



Figura 9.53 Sección de control



Figura 9.54 Colocación de trazador para observar el arrastre de sedimento



**Figura 9.55 Configuración final retirando canales piloto**

## Anexo A.9.2

(Resultados de las pruebas en el modelo físico)

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

## Generalidades

Las pruebas se realizaron inicialmente con un gasto controlado de  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ , dada la necesidad de hacer pruebas con gastos de  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , se empleó la válvula del tanque de carga constante para lograr caudales pequeños, que son confiables desde  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  y equivale en modelo a  $2.1 \text{ l/s}$  hasta  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $33.2 \text{ l/s}$ ).

Inicialmente se procedió a humedecer el modelo, esta consistió en operar con el gasto más bajo que el sistema permite, hasta que se logró la saturación. Es cuando se procedió a establecer las condiciones para las diferentes pruebas realizadas y que se describen en los párrafos siguientes.

### **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).**

Para esta condición se utilizaron compuertas con abertura de 1 m (Figura 9.56). Una vez que se ha establecido el gasto, se observó una acumulación cerca de la cortina, en el cual el movimiento del agua presenta velocidades bajas, por lo que no existe transporte de sedimento. Dadas las condiciones antes mencionadas, el material en movimiento se deposita en la región cercana a la cortina, pues no se tiene la energía suficiente para su transporte, azolvando el vaso.

Esta prueba demuestra que el uso de compuertas aún con los cauces de estiaje no permiten la extracción del sedimento.



Figura 9.56 Vertedores compuertas con abertura de 1 m

### B.2 Prueba para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un cauce de estiaje y descarga libre (compuertas totalmente abiertas).

Este ensayo consistió en alimentar un gasto de  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $10.4 \text{ l/s}$ ). La configuración empleada fue de dos canales como se muestra en la Figura 9.57. Se observó que el transporte de sedimento es poco significativo por ambos canales además, sin que ocurra la elevación necesaria para que se comunique el espejo de agua entre los vertedores, es decir, cerca de la cortina (ver Figura 9.58).

Debido a que para este gasto se presenta desbordamiento del cauce de estiaje, disminuye la velocidad del flujo y la movilidad de sedimento.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters, likely 'V.F.' or similar.



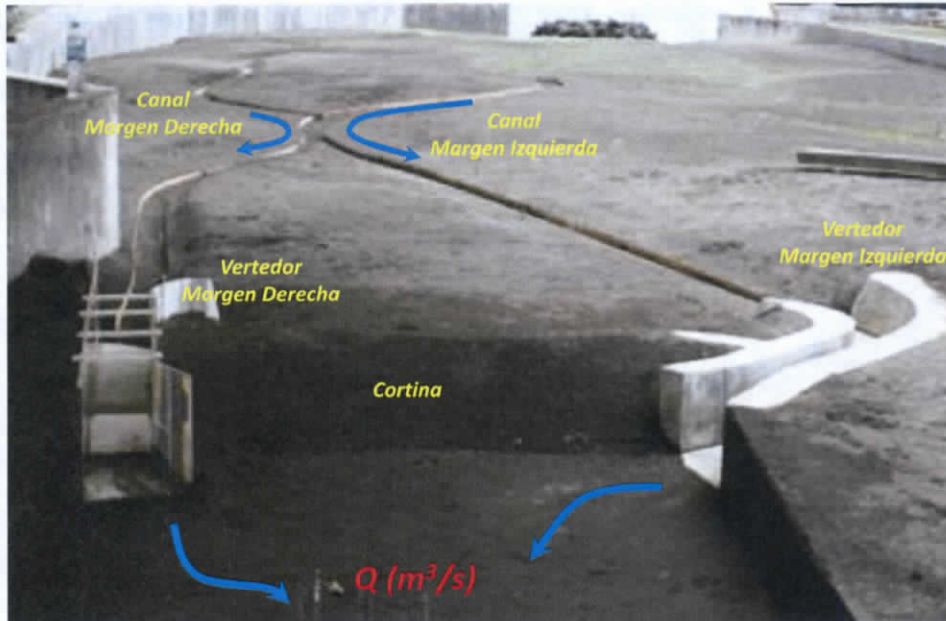


Figura 9.57 Configuración de cauces de estiaje (vista desde aguas abajo)



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)

### B.3 Prueba para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un cauce de estiaje por margen izquierda y descarga libre.

Para esta condición se construyó un canal de sección rectangular con paredes rígidas. Se empleó un gasto de  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ , se estableció el gasto y se colocó trazador, para observar movimiento de sedimento. Se observó transporte en margen izquierda, e incluso sobre la margen derecha del Carrizal, en la región cercana a la cortina, lo que contribuyó al arrastre total de sedimento. Esto logro formar sección en la margen derecha, la cual no cuenta con paredes rígidas.

La configuración del cauce de estiaje (ver Figura 9.59) de margen izquierda se desplanto a la cota de 12.40 msnm, con corona en la 14.00 msnm (condición de paredes rígidas) (ver Figura 9.60). Con este gasto se inició el movimiento de sedimento, pero además, se observó que se azolva el cauce de margen derecha, después de un par de horas. El vertedor se azolvo totalmente con el sedimento. Se empleó una sección representativa en el canal (Figura 9.61 a Figura 9.66), donde se observa el movimiento del material.

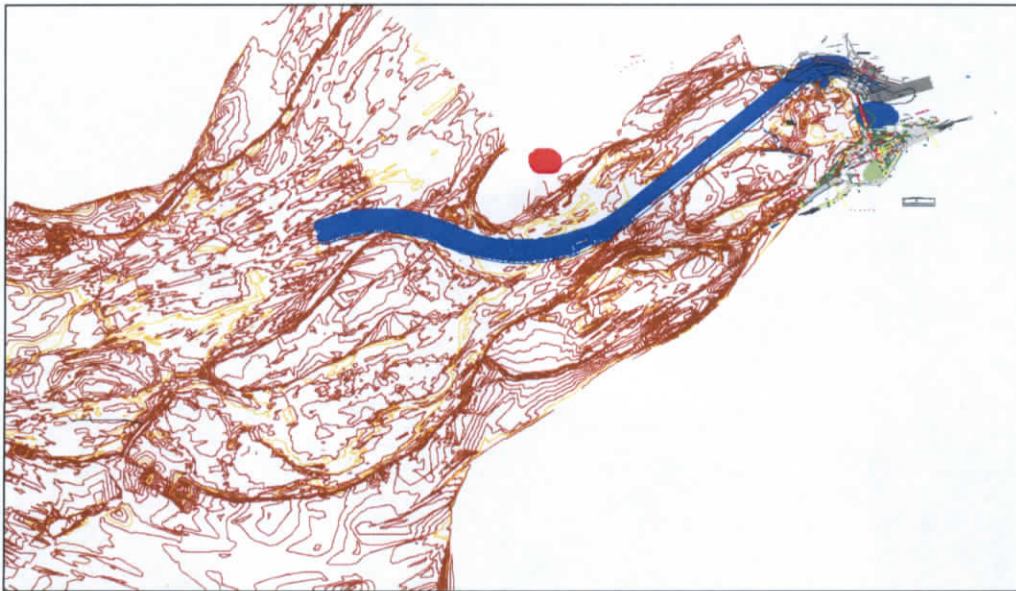


Figura 9.59 Ubicación de canal piloto de margen izquierda.

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

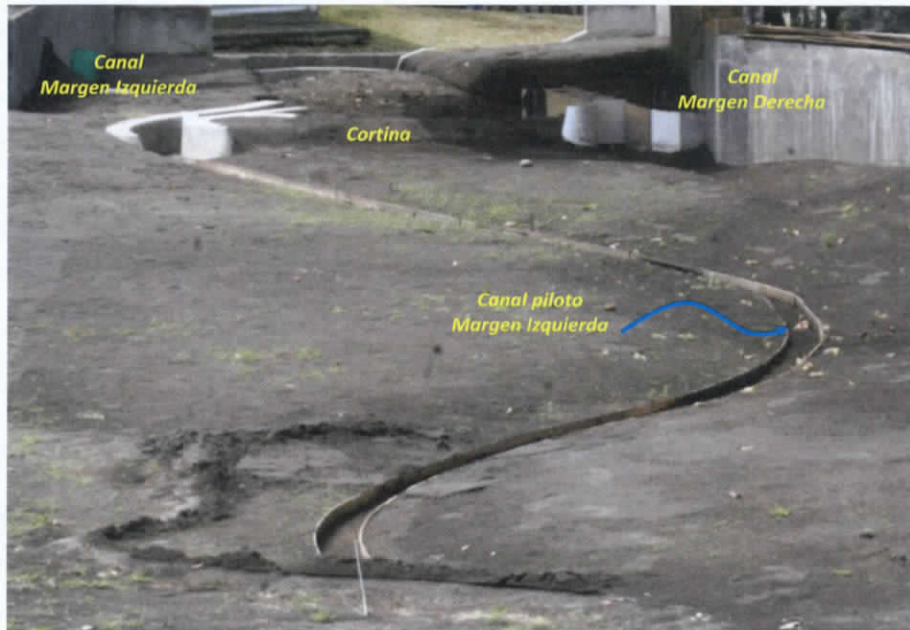


Figura 9.60 Configuración de canal de margen izquierda.

VJ





Figura 9.61 Colocación de Trazador



Figura 9.62 Tiempo: 0 minutos

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





Figura 9.63 Tiempo: 10 minutos



Figura 9.64 Tiempo: 15 minutos

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters that appear to be 'VF'.

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



**Figura 9.65 Tiempo: 20 minutos**



**Figura 9.66 Tiempo: 25 minutos**

*VJ*

**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.**

Esta prueba consistió en reconfigurar el canal piloto, con un gasto de  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , las compuertas totalmente abiertas. Para estas condiciones se observó que existía flujo por ambas márgenes; el funcionamiento general se observa en la Figura 9.67



**Figura 9.67 Vista general del modelo para la condición de  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  hacia el carrizal**

Se colocó un trazador en una sección de la margen izquierda con el propósito de observar si existe arrastre de sedimento, los resultados se muestran en las Figura 9.68 a Figura 9.73





Figura 9.68  $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=0 \text{ min}$



Figura 9.69  $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=10 \text{ min}$

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters that appear to be 'V' and 'F'.

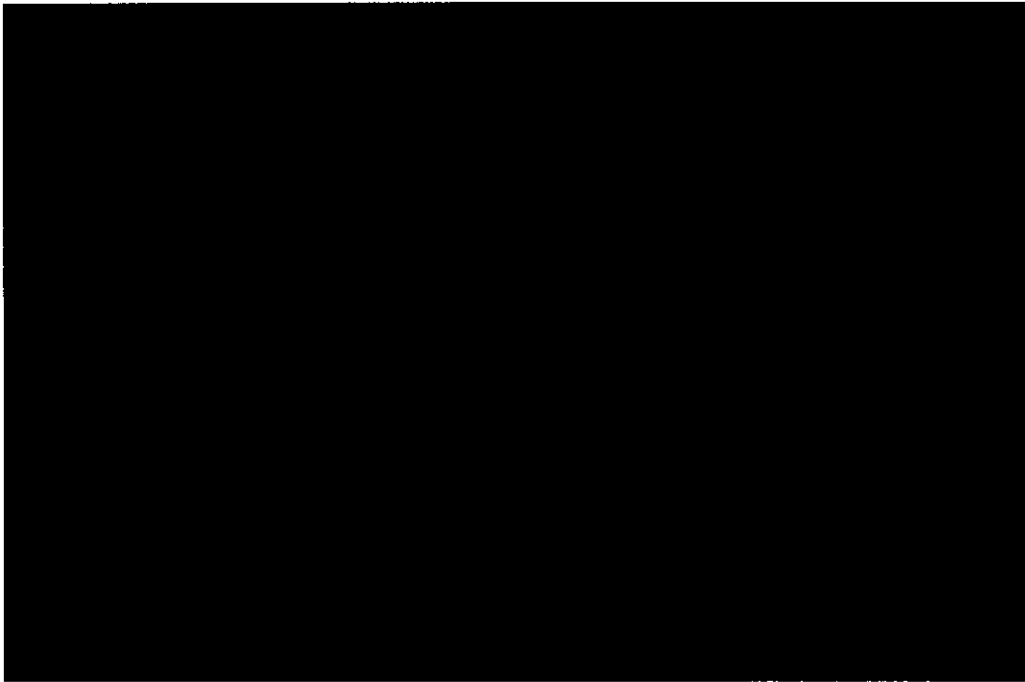


Figura 9.70  $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=20 \text{ min}$

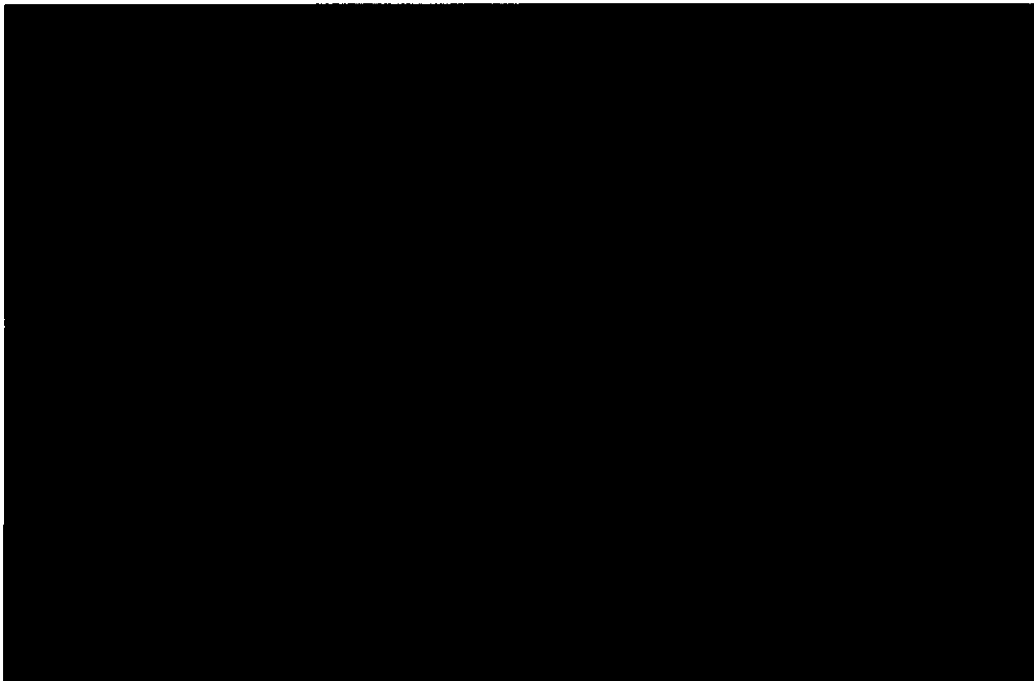


Figura 9.71  $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=30 \text{ min}$

Handwritten signature or initials.

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



Figura 9.72  $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=40 \text{ min}$



Figura 9.73  $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=65 \text{ min}$

*VJF*



En esta prueba se observó que existe un arrastre de sedimento mínimo ya que el gasto que transita por esta sección del río es muy pequeño y con estas dimensiones de cauce de estiaje no aprecia un arrastre significativo, también se observa que este comportamiento se mantiene a lo largo de todo el canal.

Este trabajo se apoyó con videos, los cuales permiten sumergir la cámara en el agua, sin afectar el flujo ni el transporte del sedimento. En dichos videos es posible apreciar el arrastre de sedimento mediante fotogramas como por ejemplo de las Figura 9.74 a Figura 9.78. Lo que se observa es la siembra de un trazador hecho de arena color verde. Como se puede observar poco a poco va desapareciendo el color verde y se observa el fondo del cauce. El flujo del agua ocurre de arriba hacia abajo, y como puede observarse a los 12 min prácticamente desapareció el trazador

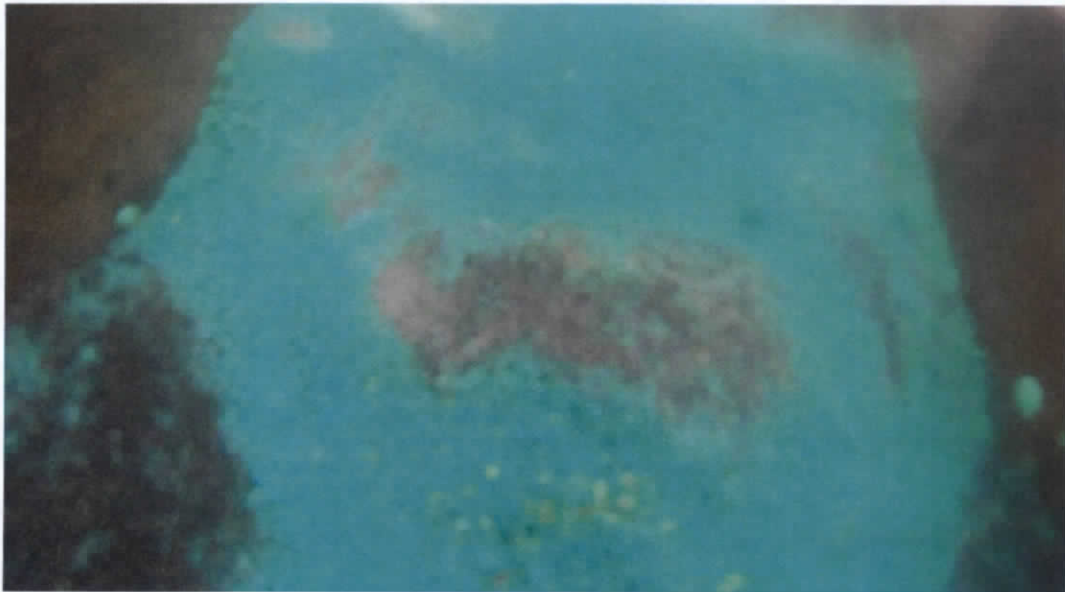


Figura 9.74 Imagen con cámara sumergida  $t=0$  s.

VJF



Figura 9.75 Imagen con cámara sumergida t=11 s.



Figura 9.76 Imagen con cámara sumergida t=3 min.



Figura 9.77 Imagen con cámara sumergida  $t=5$  min.



Figura 9.78 Imagen con cámara sumergida  $t=12$  min.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping letters that appear to be 'VJF'.



**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.**

Esta prueba se reconfiguró el cauce de estiaje derivando un gasto de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  hacia el Carrizal. La condición de las compuertas fue totalmente abierta, se colocó el cauce de estiaje solo sobre la margen izquierda, se observa que el gasto fluye tanto por la margen izquierda como por la derecha sin embargo, este se sigue azolvando, hasta el grado de quedar cerrado. Una vista general del modelo bajo estas condiciones de operación se observa en la Figura 9.79.



**Figura 9.79 Vista general del modelo para la condición de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  hacia el Carrizal**

Se colocó un trazador con el propósito de observar si existe arrastre de sedimento los resultados se muestran en las Figura 9.80 a Figura 9.87.

VF



Figura 9.80  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=0 \text{ min}$



Figura 9.81  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=10 \text{ min}$

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters, possibly 'V' and 'F'.

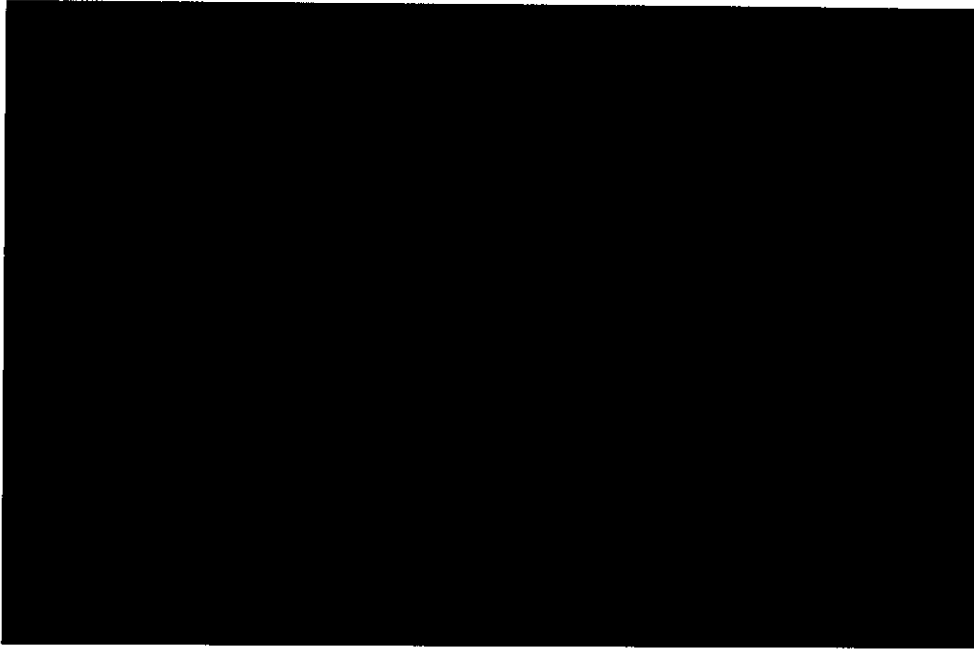


Figura 9.82  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=20 \text{ min}$

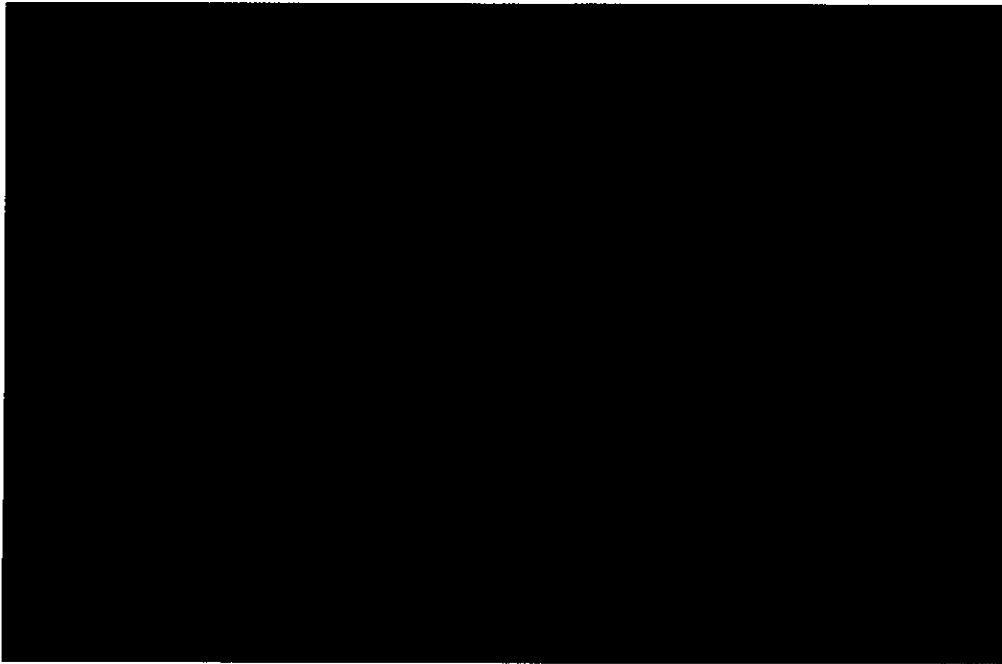


Figura 9.83  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=30 \text{ min}$

Handwritten signature or initials.

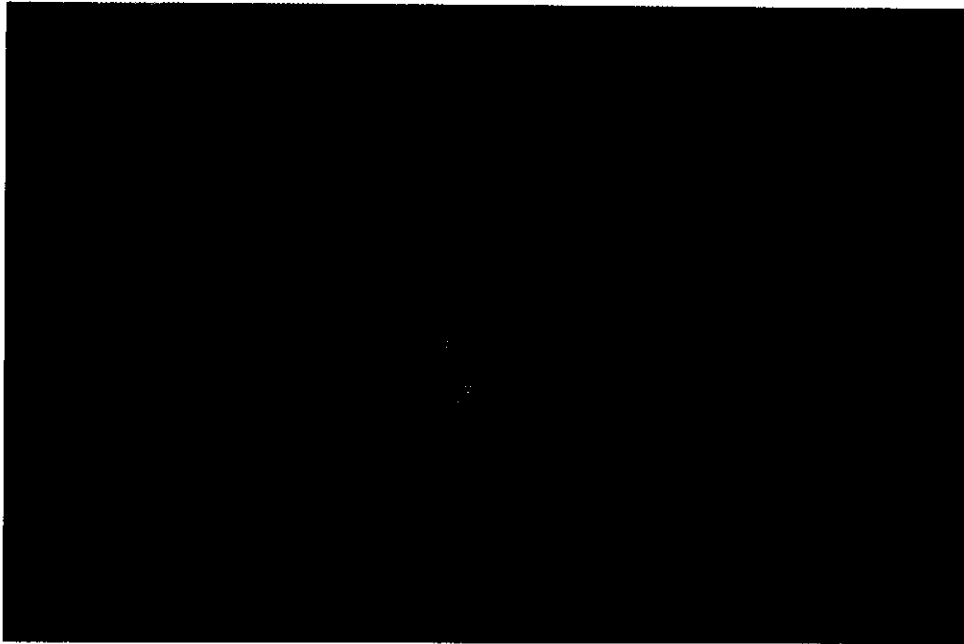


Figura 9.84  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=40 \text{ min}$

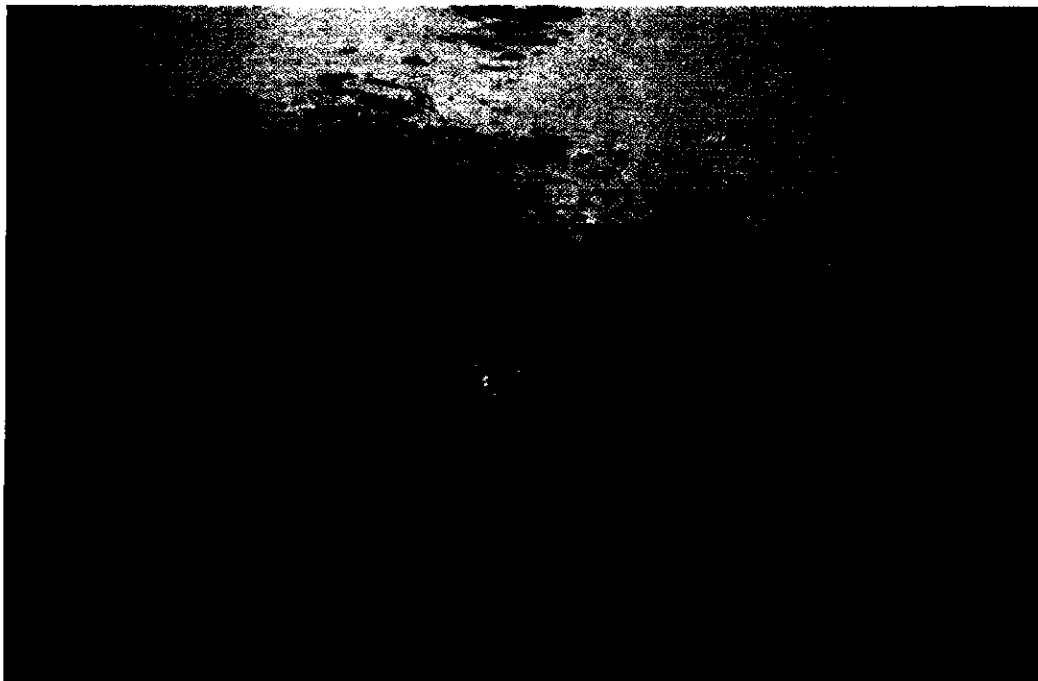


Figura 9.85  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=50 \text{ min}$



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

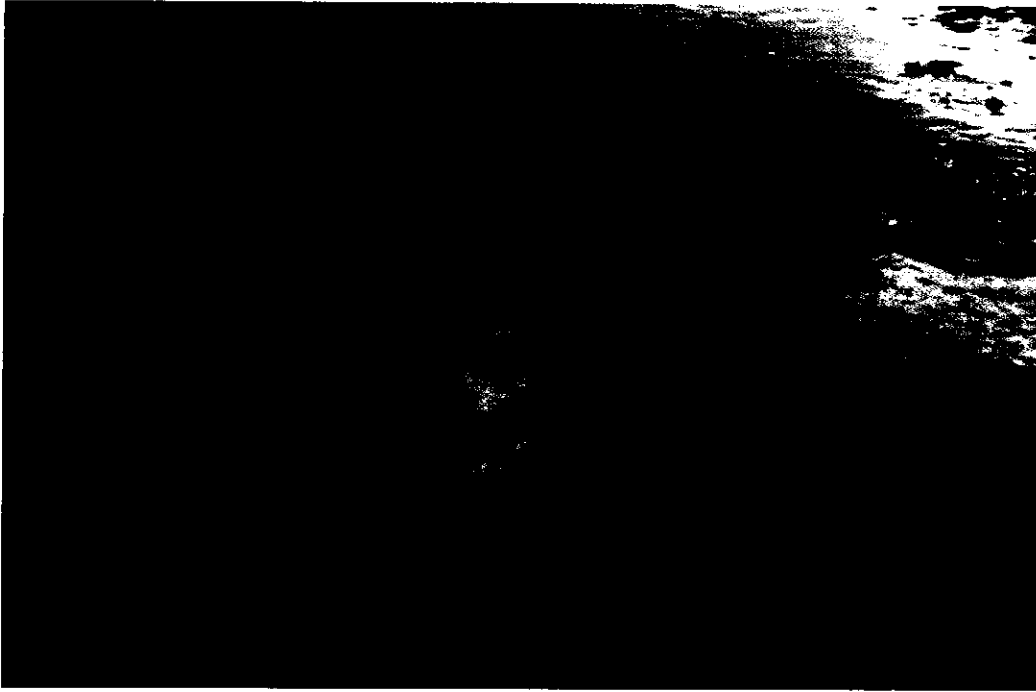
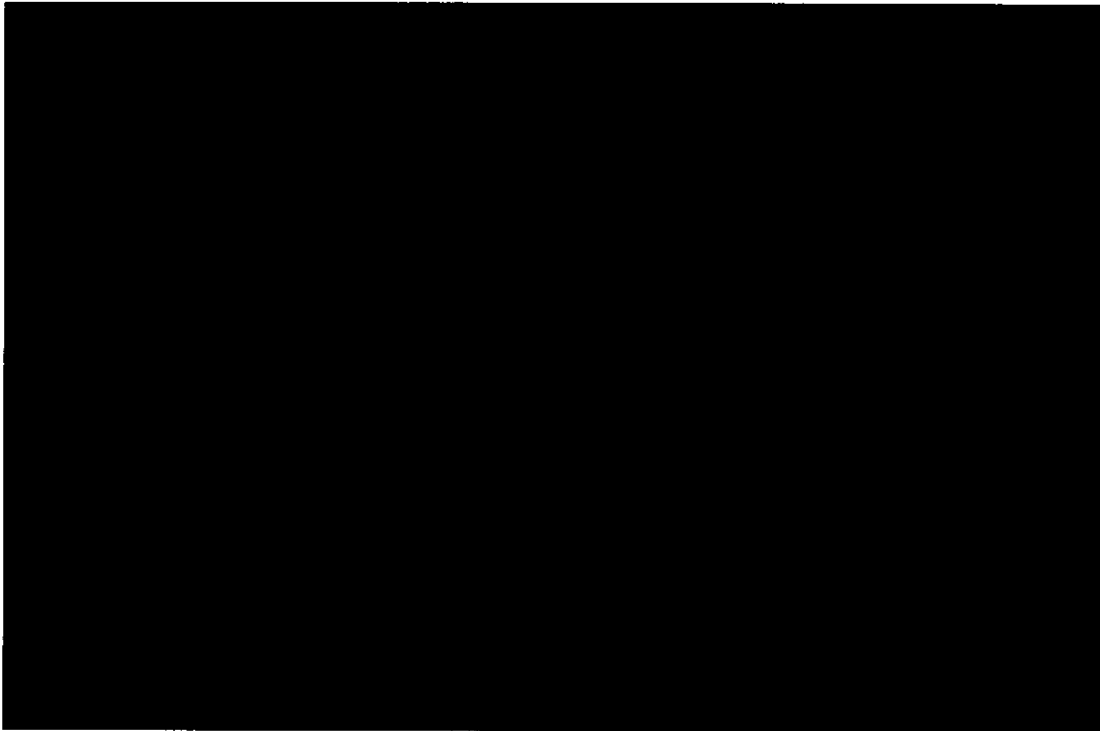


Figura 9.86  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=60 \text{ min}$

VF



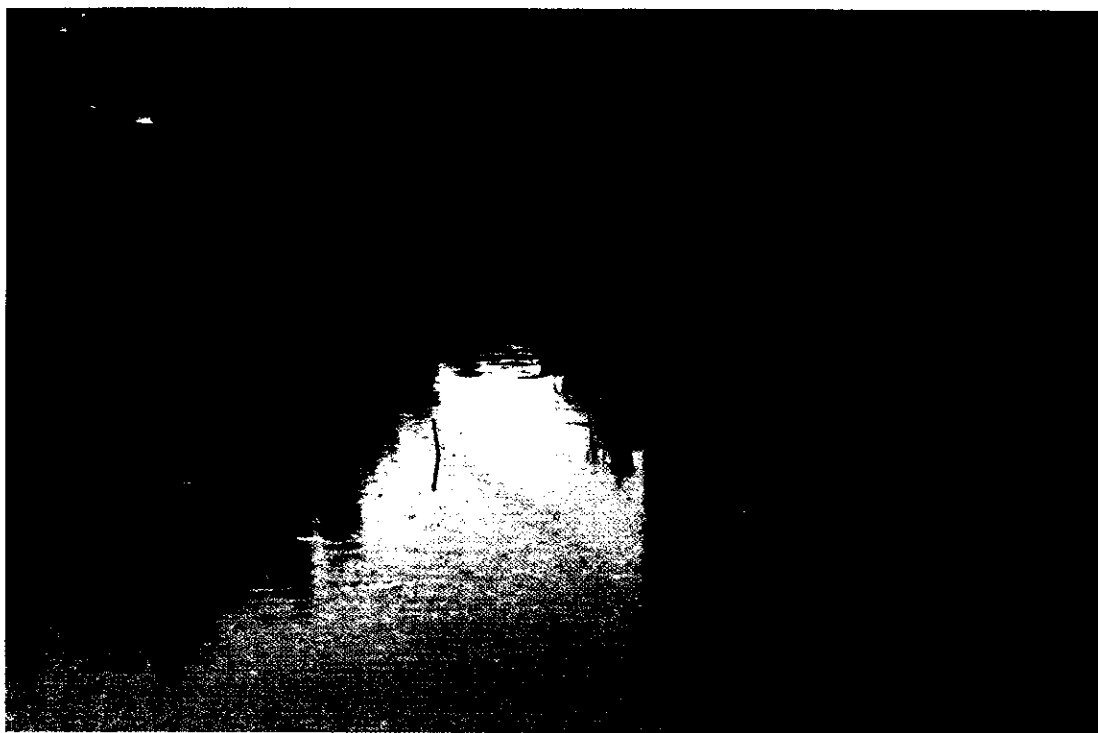
**Figura 9.87  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=80 \text{ min}$**

Para esta prueba se puede concluir que existe arrastre de sedimento sobre el canal piloto y las márgenes, aunque como se aprecia en las pruebas anteriores el arrastre de sedimento está directamente relacionado con el gasto y en el caso de un gasto de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  se tiene un arrastre sobre el canal piloto y también existe sobre las márgenes el cual es mayor que para el gasto de  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ . bajo estas condiciones de operación se observa que el arrastre de sedimento se desarrolla en la sección próxima a la zona de compuertas dejando ver que en la entrada del canal piloto es arrastre es prácticamente nulo

**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.**

Esta prueba se desarrolló derivando  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  hacia el Carrizal, la condición de las compuertas fue totalmente abierta. Se operó con el cauce de estiaje sólo en la margen izquierda del Carrizal. Una vista general de la prueba se4 observa en la Figura 9.88

V F



**Figura 9.88 Vista general del modelo para la condición de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  hacia el Carrizal**

Las pruebas consistieron en colocar un trazador en el fondo del cauce, previamente reconfigurado, para observar su comportamiento, se contaba con dos secciones de control, una a 600 m y una segunda a 400 m (aprox.) ambas referidas al eje de la cortina. En las pruebas se registró fotográficamente el comportamiento del sedimento del fondo, es decir cómo se modificaba el fondo en el tiempo. En esta prueba se decidió colocar dos veces el trazador, ya que el transporte de sedimento se desarrolla de una manera más rápida que con las otras pruebas en las Figura 9.89 a Figura 9.94 se observa el sitio correspondiente a 600 m.

Bajo esta condición el cauce de estiaje presenta desbordamientos, por lo que se tiene un arrastre de sedimento considerable sobre el fondo y aún en las márgenes del canal, ya que se aprecia que el movimiento del trazador es igual tanto en el fondo como en las márgenes.



Figura 9.89  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=0 \text{ min}$



Figura 9.90  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=5 \text{ min}$

*VF*





Figura 9.91  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=10 \text{ min}$



Figura 9.92  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=15 \text{ min}$

VF



Figura 9.93  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=20 \text{ min}$

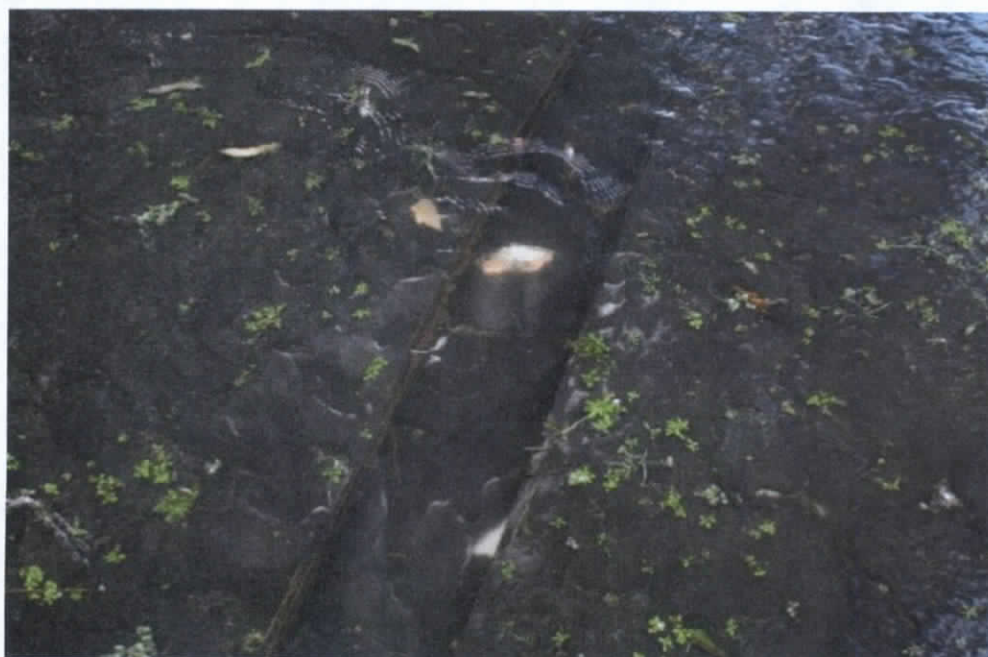


Figura 9.94  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=25 \text{ min}$

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



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

Como se observa en las fotografías anteriores después de 25 min de operación el modelo arrastra todo el trazador de la sección de control, el transporte del sedimento se realiza prácticamente en los primeros 5 min después de haberlo colocado.

En la zona de muestreo más cercana a la zona de compuertas se tiene un comportamiento similar al que se realizó a una distancia de aprox. 600 m, sólo que se observa una velocidad mayor y debido a eso el arrastre sedimento en las Figura 9.95 a Figura 9.98 se observa el sitio correspondiente a 400 m.



Figura 9.95  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=5 \text{ min}$



Figura 9.96  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=2 \text{ min}$

VF



Figura 9.97  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=5 \text{ min}$



Figura 9.98  $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$   $t=10 \text{ min}$



**B.7 Prueba para  $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ , sin un cauce de estiaje y descarga libre.**

Se realizó otra prueba retirando los muros del cauce de estiaje y reconfigurando la plantilla del modelo Figura 9.99, con el propósito de observar el comportamiento del arrastre de sedimento bajo estas condiciones (sin paredes rígidas). La prueba se realizó con un gasto de  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ , las compuertas de margen derecha e izquierda totalmente abiertas.

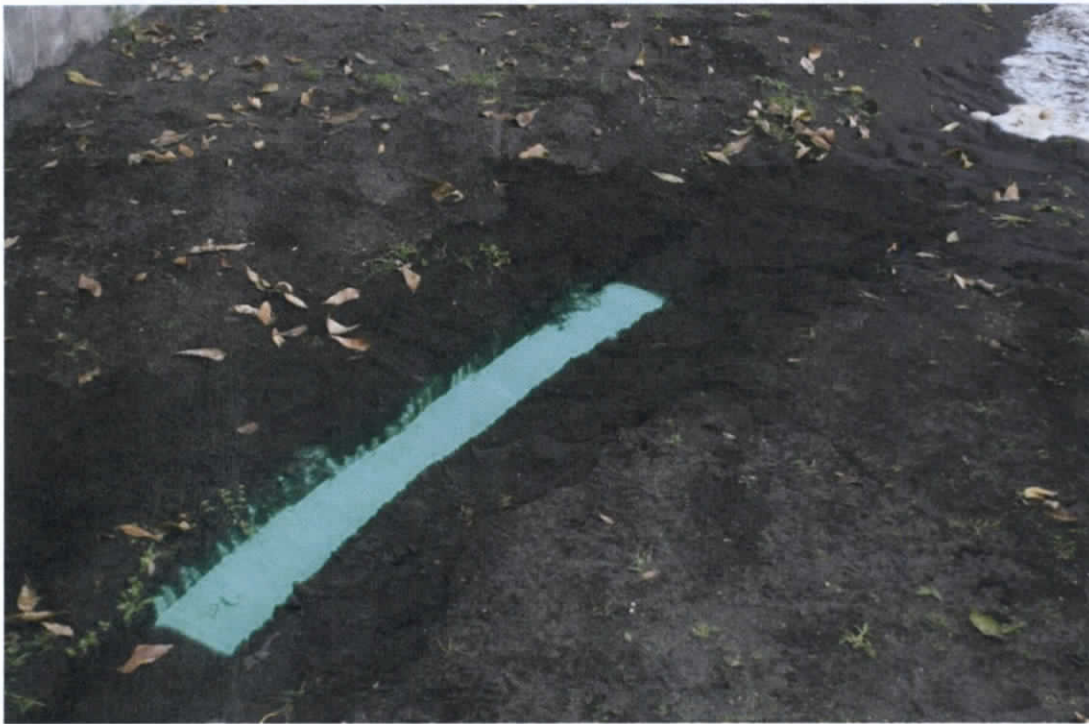


**Figura 9.99 Reconfiguración de la prueba sin paredes**

Posteriormente al retiro de las paredes del cauce de estiaje y habiendo realizado la reconfiguración del modelo, se construyeron canales rectangulares, del mismo ancho del cauce de estiaje (ver Figura 9.100). Es importante señalar que este cauce se construyó en

“seco”, porque existe la posibilidad de que en la práctica tenga que construirse bajo el agua, lo cual según las pruebas realizadas en el modelo no será posible, como se discutirá adelante.

El construir el canal en “seco” fue con el propósito de observar su funcionamiento y conocer si es posible mantener la geometría una vez que fluye el agua en ellos (ver Figura 9.101).

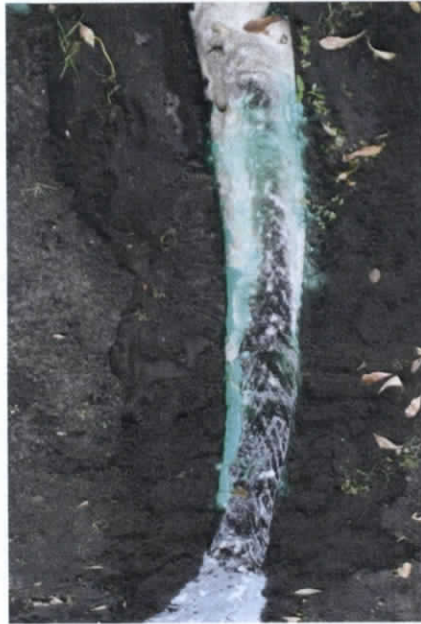


**Figura 9.100** Cauce de estiaje construido en seco sin muros rígidos

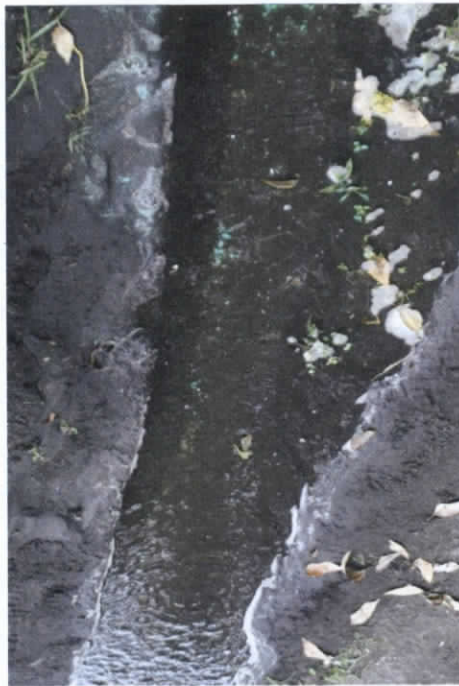
En el funcionamiento bajo estas condiciones se observa que existe arrastre de sedimento en el fondo del canal y sobre las márgenes ya que para dicho gasto el canal se desborda. La duración de la prueba fue aprox. 40 min. (Ver Figura 9.102), si bien en este tiempo existe arrastre de sedimento también se observó que el canal va desapareciendo lo que se aprecia en la Figura 9.103 ya que el canal va perdiendo su configuración inicial de aguas arriba hacia aguas abajo.

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

Lo que hace suponer que en el prototipo pasará algo similar si no se considera poner el cauce de estiaje piloto con muros rígidos.



**Figura 9.101 Prueba del cauce de estiaje construido en seco sin muros rígidos al inicio de la prueba**



**Figura 9.102 Prueba del cauce de estiaje construido en seco sin muros rígidos, después de 40 min.**





**Figura 9.103 Configuración del cauce de estiaje construido en seco sin muros rígidos al final de la prueba**

#### **B.8 Prueba para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ , sin un cauce de estiaje y descarga libre.**

Se realizó otra prueba con el propósito de simular el proceso constructivo del cauce de estiaje, ya que existe la posibilidad de que los canales se draguen cuando el nivel en el cauce esté alto y no sea posible trabajar en seco. A partir de lo anterior, surgió la duda si es posible generar dicha geometría solamente dragando en el fondo, ya que como se observó en las pruebas anteriores, el transporte de sedimentos es posible siempre y cuando existan paredes rígidas. Esto se probó utilizando una bomba sumergible para extraer el sedimento del fondo Figura 9.104 y Figura 9.105

Aunque es posible extraer el sedimento del fondo con el propósito de hacer un canal trapecial piloto, se observó que no se puede tener control sobre la geometría y se presenta un colapso rápido de las “paredes” que no permite generar una geometría estable, que pueda considerarse como un cauce estable.



Figura 9.104 Simulación del dragado con bomba sumergible



Figura 9.105 Descarga de la bomba sumergible (nótese la gran descarga de sedimento)

## B.9 Conclusiones

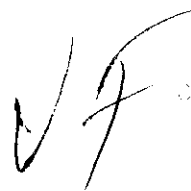
- Se observó que es posible el transporte de sedimento al existir un cauce de estiaje de muros rígidos, aunque se aprecia que el arrastre ocurre principalmente por el cauce piloto y en algunos casos por las márgenes del mismo.
- Si no se construye el cauce de estiaje de muros rígidos y se construye el canal sin presencia de agua, se tendrá una geometría temporal y un arrastre de sedimentos similar al que ocurre en presencia de muros rígidos, sin embargo a la larga esta geometría desaparecerá. En la medida que transita el flujo por el canal va perdiendo capacidad hidráulica y se va desvaneciendo, lo que indica que sería una solución solo temporal y para mantenerlo habría que mantener un programa de dragado continuo.
- Derivado de las pruebas realizadas con el trazador colocado en la plantilla se observa que el arrastre de sedimento se da más rápido entre más cercano esté de la zona de compuertas, observando que a la entrada del cauce el arrastre es menor.
- El arrastre de sedimento sobre el cauce de estiaje empieza a ser significativo a partir de los 150 m<sup>3</sup>/s, ya que durante la prueba de 60 m<sup>3</sup>/s no se observa que exista un arrastre importante aún con la construcción de los muros.
- Para que se presente el arrastre de sedimento las compuertas deben estar totalmente abiertas, ya que en la prueba con compuertas parcialmente cerradas no se observó un arrastre significativo



2017-09-27

## Anexo A.9.3

(Características del modelo numérico SSIM)



En los trabajos de Olsen A, 2001, 2010 y 2011, se presenta con todo detalle las características del modelo SSIIM (Simulation of Sediment Movements In Intakes with Multiblock Option). A continuación sólo se presentan algunos datos generales.

El modelo numérico SSIIM es un modelo numérico tridimensional desarrollado por la División de Ingeniería Hidráulica del Instituto de Tecnología Noruego durante 1990 a 1991, cuyo primer objetivo fue la simulación del transporte de sedimentos en ríos y canales. Se escogió este modelo por su disponibilidad ya que es **un modelo gratuito**, que ofrece la posibilidad de resolución de las ecuaciones de Navier Stokes; y por facilidad de elaboración de sus códigos, lo que facilita su uso en el caso de requerirse la creación de otros nuevos.

El SSIIM permite modelar el transporte de sedimentos en lechos móviles usando diferentes tipos y tamaños de sedimento, cargas de fondo y suspendida, formas de lecho y pendientes del cauce.

El programa resuelve las ecuaciones de Navier – Stokes tridimensionalmente, las que son discretizadas mediante la aplicación del método de volumen de control y del esquema de ley de potencia (Power Law). Emplea un esquema implícito para el cálculo del campo de velocidades, las que luego son usadas para resolver las ecuaciones de convección – difusión para diferentes tamaños de partículas, obteniendo así la eficiencia de remoción y el patrón de depósito de sedimentos.

Existen dos versiones del modelo: SSIIM 1 que trabaja con mallas estructuradas y el SSIIM 2 para mallas no estructuradas. El desarrollo del presente trabajo, fue realizado con la primera versión.

Dentro de las limitaciones del programa, está que no puede ser usado para ambientes marinos.

Los resultados que se pueden obtener realizando una modelación con el SSIIM, se enlistan en la Tabla 9.1.





**Tabla 9.1 Variables calculados con el modelo SSIIM**

| Variables                                   |  |
|---|--|
| Vectores velocidad                          | Niveles de agua                            |
| Velocidad horizontal y vertical             | Número de Froude                           |
| Presión                                     | Promedio Velocidad – Profundidad           |
| Energía cinemática turbulenta               | Rugosidad                                  |
| Epsilon                                     | Esfuerzos Cortantes en el lecho            |
| Viscosidad turbulenta horizontal y vertical | Espesor sedimento en el lecho              |
| Esfuerzos de Reynolds                       | Concentración de sedimentos (por diámetro) |
| Profundidad                                 | Espesor de capa activa de sedimentos       |
| Cambios en el lecho                         | Parámetros de calidad de agua              |

Adicional a estas variables, SSIIM genera un archivo de resultados (result file) donde incluye el número de iteraciones realizadas hasta converger, las velocidades en las tres dimensiones,  $k, \epsilon$ , presión, los flujos en las paredes de las celdas de la malla. Esta información es usada para el cálculo de la concentración de sedimentos generando un archivo de resultados (conres file).

A continuación se describen brevemente las ecuaciones usados por el SSIIM para el cálculo del flujo de agua y sedimentos.

- **Cálculo del flujo de agua**

La mayoría de los fluidos que se presentan en el campo de la ingeniería, son de tipo turbulento, caracterizados por movimientos irregulares y aleatorios en los cuales la velocidad y presión cambia continuamente en espacio y tiempo. De ahí la necesidad de contar con ecuaciones que consideren la turbulencia. Las ecuaciones promediadas de Navier Stokes, consideran este efecto con el término de esfuerzo de Reynolds; y son expresadas por

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{U_i U_j}) \quad \text{Ec. 9-1}$$

Los términos representados en esta ecuación son, en orden de izquierda a derecha, el término transitorio, convectivo, de presión y el esfuerzo de Reynolds.

Dada la complejidad para resolver estas ecuaciones, se requiere el uso de métodos numéricos mediante la aplicación de esquemas.

- **Término Transitorio**

En el algoritmo predeterminado del SSIIM este término no se considera a menos que se quiera realizar cálculos a través del tiempo, para lo cual es necesario indicar los niveles de agua y la descarga.

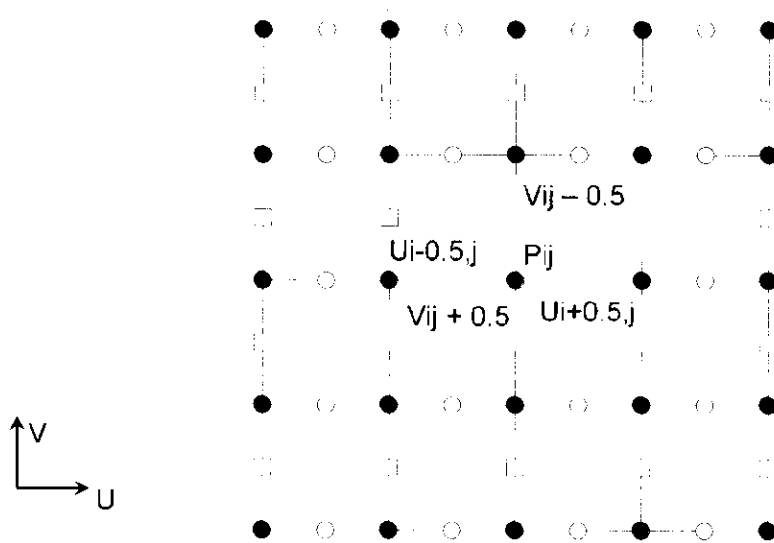
- **Término Convectivo**

Para la discretización del término convectivo se aplica el esquema de ley de potencia o esquema de segundo orden. Los esquemas de este tipo, son descentrados e incorporan las propiedades del fenómeno físico, asumiendo que, la información viaja a lo largo de las líneas características de modo que los puntos envueltos en las derivadas espaciales contengan al dominio; para lo cual se usan derivadas espaciales tanto hacia adelante como hacia atrás.

- **Término de presión**

Mediante la aplicación del algoritmo SIMPLE, se consigue discretizar este término. Este algoritmo cuyo nombre corresponde a las siglas de "Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations", fue propuesto por Patankar y Spalding (1972); y propone la cuantificación del flujo convectivo a través de las celdas de una malla por la evaluación de las componentes de la velocidad.

El tipo de malla usada en este algoritmo, es de tipo alterna, esto conlleva que las variables: Presión, densidad, etc. son concentradas en el centro de cada celda unitaria de la malla; mientras que las variables: Velocidad y momentum están ubicada en las caras de las celdas. Este tipo de mallas es usado para la modelación de flujos compresibles e incompresibles. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un ejemplo de esta malla.



**Figura 9.106 Ejemplo de malla alterna**

El algoritmo SIMPLE, se resume en el diagrama de flujo de la Figura 9.107

Para la solución de las ecuaciones de Navier Stokes por métodos iterativos por su característica no lineal, es necesario introducir un término de relajación que ayude a controlar las variaciones que se producen entre iteraciones.

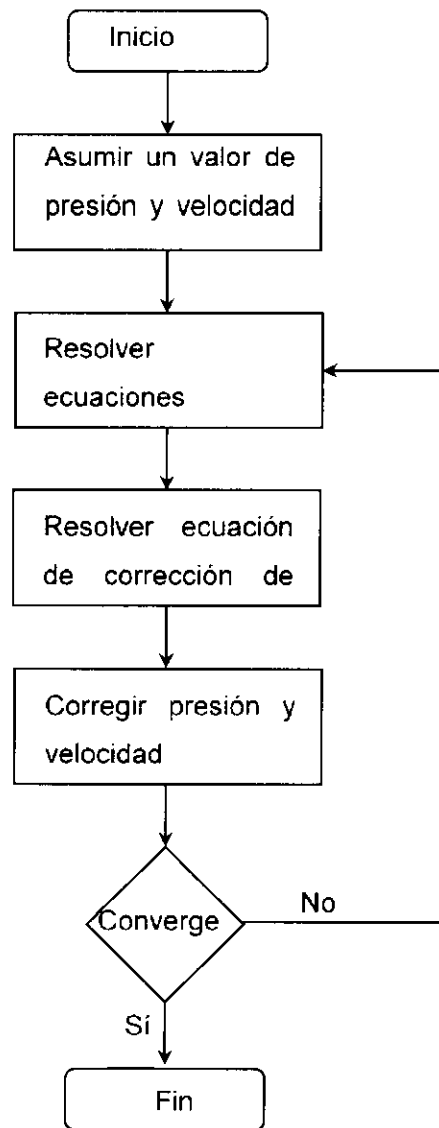


Figura 9.107 Algoritmo SIMPLE

- **Esfuerzo de Reynolds**

La discretización de este término, se la realiza con la aproximación de Boussinesq que plantea una relación lineal entre los tensores de esfuerzos de Reynolds y los gradientes de velocidad a través de la viscosidad turbulenta.

$$-\overline{u_i u_j} = V_t \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad \text{Ec. 9-2}$$

A partir de esta ecuación, surge una nueva interrogante que es la definición de la viscosidad turbulenta. El modelo predeterminado en SSIIM es el k-ε que será brevemente explicado.

○ **Modelo k-ε**

Este modelo fue desarrollado por Launder y Spalding (1974) y utiliza la energía cinética del flujo (k) y el porcentaje de disipación de la energía cinética, resultado del trabajo realizado por los remolinos más pequeños en contra del esfuerzo viscoso (ε).

La viscosidad turbulenta es calculada por

$$V_T = c_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad \text{Ec. 9-3}$$

k es la energía cinética turbulenta, definida por

$$k = \frac{1}{2} \overline{U_i u_i} \quad \text{Ec. 9-4}$$

k es modelada con la ecuación

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad \text{Ec. 9-5}$$

Donde P<sub>k</sub> está dada por

$$P_k = v_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad \text{Ec. 9-6}$$

La disipación de k se conoce como ε, y se modela con la ecuación



$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} P_k \quad \text{Ec. 9-7}$$

Los valores de las constantes para el modelo k - ε son  $c_{\mu} = 0.09$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ; y  $\sigma_\varepsilon = 1.3$

- **Cálculo del flujo de sedimentos.**

El transporte de sedimentos en corrientes se puede dar de 2 maneras: en suspensión y por arrastre de fondo. Las partículas más finas que viajan en suspensión se las conoce como carga de suspensión, por otra parte aquellas partículas de gran tamaño que son transportadas por arrastre a lo largo del fondo del cauce, se denominan arrastre de fondo.

Para el cálculo del transporte es necesario ingresar en SSIM, por diámetro de partícula, el porcentaje de éste, su velocidad de caída y su carga; éste último valor puede ser ingresado como flujo (Kg/s) o como concentración por volumen.

La cuantificación de la carga suspendida se calcula con la ecuación de convección – difusión para la concentración de sedimentos.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad \text{Ec. 9-8}$$

Donde c es la concentración de sedimentos, w es la velocidad de caída de las partículas, U es la velocidad del agua, x es dimensión y  $\Gamma$  es la difusividad turbulenta, y está definida como:

$$\Gamma = \frac{V_T}{Sc} \quad \text{Ec. 9-9}$$

En la cual  $V_T$  es la viscosidad turbulenta y Sc es el Número de Schmidt.

La concentración de la carga suspendida se lo hace con la ecuación de Van Rijn (1987)

$$c = 0.015 \frac{d^{0.3} \left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{a \left[ \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad \text{Ec. 9-10}$$

Donde  $d$  es el diámetro,  $a$  la altura de la rugosidad,  $\tau$  el esfuerzo cortante del lecho (Curva de Shields),  $\rho_w$  densidad del agua,  $\rho_s$  densidad del sedimento,  $\nu$  viscosidad del agua; y finalmente  $g$  la aceleración de la gravedad.

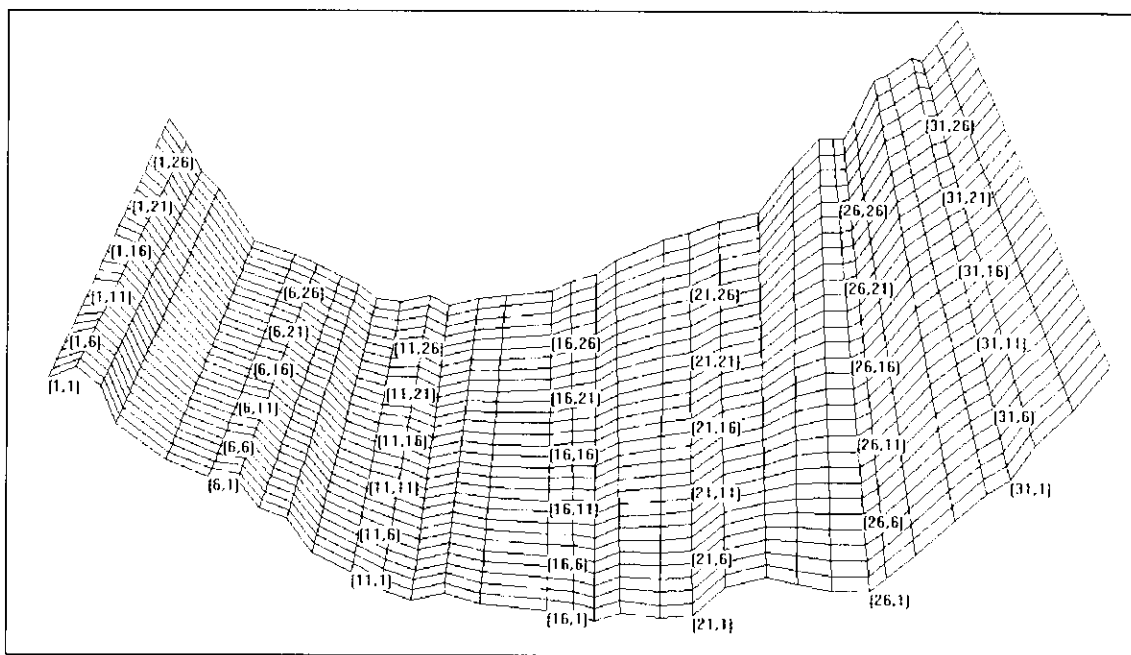
La carga suspendida se obtiene con la ecuación de Van Rijn's

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho}}} = 0.053 \frac{\left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{2.1}}{D_{50}^{0.3} \left[ \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad \text{Ec. 9-11}$$

Dentro de la información de entrada requerida para la ejecución del modelo, está relacionada con la geometría del problema a estudiar, las condiciones hidráulicas en las fronteras; y la información de sedimentos.

Para la generación de la malla se contó con la topografía del río a estudiar, el cual fue dividido en 34 secciones transversales; cada una de las cuales se dividió a su vez en 30 secciones longitudinales.

En la Figura 9.108 se presenta la malla usada para la modelación en SSIIM de la bifurcación.



**Figura 9.108 Geometría de la bifurcación**

El ingreso de los puntos x, y y z que conforman la malla, se realiza en el archivo coordina junto con su respectiva identificación del punto.

A continuación se presentan listados de los archivos de control de algunas pruebas de calibración del modelo SSIIM. Se añaden también algunas de las gráficas de ejemplos de los resultados. Los resultados que ofrece el SSIIM en cada corrida son del orden de 20 gráficas.

| T  | control  | title                                      | field       |
|--|--|--|-------------|
| F 2  | IS   |  |             |
| F 4  | 0.5 500 0.1  | relajacion                                 |             |
| F 11   | 2.65 -0.045  | denssed                                    |             |
| TF 16  | 0.01375  | ruhet 2.5*d50                              |             |
| TF 16  | 0.001  | smooinfluye                                |             |
| F 33   | 3600.0 5   | stepeiter00320000                          |             |
| F 36   | 2  | tfsrutojodoscontornossicambiasssssssssssss |             |
| F 37   | 1  | tscrutojodos                               |             |
| F 62   | 1  | locambieeeee                               |             |
| F 81   | 200  | pasostimeiguassssssssssssssssss            |             |
| F 84   | 2  | both                                       |             |
| TF 90  | 2  | roughpart                                  |             |
| G 1  | 34 30 6 1  | grid and array sizes                       |             |
| G 3  | 0.00 20.0 40.0 60.0 80.0 100.000000                  | vertical grid                              |             |
| G 7  | 0 1 2 30 2 6 0 0                                     | 600.0 1.0 0.0 0.0                          | main inflow |
| G 7  | 1 -1 11 12 3 6 0 0                                   | 250.0 1.0 0.0 0.0                          | outflowmd   |
| G 7  | 1 -1 15 30 2 6 0 0                                   | 350.0 1.0 0.0 0.0                          | outflowmizq |
| G 7  | 1 2 28 28 2 5 0 0                                    | 0.0 1.0 0.0 0.0                            | lateral     |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmorrocentra]                       |  |  |             |
| G 13   | 2 7 18 13 14 2 6                                     | empiezomorro                               |             |
| G 13   | 2 19 34 13 14 2 6                                    | hasta el finalooo                          |             |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmargenderechafinal                 |  |  |             |
| G 13   | 2 29 34 2 10 2 6                                     |  |             |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmargenderechafinalfinalloguardamos |  |  |             |
| TG 13  | 2 29 34 11 12 2 4                                    |  |             |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmargen derechaTTTT                 |  |  |             |
| G 13   | 2 6 18 2 10 2 6                                      | pedazoempiezaabajo                         |             |
| G 13   | 2 19 28 2 10 2 6                                     | pedazoquesigueabajo                        |             |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmargen derechaTTTT                 |  |  |             |
| TG 13  | 2 5 25 2 11 2 6                                      | pedazoempiezarriba                         |             |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTrugosigadgastonivelllllll          |  |  |             |
| w 1  | 35.000 200.00 18.50                                  |  |             |
| w 2  | 19 1 3 5 6 7 8 9 10 11 13 15 17 19 21 23 25 28 30 33 |  |             |
| w 4  | 2 0 2 28 28 2 5                                      | opening of wall for intake                 |             |

Figura 9.109 Tabla de resultados

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

|                  |   |        |              |       |    |    |   |   |   |         |      |
|------------------|---|--------|--------------|-------|----|----|---|---|---|---------|------|
|                  |   |        |              |       |    |    |   |   |   | control |      |
| W                | 4 | 1      | 1            | 34    | 13 | 14 | 2 | 6 |   | wall    | tres |
| W                | 4 | 1      | -1           | 34    | 13 | 14 | 2 | 6 |   | wall    | tres |
| TTTTTTTTTTTTTTTT |   |        |              |       |    |    |   |   |   |         |      |
| S                | 1 | 0.0005 | 0.0624       | sedim |    |    |   |   |   |         |      |
| I                | 1 | 00.00  | sedgasolentr |       |    |    |   |   |   |         |      |
| N                | 0 | 1      | 1.0          |       |    |    |   |   |   |         |      |
| B                | 0 | 0      | 0            | 0     | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 |         |      |
| K                | 1 | 800    | 60000        |       |    |    |   |   |   |         |      |
| K                | 2 | 0      | 1            |       |    |    |   |   |   |         |      |

Figura 9.110 Tabla de resultados

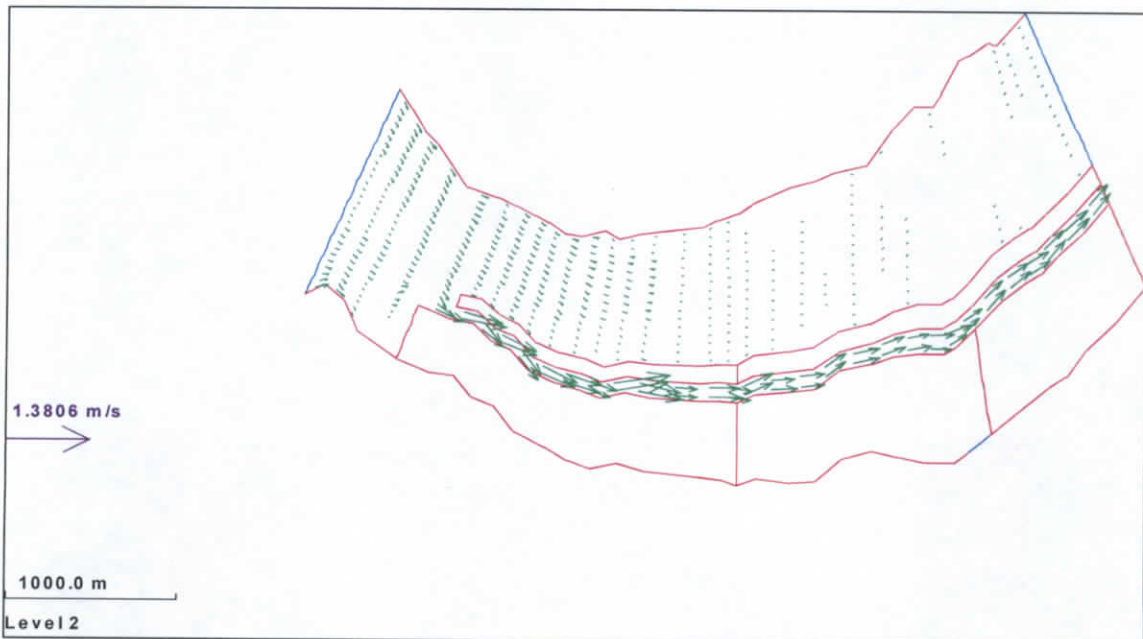


Figura 9.111 Mapa de distribución

*VF*



| T  | control<br>title field                            |
|--|---|
| F 2  | w   |
| F 4  | 0.5 500 0.1 relajacion                            |
| F 11   | 2.65 -0.045 denssed                               |
| TF 16  | 0.01375 ruhet 2.5*d50                             |
| TF 16  | 0.001 smooinfluye                                 |
| F 33   | 180.0 5 stepeiter00320000                         |
| F 36   | 2 tfsrutojodoscontornossicambiassssssssssssss     |
| F 37   | 1 tscrutojodos                                    |
| F 62   | 1 locambieeeee                                    |
| F 81   | 200 pasostimeiguassssssssssssssssss               |
| F 84   | 2 both  |
| F 108  | 12.0  |
| TF 90  | 2 roughpart                                       |
| G 1  | 34 30 6 1 grid and array sizes                    |
| G 3  | 0.00 20.0 40.0 60.0 80.0 100.000000 vertical grid |
| G 7  | 0 1 2 30 2 6 0 0 1450.1 1.0 0.0 0.0 main inflow   |
| G 7  | 1 -1 2 8 2 6 0 0 450.0 1.0 0.0 0.0 outflowmd      |
| G 7  | 1 -1 17 30 2 6 0 0 1000.1 1.0 1.0 0.0 outflowmizq |
| G 7  | 1 2 28 28 2 6 0 0 000.0 1.0 0.0 0.0 lateral       |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmorrocentra                  |   |
| TG 13  | 2 10 17 13 15 2 6 empie1719zomorro                |
| TG 13  | 2 18 19 13 14 2 2 bajadaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa  |
| TG 13  | 2 20 23 13 16 2 6 hastael20finalooo               |
| TG 13  | 2 26 34 13 16 2 6 hasta el26 finalooo             |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTisla                         |   |
| TG 13  | 2 23 24 4 6 2 6 isla                              |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTpisofinal                    |   |
| TG 13  | 2 31 34 6 16 2 2 pisofinal                        |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTAPON                         |   |
| TG 13  | 2 10 10 10 12 2 6 tapon                           |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmargenderecha129final        |   |
| TG 13  | 2 29 32 4 8 2 6                                   |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmargen derechaTTTT           |   |
| TTTG 13  | 2 10 25 9 11 2 6 pedazoempiezaabajoooooooo        |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmargen derechapisosalidaTTTT |   |
| TTTG 13  | 2 29 34 9 12 2 2 pisosalidaabajoooooooo           |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmargen derechaTTTT           |   |

**Figura 9.112 Tabla de resultados**



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

```

                                control
TG 13 2 10 33 2 9 2 3 pedazoempiezaarriba

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTespigonvillano
W 4 1 1 9 2 8 2 6 espigonvillano
W 4 1 -1 9 2 8 2 6 espigon

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTespigonnooooo28oovillanoparalelo

TW 4 2 1 8 15 29 2 6 espigonooooovillano
TW 4 2 -1 8 15 29 2 6 espigonooooo

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmini17espigo

TW 4 1 1 17 9 12 2 6 miniespigon
TW 4 1 -1 17 9 12 2 6 espigon

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmini25espigon2

TW 4 1 1 23 9 12 2 6 miniespigon
TW 4 1 -1 23 9 12 2 6 espigon

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTrugosigadgastonivel11111

W 1 50.000 1450.00 16.
W 2 19 1 3 5 6 7 8 9 10 11 13 15 17 19 21 23 25 28 30 33
W 4 2 0 2 28 28 2 6 opening of wall for intake

TTTTTTTTTTTTparedesfinales

TW 4 1 1 34 7 11 2 6 wall unooooomientrasooooooooo
TW 4 1 -1 34 7 11 2 6 wall unooooomientrasooooooooo

W 4 1 1 34 8 15 2 6 wall tres
W 4 1 -1 34 8 15 2 6 wall tres

TW 4 1 1 34 9 12 2 5 wall cuatro
TW 4 1 -1 34 9 12 2 5 wall cuatro

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTT

S 1 0.0002 0.0253 sedim
I 1 00.00 sedgasolentr
N 0 1 1.0
B 0 0 0 0 0 0

K 1 800 60000
K 2 0 1
    
```

Figura 9.113 Tabla de resultados

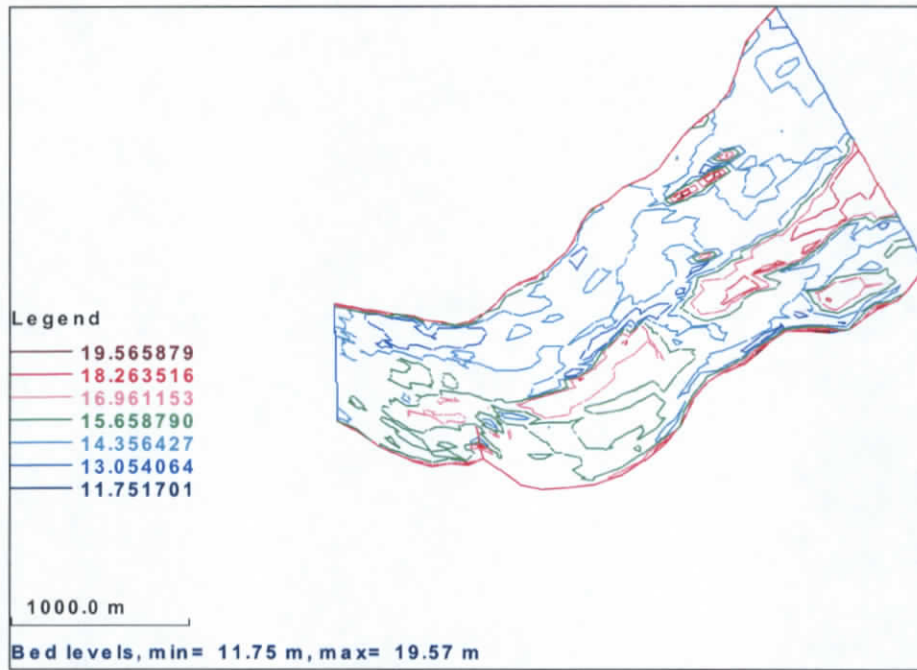


Figura 9.114 Mapa de distribución del fondo

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

| T  | control | title                                      | field  |
|--|---------|--|--|
| F 2  | IS      |  |  |
| F 4  | 0.5     | 500  | 0.1 relajacion                                     |
| F 11   | 2.65    | -0.045                                     | denssed  |
| TF 16  | 0.01375 | ruhet                                      | 2.5*d50  |
| TF 16  | 0.001   | smooinfluye                                |  |
| F 33   | 3600.0  | 5  | stepeitero0320000                                  |
| F 36   | 2       | tfsrutojodoscontornossicambiasssssssssssss |  |
| F 37   | 1       | tscrutojodos                               |  |
| F 62   | 1       | locambieeeee                               |  |
| F 81   | 200     | pasostimeiguassssssssssssssss              |  |
| F 84   | 2       | both                                       |  |
| F 108  | 12.0    |  |  |
| TF 90  | 2       | roughpart                                  |  |
| G 1  | 34      | 30   | 6 1 grid and array sizes                           |
| G 3  | 0.00    | 20.0                                       | 40.0 60.0 80.0 100.000000 vertical grid            |
| G 7  | 0       | 1  | 2 30 2 6 0 0 1250.1 1.0 0.0 0.0 main inflow        |
| G 7  | 1       | -1   | 9 10 2 6 0 0 250.0 1.0 0.0 0.0 outflowmd           |
| G 7  | 1       | -1   | 2 3 2 6 0 0 000.0 1.0 0.0 0.0 outflowmdd           |
| G 7  | 1       | -1   | 17 30 2 6 0 0 1000.1 1.0 1.0 0.0 outflowmizc       |
| G 7  | 1       | 2  | 28 28 2 6 0 0 000.0 1.0 0.0 0.0 lateral            |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmorrocentral                     |         |  |  |
| TTTG   | 13      | 2  | 10 19 13 15 2 6 empie1719zomorro                   |
| TG   | 13      | 2  | 18 19 13 14 2 2 bajadaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa |
| TTTG   | 13      | 2  | 23 26 12 13 2 6 hastael20finaloo                   |
| TTTG   | 13      | 2  | 27 34 12 14 2 6 hasta el26 finaloo                 |
| TTTG   | 13      | 2  | 34 34 2 8 2 6 cortina                              |
| G 13   | 2       | 21   | 34 9 9 2 5 morroespigon                            |
| G 13   | 2       | 24   | 34 12 12 2 5 morroespigon                          |
| G 13   | 2       | 20   | 20 9 14 2 5 morroespigonvertical                   |
| G 13   | 2       | 23   | 23 12 14 2 5 morroespigonvertical                  |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTisla                             |         |  |  |
| G 13   | 2       | 29   | 31 5 6 2 6 isla                                    |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmargenderechal29final            |         |  |  |
| TG   | 13      | 2  | 33 34 2 8 2 6                                      |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTespigonvillano                   |         |  |  |
| w 4  | 1       | 1  | 8 2 10 2 6 espigonvillano                          |
| w 4  | 1       | -1   | 8 2 10 2 6 espigon                                 |
| TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTespigonnooooo28oovillanoparalelo |         |  |  |
| TW   | 4       | 2  | 1 8 20 27 2 6 espigonooooovillano                  |
| TW   | 4       | 2  | -1 8 20 27 2 6 espigonooooo                        |
| TW   | 4       | 2  | 1 8 28 31 2 6 espigonooooovillano                  |
| TW   | 4       | 2  | -1 8 28 31 2 6 espigonooooo                        |

Figura 9.115 Tabla de resultados





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

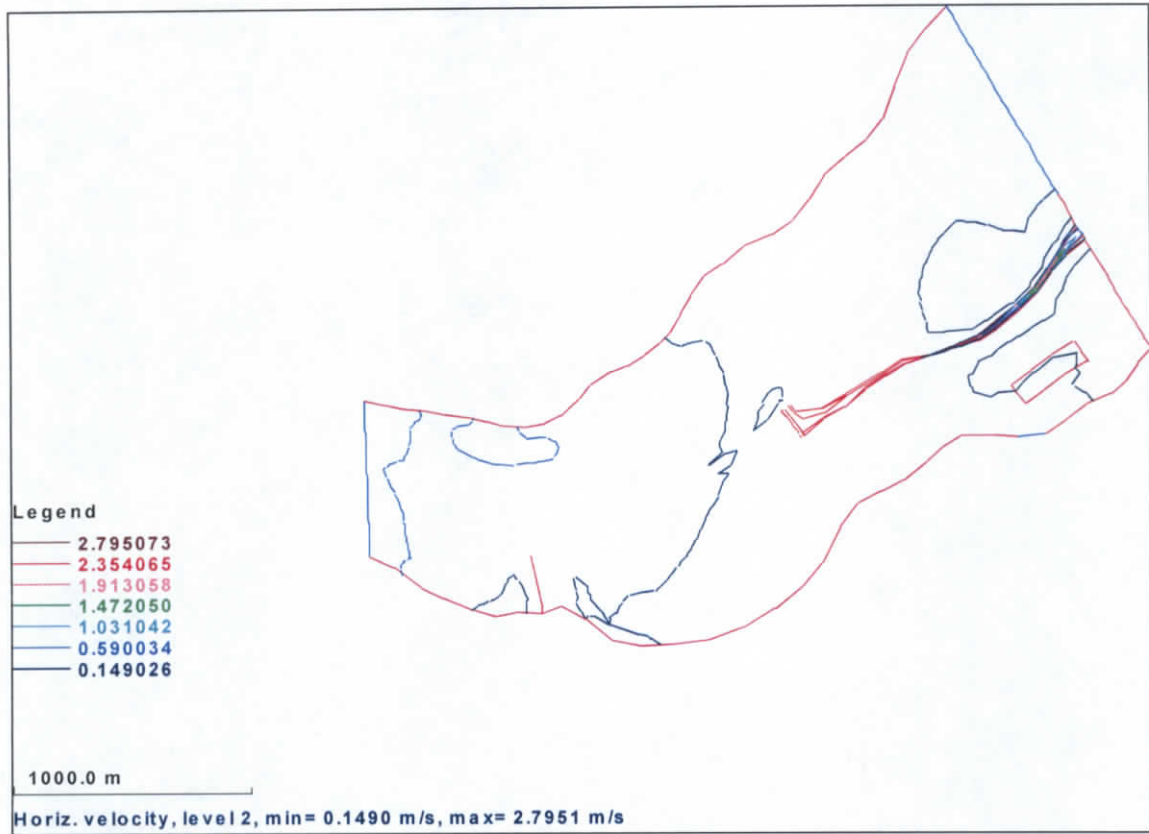


Figura 9.117 Mapa de distribución de velocidades

V F

```

                                control
TW 4 2 1 8 28 31 2 6 espigonooooovillano
TW 4 2 -1 8 28 31 2 6 espigonoooo

TW 4 2 1 8 32 34 2 6 espigonooooovillano
TW 4 2 -1 8 32 34 2 6 espigonoooo

    TW 4 2 1 11 23 34 2 6 espigonooooovillano
    TW 4 2 -1 11 23 34 2 6 espigonoooo

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTmini17espigo

TW 4 1 1 19 9 13 2 6 miniespigon
TW 4 1 -1 19 9 13 2 6 espigon

TW 4 1 1 27 9 10 2 6 miniespigon
TW 4 1 -1 27 9 10 2 6 espigon

TW 4 1 1 31 9 10 2 6 miniespigon
TW 4 1 -1 31 9 10 2 6 espigon

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTrugosigadgastonivel111111

W 1 50.000 1250.00 16.50
W 2 19 1 3 5 6 7 8 9 10 11 13 15 17 19 21 23 25 28 30 33
W 4 2 0 2 28 28 2 6 opening of wall for intake

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTparedesfinales

W 4 1 1 34 3 9 2 6 wallunoantes
W 4 1 -1 34 3 9 2 6 wallunoantes

W 4 1 1 34 12 14 2 6 wall unooooomientrasoooooooooooo
W 4 1 -1 34 12 14 2 6 wall unooooomientrasoooooooooooo

TW 4 1 1 34 9 12 2 5 wall cuatro
TW 4 1 -1 34 9 12 2 5 wall cuatro

TTTTTTTTTTTTTTTTTTTT

S 1 0.0002 0.0253 sedim
I 1 500.00 sedgasolentr
N 0 1 1.0
B 0 0 0 0 0 0

K 1 800 60000
K 2 0 1
    
```

Figura 9.118 Tabla de resultados

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

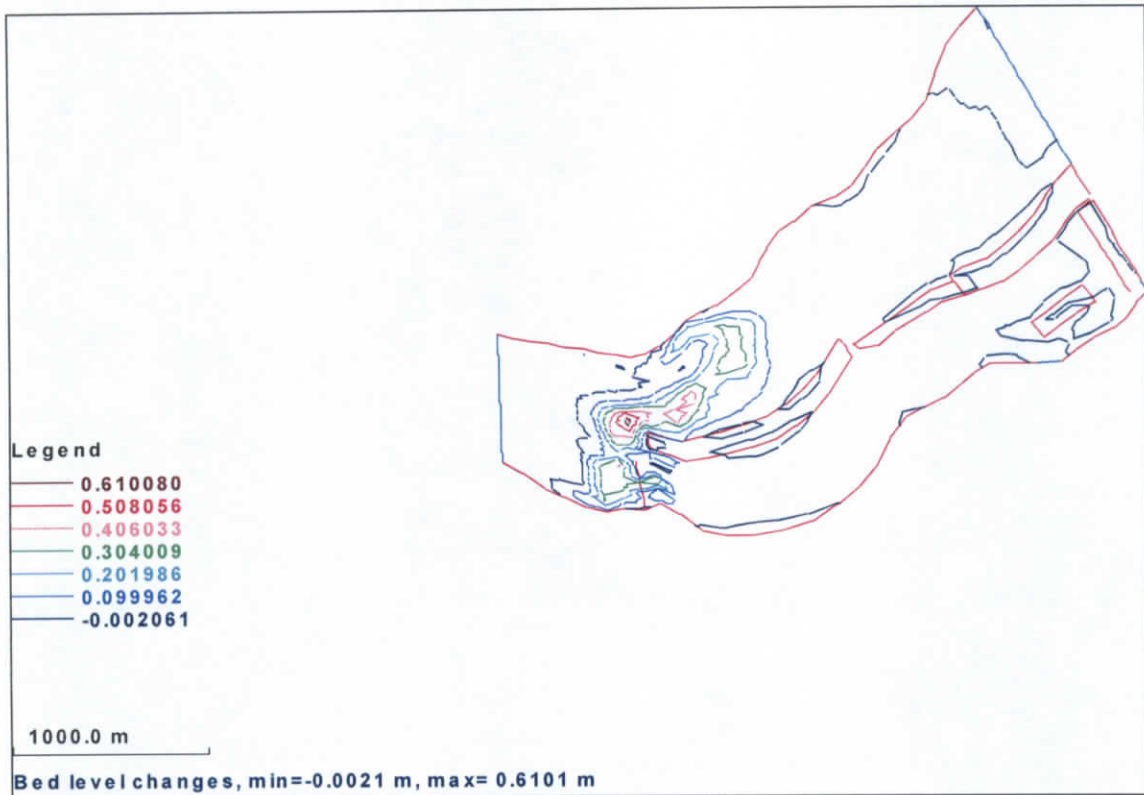


Figura 9.119 Mapa de distribución del fondo