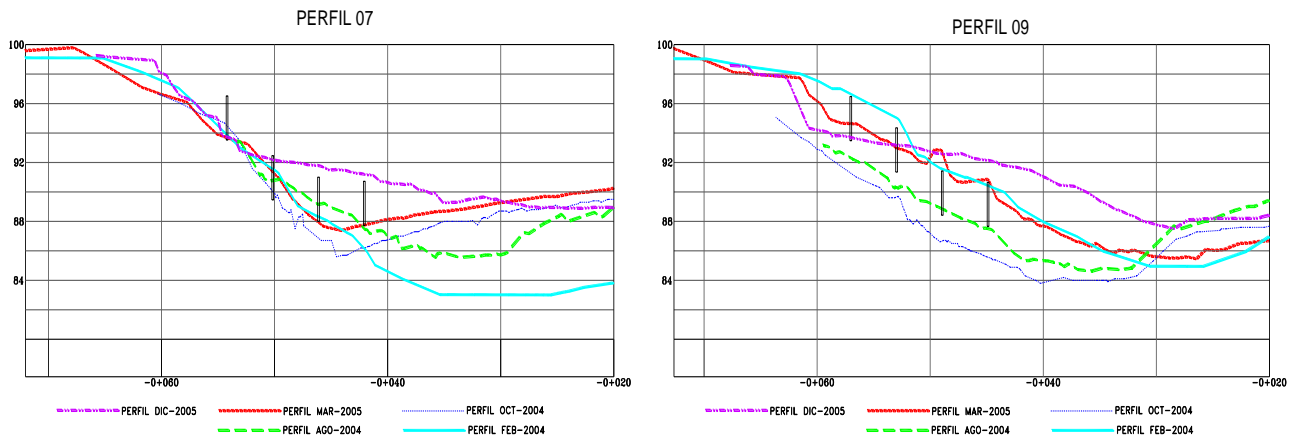


Figura 6. Comparación de la evolución de las secciones transversales antes y después de la instalación de los paneles.

La Figura 7 muestra la variación de las profundidades de flujo en el sector, establecidas mediante los levantamientos batimétricos ejecutados antes del inicio de la instalación y tres y doce meses después de concluida ésta. En términos generales, se puede observar que el alejamiento de la vaguada de la orilla se logra en corto tiempo, y después se mantiene prácticamente invariable. Como tal, la predicción basada en el diseño (Figura 3) puede considerarse bastante aceptable.

Si bien se recomienda continuar con el control del proceso de sedimentación, puede afirmarse que ésta no se modificará sustancialmente con respecto de la condición registrada un año después de la instalación. Es esta una de las ventajas del sistema de paneles sumergidos: Es tal el soporte teórico que respalda su diseño, que se

puede anticipar con bastante aproximación su efecto, así como se muestra para el caso del río Sinú en Trementino.

Ventajas adicionales son: 1) No modifican la rugosidad local del río; 2) No son visibles desde la superficie y por lo tanto no alteran el paisaje ni afectan la navegación, a menos que haya drásticas fluctuaciones del nivel de agua en el río; 3) Requieren muy bajos volúmenes de material y su construcción e instalación puede realizarse con igual facilidad independientemente de las condiciones hidrológicas locales.

## 5. Conclusiones

Como resulta evidente de la Figuras 6 y 7, los paneles sumergidos efectivamente modifican la sección transversal del río, en este caso particular, la del Sinú en Trementino, por sedimentación a lo largo de la orilla a proteger y traslado de la vaguada hacia el centro del cauce, en magnitud equivalente a la predicción del diseño (Figura 4). La magnitud de este traslado depende directamente del número de paneles por conjunto; en este caso se utilizaron tan sólo tres y cuatro paneles por conjunto, pues el propósito fundamental del proyecto era la protección de la carretera mediante el control de la evolución del meandro y no el restablecimiento de la orilla a una condición anterior.

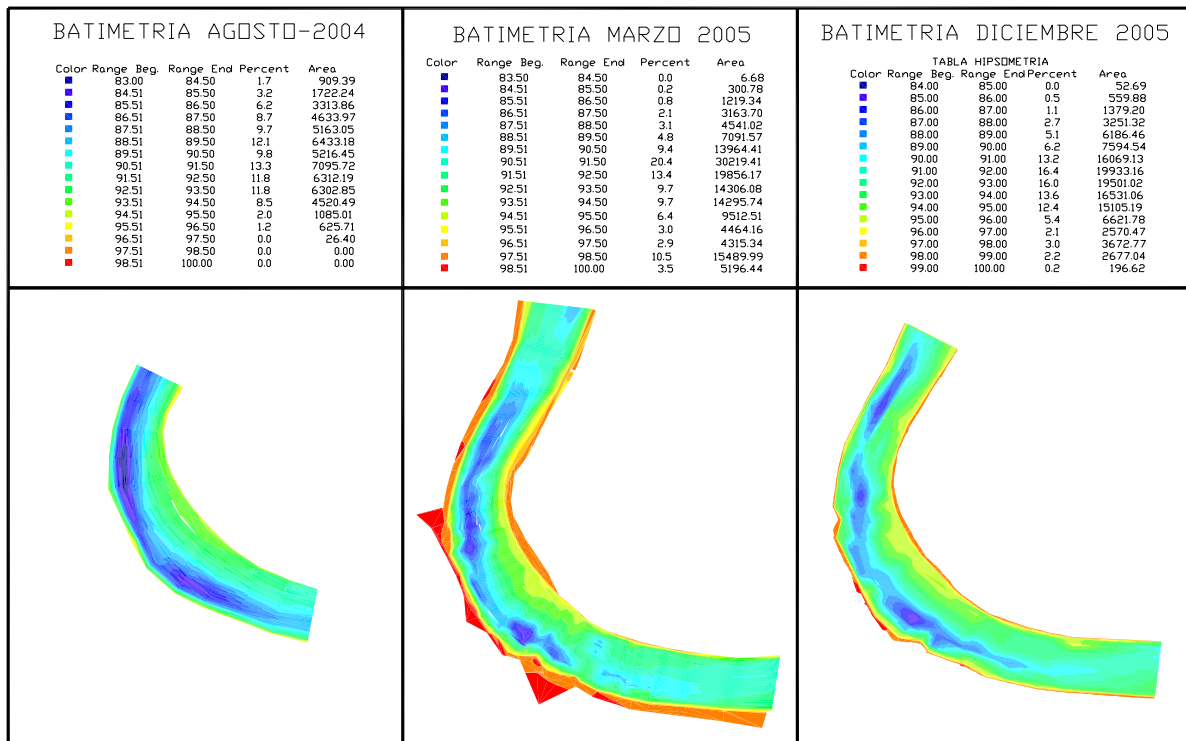


Figura 7. Comparación multi-temporal de las profundidades en el sector de Trementino.

El costo del proyecto con paneles sumergidos es muy favorable con relación al de soluciones convencionales, como el de espolones con bolsacretos o con líneas de pilotes y relleno con bolsacretos. La proporción de costos por metro de longitud protegida para el caso de Trementino es de 1:6 y 1:8, respectivamente, lo que, desde el sólo punto de vista económico, hace altamente recomendable el empleo de esta tecnología.

## 6. Reconocimiento

El material presentado en este artículo está basado en un proyecto de diseño realizado por Hidroconsulta Ltda.(2004) y en un contrato de construcción ejecutado por el Consorcio Hidroconsulta Ltda. – Hernando Pinilla Patiño. (INVIAS, 2004), para el Instituto Nacional de Vías, a través de la Oficina de Prevención y Atención de Emergencias, entidad a la que se agradece su autorización para presentar los resultados de los mismos.

## 7. Bibliografía

- Hidroconsulta Ltda. (1991). "Diseño de paneles rígidos sumergidos para el control de sedimentación, muelle de Aromáticos, CIB-ECOPETROL", Informe Técnico. Complejo Industrial Barrancabermeja, CIB, Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPETROL.
- Hidroconsulta Ltda. (1995). "Diseño obras complementarias para el control de erosión de la margen derecha del río Magdalena en Puerto Boyacá, Troncal Magdalena Medio, Puerto Boyacá – Puerto Serviez (K1+320 – K1+920)". Salgado Meléndez y Asociados Ltda., Instituto Nacional de Vías, Santa Fe de Bogotá, D. C.
- Hidroconsulta Ltda. (2004). "Ajuste estudios y diseños utilizando estructuras sumergidas, entre el PR3+700 y el PR4+0100, sitio Trementino de la carretera Puerto Rey-Moñitos-Lorica, sector San Bernardo del Viento-Lorica, Ruta 90, Tramo 9003", Informe Final, Oficina de Prevención y Atención de Emergencias, Instituto Nacional de Vías, Bogotá, D. C.
- Monroy Puin, J. A. (1997). "Construcción de obras complementarias para el control de erosión en la margen derecha del río Magdalena en el sector Puerto Boyacá – Puerto Serviez (K1+320 – K1+920), Troncal Magdalena Medio", Informe Técnico, Instituto Nacional de Vías, Santafé de Bogotá, D. C.
- INCCO Ltda. (1998a). Consultoría, asesoría e interventoría técnica y administrativa para la construcción de espolones para la protección de la banca, abscisa K3+700 de la vía San Bernardo del Viento – Lorica, Córdoba. Informe mes de agosto de 1998 de interventoría. Instituto Nacional de Vías.
- INCCO Ltda. (1998b). Consultoría, asesoría e interventoría técnica y administrativa para la construcción de espolones para la protección de la banca, abscisa K3+700 de la vía San Bernardo del Viento – Lorica, Córdoba. Informe mes de junio de 1998 de interventoría. Instituto Nacional de Vías.
- INEICA LTDA. (2001). Estudio para el diseño definitivo del sector PR3+0800 – PR4+0100 de la carretera Lorica – San Bernardo del Viento, departamento de Córdoba, Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS. (2004), Contrato 373/2004: Atención obras de emergencia mediante la construcción de paneles sumergidos para el reencauzamiento del río Sinú en el sitio Trementino, tendiente a recuperar y proteger la estructura de la banca en el PR3+0700 y el PR4+0100, de la carretera Puerto Rey – Moñitos – Lorica, Ruta 90, Tramo 9003. Oficina de Prevención y Atención de Emergencias, Instituto Nacional de Vías, Bogotá, D. C.
- Odgaard, A.J., and Kennedy, J.F. (1983). "River – bend Bank Protection by Submerged Vanes", J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 109(8), p.1161-1173.
- Odgaard, A.J., and Mosconi, C.E. (1987). "Streambank Protection by Submerged Vanes", J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 113 (4), p.520-536.
- Odgaard, A.J., and Wang, Y. (1991). "Sediment Management with Submerged Vanes, I: Theory", J. Hydr. Engrg., ASCE, Vo. 117(3), p.267-283.
- Odgaard, A. J., (1996). "BVANE: A computer model for the design of submerged vanes for sediment control", restricted distribution.
- Posada Posada, Eduardo. (1997). "Estudio, establecimiento de posibles soluciones relacionadas con el fenómeno de erosión ocasionado por el río Sinú que amenaza la estabilidad de la banca en el K3+700 de la vía que conduce a San Bernardo del Viento a Lorica, Córdoba. Instituto Nacional de Vías, Regional Córdoba.
- Rodríguez Amaya, C. (2005). Paneles sumergidos para el control de sedimentos en cauces aluviales. Hidroconsulta Ltda. Bogotá, D. C.
- US Army Corps of Engineers. (1998)., "HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, V.2.2", Hydraulic Engineering Center.