

El nivel máximo que alcanza el agua es de 4,27 m para 690 m³/s. En el Cuadro 21 se muestran las características del diseño geométrico de las secciones transversales modificadas.

Diseño de espigones

ESPACIAMIENTO ENTRE LOS ESPIGONES

Según JICA (1979), en tramos rectos el espaciamiento de los espigones está dado por la relación:

$$d = (2,5 - 3,0) * l \quad [8]$$

donde:

l = longitud del espigón
(en nuestro caso $l = 26$ m)

$$d_{\min} = 26 * 2,5 = 65 \text{ m}$$

$$d_{\max} = 26 * 3,0 = 78 \text{ m}$$

Según Jansen (1979), la máxima distancia entre espigones es dada por la relación:

$$d = (1,0 - 2,0) * b \quad [9]$$

donde:

b = ancho del río

En el caso del río Turrialba dadas sus características riesgosas, se escoge la relación mínima, a partir de la ecuación [9]: $d = b$ [10]

que conduce a un valor de $d = 89,4$ m con base en el promedio del ancho de las secciones del río (Cuadro 22).

Como se observa, el espaciamiento entre espigones oscila entre 65 y 89 metros. Debido a que los espigones propuestos son muy anchos en su base (42 m), lo cual da una protección adicional a las márgenes del río, se adopta finalmente un espaciamiento $d = 90$ m. En consecuencia se tiene, entre las estaciones 183 y 2251:

$$N = (E1 - E2) / d + 1 \quad [11]$$

donde:

N = número de espigones en cada margen

$E1$ = estacionamiento inicial

$E2$ = estacionamiento final

d = espaciamiento entre espigones

$$N = (2251 - 183) / 90 + 1 = 24$$

En total se tienen 48 espigones.

Cuadro 21. Características geométricas de las secciones transversales modificadas

Estacionamiento (m)	Línea centro (m)	Ancho base inferior (m)	Ancho base superior (m)
183	65	-12	34
576	70	-12	34
806	62	-26	48
942	50	-12	34
1162	30	-12	34
1239	50	-12	34
1328	67	-16	38
1434	54	-36	58
1552	57	-37	59
1561	63	-38	60
1701	55	-51	73
1767	51	-32	54
1774	62	-34	56
1848	47	-12	34
1973	112	-115	137
2116	61	-41	63
2251	43	-19	41

DIMENSIONES DEL ESPIGÓN

El espigón propuesto tiene dos funciones: la primera es forzar la centralización del cauce, logrado con la cabeza. La segunda es proteger los taludes del río, por medio del cuerpo del espigón, el cual tiene las siguientes características:

- *Ancho de corona (C)*. Por razones constructivas $C = 4,5$ m
- *Longitud (L_1)*. En función del ancho del cauce, se seleccionó $L_1 = 5$ m
- *Borde libre (BL)*. Se escoge $BL = 1$ m
- *Anclaje en el lecho (A)*. Se adopta $A = 1$ m; de acuerdo a la experiencia del MOPT
- *Inclinación del talud lateral (Z)*. $Z = 3$ por recomendación de Jansen (1979)
- *Profundidad máxima de agua (P_1)*. Para un período de retorno de 100 años, se tiene de acuerdo al HEC-2 una profundidad máxima de 4,27 m
- *Altura total (H_1)*
 $H_1 = A + P_1 + BL = 1 + 4,27 + 1,00 = 6,27$ m
 $H_1 \approx 6,25$ m

La cabeza del espigón tiene características semejantes al cuerpo, excepto que tiene una profundidad P_2 de 1,97 m, correspondiente a un período de retorno de 2 años.

- *Altura (H_2)*
 $H_2 = A + P_2 = 1 + 1,97 = 2,97$ m
 $H_2 \approx 3$ m
- *Longitud (L_2)*. $L_2 = 5$ m

VOLUMEN DE LOS ESPIGONES

- *Volumen A-B*
 $V_{AB} = (A_A + A_B) \cdot L_{AB} / 2 = (7,5 + 40,5) \cdot 0,5 \cdot 6 = 144 \text{ m}^3$
 $V_{BC} = A_B \cdot L_{BC} = 40,5 \cdot 5 = 202,5 \text{ m}^3$
 $V_{CD} = (A_C + A_D) \cdot L_{CD} / 2 = (40,5 + 145,3) \cdot 9,75 / 2 = 905,8 \text{ m}^3$
 $V_{ED} = A_D \cdot L_{ED} = 145,3 \cdot 5 = 726,5$

Volumen de espigón

$$V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} + V_{ED} = 144 + 202,5 + 905,8 + 726,5 = 1978,8 \text{ m}^3$$

Volumen total de los 48 espigones

$$V_T = 1978,8 \cdot 48 = 94982,4 \text{ m}^3$$

$$V_T \approx 95000 \text{ m}^3$$

Cuadro 22. Ancho de secciones

Estacionamiento (m)	Ancho de sección (m)
183	62,5
576	57,0
806	85,0
942	44,4
1162	62,6
1239	69,6
1328	74,9
1434	86,8
1552	94,9
1591	96,0
1701	107,2
1767	85,6
1774	89,4
1848	135,7
1973	185,6
2116	95,0
2251	89,4

Ancho medio = 89,47m

DISEÑO DEL REVESTIMIENTO DEL ESPIGÓN

El revestimiento tiene como función principal proteger el cuerpo del espigón de los efectos de la erosión. El ángulo de inclinación del talud (α) debe ser menor que el ángulo crítico de reposo (ϕ), cuyo valor oscila entre 30° y 40° . El revestimiento bajo el agua debe tener taludes aún más planos, recomendándose de 1:3 a 1:4.

El diámetro de las rocas del revestimiento, especialmente de la cabeza y costado aguas arriba del espigón se puede estimar con la relación (Jansen *et al.*, 1979):

$$D = AV^2 / (\delta * 2g * (1 - \sin^2 \alpha / \sin^2 \phi)) \quad [12]$$

donde:

D = diámetro de las rocas en m

A = 1,4, según el US Bureau of Reclamation, para alta turbulencia

V = velocidad media = 5,75 m/s

$\delta = (\tau_s - \tau) / \tau = (2,65 - 1) / 1 = 1,65$

τ_s = densidad de las rocas = 2,65

τ = densidad del agua = 1

g = aceleración de la gravedad = 9,8 m/s²

α = ángulo del talud (1:3) = $18,4^\circ$

ϕ = ángulo de reposo = 42°

$D = 1,4 * 5,75^2 / (1,65 * 2 * 9,81 * (1 - \sin^2 18,4 / \sin^2 42))$

D = 1,84 m

Resulta muy difícil encontrar rocas de esta magnitud. Debe, sin embargo, utilizarse roca del mayor tamaño posible, especialmente en los primeros espigones.

La cabeza de los espigones debe preferiblemente estar protegida por colchonetas de gaviones.

TRANSICIÓN ANTES DEL PRIMER ESPIGÓN

Para lograr un ajuste gradual del flujo en la entrada del primer espigón, se recomienda una transición de 1:4 (1 ancho: 4 longitud), constituida de material lo más grueso posible.

ANGULO DE INCLINACIÓN β DEL ESPIGÓN

Hey (1985) recomienda que en ríos con pendientes fuertes, de lechos gravosos, los espigones deben ser perpendiculares a la dirección de flujo, o inclinados ligeramente hacia aguas arriba, para evitar la socavación de las márgenes del río. Se adopta un ángulo $\beta = 0^\circ$, porque de esta manera se protege la margen del río, sin provocar una excesiva concentración de flujo en el centro del cauce. La literatura consultada coincide en que una orientación β hacia aguas abajo, agravaría la tendencia de socavación de los taludes del río (Hey, 1985; Jansen, 1979; JICA, 1979).

Diseño de diques

Se recomienda la construcción de un dique de gaviones del puente La Alegría hacia aguas arriba, en la margen derecha, con el objetivo de elevar el nivel de piso de dicha zona. Este sector es de alta vulnerabilidad y se corre el peligro de que el río pueda desviarse y tomar la carretera de Santa Rosa como cauce, dirigiéndose hacia la ciudad de Turrialba.

Las dimensiones del dique deben ser las siguientes:

Longitud = 100 m

Altura = variable, hasta una elevación máxima de 2 m

Cabe mencionar que para la construcción de dicha obra se deben desalojar cuatro viviendas de humilde condición, para poder cumplir con las dimensiones especificadas anteriormente. Estas construcciones están ubicadas en una planicie de alto riesgo y deben ser reubicadas, constrúyase o no el dique. En este sector, debido a que no se pueden usar espigones a causa de la pila central del puente, debe emplearse rip-rap y colchonetas de gaviones para controlar la socavación.

Protección de taludes

Esta protección se recomienda a lo largo de todo el cauce a su paso por la ciudad de Turrialba, pero especialmente entre las estaciones 0 y 183, en que no hay espigones. La protección de taludes propuesta presenta dos facetas:

- Utilización de rip-rap. Se debe seleccionar el material más grueso para conformar los espigones y el rip-rap. Esta acción se justifica dada la naturaleza aluvial inestable de los taludes, con alta erosividad.
- Conformación de los taludes, de modo que su inclinación interna sea preferiblemente de 1:4. Esta modificación se hace necesaria, especialmente en sectores como La Margot, donde taludes prácticamente verticales constituyen un sitio extremadamente frágil. Además, dada la gran altura de los taludes verticales, con frecuencia del orden de los cinco metros, se presenta un grave peligro, sobre todo para los niños.

Protección de las pilas de los puentes

Las pilas de los puentes, especialmente el puente La Alegría, deben ser protegidas con rip-rap o gaviones, este puente es el más frágil por ubicarse en un sector en que no se puede tener la protección de espigones.

Equilibrio energético del río

Uno de los objetivos de este proyecto es no introducir cambios energéticos importantes en el régimen de flujo del río. Con base en la ecuación de Manning, se observa que el gradiente energético no se modifica sensiblemente, al mantenerse muy poco alterados los niveles de piso y la distancia a lo largo del tramo modificado.

La rugosidad se reduce durante la construcción de las obras, pero el caudal de formación del río restablecerá el equilibrio energético, gracias a los procesos naturales de erosión y deposición. Estas modificaciones del cauce deben limitarse al canal trapecial inferior, preservándose el resto de la sección compuesta para afrontar los eventos de mayor magnitud.

Programa de mantenimiento

Debido a que la fuerza destructiva del río es enorme, debe programarse un plan de mantenimiento permanente. Este programa debe asegurar que la geometría del talud del trapecio inferior y de la totalidad del trapecio superior sean restablecidas periódicamente.

Se recomienda que esta labor reproduzca básicamente las secciones topográficas originales. Además, debe ser realizada anualmente en el período más seco. Si esta fundamental tarea es hecha en forma correcta, los eventos extraordinarios encontrarían un cauce adecuado, lo cual minimizaría los daños provocados pero sin lograr jamás eliminarlos, dadas las características negativas de la situación local.

Plan de reubicación urbana

Uno de los problemas graves de la ciudad de Turrialba es la invasión de las planicies de inundación, ya no solo por el crecimiento urbano sino también por el desarrollo comercial. Esta situación tiene dos aspectos negativos: estas construcciones están en peligro de ser dañadas o crean condiciones que perjudican a otros sectores que normalmente no serían afectados, y además dificultan e incluso imposibilitan las obras de corrección del cauce.

Por estos motivos es necesario que se establezca un plan de recuperación de las planicies de inundación con las siguientes medidas:

- Definición clara de las planicies de inundación.
- Prohibición de construir nuevas edificaciones en ese sector.
- Ejecución gradual de un programa de expropiación y reubicación de las construcciones existentes, empezando por las más humildes.
- Demolición inmediata de las construcciones expropiadas para impedir su reocupación.
- Creación de un parque en las planicies de inundación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El río Turrialba no presenta un peligro inminente por desbordamiento de los bancos de las márgenes. El peligro fundamental se debe a la socavación de las márgenes. lo cual podría eventualmente degenerar en algún desbordamiento.
2. La cuenca del río Turrialba ha sufrido un proceso de deforestación y cambio de uso de la tierra, el cual, sin embargo, no es el único factor en la explicación de los eventos de inundación de la cuenca baja.
3. Varios factores adicionales tienen gran impacto en esta problemática: la magnitud de los caudales, la pendiente del río, la inestabilidad del lecho y taludes y la invasión de las planicies de inundación.
4. Alta precipitación convectiva, asociada a fuertes pendientes, conduce a caudales excesivamente elevados por unidad de área de la cuenca.
5. La fuerte pendiente del río a su paso por la ciudad con un valor medio de más del 4%, explica que se presenten altas velocidades de flujo, del orden de los 6 m/s.
6. El lecho y taludes del río, sumamente inestables, con una textura gruesa, prácticamente sin cohesividad, con la presencia predominante de arenas, gravas y rocas, ofrecen una insuficiente resistencia a los enormes esfuerzos tangenciales característicos de caudales elevados con grandes términos cinéticos. La consecuencia inevitable es una severa socavación del lecho y los taludes.
7. La invasión de las planicies de inundación por parte del desarrollo urbano de la ciudad de Turrialba es totalmente contradictoria con la peligrosidad del río. Edificaciones y estructuras inadecuadas obstruyen el libre flujo del agua, exponiendo a la ciudad a un inminente e inevitable riesgo.
8. Las obras propuestas tienen como objetivo proteger las márgenes del ríos para reducir el grado de sovocación. Se considera que el espigón es la única estructura que da una protección relativa a la ciudad, ya que centraliza el cauce y protege las márgenes. Dada la energía del río, los espigones propuestos no son una solución definitiva del problema.
9. Un programa permanente de mantenimiento se hace obligatorio para mantener las características geométricas originales del grupo de 48 espigones propuestos.
10. El sector del puente de La Alegría no puede recibir el beneficio de los espigones, debido a la pila central. En consecuencia ese tramo debe ser protegido con un dique en la margen derecha, rip-rap en las márgenes y gaviones en las pilas del puente.

11. Pese a que todo el trayecto de río a su paso por la ciudad es peligroso, se considera que el sector más crítico, y en donde se debe iniciar de inmediato la construcción de las obras recomendadas, está comprendido entre las estaciones 1162 y 1552.
12. La función de los espigones es dar una protección parcial, mientras se implementan las acciones de desalojo de las planicies de inundación. Si estas acciones no se concretan, la ciudad de Turrialba estará inevitablemente sujeta a los embates del río.
13. La solución definitiva tiene dos facetas:
 - Retiro gradual de las planicies de inundación. Esta acción obliga a la prohibición total e incondicional de construcciones nuevas y un plan gradual de expropiación para la formación de un parque que cubra la totalidad de las planicies de inundación.
 - Definición de una política de desarrollo urbano de la ciudad de Turrialba, que fomente la urbanización en zonas no amenazadas por los ríos del valle. Estas zonas se ubican principalmente en la margen izquierda del río Turrialba, y en zonas elevadas de la margen derecha del río Colorado.

BIBLIOGRAFIA

- ACON. 1991. Mapa de capacidad de uso de la tierra de Costa Rica. San José, Costa Rica, Ministerio de Agricultura y Ganadería. Escala 1:200 000.
- BARNES, H. 1977. Roughness Characteristics of Natural Channels. United States Government Printing Office, Washington D.C.
- CORPS OF ENGINEERS 1991. Initial Assessment of Water Resources Needs in the Sula Valley, Honduras, Central America. Davis, California.
- CHOW, V. 1959. Open Channel Hydraulics. New York, McGraw Hill
- _____. 1964. Handbook of Applied Hydrology. New York, McGraw Hill.
- _____; MAIDMENT, D.; MAYS, L. 1988. Applied Hydrology. McGraw Hill, New York.
- DUNNE, T.; LEOPOLD, L. 1978. Water in Environmental Planning. W.H. Freeman and Co, New York.
- FRENCH, R. 1986. Open Channel Hydraulics. New York, McGraw Hill.
- HEC-1. 1990. Flood Hydrograph Package; User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- HEC-2. 1991. Water Surface Profiles; User's Manual, Version 4.6.0. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- HOGGAN, D. 1989. Computer Assisted Floodplain Hydrology and Hydraulics. McGraw Hill, New York.
- HEY, R., *et al.* 1985. Gravel Bed Rivers. John Wiley and Sons, Chichester, England.
- JANSEN, P., *et al.* 1979. Principles of River Engineering. Pitman Publishing Limited, London.
- JICA. 1979. Rivers. Ministry of Construction, Nagoya, Japan.
- LEONARD, J. 1985. Natural Resources and Economic Development in Central America. International Institute for Environment and Development, Washington.
- LINSLEY, R.; KOHLER, M.; PAULHUS, J. 1982. Hydrology for Engineers. Singapore, McGraw Hill.
- MAG. 1970. Mapa de uso potencial de la tierra. San José, Costa Rica. Escala 1:750 000
- SOLIS, H.; MURILLO, W.; OREAMUNO, R. 1991. Estudio Hidrológico e Hidráulico para el Control de Inundaciones en la Cuenca del Río Purires. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Informe técnico.
- SOLIS, H.; CHACON, J.J. 1992. Modelación hidrológica e hidráulica para el control de inundaciones en el río Turrialba. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Informe técnico.
- VIESSMAN, W.; LEWIS G.; KNAPP, J. 1989. Introduction to Hydrology. New York, Harper and Row Publishers.