



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**  
**INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN TANQUE  
DESARENADOR CON UN MODELO NUMÉRICO**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**FRANCISCO DE JESÚS PÉREZ LÓPEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., NOVIEMBRE, 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dr. Domínguez Mora Ramón

Secretario: Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo

1 er. Vocal: Dr. Gracia Sánchez Jesús

2 do. Vocal: M. I. Franco Victor

3 er. Vocal: Dr. Pozos Estrada Óscar

Ciudad de México, Instituto de Ingeniería UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Gracia Sánchez Jesús

-----

**FIRMA**

## **Agradecimientos.**

A mi familia, en especial a mis padres Benito y Lupita, por el esfuerzo, los consejos y el apoyo en todo momento. Que sin ellos no hubiese podido llegar hasta aquí.

A mis hermanos, Lily, Patricia, Lenin y Xochitl, por todo el apoyo y consejos.

A mi tutor, Dr. Jesús Gracia Sánchez por su paciencia, dedicación y apoyo para la realización de este trabajo.

Al M.I. Javier Osnaya Romero, al M.I. Víctor Manuel Ortiz Martínez, y a los laboratoristas del Instituto de Ingeniería, por el apoyo para la realización de esta tesis.

A cada uno de los profesores por compartir sus valiosos conocimientos y experiencias.

A mis amigos por la amistad, apoyo, ánimo y compañía.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por formar parte de esta institución.

Al Instituto de Ingeniería por formar parte de su equipo de trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología CONACYT, por el apoyo económico durante mis estudios.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
<b>OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>4</b>
1. ESTADO DEL ARTE .....	4
1.1 SEDIMENTACIÓN.....	4
1.1.1 ORIGEN Y PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS.....	4
1.2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	5
1.3. DESGASTE DE LOS EQUIPOS POR SEDIMENTOS.....	6
1.4. DESARENADORES.....	6
1.4.1. CLASES DE DESARENADORES .....	7
1.4.1.1 DESARENADORES DE ALTA VELOCIDAD .....	8
1.4.1.1.1 TUBO DESARENADOR.....	8
1.4.1.1.2 ALETAS DEFLECTORAS – TUBOS DESARENADORES.....	9
1.4.1.2 DESARENADORES DE BAJA VELOCIDAD .....	11
1.4.1.2.1 CANAL DESARENADOR.....	11
1.4.1.2.2 TANQUE DESARENADOR.....	11
1.4.1.3 TANQUE DESARENADOR INTERMITENTE .....	12
1.4.1.4 TANQUE DESARENADOR CONTINUO.....	12
1.4.1.5 TANQUE DESARENADOR MIXTO .....	13
1.4.1.6 DESARENADORES MIXTOS: ALTA – BAJA VELOCIDAD .....	14
1.4.1.7 DESARENADORES EN TOMAS PARA HIDROELÉCTRICAS Y PARA RIEGO.....	14
1.4.1.7.1 PARA HIDROELÉCTRICAS .....	14
1.4.1.7.2 PARA RIEGO .....	14
1.4.2 TIPOS DE DESARENADORES .....	15
1.4.2.1 DESARENADOR LONGITUDINAL .....	15
1.4.2.2 DESARENADOR CONVENCIONAL.....	15
1.4.2.3 DESARENADOR DE FLUJO HORIZONTAL .....	16
1.4.2.4 DESARENADOR DE FLUJO VERTICAL.....	18

1.4.2.5 DESARENADORES DE ALTA TASA.....	18
1.4.3 SISTEMAS DE LIMPIEZA.....	19
1.4.3.1 SISTEMA TIPO BIERI.....	19
1.4.3.2 SISTEMA TIPO DUFOUR.....	20
1.4.3.3 SISTEMA TIPO BÜCHI.....	21
1.4.3.4 SISTEMA TIPO SERPENT S4.....	22
1.5. IMPACTOS EN DETERIOROS DE TURBINAS.....	23
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>25</b>
2. MODELO MATEMÁTICO.....	25
2.1. MODELO TRIDIMENSIONAL SSIIM.....	26
2.2. FUNDAMENTOS HDRÁULICOS DEL MODELO.....	28
2.2.1. ECUACIONES DE NAVIER – STOKES.....	28
2.2.2. APROXIMACIÓN DE BUSSINESQ.....	29
2.2.3. MODELO DE TURBULENCIA k- $\epsilon$ .....	29
2.2.4. LEYES DE PARED.....	31
2.2.5. MODELO DE TURBULENCIA k- $\omega$ .....	31
2.2.6. ECUACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA.....	31
2.2.7. CALCULO DEL FLUJO DEL SEDIMENTO.....	32
2.3. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA SSIIM.....	34
<b>CAPITULO 3</b> .....	<b>37</b>
3.1 PLAN DE PRUEBAS A REALIZAR.....	37
3.2 MÉTODO.....	38
3.2.1 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	38
3.2.2 SIMULACIÓN MATEMÁTICA.....	40
3.3 DATOS DE PROTOTIPO.....	40
3.4 MODELO NUMÉRICO.....	41
3.4.1 PARÁMETROS GENERALES.....	42
3.4.2 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	43
<b>CAPITULO 4</b> .....	<b>44</b>
4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO SSIIM.....	44
4.1 SIMULACIÓN DE LAS CARACTERISTICAS HIDRODINÁMICAS DEL CANAL (SECCIÓN CONSTANTE DE 14.5 m), INCLUYENDO EL DESARENADOR QUE VA DE LA SECCIÓN 5 A 6 (3 m).....	45

4.2 SIMULACIÓN DE LAS CARACTERISTICAS DE FLUJO Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL CANAL, SECCIÓN CONSTANTE (14.5 m), Y PROFUNDIDAD DE 2 METROS, INCLUYE EL DESARENADOR QUE VA DE LA SECCIÓN 5 A 6 (3 m).....	48
<b>CAPITULO 5</b> .....	52
5.1 ANALISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	52
5.2 RESULTADOS DE DESARENADOR, SECCIÓN CONSTANTE (14.5 m), PROFUNDIDADES DE 5, 4, 3, 2 Y 1 METRO .....	53
5.3 RESULTADOS DE DESARENADOR, ANCHO 1 METRO (16.5), PROFUNDIDADES DE 2, 3, Y 4 METROS .....	56
5.4 RESULTADOS DE DESARENADOR, ANCHO 2 METRO (18.5), PROFUNDIDADES DE 2, 3, Y 4 METROS.....	58
<b>CAPITULO 6</b> .....	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
<b>REFERENCIAS</b> .....	64
<b>APENDICES</b> .....	65

## RESUMEN.

Se realizó un estudio del estado del arte de los desarenadores y se presentaron principios de un modelo matemático para el análisis de un sedimentador. Se presenta un tipo de desarenador que maneja el agua de una ciudad y que por sus características de altos gastos líquidos y sólidos, no concuerda con alguno de los diseños tradicionales. Por lo tanto, el análisis se realiza con la implementación de un modelo numérico tridimensional (SSIIIM). En la aplicación del modelo numérico, se analiza la importancia del ancho, la profundidad y la longitud de cada diseño de tanques sedimentadores. Encontrándose que la longitud es la variable más importante. Se realizaron 51 pruebas y se presentan los detalles y características de cada uno de ellas. La modelación numérica resulta ser consistente y se comentan las alternativas para la extracción del sedimento en el tanque sedimentador.

## INTRODUCCIÓN.

El agua proveniente de las descargas de ciudades o de ríos, traen consigo diferentes elementos entre ellos; los sedimentos, que son transportados a través del fluido.

La fuente de los sedimentos puede clasificarse en naturales y artificiales. Los naturales son aquellos que se originan a través de la erosión de la superficie de la tierra (debido a la acción del viento y de la lluvia).

Así mismo, la erosión en un cauce principal y sus atributos, son provocadas por la potencia erosiva del flujo, lo que ocasiona cambios en su perfil longitudinal, sección transversal, y en su forma en planta. Siendo el material arrastrado aguas abajo donde podría depositarse o bien seguir su recorrido hacia los cuerpos de agua o al mar.

Los sedimentos artificiales, son originados por la destrucción de la vegetación, la deforestación de bosques originada por el hombre, con fines de cultivo, para desarrollo urbano o industrial; las obras de ingeniería (construcción de caminos, vías férreas y presas entre otras), originan que grandes volúmenes de material sean removidos y queden más sueltos que en su estado original.

Debido a los sedimentos que causan problemas en obras como en las plantas de tratamientos de aguas residuales (PTAR), en obras hidroeléctricas y otras estructuras hidráulicas, es importante para desalojarlos y evitar daños a los equipos y tuberías.

Existen tres tipos de tanques desarenadores de flujo horizontal, de flujo vertical, y de flujo inducido.

Para llevar a cabo los estudios necesarios para el desalojamiento de los sedimentos en los desarenadores, se aplicó un modelo numérico a través del programa SSIIM, para observar el comportamiento de las partículas arrastradas por el flujo, y con ello determinar las características que lleven a la retención del mayor volumen posible de sedimentos.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Para lograr un mejor rendimiento en los equipos, y evitar daños como lo pueden ser erosión en compuertas o turbinas; incluso en los embalses se tienen pérdidas por capacidad, abrasión de obras hidráulicas.

Existen diferentes métodos que permiten evaluar y esclarecer aquellos problemas que aquejan a los diseños en obras hidráulicas, los desarenadores son uno de ellos, el cual permite retener, eliminar y separar las partículas, con este proceso se consigue proteger los equipos.

Hoy en día hay herramientas que permiten simular matemáticamente el comportamiento de los sedimentos, permite implementar modelos físicos a escala, y de esa manera afinar el diseño de los tanques sedimentadores.

## **OBJETIVO**

Comparar los resultados de una simulación matemática de los sedimentos obtenidos a través del programa SSIIM, modificando en distintas ocasiones la geometría del desarenador y determinar una metodología que caracterice su diseño, con lo cual sería capaz de captar el mayor volumen de sedimento.

# **CAPITULO 1**

## **1. ESTADO DEL ARTE**

El crecimiento en los modelos de simulación matemática, se ha convertido en una herramienta esencial para apoyo de la investigación.

Los resultados de la simulación, en contraste con las observaciones de campo habituales, se pueden extrapolar a diferentes condiciones (Miglieta, 1993).

Existen diversos métodos como programas para simulaciones en desarenadores, en todos los casos, el objetivo principal es obtener el mejor diseño.

### **1.1 SEDIMENTACIÓN**

#### **1.1.1 ORIGEN Y PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS.**

Los sedimentos; son partículas sólidas que, estando en un líquido, se depositan en el fondo. La causa principal de estas partículas se origina principalmente por el desgaste de las rocas por acción del viento y del agua en sus distintas formas (ríos, mares, glaciares, etc.).

Este desgaste se produce por arrastre de partículas de las rocas, debido a estos agentes erosivos, por el choque de partículas que son transportadas en el medio

contra las rocas o por el choque de unas partículas contra otras duras ante el transporte (España, recursostic.educacion.es, s.f.)

Se da el nombre genérico de sedimentos a las partículas procedentes de las rocas o suelos, y que son acarreados por las aguas que escurren y por los vientos. Todos estos materiales, después de cierto acarreo, finalmente son depositados a lo largo de los propios cauces.

Dada la actividad humana en el medio ambiente que lo rodea, las fuentes de los sedimentos pueden clasificarse en: (Manuel García Flores, Origen y propiedades de los sedimentos): (García, 1998)

- Naturales: Erosión de la superficie del terreno, erosión del cauce principal y sus tributarios, y movimientos naturales del terreno.
- Artificiales: Destrucción de la vegetación, obras de ingeniería, explotación de minas y canteras, desechos urbanos e industriales.

Los aspectos de ingeniería relativos a los sedimentos se pueden dividir en tres grupos:

- Sedimentos que se originan en la superficie de la cuenca
- Sedimentos que provienen del fondo y orillas de los ríos
- Sedimentos que provienen de los desechos industriales y urbanos

## 1.2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

Es el arrastre de materiales erosionados por acción del viento o el agua. Los materiales son transportados atendiendo a la fuerza del agente transportador y al peso del material transportado.

El transporte puede realizarse por:

- Reptación o rodadura: es el arrastre de materiales pesados, sin levantarlos del suelo.
- Saltación: el agua o el aire elevan pequeños fragmentos que luego vuelven a caer.

- Suspensión: el aire o el agua transportan partículas muy finas que no se depositan en el suelo.
- Disolución: es el transporte de materiales que se disuelven en agua (España, recursostic.educacion.es, s.f.)

### 1.3. DESGASTE DE LOS EQUIPOS POR SEDIMENTOS

Los sedimentos tienen una gran influencia sobre la factibilidad técnica y económica de un proyecto. La evaluación precisa de su influencia es difícil, porque es un fenómeno multifacético y variable en el tiempo.

El flujo destinado a la generación de energía, para el proceso de tratamientos de aguas residuales, etc. Suelen transportar sedimentos, los cuales, a la velocidad con la que llegan, causan en el tiempo daños a los equipos, provocando erosión de compuertas, turbinas, etc.

### 1.4. DESARENADORES

El problema que normalmente induce un embalse es el depósito del sedimento, sin embargo en muchas ocasiones el sedimento grueso, al cansa al llegar a la cortina y entonces es necesario removerlo, en una primera etapa, a través de los “Desarenadores” ubicados en las inmediaciones de la obra de toma para la generación u otros usos. En una segunda etapa, se requiere extraer los sedimentos para evitar que penetren a la obra de toma y que fueren depositados en los “Tanques o cámaras de sedimentación” con el propósito de que estos no lleguen a las turbinas para evitar que los álabes de las turbinas sean dañados por abrasión.

La captación de agua de una corriente natural, que transporta partículas sólidas provenientes de la erosión del mismo cauce o de los terrenos de la cuenca, origina en muchos casos graves problemas debido a la acumulación y/o a la acción erosiva de estas partículas, llamadas comúnmente sedimentos.

Los problemas con sedimentos se manifiestan con mayor gravedad durante la época de avenidas, debido al considerable incremento del material sólido en los ríos.

La experiencia en estos problemas, ha demostrado la imperiosa necesidad de diseñar estructuras especiales para evitar o disminuir los daños que ocasionan los sedimentos. Los desarenadores son estructuras que sirven para captar y eliminar una parte del sedimento transportado por el flujo. Las partículas a eliminar son, por lo general, mayores de un cierto diámetro y son generalmente arenas.

En el diseño de las desarenadores hay que tomar en cuenta entre otros aspectos, la ubicación de la estructura, el aporte de sedimentos, y su evaluación económica.

#### 1.4.1. CLASES DE DESARENADORES

Existe una amplia variedad de diseños de estructuras desarenadores, básicamente pueden ser agrupados teniendo en cuenta dos características importantes en su funcionamiento: la velocidad del flujo y la forma de eliminar los sedimentos.

Por la velocidad del flujo, pueden ser:

- De alta velocidad
- De baja velocidad
- Mixto, velocidad alta-baja

Por la forma de eliminar los sedimentos, pueden ser:

- Intermitente
- Continuo
- Mixto (continuo-intermitente)

Basado en la velocidad del flujo como rasgo principal, se describirán adelante los diferentes tipos de desarenadores que se presentan con la combinación de otras características de funcionamiento, tales como la forma de eliminar los sedimentos, su disposición, en paralelo o en serie, así como el número de ellos.

#### 1.4.1.1 DESARENADORES DE ALTA VELOCIDAD

Los desarenadores de alta velocidad son aquellos en los cuales la velocidad del flujo puede ser suficiente para arrastrar el material de la capa de fondo hacia orificios o conductos de evacuación ubicados transversalmente al escurrimiento. Este tipo de estructura tiene la ventaja de resultar muy económica debido que necesita sólo una reducida sección transversal y su mantenimiento es casi nulo. Parshall y Rohwer, pioneros en esta clase de estructuras, desarrollaron uno denominado "Tubo desarenador" (Vortex Tube Sand Trap), posteriormente otros, contribuyeron con un mejor conocimiento de las características y funcionamiento de este tipo de desarenador.

##### 1.4.1.1.1 TUBO DESARENADOR.

Es una estructura compuesta por un tubo inclinado en el fondo del canal, formando un ángulo de aproximadamente  $45^\circ$  con la dirección del flujo, es uno de los más eficientes, tiene una abertura a todo lo largo de su parte superior, tal como se muestra en la Figura 1. Al paso del flujo sobre la abertura, se establece dentro y a todo lo largo del tubo, un movimiento helicoidal, el cual permite que el material sólido transportado por el fondo del canal sea atraído hacia el interior del tubo y conducido hasta una salida y luego ser descargado al río, mediante un conducto de evacuación. El propósito de este desarenador es eliminar la parte del sedimento transportado como arrastre de fondo; es decir, el que desliza sobre el fondo del canal.

La forma de eliminación de los sólidos es continua, la cual se hace aprovechando la energía del movimiento helicoidal en el tubo para conducir el material a la salida. Obviamente conjuntamente con el material, es eliminado un porcentaje del gasto del canal.

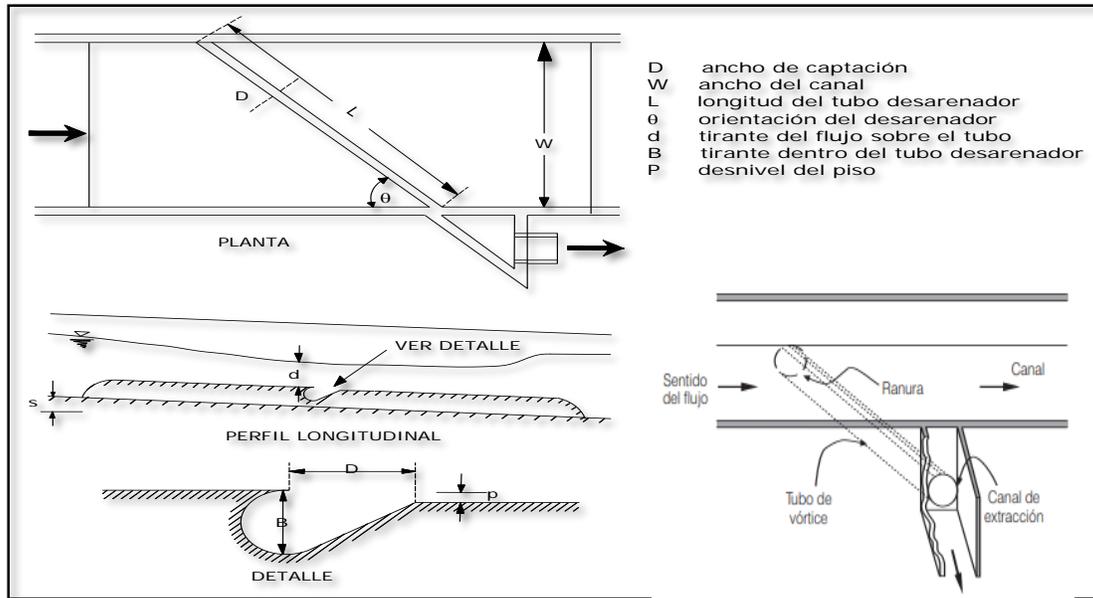


Fig.1 Tubo Desarenador

#### 1.4.1.1.2 ALETAS DEFLECTORAS – TUBOS DESARENADORES

Es un tipo de desarenador producto de la combinación del anteriormente expuesto y una serie de láminas de metal curvadas, localizadas en el fondo del canal y que actúan como deflectoras. El material de arrastre de fondo es forzado a moverse lateralmente hacia el final de las aletas donde es captado por tubos desarenadores cortos.

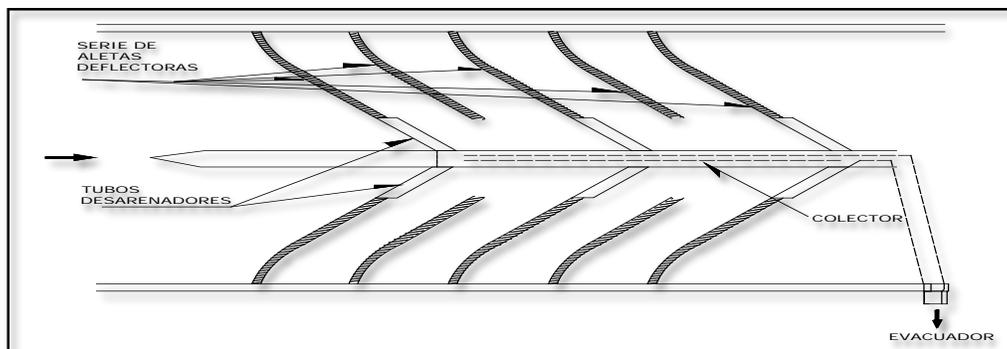


Fig.2 Aletas deflectoras - Tubos desarenadores

Parshall reporta pruebas de laboratorio realizadas con éxito en este tipo de desarenador, así como la implantación de prototipos en el campo con óptimos resultados. No especifica el número de aletas a instalarse, pero indica que su número depende del tamaño del material arrastrado por el fondo. Para gravas y arena gruesa se pueden requerir de unas pocas aletas, mientras que para arena fina, el número de aletas será mayor, sin probablemente exceder, en ningún caso, un grupo de diez aletas, o veinte si es muy ancho.

Tampoco especifica la altura de las aletas ni la separación entre ellas, pero para algunos casos particulares menciona alturas de aletas entre 0.15 m y 0.45 m. Este tipo de desarenador puede ser adaptado tanto en canales angostos como muy anchos, y para gastos derivados que varían entre 0.30 y 56.70 m<sup>3</sup>/s.

Para canales de ancho entre 6 y 15 m se recomienda instalar dos series de aletas a fin de empujar el arrastre de fondo hacia el centro o eje del canal, donde se ubican tubos desarenadores cortos al final de las aletas. Estos captan y conducen el material a un compartimiento estrecho o colector, construido a lo largo de la parte central del canal, donde luego es evacuado hacia el río por medio de un conducto de salida.

Para canales con ancho entre 15 m y 30 m, se recomienda una doble instalación con cuatro series de aletas. Las salidas de las instalaciones gemelas se unen en un colector ubicado por debajo del fondo del canal.

Pruebas de laboratorio, realizadas en modelos de aletas deflectoras - tubos desarenadores, indican que son capaces de eliminar el 90% o más de sedimentos, que como arrastre de fondo viajan en el canal, aguas arriba de las aletas.

De los desarenadores de este tipo, construidos en el campo, se reporta que prácticamente todos han dado buenos resultados, eliminando no sólo gravas y arena gruesa sino también arena fina.

La eliminación de los sedimentos, al igual que el tipo anterior, es en forma continua; asimismo el mencionado autor estima que el porcentaje de flujo eliminado por el colector, varía del 5% al 15% del total conducido.

#### 1.4.1.2 DESARENADORES DE BAJA VELOCIDAD

Los desarenadores de baja velocidad son aquellos en que la captación de los sedimentos se hace por medio del decantamiento de las partículas, para lo cual es necesario reducir considerablemente la velocidad del flujo.

Básicamente consta de un tanque sedimentador, zona de depósitos o cámara de sedimentación, habiéndose desarrollado una gran variedad de tipos, combinando la forma de eliminación del material depositado, la disposición de uno o más tanques de sedimentación, los cuales serán descritos adelante.

##### 1.4.1.2.1 CANAL DESARENADOR

Su función es impedir el paso de sedimentos por la obra de toma y está ubicado en forma adyacente a las compuertas de la misma. Tiene principalmente un canal formado por dos muros verticales casi paralelos y, al final de éste, una o más compuertas. Uno de los muros separa la ladera del río del canal desarenador y es donde se ubican las compuertas de la obra de toma; el otro muro, denominado también muro guía, separa el canal y el cauce del río, siendo generalmente la prolongación de una de las pilas de la presa derivadora.

##### 1.4.1.2.2 TANQUE DESARENADOR

Ubicados por lo general casi inmediatamente aguas abajo de la toma, su característica principal es que pueden atrapar un gran porcentaje de partículas finas transportadas en suspensión, algo que normalmente no se puede lograr con el uso de otros tipos de desarenadores.

El tanque es una estructura en que el flujo es forzado a reducir su velocidad en una magnitud tal que permita la decantación de partículas mayores de un cierto

diámetro. Sus dimensiones deben ser suficientes para que se efectúe la decantación, así como para retenerlos hasta su posterior eliminación.

De acuerdo a la forma de eliminación de los sedimentos, intermitente o continua, se describirán los diferentes tipos de tanques desarenadores.

#### 1.4.1.3 TANQUE DESARENADOR INTERMITENTE

Este desarenador fue originalmente propuesto por Büchi, Andaroodi (2006) y es aquel en el que la decantación y la eliminación de los sedimentos son dos operaciones sucesivas.

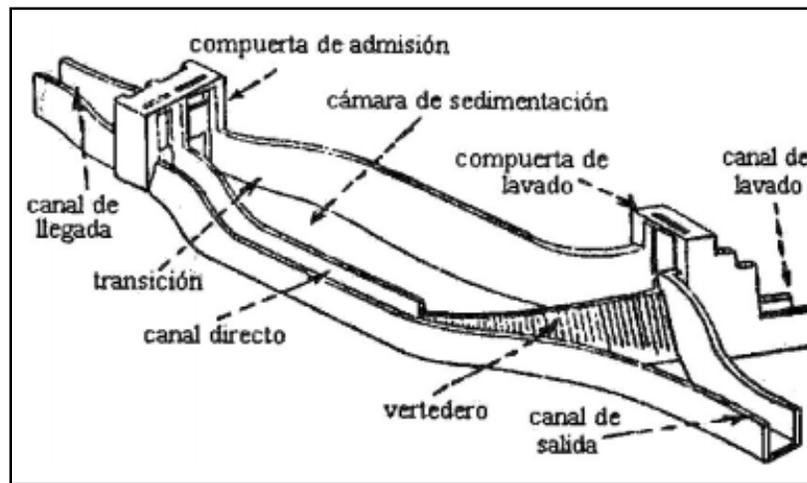


Fig. 3 Tanque desarenador intermitente

#### 1.4.1.4 TANQUE DESARENADOR CONTINUO

Es aquel en el que la sedimentación y la eliminación de los sedimentos son dos operaciones simultáneas. A diferencia del tanque anterior, aquí los sedimentos son eliminados en forma continua mediante un sistema de evacuación a lo largo del desarenador.

El principal propulsor de este desarenador fue Dufour, Jacobsen (2015), quien desarrolló uno que lleva su nombre es el más eficaz de todos los sistemas conocidos y cuya aplicación es una de las más comunes actualmente.

El tanque desarenador tipo Dufour emplea una disposición similar al intermitente. La sección transversal del tanque tiene forma de embudo, cuya parte central más profunda es el canal colector de los sedimentos. Por encima del colector se coloca una rejilla horizontal de madera denominada trampa, por entre cuyos espacios pasan los sedimentos. Este mecanismo evita que el material pueda ser nuevamente arrastrado por las turbulencias propias de la corriente.

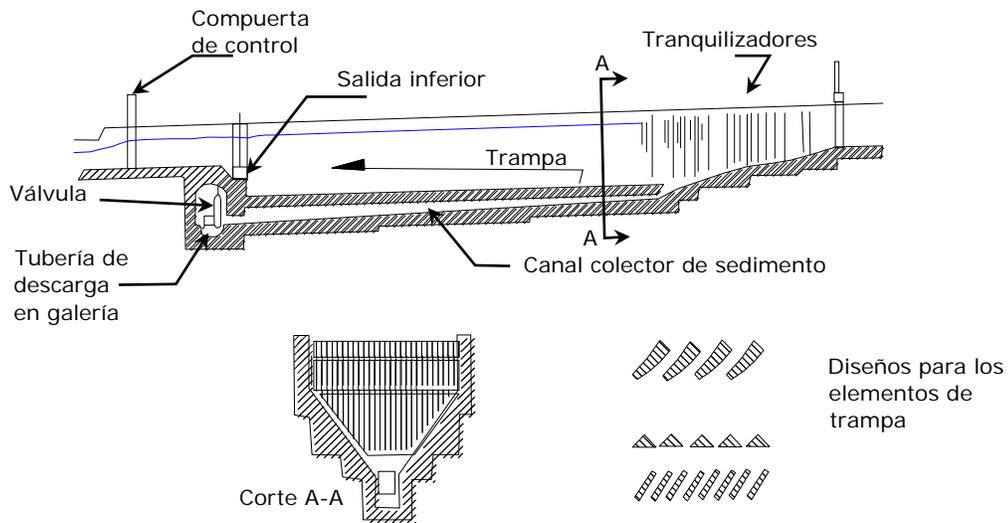


Fig. 4 Tanque desarenador continuo

#### 1.4.1.5 TANQUE DESARENADOR MIXTO

Esencialmente, es un desarenador de tipo continuo, al que se le hace alguna modificación que permite, en algunos casos, almacenar y luego eliminar los sedimentos en dos operaciones sucesivas. Generalmente esto se hace en épocas de escasez de agua en que no conviene desperdiciarla, considerando que con la operación continua, la pérdida puede alcanzar un 15 % del gasto. En época de

crecidas, que es cuando los ríos transportan gran cantidad de sedimentos, vuelve a funcionar en forma continua.

#### 1.4.1.6 DESARENADORES MIXTOS: ALTA – BAJA VELOCIDAD

También se les puede denominar desarenadores en serie. Generalmente formado por un desarenador de baja velocidad construido a continuación de uno de alta velocidad, efectuándose una doble operación de desarenamiento.

#### 1.4.1.7 DESARENADORES EN TOMAS PARA HIDROELÉCTRICAS Y PARA RIEGO

##### 1.4.1.7.1 PARA HIDROELÉCTRICAS

Cuando se trata del aprovechamiento del agua con fines de generación de energía hidroeléctrica, la presencia de arenas con cantos afilados transportados por el flujo a altas velocidades, atacan las paredes de la tubería a presión y las partes de la turbina en contacto con el agua, produciendo desgaste, el cual es más acentuado cuando la carga sobre las máquinas es mayor.

##### 1.4.1.7.2 PARA RIEGO

Cuando se trata del aprovechamiento del agua en riego, el principal problema que se presenta es el depósito de los sedimentos en el fondo de los canales o en el fondo de pequeños embalses de regulación, originando una reducción en la capacidad de conducción o almacenamiento, que hace necesario trabajos periódicos de limpieza, con las consiguientes interrupciones en el servicio y los elevados costos de mantenimiento. Asimismo, las arenas transportadas en los canales de conducción y finalmente depositadas en los terrenos de cultivo, con la aplicación del agua, puede tener un efecto que no necesariamente perjudicial para las tierras y los cultivos.

## 1.4.2 TIPOS DE DESARENADORES

### 1.4.2.1 DESARENADOR LONGITUDINAL

Su funcionamiento se basa en la reducción de la velocidad del agua, régimen de velocidad del agua y de su régimen de escurrimiento (laminar, turbulento y de transición); permiten así que el material sólido transportado en suspensión se deposite en el fondo, de donde es retirado periódicamente. (Sparrow Álamo, 2008). Normalmente, se construyen dos estructuras paralelas para permitir la limpieza de una de las estructuras mientras la otra está operando.

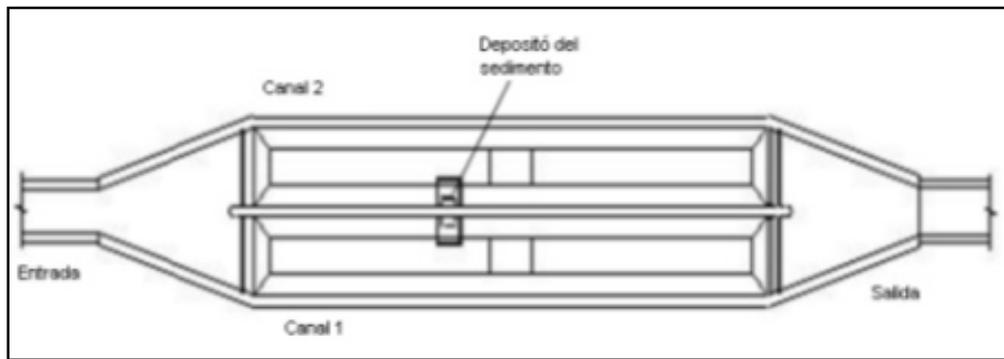


Fig. 5 Desarenador longitudinal en paralelo

### 1.4.2.2 DESARENADOR CONVENCIONAL

Es un tanque construido con el propósito de sedimentar partículas en suspensión por acción de la gravedad. El desarenador debe ubicarse lo más cerca posible de la bocatoma, con el fin de evitar problemas de obstrucción en la línea de aducción. El material en suspensión transportado por el agua es básicamente arcilla, arena o grava fina.

- 1.- Zona de entrada
- 2.- Vertedero de alivio
3. Placa difusora
- 4.- Zona de sedimentación
- 5.- Zona de salida

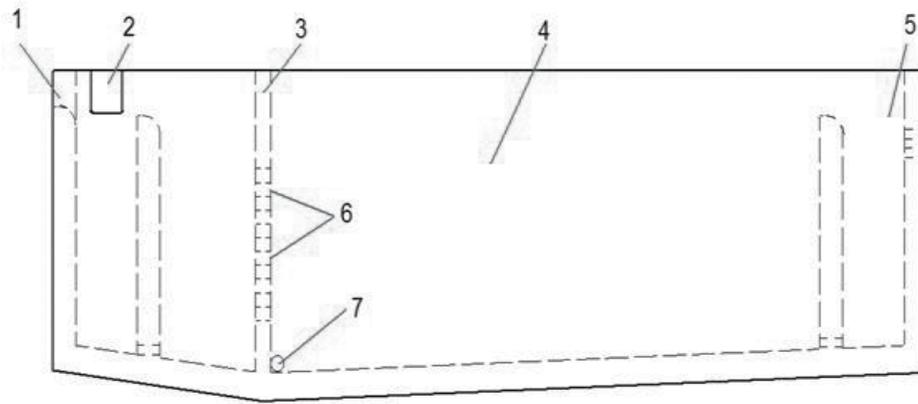


Fig. 6 Desarenador convencional

#### 1.4.2.3 DESARENADOR DE FLUJO HORIZONTAL

Son utilizados en instalaciones de pequeñas poblaciones y consisten en un ensanchamiento del canal del pretratamiento de forma que se reduzca la velocidad de flujo y decanten las partículas. Debe diseñarse con un canal paralelo para proceder a su limpieza que se realiza manualmente. Suelen instalarse con un aforador Parshall a la salida que permite medir el caudal.

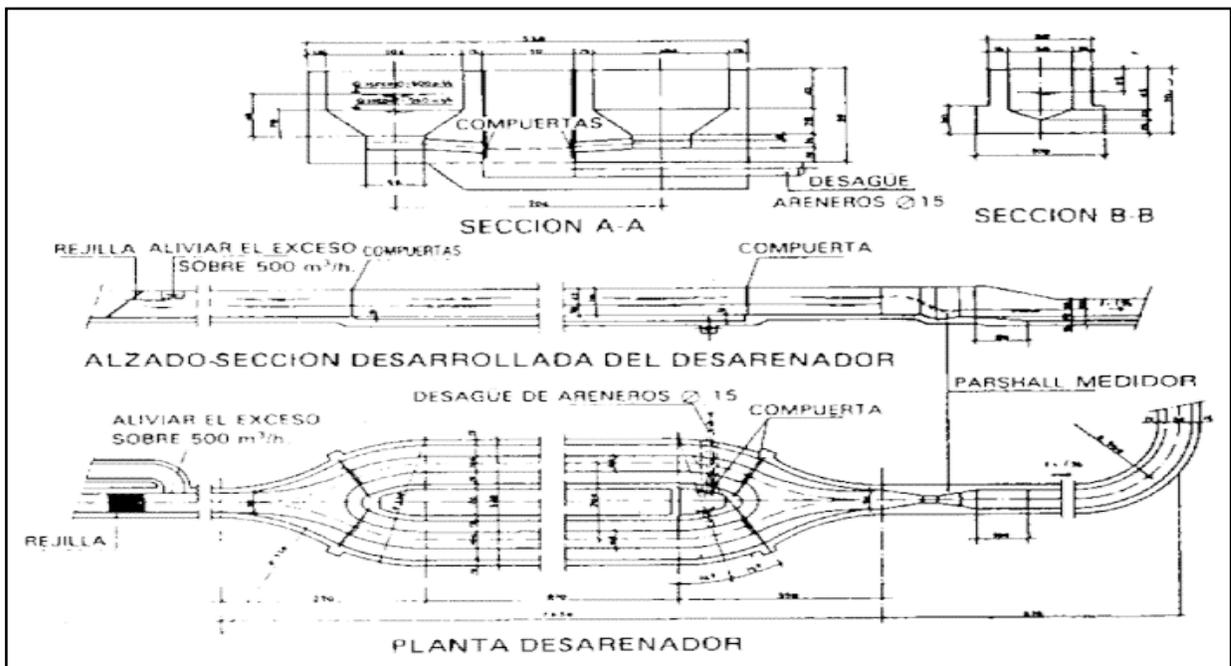


Fig. 7 Desarenador de flujo horizontal

Los desarenadores de flujo horizontal rectangulares y cuadrados se han utilizado durante muchos años. Sin embargo, su uso en las nuevas instalaciones se ha limitado a favor de las cámaras de tipo aireado y vórtice, principalmente en plantas medianas y grandes.

Desarenadores de flujo horizontal rectangulares. El tipo más antiguo de desarenador utilizado es el de flujo horizontal de velocidad controlada. Estas unidades se han diseñado para mantener una velocidad del orden de 0.3 m/s que proporciona tiempo suficiente para que las partículas de arena puedan asentarse en el fondo del canal.

La velocidad de diseño llevará la mayoría de las partículas orgánicas a través de la cámara y tenderá a volver a suspender las partículas orgánicas que se depositen, pero permitiendo que la arena más pesada se estabilice (Conagua.)

COMPONENTE	RANGO	COMENTARIO
Dimensiones	-	-
Profundidad del agua (m)	0.6 – 1.5	Depende del área del canal y el gasto
Longitud (m)	3 - 25	En función de la profundidad del canal y de la velocidad de sedimentación de la arena
% adicional por entrada y turbulencia	25- 50	Basado en la longitud teórica
Tiempo de retención a gasto pico (s)	15- 90	En función de la velocidad y la longitud del canal
Velocidad horizontal (m/s)	0.15 - 0.4	Velocidad óptima, 0.3 m/s

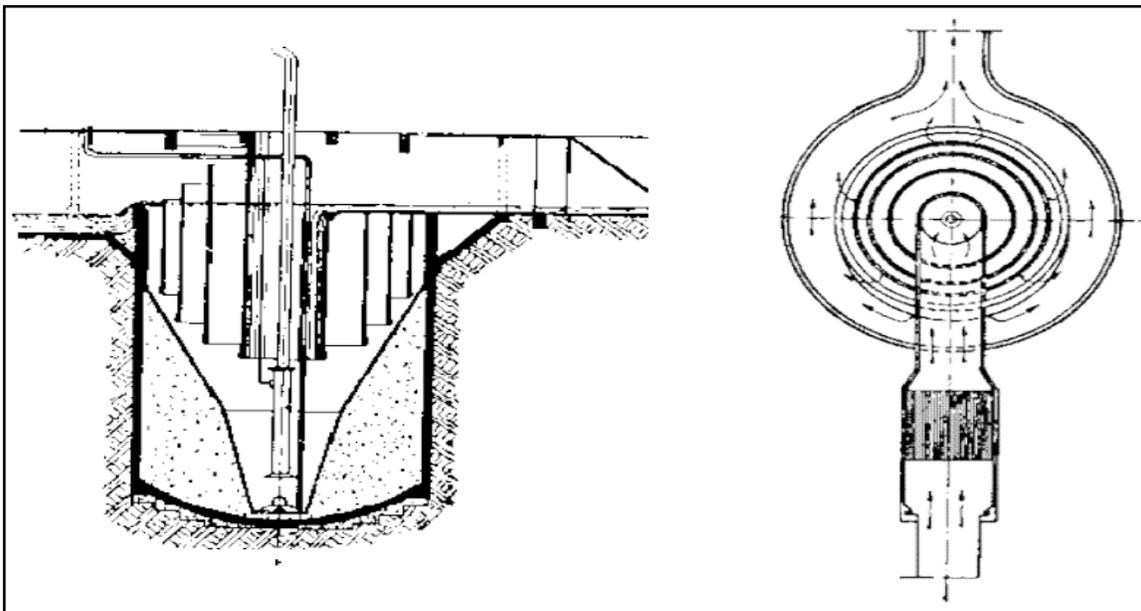
Tabla 1. Criterios de diseño para desarenadores horizontales

(Fuente: Design of municipal Wastewater Treatment Plants, Volume I (1992))

#### 1.4.2.4 DESARENADOR DE FLUJO VERTICAL

Se diseñan mediante tanques que tienen una velocidad ascensional del agua tal que permite la decantación de las arenas pero no caen las partículas orgánicas.

El flujo se efectúa desde la parte inferior hacia arriba. Las partículas se sedimentan mientras el agua sube. Pueden ser de formas muy diferentes: circulares, cuadrados o rectangulares. Se construyen cuando existen inconvenientes de tipo locativo o de espacio.



1.- vista en Perfil

2.- vista en planta

Fig. 8 Desarenador de flujo vertical (circular)

#### 1.4.2.5 DESARENADORES DE ALTA TASA

Consisten básicamente en un conjunto de tubos circulares, cuadrados o hexagonales o simplemente láminas planas paralelas, que se disponen con un ángulo de inclinación con el fin de que el agua ascienda con el flujo laminar. Este

tipo de desarenadores permite cargas superficiales mayores que las generalmente usadas para desarenadores convencionales, por tanto, es más funcional.

#### 1.4.3 SISTEMAS DE LIMPIEZA

Un desarenador, tanque o cámara de sedimentación normalmente se localiza aguas abajo de la toma de generación hidráulica y permite separar la arena del agua entrante previniendo los daños por abrasión en las turbinas.

El tanque de sedimentación longitudinal consiste en una o dos cámaras de longitud y pendiente suficiente para permitir la sedimentación de arenas. Al inicio del tanque de sedimentación, el agua fluye por una transición donde las rejillas tranquilizan el flujo y crear una distribución uniforme del mismo. En las zonas de montaña, los tanques de sedimentación tienen que protegerse contra los derrumbes y avalanchas, por lo que suelen construirse en cavernas o cubrirse con muros de concreto. En regiones más bajas, los desarenadores no tienen que ser cubiertos.

Los sistemas de limpieza de los desarenadores normalmente empleados son los siguientes.

##### 1.4.3.1 SISTEMA TIPO BIERI

El sistema tipo Bieri al operar con descarga libre, los sedimentos depositados en la cámara de sedimentación son removidas periódicamente a través de una abertura en el fondo de la cámara (tolva) y regresados al río. El volumen de agua para purga es mínimo.

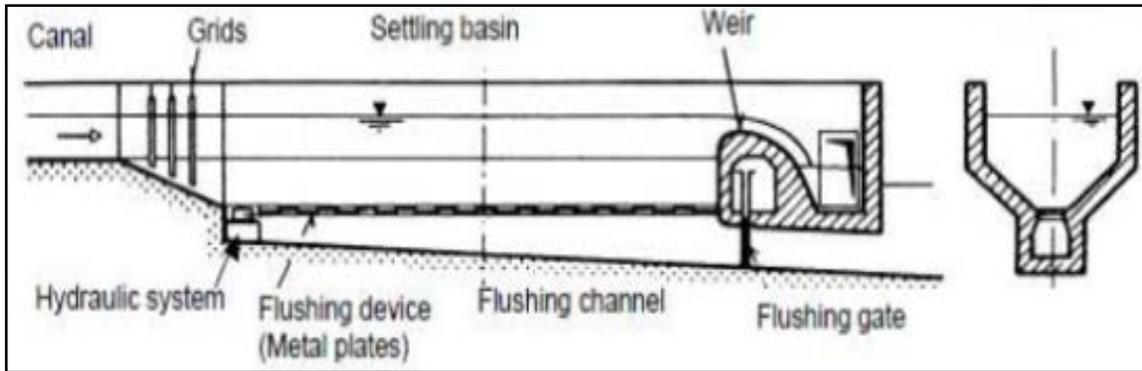


Fig. 9 Sistema de limpieza tipo Bieri

#### 1.4.3.2 SISTEMA TIPO DUFOUR

El sistema requiere de un flujo continuo de agua para remover el sedimento depositado en el fondo de la cámara de sedimentación. El desarenador se dispone de una rejilla horizontal que atrapa los sedimentos, previniendo su eventual retorno.

El sistema de remoción de sedimento construido de madera está formado por módulos de 4 m de longitud, cada uno de ellos con dos orificios de 10 cm de altura, formados por los huecos entre los tablones de madera de 2 m de largo e inclinados ligeramente de la horizontal. El ancho de los orificios varía de 20 cm en su parte superior, aguas arriba, a 10 cm en su parte inferior. El flujo de limpieza normalmente es del orden del 5 al 10% del flujo que entra en el tanque; con una velocidad de remoción en el canal del fondo entre 2 - 2.5 m/s. Este flujo se controla con una válvula en la salida.

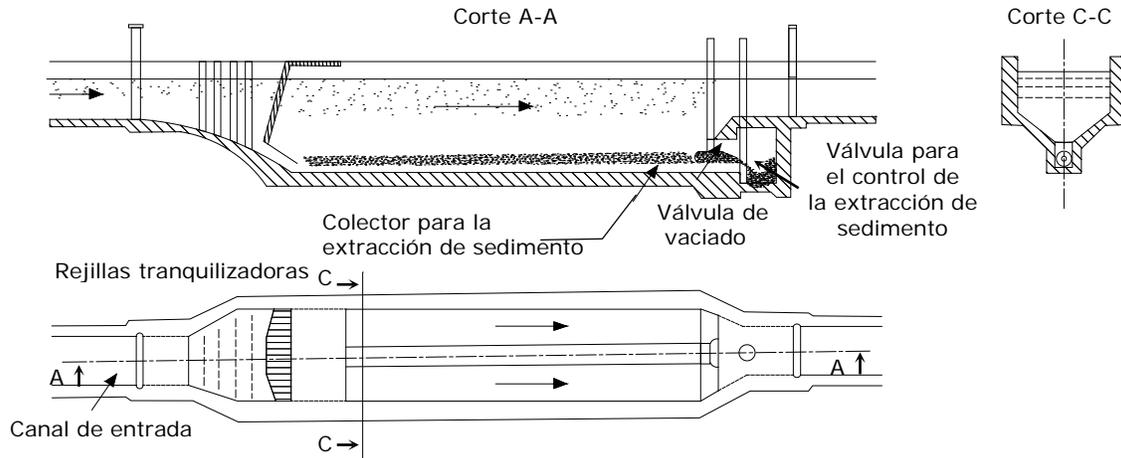


Fig. 10 Sistema de limpieza tipo Dufour

#### 1.4.3.3 SISTEMA TIPO BÜCHI

Con el sistema de limpieza tipo Büchi, la remoción de sedimentos se realiza periódicamente

El funcionamiento del sistema tipo Büchi difiere de los otros sistemas antes citados. Los sedimentos en suspensión inician su depósito a la entrada de la cámara de sedimentación, reduciéndose el área hidráulica del flujo e incrementándose la velocidad, y por consecuencia se reduce la eficiencia de sedimentación. Con el paso del tiempo la cámara se colma gradualmente de sedimentos hacia aguas abajo. Cuando la carga depositada en la cámara se vuelve crítica y ya no son aceptables cargas de sedimento grandes hacia aguas abajo, se opera la compuerta al final de la cámara para remover el material depositado. La pendiente del fondo y el tamaño de la compuerta se definen en función del tamaño del sedimento para tener una velocidad de arrastre mayor que la crítica. Sin embargo, el procedimiento de lavado toma un cierto tiempo durante el cual no pasa agua hacia las turbinas.

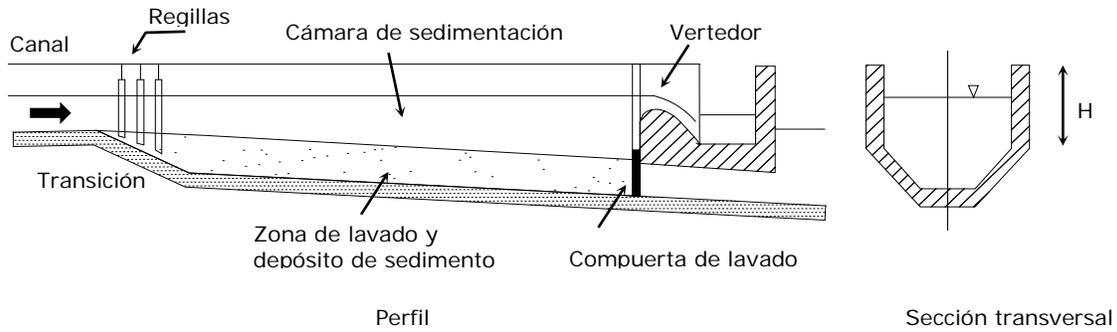


Fig. 11 Sistema de limpieza tipo Büchi

#### 1.4.3.4 SISTEMA TIPO SERPENT S4

Serpent Sediment Sluicing System (S4). Es esencialmente un sello de hule que se coloca a lo largo del fondo del tanque sedimentador y que al removerlo mejora el arrastre de sedimento.

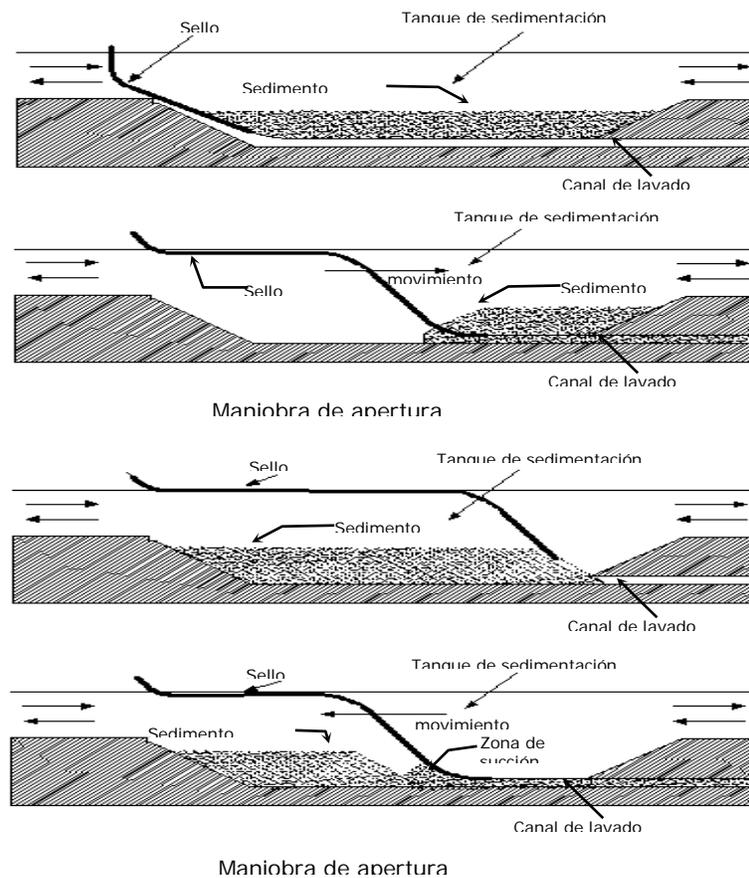


Fig. 12 Sistema de limpieza tipo Serpent S4

## 1.5. IMPACTOS EN DETERIOROS DE TURBINAS

Cuando el sedimento grueso alcanza a llegar a las obras de toma de centrales hidroeléctricas, el problema más importante es el desgaste de los álabes de las turbinas debido a la erosión por la presencia del sedimento.

Es importante determinar la cantidad de sedimento que se necesita eliminar, la cual depende de las condiciones de operación. Al respecto mencionan los intentos que se han hecho para especificar el diámetro de las partículas más pequeñas que deben ser eliminadas para prolongar la vida útil de tuberías, válvulas y turbinas. Según las pruebas realizadas y otras experiencias de campo, se pueden presentar las siguientes recomendaciones:

En plantas hidroeléctricas de carga media ( $15 \text{ m} < H < 50 \text{ m}$ ) usualmente se especifica la eliminación de partículas mayores de 0.2 a 1 mm; sin embargo, el sedimento de cuarzo de cantos afilados con un tamaño de partícula tan pequeña como 0.25 mm, puede dañar seriamente las turbinas. En plantas hidroeléctricas de carga alta ( $H > 50 \text{ m}$ ), pueden tener objeción partículas de 0.1 a 0.2 mm.

En plantas hidroeléctricas de carga muy alta (de varios cientos de metros), el desgaste del equipo mecánico se puede reducir eliminando partículas de un tamaño tan pequeño como 0.01 a 0.05 mm. Este rango de límites del tamaño del grano aquí especificado se considera crítico, si las fracciones de sedimento fino incluyen granos de cuarzo con cantos afilados (los tamaños de partículas mencionados pertenecen al grupo de los limos).

A continuación se presenta la Tabla 10.1 en la que indica el diámetro mínimo de las partículas que deben ser eliminadas por el desarenador en función de la carga, con el objeto de evitar daños a las máquinas.

Diámetro mínimo Mm	Carga H m
0.6	100-200
0.5	200-300
0.3	300-500
0.1	500-1000

Tabla 2. Relación entre diámetro mínimo de partículas y carga de trabajo para evitar desgaste en las turbinas.

Algunos autores afirman que el tamaño mínimo de partícula a eliminar, también depende del tipo de turbina que se emplee. Así, en las turbinas Kaplan, el diámetro mínimo varía de 1 a 3 mm, en las turbinas Francis, de 0.4 a 1 mm, y en las Pelton de 0.2 a 0.4 mm.

Considerando los diferentes tipos de desarenadores descritos anteriormente, se sugiere, para tomas de agua con fines de generación de energía hidroeléctrica, el uso de desarenadores de baja velocidad, y específicamente, tanques desarenadores, los cuales son los únicos capaces de eliminar el tamaño de partículas especificadas para estos casos.

Debido a que las características inusuales del desarenador, necesario para la planta de tratamientos residuales en estudio, no se puede emplear los desarenadores descritos con anterioridad, por lo tanto, es necesario diseñar un desarenador a través de la simulación matemática, el cual se realizará con la ayuda del programa tridimensional SSIM (Sediment Simulation In Water Intakes Whit Multiblock option).

## CAPITULO 2

### 2. MODELO MATEMÁTICO

La modelación matemática permite determinar variables hidráulicas a partir de la solución, generalmente, con métodos numéricos de las ecuaciones que describen el fenómeno estudiado. Los modelos matemáticos han ido evolucionando de forma paralela al incremento en la capacidad de cómputo y al desarrollo de cálculo numérico en general.

De esta manera se ha avanzado desde los primeros modelos unidimensionales, utilizando secciones transversales en modelos de ríos, posteriormente están los modelos bidimensionales, que resuelven ecuaciones promediadas en la profundidad, llegando a los primeros modelos tridimensionales que actualmente se utilizan.

Para nuestro caso se ha considerado implementar el modelo numérico SSIIM (Sediment Simulation In Water Intakes With Multiblock option), con el fin de obtener los patrones del flujo del agua y de transporte de sedimentos, que se generen en el canal, así mismo, la influencia de un desarenador en el mismo.

Los diferentes métodos implementados en un modelo, para llevar a cabo una simulación numérica de un fenómeno hidráulico, está basada en las ecuaciones de Navier-Stokes.

## 2.1. MODELO TRIDIMENSIONAL SSIIM.

SSIIM es una herramienta de mecánica de fluidos computacional para la simulación de variables de flujo tridimensional y transporte de sedimentos en flujos con superficie libre. El software es de libre distribución y tiene algunas librerías en código abierto para el desarrollo de metodologías de cálculo.

SSIIM es una abreviatura de Sediment Simulation In Water Intakes with Multiblock option. El programa es todavía diseñado para ser utilizado en la enseñanza e investigación de ingeniería hidráulica / de ríos / sedimentación. El cual es un programa desarrollado para la aplicación de investigación en ingeniería hidráulica en el estudio del flujo del agua y el proceso de sedimentación, que mediante una malla tridimensional, simula el movimiento del agua y sedimento. El programa resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando el método de control de volumen con el algoritmo SIMPLE y el modelo de turbulencia k-epsilon. También resuelve la ecuación de convección-difusión para el transporte de sedimentos, utilizando la fórmula de van Rijn para el límite del lecho. Además, se incluye un módulo de calidad del agua. (NTNU, NTNU Norwegian University of Science and Technology, 2019)

El modelo tridimensional SSIIM (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option), el cual fue desarrollado por el Dr. Nils Reider B. Olsen, profesor en NTNU (Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología), cuyo principal objetivo es el desarrollo en la simulación numérica de sedimentos. Las estadísticas del software dicen que un programa de computadora promedio tendrá de 2 a 20 errores por segundo. 1000 líneas de programa. Por lo tanto, los programas SSIIM tendrán entre 100 y 1000 errores. Las nuevas versiones del programa SSIIM no se han probado por completo (NTNU, NTNU Norwegian University of Science and Technology, 2019). Lo que significa que sería menos fiable, por lo cual es importante saber la forma correcta de aplicarlo al caso de estudio requerido y la adecuada interpretación de los resultados.

El programa SSIIM calcula las velocidades del agua, y el transporte de sedimentos en los ríos, embalses, etc. Utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes mediante una discretización con el método de volumen de finito y del esquema de de Ley de potencia, basándose en el método SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) para corrección del término de presión. Para el campo de las velocidades usa un esquema implícito y que se usan para ecuaciones de convección-difusión.

La simulación dentro del modelo SSIIM se realiza en tres etapas: pre-procesamiento de información, solución de sistemas de ecuaciones (cálculos), y procesamiento de datos.

El pre-procesamiento de datos incluye la generación de datos de entrada y la malla tridimensional. Para el enmallado debe considerarse la perpendicularidad de las líneas de cada celda; no debe existir ángulos menores a  $45^\circ$ , de no ser así, la convergencia de la solución es más lenta o incluso no puede darse.

La solución interna de las ecuaciones y demás parámetros se realiza sin intervención del usuario. El cálculo finaliza en el momento que el programa converge, lo cual sucede cuando en la ventana principal se puede observar que los valores de los residuales de velocidad, continuidad, modelo de turbulencia  $k-\epsilon$ , son menores a  $1 \text{ E}^{-3}$  y se escribe el archivo de resultados.

A pesar de que los datos mostrados se presentan gráficamente en 2 dimensiones dentro de la interfaz gráfica, es posible exportar los resultados a diferentes programas para el procesamiento y presentación de resultados (Olsen, A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water in takes whit multiblock option., 2011).

Hay dos versiones del programa: SSIIM 1, usa una cuadrícula estructurada, y SSIIM 2, usa una cuadrícula no estructurada. SSIIM 1 es más fácil de usar, y la cuadrícula es más simple. Se recomienda comenzar con esta versión. Si se debe modelar la humectación / secado, es necesario usar SSIIM 2. De lo contrario, se recomienda SSIIM 1 (NTNU, NTNU Norwegian University of Science and

Technology, 2019) . Ambos tipos de mallas son tridimensionales. En la malla estructurada 3D usada por la versión SSIIM 1, cada celda usa 3 índices para hacer más fácil la localización en la malla y el ingreso de datos en cada punto de la misma, tanto para las superficies de entrada y salida del flujo; además el editor de esta malla 3D estructurada solo trabaja en bloque a la vez. La velocidad de resolución de cálculos es mejor en este tipo de malla estructurada, el principal motivo es que usas menor memoria computacional. Para el SSIIM 2, el cual usa una malla no estructurada 3D, se ocupa solo un índice en cada celda que se genera casi aleatoria, lo cual provoca que haya necesidad de que el usuario deba especificar cuáles son las superficies de entrada y salida de flujo, mediante un editor gráfico de descarga, que además de la posibilidad de generar y conectar múltiples bloques (Olsen, A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water in takes whit multiblock option., 2011).

## 2.2. FUNDAMENTOS HDRÁULICOS DEL MODELO.

### 2.2.1. ECUACIONES DE NAVIER – STOKES.

La ecuación de Navier-Stokes, en mecánica de fluidos, es una ecuación diferencial parcial que describe el flujo de fluidos incompresibles. La ecuación es una generalización de la ecuación diseñada por un matemático suizo Leonhard Euler en el siglo XVIII, para describir el flujo de fluidos incompresibles y sin fricción. (Britannica., 2019).

Las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo turbulento en una geometría tridimensional general, se resuelven para obtener la velocidad del agua. El modelo  $k-\epsilon$ , se utiliza para calcular el esfuerzo de deformación turbulento. Se puede utilizar un modelo de turbulencia más simple.

Las ecuaciones de Navier-Stokes, para flujo de densidad constante y no compresible se pueden escribir como sigue.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

De izquierda a derecha de la ecuación es el término transitorio, el siguiente es el término convectivo; el término después del signo de igualdad es el término de presión, el siguiente es el de estrés de Reynolds, para evaluar este último se requiere un modelo turbulento (NTNU, NTNU Norwegian University of Science and Technology, 2019).

### 2.2.2. APROXIMACIÓN DE BUSSINESQ.

Presenta una aproximación para evaluar el término de tensión de Reynolds.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_T \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

En esta ecuación el término de la izquierda del signo de la igualdad es el que representa las tensiones de Reynolds, del lado derecho se tiene el término difusivo, luego el término de nominado de aproximación turbulenta, y el tercer término corresponde a la presión. Cabe mencionar, que se debe evaluar la viscosidad turbulenta  $\nu_T$ , esto se logra mediante diferentes modelos. El programa SSIIM utiliza el más completo hasta el momento llamado  $k-\varepsilon$  (Nils, 2014).

### 2.2.3. MODELO DE TURBULENCIA $k-\varepsilon$

El modelo de turbulencia define la viscosidad turbulenta, se utiliza para modelar el término de esfuerzo de Reynolds, como se muestra a continuación:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_T \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

Los dos primeros términos del lado derecho de la ecuación, forma la parte difusiva en la ecuación de Navier-Stokes, mientras que el tercer término se refiere a la presión.

La viscosidad en el modelo  $k-\varepsilon$ , se expresa como:

$$v_T = c_\mu \frac{k}{\varepsilon}$$

Donde “k” es la turbulencia para la energía cinética, y “ε” expresa la disipación de la turbulencia “k”. Estos dos términos se evalúan mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales que se mencionan en el manual de usuario SSIM.

Definiéndose la energía cinética turbulenta k como:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_j}$$

K se modela como:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_T}{\sigma x_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon$$

Donde P<sub>k</sub> es dado por:

$$P_k = v_T \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_j}{\sigma x_i} + \frac{\partial U_i}{\sigma x_j} \right)$$

La disipación de K es ε, y se modela como:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T \partial \varepsilon}{\sigma_k \partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

En todas las ecuaciones anteriores “C”, son diferentes constantes en el modelo k-ε. El modelo es la turbulencia por defecto en el programa SSIM.

#### 2.2.4. LEYES DE PARED.

Se usa las leyes de pared de los límites aproximados, según dado por Schlichting.

$$\frac{U}{u_x} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{30y}{k_s} \right)$$

La rugosidad  $K_s$ , es equivalente a un diámetro de partículas en la cama.

#### 2.2.5 MODELO DE TURBULENCIA $k-\omega$

El modelo  $k-\omega$  a menudo da difusión menos turbulenta que el modelo  $k-\varepsilon$ , lo que significa que sobreestima el tamaño de la zona de recirculación, mientras que para el modelo  $k-\varepsilon$  subestima la longitud de esta zona.

En SSIIM, las leyes de pared para el modelo  $k-\varepsilon$  se utiliza también para el modelo  $k-\omega$ , debido a la inclusión más fácil de la pared de rugosidad y la exactitud de la predicción de la tensión de esfuerzo (Nils, 2014). La ecuación que presenta el modelo  $k-\omega$ , es el siguiente:

$$v_T = \frac{k}{\omega}$$

#### 2.2.6. ECUACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua en SSIIM, se calcula mediante la ecuación de convección-difusión para la concentración. La diferencia de cálculo de la concentración de sedimentos es la adición de fuente extra y un término de lavado, debido a los flujos superficiales, químicos y a reacciones biológicas que se desarrollan.

El modelo SSIIM tiene una mayor flexibilidad que otros modelos, ya que el usuario define el número de variables a tomar en cuenta para la calidad del agua, así como, nuevas consideraciones en función del fenómeno que desee analizar (Nils, 2014). La ecuación para la calidad del agua es la siguiente:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right)$$

### 2.2.7. CALCULO DEL FLUJO DEL SEDIMENTO

SSIIM calcula el transporte de sedimentos por fracciones de tamaño. En el archivo de control, cada fracción se especifica en un conjunto de datos S, donde se proporciona el diámetro y la velocidad de caída. Este conjunto de datos debe darse al calcular el transporte de sedimentos. El número de tamaños de sedimento se indica en el conjunto de datos G 1.

Hay dos métodos para especificar el flujo de sedimentos en el archivo de control. Un método es dar la entrada de los conjuntos de datos I en kg / s. Se debe dar un conjunto de datos I para cada fracción. Luego se utilizará una distribución de concentración de sedimento vertical según la ecuación de Hunter-Rouse. Esta concentración de sedimento se administrará en toda la sección transversal aguas arriba ( $i = 1$ ).

El otro método para especificar la entrada de sedimentos es utilizar el conjunto de datos G 5. Luego, la concentración se da para una superficie específica en el límite de la cuadrícula. La concentración se da en la fracción de volumen, que se utiliza en todos los cálculos por SSIIM. Es posible usar las opciones I y G 5 simultáneamente para especificar múltiples fuentes de sedimentos.

La especificación de las fracciones de sedimento iniciales en el lecho se realiza utilizando los conjuntos de datos N y B en el archivo de control. Los conjuntos de datos N especifican una serie de mezclas de sedimentos. La distribución de las mezclas en las distintas partes de la cama se da en los B conjuntos de datos.

El transporte de sedimentos se divide tradicionalmente en carga de cama y carga suspendida. La carga suspendida se puede calcular con la ecuación de convección-difusión para la concentración de sedimento:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right)$$

Donde  $w$  representa la velocidad de caída del sedimento, y el coeficiente de difusión  $\Gamma$  se toma a partir del modelo  $k-\varepsilon$ .

$$\Gamma = \frac{v_T}{S_c}$$

$S_c$  es el número de Schmidt ajustado a 1 por defecto en el modelo SSIIM, aunque éste puede ser modificado.

Para cargas suspendidas, van Rijn (1987) desarrolló una fórmula para la concentración de sedimento en equilibrio  $C_{bed}$  cerca del lecho.

$$C_{bed} = 0.015 \frac{D_{50}}{a} \frac{\left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{\left\{ D_{50} \left[ \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{\frac{1}{3}} \right\}^{0.03}}$$

Donde:

$D_{50}$ : Diámetro de la partícula de sedimento.

$\tau$ : Esfuerzo cortante en la cama.

$\tau_c$ : Esfuerzo de corte crítico para el movimiento de partículas de sedimento.  $\alpha$

$\rho_s$ : Densidad del sedimento.

$\rho_w$ : Densidad del agua.

$v$ : Viscosidad del agua.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$\alpha$ : Nivel de referencia equivalente a la altura de rugosidad.

### 2.3. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA SSIIM.

El programa se ejecuta con los siguientes archivos:

Koordina: Este archivo guarda el número de secciones transversales y longitudinales con las que se generó la malla, el cual describe 5 columnas (de izquierda a derecha) con las variables  $i$ ,  $j$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Donde:

$i$ : Número de secciones transversales del nodo.

$j$ : Número de secciones longitudinales del nodo.

$x$ : Coordenadas en la abscisa del nodo.

$y$ : Coordenada en la ordenada del nodo.

$z$ : Coordenada en el eje vertical del nodo.

Control: Este archivo almacena los algoritmos necesarios para la simulación, se ingresan las condiciones hidráulicas y numéricas que gobernarán el modelo.

T	Título de la simulación.
F2 W	Ejecución automática del cálculo del flujo.
G 1	Número de secciones transversales, longitudinales, verticales y número de sedimentos a simularse.
G 3	Distribución de porcentaje de la altura de la sección transversal.
G 7	Secciones de entrada y salida del flujo.
W 1	M de strickler, caudal de entrada y tirante aguas abajo.
W 2	Sección de análisis para la interpolación de la superficie del agua.
W 4	Condiciones de pared.
K 1	Total de iteraciones e intervalos de actualización de la superficie del agua.
K 2	Leyes de pared lateral y superficie.

Tabla 3. Comandos de archivo Control, cálculo de hidrodinámica.

Una vez que se ha ejecutado el archivo control para el cálculo de la hidrodinámica, se genera automáticamente un archivo llamado "result", el cual contiene los cálculos del flujo del agua (hidrodinámica), el cual se tomara para el cálculo del flujo del sedimento. Resuelto el cálculo de flujo del agua, se procede con el cálculo de flujo y transporte de sedimentos con los algoritmos siguientes.

T	Título de la simulación
F 2 RIS	Ejecución automática del cálculo de transporte de sedimentos.
F 11	Peso específico de sedimentos y coeficiente de Shields
F 33	Intervalo de tiempo y número de iteraciones internas.
F 37	Algoritmo para el cálculo de sedimentos impermanente.
F 68	Algoritmo para el cálculo del flujo del sedimento.
G 1	Número de secciones transversales, longitudinales, verticales y número de sedimentos a simularse.
G 3	Distribución en porcentaje de la altura de la sección transversal.
G 7	Secciones de entrada y salida del flujo del agua.
G 21	Algoritmo para el cálculo de sedimentos en secciones de interés.
I	Concentración de cada tamaño de sedimentos (kg/s), en la sección transversal aguas arriba.
S	Diámetro y velocidad de caída de cada tamaño de sedimento.
N	Grupo de sedimentos y fracción de cada tamaño.
B	Distribución en la malla de los grupos N de sedimentos.
W 1	M de Strickler, caudal de entrada y tirante aguas abajo.
W 2	Sección de análisis para la interpolación de la superficie del agua.
W 4	Condiciones de pared.
K 1	Total de interacciones e intervalo de actualización de la superficie del agua.
K2	Leyes de pared lateral y superficie.

Tabla 4. Comandos archivo control, cálculo del flujo de sedimentos.

Boogie: Este archivo registra los resultados intermedios del cálculo, muestra la eficiencia de atrapamiento y distribución del tamaño del grano de sedimento.

Koosurf: Este archivo es idéntico al archivo Koordina, con la diferencia que el nivel de la superficie es también escrita en cada línea.

## CAPITULO 3

### 3.1 PLAN DE PRUEBAS A REALIZAR

Para el estudio realizado en esta presente tesis, se basa en una obra existente de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ubicada en el estado de Hidalgo (México), que trata el agua que proviene del valle de México.

La planta ha sido diseñada para un caudal máximo en tiempos de lluvias de 50 m<sup>3</sup>/s, siendo su caudal medio de 42 m<sup>3</sup>/s en épocas de lluvias, y de 35 m<sup>3</sup>/s en temporadas de estiaje (Acciona, 2018).

Las aguas tratadas se reutilizan para uso agrícola, y así mismo, mejora las condiciones sanitarias, epidemiológicas y de salud de los usuarios finales.

La planta de tratamiento de aguas residuales permite depurar las aguas residuales de 12,6 millones de habitantes equivalentes de la Ciudad de México, reutilizándose esta para usos agrícolas o riego tecnificados, además de posibilitar el cambio de cultivos restringidos a no restringidos, entre otras ventajas. Además, la planta de tratamientos reporta importantes beneficios medioambientales para la región. La planta de tratamientos de aguas residuales es la mayor planta de tratamiento de aguas residuales del mundo con una capacidad nominal de tratamiento medio de 35 m<sup>3</sup>/s y un máximo de 50 m<sup>3</sup>/s, incluida la evacuación final

de los residuos sólidos y lodos que se generen. Además, la planta está dotada de un sistema de cogeneración para aprovechar el biogás producido en la digestión, permitiendo el máximo ahorro energético (Acciona, 2018).

La presencia de sedimentos reduce la capacidad de agua que pueda transportar el canal, así mismo, puede ocasionar erosión en las paredes de los canales o la deposición de las partículas finas provocando la reducción o disminución de su capacidad. En el caso especial analizado, los daños son en los equipos de separación de sólidos.

La finalidad del estudio consiste en determinar la sección geométrica óptima de un desarenador, considerando el gasto máximo de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  que retenga la mayor cantidad posible de sedimentos.

## 3.2 MÉTODO

Para el desarrollo del estudio numérico del desarenador, se realizará la simulación en el programa SSIIM, a fin de obtener los patrones de flujo de agua y de los procesos asociados del transporte de sedimentos.

Dado que en la obra actual no existe una obra cuya finalidad sea la de retener las partículas sedimentarias, se ha optado en éste estudio proponer un desarenador cuya finalidad sea captar el mayor volumen de sedimentos que puedan pasar a la planta de tratamientos.

Para este procedimiento se presentan las operaciones de los procesos y sistemas reales de manera numérica para su análisis y estudio, permitiendo modificar las distintas variables que en el estudio puedan participar.

### 3.2.1 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, aeroacústica etc.

El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos (BlogESSS, s.f.)

Los modelos CFD trabajan dividiendo el dominio de interés en una serie de pequeños volúmenes discretos usando una malla para modelización. Las propiedades físicas del fluido, tales como temperatura, velocidad, presión, etc., son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales, logrando predecir el comportamiento del fluido con gran detalle en el dominio estudiado, un cálculo de CFD consta de 3 procesos:

- Definición del problema: Delimitación de la geometría, discretización del dominio (generación de la malla de cálculo), consideración de aspectos físicos, condicionales iniciales, y definición de los parámetros de cálculo.
- Solución numérica: A finación de parámetros de entrada y cálculo, refinamiento de la malla y obtención de resultados.
- Análisis de resultados y generación de representaciones.

Según la configuración las mallas pueden ser estructuradas y no estructuradas.

- Malla estructurada: En una malla estructurada es posible hacer un arreglo coordinado, indicando la posición de todos los elementos de la misma. Su nombre se basa en el hecho de que presenta un patrón repetitivo y regular llamado bloque. Este tipo de mallas se compone de elementos cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D. Lo ideal en estos casos es usar generadores de malla con ecuaciones elípticas que optimizan la forma al procurar mantener su ortogonalidad y uniformidad.
- Malla no estructurada: Es una colección arbitraria de elementos para llenar el dominio, la disposición de dichos elementos, no posee un patrón discernible de ordenamiento. Este tipo de mallas es táctico compuesto por triángulos en 2D y tetraedros en 3D. La ventaja de esta malla radica en que su generación es bastante automatizada y requiere pocos datos de entrada por parte del usuario, sin embargo, los problemas suelen presentarse al

momento de hacer arreglos especiales en la malla o refinar en zonas específicas (Hermida, 2014).

### 3.2.2 SIMULACIÓN MATEMÁTICA

Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema (Nylor, 1996).

Los diferentes métodos implementados en un modelo CFD para llevar a cabo la simulación numérica de un fenómeno hidráulico, se basan en la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, junto con modelos de turbulencia de distintos grados de complejidad, que van desde los modelos algebraicos de vorticidad para la viscosidad, hasta los modelos de tensión de Reynolds. Una vez finalizada la simulación, provee de resultados en puntos discretos del espacio y tiempo (P. Novak, 2001)

SSIIM como un programa CDF consta de tres pasos:

- Pre-procesamiento: Generación de la malla e ingreso de los datos de entrada.
- Cálculos: el programa calcula la velocidad del agua, el flujo y transporte de los sedimentos, etc. El cálculo finaliza cuando el programa converge, lo cual sucede cuando se escribe el archivo "result".
- Post-procesamiento: El programa genera los resultados visuales a través de vista en planta, transversales o longitudinales.

### 3.3 DATOS DE PROTOTIPO

Los datos de prototipo de la planta de tratamiento de aguas en específico, se parten de un canal con las siguientes características de prototipo:

Sección: Rectangular

Ancho: 14.5 m

Longitud: 100 m

Gasto: 50 m<sup>3</sup>/s

### 3.4 MODELO NUMÉRICO

Durante la realización del modelo numérico a partir de los datos obtenidos de prototipo, se realizaron las adecuaciones necesarias para ejecutarlas en el programa S SIIM. Así, el modelo numérico es tá compuesto por la siguiente información:

- El modelo numérico se conforma por 34 secciones, cada sección tiene una separación de 3 metros entre ellas, con ello, se simula la longitud del canal prototipo. Se enumera la sección del 1 (lado izquierdo) hasta la 34 (lado derecho).
- La generación de la malla deberá de ser cuidadosa, pues su calidad se ve reflejada en los resultados.

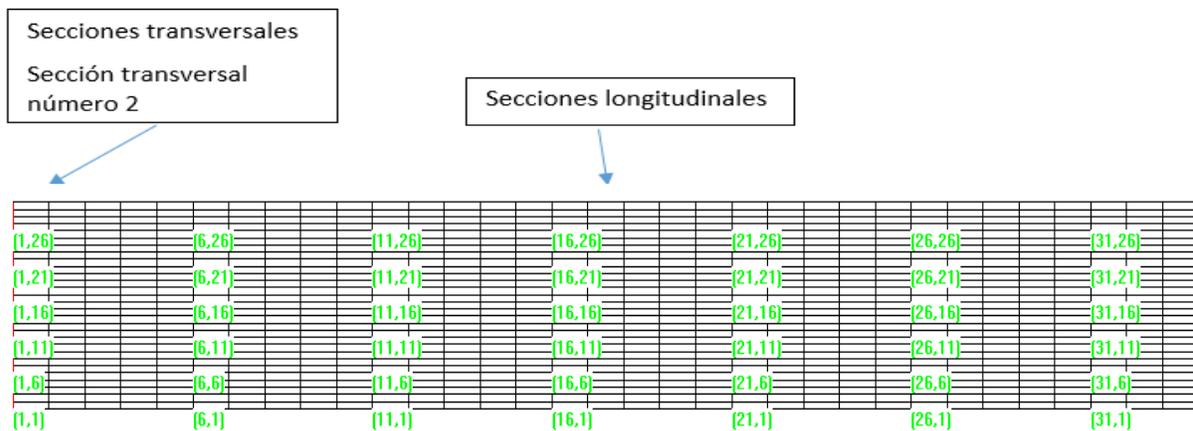


Fig. 13 Vista en planta de las secciones que conforman el modelo numérico desde la entrada (izquierda) hasta la salida (derecha).

- Cada sección, de manera transversal está dividida por 30 secciones transversales con separaciones de 0.5 cm entre ellas.

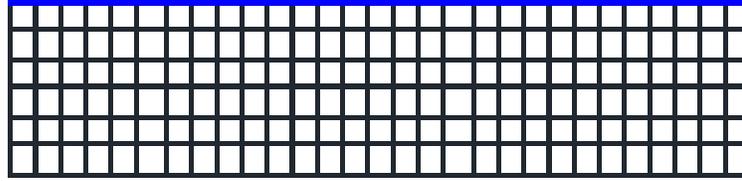


Fig. 14 Vista transversal de una sección.

- Las coordenada en x, y, z, se realizaron en el archivo koordina
- Se proponen obras de toma dentro del desarenador, así como, en las secciones 20, 22, 24 y 26.

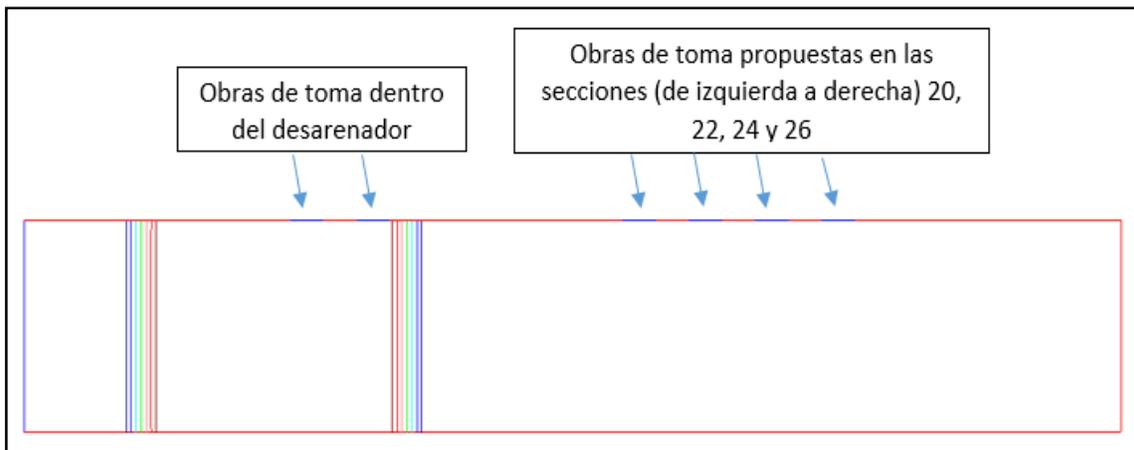


Fig. 15 Obras de toma

- Proceso de información, durante las distintas pruebas de simulación, se recopilará la información para su comparación que permita evaluar la mejor condición.
- Realizado las simulaciones, y comparado la información, se determinará la geometría que caracterice el mejor diseño.

### 3.4.1 PARÁMETROS GENERALES.

Como se ha mencionado, para el modelamiento en el programa SSIIM, además de utilizar el archivo “koordina” para las coordenadas de la malla a usarse, se utiliza el archivo “control”, el cuál este archivo almacena los algoritmos necesarios para

la simulación, se ingresan las condiciones hidráulicas y numéricas que gobernarán el modelo.

### 3.4.2 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

La realización de las simulaciones en el programa SSIIM, se harán en dos escenarios, con la finalidad de observar la retención de sedimentos con desarenador y sin desarenador, de la siguiente manera:

Primer escenario, comprende la simulación hidrodinámica del flujo en el canal, así mismo, la simulación con sedimentos en el modelo numérico, la simulación se hará sin desarenador, identificando tanto sus vectores de velocidad, sus velocidades horizontales y verticales, así como, el comportamiento del flujo y transporte de sedimentos generados en el modelo numérico. Con ello, se observará el comportamiento de los sedimentos en el canal sin desarenador (Se anexan imágenes en el apéndice).

El segundo escenario, consiste en colocar un desarenador, modificando su geometría, ancho, profundidad y longitud, observando el comportamiento del transporte y flujo de los sedimentos en el canal, y con ello determinar la sección geométrica óptima que pueda retener el mayor volumen de sedimentos.

## CAPITULO 4

### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO SSIIM

El primer paso para el desarrollo del modelo numérico en el programa SSIIM, es establecer los archivos necesarios que se requerirán para la realización del modelo, explicados anteriormente.

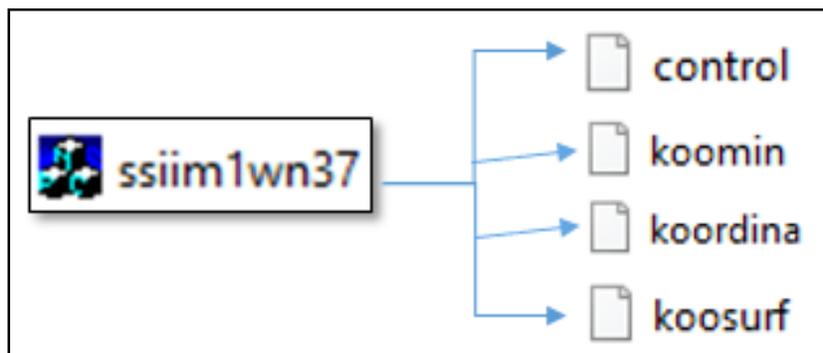


Fig. 16 Esquema de los archivos para SSIIM

El programa SSIIM maneja una gran cantidad de variables como se muestra en la siguiente tabla.

VARIABLES DEL PROGRAMA SSIIM	
Vectores de velocidad	Velocidades horizontales y verticales
Presión	Energía cinemática turbulenta
Épsilon	Esfuerzo cortante en el lecho
Viscosidad turbulenta horizontal y vertical	Espesor de sedimento en el lecho
Esfuerzo de Reynolds	Concentración de sedimentos por diámetros.
Profundidad	Cambios en lecho
Espesor de capa activa de sedimentos	Parámetros de calidad de agua
Niveles de agua	Número de Froude
Promedio velocidad-profundidad	Rugosidad

Tabla 5. Variables del programa SSIIM

Para una simulación se ejecutan primero las características hidrodinámicas del canal, con o sin desarenador cual sea el caso; posterior a ello, se simula con las condiciones de flujo y transporte de sedimentos.

A continuación se presenta un ejemplo de una simulación hecha con el programa, colocando el desarenador, y obras de toma.

#### 4.1 SIMULACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL CANAL (SECCIÓN CONSTANTE DE 14.5 m), INCLUYENDO EL DESARENADOR QUE VA DE LA SECCIÓN 5 A 6 (3 m).

Con el modelo SSIIM se puede obtener los vectores de velocidad en todo el tramo del canal. Las flechas de mayor tamaño son indicativos de mayor velocidad, como se muestra en la siguiente figura. En las obras de toma propuestas se presentan las más altas velocidades, debido a la disminución de la sección.

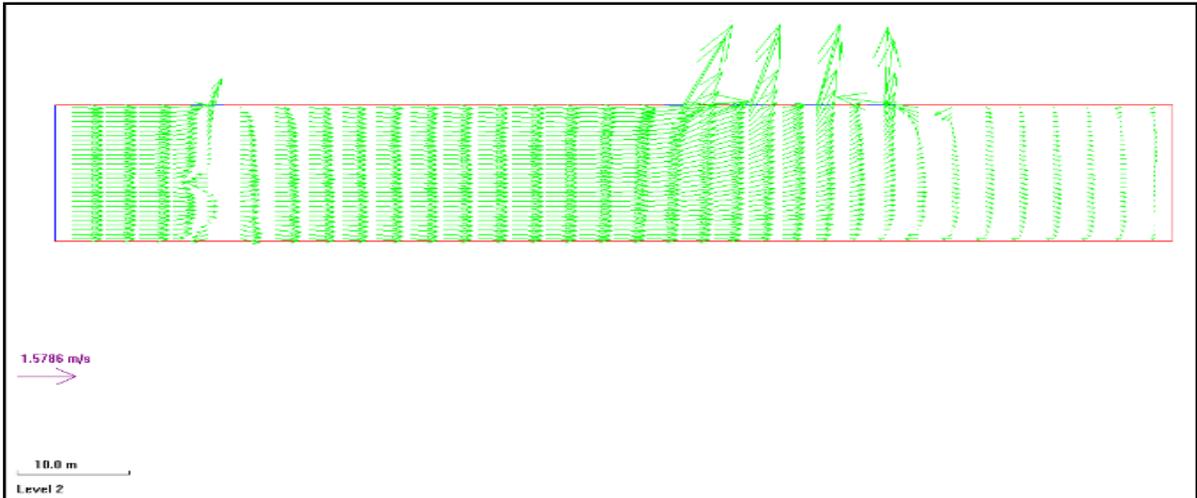


Fig. 17 Vectores de velocidad, vista en planta. A lo largo del canal se observan las líneas de corriente en el nivel 2, desde la entrada (lado izquierdo), hasta la salida (lado derecho); así mismo, aquellas que se desvían a las obras de toma.

En la siguiente figura se muestra la sección transversal dentro del desarenador, en este caso trata de la sección 6, es decir, donde termina el desarenador, en esta sección se propuso una obra de toma, con la finalidad de desalojar el sedimento a un canal secundario, y así, evitar la acumulación de sedimentos en el desarenador.

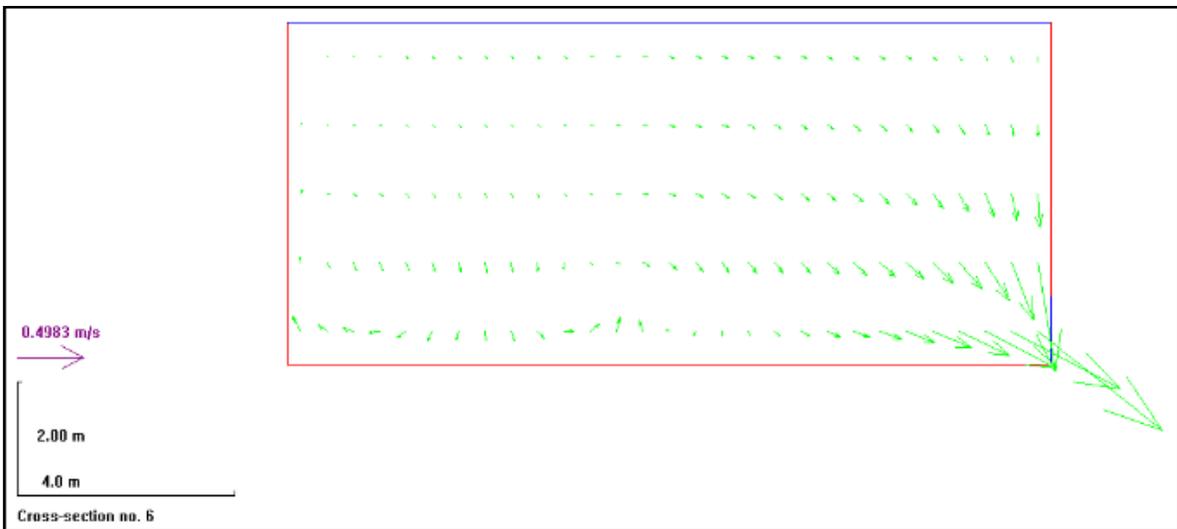


Fig. 18 Vectores de velocidad, corte transversal en la sección 06, obra de toma en el desarenador.

El programa permite obtener las velocidades horizontales y las verticales, en una simulación de flujo en el canal.

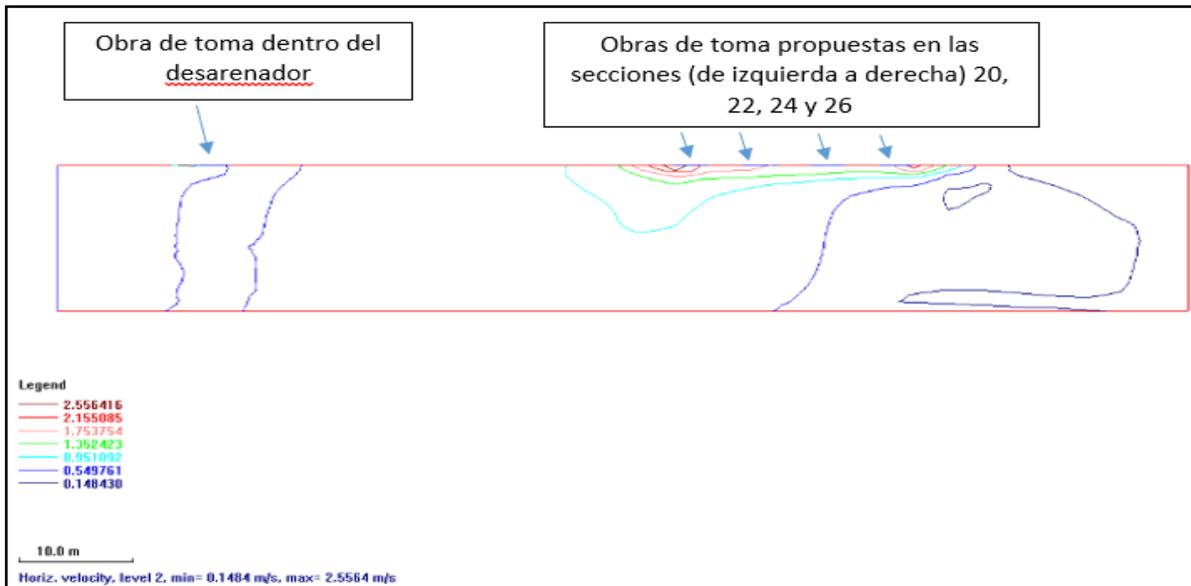


Fig. 19 Velocidades horizontales, vista en planta. Las velocidades están en un rango de 0.14 a 2.55 m/s, las corrientes se centran en las obras de toma.

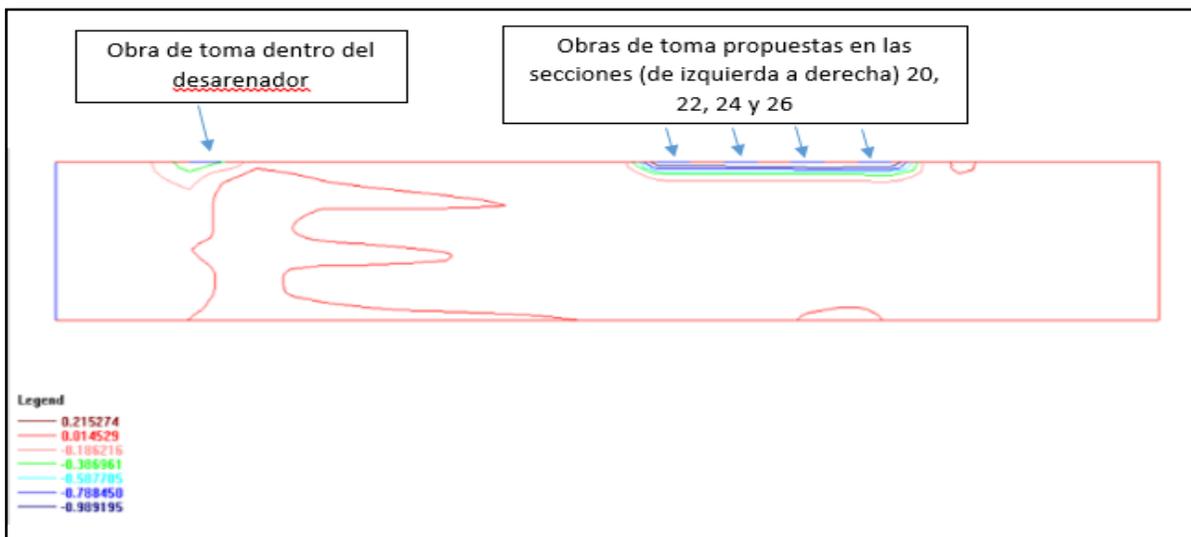


Fig. 20 Velocidades verticales, vista en planta. Las velocidades están en un rango de -0.98 a 0.21 m/s, las corrientes se centran en las obras de toma, las velocidades negativas muestran que existe un remanso.

La simulación hidrodinámica del canal con dearenador en la sección 5 al 6, demuestra el comportamiento y régimen de velocidades que actúan en el canal, siendo las obras de toma propuestas quienes hacen que aumente la velocidad, así mismo, la simulación nos muestra el comportamiento que puedan tener las partículas que en el canal circulen. El comportamiento hidrodinámico que se tenga, estará en función de las propuestas que se harán con el desarenador, dicho comportamiento reflejará sus velocidades máximas y mínimas, así mismo, sus vectores de velocidades.

#### 4.2 SIMULACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FLUJO Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL CANAL, SECCIÓN CONSTANTE (14.5 m), Y PROFUNDIDAD DE 2 METROS, INCLUYE EL DESARENADOR QUE VA DE LA SECCIÓN 5 A 6 (3 m).

Como en las características hidrodinámicas, el programa permite obtener las velocidades horizontales relacionadas con el arrastre de los sedimentos, y las verticales relacionadas con la velocidad de caída.

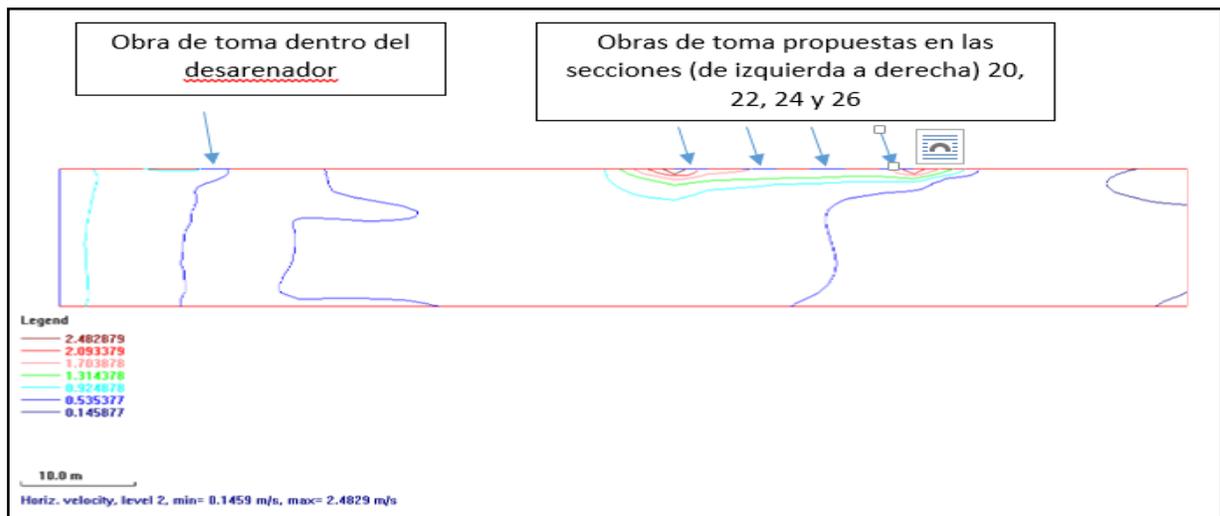


Fig. 21 Velocidades horizontales, vista en planta. Las líneas de corrientes se centran en las obras de toma existentes en obra, las velocidades están en un rango de 0.14 a 2.48 m/s

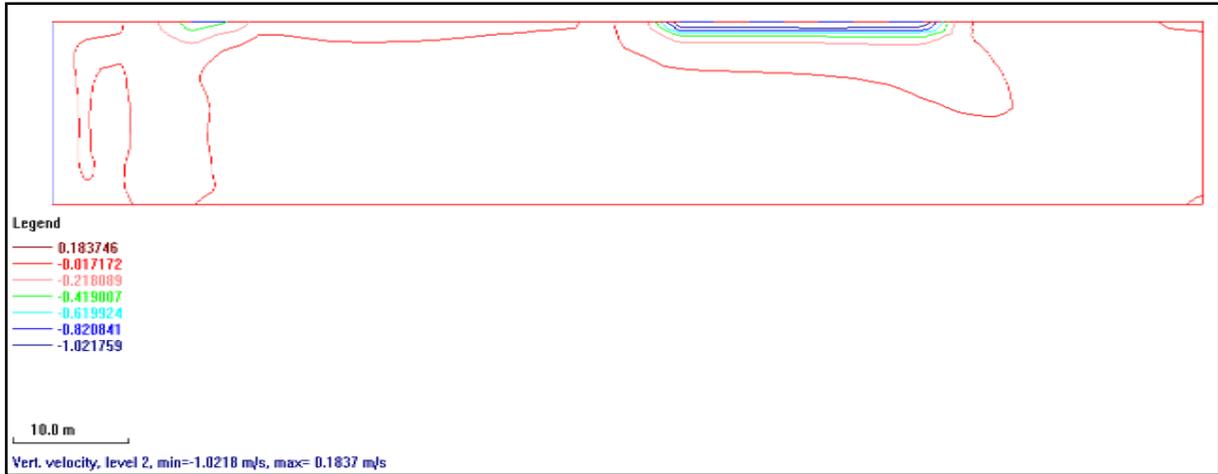


Fig. 22 Velocidades verticales, vista en planta. Se presentan velocidades de - 1.021 a 0.18 m/s

Los cambios en el lecho, demuestran la concentración de sedimentos en el canal, así mismo la altura de ellos concentrados

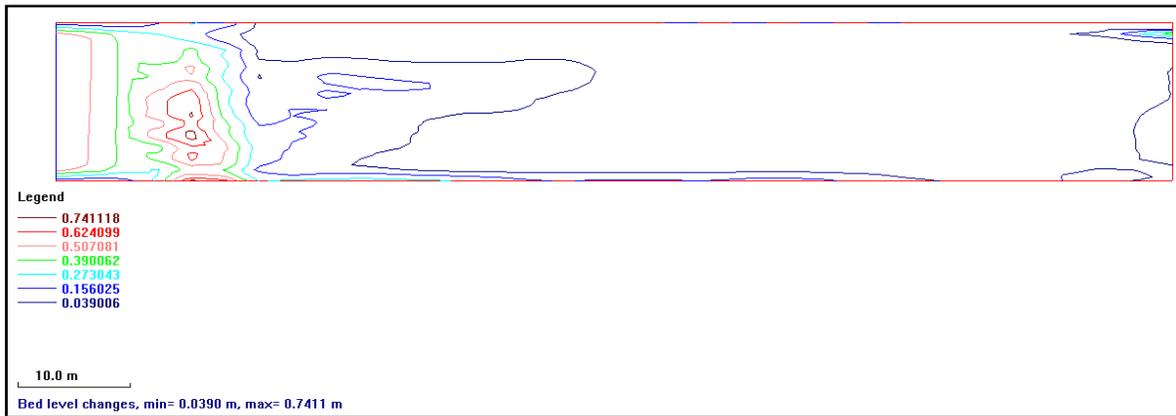


Fig. 23 Cambios en lecho (BEDCHANGE), vista en planta.

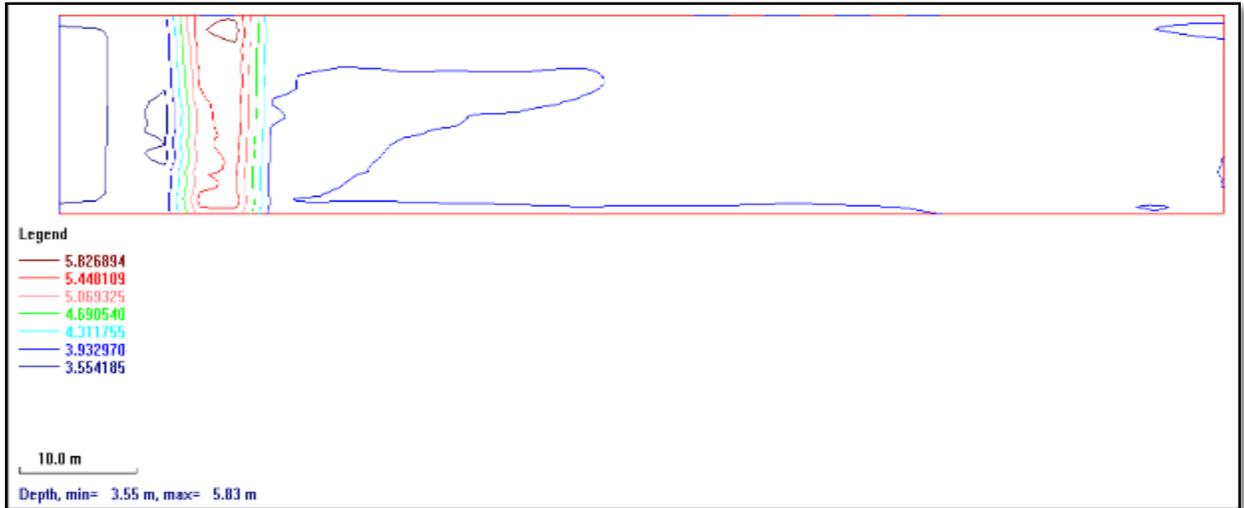


Fig. 24 Profundidad (DEPTH), vista en planta.

La concentración de sedimentos en el desarenador de la sección 5 a 6 (longitud de 3 metros) de sección constante, no logra retener el sedimento, observándose partículas ingresar después del desarenador.

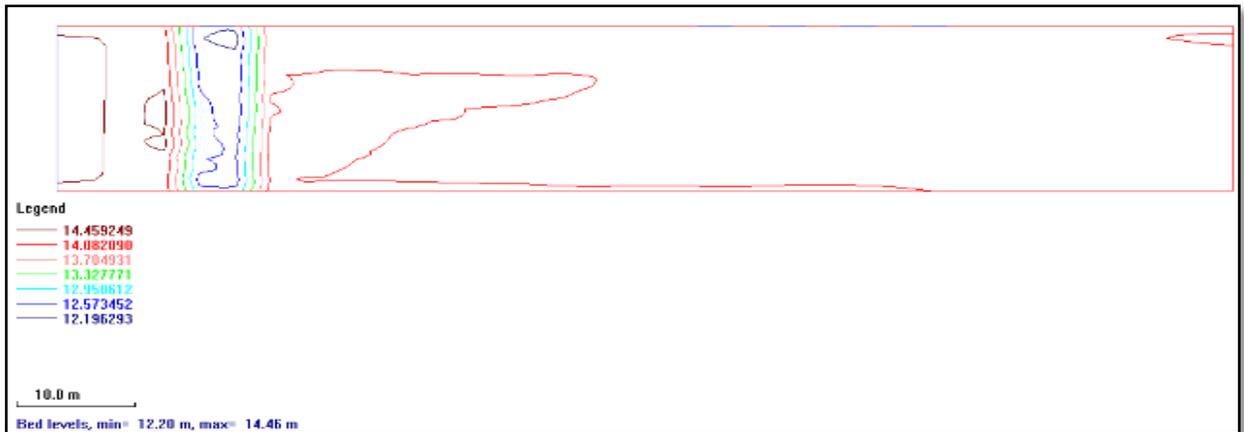


Fig. 25 Niveles de profundidad (BEDLEVELS), vista en planta.

La simulación de las características del flujo y transporte de sedimentos aquí presentadas, demuestran el comportamiento de las partículas que fluyen en el canal, se observa que su transporte como su depósito y/o sedimentación, está en

función de las velocidades que rigen en el canal, para este ejemplo, donde el desarenador se encuentra en la sección 5 a la sección 6 ( 3 metros), con una profundidad de 2 metros, y ancho constante de 14.5 m. Las dimensiones del desarenador propuesto, no son suficientes para captar y/o retener a las partículas en suspensión, observándose, que muchas de ellas, logran pasar el desarenador, los volúmenes obtenidos en el programa SSIM, de un antes y un después de las propuestas hechas para un desarenador se presentan en el siguiente capítulo.

## **CAPITULO 5**

### **5.1 ANALISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

Para el caso en estudio se realizaron 51 simulaciones en el canal (con desarenador), considerando tres condiciones:

- Ancho
- Profundidad
- Longitud

A continuación en la siguiente tabla se muestra las variaciones geométricas realizadas en las distintas simulaciones; en la primera columna se menciona la profundidad, en la segunda columna, se muestran los anchos realizados con la profundidad de la primera columna, en la tercera columna se menciona la longitud del cual fueron hechas las simulaciones, es decir, se realizaron simulaciones a partir de 3 metros hasta 33 metros.

ESCENARIOS (desarenador)		
Profundidad (m)	Ancho (m)	Longitud (m)
1	- Sin ancho, longitud constante (14.5 m).	0 a 33 m
2	- 1 - 2 - Sin ancho, longitud constante.	0 a 33 m
3	- 1 - 2 - Sin ancho, longitud constante.	0 a 33 m
4	- 1 - 2 - Sin ancho, longitud constante.	0 a 33 m
5	- Sin ancho, longitud constante.	0 a 33 m

Tabla 6. Variaciones a realizarse con el desarenador.

## 5.2 RESULTADOS DE DE SARENADOR, S ECCIÓN CO NSTANTE (14.5 m ), PROFUNDIDADES DE 5, 4, 3, 2 Y 1 METRO

En las siguientes tablas se muestra los resultados obtenidos en el programa, con ancho constante, es decir, no se modificaron los anchos, se mantiene el ancho real de 14.5 metros, con profundidades de 5, 4, 3, 2 y 1 metros, y longitudes de 3 a 33 metros.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 14.5 m

Profundidad: 1 m

Longitud: 3, 9, 21 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON 1 METRO DE PROFUNDIDAD</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	1	14.5	69.82	45.46	68.82
5-8	9	1	14.5	70.17	81.10	31.72
5-12	21	1	14.5	70.95	121.53	8.52
5-16	33	1	14.5	69.50	131.05	5.58

Tabla 7. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 1 metro de profundidad, ancho de 14.5, y longitudes variables.

Los resultados obtenidos para esta simulación, reflejan que las dimensiones propuestas no son suficientes para retener la mayor parte de sedimentos, observándose partículas después del desarenador propuesto.

**PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:**

Ancho: 14.5 m

Profundidad: 2 m

Longitud: 3, 6, 9, 15, 21, 27 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON 2 METROS DE PROFUNDIDAD</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	2	14.5	77.67	40.37	41.06
5-7	6	2	14.5	76.52	75.25	25.39
5-8	9	2	14.5	73.85	97.62	17.27
5-10	15	2	14.5	71.77	121.67	9.82
5-12	21	2	14.5	71.68	154.22	6.66
5-14	27	2	14.5	70.53	168.16	5.42
5-16	33	2	14.5	70.61	175.25	4.61

Tabla 8. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 2 metro de profundidad, ancho de 14.5, y longitudes variables.

Se observa que los volúmenes obtenidos después del desarenador, se reducen conforme la longitud va aumentando.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 14.5 m

Profundidad: 3 m

Longitud: 3, 9, 21 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON 3 METROS DE PROFUNDIDAD</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	3	14.5	72.64	26.39	54.29
5-8	9	3	14.5	71.55	63.42	36.07
5-12	21	3	14.5	72.85	144.26	16.41
5-16	33	3	14.5	72.42	172.06	9.79

Tabla 9. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 3 metro de profundidad, ancho de 14.5, y longitudes variables.

Se observa que ante el aumento de la profundidad, los volúmenes de sedimentos que pasan después son considerables.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 14.5 m

Profundidad: 4 m

Longitud: 3, 9, 21 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON 4 METROS DE PROFUNDIDAD</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	4	14.5	73.59	22.22	65.02
5-8	9	4	14.5	72.41	58.06	47.82
5-12	21	4	14.5	72.22	134.09	15.62
5-16	33	4	14.5	71.90	171.06	7.48

Tabla 10. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 4 metro de profundidad, ancho de 14.5, y longitudes variables.

Ante el aumento de la profundidad, los volúmenes de sedimentos que pasan después son aún mayor.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 14.5 m

Profundidad: 5 m

Longitud: 3, 9, 21 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON 5 METROS DE PROFUNDIDAD</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	5	14.5	74.14	14.88	66.10
5-8	9	5	14.5	72.15	50.27	53.47
5-12	21	5	14.5	71.49	126.21	17.78
5-16	33	5	14.5	71.55	163.53	8.16

Tabla 11. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 5 metro de profundidad, ancho de 14.5, y longitudes variables.

Ante el aumento de la profundidad, los volúmenes de sedimentos son similares a las obtenidas con anterioridad (4 metros de profundidad).

Mientras más profunda sea la propuesta del desarenador, las corrientes de velocidades serán nulas.

### 5.3 RESULTADOS DE DE SARENADOR, ANCHO 16.5 METRO (16.5), PROFUNDIDADES DE 2, 3, Y 4 METROS

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos en el programa, con un ancho de 16.5 (aumento de 1 metro por lado al ancho original), con profundidades de 2, 3 y 4 metros, y longitudes de 3 a 33 metros.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 16.5 m

Profundidad: 2 m

Longitud: 3, 9, 15, 21, 27 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON ANCHO DE 16.5, PROFUNDIDAD DE 2 METROS</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	2	16.5	73.49	27.76	59.80
5-8	9	2	16.5	74.50	97.29	17.14
5-10	15	2	16.5	71.19	117.09	8.59
5-12	21	2	16.5	71.52	154.06	4.98
5-14	27	2	16.5	71.61	167.56	3.72
5-16	33	2	16.5	71.67	174.33	2.77

Tabla 12. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 2 metros de profundidad, ancho de 16.5, y longitudes variables.

Para ésta simulación, se observa que la longitud es la variable que permite retener mayor cantidad de sedimentos, así como el ancho interviene en ello.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 16.5 m

Profundidad: 3 m

Longitud: 3, 9, 21 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON ANCHO DE 16.5, PROFUNDIDAD DE 3 METROS</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	3	16.5	73.10	22.17	73.42
5-8	9	3	16.5	76.82	72.51	30.74
5-12	21	3	16.5	73.12	127.07	6.10
5-16	33	3	16.5	72.91	155.19	2.34

Tabla 13. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 3 metros de profundidad, ancho de 16.5, y longitudes variables.

Los volúmenes que pasan aún, son considerables, el aumento de profundidad no disminuye el paso de sedimentos.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 16.5 m

Profundidad: 4 m

Longitud: 3, 9 y 21 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON ANCHO DE 16.5, PROFUNDIDAD DE 4 METROS</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	4	16.5	73.66	19.19	77.61
5-8	9	4	16.5	73.28	53.06	45.76
5-12	21	4	16.5	71.54	121.99	9.88
5-16	33	4	16.5	71.56	154.56	3.52

Tabla 14. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 4 metros de profundidad, ancho de 16.5, y longitudes variables.

Aún se observa una cantidad considerable que pasa.

5.4 RESULTADOS DE DESARENADOR, ANCHO 18.5 METRO (18.5), PROFUNDIDADES DE 2, 3, Y 4 METROS.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos en el programa, con un ancho de 18.5 (aumento de 2 metros por lado al ancho original), con profundidades de 2, 3 y 4 metros, y longitudes de 3 a 33 metros.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 18.5 m

Profundidad: 2 m

Longitud: 3, 9, 15, 21, 27 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON ANCHO DE 16.5, PROFUNDIDAD DE 2 METROS</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	2	18.5	73.62	33.15	70.52
5-8	9	2	18.5	72.74	62.20	41.74
5-10	15	2	18.5	72.10	83.26	19.50
5-12	21	2	18.5	71.48	134.97	3.72
5-14	27	2	18.5	71.14	147.85	2.06
5-16	33	2	18.5	71.16	152.81	1.64

Tabla 15. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 2 metros de profundidad, ancho de 18.5, y longitudes variables.

Los resultados obtenidos permiten visualizar lo que ya se ha comentado, la longitud es una de las variables importantes para la retención de sedimentos.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 18.5 m

Profundidad: 3 m

Longitud: 3, 9, 21 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON ANCHO DE 16.5, PROFUNDIDAD DE 3 METROS</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	3	18.5	73.10	22.17	73.42
5-8	9	3	18.5	76.82	72.51	30.74
5-12	21	3	18.5	73.12	127.07	6.10
5-16	33	3	18.5	72.91	155.19	2.34

Tabla 16. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 3 metros de profundidad, ancho de 18.5, y longitudes variables.

El aumento de la profundidad no garantiza mayor retención de sedimentos.

PROPUESTA DE DESARENADOR CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

Ancho: 18.5 m

Profundidad: 4 m

Longitud: 3, 9, 21 y 33 m

<b>RESULTADOS DE DESARENADOR CON ANCHO DE 16.5, PROFUNDIDAD DE 4 METROS</b>						
SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)	VOLUMEN ANTES DEL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN EN EL DESARENADOR (m3)	VOLUMEN DESPUÉS DEL DESARENADOR (m3)
5-6	3	4	18.5	73.66	19.19	77.61
5-8	9	4	18.5	73.28	53.07	45.76
5-12	21	4	18.5	71.54	121.99	9.88
5-16	33	4	18.5	71.56	154.56	3.52

Tabla 17. Resultados de las simulaciones del desarenador, con 4 metros de profundidad, ancho de 18.5, y longitudes variables.

Mientras se aumente la profundidad, las partículas que pasan en el desarenador son considerables.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dadas que las características de los altos gastos líquidos y sólidos manejados, no permiten usar alguno de los diseños tradicionales. El análisis se realiza con la implementación de un modelo numérico tridimensional SSIIM (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option).

Para la aplicación del modelo, se analiza la importancia del ancho, la profundidad y la longitud de cada diseño de tanques amortiguadores obteniendo los siguientes resultados, mostrados en la siguiente tabla:

No.	SECCIÓN	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD (m)	COTA	ANCHO (m)	VOL. ANTES DEL DESARENADOR (m <sup>3</sup> /s)	VOL. EN EL DESARENADOR (m <sup>3</sup> /s)	VOL. DESPUES DEL DESARENADOR (m <sup>3</sup> /s)
1	5-6	3	4	10	1	73.66	19.19	77.61
2	5-8	9	4	10	1	73.28	53.07	45.76
3	5-12	21	4	10	1	71.54	121.99	9.88
4	5-16	33	4	10	1	71.56	154.56	3.52
5	5-6	3	3	11	1	73.10	22.17	73.42
6	5-8	9	3	11	1	76.82	72.51	30.74
7	5-12	21	3	11	1	73.12	127.07	6.10
8	5-16	33	3	11	1	72.91	155.19	2.34
9	5-6	3	2	12	1	73.49	27.76	59.80
10	5-8	9	2	12	1	74.50	97.29	17.14
11	5-10	15	2	12	1	71.19	117.09	8.59
12	5-12	21	2	12	1	71.52	154.06	4.98
13	5-14	27	2	12	1	71.61	167.56	3.72
14	5-16	33	2	12	1	71.67	174.33	2.77
15	5-6	3	4	10	2	73.66	19.19	77.61
16	5-8	9	4	10	2	73.28	53.07	45.76
17	5-12	21	4	10	2	71.54	121.99	9.88
18	5-16	33	4	10	2	71.56	154.56	3.52

19	5-6	3	3	11	2	73.10	22.17	73.42
20	5-8	9	3	11	2	76.82	72.51	30.74
21	5-12	21	3	11	2	73.12	127.07	6.10
22	5-16	33	3	11	2	72.91	155.19	2.34
23	5-6	3	2	12	2	73.62	33.15	70.52
24	5-8	9	2	12	2	72.75	62.19	41.74
25	5-10	15	2	12	2	72.09	83.26	19.49
26	5-12	21	2	12	2	71.48	134.98	3.72
27	5-14	27	2	12	2	71.14	147.85	2.06
28	5-16	33	2	12	2	71.16	152.81	1.64
29	5-6	3	5	9	s/ancho	74.14	14.88	66.10
30	5-8	9	5	9	s/ancho	72.15	50.27	53.47
31	5-12	21	5	9	s/ancho	71.49	126.21	17.78
32	5-16	33	5	9	s/ancho	71.55	163.53	8.16
33	5-6	3	4	10	s/ancho	73.59	22.22	65.02
34	5-8	9	4	10	s/ancho	72.41	58.06	47.82
35	5-12	21	4	10	s/ancho	72.22	134.09	15.62
36	5-16	33	4	10	s/ancho	71.90	171.06	7.48
37	5-6	3	3	11	s/ancho	72.64	26.39	54.29
38	5-8	9	3	11	s/ancho	71.55	63.42	36.07
39	5-12	21	3	11	s/ancho	72.85	144.26	16.41
40	5-16	33	3	11	s/ancho	72.42	172.06	9.79
41	5-6	3	2	12	s/ancho	77.67	40.37	41.06
42	5-7	6	2	12	s/ancho	76.52	75.25	25.39
43	5-8	9	2	12	s/ancho	73.85	97.62	17.27
44	5-10	15	2	12	s/ancho	71.77	121.67	9.82
45	5-12	21	2	12	s/ancho	71.68	154.22	6.66
46	5-14	27	2	12	s/ancho	70.53	168.16	5.42
47	5-16	33	2	12	s/ancho	70.61	175.25	4.61
48	5-6	3	1	13	s/ancho	69.82	45.46	68.82
49	5-8	9	1	13	s/ancho	70.17	81.10	31.71
50	5-12	21	1	13	s/ancho	70.95	121.53	8.52
51	5-16	33	1	13	s/ancho	69.49	131.05	5.58

Tabla 18. En esta tabla, se muestran los resultados obtenidos para las 51 simulaciones hechas, obteniendo los volúmenes de un antes y un después del desarenador.

Se encontró que la longitud es la variable más importante.

Tras el aumento de las profundidades, se observa que el aumento de sedimentos después del desarenador es gradual; es decir, mientras más profundo sea, la cantidad de sedimento que logra pasar va en aumento.

Las propuestas de ampliación del desarenador permitirían obtener resultados similares a los obtenidos con la profundidad, con la excepción de la ampliación de 1 metro; ya que se observa que los sedimentos que pasan el desarenador son

muy bajas, con la información obtenida se propone un tanque de 2 metros de profundidad, ancho constante de 14.5 y longitud de 21 metros de la prueba 45, que es capaz de retener 154.22 m<sup>3</sup> de sedimento.

Se realizaron en total 51 pruebas y se presentan, en el texto, los detalles y características de cada uno de ellos.

La modelación numérica resulta ser consistente y se comentan las alternativas para la extracción del sedimento en el tanque sedimentador.

Se hace notar que esta por a finar la extracción del sedimento del tanque sedimentador, puesto que aunque se ha considerado en los casos analizados que la extracción puede hacerse de manera continua o intermitente, aún hay que afinar los detalles de los sistemas de extracción.

Evidentemente siempre existirá la alternativa de realizar dicha extracción a través de sistemas mecánicos (p.e. las dragas de almeja y el acarreo con camiones).

Así mismo, se recomienda como trabajo complementario, comparar los resultados con una simulación física.

## REFERENCIAS

Miglieta, F. & Bindi, M., (1993), "crop growth simulation models for research, farm management and agrometeorology". Florencia Italia.

García M. F, Maza J A, (1998). "origen y propiedades de los sedimentos, manual de ingeniería de ríos". Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

Hermida, G. A , ( 2014), " Simulación numérica del flujo de sedimentos en el desarenador del proyecto hidroeléctrico c oca codo, Sinclair". Universidad de la cuenca, Ecuador.

Nylor T. (1996). "Técnicas de simulación en computadora".

P. Novak, A. I. B. Moffat y C. Nalluri (2001), "Estructuras hidráulicas", Mc Graw Hill

Sparrow E A , ( 2008). "El desarenador". Universidad Nacional del Santa. Nuevo Chimbote, Perú.

CONAGUA (2016), "Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales Municipales: pretratamiento y tratamiento primario", México.

Olsen, Nils Reidar B. (2011). "A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option". Norwegian university of science and technology.

Olsen, Nils Reidar B. (2014). "A three dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option, user's manual". Department of hydraulic and environmental engineering the norwegian university of science and technology.

## APENDICES

A continuación se presentan la simulación del primer escenario mencionado en el subcapítulo 3.4.2.

Simulación hidrodinámica

Velocidades horizontales

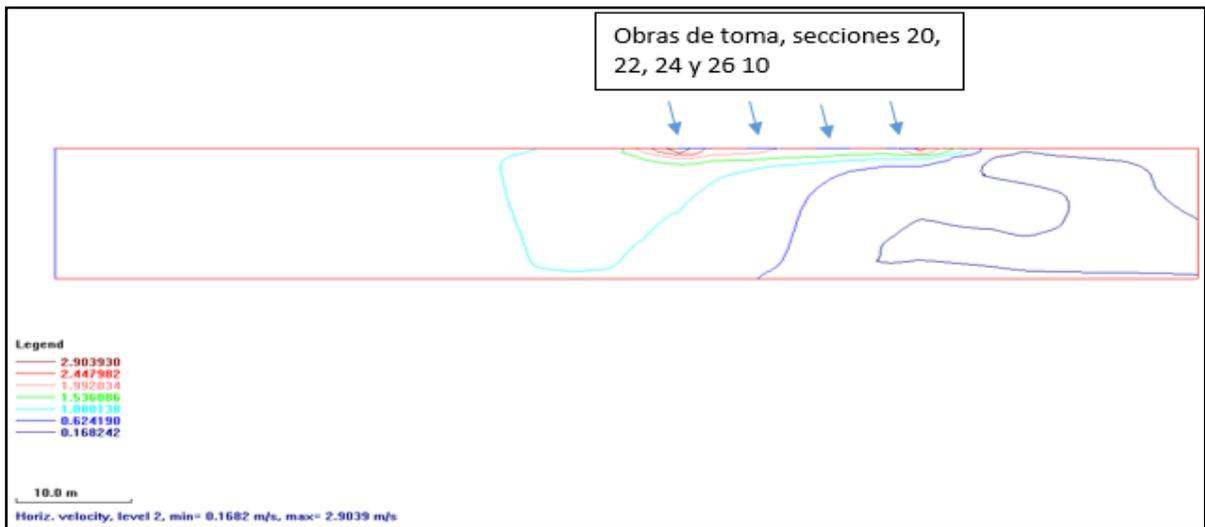


Fig. 26 Vista en planta del comportamiento de las velocidades horizontales

Sección transversal

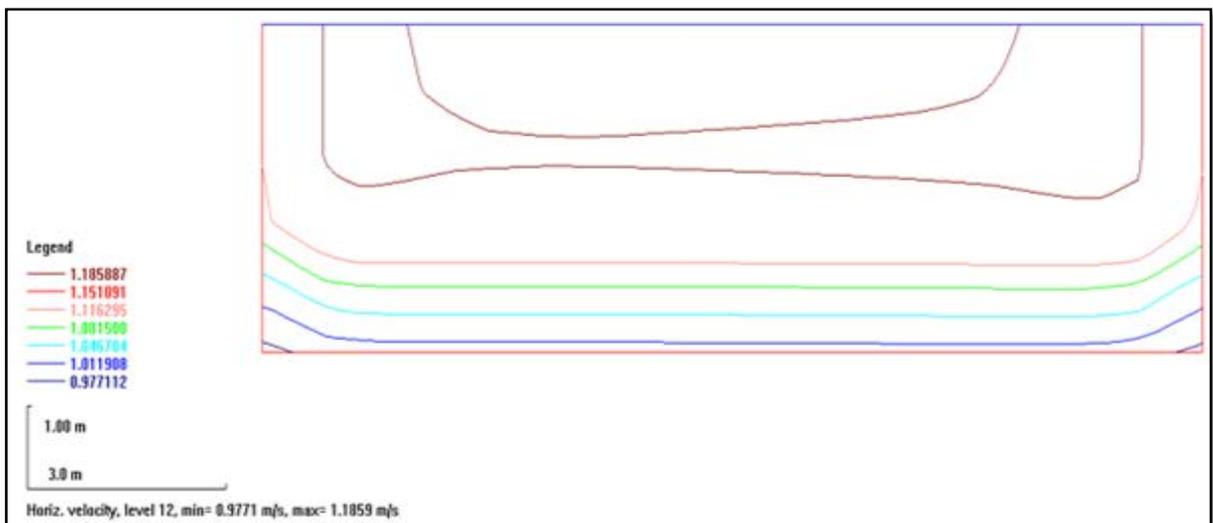


Fig. 27 Perfil transversal de las velocidades horizontales, sección 12.

Velocidades verticales

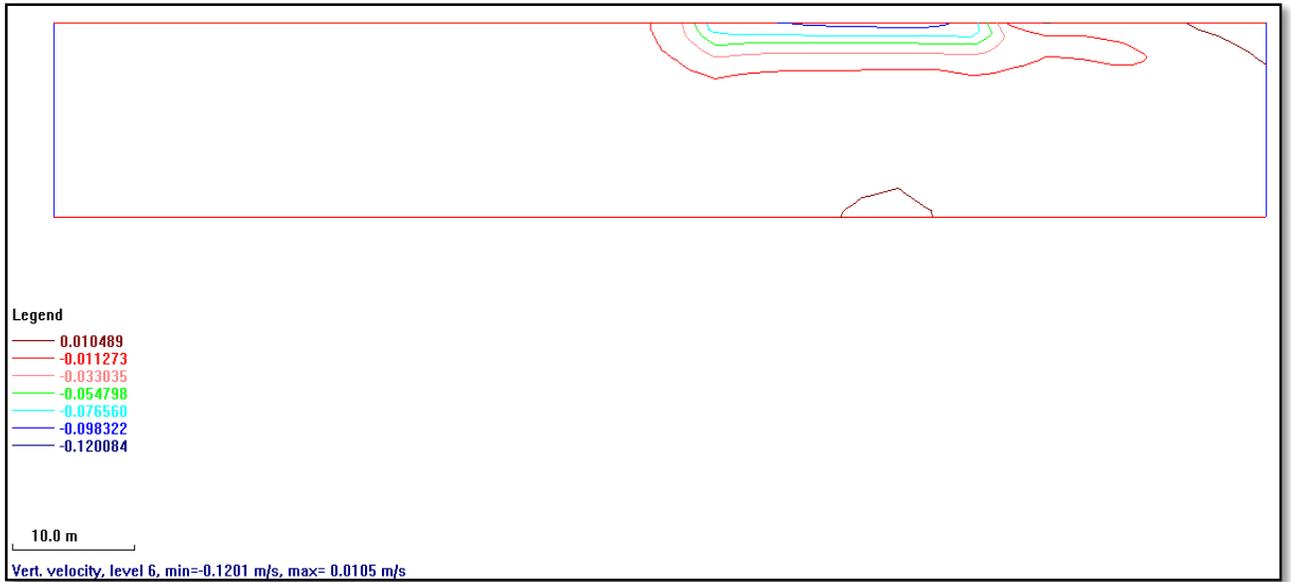


Fig. 28 Vista en planta de las velocidades verticales.

Sección transversal

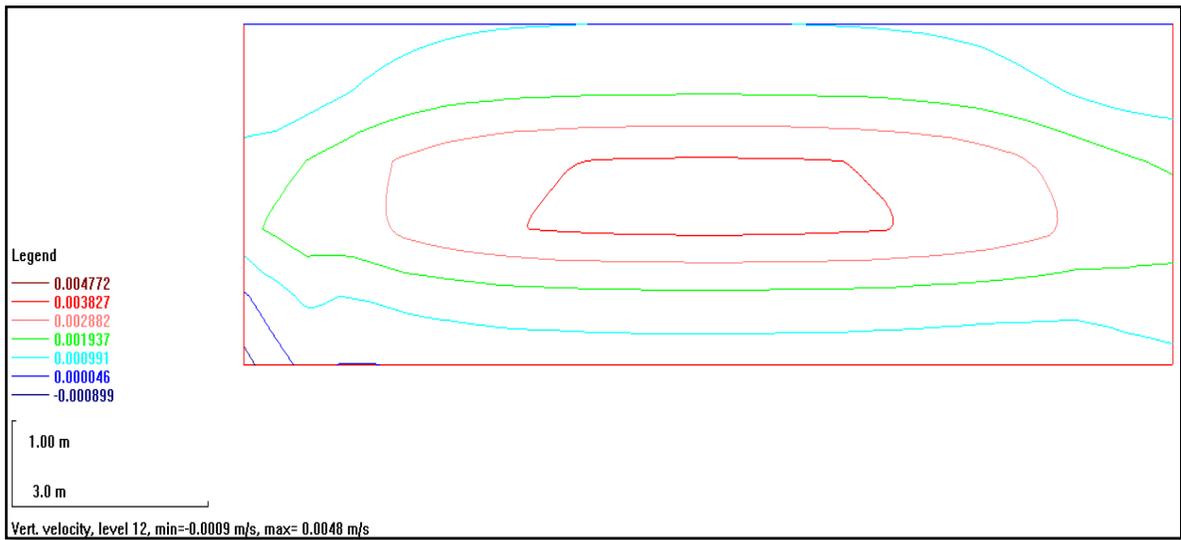


Fig. 29 Perfil transversal de las velocidades verticales, sección 12.

## Número de Froude

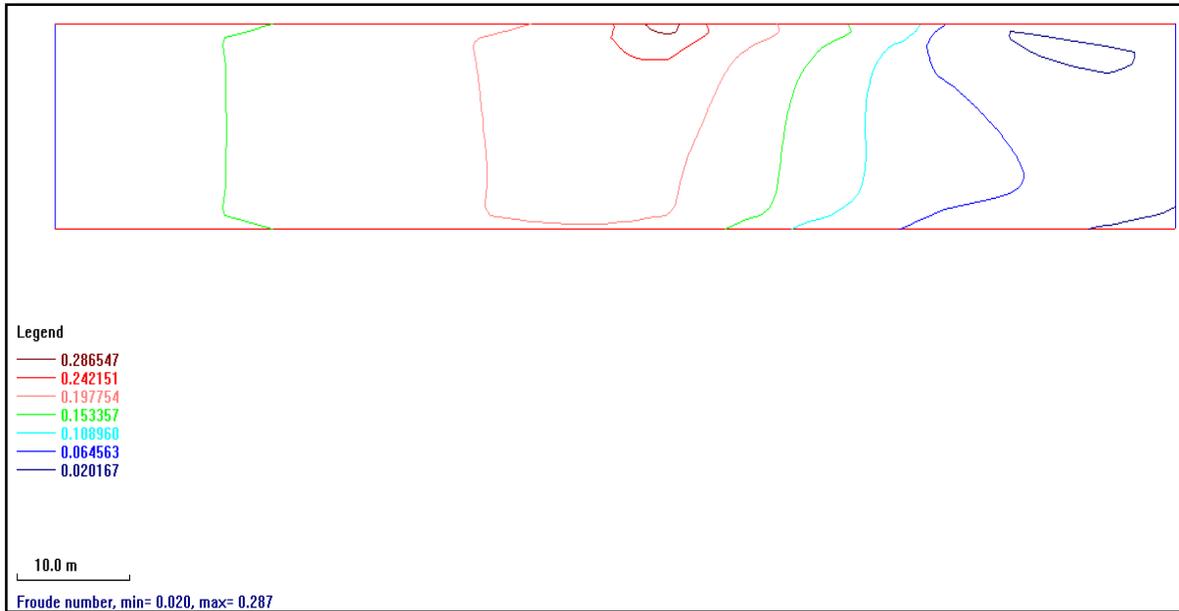


Fig. 30 Vista en planta del régimen que se establece en el canal, teniendo un número de Froude máximo de 0.287 y mínimo de 0.020, el cuál es un régimen subcrítico.

## Vector de velocidades

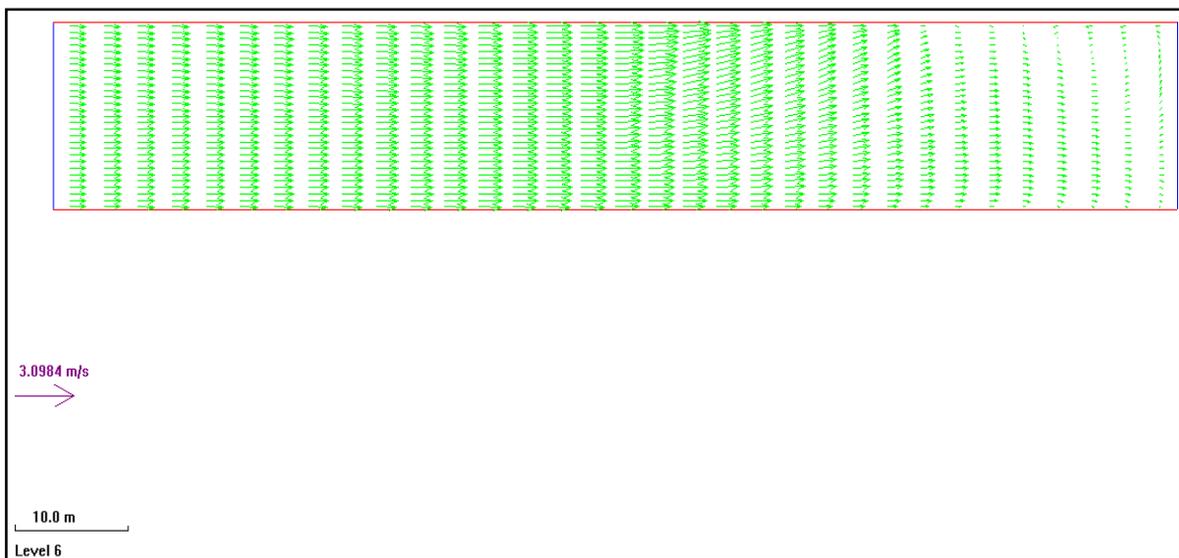


Fig. 31 Vista en planta de los vectores de velocidades en el canal.

Sección transversal en el canal

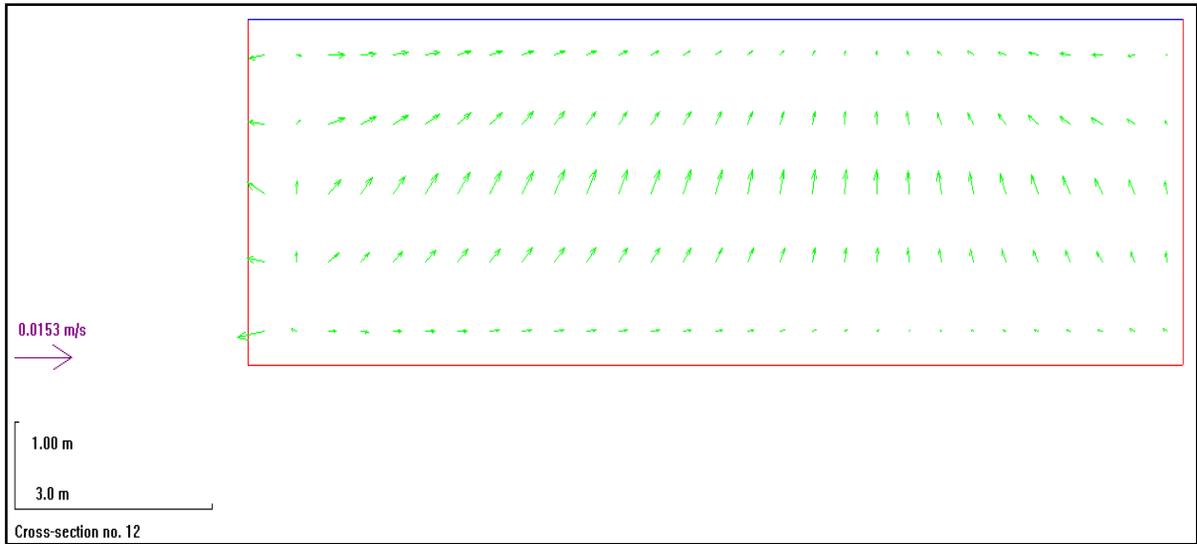


Fig. 32 Vista transversal, sección 12

Simulación del flujo y transporte de sedimentos

Velocidades horizontales

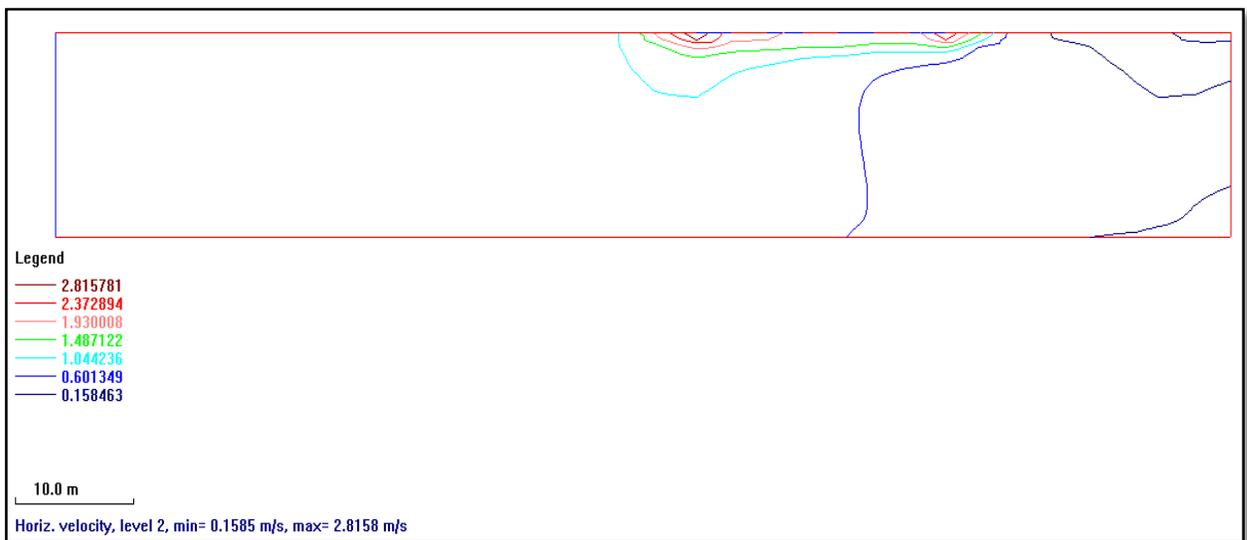


Fig. 33 Vista en planta de las velocidades horizontales en el canal.

### Sección transversal (velocidades horizontales)

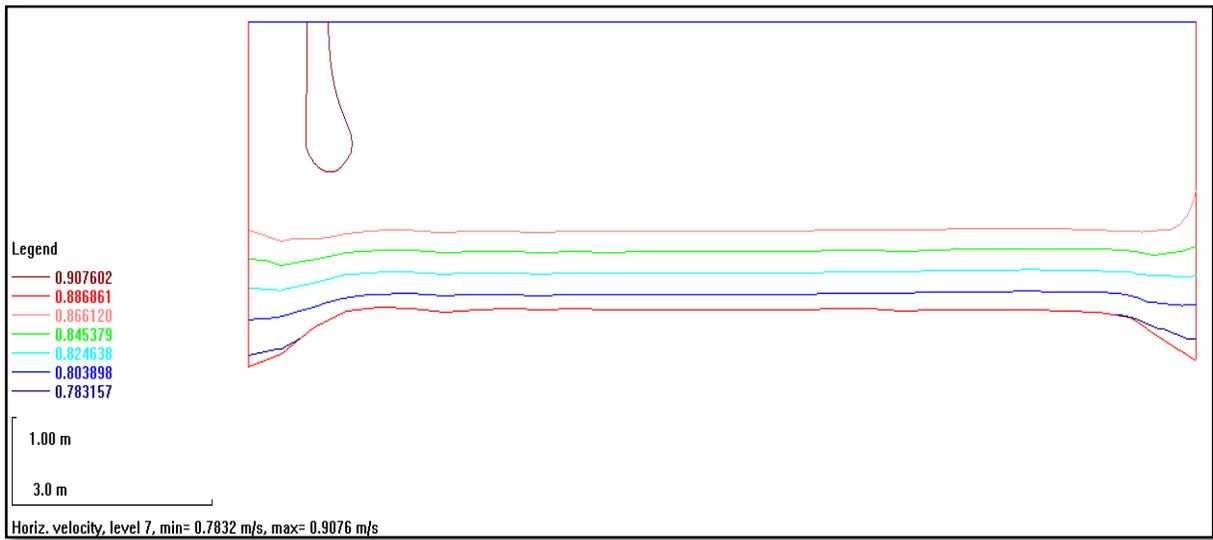


Fig. 34 Comportamiento de las velocidades horizontales en la sección 7 del canal

### Velocidades verticales

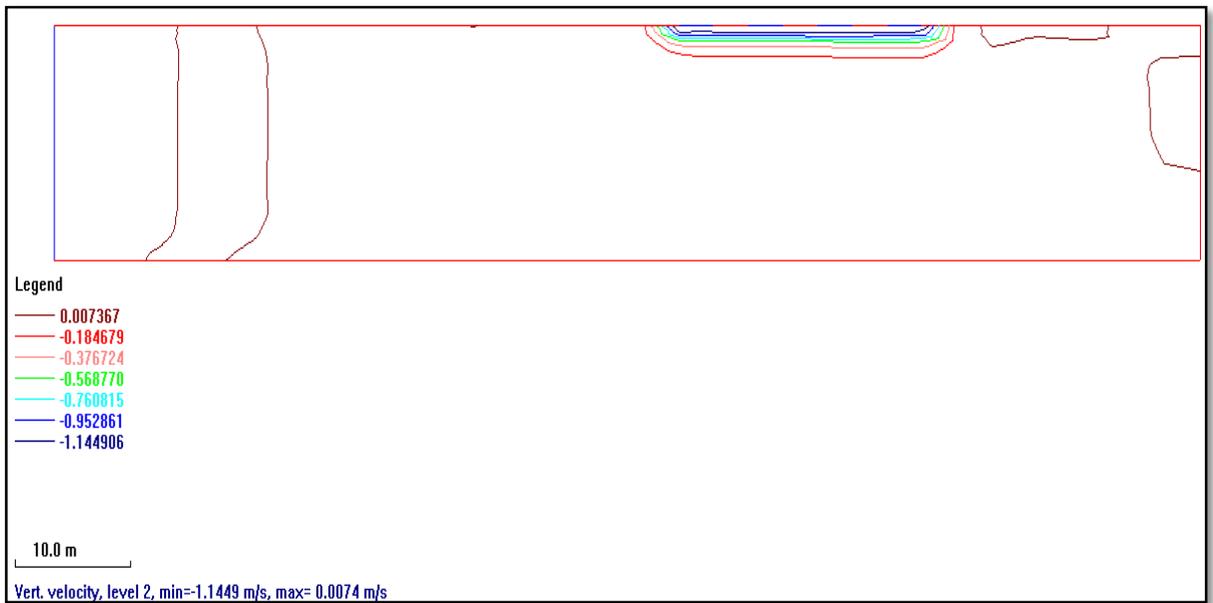


Fig. 35 Vista en planta de las velocidades verticales en el canal.

### Sección transversal (velocidades verticales)

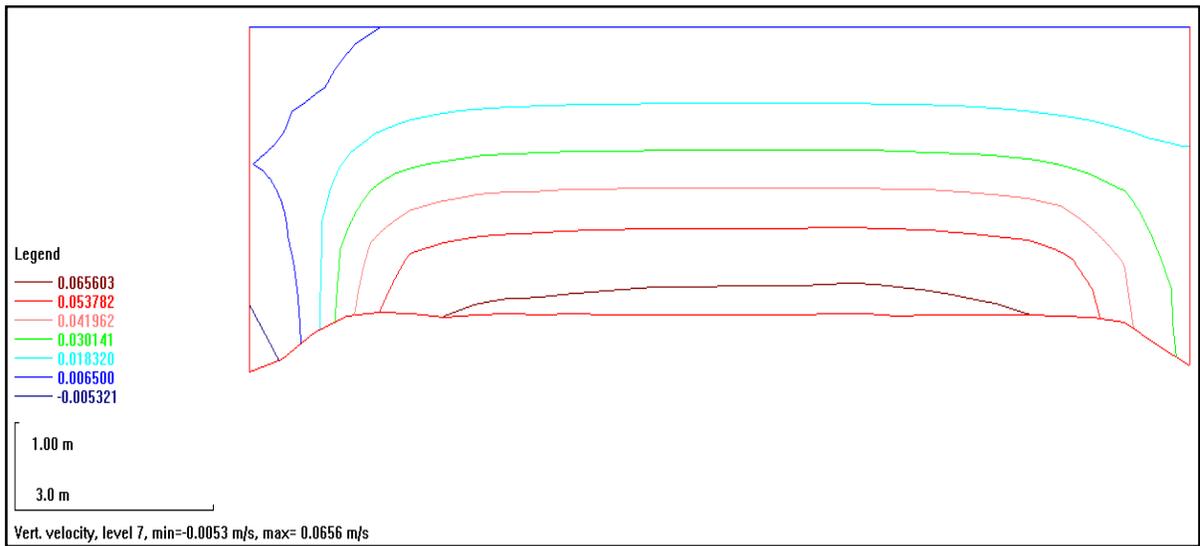


Fig. 36 Sección transversal en el desarenador, velocidades verticales.

### Niveles en plantilla (Bedlevels)

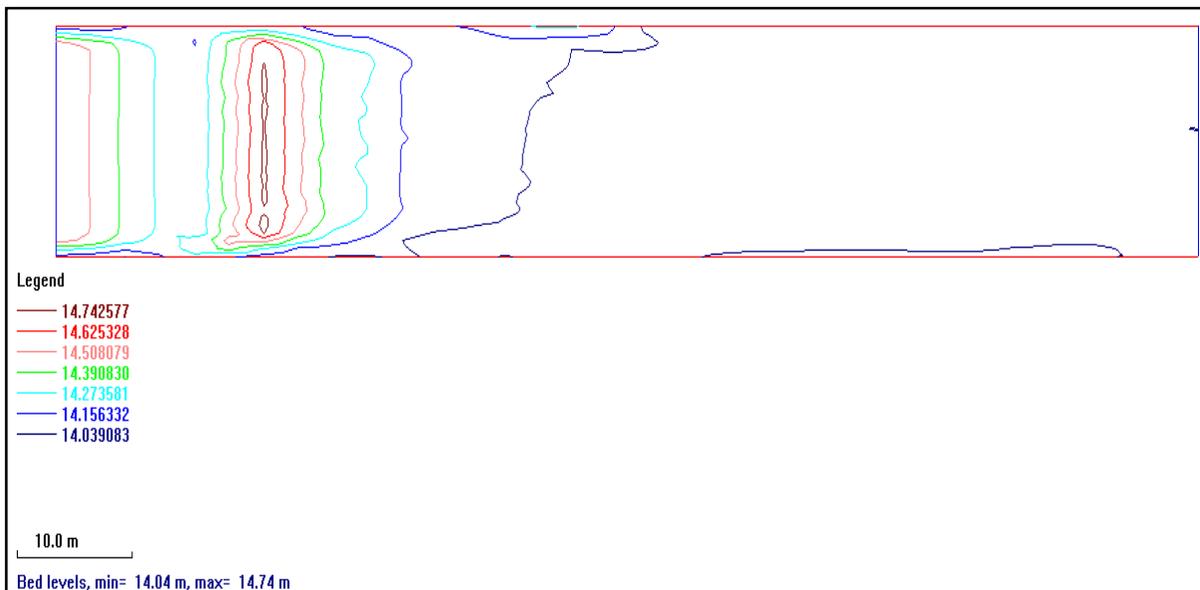


Fig. 37 Vista en planta de los niveles de sedimentos que se han obtenido en el canal, la altura máxima en el canal es de 14.74, lo que representa una altura de 0.74 centímetros, y una altura mínima de 0.039 centímetros.

Simulación para un desarenador con las siguientes características.

Resultado hidrodinámico en SSIIM, canal con desarenador de la sección 5 a 6, ancho constante 14.5 m, profundidad de desarenador 4 m (cota 10), longitud 3 m. Desarenador con obra de toma en la sección 06.

Velocidades horizontales

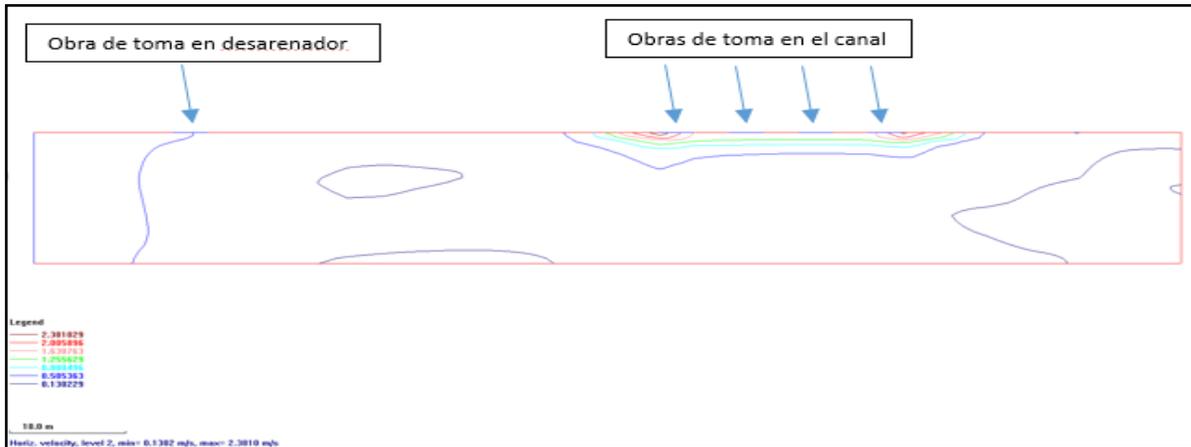


Fig. 38 Vista en planta del comportamiento de las velocidades horizontales en el canal desde la entrada (lado izquierdo) hasta la salida (lado derecho), la concentración se centra en las obras de toma; con velocidades máximas de 2.38 m/s, y velocidades mínimas de 0.130 m/s.

Sección transversal (velocidades horizontales)

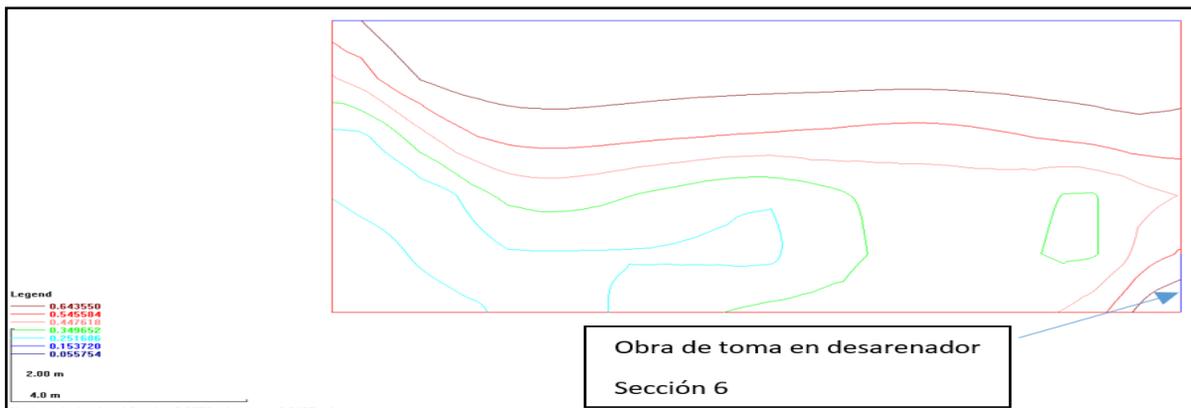


Fig. 39 Sección transversal en el desarenador, comportamiento de las velocidades horizontales en la sección 6.

## Velocidades verticales

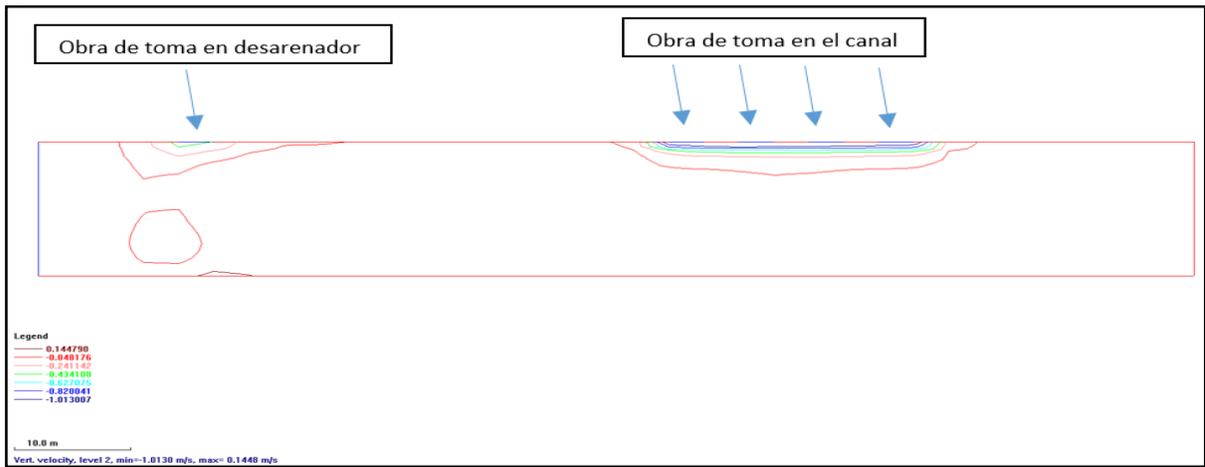


Fig. 40 Vista en planta del comportamiento de las velocidades verticales, la concentración se centra en las obras de toma; con velocidades máximas de 0.144 m/s, y velocidades mínimas de -1.013 m/s, que indica que hay un remanso.

## Sección transversal (velocidades verticales)

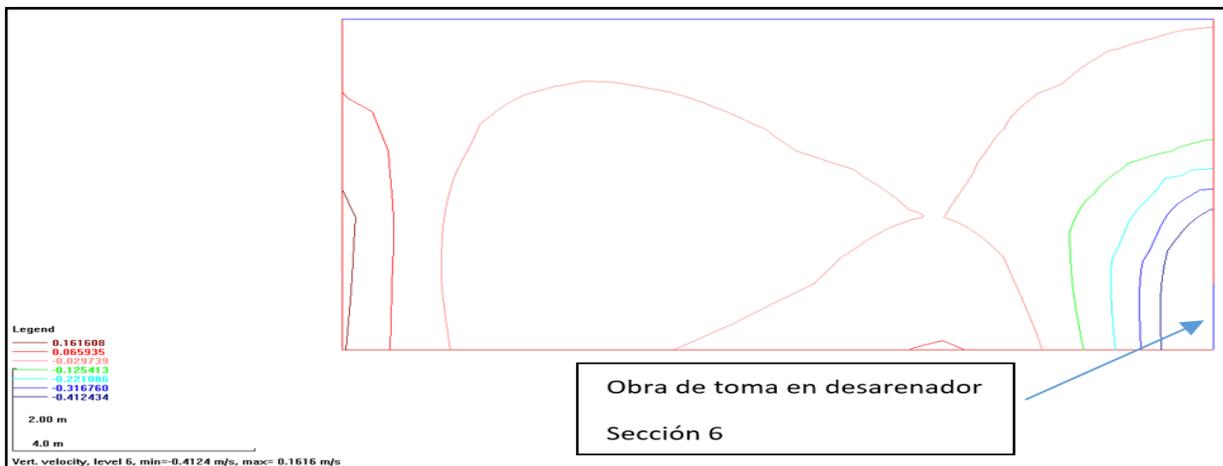


Fig. 41 Sección transversal en el desarenador, comportamiento de las velocidades verticales en la sección 6.

## Número de Froude

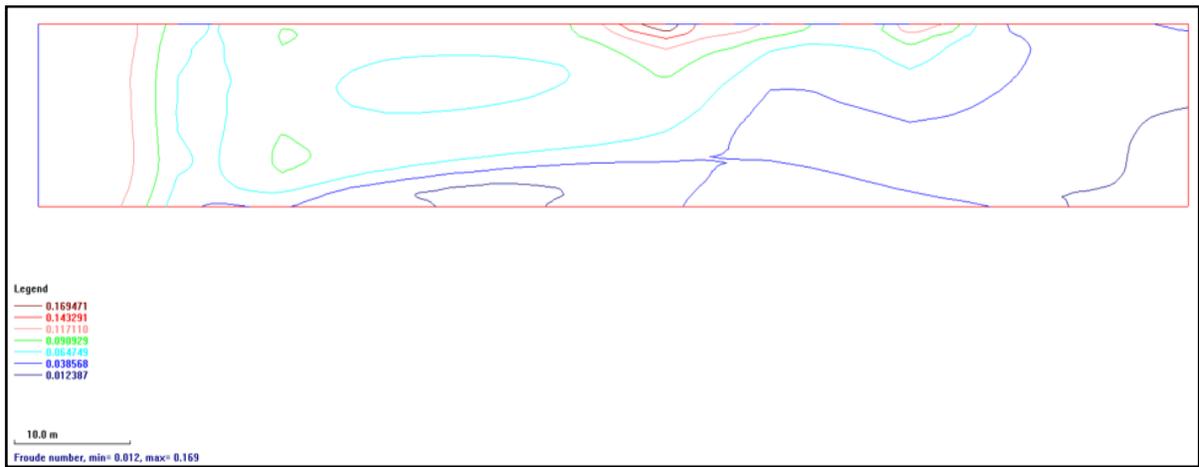


Fig. 42 Vista en planta del régimen que se establece en el canal, teniendo un número de Froude máximo de 0.169 y mínimo de 0.012, el cuál es un régimen subcrítico.

## Vectores de velocidad

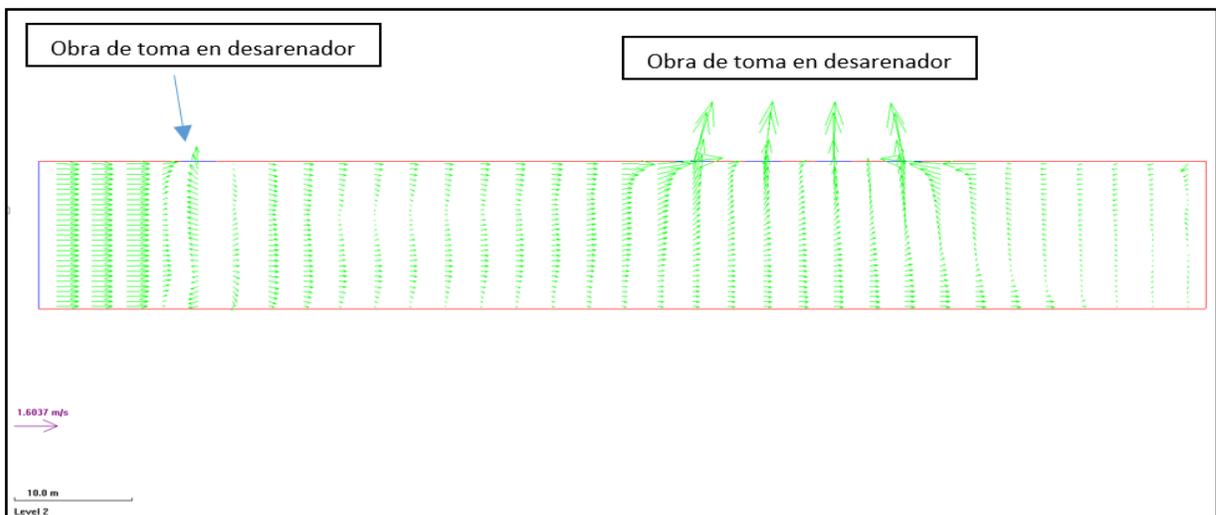


Fig. 43 Vista en planta del comportamiento de los vectores de velocidad desde la entrada (lado izquierdo) hasta la salida (lado derecho).

## Sección transversal en desarenador (sección 6 - obra de toma)

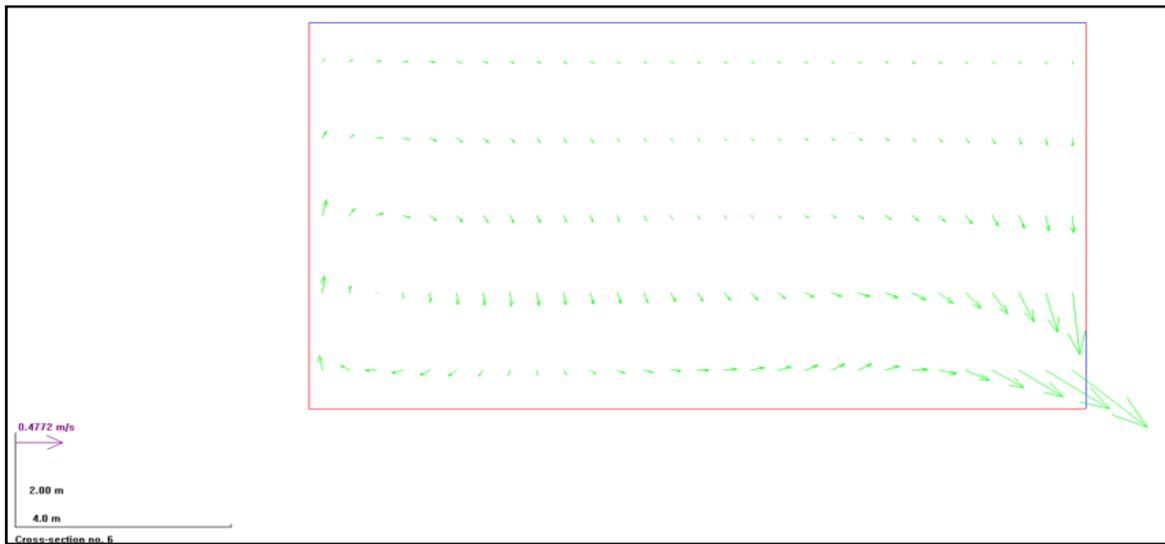


Fig. 44 Vista de los vectores de velocidad en la sección transversal del desarenador en la sección 6, con obra de toma, ubicado en el lado derecho del canal.

Resultados del transporte y flujo de sedimentos en el programa SSIIM, canal con desarenador de la sección 5 a 6, ancho constante, profundidad de desarenador 4 m (cota 10), longitud 3 m. Desarenador con obra de toma en la sección 06.

## Velocidades horizontales

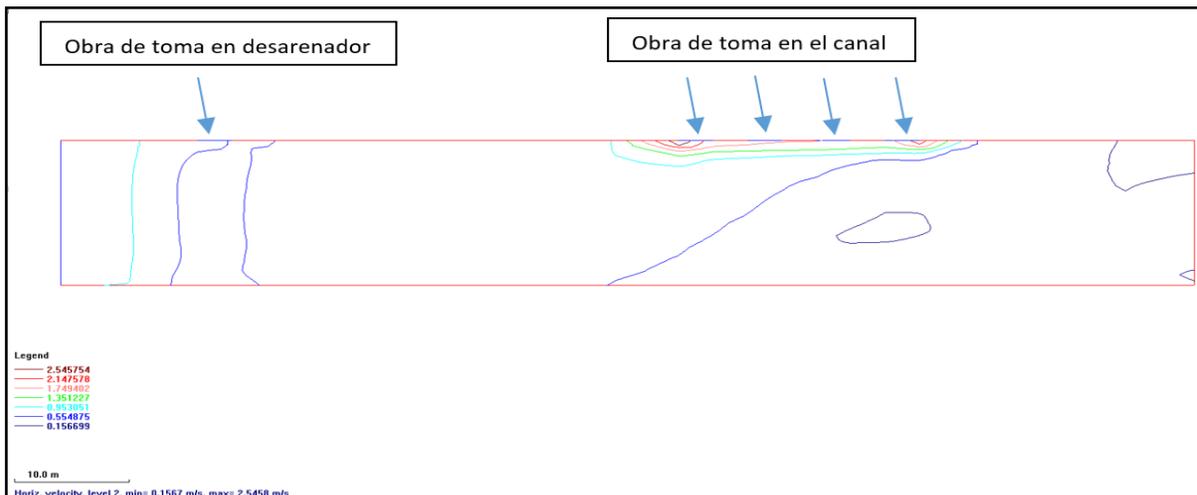


Fig. 45 Vista en planta del comportamiento de las velocidades horizontales simulado con sedimento en el programa SSIIM, velocidad máxima de 2.54 m/s, y velocidad mínima de 0.15 m/s. La concentración de velocidades ésta en las obras de toma.

Sección transversal (velocidades horizontales)



Fig. 46 Sección transversal en el desarenador, velocidades horizontales.

Velocidades verticales

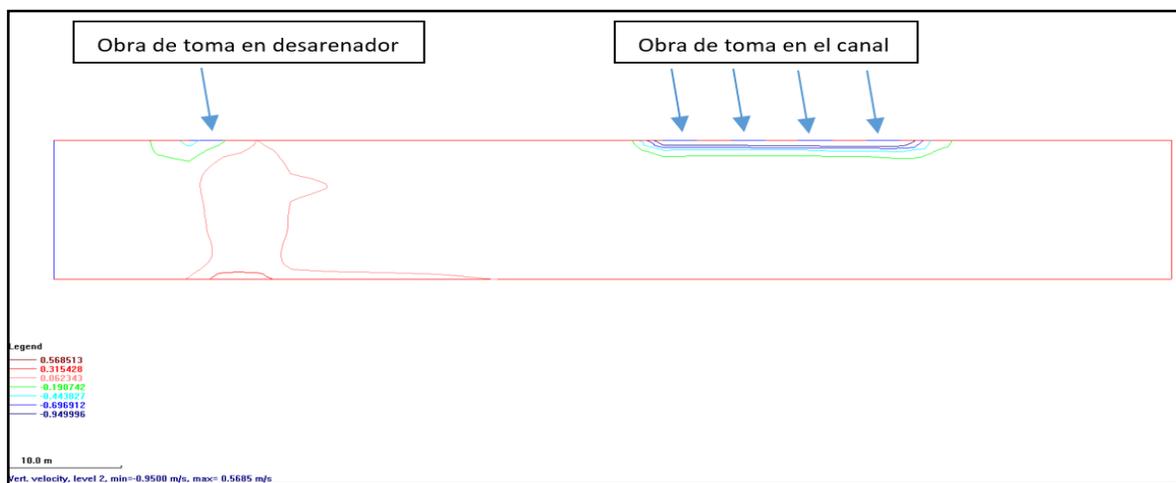


Fig. 47 Vista en planta del comportamiento de las velocidades verticales, la concentración se centra en las obras de toma; con velocidades máximas de 0.56 m/s, y velocidades mínimas de -0.95 m/s, que indica que hay un remanso.

## Sección transversal (velocidades verticales)

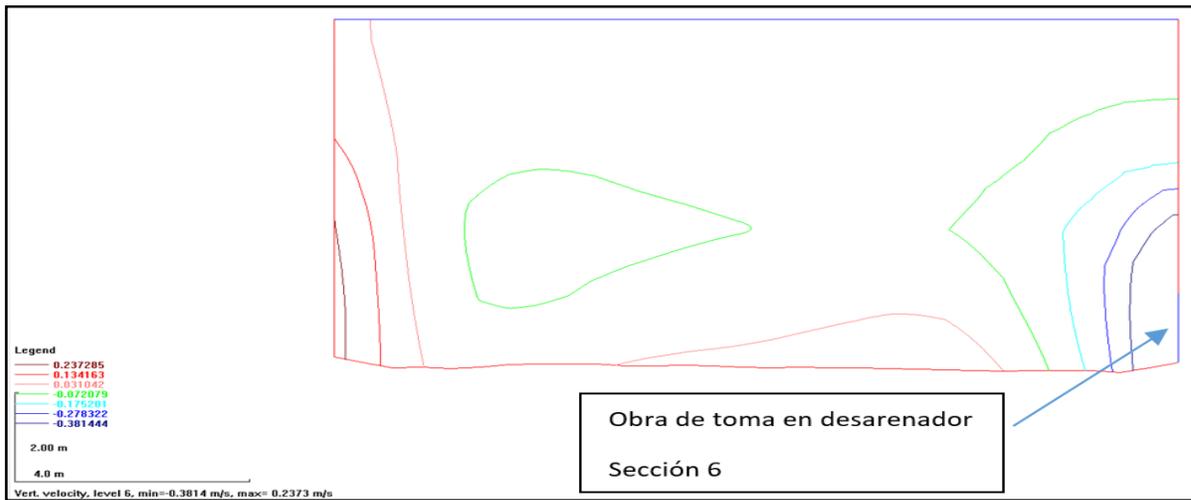


Fig. 48 Sección transversal en el desarenador, velocidades verticales.

## Niveles en plantilla (Bedlevels)

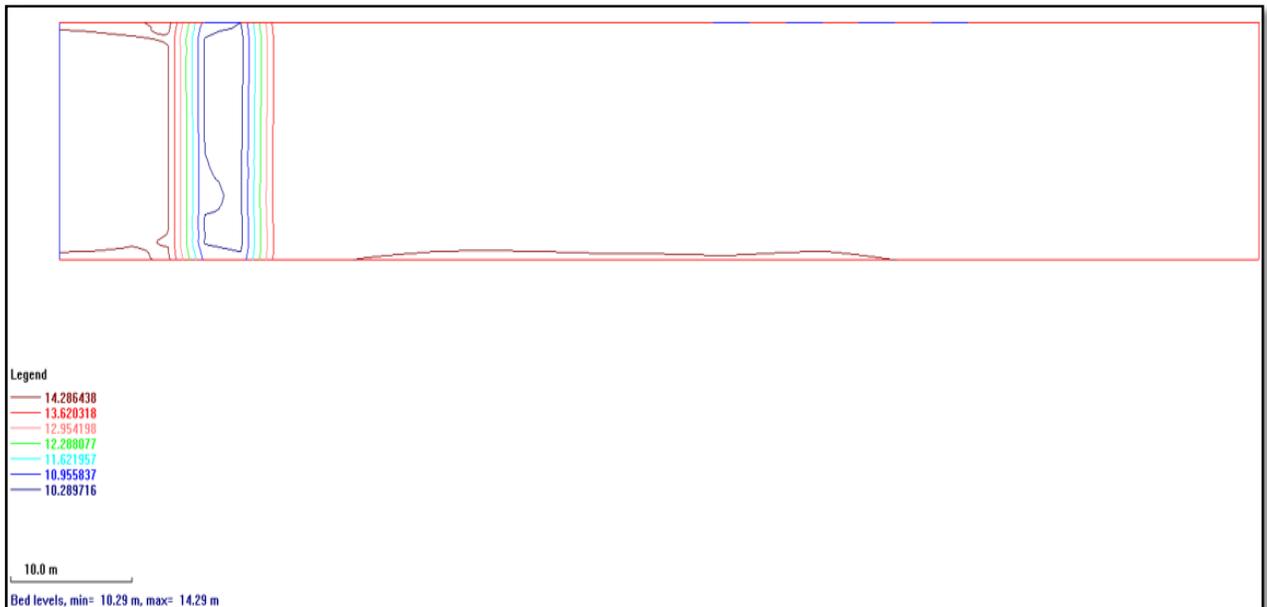
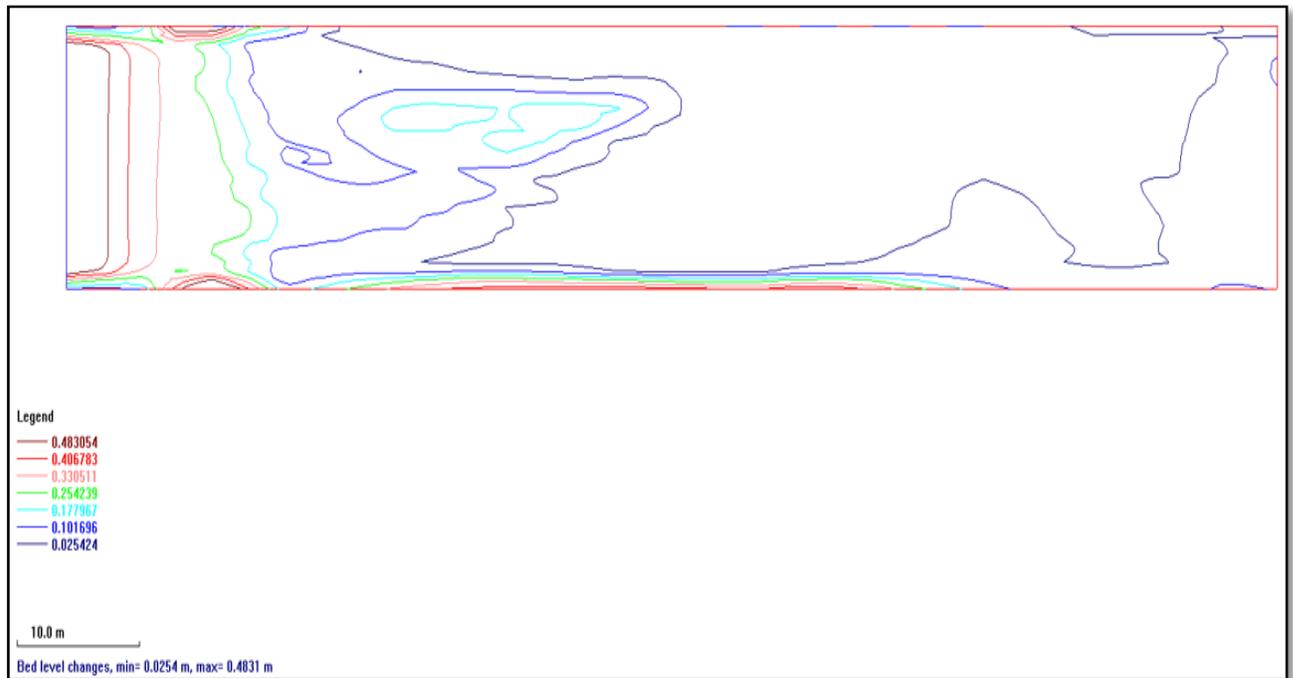


Fig. 49 Vista en planta de los niveles de sedimentos que se han obtenido en el canal, tanto en el desarenador como antes y después de ella. Se tiene un nivel de 14.28 m en el canal, es decir, una altura de sedimento de 0.28 centímetros. En el desarenador se tiene una altura máxima de 13.62 m, y una mínima de 10.28 m, lo

que significa que la altura de sedimentos en el desarenador es de 0.62 cm máximo y de 0.28 cm mínimo.

### Cambios en profundidad de plantilla (Bedchange)



Resultado hidrodinámico en SSIIM, canal con desarenador de la sección 5 a 12, ancho constante 14.5 m, profundidad de desarenador 2 m (cota 12), longitud 21 m. Desarenador con obra de toma propuestas en las secciones 10 y 12.

Velocidades horizontales

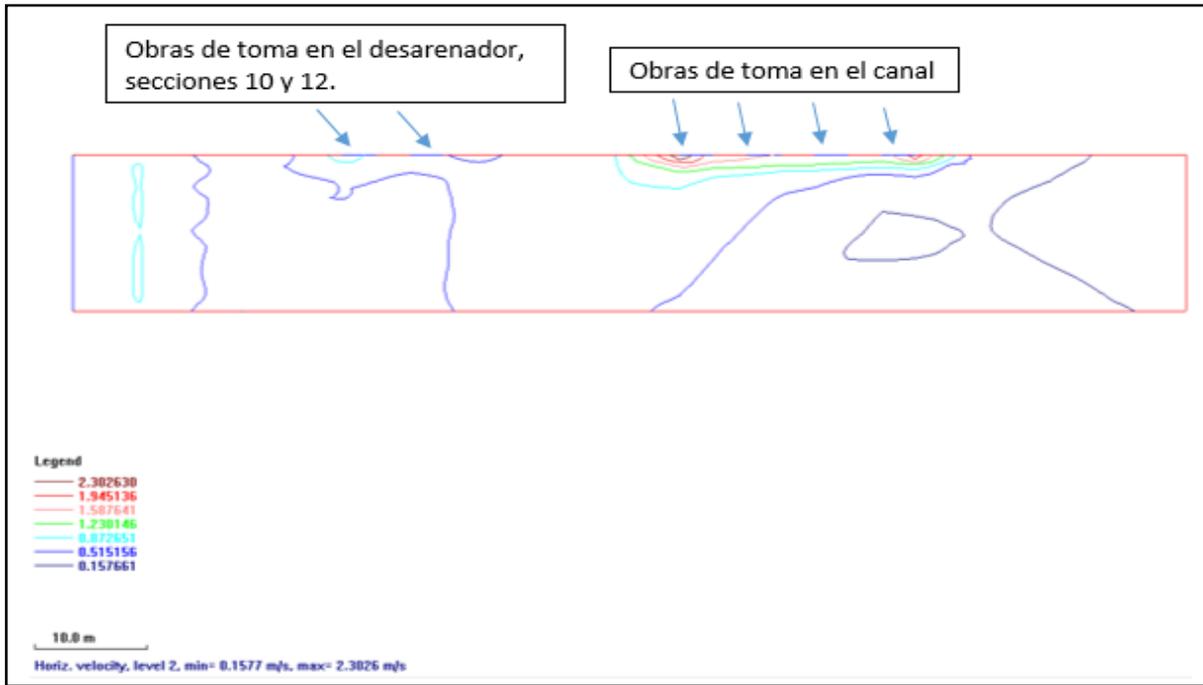


Fig. 51 Vista en planta del comportamiento de las velocidades horizontales en el canal desde la entrada (lado izquierdo) hasta la salida (lado derecho), la concentración se centra en las obras de toma; con velocidades máximas de 2.30 m/s, y velocidades mínimas de 0.15 m/s.

## Sección transversal (velocidades horizontales)

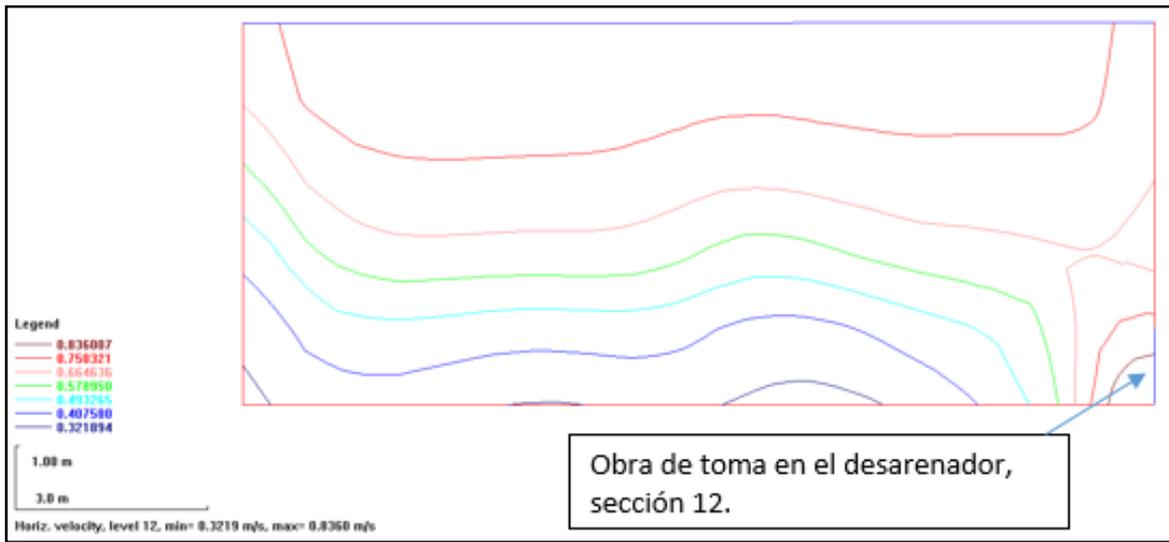


Fig. 52 Sección transversal en el desarenador, comportamiento de las velocidades horizontales en la sección 12.

## Velocidades verticales

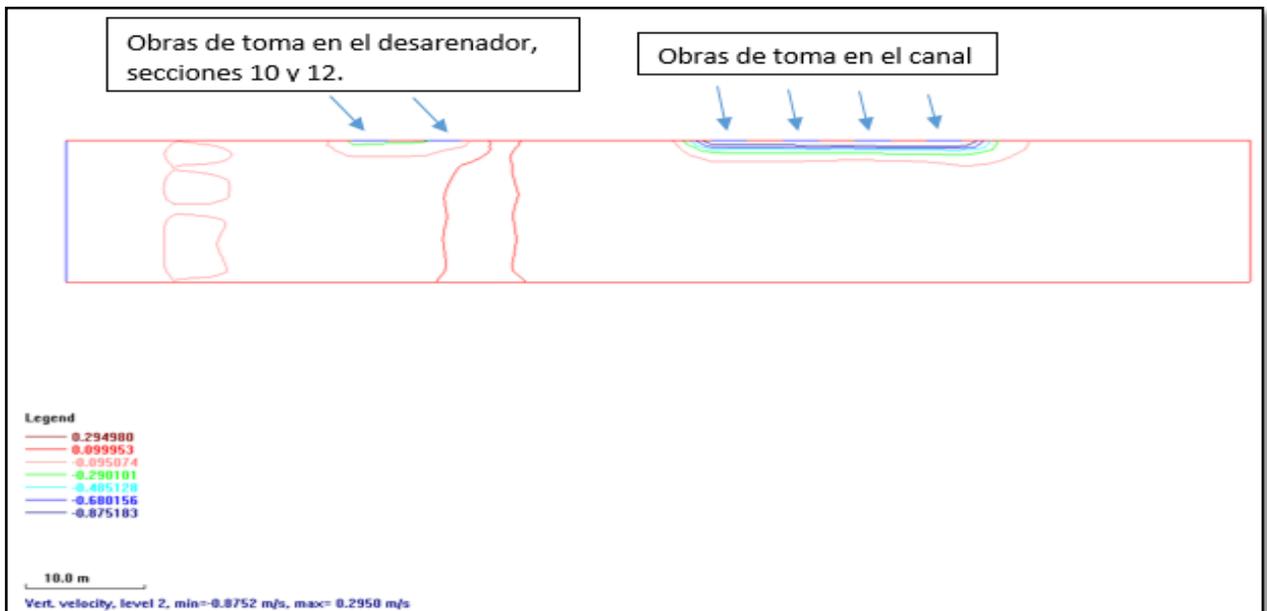


Fig. 53 Vista en planta del comportamiento de las velocidades verticales, la concentración se centra en las obras de toma; con velocidades máximas de 0.295 m/s, y velocidades mínimas de -0.875 m/s, que indica que hay un remanso.

## Sección transversal (velocidades verticales)

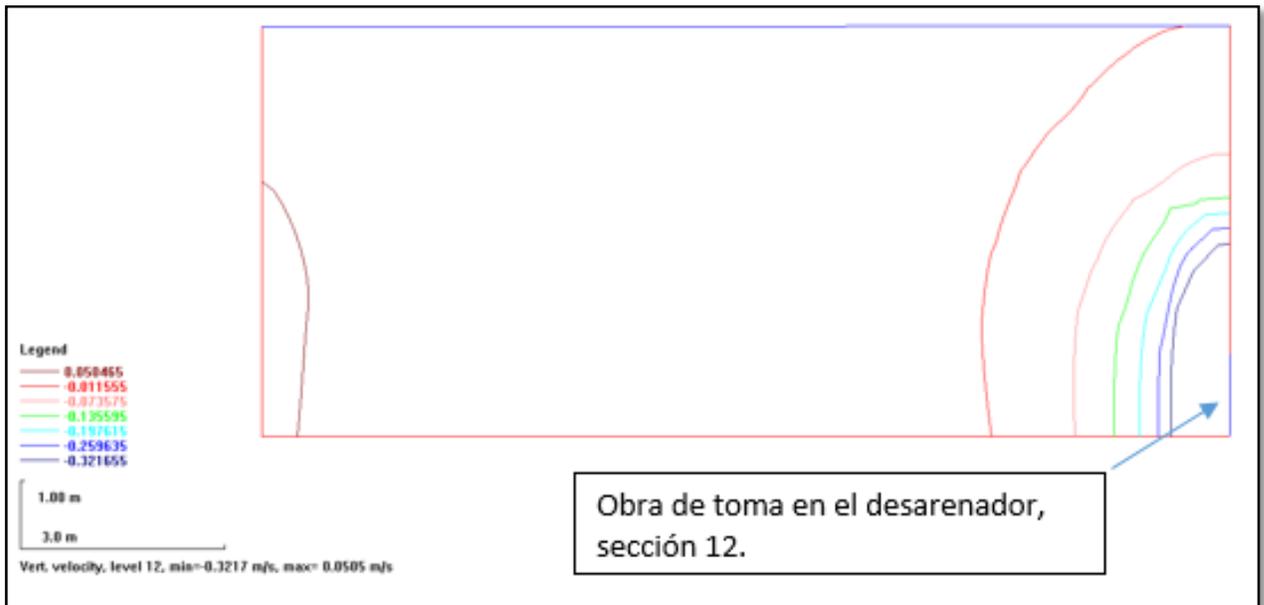


Fig. 54 Sección transversal en el desarenador, comportamiento de las velocidades verticales en la sección 12.

## Número de Froude

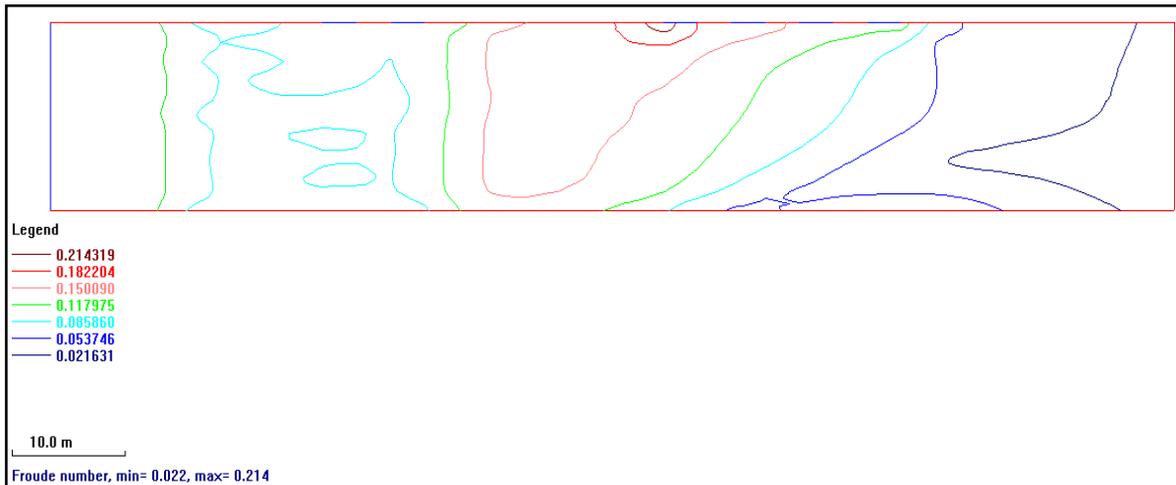


Fig. 55 Vista en planta del régimen que se establece en el canal, teniendo un número de Froude máximo de 0.214 y mínimo de 0.022, el cuál es un régimen subcrítico.

## Vectores de velocidad

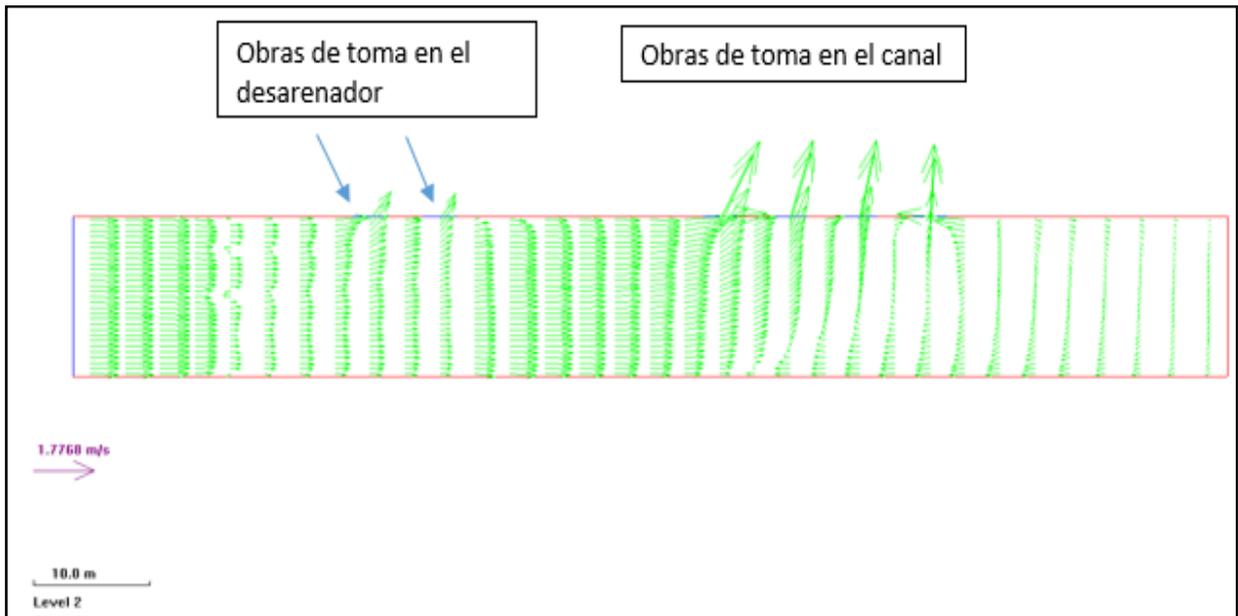


Fig. 56 Vista en planta del comportamiento de los vectores de velocidad desde la entrada (lado izquierdo) hasta la salida (lado derecho).

## Sección transversal en desarenador (sección 12 - obra de toma)



Fig. 57 Vista de los vectores de velocidad en la sección transversal del desarenador en la sección 12 (con obra de toma), ubicado en el lado derecho del canal.

Resultados del transporte y flujo de sedimentos en el programa SSIIM, canal con desarenador de la sección 5 a 12, ancho constante, profundidad de desarenador 2 m (cota 12), longitud 21 m. Desarenador con obra de toma en la sección 10 y 12.

### Velocidades horizontales

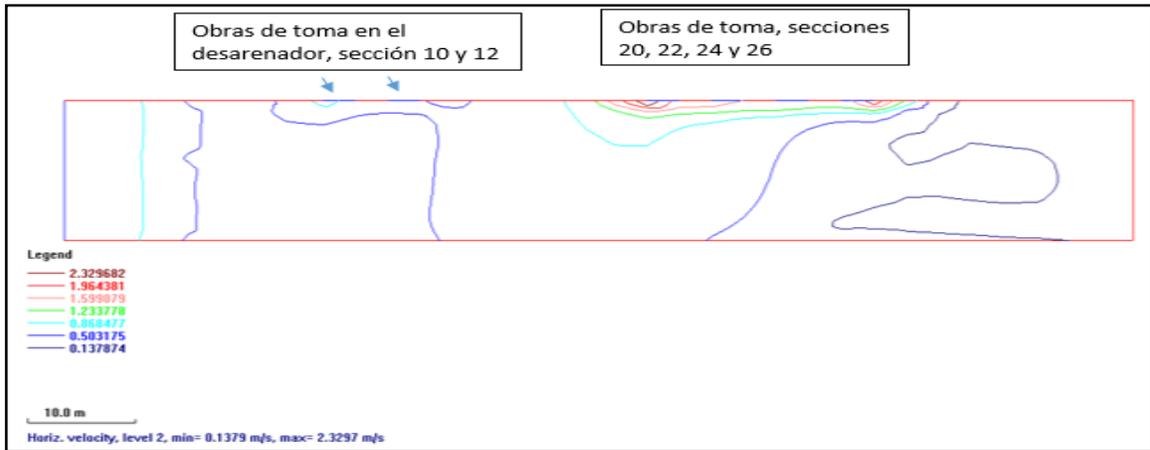


Fig. 58 Vista en planta del comportamiento de las velocidades horizontales simulado con sedimento en el programa SSIIM, velocidad máxima de 2.32 m/s, y velocidad mínima de 0.13 m/s. La concentración de velocidades ésta en las obras de toma.

### Sección transversal (velocidades horizontales)

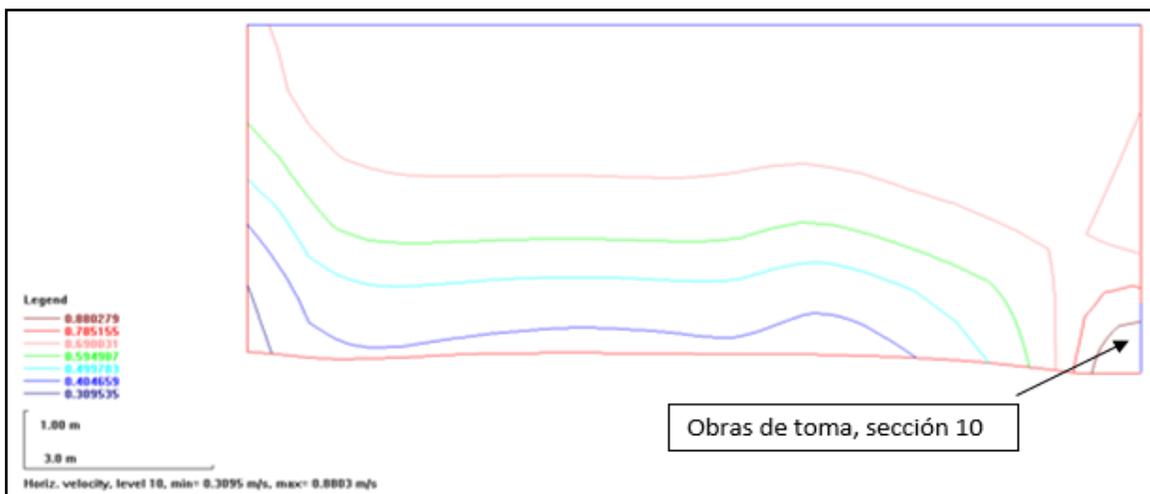


Fig. 59 Sección transversal en el desarenador, velocidades horizontales.

## Velocidades verticales

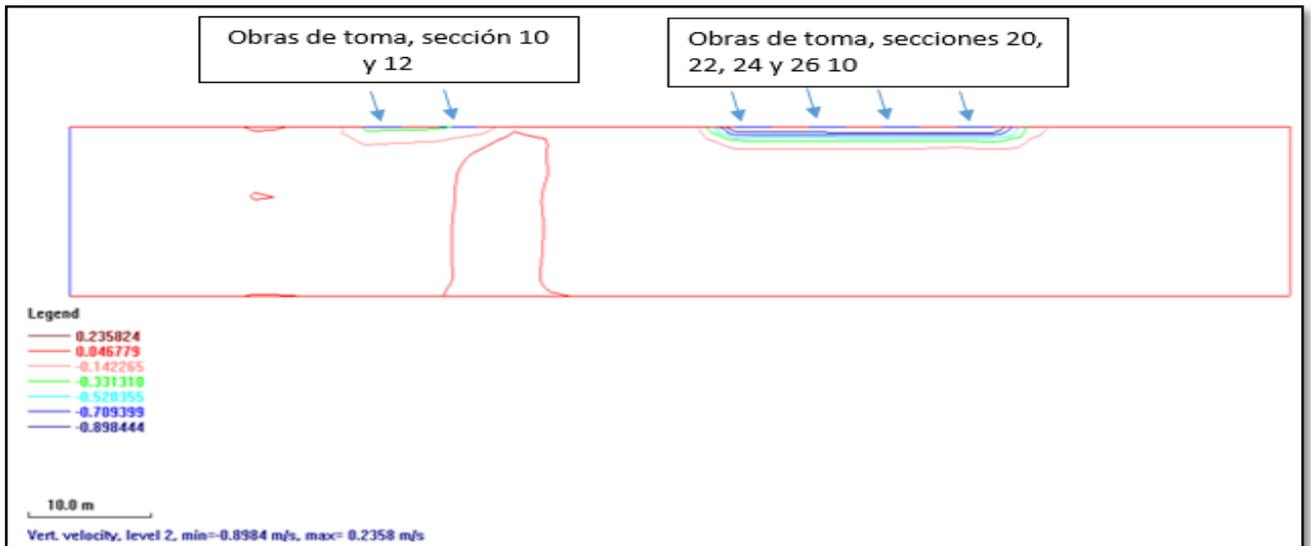


Fig. 60 Vista en planta del comportamiento de las velocidades verticales, la concentración se centra en las obras de toma; con velocidades máximas de 0.23 m/s, y velocidades mínimas de -0.89 m/s, que indica que hay un remanso.

## Sección transversal (velocidades verticales)

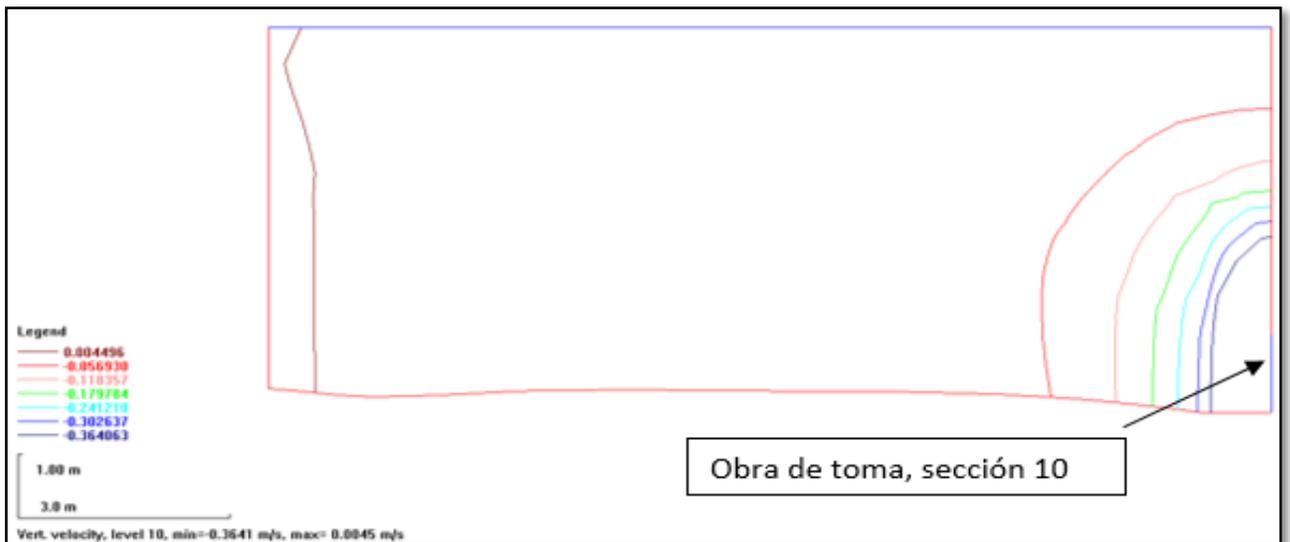


Fig. 61 Sección transversal en el desarenador, velocidades verticales.

## Niveles en plantilla (Bedlevels)

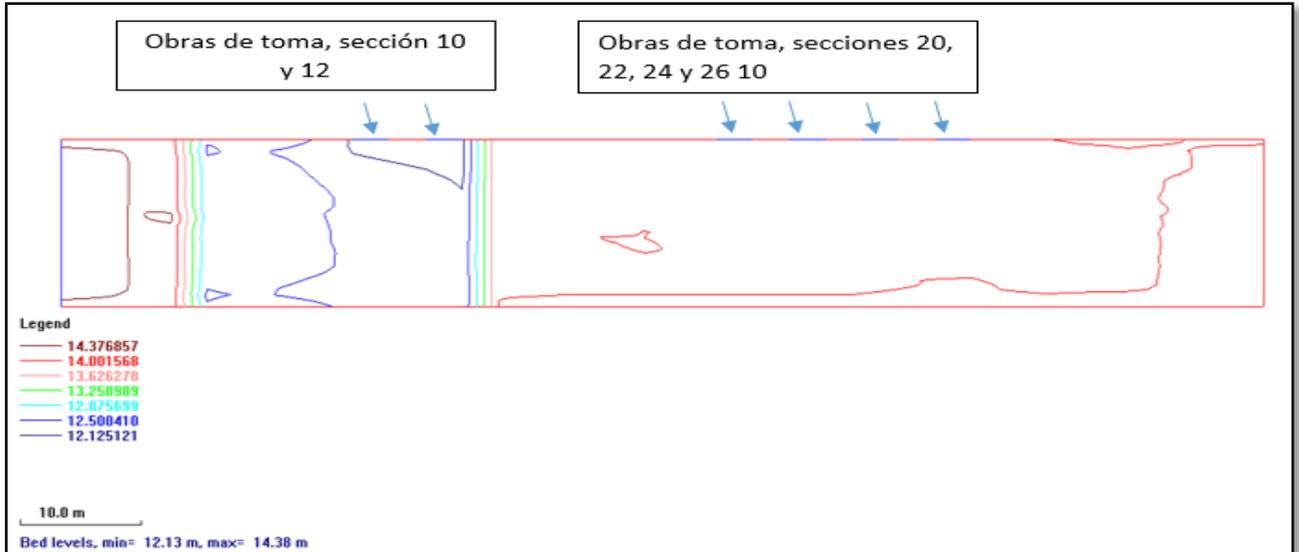


Fig. 62 Vista en planta de los niveles de sedimentos que se han obtenido en el canal, tanto en el desarenador como antes y después de ella. Se tiene un nivel de 13.62 m como máximo en el desarenador, es decir, una altura de sedimento de 1.62 metros, un mínimo de 12.13 m, lo que significa una altura de 13 centímetros, así mismo, se observa una altura de 14.37 sobre la plantilla del canal, es decir, se tiene una altura de sedimento de 37 centímetros, antes del desarenador.

(Bedchange)

