

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)

Convenio de Colaboración
No. SGIH-GPIH-SGPOPR-UNAM-II-RF-14-01

Informe Final

CAPÍTULO 9 Determinación del gasto suficiente en el río Carrizal para el abastecimiento de agua potable

Dr. Fernando Jorge González Villarreal *
Director del proyecto

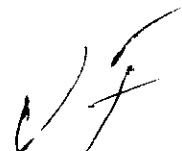
M. en I. Juan Javier Carrillo Sosa **
Coordinador del proyecto

Dr. Jesús Gracia Sánchez *
M. en I. Víctor Franco *
M. en I. Víctor Manuel Ortiz Martínez **
M. en I. Javier Osnaya Romero **
M. en I. Eliseo Carrizosa Elizondo **
M. en I. Juan César Luna Bahena ***
Participantes

**Elaborado para:
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA†**

NOVIEMBRE, 2014

* Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM
** Técnico académico, Instituto de Ingeniería, UNAM
*** Becario, Instituto de Ingeniería, UNAM
**** Consultor externo



ÍNDICE

9	DETERMINACIÓN DEL GASTO SUFICIENTE EN EL RÍO CARRIZAL PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	1
9.1	Introducción	1
9.1.1	Objetivo	2
9.1.2	Planteamiento del problema	2
9.1.3	Planteamiento de la solución del problema.....	4
9.1.4	Planteamiento del problema de diseño	5
9.1.5	Zona de estudio del modelo físico	7
9.2	Recopilación y procesamiento de información	7
9.3	Actualización del modelo físico incluyendo la estructura de margen derecha... 8	
9.4	Acondicionamiento del modelo físico a las condiciones actuales.	11
9.4.1	Alternativas de solución a la toma de agua potable del río Carrizal en estiaje. 11	
9.4.2	Determinación de niveles de operación de la estructura en estiaje.....	15
9.4.3	Determinación de las relaciones entre las cargas y los gastos en la estructura de control	16
9.4.4	Determinación de los gastos en el río Carrizal (estructura del Macayo) en relación con el río Mezcalapa	18
9.4.5	Cálculo numérico con un modelo unidimensional del ancho del cauce de estiaje. 20	
9.5	Pruebas en el modelo físico	24
9.6	Pruebas de calibración de un modelo numérico 3D (SSIIM).....	25
9.6.1	Resultados del cálculo numérico con un modelo 3D (SSIIM).....	25
9.7	Características, trazo y ubicación de los canales de servicio propuestos y las curvas de operación de las compuertas de la estructura de control.	35
9.8	Recomendaciones para el mantenimiento del canal de estiaje.	36



9.9	Conclusiones y recomendaciones	37
9.9.1	Conclusiones	37
9.9.2	Resumen de alternativas	39
B.1	Prueba para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, con un cauce de estiaje y abertura de compuertas de 1 m (ambos vertedores)	54
B.2	Prueba para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, con un cauce de estiaje y descarga libre (compuertas totalmente abiertas).....	55
B.3	Prueba para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, con un cauce de estiaje por margen izquierda y descarga libre.....	57
B.4	Prueba para $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$, con un cauce de estiaje por margen izquierda (eliminando canal de margen derecha) y descarga libre.....	62
B.5	Prueba para $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$, con un cauce de estiaje por margen izquierda (eliminando canal de margen derecha) y descarga libre.	69
B.6	Prueba para $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$, con un cauce de estiaje por margen izquierda (eliminando canal de margen derecha) y descarga libre.	74
B.7	Prueba para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, sin un cauce de estiaje y descarga libre.....	81
B.8	Prueba para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, sin un cauce de estiaje y descarga libre.....	85
B.9	Conclusiones	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 9.1	Planteamiento del problema.....	3
Figura 9.2	Zona de depósito de sedimento.	4
Figura 9.3	Zona representada en el modelo físico.	7
Figura 9.4	Plano de ubicación del modelo físico.....	9
Figura 9.5	Elementos del vertedor de margen derecha fabricados con una impresora 3D10	
Figura 9.6	Vertedor de margen derecha instalada en el modelo físico	11
Figura 9.7	Ubicación de las alternativas propuestas, (I+II) y sólo (II)	12
Figura 9.8.a	Ubicación de las alternativas propuestas por CONAGUA	12
Figura 9.9	Esquema con el funcionamiento del cauce de estiaje	14
Figura 9.10	Esquema del funcionamiento de la zona de la bifurcación en época de avenidas.	15
Figura 9.11	Datos de niveles y gastos en la estructura del Macayo	16
Figura 9.12	Datos de niveles y gastos en la estructura del Macayo	17

Figura 9.13 Relación de gastos en el Mezcalapa y en el Carrizal (en % del Mezcalapa) .	18
Figura 9.14 Relación de gastos en la bifurcación (CONAGUA).....	19
Figura 9.15 Relación de gastos en el Macayo y en el río Mezcalapa.....	19
Figura 9.16 Curva de Hjulstrom	21
Figura 9.17 Perfil del agua para 250 m ³ /s.....	22
Figura 9.18 Perfil del agua para 60 m ³ /s.....	23
Figura 9.19 Relación de niveles en la bifurcación y gastos por el canal de estiaje.....	24
Figura 9.20 Topografía	26
Figura 9.21 Isométrico de la batimetría. Abajo se encuentra la zona del Mezcalapa, por lo cual el río Carrizal quedaría a la derecha y se señala el puerto donde se iniciará el cauce de estiaje	27
Figura 9.22 Vectores de velocidad en el nivel del fondo	27
Figura 9.23 Velocidades horizontales en el nivel del fondo.....	28
Figura 9.24 Cambios en el nivel del fondo	29
Figura 9.25 Condiciones iniciales	30
Figura 9.26 Condiciones después de 10 días	31
Figura 9.27 Condiciones después de 20 días	32
Figura 9.28 Vectores de velocidad (nivel del fondo)	33
Figura 9.29 Isolíneas de velocidad (nivel del fondo)	33
Figura 9.30 Isolíneas de velocidad (nivel del fondo)	34
Figura 9.31 Cambios en el fondo después de la avenida.....	35
Figura 9.32 Ubicación del canal propuesto	36
Figura 9.33 Características geométricas del cauce propuesto.....	36
Figura 9.34 Zona del modelo físico con presencia de vegetación	42
Figura 9.35 Proceso de limpieza del modelo físico	42
Figura 9.36 Presencia de vegetación en el tanque de disipación.....	43
Figura 9.37 Casa de máquinas	43
Figura 9.38 Retiro de vegetación y limpieza del tanque de disipación	44
Figura 9.39 Trabajos de mantenimiento en tanques	44
Figura 9.40 Colocación de chaflanes para evitar fugas.....	45
Figura 9.41 Revisión y nivelación del terreno.....	45
Figura 9.42 Construcción de la margen derecha.....	46
Figura 9.43 Construcción de elementos para canal de margen derecha.....	47
Figura 9.44 Compactación para nueva topografía	47
Figura 9.45 Reconfiguración del modelo físico	48
Figura 9.46 Detalle de reconfiguración del modelo físico	48
Figura 9.47 Elementos impresos canal margen derecha	49
Figura 9.48 Configuración estructuras margen derecha e izquierda	49
Figura 9.49 Estructura de margen derecha terminada	50
Figura 9.50 Configuración con canal piloto	50
Figura 9.51 Funcionamiento general.....	51
Figura 9.52 Canal piloto después de la prueba	51
Figura 9.53 Sección de control	52

Figura 9.54 Colocación de trazador para observar el arrastre de sedimento	52
Figura 9.55 Configuración final retirando canales piloto	53
Figura 9.56 Vertedores compuertas con abertura de 1 m	55
Figura 9.57 Configuración de cauces de estiaje (vista desde aguas abajo)	56
Figura 9.58 Prueba con $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ y configuración de cauces de estiaje de la figura anterior (con agua, vista desde aguas arriba)	56
Figura 9.59 Ubicación de canal piloto de margen izquierda	57
Figura 9.60 Configuración de canal de margen izquierda	58
Figura 9.61 Colocación de Trazador	59
Figura 9.62 Tiempo: 0 minutos	59
Figura 9.63 Tiempo: 10 minutos	60
Figura 9.64 Tiempo: 15 minutos	60
Figura 9.65 Tiempo: 20 minutos	61
Figura 9.66 Tiempo: 25 minutos	61
Figura 9.67 Vista general del modelo para la condición de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ hacia el carrizal	62
Figura 9.68 $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=0 \text{ min}$	63
Figura 9.69 $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=10 \text{ min}$	63
Figura 9.70 $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=20 \text{ min}$	64
Figura 9.71 $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=30 \text{ min}$	64
Figura 9.72 $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=40 \text{ min}$	65
Figura 9.73 $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=65 \text{ min}$	65
Figura 9.74 Imagen con cámara sumergida $t=0 \text{ s}$	66
Figura 9.75 Imagen con cámara sumergida $t=11 \text{ s}$	67
Figura 9.76 Imagen con cámara sumergida $t=3 \text{ min}$	67
Figura 9.77 Imagen con cámara sumergida $t=5 \text{ min}$	68
Figura 9.78 Imagen con cámara sumergida $t=12 \text{ min}$	68
Figura 9.79 Vista general del modelo para la condición de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ hacia el Carrizal	69
Figura 9.80 $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=0 \text{ min}$	70
Figura 9.81 $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=10 \text{ min}$	70
Figura 9.82 $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=20 \text{ min}$	71
Figura 9.83 $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=30 \text{ min}$	71
Figura 9.84 $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=40 \text{ min}$	72
Figura 9.85 $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=50 \text{ min}$	72
Figura 9.86 $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=60 \text{ min}$	73
Figura 9.87 $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=80 \text{ min}$	74
Figura 9.88 Vista general del modelo para la condición de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ hacia el Carrizal	75
Figura 9.89 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=0 \text{ min}$	76
Figura 9.90 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=5 \text{ min}$	76
Figura 9.91 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=10 \text{ min}$	77
Figura 9.92 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=15 \text{ min}$	77
Figura 9.93 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=20 \text{ min}$	78
Figura 9.94 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=25 \text{ min}$	78
Figura 9.95 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=5 \text{ min}$	79
Figura 9.96 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=2 \text{ min}$	79



Figura 9.97 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=5 \text{ min}$	80
Figura 9.98 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ $t=10 \text{ min}$	80
Figura 9.99 Reconfiguración de la prueba sin paredes	81
Figura 9.100 Cauze de estiaje construido en seco sin muros rígidos.....	82
Figura 9.101 Prueba del cauce de estiaje construido en seco sin muros rígidos al inicio de la prueba.....	83
Figura 9.102 Prueba del cauce de estiaje construido en seco sin muros rígidos, después de 40 min.....	84
Figura 9.103 Configuración del cauce de estiaje construido en seco sin muros rígidos al final de la prueba	85
Figura 9.104 Simulación del dragado con bomba sumergible	86
Figura 9.105 Descarga de la bomba sumergible (nótese la gran descarga de sedimento)	86
Figura 9.106 Ejemplo de malla alterna.....	92
Figura 9.107 Algoritmo SIMPLE.....	93
Figura 9.108 Geometría de la bifurcación	97
Figura 9.109 Tabla de resultados.....	98
Figura 9.110 Tabla de resultados.....	99
Figura 9.111 Mapa de distribución.....	99
Figura 9.112 Tabla de resultados.....	100
Figura 9.113 Tabla de resultados.....	101
Figura 9.114 Mapa de distribución del fondo	102
Figura 9.115 Tabla de resultados.....	103
Figura 9.116 Tabla de resultados.....	104
Figura 9.117 Mapa de distribución de velocidades	105
Figura 9.118 Tabla de resultados.....	106
Figura 9.119 Mapa de distribución del fondo	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 9.1 Variables calculados con el modelo SSIIM.....	90
---	----

ACCIONES PARA EL MAYOR APROVECHAMIENTO HIDRAULICO EN EL ESTADO

9 DETERMINACIÓN DEL GASTO SUFICIENTE EN EL RÍO CARRIZAL PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

9.1 Introducción

A partir de 1999, cuando se desbordó el río Carrizal en la Ciudad de Villahermosa, se consideró la posibilidad de construir una estructura que controlara los gastos provenientes de la bifurcación del río Mezcalapa (Samaria y Carrizal). Esto fue finalmente logrado en el año de 2012, cuando se terminó la construcción de la estructura de control denominada el Macayo que consiste de una cortina y dos baterías de compuertas. Sin embargo, desde su concepción, se sabía que uno de los problemas importantes sería el relacionado con el sedimento, pues una estructura con éstas características, limitaría el paso del sedimento, causando su acumulación en el tramo de llegada, ya que las compuertas causarían un aumento en los tirantes, la disminución de la velocidad y por lo tanto el depósito de sedimento en dicha zona.

Una de las principales repercusiones que ha tenido el depósito del material sólido en el tramo de llegada a la estructura, es que en el estiaje, los niveles del agua en la bifurcación son bajos, provocando que no ingrese suficiente agua a la estructura, por lo tanto los niveles son bajos en el río Carrizal también, e impiden el funcionamiento eficiente de las tomas de agua de los sistemas de bombeo de agua potable para la Ciudad de Villahermosa.

Ante esta situación la, CONAGUA solicitó al II, UNAM, el estudio del problema de sedimentación del tramo de acceso a la estructura, para encontrar una solución que garantizara durante el estiaje, el suministro de agua potable a la Ciudad de Villahermosa. **En otras palabras, proponer la solución para “garantizar la determinación del gasto suficiente en el río Carrizal para el abastecimiento de agua potable”.**

CONAGUA
YUCATÁN


9.1.1 Objetivo

Proponer el trazo de un canal o canales, para que aún en la época de estiaje, exista un gasto por el río Carrizal, suficiente para el abastecimiento de agua potable, empleando pruebas en un modelo físico y un análisis con un modelo matemático.

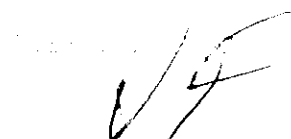
9.1.2 Planteamiento del problema

Durante la época de lluvias del año de 1999, se observó un cambio en la distribución de gastos del río Mezcalapa en la bifurcación Samaria - Carrizal. En 1997 del aporte total del río Mezcalapa, el río Carrizal transportaba entorno al 34% y el río Samaria el 66 %. Sin embargo, después de octubre de 1999, el río Carrizal (para un gasto en el río Mezcalapa del orden de 1500 m³/s en la época de estiaje) transportó aproximadamente el 47 % y el río Samaria el otro 53 %. Esto significa que aumentó el gasto por el río Carrizal.

Lo anterior tiene una gran importancia porque el río Carrizal pasa por la ciudad de Villahermosa, y dado que en 1999 y en 2007 esta ciudad sufrió importantes inundaciones por el desbordamiento del río Carrizal, por lo que fue necesario construir la estructura con compuertas.

De acuerdo con las inspecciones realizadas en campo y los levantamientos realizados, el motivo que explicaría mejor el cambio de la proporción de gastos, serían los grandes depósitos de sedimento en el río Samaria en el tramo de la bifurcación. Aparentemente esto se debe a la alta carga de sedimentos que transporta el río Mezcalapa y al remanso ocasionado por las condiciones de aguas abajo (en el río Samaria). El periodo de avenidas extraordinarias de septiembre y octubre de 1999 acentuó este problema y causó el incremento de gastos en el río Carrizal.

Para proteger a la Ciudad de Villahermosa la CONAGUA construyó la obra de control en el río Carrizal, aguas abajo pero cerca de la confluencia, para limitar la derivación del gasto del río Mezcalapa. Sin embargo esto produjo una reducción substancial del sedimento transportado por el río Carrizal, con lo cual se alteraron su características morfodinámicas y probablemente se produjeron efectos no deseados, tales como el ataque a las márgenes con la consecuente falla de taludes.



Para evitar la falta de sedimento en el río Carrizal se han propuesto algunas soluciones como son la alimentación artificial de arena (camiones o bombeo) pero se juzga puede ser una alternativa muy cara. Evidentemente la mejor solución sería propiciar el paso del sedimento hacia el río Carrizal a través de la estructura de control. Sin embargo, el problema inmediato ha sido la acumulación del sedimento en el tramo de llegada a la estructura de compuertas, lo cual en la época de estiaje ha puesto en crisis el suministro de agua.

A partir del año 2012 en las épocas de estiaje se han presentado problemas para abastecer de agua potable a la Ciudad de Villahermosa, Tabasco. Esto es debido a que al entrar en operación la obra de control del Macayo, ésta ha causado el depósito de sedimento en el tramo de acceso a la estructura (ver Figura 9.1 y Figura 9.2), por cual cuando los gastos provenientes del río Mezcalapa son bajos los tirantes de llegada a la estructura también lo son, pero como el nivel del sedimento es alto, no alcanza a penetrar suficiente agua al tramo de acceso y entonces en volumen y niveles, no son suficientemente altos para el funcionamiento de los sistemas de bombeo.

Se hace notar que en el resto del año, cuando los niveles del agua en el río Mezcalapa son altos, no existe el problema de abastecimiento.

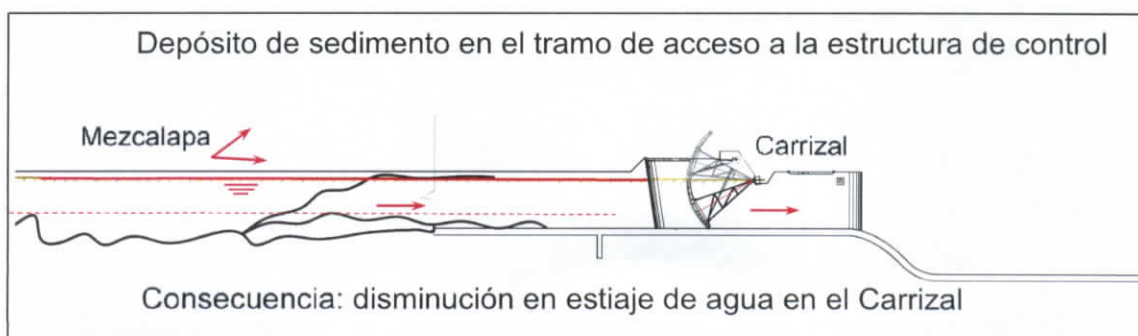


Figura 9.1 Planteamiento del problema.

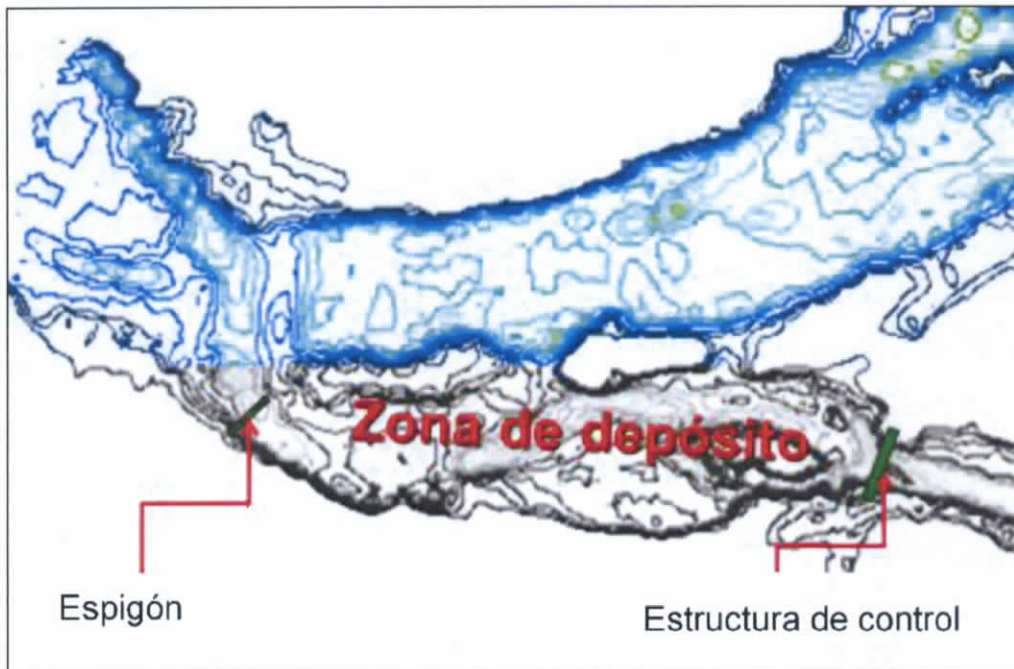


Figura 9.2 Zona de depósito de sedimento.

9.1.3 Planteamiento de la solución del problema

Para resolver el problema se plantea la necesidad de dragar un cauce de estiaje en la aproximación a la estructura de control, que permita, cuando los niveles en el río Mezcalapa sean bajos, alimentar el gasto mínimo para satisfacer las necesidades de agua de la ciudad.


Por supuesto una solución trivial sería solicitar a la CFE que en las descargas de la presa Peñitas, siempre extraiga un gasto tal que los niveles a la entrada del Macayo permitan el suministro del gasto mínimo, pero esto no parece razonable dadas las políticas de operación en una hidroeléctrica. Esto además de que en realidad el problema se ha generado por el depósito de sedimento, el cual siempre se supo que iba a ocurrir, desde el proyecto de la obra por el tipo de estructura seleccionada. Ahora bien esta "solución" en realidad es transitoria, ya que el problema de sedimentación en el tramo de acceso no se detiene con este tipo de procedimiento.

Para resolver el problema en el tramo de acceso presenta diferentes variantes, por ejemplo:

- a) Una primera variante sería dragar un canal desde la bifurcación hasta la estructura de control para provocar que con tirantes bajos penetre el gasto necesario (durante el estiaje). El inconveniente de esta alternativa es que el canal sería muy largo más de 3 km y sería muy difícil mantener el flujo de un año a otro, independientemente de que seguramente el costo del dragado sería muy alto. Por supuesto, habría que diseñarlo para garantizar el flujo sin depósito de sedimento, lo cual además está ligado al procedimiento de operación de las compuertas.
- b) La alternativa más simple al caso anterior, sería dragar un canal en el puerto más cercano a la estructura de control con la misma idea anterior. Las ventajas de esta alternativa sería que el tramo de dragado se reduce a 2 km y su mantenimiento sería más barato. Ahora bien, también en este caso sería conveniente que el canal fuera autolimpiable, para reducir los costos de mantenimiento y garantizar su buen funcionamiento.
- c) Como ya mencionó uno de los puntos fundamentales para lograr el desazolve automático de la estructura es la operación de las compuertas. En este aspecto, al parecer durante el tiempo en que lleva en operación la estructura, no se ha operado ésta con descarga libre, lo cual ha contribuido al azolve del tramo de acceso. La recomendación que a este respecto se hizo durante el diseño de la estructura, fue que durante el estiaje las compuertas se mantuvieran siempre abiertas para favorecer el transporte de sedimento y que durante avenidas se operaran como conviniera a la CONAGUA.

9.1.4 Planteamiento del problema de diseño

Aceptando que el lineamiento general de la solución está dado por lo establecido en el inciso b) del planteamiento del problema. Entonces las actividades a realizar son las siguientes:

2011


- a) Determinar el nivel de operación y los gastos de la estructura en estiaje. Esto se realizará de los datos históricos de la variación de niveles y gastos en la bifurcación.
- b) Determinar el trazo en planta de un canal piloto para la toma de agua en estiaje. Aquí se determinará el trazo más corto posible para que el mantenimiento, si fuera indispensable, pudiera realizarse al menor costo.
- c) Determinar las velocidades mínimas de arrastre de material sólido para garantizar la auto limpieza del canal piloto y que pueda conducir el gasto mínimo requerido en el estiaje. Es en este caso en que es necesario realizar las pruebas en un **modelo físico** que permita probar el ancho (área) y la pendiente del canal de estiaje capaz de remover el sedimento.
- d) Proponer otras condiciones diferentes a las del diseño del cauce de estiaje, para conocer las implicaciones de este cauce en el paso de avenidas. En estas condiciones se calibrará un **modelo numérico** (SSIIM) para simular las diferentes condiciones de funcionamiento que el modelo físico ya no pudiera considerar.

Proponer las condiciones de operación de las compuertas para garantizar la limpieza del canal piloto de la estructura.

Conviene aquí explicar el porqué de la necesidad de emplear un modelo físico y otro numérico. Principalmente porque los problemas donde se tratan problemas de agua con sedimentos son difíciles de abordar y no es posible emplear sólo una herramienta para resolverlos. El modelo físico sólo da una idea aproximada del comportamiento porque es distorsionado y el modelo matemático, es más preciso, pero necesita ser calibrado para garantizar la similitud entre los cálculos y la realidad.

9.1.5 Zona de estudio del modelo físico

En el año 2008 y 2011 (Ref. Gracia, 2008-2012, el Instituto de Ingeniería de la UNAM trabajó en el modelo físico de la Estructura de Control de margen izquierda y derecha sobre el río Carrizal, respectivamente.

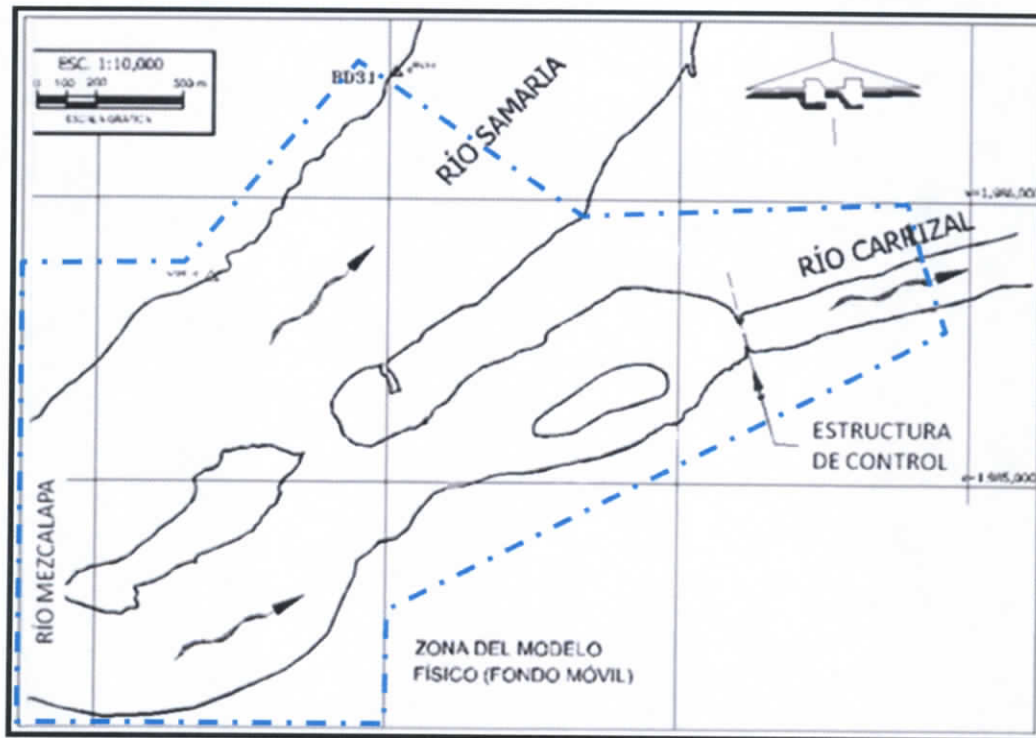


Figura 9.3 Zona representada en el modelo físico.

9.2 Recopilación y procesamiento de información

Se solicitó a la Comisión Nacional del Agua información respecto a:

- Topografía y/o batimetría existente de la zona de la bifurcación.
- Datos de mediciones en el estiaje y lluvia de gastos y niveles en la zona de la bifurcación (estas mediciones deben de considerar gastos y niveles en los ríos: Mezcalapa, Samaria, Carrizal y en las compuertas de margen izquierda y derecha de la estructura Macayo).
- Planos finales de las estructuras de compuertas en margen izquierda y margen derecha.

- Las políticas de operación de las compuertas, así como los niveles de funcionamiento y apertura de las compuertas.

Todo ello con el fin de contar con información suficiente para la actualización y acondicionamiento del modelo físico. La información sirvió principalmente para conformar de nuevo el modelo físico, construir la obra de margen derecha y alimentar al programa de simulación (numérico).

9.3 Actualización del modelo físico incluyendo la estructura de margen derecha

Para ello, se procedió a la limpieza del sitio donde se ubica el modelo físico de fondo móvil en el laboratorio de Hidráulica del II, UNAM (Ver anexo A.9.1). Se recuerda que se trata de un modelo distorsionado (esc. hor. 1:120, esc. vert. 1:34.28, lo cual implica una distorsión de 3.5, construido al aire libre).

Desde el año de 2009 se construyó un modelo físico (Figura 9.3) de la bifurcación de fondo móvil y distorsionado para estudiar el comportamiento del sedimento e intentar soluciones al problema de sedimentación en la bifurcación. Este modelo se ubica en el laboratorio de Hidráulica del II, UNAM, sin embargo en la versión disponible todavía no se contaba con el diseño de la estructura de compuertas de margen derecha. En estas circunstancias, se consideró apropiado emplear dicho modelo para estudiar el desazolve del tramo de acceso a la estructura de control, para lo cual fue necesario añadir el sistema de compuertas de margen derecha.

El modelo cubre un área aproximada de 900 m², tiene tres aforadores de gasto, uno a la entrada en lo que representa al río Mezcalapa, otro en la salida del río Carrizal y otro en la del río Samaria. En el anexo A.9.1 se incluye un álbum de fotos de las adecuaciones.



ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA
POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA
(PROHTAB)

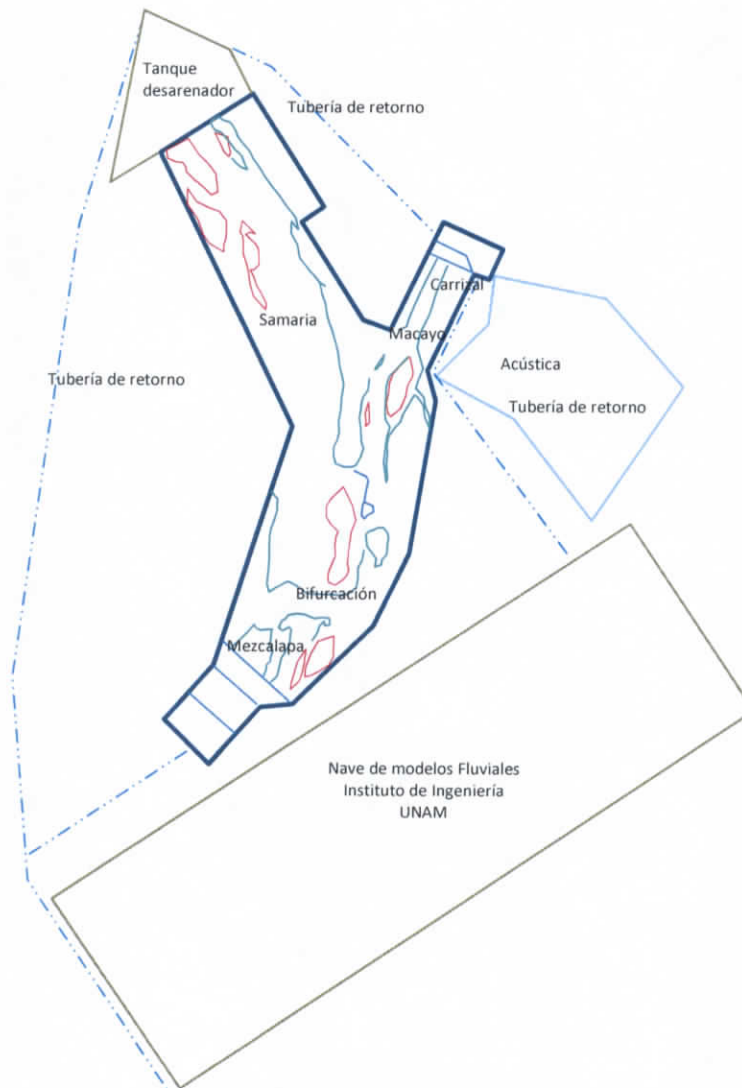


Figura 9.4 Plano de ubicación del modelo físico.

El problema más importante en un modelo de este tipo es la distorsión, ya que si bien ello permite mejorar la representación del comportamiento del material sólido, pero distorsiona mucho los efectos locales. Es necesario señalar que el interés básico del modelo distorsionado y de fondo móvil, es el determinar el comportamiento del sedimento, para probar soluciones alternativas donde está involucrado el transporte sólido.

La nueva estructura incluida en el modelo es el vertedor de margen derecha fue construida en PLA y acrílico, se empleó una impresora 3D (Manufactura Aditiva) para su fabricación. Luego de ser terminados los acabados finales (pulido y pintado) se instaló en el modelo físico. En la Figura 9.5 se muestran algunas partes de la estructura de margen derecha recién fabricadas con la impresora 3D y en la Figura 9.6 la estructura de margen derecha completa ya instalada en el modelo físico.



Figura 9.5 Elementos del vertedor de margen derecha fabricados con una impresora 3D



Figura 9.6 Vertedor de margen derecha instalada en el modelo físico

9.4 Acondicionamiento del modelo físico a las condiciones actuales.

Con la topografía actual, se procedió a reconfigurar el modelo físico para ajustarse a las condiciones actuales. En el anexo A.9.1 se muestra diferentes aspectos de tal conformación. Dentro de los cambios más importantes estuvo la inclusión de los posibles canales de estiaje, que esencialmente fueron dos y que a continuación se presentan.

9.4.1 Alternativas de solución a la toma de agua potable del río Carrizal en estiaje.

En la Figura 9.7 Ubicación de las alternativas propuestas, (I+II) y sólo (II)1 se muestra una aproximación de las dos alternativas principales, para suministrar el agua potable en estiaje. Por un lado está la construcción de los cauces piloto (canales) I y II (I+II), es la más larga y se trata de un solo encauzamiento que va de la zona donde se encuentra el espigón hasta la estructura. Y en segundo lugar la alternativa II que es un cauce piloto que va desde un puerto (el más cercano) hasta la estructura.

Adicionalmente, en la Fig. 9.7.a se muestran las alternativas propuestas originalmente por CONAGUA, que como puede observarse, las de margen izquierda son similares al indicadas en el párrafo anterior.

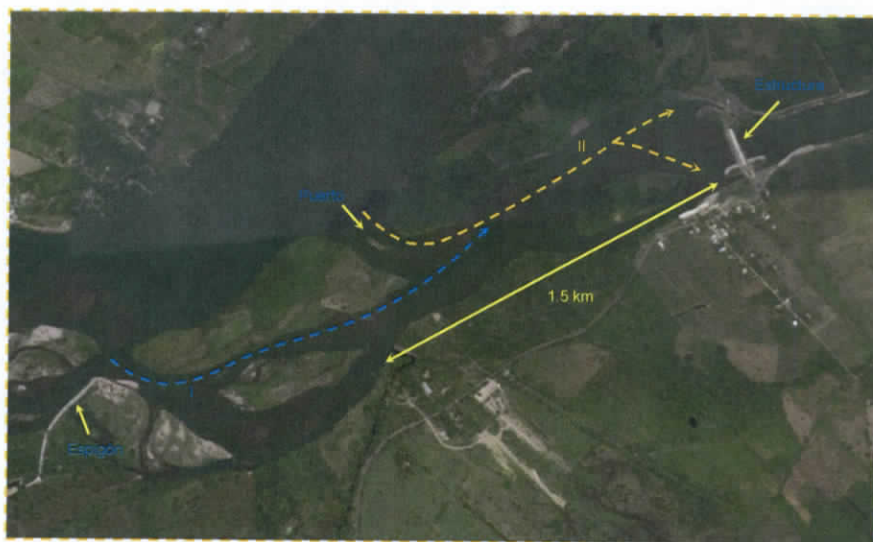


Figura 9.7 Ubicación de las alternativas propuestas, (I+II) y sólo (II)

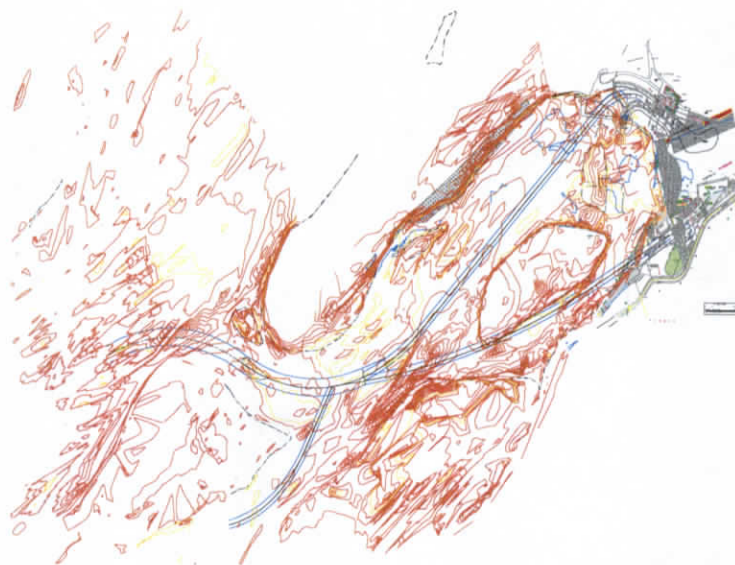


Figura 9.8.a Ubicación de las alternativas propuestas por CONAGUA

En cualquiera de los casos anteriores es muy importante señalar que las paredes de los cauces de estiaje deben ser construidas garantizando su estabilidad, por ejemplo:

- a) El cauce piloto puede ser excavado en el lecho propio del río, es decir se puede construir dragando simplemente el material del fondo por lo cual los taludes serán del mismo material del fondo del río. Esta alternativa tiene la ventaja de ser barata, aunque la estabilidad de la sección transversal es difícil de mantener, porque no se sabe cuán estables serían los taludes de las márgenes. Considérese que en estiaje se supone que el agua estará contenida en el cauce y mantendrá su sección debido al propio arrastre del flujo, pero en época de avenidas quedará sumergido totalmente con tirantes sensiblemente más altos.
- b) Otra alternativa es construir paredes que fijen el cauce para evitar que se modifique la sección transversal y están pueden ser bordos, paredes impermeables, paredes permeables (troncos con mallas rellenas), etc.
- c) No se considera adecuada la posibilidad de construir espigones porque estos serían muy largos y entonces es preferible la construcción de muros o paredes.

Para terminar de definir las condiciones actuales del modelo, es necesario antes definir las condiciones de gastos y niveles de diseño, para lo cual a continuación se presentan los cálculos siguientes.

En las Figura 9.9 y Figura 9.10 se presentan dos esquemas con fines de entender más fácilmente el funcionamiento del cauce de estiaje propuesto. En la primera se muestra el funcionamiento del cauce (de estiaje) precisamente en el estiaje. En la segunda se ilustra el funcionamiento de todo el sistema en época de avenidas, incluyendo el cauce de estiaje. Nótese que la complicación del cálculo y lo que hace indispensable la simulación numérica tridimensional, es precisamente por este segundo caso, ya que el flujo al cauce de estiaje ocurre también por la parte superior del mismo y a todo lo largo.

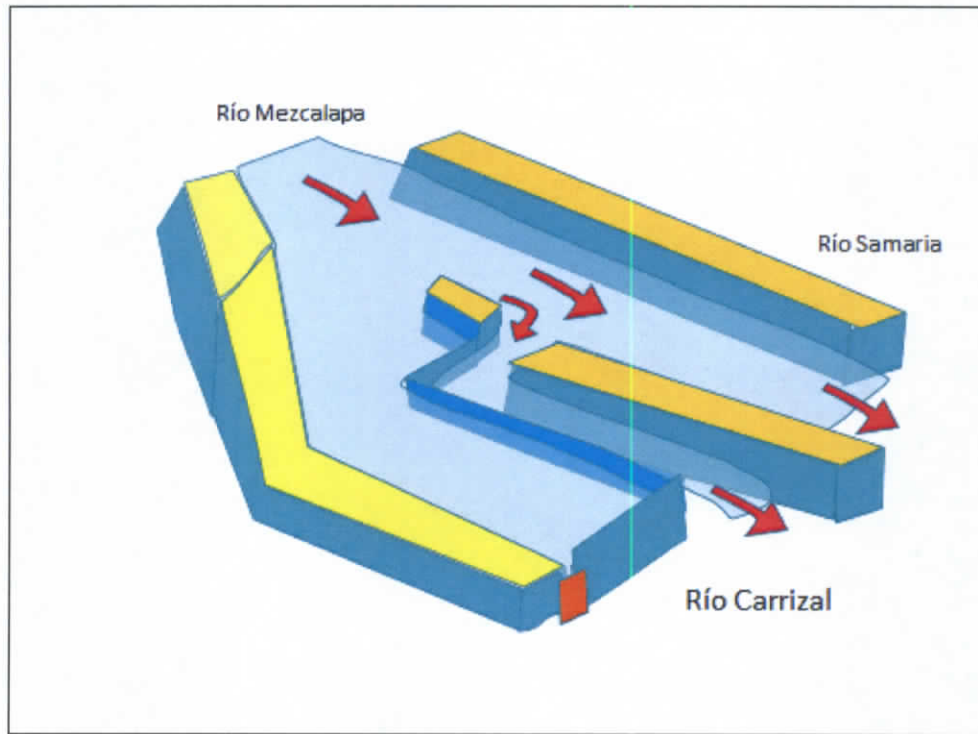


Figura 9.9 Esquema con el funcionamiento del cauce de estiaje

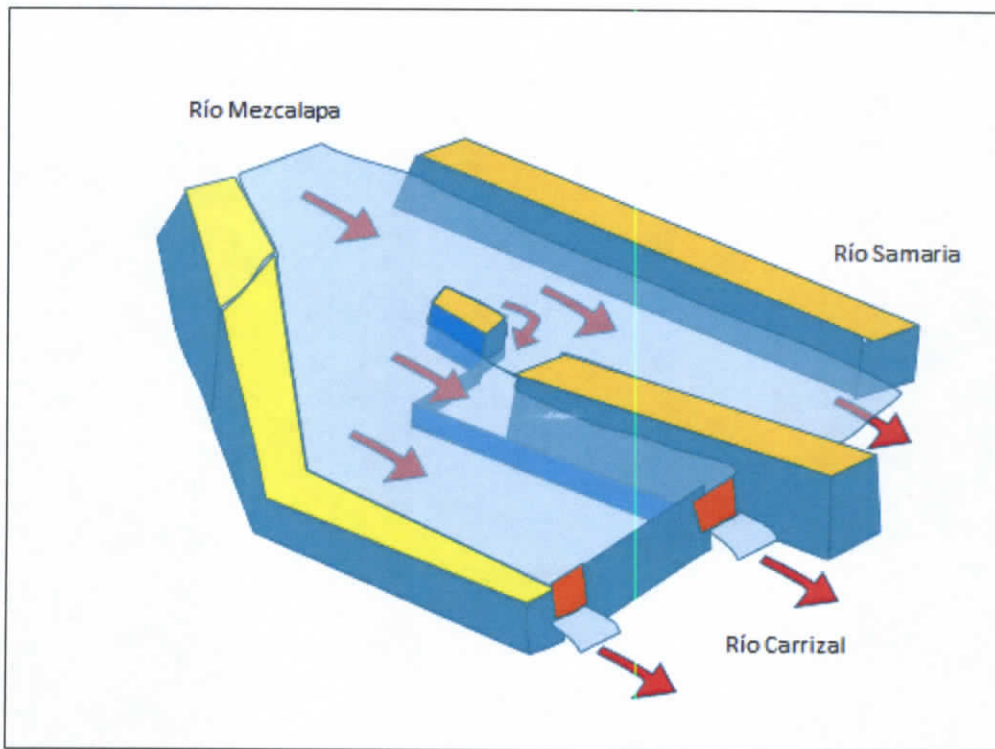


Figura 9.10 Esquema del funcionamiento de la zona de la bifurcación en época de avenidas.

9.4.2 Determinación de niveles de operación de la estructura en estiaje.

En la Figura 9.11 se muestran los niveles de operación en la estructura de control durante los tres últimos años (2013 - mayo 2014). Como puede considerarse que la fluctuación media ocurre entre 14.80 y 15.60 msnm por lo cual se puede proponer un **gasto de 250 m³/s** para considerarlo como el de diseño. Se sabe que la operación generalmente se realiza con las compuertas parcialmente abiertas, por lo cual este nivel es representativo del periodo de estiaje. Se propone entonces emplear este rango para representar el funcionamiento de la estructura en tales condiciones. Evidentemente el nivel en la bifurcación será un poco mayor.

Se sabe, por experiencias anteriores, que el gasto mínimo con el cual pueden funcionar las tomas de agua potable es de 60 m³/s, por lo cual podría considerarse este como el

gasto mínimo. Nótese que el nivel para este gasto probablemente sea a rededor del nivel 13.5 msnm (en la estructura).

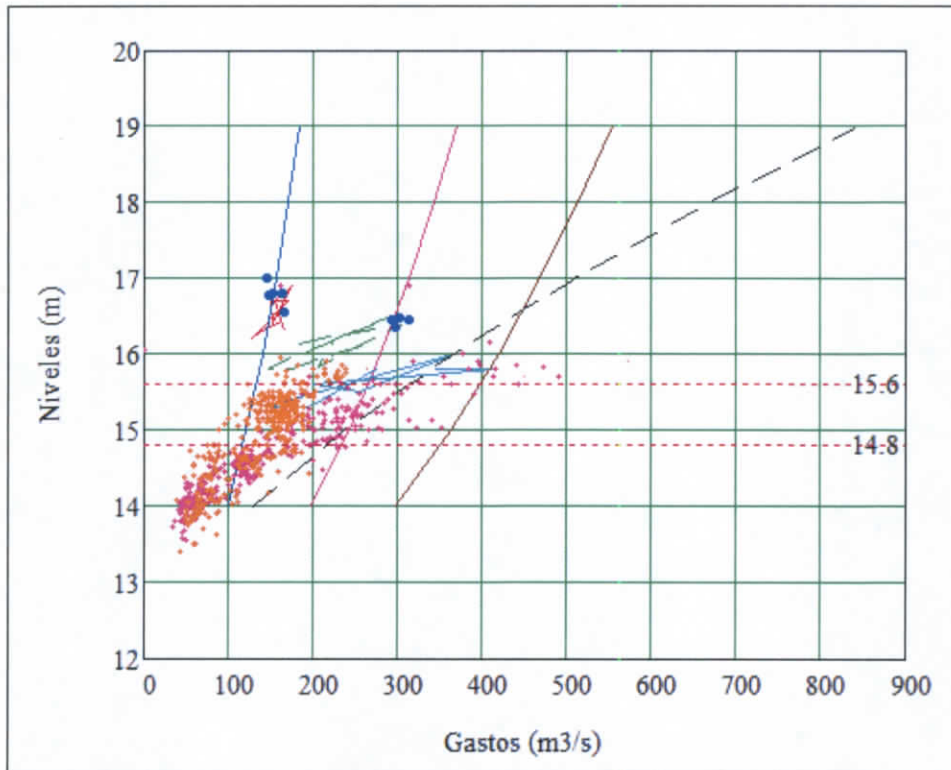


Figura 9.11 Datos de niveles y gastos en la estructura del Macayo

En la misma figura se han incluido cuatro líneas: una con líneas intermitentes que corresponde a la estructura funcionando con las compuertas totalmente abiertas y tres más "verticales" que corresponden, de izquierda a derecha, a aberturas de compuertas de 1, 2 y 3 m. A continuación se describirá como se determinó la gráfica de la Figura 9.11.

9.4.3 Determinación de las relaciones entre las cargas y los gastos en la estructura de control

La CONAGUA proporcionó información para determinar el comportamiento de las compuertas en el Macayo. En la Figura 9.12 se presenta en forma gráfica dicha información presentada para una compuerta.

Para determinar la relación histórica entre los niveles en el Macayo y los gastos descargados, se emplearon los datos históricos de los niveles en la estructura y los gastos diarios registrados en la estación González de CONAGUA. La información empleada de los gastos, fue la correspondiente al mismo período de los niveles en la estructura. En la Figura 9.12 se muestra esta relación y la obtenida con las mediciones de la Figura 9.11. Como se puede observar, la línea continua más tendida corresponde al funcionamiento de las compuertas suponiendo que están completamente abiertas, y las punteadas corresponden al funcionamiento de la estructura con diferentes grados de abertura. Nótese que la aproximación empleada permite interpretar bien a las mediciones del prototipo.

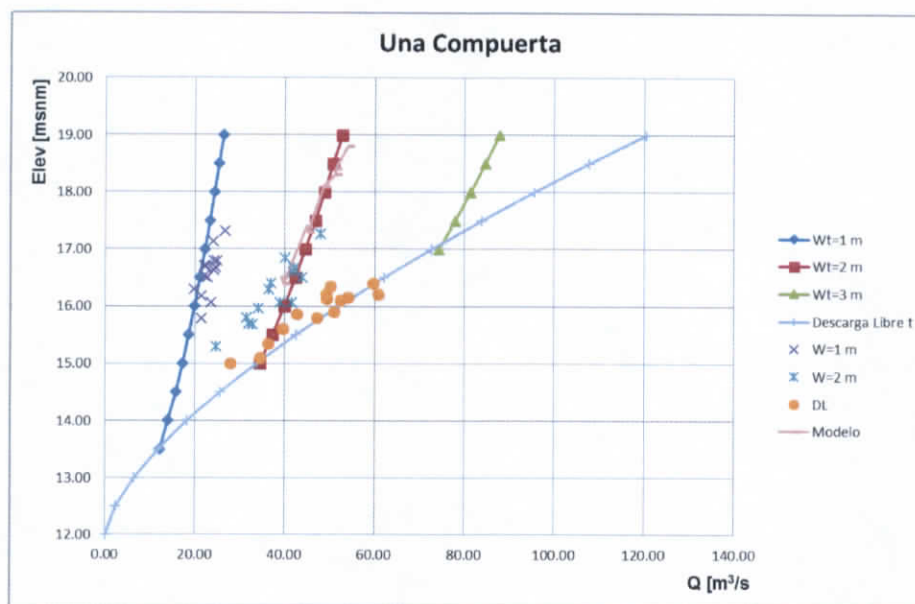


Figura 9.12 Datos de niveles y gastos en la estructura del Macayo

Conviene señalar que la aproximación anterior se considera satisfactoria porque las mediciones de gastos en la estación González, no necesariamente se realizan a la misma hora en que se miden los niveles en la estructura del Macayo y como se encuentran a varios kilómetros de distancia entonces su representatividad es sólo para periodos de largo plazo, lo cual es suficiente para este estudio.

9.4.4 Determinación de los gastos en el río Carrizal (estructura del Macayo) en relación con el río Mezcalapa

En la Figura 9.13 se muestra la relación de gastos entre los gastos del Mezcalapa (2012-2014) (eje horizontal) y los datos de gastos en el Carrizal (estación González) (eje vertical en % del Mezcalapa). Como se puede observar existe una gran dispersión de los puntos, que sin embargo se explica por el manejo de las compuertas de la estructura de control.

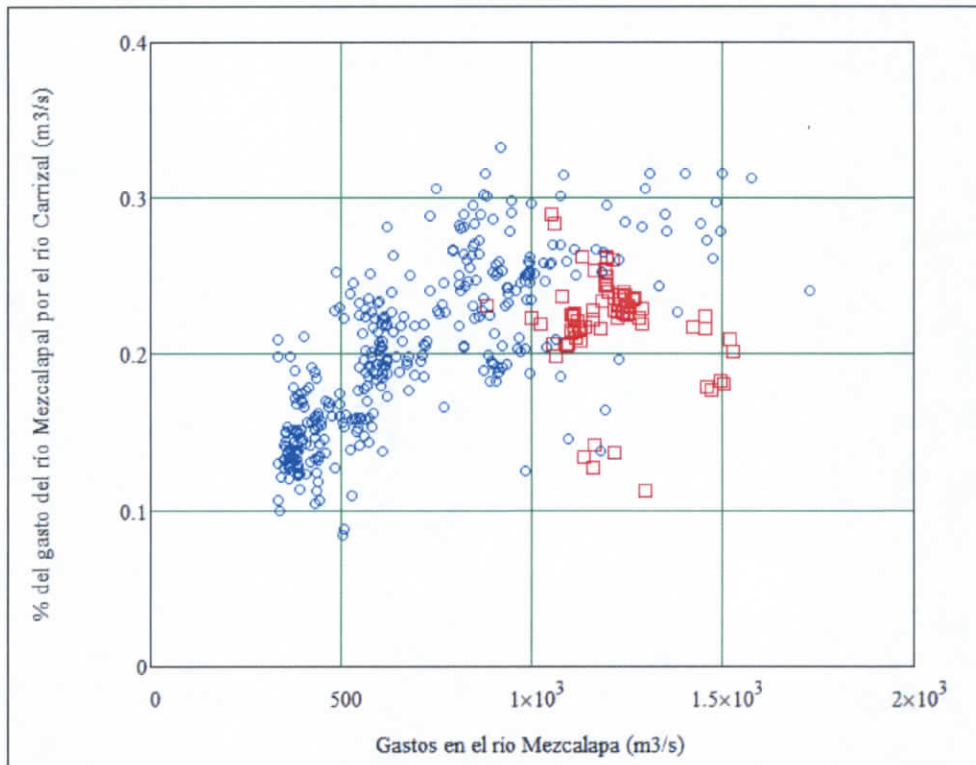


Figura 9.13 Relación de gastos en el Mezcalapa y en el Carrizal (en % del Mezcalapa)

(Los círculos corresponden al año 2013 y los cuadrados a 2014).

En la Figura 9.14 se ha reproducido una versión presentada por CONAGUA de la gráfica de anterior (Figura 9.13) para fines comparativos. Los puntos dentro del recuadro punteado en la Figura 9.14 corresponden a los puntos de gráfica de la Figura 9.13, nótese que son muy similares las áreas graficadas en ambas figuras.

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)

Se hace notar que en la gráfica de la Figura 9.14 el comportamiento anterior a la construcción de la estructura, es totalmente diferente a la actual y que no puede haber ninguna similitud por ser concepciones totalmente diferentes.

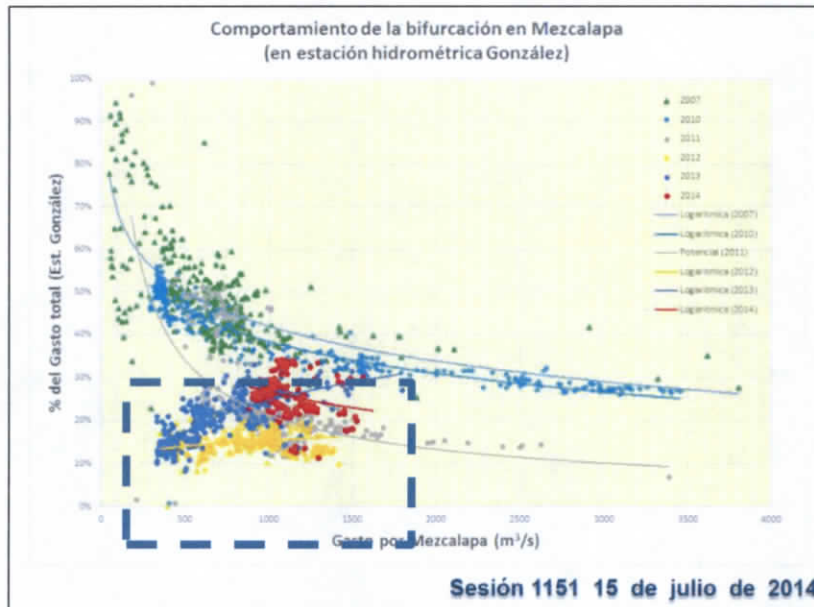


Figura 9.14 Relación de gastos en la bifurcación (CONAGUA).

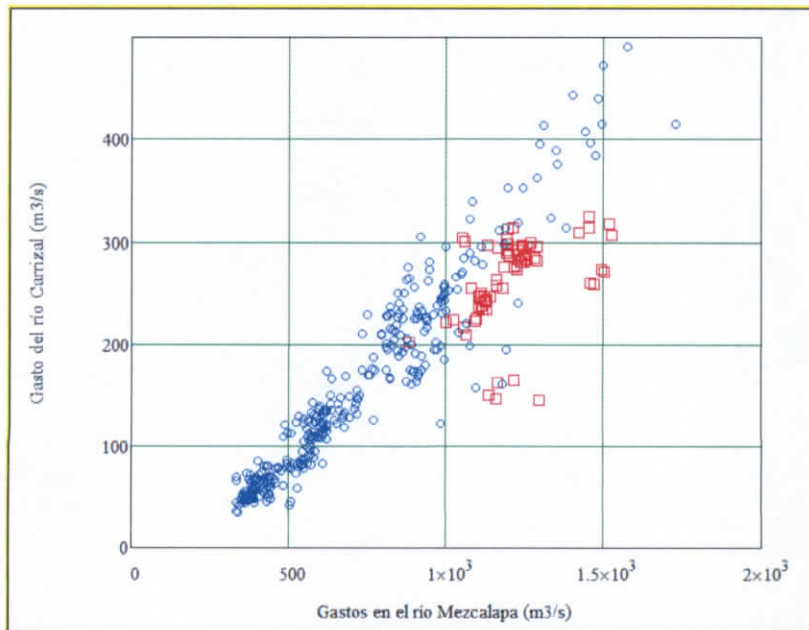


Figura 9.15 Relación de gastos en el Macayo y en el río Mezcalapa

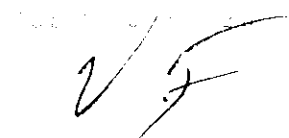
En la Figura 9.15 se presenta la misma información que en la Figura 9.13, pero en el eje vertical se presentan los gastos en el Macayo en m^3/s . Se puede observar que existe un rango entre 200 y 300 m^3/s donde generalmente opera la estructura. **Esto lleva a comprobar el gasto de diseño de 250 m^3/s con el nivel variando entre 14.80 y 15.60 msnm para la operación en estiaje y garantizar el suministro de agua potable.** Esto implica, según la misma gráfica, a requerir un gasto entre 1000 y 1300 m^3/s por el Mezcalapa para proporcionar ese gasto.

Se hace notar que la gráfica de la Figura 9.15 dependerá de la cantidad de azolve en el tramo de llegada a la estructura de control. Por lo tanto, si aumenta dicho depósito, como probablemente ocurra en el futuro, cambiarán las relaciones de gastos.

Conviene señalar que los gastos del río Mezcalapa se obtuvieron sumando los gastos en la estación González y en la estación Samaria, nuevamente la gran distancia entre ambas estaciones y la diferencia de los momentos de la toma de muestras hacen que los resultados de la Figura 9.11 sólo sea una aproximación, sin embargo, suficiente para los fines de este trabajo.

9.4.5 Cálculo numérico con un modelo unidimensional del ancho del cauce de estiaje.

Para tener una primera aproximación del posible funcionamiento hidráulico de la alternativa I + II se realizó el cálculo de la manera tradicional, es decir, calculando el perfil desde las compuertas (totalmente abiertas) hasta el sitio donde se encuentra el espigón (aprox. 2.7 km). El resultado obtenido es que con un cauce de 40 m de ancho de base (sección trapecial con talud de 1:3), se pueden transitar 250 m^3/s , **teniendo un nivel a la entrada de la bifurcación de 16.1 msnm** con una velocidad de 1.6 m/s. Considerando que la velocidad mínima para que exista arrastre es de 0.45 m/s para un material con $d_{50} = 0.0004$ m, (diámetro del material del cauce), entonces el cauce podrá limpiarse de forma automática y cumple con las condiciones de funcionamiento.



Como complemento a lo anterior en la Figura 9.16 se muestra la curva de Hjulstrom (Miedma S A, 2010 118) que permite determinar las velocidades a partir de las cuales ocurre la erosión del cauce. Como se puede observar dicha velocidad depende de la granulometría del material, sin embargo puede decirse que su **valor mínimo es de 0.1 m/s** en el rango de las arenas. Este valor permite tener una idea del límite inferior en el cual empieza el movimiento del sedimento.

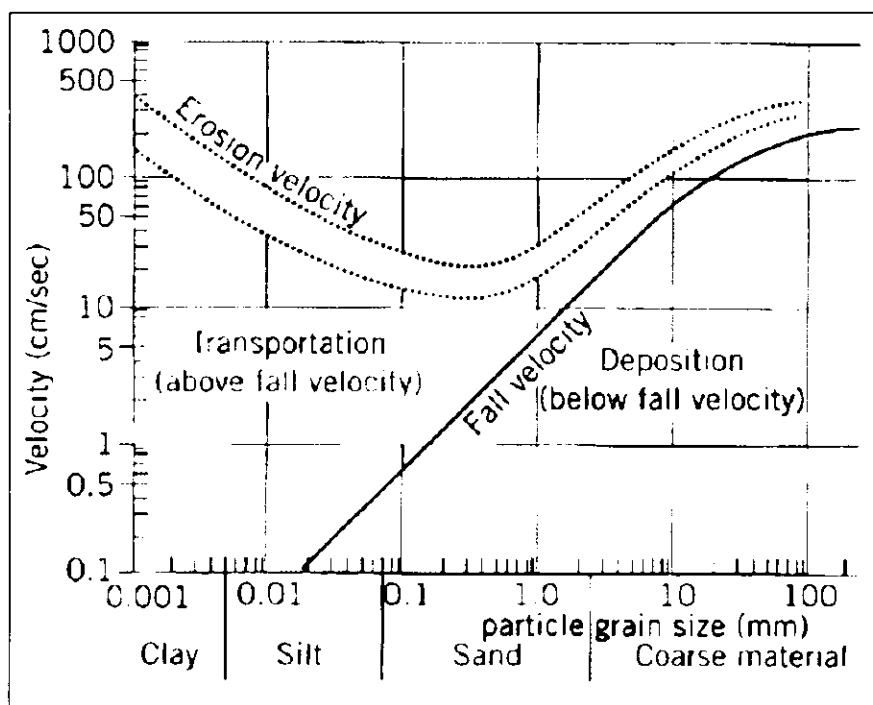


Figura 9.16 Curva de Hjulstrom

Para tener una primera aproximación del posible funcionamiento de la alternativa II también se realizó el cálculo de funcionamiento de la manera tradicional, es decir, calculando el perfil desde las compuertas (totalmente abiertas) hasta el sitio donde se encuentra el puerto de posible toma del agua en estiaje (aprox. 1.6 km).

El resultado obtenido es que con un cauce de 40 m de ancho de base (sección trapezoidal con talud de 1:3), se pueden transitar 250 m³/s, teniendo un nivel de 15.83 msnm a la entrada de la bifurcación y circulará con una velocidad de 1.83 m/s. Considerando que la

velocidad mínima para que exista arrastre es de 0.45 m/s para un material con $d_{50} = 0.0004$ m, entonces el cauce podrá limpiarse de forma automática y cumple con las condiciones de funcionamiento. La plantilla de arranque del canal en este caso es el nivel 13.0 m. En la Figura 9.17 se muestra el perfil del cálculo.

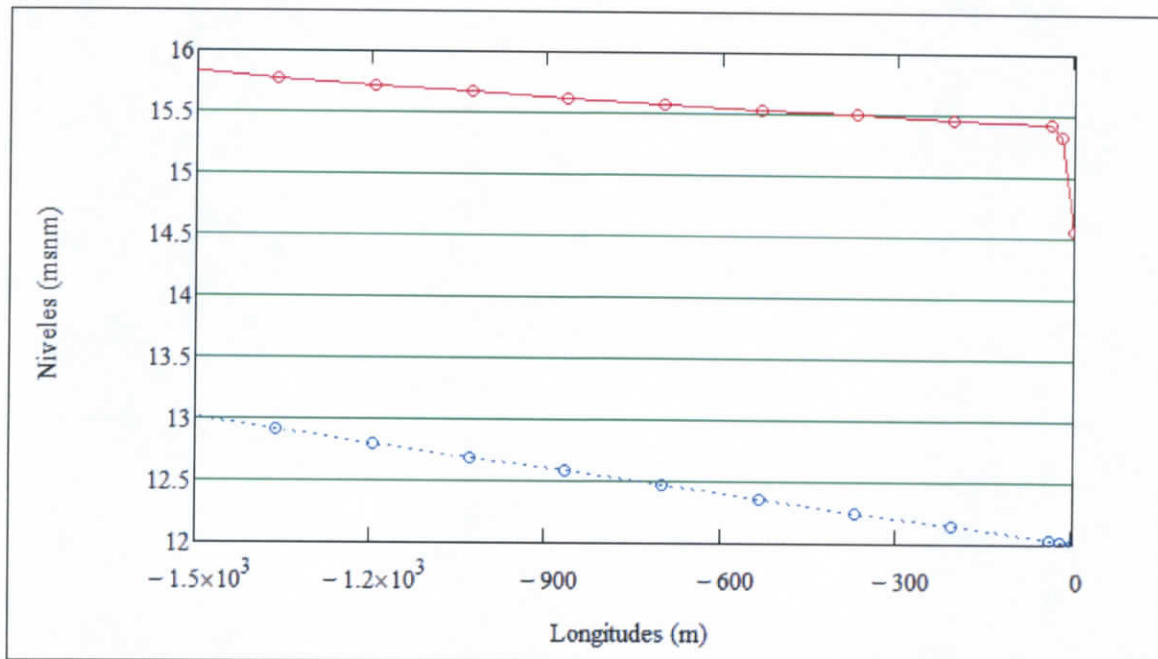


Figura 9.17 Perfil del agua para 250 m³/s

En la Figura 9.18 se muestra el perfil de cálculo para 60 m³/s, donde se puede observar que el nivel en la Bifurcación tendría que ser de 14.15 msnm ($v = 1.25$ m/s), lo cual significa que aún para ese nivel tan bajo el agua podría penetrar a la estructura para satisfacer la demanda de agua potable pues la plantilla del canal inicia en la cota 13.0 msnm.

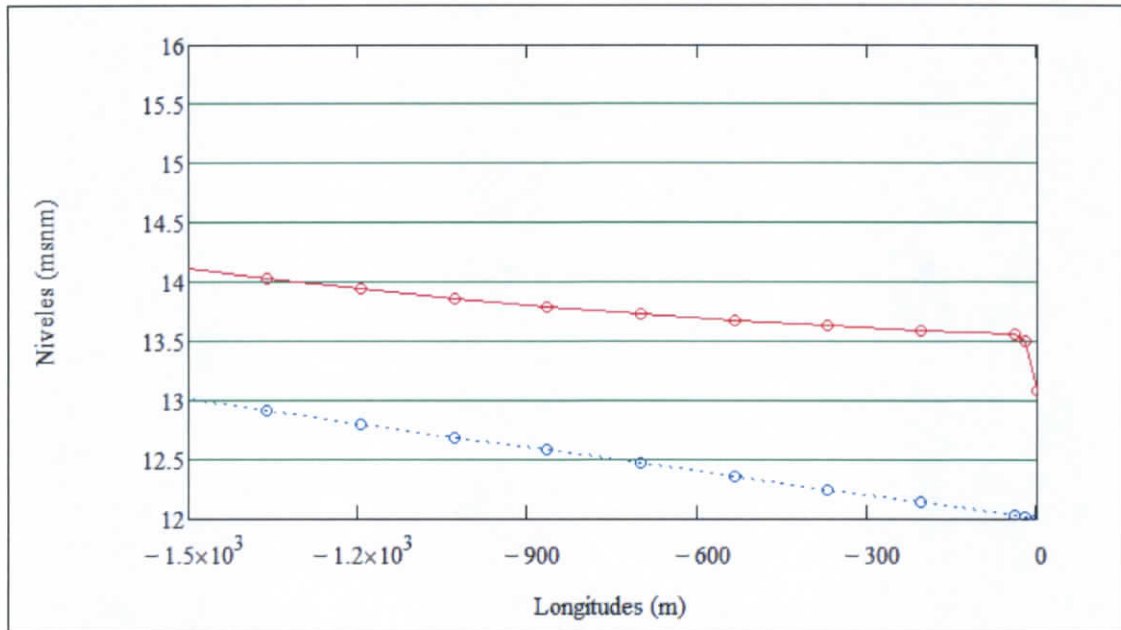


Figura 9.18 Perfil del agua para 60 m³/s

Como se puede observar la opción II es una mejor alternativa para extraer el sedimento, pues se obtienen velocidades mayores con menores niveles a la entrada y el cauce es más corto, por lo cual de necesitarse el dragado, es mejor el caso del cauce más corto. Por lo tanto **se propone emplear la solución II.**

La consideración final se resume en la Figura 9.19 donde se muestran los niveles en la bifurcación para los diferentes gastos derivados. En especial se obtiene el nivel 15.83 msnm para 250 m³/s y 14.15 msnm para 60 m³/s.

Una opción importante es emplear las dos baterías de compuertas totalmente abiertas para extraer el sedimento, sin embargo en esta etapa sólo se plantea el uso de la batería de margen izquierda, porque en el modelo físico no funcionó bien la conexión de las dos baterías, ya que es una zona que se llena inmediatamente de sedimento.

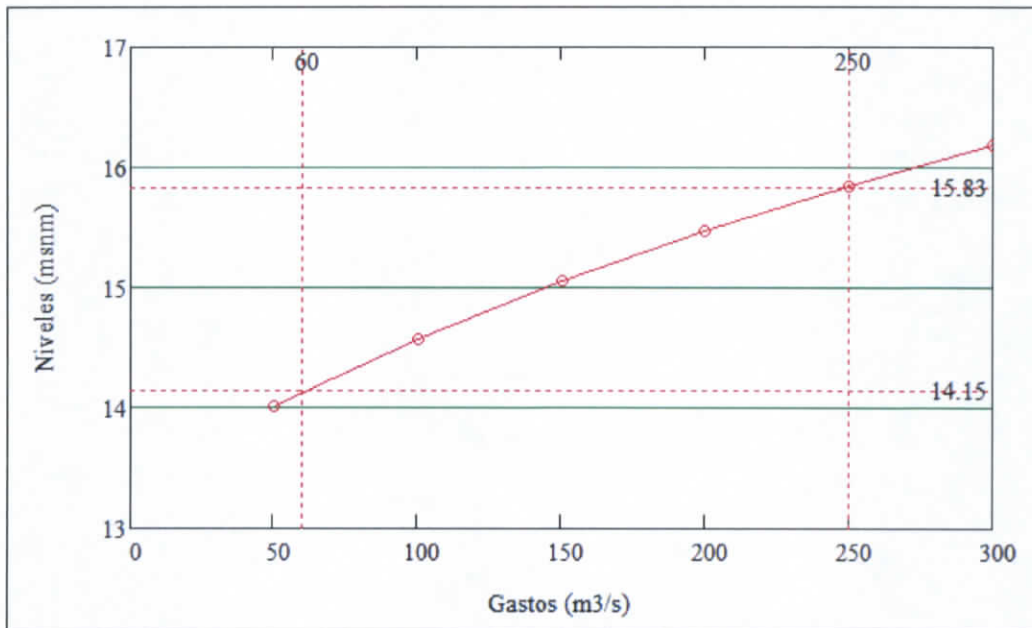


Figura 9.19 Relación de niveles en la bifurcación y gastos por el canal de estiaje.

9.5 Pruebas en el modelo físico

Las pruebas a realizar en el modelo físico son las siguientes:

- Probar el efecto de las compuertas en el comportamiento del sedimento
- Probar el efecto del desazolve con un cauces piloto
- Probar el efecto de la construcción del cauce de estiaje por dragado

En el anexo A.9.2 se muestra la colección de pruebas realizadas en el modelo físico.

Las conclusiones más importantes obtenidas de las pruebas en el modelo físico son las siguientes:

- 1) El modelo físico sin cauces piloto no extrae sedimento, aún con las compuertas totalmente abiertas. Sólo existe un efecto local vecino a la entrada de los vertedores.
- 2) Con las compuertas parcialmente abiertas no es posible extraer sedimento bajo ninguna circunstancia (con o sin canal de estiaje).

- 3) El canal de estiaje más largo (I + II) no extrae sedimento para las condiciones de prueba ($250 \text{ m}^3/\text{s}$) y compuertas abiertas.
- 4) La mejor solución se encontró para el canal de estiaje II. Empleando un ancho de 40.0 m , si es posible extraer sedimento.
- 5) Al extraer sedimento con nivel de agua en el cauce la sección no es estable, se derrumba. Esto implica que es necesario construir paredes sólidas para construir el cauce de estiaje. Esto evidentemente invalida la posibilidad de emplear espigones para definir el cauce de estiaje.
- 6) El rango de **gastos unitarios** donde claramente hubo movimiento de sedimento en el modelo es el siguiente: $15, 10, 6.25$ y $3.75 \text{ m}^3/\text{s-m}$. Para $1.5 \text{ m}^3/\text{s-m}$ prácticamente cesó el movimiento.
- 7) Nótese que para el diseño propuesto se han considerado los gastos unitarios de $250/40 = 6.25 \text{ m}^3/\text{s-m}$ y $60/40 = 1.5 \text{ m}^3/\text{s-m}$, por lo cual para el primero (el de diseño) claramente hay transporte de sedimento. Para el segundo no habrá transporte de sedimento, pero esto no es relevante porque lo que interesa es el gasto líquido para el agua potable, no el transporte sólido.

9.6 Pruebas de calibración de un modelo numérico 3D (SSIIM)

El modelo físico empleado permite obtener resultados cualitativos, por lo cual para extender los resultados a un ámbito más confiable de prototipo, se realizaron comparaciones con los resultados del modelo numérico SSIIM.

En el anexo A.9.3 se muestra información adicional del modelo numérico empleado y que por otro lado es de uso público, por lo cual no necesita mayor presentación de detalle.

9.6.1 Resultados del cálculo numérico con un modelo 3D (SSIIM)

a) Condiciones Actuales.

En la Figura 9.20 se presenta el plano topográfico empleado en las simulaciones. Nótese que se han señalado el espigón existente, la isla y la zona de la cortina. Sólo para fines ilustrativos en la figura se han señalado las partes más altas que separan al río Samaria del Carrizal.

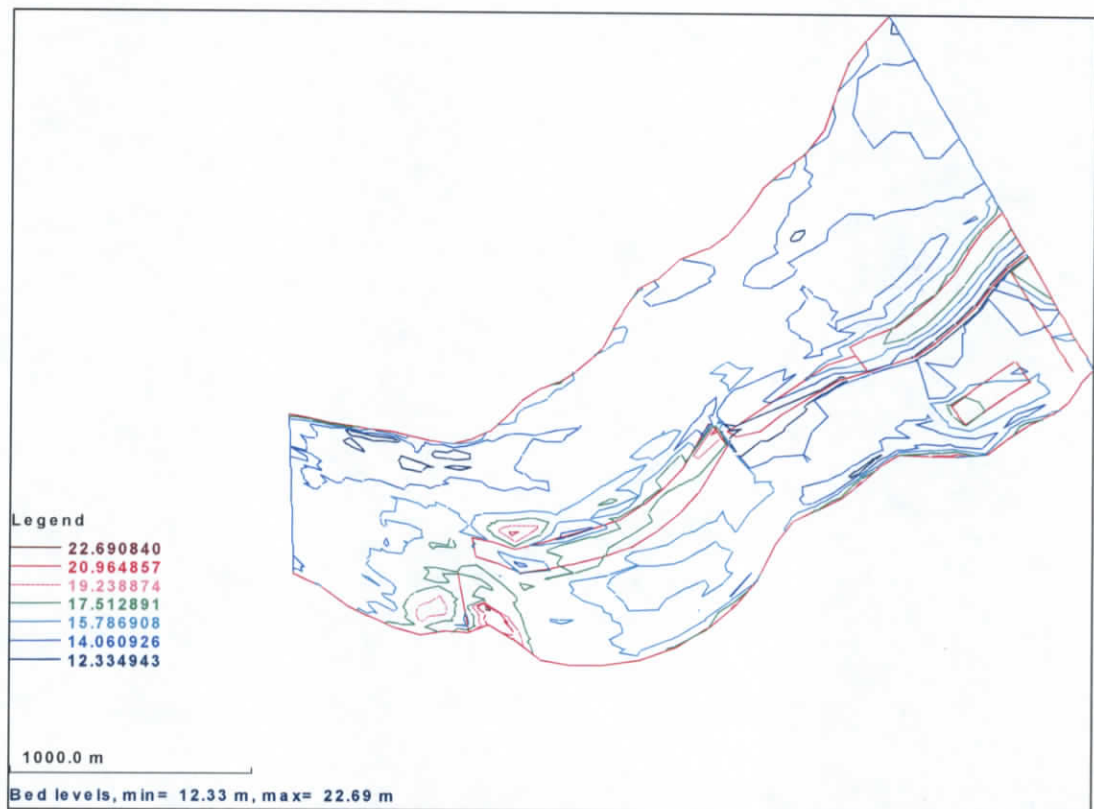


Figura 9.20 Topografía

En la Figura 9.21 se muestra un isométrico de la batimetría, donde se observa el depósito en la bifurcación y sobre el río Carrizal.

En la Figura 9.22 se presenta el plano de vectores de velocidad para el nivel del fondo. Las condiciones del plano presentado corresponden a un gasto de ingreso por el río Mezcalapa de $2250 \text{ m}^3/\text{s}$, $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ por el Samaria, $250 \text{ m}^3/\text{s}$ por margen izquierda y $300 \text{ m}^3/\text{s}$ por margen derecha, estas últimas por el río Carrizal. Nótese la disminución de la magnitud de los vectores por el Carrizal.

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)

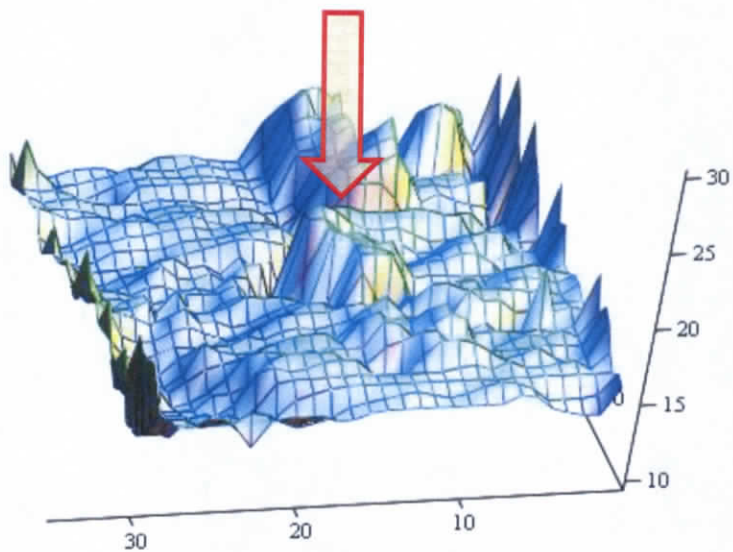


Figura 9.21 Isométrico de la batimetría. Abajo se encuentra la zona del Mezcalapa, por lo cual el río Carrizal quedaría a la derecha y se señala el puerto donde se iniciará el cauce de estiaje

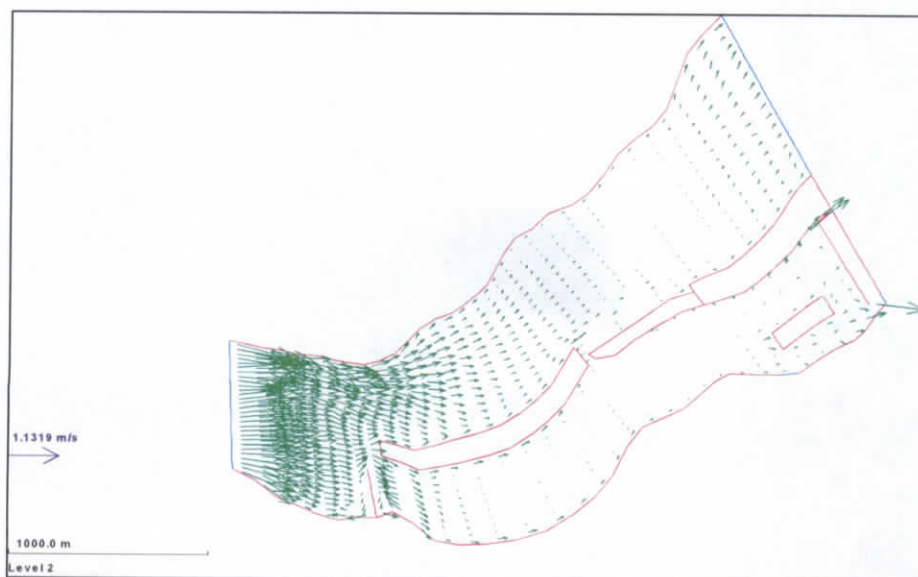


Figura 9.22 Vectores de velocidad en el nivel del fondo

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters, located at the bottom right of the page.

En la Figura 9.23 se presenta el plano de velocidades en el fondo. Como se puede observar, en el río Carrizal son muy bajas (por su valor no alcanzan a graficarse).

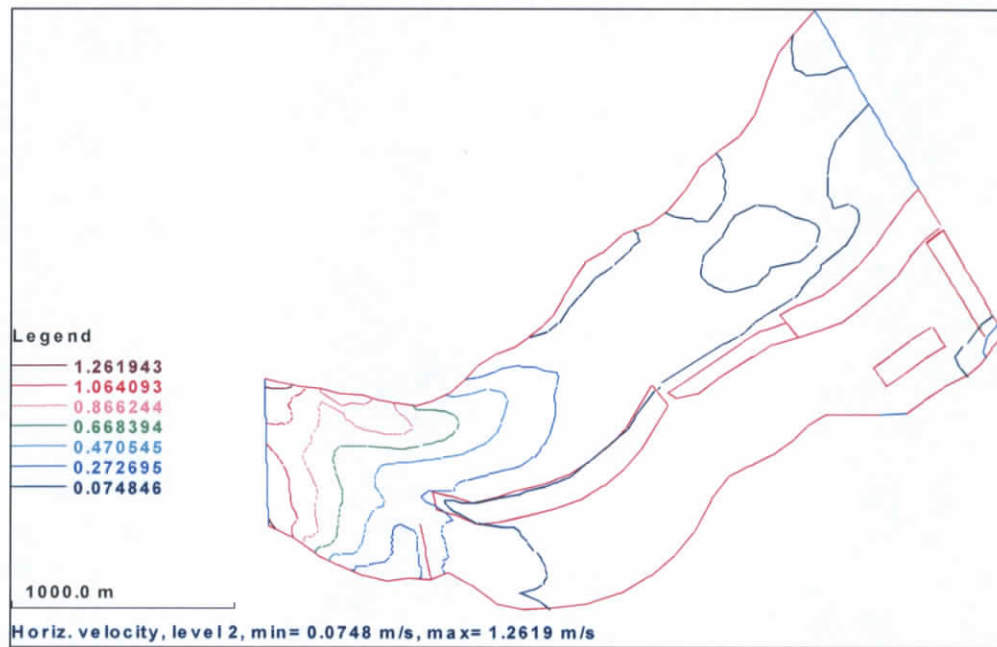


Figura 9.23 Velocidades horizontales en el nivel del fondo

En la Figura 9.24 se presenta la variación del fondo después de una avenida extraordinaria. Nótese que el movimiento del sedimento ocurre fuera del río Carrizal, pero existen acumulaciones en su entrada (cauce principal y puerto). No confundir los resultados de esta simulación de avenida con el comportamiento para otras condiciones ordinarias, donde evidentemente existe la entrada del sedimento al río Carrizal.

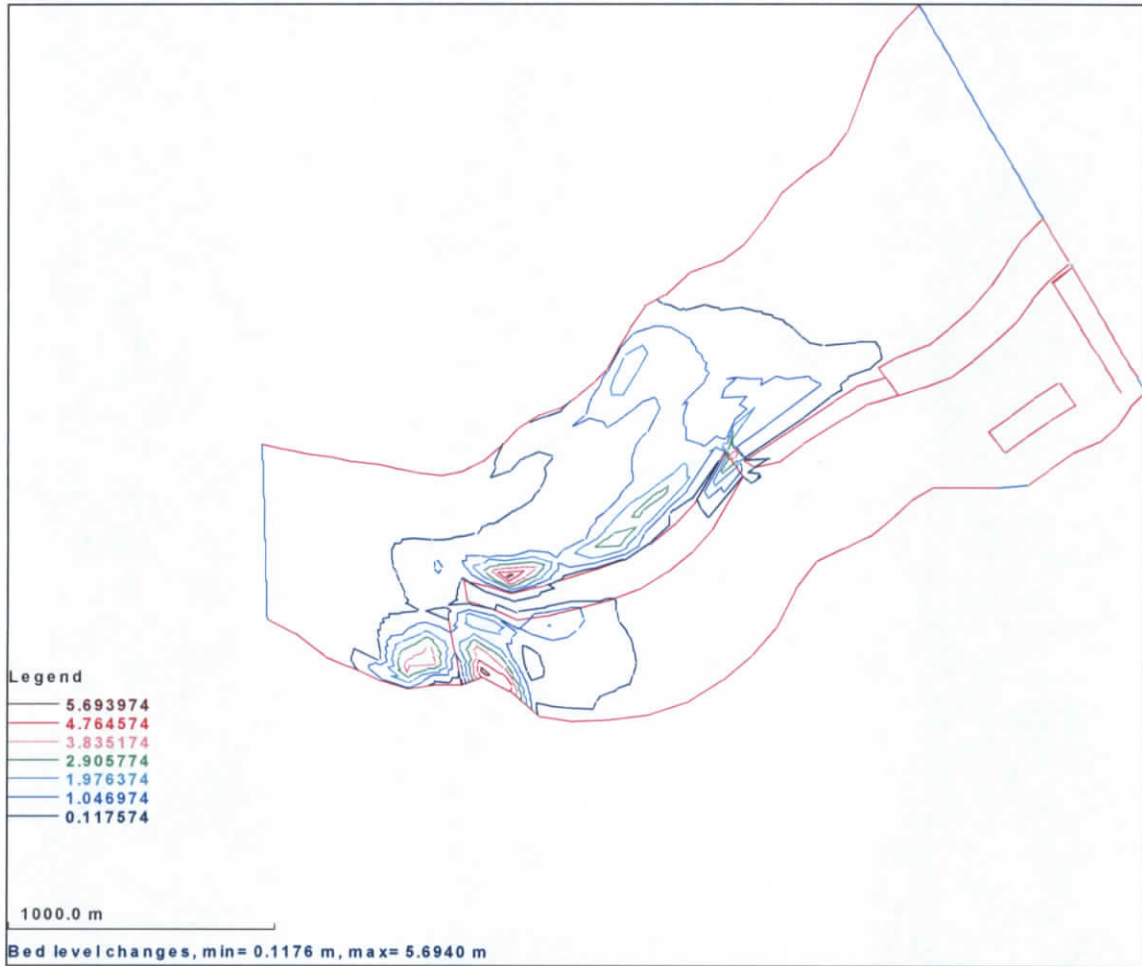


Figura 9.24 Cambios en el nivel del fondo

Conclusión: Las imágenes anteriores muestran claramente el problema de sedimentación del tramo de llegada a la estructura de control.

b) SIMULACIÓN DEL CAUCE DE ESTIAJE

En este caso lo que se supone es que los niveles en el río Mezcalapa son bajos, pues se trata del estiaje. En las siguientes figuras se presenta un ejemplo para mostrar las distribuciones de velocidad y los vectores de velocidad en el cauce de estiaje, donde hay que destacar el incremento de la velocidad en el cauce de estiaje propuesto (parte derecha de la figura) y su evolución en el tiempo al remover un depósito ("testigo").

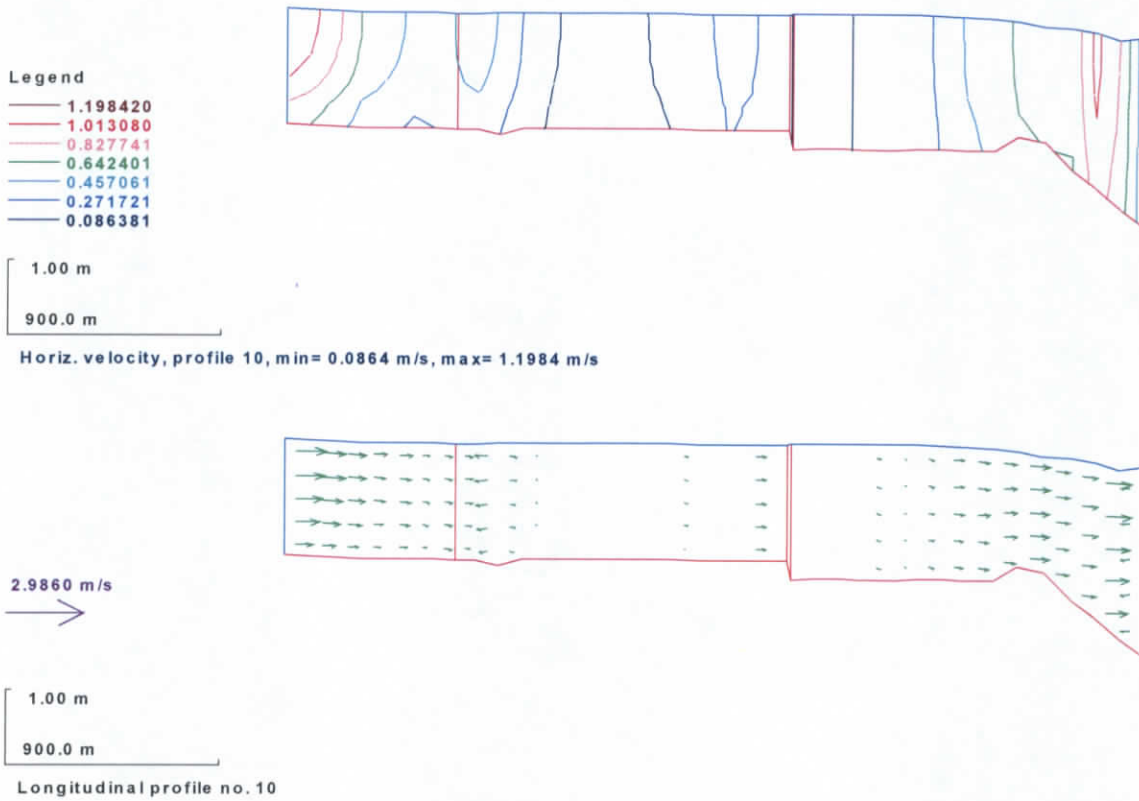


Figura 9.25 Condiciones iniciales

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)

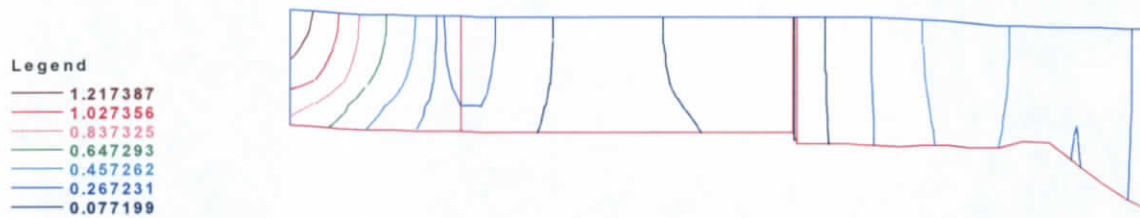


Figura 9.26 Condiciones después de 10 días

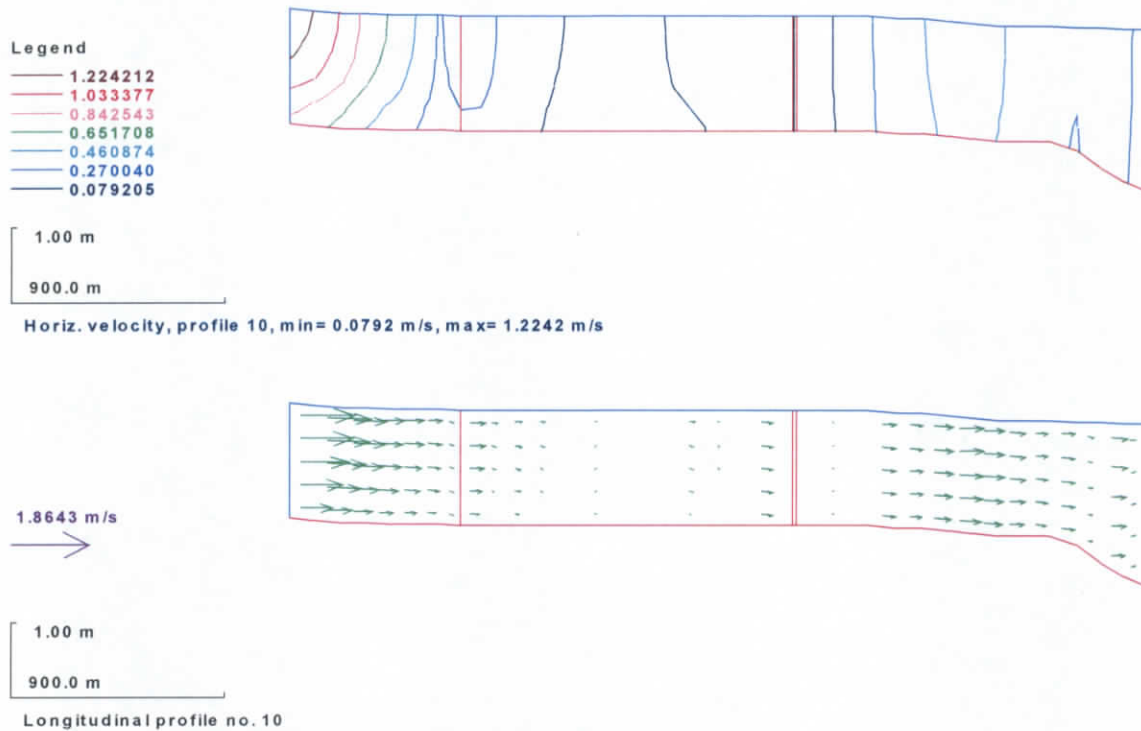


Figura 9.27 Condiciones después de 20 días

Para ilustrar el comportamiento completo del cauce de estiaje, en la Figura 9.28 se muestra el plano completo de los vectores velocidad de una simulación para una condición de una avenida ($2250 \text{ m}^3/\text{s}$, las condiciones son las mismas del ejemplo del inciso de condiciones actuales: inciso a) de 9.6.1) con el funcionamiento del cauce de estiaje.

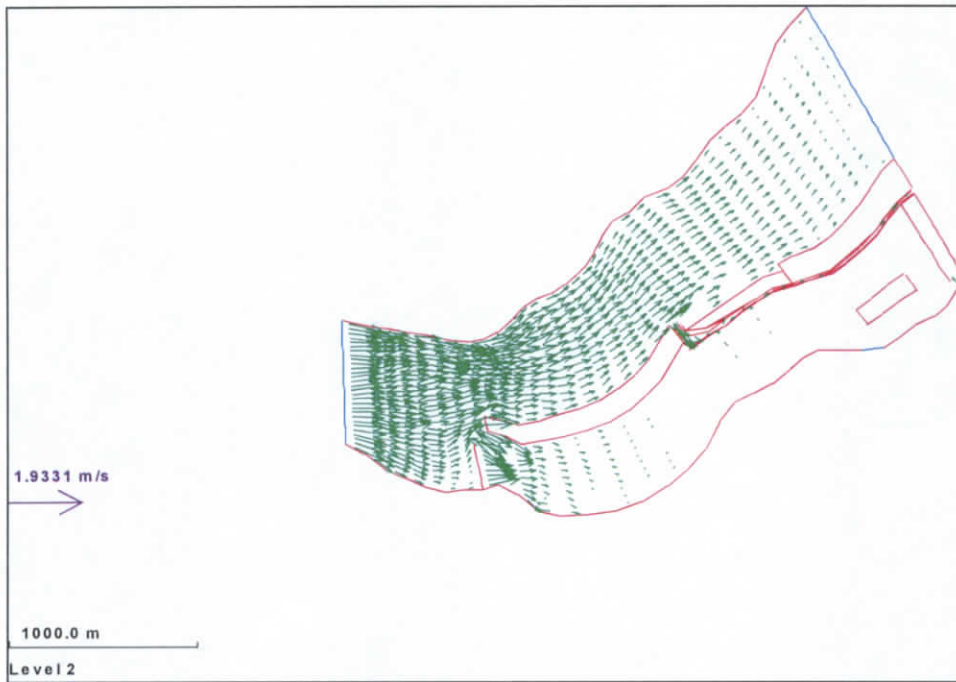


Figura 9.28 Vectores de velocidad (nivel del fondo)

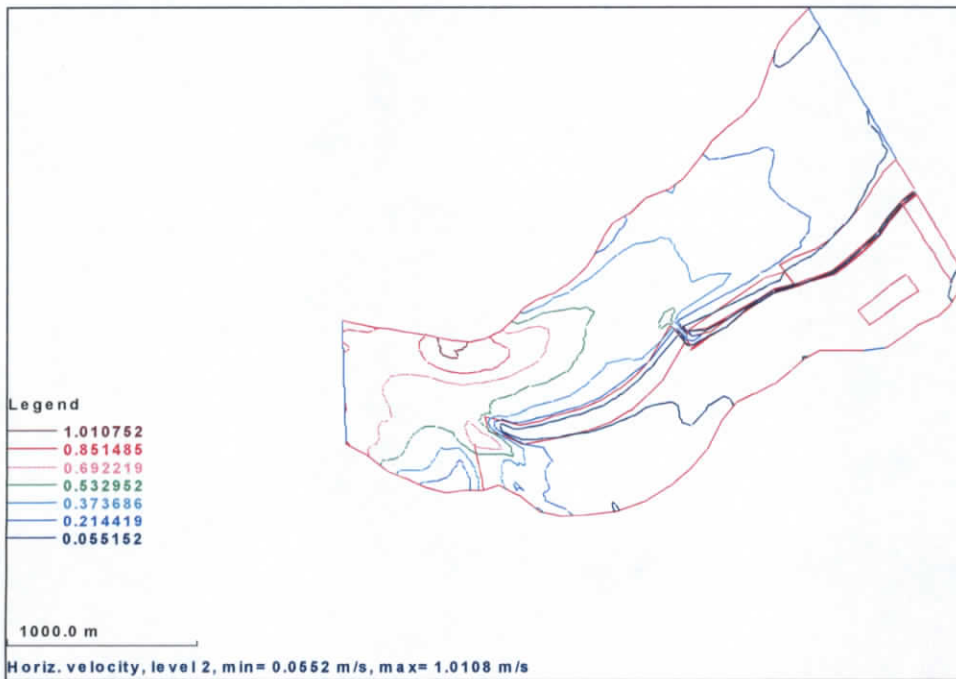


Figura 9.29 Isolíneas de velocidad (nivel del fondo)

En la Figura 9.30 se muestra un detalle de las velocidades en el cauce de estiaje en las condiciones de la avenida. Como puede observarse son muy bajas, debido a que esta condición requiere de las compuertas parcialmente abiertas.

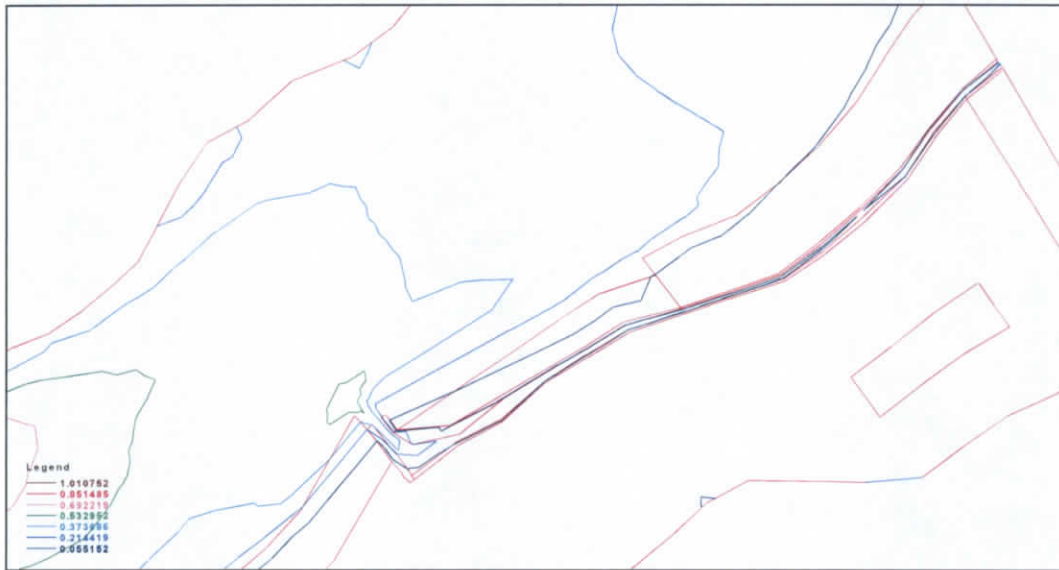


Figura 9.30 Isolíneas de velocidad (nivel del fondo)

En la Figura 9.31 se muestra el plano de los cambios del fondo. Una observación importante del comportamiento durante las avenidas es que el sedimento alcanza a entrar en el cauce de estiaje, lo cual prueba que durante esta época existe el peligro de un cierre de toda la sección, esto evidentemente puede ocurrir también en la entra del río Carrizal; de hecho es un peligro que aumentará al aumentar el depósito con el tiempo en el tramo del río Carrizal.

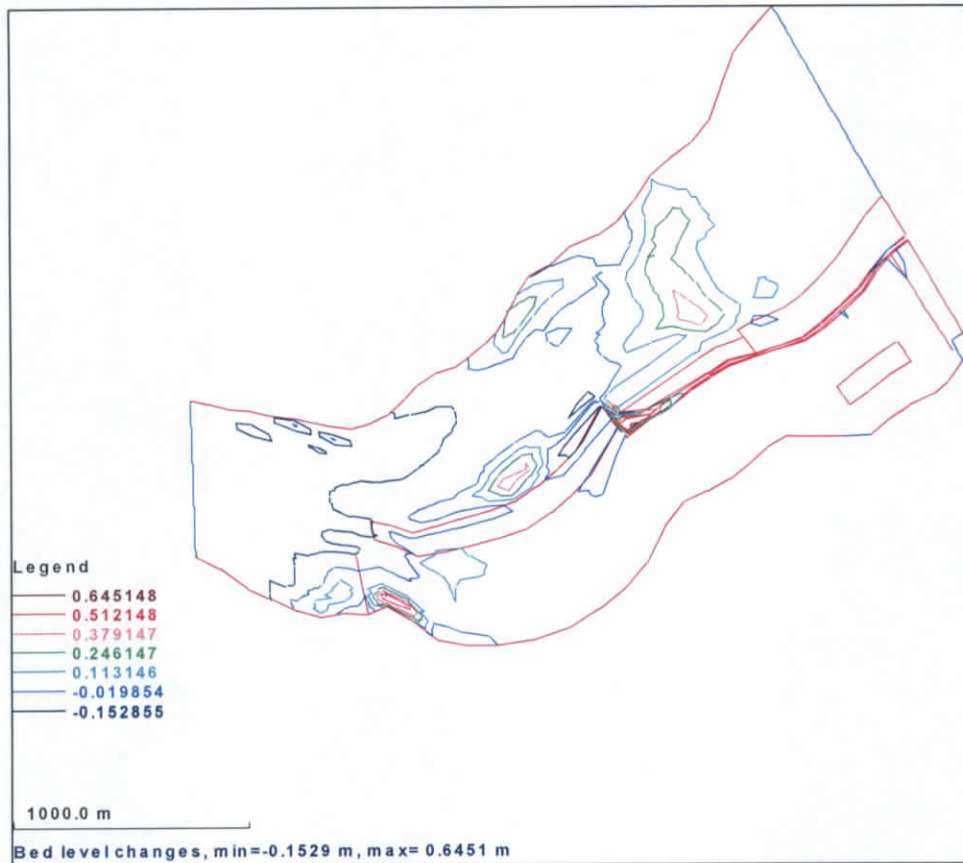


Figura 9.31 Cambios en el fondo después de la avenida

9.7 Características, trazo y ubicación de los canales de servicio propuestos y las curvas de operación de las compuertas de la estructura de control.

En la Figura 9.32 se ubica la posición del canal propuesto y en la Figura 9.33 se indican las características de la sección transversal y longitudinal. Se recuerda que estos son datos de anteproyecto conceptual, que deberán ajustarse a las condiciones reales para el proyecto definitivo.

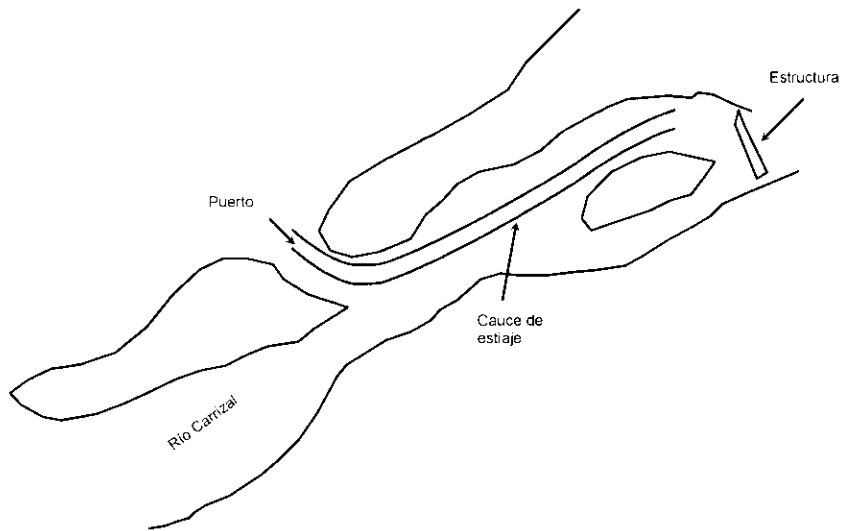


Figura 9.32 Ubicación del canal propuesto

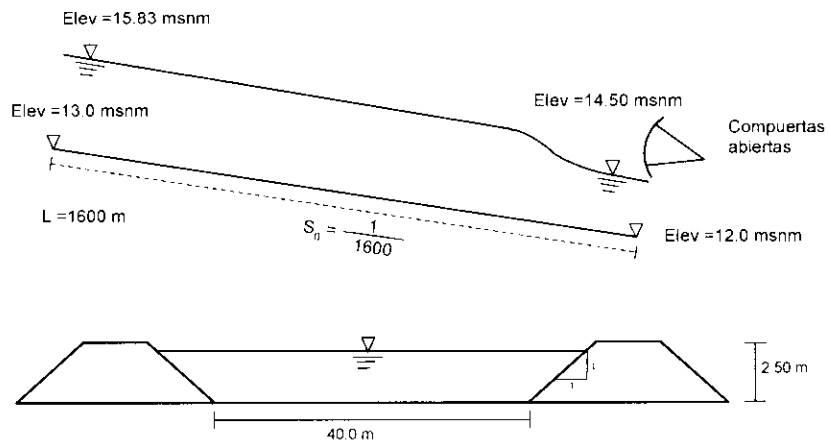


Figura 9.33 Características geométricas del cauce propuesto

9.8 Recomendaciones para el mantenimiento del canal de estiaje.

- La más importante es seguir la política de compuertas totalmente abiertas durante la época de estiaje, para que el flujo sea libre, de preferencia en las dos baterías de compuertas.

- b) De ser necesario convendría estudiar a mayor detalle la entrada de la toma del cauce de estiaje para buscar alguna alternativa que evite la entrada de sedimento. Sin embargo esto deberá hacerse en un estudio de avenidas que lleven a definir la política de operación de compuertas durante las avenidas. Nótese que son dos aspectos diferentes la operación de compuertas en estiaje para el suministro de agua potable y la política de operación de compuertas durante avenidas.
- c) Sería conveniente dejar los preparativos a la entrada del cauce de estiaje para realizar el dragado en caso necesario (p.e. la posibilidad de instalar una draga).
- d) Es importante señalar que de las pruebas experimentales, por el momento no es recomendable hacer una interconexión entre las dos baterías, ya que esto le quitaría eficacia al auto-desazolve para los gastos más bajos. Se considera que es más adecuado dejar que libremente se realice dicha conexión con la operación normal, pero siempre respetando la condición de compuertas totalmente abiertas en estiaje.

9.9 Conclusiones y recomendaciones

9.9.1 Conclusiones

- a) Existe el peligro de que durante una avenida se azolve la entrada al tramo de acceso a la estructura de control, con lo cual, para niveles bajos en el río Mezcalapa (estiaje), pudiera ser imposible que entrara el agua hacia el río Carrizal con lo cual se suspendería el suministro de agua potable.
- b) Es necesario habilitar un cauce de estiaje que asegure que en condiciones de niveles bajos en el río Mezcalapa, se garantice la entrada del agua hacia el río Carrizal. Para esto se propone la construcción de un cauce de estiaje que permita la toma de agua hasta en los niveles más bajos del agua en el río Mezcalapa.

- c) La posición más favorable del cauce de estiaje se ha encontrado que debe ser en el puerto más cercano a la estructura con desplante recomendado en la elev. 13.0 msnm.
- d) El ancho recomendado para tal cauce de estiaje es de 40.0 m, y dependerá del método de construcción la recomendación de los taludes iniciando en la cota 13.0 msnm y terminado en la 12.0 msnm en la estructura de compuertas de margen izquierda.
- e) La ubicación en planta del cauce de estiaje se recomienda sea lo más cercano a la margen izquierda del río Carrizal.
- f) Las paredes del cauce de estiaje deben ser rígidas y resistentes al ingreso del agua por su corona, ya que para niveles altos la sumergencia es su condición normal de trabajo. La profundidad del cauce de estiaje debe ser de al menos 2.5 m.
- g) El dragado del canal de estiaje, sin rigidizar las márgenes, puede ser un trabajo inútil, costoso y cada año deberá ser repetido.
- h) Durante la época de estiaje se recomienda que las compuertas permanezcan totalmente abiertas.
- i) Con el diseño propuesto, aún en el nivel 14.15 msnm del río Mezcalapa, sería posible derivar hasta 60 m³/s, que es el gasto mínimo que en la práctica (históricamente) puede suministrarse y garantizar el suministro del agua potable.
- j) Aunque la extracción del gasto de estiaje se realizará principalmente por la batería de compuertas de margen izquierda, convendría mantener abiertas también las compuertas de margen derecha.
- e) Como resultado de los experimentos realizados, se puede concluir que el transporte de sedimento en el río Carrizal ha disminuido substancialmente y ha

dado como resultado un "vaso artificial" regulado por las compuertas del Macayo, el cual se ha formado porque los tirantes del flujo aumentan, y entonces las velocidades disminuyen permitiendo el depósito del sedimento. Sería entonces recomendable realizar un estudio, del mismo tramo del río Carrizal aquí estudiado, pero no con el objetivo del suministro de agua potable, sino para el control de avenidas para propiciar el movimiento del sedimento.

- k) Convendría realizar un análisis de la política de operación de las compuertas en la época de avenidas, para garantizar la protección de la ciudad de Villahermosa y manejar lo mejor posible el sedimento en el tramo de acceso a la obra de control.

9.9.2 Resumen de alternativas

	Alternativas analizadas	Resultados obtenidos
1	Sistema de canales por margen derecha e izquierda (Fig. 9.7.a)	Con compuertas total o parcialmente abiertas no hay transporte de sedimento.
2	Del sistema de canales (Fig. 9.7.a) sólo se construye el de margen derecha.	Con compuertas total o parcialmente abiertas no hay transporte de sedimento.
3	Del sistema de canales (Fig. 9.7) sólo se construye el de margen izquierda.	Con compuertas parcialmente abiertas no hay transporte de sedimento.
4	Del sistema de canales (Fig. 9.7) sólo se construye el de margen izquierda en su tramo más corto.	Con compuertas totalmente abiertas el si hay transporte de sedimento.

BIBLIOGRAFÍA

- Gracia S J, Osnaya R J, Carrizosa E E, Ortiz M V M y Franco V, "Estudio experimental de las obras de control sobre los ríos Carrizal, la Sierra, Pichucalco y en la bifurcación del Samaria, en el estado de Tabasco", Informe del Instituto de Ingeniería para la CONAGUA, 314-382pp, dic. 2008
- Gracia S J, Osnaya R J, Carrizosa E E, Ortiz M V M, Franco V, Rico F T J, Casilimas P A, Velázquez M J C, Villarreal B H, Urgel G Y, "Análisis de casos especiales con los modelos físicos, para determinar el comportamiento de tres estructuras de derivación y una de control de sedimento, en el estado de Tabasco", informe para CONAGUA, 2011.
- Miedma S A, 2010, "Constructing the shields curve, a new theoretical approach and its applications ", WODCON XIX, Beijing China
- Olsen Nils Reidar B., 2001, "CFD for modeling for hydraulic structures", Departmet of Hydraulic and Environmental Engineering and The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Olsen Nils Reidar B., 2011, "User's Manual", Departmet of Hydraulic and Environmental Engineering and The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Olsen Nils Reidar B., 2012, "Numerical Modelling and Hydraulics", Third Edition, Departmet of Hydraulic and Environmental Engineering and The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Anexo A.9.1

(Álbum fotográfico)



A continuación se presenta un reporte fotográfico de las acciones de limpieza, rehabilitación, recuperación y acondicionamiento de las instalaciones para iniciar los trabajos de actualización del modelo físico.



Figura 9.34 Zona del modelo físico con presencia de vegetación



Figura 9.35 Proceso de limpieza del modelo físico

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters.



Figura 9.36 Presencia de vegetación en el tanque de disipación



Figura 9.37 Casa de máquinas

V.F.



Figura 9.38 Retiro de vegetación y limpieza del tanque de disipación



Figura 9.39 Trabajos de mantenimiento en tanques



Figura 9.40 Colocación de chaflanes para evitar fugas



Figura 9.41 Revisión y nivelación del terreno

Handwritten signature or initials.



Figura 9.42 Construcción de la margen derecha

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters, likely representing the author or reviewer of the report.

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)



Figura 9.43 Construcción de elementos para canal de margen derecha



Figura 9.44 Compactación para nueva topografía

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters.



Figura 9.45 Reconfiguración del modelo físico



Figura 9.46 Detalle de reconfiguración del modelo físico

VF



Figura 9.47 Elementos impresos canal margen derecha



Figura 9.48 Configuración estructuras margen derecha e izquierda

JF

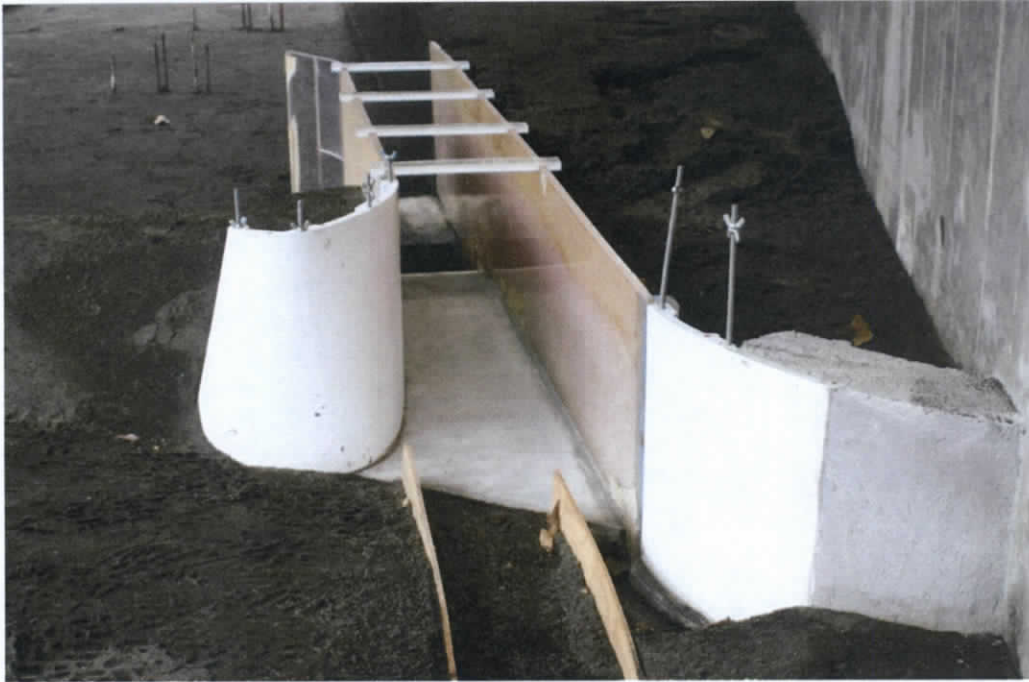


Figura 9.49 Estructura de margen derecha terminada



Figura 9.50 Configuración con canal piloto

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters, likely 'VF'.

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA
POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA
(PROHTAB)



Figura 9.51 Funcionamiento general



Figura 9.52 Canal piloto después de la prueba

A handwritten signature or set of initials in black ink, located in the bottom right corner of the page.