

Diques Fusibles para el Control de Inundaciones en la Mojana

LILIAN POSADA GARCÍA, I.C MSc. PhD.

Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín,
AA 1027 Medellín, e-mail: lposada@unalmed.edu.co

OSCAR ANDRES DUQUE MARIN, I. C.

Candidato a Magíster en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, oaduque0@unalmed.edu.co

Resumen. Las inundaciones que se presentan cada año en la región de La Mojana por el incremento de los niveles del río Cauca, afectan no solo áreas cultivables (350000 Ha), sino que inundan las cabeceras de los municipios de San Jacinto, Tenche, Guaranda y Nechí. El flujo desbordado se conduce a través de la región por los antiguos brazos del delta interior del río Cauca. Las obras para el control de inundaciones consisten de un dique marginal en tierra y estructuras hidráulicas del tipo dique fusible en los rompederos (puntos mas críticos) de Santa Anita, Tenche, Potrero Nuevo y Las Brisas. Estas estructuras permiten el drenaje de una parte de las crecientes del río Cauca (T=25 años) mediante la evacuación lateral controlada. Este tipo de estructuras no se ha implementado en Colombia; su diseño se basa en las experiencias del US. Bureau of Reclamation, adaptadas a las condiciones físicas, sociales y ecológicas de la región.

Palabras clave: Estructuras hidráulicas, dique Fusible, control de inundaciones

1. Introducción

La región de La Mojana es una zona que periódicamente está sujeta a inundaciones causadas por los desbordamientos del río Cauca, con intensidades y duraciones prácticamente impredecibles. Estas inundaciones deterioran los pocos caminos existentes, interrumpen la comunicación terrestre y mientras dura la inundación desaparece cualquier actividad agropecuaria.

La región cuenta en la actualidad con un jarillón de unos 54 km que bordea la margen izquierda desde el corregimiento Colorado (Antioquia) hasta el corregimiento Las Brisas (Bolívar); este dique es usado como carretera en la época de verano, pero se encuentra bastante deteriorado. Durante las crecidas del río, el agua socava los taludes del dique y facilita la ruptura en los sitios de curvatura cóncava, comúnmente conocidos como “rompederos”; tal es el caso de Nuevo Mundo, Junín y Santa Anita en Nechí; Brazuelo, Bermúdez, Malabeth, Potrero Nuevo y Caimital, en el sur de Bolívar; Cachimberos y Boca del Cura en

Sucre. En general, se calcula que el trasvase natural a través de los numerosos caños y brazos de La Mojana puede ser del orden de 600 a 800 m³/s.

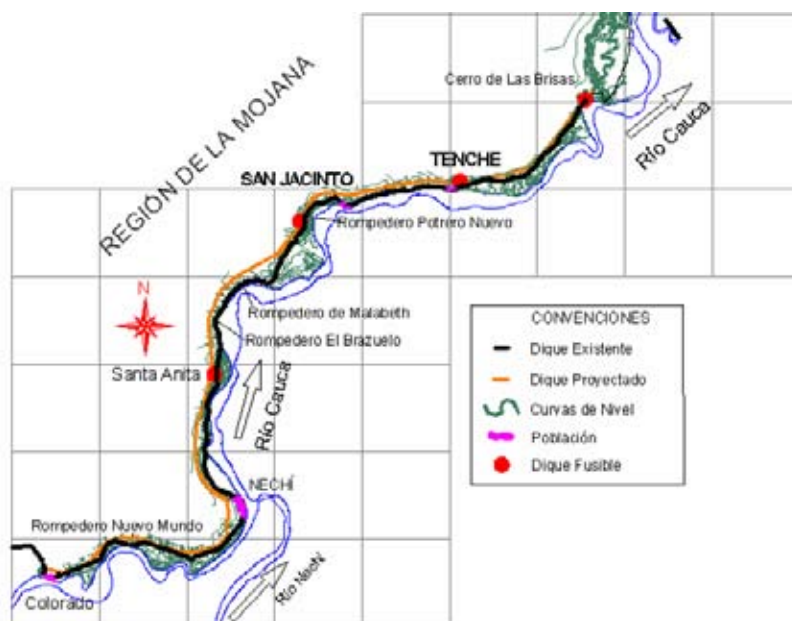


Foto 12-1. Esquema localización de los diques fusibles proyectados en la Mojana

Como obra principal para el control de la inundación, se diseñó un dique carretable de 52.2 km sobre la margen izquierda del río, entre la población de Colorado (Antioquia) y el cerro las Brisas (Bolívar), y se complementó con obras de drenaje tipo Diques fusibles (en los rompederos de Santa Anita y Potrero Nuevo y en las localidades de Tenche y Las Brisas), para aliviar la carga del río Cauca y devolver el flujo a los caños y sistema de humedales que caracterizan la región de la Mojana.

En los últimos años, debido a la necesidad de un mejor aprovechamiento y control de las fuentes hídricas, se han venido desarrollando nuevas estructuras hidráulicas para el control de ríos y demás cuerpos de agua. Entre estas estructuras, el dique fusible representa la alternativa mas económica cuando se emplean estructuras vertedoras en terraplenes o diques de contención.

2. Revisión de literatura

Un dique fusible es un terraplén de material seleccionado, diseñado para ser removido de una manera controlada, cuando la creciente del río supere a la creciente de diseño. Una vez se alcance este estado, el material sobre la corona del fusible es removido por las aguas de la creciente y el resto del dique comienza a trabajar como un vertedero de cresta ancha.

Las primeras investigaciones en diques fusibles surgieron en Estados Unidos a partir de la necesidad de nuevas estructuras económicas a los vertederos en presas de concreto. Gran parte de la información

encontrada en la literatura, está asociada a las investigaciones conducidas por Tinney y Hsu (1961), en el diseño del dique fusible vertedero del proyecto Hidroeléctrico de Oxbow, sobre el río Snake (Idaho).

Estas primeras investigaciones (1961) se concentraron en la mecánica del lavado del lleno de los diques fusibles, a partir de análisis y mediciones en modelos hidráulicos. Las investigaciones se continuaron en la Universidad de Windsor a partir de 1977 donde se analizaron ecuaciones teóricas y se compararon con los resultados de los modelos (Pugh, 1985).

Otros estudios, conducidos por el Bureau of Reclamation, se concentraron en precisar los parámetros de diseño de los diques fusibles como estructuras vertedoras auxiliares en presas para proyectos hidroeléctricos o para suministro de agua potable; tal es el caso de las presas Horseshoe y Bartlett en Arizona (Wahl, 1993) y de la presa Silver Lake en Michigan (FERC, 2003). El dique fusible de la presa Horseshoe fue diseñado para un caudal de 6850 m³/s compuesto por tres vertederos con longitudes de cresta de 44 a 52 m de longitud y de 6 a 7.9 m de altura. El dique fusible de la presa Bartlett, fue diseñado para un caudal de 100 m³/s (Burgi, 1995).

Igualmente, el Bureau of Reclamation ha investigado diferentes métodos de predicción de rompimiento de diques fusibles con ayuda de modelos hidráulicos físicos. Las experiencias adquiridas permitieron establecer modelos de erosión basados en la relación de la tasa de disipación de energía hidráulica y los índices de erodabilidad para distintos materiales (Pugh, 1985), Wahl (1998) y Coleman (2002).

El Laboratorio de Investigación en Recursos Hidráulicos del Bureau of Reclamation ha realizado distintos modelos hidráulicos físicos para determinar criterios de diseño de diques fusibles. Tales modelos a escala 1:10 y 1:25 no superaban los 2.7 m de longitud con alturas entre 0.15 a 0.38 m (Wahl, 1998).

Los diques fusibles como estructuras para el control de inundaciones se han implementado en países como Estados Unidos, España, Nicaragua y Perú. En la ciudad de Écija (Sevilla, España) son frecuentes las inundaciones del río Genil, que en forma periódica ocasionan daños materiales y desplazamiento de la población asentada en las partes bajas (Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, 2006). Para controlar las inundaciones se construyeron diques de defensa en ambas márgenes del río en una longitud total de 3.2 km, con ancho de corona de 5 m y altura entre 1.2 a 4.7 m. Para complementar la obra, se construyó un dique fusible en gaviones para permitir el flujo controlado de 2075 m³/s asociado a una creciente de 100 años de periodo de retorno. En Perú, el puente Independencia sobre el río Piura entre Catacaos y la Arena (Estado del Piura), esta protegido por un dique fusible para evitar daños ocasionados por crecientes del río en la estructura del puente (elregionaldelpiura.com.pe, 2006),

En Nicaragua, el lago La Virgen en Matagalpa hace parte de un complejo hidroeléctrico compuesto por los embalses de Apanas, Asturias y La Virgen; este último posee un vertedero y un dique fusible (304.5 m de

longitud) que sirven directamente al Lago La Virgen como sistema de protección ante cualquier inundación (www.elnuevodiario.con.nj, 2002).

En Colombia, aún no se han implementado este tipo de obras para el control de inundaciones o como sistemas de protección para otras estructuras. Se diseñaron diques fusibles como obras complementarias para el control de inundaciones en la región de La Mojana (Contrato 073-2002, INVIAS-Universidad Nacional Medellín), y estos ya fueron incluidos en el documento CONPES Mojana 2006 para su construcción.

3 Metodología y criterios de diseño

El dique fusible es una estructura de carácter semipermeable (construida en gaviones) para minimizar las fuerzas de subpresión sobre la estructura, para permitir un drenaje mínimo que sirva de alerta a la población que habita en la zona de influencia de la estructura y del caño receptor. Cuando los niveles del río asciendan hasta el nivel de la creciente de diseño (N_{25}), el flujo empezará a verter sobre el dique – vertedero evacuando el caudal que pueda ser conducido en forma segura por el caño receptor. Con el tiempo, los sedimentos que se filtran por los gaviones van llenando los espacios vacíos y la estructura se va colmatando.

La ubicación de los diques obedece a los estudios de la dinámica evolutiva del río durante los últimos años, tomando como referencia el sector comprendido entre Colorado (Antioquia) y el municipio de Achí (Bolívar).

La sección transversal del dique marginal proyectado por la Universidad Nacional, tiene un ancho de corona de 3 m y taludes tendidos al 2.5H:1V en el lado contiguo al río y 3H:1V al lado opuesto del río. El dique fusible estará conformado por una estructura en gaviones cuya cresta se elevará hasta el nivel de la creciente de 25 años; entre la cresta y la corona del dique se dispone una rampa que sirve de transición entre el dique en tierra y la estructura en gaviones. El flujo que pasa por los diques fusibles (17.2 m³/s en Santa Anita) es conducido rápidamente hacia caños naturales en los sitios Santa Anita, Tenche, Las Brisas y Potrero Nuevo, respectivamente. (Figura 1)

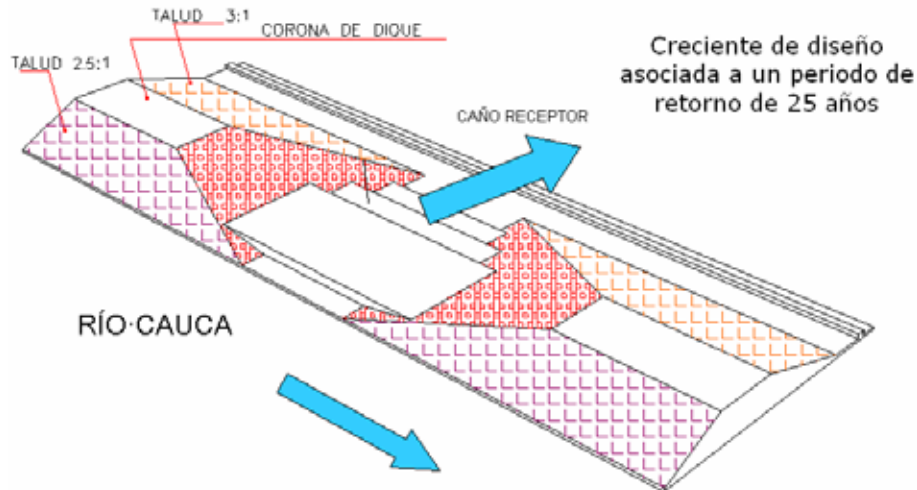


Figura 1. Esquema de los diques fusibles proyectados en La Mojana.

2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Para calcular las dimensiones de la estructura que evacua el caudal transportado por el caño receptor, se usó la ecuación general de un vertedero lateral:

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Donde Q es el caudal [m^3/s] evacuado por el vertedero; C_d es el coeficiente de descarga; b es el ancho [m] del vertedero (base de la sección trapezoidal) y h es la lámina de agua [m] sobre la cresta del vertedero. Para un vertedero Cipolletti $C_d = 0.63$ (en el sistema internacional, de unidades) y la aceleración de la gravedad, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; reemplazando estos valores en la ecuación (1) se tiene:

$$Q = 1.859 b h^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

La altura del vertedero se evalúa a partir de h_{\max} , según la ecuación 3.

$$h_{\max} = N_r - N_{25} - BL \quad (3)$$

Donde h_{\max} es la altura máxima de la lámina de agua [m], N_r es la cota [m] de la rasante de la vía, N_{25} es el nivel [m] de la crecida de diseño y BL es el borde libre (0.6 m para todos los fusibles).

2.1.1 TASA DE EROSIÓN

La tasa de erosión del lleno en tierra del dique fusible, luego del rompimiento del fusible puede ser expresada a partir de la siguiente ecuación (Pugh, 1985),

$$ER = 13.2H + 150 \quad (4)$$

Donde ER [pies/hora] es la tasa de erosión del lleno en tierra y H [pies] es la altura del dique fusible. En la Tabla 1 se presentan las tasas de erosión para cada uno de los diques fusibles proyectados.

Tabla 1. Tasas de erosión del lleno en tierra para los diques fusibles proyectados.

Dique Fusible	H(m)	H(pies)	Long dique fusible (m)	ER (m/h)	T (h)	T (min)
Santa Anita	1.49	4.89	27	65.39	0.41	25
Tenche	1.35	4.43	54	63.54	0.85	51
Las Brisas	1.51	4.95	30	65.65	0.46	28
Potrero Nuevo	1.35	4.43	54	63.54	0.85	51

Donde T es el tiempo [h] que tarda en lavarse el lleno en tierra de cada uno de los diques fusibles propuestos. De la Tabla 2 se puede observar que los tiempos de lavado del material que conforma el lleno para los diques fusibles proyectados, varían entre 25 y 51 minutos, mostrando que el rompimiento de los fusibles es controlado y de forma gradual.

2.1.2 ESTRUCTURA DEL DIQUE FUSIBLE

La sección transversal del dique fusible es un vertedero trapezoidal de cresta ancha con taludes 5.7:1 (27 m de ancho en Santa Anita). En el sentido longitudinal (alineado con el terraplén) el dique tiene forma trapezoidal con taludes escalonados tratando de conservar los taludes del terraplén (Figura 2); en la cara de aguas abajo se proyectaron escalones de mayor amplitud (huella) para logra una evacuación del flujo en forma amortiguada.

Los diques fusibles serán construidos con gaviones de 1.0 x 3.0 x 0.5 m en varios niveles hasta alcanzar la altura de diseño, dada por el nivel de la creciente de 25 años de período de retorno (N_{25}). El material de lleno será canto rodado, con rocas grandes para las caras externas, mayores de 20 cm y un material un poco más pequeño dentro de la canasta (hasta 8 cm) para ganar densidad.

Se dispuso un pozo de aquietamiento para lograr un flujo subcrítico en el caño receptor. En la Tabla 1 se presentan las dimensiones de los pozos de aquietamiento para cada uno de los diques fusibles. Debido a que los vertederos son de poca altura, comparada con el ancho (longitud de la sección transversal B-B), la estructura es estable ante el volcamiento (F.S: 48) que pueden producir las fuerzas actuantes (empujes). El recubrimiento proyectado en la fundación con el colchón de gaviones (como se detalla en la Figura 2), contribuye a generar mayor capacidad de soporte en el suelo de fundación y evita que la estructura del vertedero falle por deslizamiento (F.S: 5).

Las dimensiones y características de los diques proyectados se muestra en la Tabla 2. En la Figura 2 se muestra la sección transversal, longitudinal y la vista en planta del dique fusible en Santa Anita.

Tabla 2. Características principales de los diques fusibles propuestos.

Lugar	Unidad	Santa Anita	Potrero Nuevo	Tenche	Las Brisas
Abscisa	----	K18+094.60	K32+200	K42+620	K51+170

Lugar	Unidad	Santa Anita	Potrero Nuevo	Tenche	Las Brisas
Cota terreno	msnm	32.57	30.23	29.5	26.25
Cota rasante del dique	msnm	36	34.84	34.05	31.08
Cota cresta vertedero (N ₂₅)	msnm	34.51	33.49	32.7	29.67
Caudal a evacuar	m ³ /s	17.2	36	36	58.5
Caño receptor	---	El Cedro	Coroncoro	Moja-escopeta	Las Brisas
Longitud corona dique fusible	m	27	54	54	30
Longitud rampa acceso al dique fusible desde la vía	m	8.48	7.1	7.143	19.62
Longitud dique fusible (corona y rampa)	m	43.95	68.3	68.29	69.24
Ancho total dique fusible	m	21	28	28	27.8
Longitud pozo de aquietamiento	m	5.5	8	8	5.5
Ancho del pozo de aquietamiento	m	41	72	72	47
Altura del Dintel a la salida del pozo	m	1	1	1	1
Altura del dique fusible, incluida fundación	m	2.42	3.92	3.92	3.42
Gaviones de 3x1x0.5 m (canastas)	m ³	1995	3143	3143	2104
Gaviones de 3x1x0.3 m (colchón)	m ³	653	1137	1137	1062
Geotextil	m ²	1290	2038	2038	1728
Distancia entre Nivel superior e inferior del vertedero en gaviones	m	7	10.5	10.5	10.5
Parámetro pozo disipador (D)	-	0.00292	0.00075	0.00075	0.00969
Distancia de caída del chorro (L _D)	m	2.15	2.42	2.42	4.21
Longitud Total desarrollo resalto (L _D +L)	m	7.14	8.02	8.02	13.95
Y ₂ profundidad del flujo aguas abajo del resalto	m	0.831	0.933	0.933	1.623
Distancia entre el sitio de caída del chorro y el desarrollo del resalto (L)	m	4.99	5.6	5.6	9.74

Para la transición entre el dique de tierra y el dique en gaviones (fusible) se colocará un manto de geotextil no tejido que impida la fuga del material fino del terraplén, y sobre este se coloca un colchón de gaviones de 0.30 m de espesor a manera de "RUANA" cubriendo la rampa del vertedero, los costados de la misma hasta el nivel del terreno y 15 m de la corona y taludes del dique de tierra. En la base de la estructura se colocará un colchón de gaviones de 0.3 m de espesor el cual se extiende 3 m antes del primer escalón en la entrada y se prolonga para conformar el piso del pozo de aquietamiento.

De esta forma, se mejorarán las condiciones del suelo debajo del vertedero y se disminuirá el riesgo de falla por deslizamiento de la estructura del vertedero.

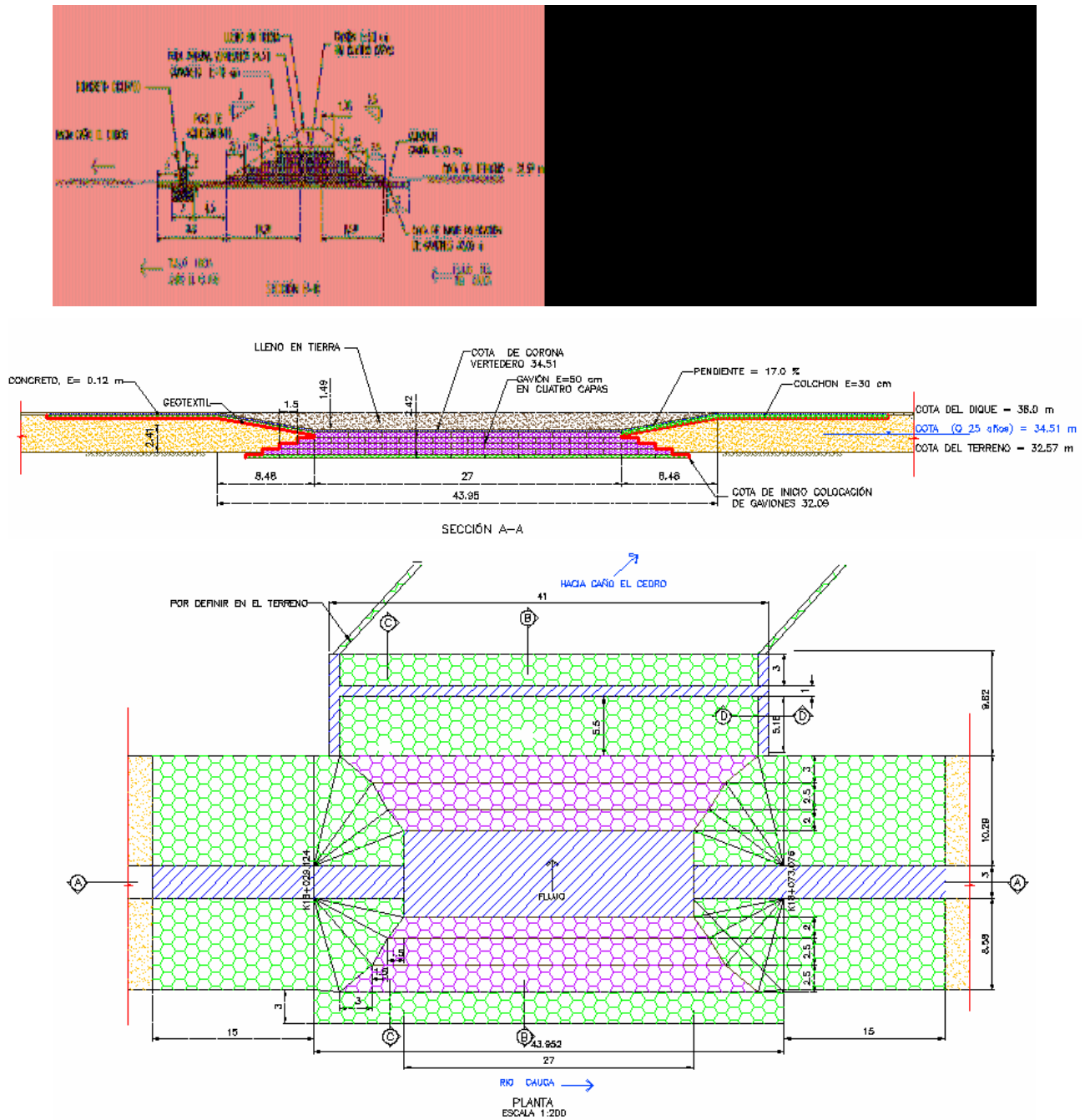


Figura 2. Sección transversal, longitudinal y vista en planta del dique fusible en Santa Anita.

2.1.3 OBRAS COMPLEMENTARIAS - POZO DE AQUIETAMIENTO

A la salida del vertedero se presenta un aumento en la energía del flujo (energía potencial) que se debe disipar con la estructura de gaviones escalonados, con buena longitud de desarrollo para lograr este fin como se indica en la Figura 2. El pozo quedará confinado con un dintel en concreto ciclópeo de 1.0 m de altura, que bordea el pozo por sus tres costados. El dintel lateral tendrá 0.5 m de espesor mientras que el de

aguas abajo, en la salida hacia el caño receptor, tendrá un ancho de 1.0 m; El ancho del pozo es igual a la base del vertedero y la longitud libre se indica en la Tabla 1.

Ven Te Chow (1988) propone las siguientes expresiones para estimar la longitud de desarrollo del resalto hidráulico formada aguas abajo de una caída de altura h (Figura 3),

$$L_D / h = 4.30D^{0.27} \quad (5)$$

$$Y_2 / h = 1.66D^{0.27}; \quad D = q^2 / gh^3 \quad (5)$$

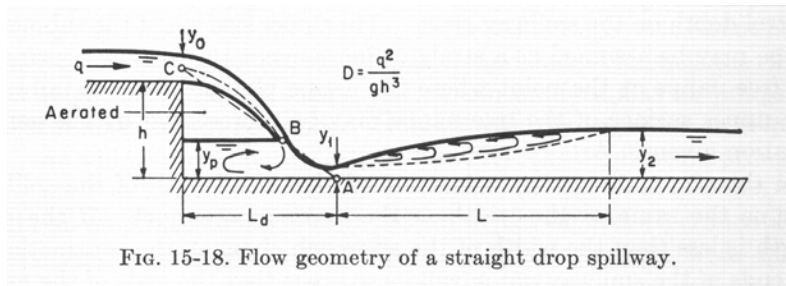


Figura 3. Perfil del flujo en un vertedero de caída h (Tomado de Ven te Chow (1988), Figura 15-18).

Donde, L_D es la distancia de caída del chorro [m] desde el escalón, Y_2 es la profundidad del flujo [m] aguas abajo del resalto, q es el caudal por unidad de ancho [$m^3/s/m$].

La distancia entre el sitio de caída del chorro y el desarrollo del resalto (L), se estima para pendiente horizontal de la superficie como seis veces Y_2 (Ven Te Chow, 1988). Al final de la Tabla 2 se presentan las distancia $L_D + L$ para cada uno de los pozos de aquietamiento de los diques fusibles. De la Tabla 2 se observa que la distancia del sitio de caída del chorro (L_D) es menor que la distancia entre el nivel superior e inferior de los gaviones escalonados. Por tanto, en los niveles escalonados se disipa gran parte del flujo que pasa a través del fusible y el resalto hidráulico logra desarrollarse antes de llegar al dintel al final del pozo.

4. Conclusiones

Para el control de las inundaciones en la región de La Mojana, la obra principal consta de un dique marginal paralelo al río, pero esta obra sola no es sostenible por la gran cantidad de sedimentos que recibe el Cauca y que difícilmente los entrega en el brazo de Loba (depresión Momposina). La carga sólida viaja mucho mas lentamente que la carga líquida y eso hace que el cauce se esté agradado permanentemente, lo que implica un ascenso permanente de los niveles de inundación en toda la región.

Esta dinámica del flujo exige el diseño de obras de drenaje para aliviar la carga del río Cauca y devolver el flujo a los caños y sistema de humedales que caracterizan la región de la Mojana. Se analizó la

problemática de los puntos más críticos (rompederos) y se diseñaron diques fusibles en cada caso, permitiendo el drenaje de agua y sedimentos que reducen en parte los niveles de inundación y la amenaza de ruptura del dique.

Con este tipo de obras se ofrece mayor seguridad para el drenaje de los caudales altos de inundación, dado que el vertimiento por los diques fusibles es gradual y controlado, además se genera mayor confiabilidad para el sector agrícola por la disminución del riesgo de inundación y la reducción de las pérdidas económicas debidas a las inundaciones.

3. Bibliografía.

Coleman et al, 2002. Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 9, September 1.

Pugh, Clifford, 1985. Hydraulic model studies of fuse plug embankments. U. S. Department of Interior. Bureau of Reclamation. Engineering and Research Center.

Tinney, E.R. and Hsu, H.Y., 1961. Mechanics of washout of an erodible fuse plug. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings, ASCE, Vol. 87, No. HY3, May 1961.

UNAL, 2005. Control de Inundaciones en la Región de La Mojana. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas. Medellín.

Ven te Chow, 1988. Open Channel Hydraulics. Macgraw Hill.

Wahl, T., 1993. Hydraulic Model Study of Horseshoe Dam Fuse Plug Auxiliary Spillway. U.S. Department Of The Interior, Bureau of Reclamation. Denver.

Wahl, T., 1998. Prediction of Embankment Dam Breach Parameters. U.S. Department Of The Interior, Bureau of Reclamation. Denver.

En red:

www.elnuevodiario.com.ni, 22 de junio de 2002, "Quieren mal vender Plantas ignorando recursos hídricos").
(www.elregionaldelpiura.com.pe, 18 de marzo de 2006, "Cerraron puente Independencia por fisuras en dique fusible").

Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, Ministerio del Medio Ambiente – España, Obras de defensa de la ciudad de Écija frente a las avenidas del río Genil. 2ª fase. Tomado de: www.mma.es/rec_hid/informes_viabilidad/pdfinformes/ecijaf.pdf.

FERC Independent Consultants Review Panel, 2003. Silver Lake Dam. Technical reasons for the release of Silver Lake Reservoir on may 14-15, 2003. Report no. 2. Tomado de www.usbr.gov.co/ FERC.