

UNIVERSIDAD DE CUENCA

FUNDADA EN 1867



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE SEDIMENTOS EN EL DESARENADOR
DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA CODO SINCLAIR**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

Ing. M.Sc. Esteban Alonso Pacheco Tobar

TUTOR:

Ing. Gustavo Adolfo Luzuriaga Hermida

AUTORES:

María Bernarda Luzuriaga Hermida
Diana Alexandra Amaya Zhingre

Cuenca – Ecuador
2014



RESUMEN

El presente trabajo se ha realizado con el objetivo de establecer el patrón de flujo de agua y sedimentos en el desarenador del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (CCS), mediante el uso del software de modelización numérica tridimensional SSIIM (Simulación de movimiento de sedimentos para flujo de agua con opción de bloques múltiples), que está basado en la aproximación de un volumen de control mediante una malla tridimensional para cálculo del flujo de agua resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes con el modelo de turbulencia K-épsilon, mientras que para el transporte de sedimentos se resuelve la ecuación de Convección-Difusión. Para llevar a cabo el estudio del patrón de flujo de agua y sedimentos, se ha implementado el modelo numérico al prototipo del desarenador del proyecto, obteniéndose así, datos de distribución de velocidades, líneas de corriente, concentración de sedimentos y zonas de depósito a lo largo de la cámara del sedimentador. Los resultados conseguidos de la simulación numérica ejecutada en SSIIM, fueron contrastados y analizados con los resultados obtenidos en los estudios del modelo físico y del sistema de lavado de sedimentos SEDICON Sluicer implementado para el proyecto y que fueron ejecutados por el laboratorio de *Yellow River* en Zhengzhou–China, y por *Comisión Federal de Electricidad* (CFE) de Cuernavaca–México, encontrándose compatibilidad entre los resultados de simulación numérica y los resultados obtenidos en modelo físico. De los resultados y el análisis realizado se concluye que: i) El diseño concebido para el desarenador del proyecto presentaría altas eficiencias de retención (97%) para partículas menores al diámetro de diseño (0.25mm), y ii) La modelización numérica mediante SSIIM presenta un buen desempeño para la simulación tridimensional del movimiento del agua y de los procesos de movimiento de sedimentos en las cámaras del desarenador, siendo recomendable su utilización para el estudio y evaluación de obras hidráulicas en general.

Palabras Clave: Desarenador, Sedimentos, Simulación Numérica, SSIIM.



ABSTRACT

This work was carried out in order to establish the pattern of water flow and sediment in the sedimentation tank of the Hydroelectric Project “Coca Codo Sinclair” (CCS), using the three-dimensional numerical modeling software SSIIM (Simulation of sediment movement in Water Intakes with Multi block options), which is based on the approximation of a control volume using a three-dimensional mesh for the water flow calculation through the Navier-Stokes equations with the K-epsilon turbulence model, while for the sediment transport the Convection-Diffusion equation is solved. To carry out the study of the flow pattern of water and sediment, was implemented the numerical model to the prototype of the project, obtaining the velocity distribution, streamlines, sediment concentration and storage areas to along the sedimentation tank. The results obtained from the numerical simulation performed in SSIIM, were compared and analyzed with the results obtained in studies of the physical model and system flushing sediment SEDICON Sluicer implemented for the project and which were executed by the laboratory of Yellow River in Zhengzhou -China, and the Federal Electricity Commission (CFE) of Mexico, finding compatibility between the results of numerical simulation and the results of physical model. From the results and the analysis has been concluded that: i) The design conceived for the sedimentation tank has high retention efficiency (97%) for the design particles (0.25mm), and ii) Numerical modeling by SSIIM presents a good performance for the three-dimensional simulation of the movement of water and sediment movement processes in the sedimentation tank, being recommended for use for the study and evaluation of hydraulic structures in general.

Keywords: Sedimentation tank, Sediments, Numerical Simulation, SSIIM



CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Justificación	16
1.2 Objetivo general.....	16
1.2.1 Objetivos específicos	16
1.3 Alcance.....	17
2 DESARENADOR DEL PROYECTO COCA CODO SINCLAIR.....	17
2.1 Descripción general del proyecto.....	17
2.1.1 Esquema de las obras de Captación.....	18
2.2 Principales aspectos relacionados a operación.....	21
2.3 Condiciones hidráulicas proyectadas.....	21
2.4 Hidrología de sedimentos.....	21
3 ANÁLISIS DE LOS INFORMES DE LOS MODELOS realizados PARA EL DESARENADOR DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA CODO SINCLAIR.....	23
3.1 Modelo físico de Yellow River - China.....	23
3.1.1 Resultados de los ensayos del Modelo de Yellow River	26
3.2 Modelo Físico de la CFE de México	29
3.2.1 Resultados de los ensayos del modelo de la CFE México	31
3.3 Sistema de lavado del prototipo - SEDICON Sluicer	33
3.3.1 Criterios de Diseño	34
3.3.2 Patrón de Depósito de Sedimentos en el Desarenador	35
4 MÉTODOS.....	37
4.1 Dinámica de Fluidos Computacional	37
4.2 Modelo numérico SSIIM	39
4.2.1 Generalidades	39
4.2.2 Fundamentos Hidráulicos del Modelo	39
4.2.3 Modelo del Transporte de Sedimentos	41
4.2.4 Capacidades y Limitaciones del modelo SSIIM.....	42
4.2.5 Funcionamiento.....	42
4.2.6 Ejecución de SSIIM y Procedimientos	43
4.2.7 Simulación numérica e implementación de SSIIM	46
4.3 Simulación del Flujo de Agua	48
4.3.1 SEDICON (Sin velocidades iniciales).....	48
4.3.2 SEDICON (Con velocidades iniciales)	52
4.3.3 BIERI (Sin velocidades iniciales)	53
4.3.4 BIERI (Con velocidades iniciales).....	54



4.3.5	BIERI para caudal de 30 m ³ /s (con velocidades iniciales).....	55
4.4	Simulación del Transporte de Sedimentos.....	56
4.4.1	SEDICON - Granulometría del Cauce Natural (Río Coca)	56
4.4.2	SEDICON (Granulometría SEDICON)	60
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
5.1	Patrón de flujo de agua Prototipo (SEDICON 30m ³ /s sin velocidades iniciales).....	61
5.2	Patrón de flujo de agua Prototipo (SEDICON 30m ³ /s considerando velocidades iniciales)	62
5.3	Patrón de flujo de sedimentos - prototipo (SEDICON 30 m ³ /s).....	63
5.3.1	Granulometría del cauce natural (Río Coca).....	63
5.3.2	Granulometría propuesta por SEDICON	64
5.3.3	Pruebas de sensibilidad - simulación del flujo de sedimentos	65
5.4	Patrón de flujo de agua - Bieri 32.5 m ³ /s Sin velocidades iniciales	66
5.5	Patrón de flujo de agua - Bieri 32.5 m ³ /s considerando velocidades iniciales.....	67
5.5.1	Pruebas de sensibilidad - simulación del flujo de agua.....	67
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
7	BIBLIOGRAFÍA	73



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Escalamiento para el modelo de Yellow River	24
Tabla 2.- Caudal de entrada, 33.60m ³ /s y nivel normal de operación en la toma.....	27
Tabla 3.- Caudal de entrada, 33.60m ³ /s y niveles altos de operación en la toma	27
Tabla 4.- Caudal de entrada, 32.50m ³ /s y nivel normal de operación en la toma.....	28
Tabla 5.- Escalas usadas en el modelo CFE	30
Tabla 6.- Determinación del caudal y volumen de agua para la remoción de sedimento por cámara	32
Tabla 7.- Condiciones iniciales para el diseño de las unidades SEDICON	34
Tabla 8.- Velocidad de sedimentación de las partículas	35
Tabla 9.- Distribución longitudinal de las partículas en función de su tamaño	35
Tabla 10.- Capacidad de las unidades SEDICON	36
Tabla 11.- Archivo control - Cálculo del flujo de agua.....	45
Tabla 12.- Archivo control – Cálculo flujo de sedimentos.....	45
Tabla 13.- Condiciones Iniciales – Simulación de flujo (Geometría SEDICON)	48
Tabla 14.- Condiciones iniciales – Simulación de flujo de agua (Geometría BIERI).....	53
Tabla 15.- Granulometría del cauce natural (Rio Coca).....	56
Tabla 16.- Granulometría propuesta por SEDICON para el sistema de lavado	60
Tabla 17.- Patrón de flujo de agua sin considerar velocidades iniciales – SEDICON (30m ³ /s) .	61
Tabla 18.- Patrón de flujo de agua considerando velocidades iniciales – SEDICON 30m ³ /s	62
Tabla 19.- Eficiencia del desarenador (SEDICON 30m ³ /s) – Granulometría cauce natural.....	63
Tabla 20.- Concentración de sedimentos en secciones de interés – Granulometría cauce natural	64
Tabla 21.- Eficiencia del desarenador (SEDICON 30m ³ /s) – Granulometría SEDICON.....	64
Tabla 22.- Concentración de sedimentos en secciones de interés – Granulometría SEDICON	65
Tabla 23.- Prueba de sensibilidad - Variando el parámetro de Shields.....	65
Tabla 24.- Patrón de flujo de agua sin considerar velocidades iniciales - BIERI 32.5m ³ /s	66
Tabla 25.- Patrón de flujo de agua considerando velocidades iniciales - BIERI 32.5m ³ /s	67
Tabla 26.- Velocidades máximas y mínimas en secciones de interés, variando el nivel de operación.	68
Tabla 27.- Velocidades máximas y mínimas en secciones de interés, variando coeficiente de rugosidad.	68
Tabla 28.- Velocidades máximas y mínimas en secciones de interés, variando coeficientes de relajación.....	69



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Ubicación del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair	17
Figura 2.- Esquema de las obras de captación ₀	18
Figura 3.- Vista en planta y sección longitudinal del prototipo del desarenador	20
Figura 4.- Curva granulométrica para el prototipo y para el modelo de Yellow River	24
Figura 5.- Sección de la cámara para el sistema de lavado BIERI.....	25
Figura 6.- Sección longitudinal de la cámara (Desde la toma hasta el cuenco estabilizador) ..	25
Figura 7.- Curva granulométrica del sedimento del prototipo y del sedimento del modelo CFE30	
Figura 8.- Sección de la cámara para el sistema de lavado SEDICON.....	31
Figura 9.- Distribución granulométrica de las partículas de sedimento usadas para el cálculo de las unidades SEDICON en el prototipo.....	34
Figura 10 .- Distribución de sedimentos a lo largo de la cámara del desarenador	36
Figura 11.- Diseño del proceso de simulación en SSIIM.....	47
Figura 12.- Valores de entrada	Figura 13.- Ventana previa a la
	49
Figura 14.- Archivos boogie, control y koordina generados automáticamente en SSIIM.....	50
Figura 15.- Estructura del archivo koordina modificado.	50
Figura 16.- Archivo control - Simulación de flujo de agua – sin velocidades iniciales	51
Figura 17.- Secciones del mallado – SSIIM.....	51
Figura 18.- Residuales luego de la convergencia – Cálculo flujo de agua	51
Figura 19.- Archivo control - Simulación de flujo de agua – con velocidades iniciales	52
Figura 20.- Interpolación de velocidades y archivo innflow	53
Figura 21.- Secciones del mallado – SSIIM.....	54
Figura 22.- Interpolación de velocidades a partir del modelo físico.....	55
Figura 23.- Primera sección en SSIIM con velocidades iniciales	55
Figura 24.- Archivo control – Cálculo flujo de sedimentos – granulometría cauce natural (Rio Coca)	57
Figura 25.- Archivos de resultados para el cálculo del flujo de sedimentos	58
Figura 26.- Archivo boogie – Eficiencia y concentraciones en secciones de interés (18000s) .	59
Figura 27.- Volumen del cambio total en el fondo.....	59



LISTA DE SÍMBOLOS

T_r : periodo de tiempo

L_e : longitud (horizontal y vertical) equivalente en similitud geométrica

Q_e : caudal equivalente en similitud de Froude

V_e : velocidad equivalente en similitud de Froude

η_e : rugosidad equivalente en similitud de Froude

t_e : tiempo equivalente en similitud de Froude

θ : parámetro de Shields

V_s : velocidad de sedimentación

g : aceleración de la gravedad

d : diámetro de partícula de sedimento

ρ : densidad relativa de la partícula de sedimento

C_d : coeficiente de arrastre

ε : disipación de energía cinética turbulenta.

k : energía cinética turbulenta.

P_k : producción de turbulencia.

k_s : rugosidad equivalente a un diámetro de partícula en la cama.

w : velocidad de caída del sedimento

Γ : coeficiente de difusión

ν_T : viscosidad Eddy

S_c : número de Schmidt

C_{bed} : carga suspendida

D_{50} : diámetro de la partícula de sedimento

τ : esfuerzo de corte en la cama

τ_c : esfuerzo de corte crítico para el movimiento de partículas de sedimento

ρ_s : densidad del sedimento

ρ_w : densidad del agua

ν : viscosidad del agua

g : aceleración de la gravedad

a : nivel de referencia equivalente a la altura de rugosidad

i : número de secciones transversales del nodo

j : número de secciones longitudinales del nodo

x : coordenada en las abscisas del nodo

y : coordenada en las ordenadas del nodo

z : coordenada en el eje vertical del nodo



LISTA DE ABREVIATURAS

SSIIM: Sediment Simulation In Water Intakes with Multiblock option/ Simulación de movimiento de sedimentos para flujo de agua con opción de bloques múltiples

CCS: Coca Codo Sinclair

NTNU: Norwegian University of Science and Technology/ Universidad de Noruega de Ciencia y Tecnología

CFD: Computational Fluid Dynamics/ Dinámica de Fluidos Computacional

CFRD: Concrete Face Rockfill Dams/ presa de enrocado con pantalla de concreto

msnm: metros sobre el nivel del mar

NAMO: Nivel de aguas máximas ordinarias

NAME: Nivel de aguas máximas extraordinarias

NAMC: Nivel de aguas máximas catastrófico

CFE: Comisión Federal de Electricidad - México



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, María Bernarda Luzuriaga Hermida, autora de la tesis "SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE SEDIMENTOS EN EL DESARENADOR DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA CODO SINCLAIR", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Mayo 2014

Bernarda Luzuriaga H.

CI: 010563322-6



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, Diana Alexandra Amaya Zhingre, autora de la tesis “SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE SEDIMENTOS EN EL DESARENADOR DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA CODO SINCLAIR”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Mayo 2014

Diana Amaya Z.
CI: 1104356678



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, María Bernarda Luzuriaga Hermida, autora de la tesis “SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE SEDIMENTOS EN EL DESARENADOR DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA CODO SINCLAIR”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Mayo 2014

Bernarda Luzuriaga H.
CI: 010563322-6



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, Diana Alexandra Amaya Zhingre, autora de la tesis "SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE SEDIMENTOS EN EL DESARENADOR DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA CODO SINCLAIR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Mayo 2014

Diana Amaya Z.
CI: 1104356678



DEDICATORIA

“Al dueño de la sabiduría, por permitirme un poco de conocimiento... Dios”

Bernarda Luzuriaga H.

“A la felicidad y orgullo de mi esposo, mis hijos y mi madre”

Diana Amaya Z.



AGRADECIMIENTO

“La nobleza vive de la parte del que da, el agradecer está de parte del que recibe”

A Dios por ser el origen inspirador.

A mi padre por su fortaleza, a mi madre por su prudencia, gracias por tener sus miradas amorosas en mi camino.

A mis profesores, por transmitir sus conocimientos y aclarar mis dudas

A mis hermanos y esas personas incondicionales en mi vida.

Todo ha sido y será posible por ustedes...

Bernarda Luzuriaga H.

A Dios por guiar mi camino y permitirme una meta más.

A mi esposo por su gran amor, paciencia, fortaleza y apoyo.

A mi madre, por ser un apoyo incondicional e infinito en mi vida y por luchar por mí.

A mis profesores por guiarme con su conocimiento y experiencia.

A mis familiares y amigos, personas bondadosos, que durante éste camino, supieron darme su aliento y extenderme su mano para continuar.

Diana Amaya Z.



1 INTRODUCCIÓN

“Acuérdate, cuando estudies el agua, de alegar primero la experiencia y después la razón”

Leonardo da Vinci (1452-1519)

1.1 Justificación

La modelización física a escala reducida en modelos morfológicos, se había constituido en la única alternativa para el estudio de problemas relacionados con flujo de sedimentos en obras hidráulicas. Si bien, los modelos físicos responden satisfactoriamente al entendimiento de procesos de transporte de sedimentos de fondo con material grueso, para procesos de suspensión, la modelización física del transporte de sedimentos es muy limitada debido a los efectos que introduce el escalamiento. De manera particular, en proyectos de generación hidroeléctrica, la problemática del diseño de los desarenadores radica en el control de los sedimentos, ya que se debe lograr altas eficiencias de retención para impedir el ingreso de los mismos hacia la maquinaria hidroeléctrica y evitar la abrasión, desgaste y reducción de su vida útil. Por ello, se considera necesario el desarrollo de modelos numéricos ⁽¹⁾, así como el entendimiento y análisis de su desempeño como herramienta de soporte para la concepción, diseño y toma de decisiones en procedimientos de operación.

En los últimos años, el incremento en las capacidades y velocidad de cálculo de los computadores, ha permitido la introducción de paquetes computacionales para modelización numérica tridimensional como una herramienta de simulación potente que complementa la modelización física ⁽²⁾. El uso conjunto de la modelización física y numérica, modelos híbridos, permite el estudio de diversos escenarios con la interacción de ambos tipos de modelización así como la implementación de soluciones optimizadas en el diseño o en un prototipo ⁽³⁾. Los modelos tridimensionales 3D representan el estado más avanzado para la modelización, pues mediante estos, es posible calcular las tres componentes espaciales de la velocidad de flujo de agua y resolver fenómenos de flujo como el transporte de sedimentos ⁽⁴⁾. De entre los diferentes modelos disponibles, se ha optado por SSIIM debido a la capacidad de modelización conjunta del movimiento del agua y de flujo de sedimentos en condiciones de lecho móvil y geometrías complejas ⁽⁵⁾.

1.2 Objetivo general

Establecer el patrón de flujo de agua y sedimentos en el desarenador del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, mediante la modelización numérica, haciendo uso del software SSIIM.

1.2.1 Objetivos específicos

- Definir los parámetros que intervienen en la modelización numérica basados en las características del prototipo y modelo físico para el caudal de diseño.

¹ (Agraval, 2005)

² (Novak, Moffat, & Nalluri, 2001)

³ (Novak, Moffat, & Nalluri, 2001)

⁴ (Vásquez, 2003)

⁵ (Fernandez, Delgado, Herrero, & Salet, 2011)

- Implementar el modelo numérico SSIIM al modelo físico y prototipo del desarenador del Proyecto Coca Codo Sinclair.
- Evaluar el desempeño hidráulico del desarenador, mediante la comparación de los resultados del modelo físico y estudios realizados al prototipo respecto a los obtenidos en el modelo numérico desarrollado, considerando parámetros relativos a velocidades de flujo, concentración de sedimentos y zonas de depósito de sedimentos en el desarenador.

1.3 Alcance

El presente estudio se realizó para determinar el patrón de flujo de agua y sedimentos del desarenador del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair CCS, haciendo uso de la modelización numérica mediante el software libre SSIIM (Sediment Simulation In Water Intakes with Multiblock option) desarrollado por el Dr. Nils Olsen de la NTNU (Norwegian University of Science and Technology). Mediante el trabajo propuesto, se espera dar un importante aporte al entendimiento, aplicación y desarrollo de conocimiento en modelización numérica para la optimización del diseño y operación de obras hidráulicas para proyectos de ingeniería del agua.

Los resultados del estudio se constituyen en un importante aporte para el desarrollo futuro de documentos de divulgación técnica/científica que se ejecutan a través del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos y el Grupo de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

2 DESARENADOR DEL PROYECTO COCA CODO SINCLAIR

2.1 Descripción general del proyecto

El proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, de 1500 Megavatios (MW) de potencia instalada, se encuentra ubicado, al noreste de la República del Ecuador entre las provincias de Napo y Sucumbíos. El área de drenaje de interés del proyecto, en su mayor parte terreno montañoso bordeado por la Cordillera Central, está constituido por la cuenca del río Coca hasta el sitio denominado el Salado (zona de captación), que cubre una superficie aproximada de 3600km² (6).

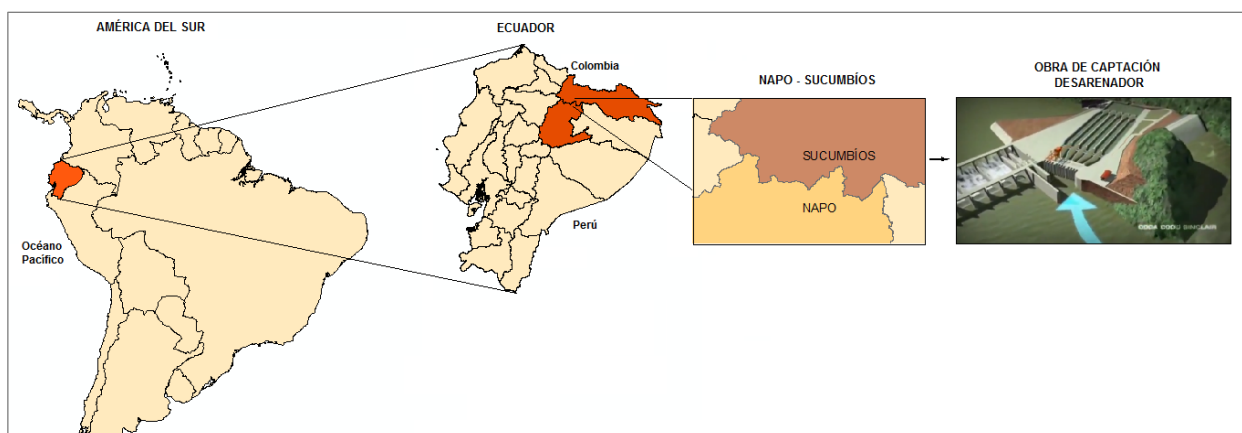


Figura 1.- Ubicación del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair

⁶ (Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, 2013)

Al ser la cuenca del río Coca una zona de transición de los Andes al Llano Amazónico, la precipitación varía progresivamente desde 1331mm en la estación Papallacta (Andes), hasta 6122mm en la Estación Reventador (Amazonía). En cuanto a la temperatura en la zona de captación (El Salado), los rangos de variación de las temperaturas medias mensuales y anuales son pequeñas, sin embargo las diferencias de temperatura a lo largo del día son grandes ya que presentan mínimos de 10.5°C y 30°C como máximos ⁽⁷⁾.

Las estructuras más importantes que conforman el proyecto se dividen en obra de captación, túnel de conducción, embalse compensador, tuberías de presión y casa de máquinas.

2.1.1 Esquema de las obras de Captación

Las obras de captación (presa CFRD, vertedero, compuerta de lavado, toma y desarenador) se localizan en el río Coca, un kilómetro abajo de la confluencia de los ríos Quijos y Salado. A continuación se describen brevemente los elementos que constituyen la obra de captación ⁽⁸⁾.



Figura 2.- Esquema de las obras de captación ⁽⁹⁾

La *presa de enrocamiento* con cara de concreto (CFRD) está localizada en la margen derecha del río Coca y tiene una longitud de 143.20m (1289.50msnm), un ancho de corona de 8m y una altura de 31.50m; con taludes de 1:1.5 tanto aguas arriba como aguas abajo.

El *vertedero* está formado por 8 vanos de 20m de longitud, con la cresta elevada a 1275.50msnm (NAMO), para descargar caudales en época de crecidas de 6020m³/s con un período de retorno $Tr = 200$ años. Para caudales de 8900m³/s de un $Tr = 10000$ años, la elevación del embalse alcanzará los 1284.25msnm (NAME); y para una crecida catastrófica de 15000m³/s la elevación en el embalse llegaría a la cota 1288.30msnm (NAMC).

La *compuerta de lavado* de gravas, se ubica en la margen derecha del vertedero, presenta tres orificios con su base a la elevación 1260msnm, uno con compuerta radial de 8 x 8 m (vano uno) y por dos compuertas planas de 4.5 x 4.5 m. El vertedero y el desarenador están separados por un muro de 90m de longitud a la elevación 1275.50msnm.

⁷ (Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, 2011)

⁸ (Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, 2013)

⁹ (www.ccs.gob.ec, 2012)



La *toma* que capta $222\text{m}^3/\text{s}$, está emplazada a la derecha del vertedero. El eje de la toma a lo largo de la dirección de flujo y el eje del aliviadero forman un ángulo de 70° . Tiene un ancho total de 80m y se compone de 16 entradas (3.10m base x 3.30m altura) donde cada par de entradas desde la toma, dotan de caudal a cada una de las 8 cámaras del desarenador. La elevación del asiento de las compuertas de entrada es de 1270msnm.

El ducto de caudal ecológico se emplaza al lado derecho de la toma y sus dimensiones son 1.50m x 2m.

El *desarenador* de longitud total igual a 259.5m, está formado por 8 cámaras de sedimentación codificadas de #1 a #8 de izquierda a derecha respectivamente, donde cada cámara de sedimentación (151.50m de longitud total por 13m de ancho) se integra a una sección de conexión aguas arriba (45m de longitud y 7.80m de ancho) y una conexión aguas abajo con el cuenco disipador (63m de longitud).

El tramo de transición (curva) entre la sección aguas arriba y la sección de decantación, varía su anchura gradualmente desde 7.80m hasta llegar a la zona inicial de decantación de 13m de ancho, donde se encuentran tres rejillas disipadoras de energía o tranquilizadoras espaciadas 3m entre sí. La rejillas están elaboradas por barras de acero angulares de L60x60x6mm con espaciamiento neto de 120mm (primera rejilla), L50x50x5mm con espaciamiento neto de 70mm (segunda rejilla) y L40x40x4mm con espaciamiento neto de 40mm (tercera rejilla).

Las dimensiones transversales de la zona de decantación de la cámara son: ancho neto de 13m, una parte vertical superior de 8.63m, una parte trapezoidal inferior de 3.67m y una parte rectangular ubicada en la parte baja de 2m de base por 3.50m de altura. La elevación de la parte inferior de las cámaras es de 1261.20msnm.

El cuenco disipador de 111m de ancho por 38.30m de longitud, es la parte que conecta las cámaras sedimentadoras aguas abajo con el túnel de aducción. Su función está ligada a disipar la energía del flujo liberado de las cámaras del desarenador, para conducir el agua hacia el túnel de aducción. En la parte lateral izquierda, posee un vertedero con dos compuertas basculantes de 6m de ancho a un nivel de 1271.90msnm, que sirven para la descarga de caudal excesivo hacia el río cuando el caudal de desvío supera los $222\text{m}^3/\text{s}$.

Las vistas en planta y sección longitudinal del prototipo del desarenador se indican en la siguiente figura.

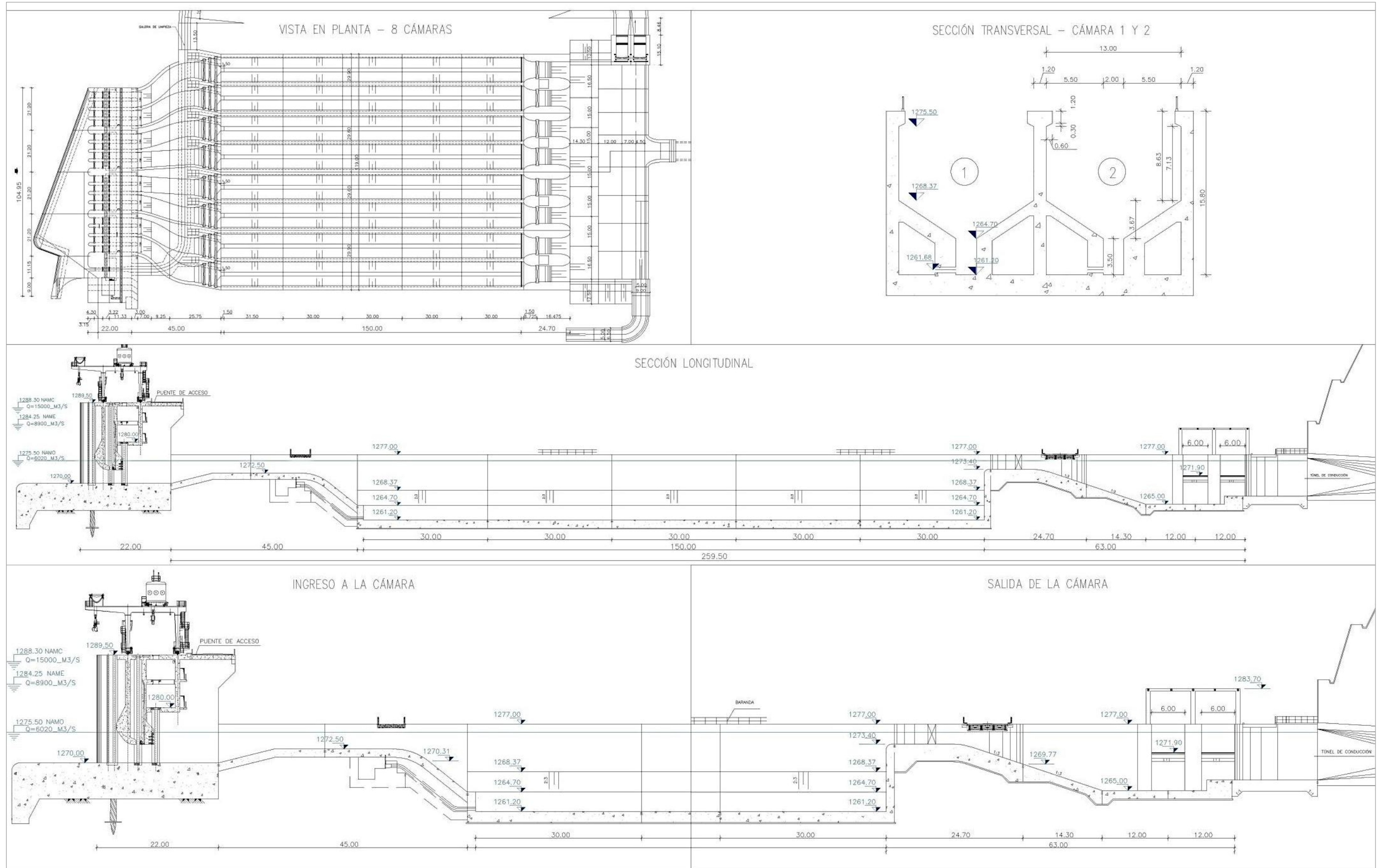


Figura 3.- Vista en planta y sección longitudinal del prototipo del desarenador



2.2 Principales aspectos relacionados a operación

Según los diseños definitivos del desarenador, la operación es como se describe a continuación ⁽¹⁰⁾:

- El nivel normal de desviación es de 1275.50msnm y se capta un caudal de 222m³/s.
- El caudal normal de desvío de cada una de las 8 cámaras es 27.75m³/s, sin incluir el caudal de lavado (2.30m³/s).
- La descarga máxima para cada cámara es de 32.25m³/s (considerando que puede haber un exceso de hasta 4.50m³/s). Dado que el caudal máximo en el túnel de conducción es de 222m³/s, el exceso será controlado mediante el aliviadero lateral.
- Las compuertas de admisión estarán parcialmente abiertas para desviar el caudal de diseño cuando el flujo aguas arriba sea mayor a 32.25m³/s.
- El desarenador detendrá la operación cuando el nivel aguas arriba de las compuertas de admisión (toma) esté sobre los 1279.69msnm (nivel máximo de desviación).
- Algunas cámaras detendrán la operación para asegurar el nivel de 1275.50msnm aguas arriba de la toma cuando el flujo aguas arriba sea menor al flujo de diseño (bajo el nivel de desvío) de modo que las otras cámaras tengan el nivel de desvío normal.
- El nivel de agua en el cuenco amortiguador será de 1274.73m cuando el caudal de desvío sea de 222m³/s en el desarenador.
- El ducto ecológico suministra no menos del caudal ecológico 20m³/s durante el tiempo de operación normal. Los ductos de limpieza se detendrán cuando el desarenador detenga la operación (nivel de aguas arriba de la toma sobre la 1279.69m).

2.3 Condiciones hidráulicas proyectadas

Los requerimientos hidráulicos con los que debe cumplir el desarenador para su correcto funcionamiento se describen a continuación ⁽¹¹⁾:

El desarenador se ha diseñado de manera que las cámaras sedimentadoras retengan el 100% de partículas de arena mayores o iguales 0.25mm.

La velocidad de flujo en las cámaras del desarenador no debe superar los 0.35m/s.

La velocidad de sedimentación proyectada es menor a 3.5cm/s.

La velocidad de flujo en el canal de transición debe ser menor a 1.5m/s, en la condición de flujo máximo.

La descarga máxima del sistema de lavado SEDICON es de 2.3m³/s para cada cámara.

2.4 Hidrología de sedimentos

Los sedimentos transportados en el área de drenaje del río Coca, se presentan en su mayor parte como carga suspendida. Según los estudios, estadísticamente, la carga

¹⁰ (Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, 2013)

¹¹ (Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, 2013)



anual promedio de sedimentos en suspensión que llega al río Coca en la zona de captación es de 18 millones de toneladas, de los cuales 7.80 millones de toneladas ingresarían a los desarenadores ⁽¹²⁾.

La concentración de sedimentos presente al ingresar el agua al desarenador, considerada para diseño de las obras es de 5 kg/m^3 que corresponde a un flujo de sedimentos de 4140Tn/h.

¹² (Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, 2013)



3 ANÁLISIS DE LOS INFORMES DE LOS MODELOS REALIZADOS PARA EL DESARENADOR DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA CODO SINCLAIR

Para establecer el número definitivo de cámaras sedimentadoras que integran el desarenador y que determinan el sistema de lavado más eficiente para la remoción de sedimentos, el Proyecto ha ejecutado el estudio “*Investigación experimental sobre el rendimiento de la cámara # 7 del desarenador de la central hidroeléctrica CCS con el sistema de lavado BIERI*” llevado a cabo en los laboratorios de Yellow River en Zhengzhou – China, y el estudio “*Modelo físico para verificar el funcionamiento de la cámara No. 6 con el sistema de lavado Succionador SEDICON*” desarrollado por la Comisión Federal de Electricidad CFE en Cuernavaca–México. Así mismo, y para efectos de evaluar el prototipo del desarenador con el sistema de lavado SEDICON, el Proyecto ejecutó un estudio en el modelo numérico 2D “SED-TRAP”.

Los ensayos en los modelos físicos de la Comisión Federal de Electricidad CFE-México y del laboratorio YELLOW RIVER de China, se llevaron a cabo para 6 y 7 cámaras respectivamente puesto que cada uno de los estudios es una comprobación del rendimiento según el número de cámaras. Estos estudios incluyen también ensayos para el lavado de sedimento con el sistema BIERI (Yellow River) y SEDICON Sluicer (CFE) ya que aún no estuvo definido el sistema de lavado a usarse en el desarenador. El hecho de probar un sistema de lavado en cada modelo hizo variar ligeramente la geometría de la sección transversal de la cámara sedimentadora en la zona trapezoidal y el canal de lavado.

3.1 Modelo físico de Yellow River - China

El estudio “*Investigación experimental sobre el rendimiento de la cámara # 7 del desarenador de la central hidroeléctrica CCS*” llevado a cabo en los laboratorios de Yellow River en Zhengzhou – China, fue realizado con el fin de evaluar el rendimiento del desarenador al agregar una nueva cámara (cámara #7).

En el modelo físico los ensayos se hicieron en dos etapas de acuerdo a las condiciones del agua:

- *Agua limpia:* Aquí se estudió el comportamiento hidráulico en términos de patrón de flujo y distribución de velocidad para los diferentes niveles de operación de la toma.
- *Agua con carga de sedimentos:* Se realizaron para observar el comportamiento de los sedimentos dentro de la cámara de sedimentación antes y durante el lavado mediante el sistema BIERI a fin de determinar el desempeño del mismo.

Los criterios de similitud geométrica, de movimiento del flujo y de movimiento de sedimentos usados para este modelo físico se resumen en la siguiente tabla:



Similitud	Nombre		Escala	Modelo	Prototipo	Observaciones
Similitud geométrica	Escala Horizontal	L_e	20	20	1	
	Escala Vertical	L_e	20	20	1	
Similitud del movimiento del flujo (Similitud de Froude)	Caudal	$Q_e = L_e^{5/2}$	1789	0,124 m³/s	222 m³/s	Nivel de operación (1275,5m) Material modelo: vidrio orgánico
	Velocidad	$V_e = L_e^{1/2}$	4,47	0,223 m/s	1 m/s	
	Rugosidad	$n_e = L_e^{1/6}$	1,65	0,008	0,013	
	Tiempo	$t_e = L_e^{1/2}$	4,47	13,42 seg	1 min	
Similitud del movimiento de sedimentos suspendidos (ceniza de carbón quemado)	Densidad Aparente		1,29	2,10 t/m³	2,70 t/m³	d50
	Densidad aparente seca		1,67	0,78 t/m³	1,30 t/m³	
	Densidad aparente relativa		1,55			
	Velocidad de sedimentación		4,47			
	Tamaño del grano		2,88	0,156 mm	0,45 mm	
	Concentración de los sedimentos		0,83			
	Temperatura del Agua		----	10 °C	20 °C	

Tabla 1.- Escalamiento para el modelo de Yellow River

La curva granulométrica del tamaño de partículas del prototipo y curva granulométrica usada en el modelo físico se muestra en la siguiente figura:

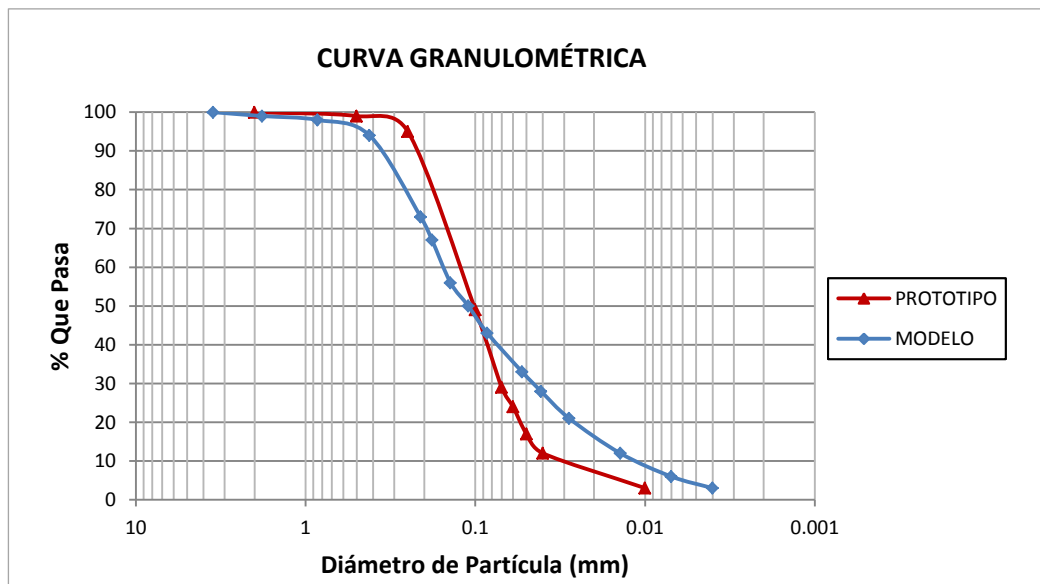


Figura 4.- Curva granulométrica para el prototipo y para el modelo de Yellow River

El modelo se realizó para la evaluación de la cámara adicionada al desarenador (cámara No.7) y sistema de lavado de sedimentos BIERI. Según el funcionamiento del sistema, la geometría de la sección transversal de la cámara es la siguiente:

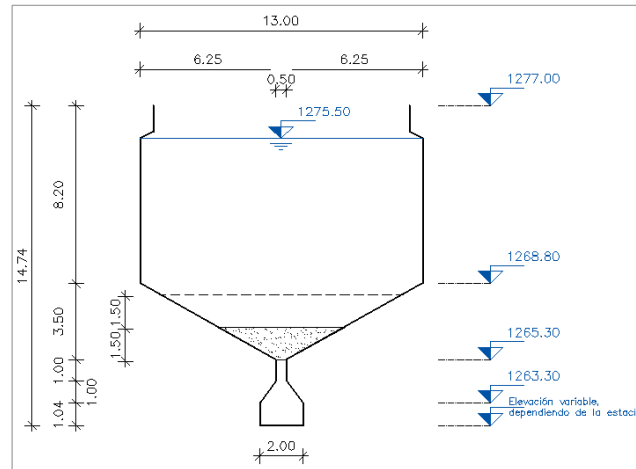


Figura 5.- Sección de la cámara para el sistema de lavado BIERI.



Figura 6.- Sección longitudinal de la cámara (Desde la toma hasta el cuenco estabilizador)



De acuerdo a la escala geométrica 1:20 establecida, el modelo físico del desarenador considerando desde las obras de toma hasta el cuenco estabilizador, ocupa un espacio de 14.90m de largo por 7.50m de ancho.

Las condiciones y herramientas para el ensayo fueron las siguientes:

- El flujo de entrada del modelo fue controlado mediante un medidor de flujo electromagnético.
- El caudal en la galería de lavado fue medido con un vertedero rectangular.
- La concentración de sedimentos se determinó con un picnómetro.
- El nivel de agua fue medido con una sonda.
- La velocidad de flujo se midió con un medidor de corriente LS-401 (hélice).

3.1.1 Resultados de los ensayos del Modelo de Yellow River

Patrón de flujo de agua y distribución de velocidad en la cámara

El estudio del patrón de flujo de agua y distribución de velocidades en la cámara #7, se realizó para tres valores de caudal de ingreso a la cámara (33.60 – 32.50 - 31.70) m³/s. Para el caudal 33.60m³/s se variaron los niveles en la toma hasta alcanzar el nivel máximo de operación (1280msnm). Para los caudales 32.50 m³/s y 31.70 m³/s las pruebas se realizaron únicamente para el nivel normal de operación (1275.50msnm).

El patrón de flujo fue registrado mediante fotografías en: a) En la curva de ingreso a la cámara sedimentadora, b) Antes y después de las rejillas aquietadoras, c) En la parte central de la cámara de sedimentación, y d) A la salida de la cámara, en la zona de transición.

Para determinar las caídas en la zona de las rejillas aquietadoras, centro de la cámara y cuenco estabilizador se obtuvo un perfil longitudinal de la superficie de agua. En este perfil se indica el intervalo de variación de nivel de agua.

La distribución de velocidad fue medida en ocho secciones transversales, dos secciones al inicio de la curva (9 puntos por sección), 5 secciones en el cuerpo central (24 puntos por sección) y una sección a la salida de la cámara (9 puntos en la sección).

Cada uno de los ensayos se resume en las siguientes tablas:



Resultados del Modelo Físico de los Desarenadores Coca Codo Sinclair			
Niveles Normales en la Toma y en la Cámara Estabilizadora			
Cámara	Descripción	Lectura	Observaciones
Caudal	Nivel en la toma	1275,50 msnm	Caudal desviado 222m ³ /s
	Nivel en cuenco estabilizador	1274,73 msnm	
	Caudal Medido en la 7 cámara	33,60 m ³ /s	Galería de lavado de sedimentos cerrada
Patrón de Flujo	En la curva luego de la toma		Foto
	Cerca de las rejillas estabilizadoras		Foto : Una caída de agua se observa a alrededor de la primera rejilla. Al pasar la tercera rejilla el flujo es estable.
	En la parte central de la cámara		Foto : Flujo estable
	Cerca a la salida		Foto
Perfil Longitudinal de la Superficie	Nivel de agua en el cuerpo principal	1275,16 - 1275,20 msnm	Valores cercanos al valor de diseño en la parte central de la cámara.
	Perfil Longitudinal para nivel en la toma: 1275,50		
Distribución de Velocidad	Velocidades en la curva Sección Transversal en las Abscisas: 0-022,54 0-014,00	1,07 - 1,84 m/s	La velocidad de flujo es mayor en el lado izquierdo que en el derecho. (Velocidades máxima y mínima)
	Velocidades en el cuerpo central Sección Transversal en las Abscisas: 0+002,00 0+020,00 0+060,00 0+100,00 0+140,00	1,00 m/s	La velocidad de flujo es mayor cerca del fondo que cerca de la superficie. La velocidad máxima es de 1,0 m/s, desfavorable para la sedimentación.
	Velocidades a la salida de la cámara Sección Transversal en las Abscisas: 0+163,83	3,11 - 3,52 m/s	Distribución de velocidad relativamente uniforme

Tabla 2.- Caudal de entrada, 33.60m³/s y nivel normal de operación en la toma

Resultados del Modelo Físico de los Desarenadores Coca Codo Sinclair			
Niveles Altos en la Toma			
Cámara	Descripción	Lectura	Observaciones
Caudal	Nivel en la toma	1277,1278,1279,1280 msnm	Caudal desviado 222m ³ /s
	Nivel en cuenco estabilizador	1274,73 msnm	
	Caudal Medido en la 7 cámara	33,60 m ³ /s	Galería de lavado de sedimentos cerrada
Patrón de Flujo	En la curva luego de la toma		Fotos: Flujo turbulento luego de las compuertas. La superficie del agua fluctúa hasta 0,66m. Diferencia de niveles de agua en la curva, máximo valor observado 1,55m.
	Cerca de las rejillas estabilizadoras		Fotos: Flujo estable aguas abajo de las rejillas.
	En la parte central de la cámara		Fotos: Superficie ondulante en rangos de 0,1m.
	Cerca a la salida		
Perfil Longitudinal de la Superficie	Nivel de agua en el cuerpo principal	1275,16 - 1275,22 msnm	Superficie ondulante en la parte central de la cámara
	Perfil Longitudinal para los niveles en la toma: 1277, 1278, 1279, 1280		
Distribución de Velocidad	Velocidades en las compuertas de ingreso Sección Transversal en las Abscisas: 0-045,00	6,62 m/s	Distribución de velocidad en los orificios izquierdo y derecho, para apertura de la compuerta variando (1,29 - 0,81)m. Mayor velocidad cerca del fondo que cerca de la superficie. La velocidad en el fondo aumenta conforme aumenta el nivel en la toma. Valor máximo medido 6,62 m/s.
	Velocidades en la curva Sección Transversal en las Abscisas: 0-022,54 0-014,00	0,69 - 2,81 m/s	Mayor velocidad a la izquierda que a la derecha por efecto de la curva. La diferencia de velocidad aumenta mientras mayor es el nivel de agua a la entrada.
	Velocidades en el cuerpo central Sección Transversal en las Abscisas: 0+002,00 0+020,00 0+060,00 0+100,00 0+140,00	0,22 - 0,80 m/s	Para niveles mayores en la toma, la distribución de velocidad muestra mayores velocidades cerca del fondo. La velocidad máxima medida 1,0 m/s, desfavorable para la sedimentación.
	Velocidades a la salida de la cámara Sección Transversal en las Abscisas: 0+163,83	2,96 - 3,41 m/s	No hay cambios apreciables respecto a las velocidades cuando la toma trabaja con el nivel normal.

Tabla 3.- Caudal de entrada, 33.60m³/s y niveles altos de operación en la toma

La siguiente tabla, presenta un cambio considerado como mejora en las condiciones de ensayo y consiste en suprimir el espacio entre las rejillas tranquilizadoras y el fondo de la cámara.



Resultados del Modelo Físico de los Desarenadores Coca Codo Sinclair			
Niveles Normales en la Toma y en la Cámara Estabilizadora			
Cámara	Descripción	Lectura	Observaciones
Caudal	Nivel en la toma	1275,5 msnm	Caudal desviado 222m³/s
	Nivel en cuenco estabilizador	1274,73 msnm	
	Caudal Medido en la 7 cámara	32,50 m³/s	Galería de lavado de sedimentos cerrada
Patrón de Flujo	En la curva luego de la toma		Foto : Ligera caída de la superficie en la curva.
	Cerca de las rejillas estabilizadoras		Foto : Una caída de agua se observa a alrededor de la primera rejilla. Menor remanso cerca a la primera rejilla.
	En la parte central de la cámara		Foto : Flujo estable
	Cerca a la salida		Foto
Perfil Longitudinal de la Superficie	Nivel de agua en el cuerpo principal	1275,14 - 1275,19 msnm	Valores cercanos al valor de diseño en la parte central de la cámara. Nivel de agua estable.
	Perfil Longitudinal para nivel en la toma: 1275,50		
Distribución de Velocidad	Velocidades en la curva		No se realizaron mediciones en este tramo que conduce hacia la cámara sedimentadora.
	Velocidades en el cuerpo central	0,21 - 0,44 m/s	La velocidad se distribuye mas uniformemente con las rejillas estabilizadoras asentadas en el fondo.
	Sección Transversal en las Abscisas: 0+002,00 0+020,00 0+060,00 0+100,00 0+140,00		
	Velocidades a la salida de la cámara		No se realizaron mediciones en este tramo que conduce hacia la cámara sedimentadora.
Sección Transversal en las Abscisas: 0+163,83			

Tabla 4.- Caudal de entrada, 32.50m³/s y nivel normal de operación en la toma

Para el caso de caudal de ingreso 31.70m³/s y nivel normal de operación, se realizaron mediciones únicamente en la parte central de cámara y no se detectaron diferencias apreciables en cuanto a distribución de velocidad, por esa razón no se presenta una tabla resumen para estas condiciones.

Pruebas sobre el rendimiento del sistema de lavado BIERI

La remoción de sedimentos con el sistema BIERI se lleva a cabo mediante 6 módulos en cada cámara, cada uno de 25m de longitud con 48 orificios (0.19 x 0.20 m en el prototipo), que descargan en un ducto común de 2 x 2 m. La primera unidad es la más cercana a la captación, mientras que la sexta unidad es la más alejada. La operación de cada una de las unidades se realiza una a una, no de manera simultánea. Para verificar el rendimiento del sistema de lavado, se determinó en primer lugar el caudal de lavado y luego se procedió a realizar pruebas de lavado para evaluar la eficiencia.

Caudal de Lavado

El caudal de lavado para los sedimentos acumulados en la sección trapezoidal del desarenador, se estableció en condiciones normales de operación (1275.5msnm -Toma y 1274.73msnm -Cuenco estabilizador). Estos caudales se fijaron cuando las unidades BIERI primera y sexta se hallen trabajando para diferentes niveles de agua a la salida de la galería (1261msnm, 1265.78msnm y 1266.33msnm). Luego se obtuvieron perfiles longitudinales de la superficie para dichos niveles.

Los resultados mostraron lo siguiente:

- Mayor caudal: 19.27m³/s cuando trabaja la 1° unidad BIERI y el nivel de salida de la galería está a 1261.00msnm.
- Menor caudal: 11.87m³/s con la 6° unidad BIERI trabajando y el nivel de salida de la galería a 1266.33msnm.



Los perfiles longitudinales mostraron que cuando sube el nivel de agua a la salida de la galería, el perfil longitudinal de la superficie de agua incrementa ligeramente.

- Unidad BIERI No. 1 Trabajando: El perfil longitudinal oscila entre valores de 1274.90msnm - 1275.02msnm en el cuerpo central de la cámara sedimentadora.
- Unidad BIERI No. 6 Trabajando: El perfil longitudinal oscila entre valores de 1274.96msnm - 1275.06msnm en el cuerpo central de la cámara sedimentadora.

Pruebas de Lavado

Las pruebas de lavado se llevaron a cabo para las condiciones normales de operación (1275.5msnm -Toma y 1274.73msnm -Cuenco estabilizador) y nivel máximo de agua a la salida de la galería (1266.33msnm – 6° Unidad BIERI trabajando). Se dividió en dos ensayos, según el espesor de la capa de sedimentos depositada en la sección trapezoidal de la cámara de sedimentación. Se realizaron mediciones de concentración de sedimentos a la salida de la galería para diferentes intervalos de tiempo.

- Depósito de espesor 1.50m (715m³): Al inicio del lavado se presentaron concentraciones de 38kg/m³, a los 6 minutos concentraciones de 10kg/m³ y a los 8 minutos concentraciones de 5kg/m³.
- Depósito de espesor 3m: Al inicio del lavado se presentaron concentraciones de 84kg/m³, a los 8 minutos concentraciones de 6kg/m³ y a los 12 minutos concentraciones de 5kg/m³.

Se hizo una estimación superficial sobre el funcionamiento del sistema de lavado, es decir; asumiendo que se opera en un lapso de 48 minutos (6 módulos por 8 minutos), con un caudal medio de 15.57m³/s, el volumen necesario para la operación del sistema es de 44841.60m³ de agua cada vez que se opere. Con lo anterior se puede estimar que el consumo de agua por metro cúbico de sedimento depositado es de 62.71m³.

Los datos anteriores sumados a un registro fotográfico indican la ausencia de depósitos remanentes demostrando el trabajo del sistema de limpieza BIERI. Sin embargo, luego de los ensayos, por cuestiones de eficiencia, se sugiere trabajar con un espesor de sedimentos máximo de 1.50m que corresponde al primer caso.

3.2 Modelo Físico de la CFE de México

El estudio del modelo físico desarrollado por la Comisión Federal de Electricidad CFE en Cuernavaca – México, fue realizado para verificar el funcionamiento de la cámara No. 6 con el sistema de lavado “Succionador SEDICON”. Los ensayos en este modelo físico estuvieron direccionados al funcionamiento del sistema de lavado SEDICON, antes que al estudio y registro del patrón de flujo del agua con sedimentos, por esta razón se dividieron los ensayos de la siguiente manera:

- Selección del tipo de material para usar como sedimento en el modelo.
- Determinación de caudales de lavado y niveles de descarga para espesores de sedimento de 1.50m y 3m desde la base de la tolva.
- Tiempo de remoción de sedimentos



Los criterios de similitud asumidos y calculados para el modelo se pueden observar en la siguiente tabla:

Similitud	Nombre	Escala	Modelo	Prototipo	Observaciones	
Similitud geométrica	Escala Horizontal	L_e	20	20	1	
	Escala Vertical	L_e	20	20	1	
Similitud del movimiento del flujo (Similitud de Froude)	Caudal	$Q_e = L_e^{5/2}$	1788,85	0,124 m³/s	222 m³/s	Nivel de operación (1275,50msnm)
	Velocidad	$V_e = L_e^{1/2}$	4,47	0,223 m/s	1 m/s	Material modelo: vidrio orgánico
	Rugosidad	$n_e = L_e^{1/6}$	1,647	0,008	0,013	
	Tiempo	$t_e = L_e^{1/2}$	4,47	13,42 seg	1 min	
Similitud del movimiento de sedimentos suspendidos (ceniza de carbón quemado)	Densidad aparente		1,11	2,42 t/m³	2,70 t/m³	
	Tamaño del grano		1	0,27 mm	0,27 mm	d50
	Concentración de los sedimentos por volumen	Durand - Condolios Dos - Capas		2,36 % 1,94 %	8,5 % 21 %	
	Temperatura del Agua			----	20 °C	No especificado para el modelo

Tabla 5.- Escalas usadas en el modelo CFE

La curva granulométrica del tamaño de partículas del prototipo y curva granulométrica de los materiales usados en el modelo físico se muestra en la siguiente figura:

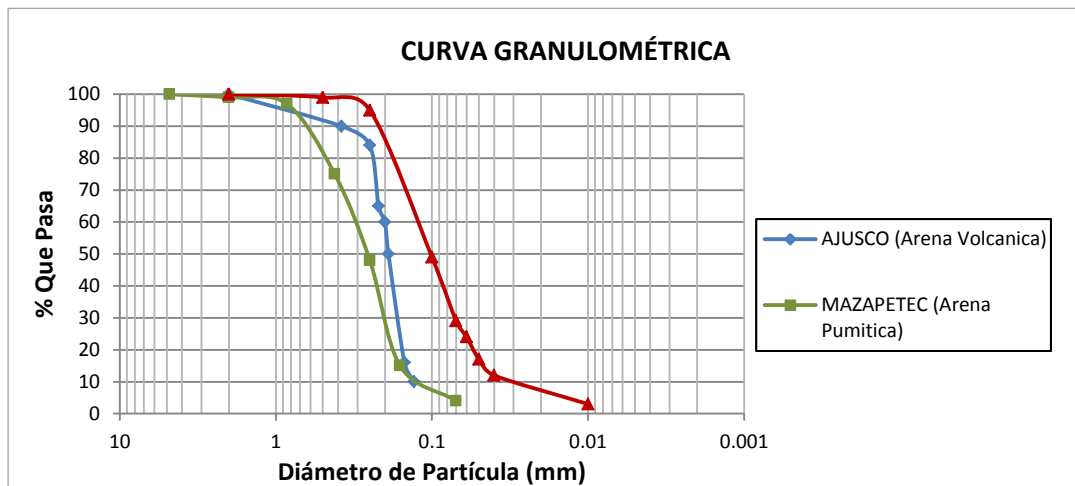


Figura 7.- Curva granulométrica del sedimento del prototipo y del sedimento del modelo CFE

La geometría de la sección transversal del desarenador, compuesto por 6 cámaras y considerando el sistema de lavado Succionador SEDICON se muestra en la siguiente figura:

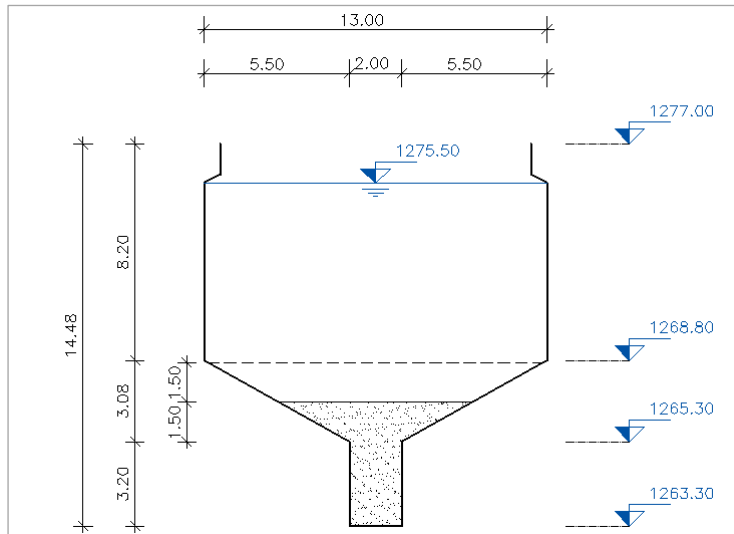


Figura 8.- Sección de la cámara para el sistema de lavado SEDICON

Puesto que este modelo fue realizado para el desarenador compuesto por 6 cámaras, el caudal de ingreso fue de $37\text{m}^3/\text{s}$ en la cámara número 6.

El sedimento sembrado para llevar a cabo cada uno de los ensayos fue vaciado en la cámara sedimentadora hasta alcanzar el nivel 1.50m o 3m en la tolva.

La sección trasversal del sistema SEDICON, se identificó como más ventajosa en lo que se refiere a volumen de sedimentos retenidos, ya que estos no solo se acumulan en la sección trapezoidal sino también en el canal rectangular de lavado.

3.2.1 Resultados de los ensayos del modelo de la CFE México

Como se mencionó antes, los ensayos fueron direccionados al funcionamiento del sistema de lavado SEDICON. Por esta razón, para cada ensayo se plantearon condiciones para un determinado espesor de sedimentos sembrados en el canal y la tolva de la cámara sedimentadora.

Selección del tipo de material para usar como sedimento en el modelo

Como opciones para material que represente el sedimento en el modelo físico, fueron seleccionados 4 tipos de material con los cuales se hicieron 2 ensayos previos. Dos tipos fueron desechados por problemas relacionados con cohesividad y compactación, y los dos restantes fueron usados para los diferentes ensayos.

Material 1: Arena Volcánica – Ajusco (A)Densidad de 2.55 Tn/m^3

Material 2: Arena Presa Soledad – Mazatepec (M).....Densidad de 2.42 Tn/m^3



Pruebas sobre el rendimiento del sistema de lavado SEDICON Sluicer

La remoción de sedimentos mediante el sistema de lavado SEDICON, se realizó a través de 5 módulos independientes, integrados a lo largo de cada cámara sedimentadora. Estos módulos de 30m de longitud, están compuestos por tubos ranurados de 450mm de diámetro que se asientan en la sección de la tolva y en la parte inferior del canal. Las tuberías ranuradas son unidas mediante unidades de acoplamiento en una tubería de salida, que asegura la distribución uniforme entre las dos tuberías ranuradas y mantenga un flujo equilibrado con una concentración máxima permisible. La operación de cada uno de los módulos pudo realizarse sola o de manera simultánea.

Las pruebas de rendimiento del sistema de lavado SEDICON, se hicieron para dos tipos de material y dos condiciones de espesor de sedimentos 1.50m y 3m.

Caudal y Volumen de Lavado

El caudal y volumen de agua a usarse para el lavado de los sedimentos acumulados en la sección trapezoidal del desarenador, se estableció en condiciones normales de operación (1275.5msnm - Toma y 1274.73msnm – Cuenca estabilizador). Para cada ensayo se varió el tipo de material, altura de sedimentos en la tolva y el nivel de agua en la descarga. Los resultados de dichos ensayos se muestran en la siguiente tabla:

Resultados del Modelo Físico de los Desarenadores Coca Codo Sinclair			
Niveles Normales en la Toma y en la Cámara Estabilizadora			
Descripción	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Caudal	Nivel en la toma	1275,50 msnm	1275,50 msnm
	Nivel en cuenco estabilizador	1274,73 msnm	1274,73 msnm
	Caudal Medido en la 6 cámara	37 m³/s	37 m³/s
Material	Tipo de Material	Ajusco	Mazatepec
	Densidad	2,55 Tn/m³	2,42 Tn/m³
Condiciones de Desazolve	Espesor de sedimento en la tolva	3 m	3 m
	Volumen de material a remover	1053 m³	1053 m³
	Nivel de agua en la descarga	1265 msnm
	Caudal medio empleado	0,87 m³/s	1,60 m³/s
	Tiempo medio empleado	7,40 h	0,86 h
	Volumen de agua para limpieza	115884 m³	24833 m³
Observaciones	Descarga ahogada	Descarga libre	Volumen de sedimenos igual a la condición 1,50m en el sistema Bieri

Tabla 6.- Determinación del caudal y volumen de agua para la remoción de sedimento por cámara

Según lo expuesto en la tabla, en el ensayo 5 se pusieron las mismas condiciones con las que se realizó la limpieza de la cámara con el sistema BIERI, para poder comparar la eficiencia de los dos sistemas de lavado de sedimentos.



Pruebas de Lavado para 1.50m y 3m de sedimentos

Las pruebas de lavado para diferentes espesores de sedimento desde el fondo de la tolva, consideran también el sedimento acumulado en el canal rectangular. Las pruebas se realizaron en este caso para afinar el nivel de descarga óptimo y determinar el consumo de agua por metro cúbico de sedimento depositado.

Se dividió en dos ensayos, según el espesor de la capa de sedimentos sobre la sección trapezoidal de la cámara de sedimentación y se determinó el volumen de agua requerido por el sistema para diferentes niveles de agua en el tanque amortiguador.

- Depósito de espesor 1.50m.- Con 1.50m a partir de la tolva (1053m^3) sumado al volumen de sedimentos del canal rectangular (960m^3) da como resultado un volumen acumulado de sedimentos de 2013m^3 . En condiciones normales de operación (1275.5msnm - Toma y 1274.73msnm - Cuenco estabilizador) y nivel de agua variando a la salida de la galería, de manera que el tirante de agua en la descarga oscile de 0.0m a 8m. Se requiere un consumo de agua de 11.90m^3 a 47.95m^3 por metro cúbico de sedimento depositado, para realizar el lavado de sedimentos.
- Depósito de espesor 3m.- Con 3m a partir de la tolva (3311m^3) sumado al volumen de sedimentos del canal rectangular (960m^3) da como resultado un volumen acumulado de sedimentos de 4271m^3 . En condiciones normales de operación (1275.5msnm - Toma y 1274.73msnm - Cuenco estabilizador) y nivel de agua variando a la salida de la galería, de manera que el tirante de agua en la descarga oscile de 0m a 8m. Se requiere un consumo de agua de 8.7m^3 a 29.64m^3 por metro cúbico de sedimento depositado, para realizar el lavado de sedimentos.

Los datos anteriores, sumados a un registro fotográfico, muestran el correcto funcionamiento del sistema de lavado SEDICON para el nivel máximo de sedimentos en la tolva (3m), lo cual le da una gran ventaja sobre el sistema BIERI. De acuerdo a los resultados en ambos modelos se puede resaltar que el sistema BIERI requiere un volumen de agua de 44841.60m^3 , mientras el sistema SEDICON requiere 23827.10m^3 de agua para realizar la limpieza en las mismas condiciones de operación y volumen de sedimentos.

3.3 Sistema de lavado del prototipo - SEDICON Sluicer

El informe de cálculo y diseño del sistema de lavado SEDICON fue desarrollado por la empresa SEDICON AS (www.sedicon.no/index), luego de que se definiera (por ensayos realizados en los modelos físicos) como el sistema de lavado más óptimo a aplicar en el prototipo del desarenador. En dicho informe se abordan criterios de diseño del sistema SEDICON, fundamento teórico y solución para la remoción de sedimentos, operación y mantenimiento. La geometría del prototipo del desarenador usado en el documento es la indicada en el capítulo dos (Figura 3).



3.3.1 Criterios de Diseño

En esta parte se describen las condiciones de entrada para el diseño de las unidades SEDICON, tales como, niveles de operación, granulometría del sedimento y la velocidad de sedimentación para los diferentes diámetros de partículas con los cuales se llevaron a cabo los cálculos.

Condiciones iniciales		
	Caudal de entrada en la captación	222 m³/s
	Nivel de agua en el desarenador	1275,10 msnm
Niveles de Operación y Caudal	Nivel de agua en la descarga	1266,33 msnm
	Número de cámaras sedimentadoras	8
	Caudal de ingreso en cada cámara	27,70 m³/s
	Caudal de lavado	2,30 m³/s
Sedimento	Concentración de Sedimentos Entrante	5 kg/m³
	Total de Sedimentos de Entrada	4140 Tn/h
	Carga de sedimentos en cada cámara	517,50 Tn/h
	Densidad de los sedimentos en Seco	1,50 Tn/m³
	Densidad de las partículas de Sedimento	2,65 Tn/m³

Tabla 7.- Condiciones iniciales para el diseño de las unidades SEDICON

En la curva granulométrica establecida, el tamaño de grano del sedimento presenta diámetros, entre 2mm y 0.20mm como se muestra en la figura a continuación. Esta difiere de la granulometría del cauce natural, para dar condiciones desfavorables al diseño del sistema de lavado.

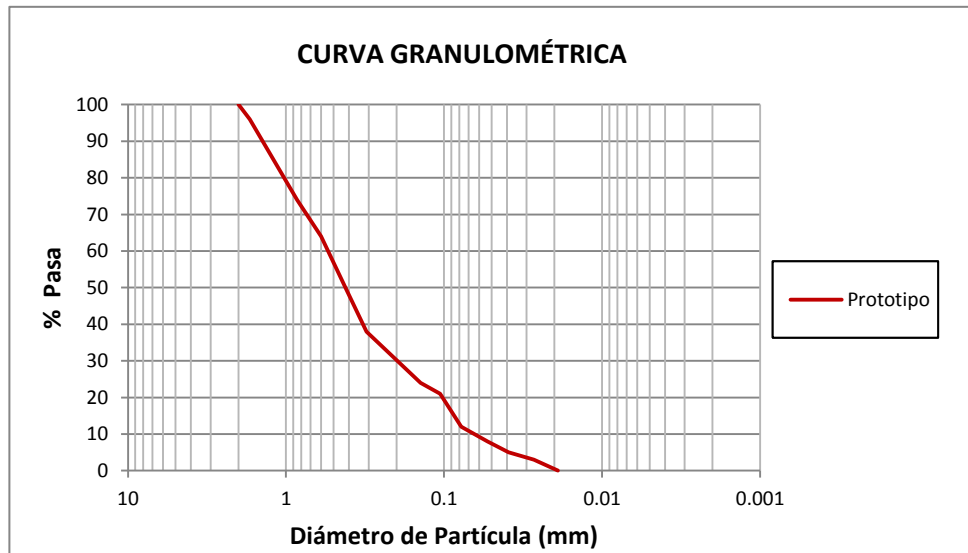


Figura 9.- Distribución granulométrica de las partículas de sedimento usadas para el cálculo de las unidades SEDICON en el prototipo.

La velocidad de sedimentación ha sido obtenida para 8 diámetros de partícula mediante la ecuación:

$$V_s = \sqrt{\frac{4 * g * d * (\rho - 1)}{3C_d}}$$

Donde el valor del coeficiente de arrastre C_d ha sido calculado mediante la ecuación de D. G. Thomas. Las velocidades se muestran en la siguiente tabla.



Tamaño de Partícula (mm)	Velocidad de Sedimentación (cm/s)
1.700	18.300
0.850	11.500
0.420	6.100
0.210	2.630
0.141	1.620
0.106	1.150
0.053	0.252
0.027	0.066

Tabla 8.- Velocidad de sedimentación de las partículas

3.3.2 Patrón de Depósito de Sedimentos en el Desarenador

Según el modelo numérico 2D denominado “SED-TRAP” llevado a cabo para el diseño de las unidades SEDICON, el comportamiento de los sedimentos en la cámara sedimentadora sería de la siguiente manera:

Distribución longitudinal de los sedimentos depositados por tamaño de partícula

Según el modelo numérico desarrollado por SEDICON, se determina la distribución granulométrica de los sedimentos en cada una de las 5 unidades de 30m en las que se ha dividido cada una de las cámaras sedimentadoras. En base a estas curvas obtenidas, se establece el tamaño de la partícula d_{50} en cada unidad, para poder aproximar la distribución longitudinal de las partículas en función de su tamaño.

La siguiente tabla muestra la unidad, distancia a la que se realizó la sección transversal para obtener la curva granulométrica y el valor de la partícula d_{50} de dicha curva granulométrica.

Tamaño Medio de Partícula en Cada Unidad		
Unidad	Distancia desde la Entrada (m)	Partícula d_{50} (mm)
1	12	0,90
2	35	0,70
3	62	0,30
4	92	0,19
5	128	0,10

Tabla 9.- Distribución longitudinal de las partículas en función de su tamaño

Ubicación de los depósitos de sedimentos

Lo esperado en cuanto al depósito de sedimentos, es que el material más grueso se asiente primero ocupando la parte inicial de la cámara, mientras el material más fino se deposita sucesivamente a lo largo de la cámara conforme el tamaño disminuye.

La distribución de los sedimentos a lo largo del desarenador calculado mediante SED-TRAP fue la siguiente:

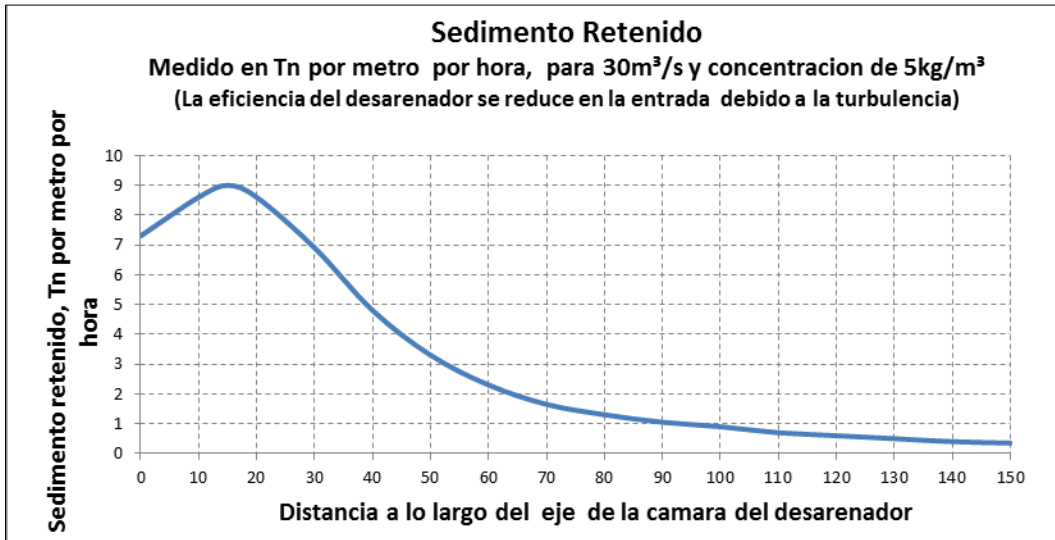


Figura 10.- Distribución de sedimentos a lo largo de la cámara del desarenador

Eficiencia del desarenador

Según las condiciones de operación del desarenador y las características de sedimento la eficiencia general proyectada para el sedimentador fue de 85%. Adicionalmente, si se considera partículas mayores a 0.20mm, la eficiencia del sedimentador resultante fue mayor al 99%.

Solución para la remoción de sedimentos

El informe hace referencia al diseño civil, a la explicación de los componentes y al cálculo de la capacidad de las tuberías en las unidades SEDICON, mediante los criterios de Durand - Condolios y Modelo de dos Capas. Luego de un análisis de los criterios y comparación con los resultados experimentales, el estudio decidió optar por el Modelo de dos Capas, el cual al ser aplicado determina en cada unidad la carga de sedimentos, tamaño medio de partícula, capacidad de lavado de sedimentos y consumo de agua por unidad.

CAPACIDAD DE LAS UNIDADES SEDICON (Concentración 5kg/m ³)						
UNIDAD		Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5
Longitud tubería de salida	m	30	53	80	110	146
Capacidad neta de remoción	tn/h	298	302	590	695	854
Max. Consumo de Agua	m ³ /s	1,21	1,11	0,99	0,90	0,83
Tiempo de llenado hasta 1264,7msnm	h	0,90	1,30	3,30	7,10	13,20
Carga de sedimentos en la unidad	t/h	197	143	66	35	23
Volumen antes del lavado	m ³	117,50	125	142,50	165	200
Peso	tn	176,30	187,50	213,80	247,50	300
Tiempo empleado para lavado	h	0,59	0,62	0,36	0,36	0,35
Tiempo de cada secuencia de lavado	h	1,50	1,90	3,6	7,5	13,5

Tabla 10.- Capacidad de las unidades SEDICON

Según los resultados de capacidad dados por el modelo seleccionado, fue determinado el caudal de lavado de 2.3m³/s (considerando que las unidades uno y dos funcionen simultáneamente)



4 MÉTODOS

Para la simulación numérica del flujo de sedimentos en el desarenador de estudio, se ha considerado implementar el modelo numérico SSIM (Sediment Simulation In Water Intakes with Multiblock option), a fin de obtener el patrón de flujo de agua y de los procesos asociados de transporte de sedimentos. Dadas las diferentes condiciones y consideraciones hechas en los estudios de modelización física tanto para el estudio del comportamiento de los sedimentos así como para el sistema de lavado, en el presente trabajo se ha optado por dividir la simulación numérica en dos partes.

La primera parte comprende la simulación del flujo de agua limpia en el prototipo del desarenador, bajo las mismas condiciones iniciales propuestas en los ensayos del modelo físico. De esta simulación se han obtenido las velocidades de flujo a lo largo de la cámara a diferentes niveles y la dirección de los vectores de velocidad. Así mismo, se ha identificado la presencia o formación de vórtices y flujos preferenciales.

La segunda parte simula el comportamiento de los sedimentos, a fin de obtener valores de concentración de sedimentos a lo largo de la cámara, diámetro mínimo retenido y zonas de depósito. La simulación del flujo de sedimentos, se ha realizado a nivel de prototipo para poder efectuar un estudio comparativo con los resultados del estudio de sedimentos llevado a cabo para el diseño del sistema de lavado (SEDICON Sluicer) del desarenador.

4.1 Dinámica de Fluidos Computacional

La dinámica de fluidos computacional (CFD) por sus siglas en inglés, es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para simular el comportamiento de los flujos de fluidos y fenómenos de transferencia de calor y materia. Para esto se basa en la resolución numérica de las ecuaciones fundamentales de conservación de la masa, conservación del *momentum* y ecuación del transporte.

Los modelos CFD trabajan dividiendo el dominio de interés (geometría), 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, condiciones iniciales y definición de los parámetros de cálculo.
- *Solución numérica:* Afinación de parámetros de entrada y cálculo, refinamiento de la malla y obtención de resultados.
- *Análisis de resultados y generación de representaciones*



Mallas Computacionales

La generación de la malla normalmente es la que demanda mayor cuidado y tiempo en un modelo CFD, pues su calidad se ve reflejada en los resultados. Según su configuración las mallas se dividen en 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 se 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*: Una 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 está 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.

Simulación Numérica de Procesos Hidrodinámicos

Una simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en un computador, las cuales requieren ciertos tipos de modelos lógicos y matemáticos, que describen el comportamiento de un fenómeno (o algún componente de este) en períodos de tiempo ⁽¹³⁾.

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 ($k-\epsilon$, $k-\omega$), hasta los modelos de tensión de Reynolds (RMS). Una vez finalizada la simulación, provee de resultados en puntos discretos del espacio y/o tiempo ⁽¹⁴⁾.

Estabilidad y Convergencia

Se dice que un método de solución numérica es estable, si no maximiza el error que aparece en el curso del proceso de solución. Para el caso de métodos iterativos, un método es estable si no diverge.

En lo que refiere a convergencia, se dice que un método numérico es convergente si la solución iterativa de las ecuaciones discretizadas, tiende a la solución exacta de las ecuaciones continuas cuando el espaciamiento de la malla tiende a cero.

¹³ (Naylor, 1996)

¹⁴ (Novak, Moffat, & Nalluri, 2001)



4.2 Modelo numérico SSIIM

4.2.1 Generalidades

SSIIM (Sediment Simulation In Water Intakes with Multiblock option), es un programa desarrollado para la aplicación en investigaciones de Ingeniería Hidráulica en el estudio de flujo de agua y procesos de sedimentación que simula el movimiento de agua y sedimentos mediante una aproximación de un volumen de control con una malla tridimensional no ortogonal. El programa fue desarrollado en 1991 por la División de Ingeniería Hidráulica del Instituto Noruego de Tecnología. SSIIM es un software de uso libre, su instalador y manual pueden descargarse gratuitamente de <http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim/>.

Para calcular el flujo de agua, SSIIM resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes con el modelo de turbulencia k-epsilon, mientras que el transporte de sedimentos se soluciona con la ecuación de convección-difusión. Estos cálculos a su vez son dependientes del tiempo y del mallado vertical móvil que toma en cuenta los cambios de nivel del agua y del lecho ⁽¹⁵⁾.

Existen dos versiones del programa, SSIIM1 y SSIIM2, siendo la principal diferencia entre estos, que en la primera se usa una malla estructurada de un solo bloque; y en la segunda se emplea una malla no estructurada que le permite generar más de un bloque. Una importante ventaja de la versión 2 sobre la versión 1, es la capacidad de generar algoritmos que modelicen geometrías complejas y simulen procedimientos de humedecido y secado de las mismas, mientras que SSIIM1 modeliza cuerpos de agua menores y más definidos ⁽¹⁶⁾. Es posible trabajar con las dos versiones simultáneamente, generando un mallado en SSIIM1 y transfiriéndolo a SSIIM2 o viceversa. Sin embargo, es importante mencionar que las dos versiones se encuentran aún en etapa de validación siendo la versión más nueva (SSIIM2) la más propensa a errores. En el presente trabajo, se hace uso de la versión SSIIM1 por lo que, para menciones posteriores, cuando se hable de SSIIM se hará referencia a dicha versión.

4.2.2 Fundamentos Hidráulicos del Modelo

Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier Stokes son un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen cómo la velocidad, presión, temperatura, y la densidad de un fluido en movimiento están relacionadas. En la práctica, estas ecuaciones son muy difíciles de solucionar analíticamente por lo que actualmente se hace uso de los ordenadores para resolver las aproximaciones a la ecuaciones usando una variedad de técnicas como las diferencias finitas, volumen finito, elementos finitos, y métodos espectrales.

Las ecuaciones de Navier-Stokes (Conservación del *Momentum*) para flujo turbulento se resuelven para obtener la velocidad del agua, mientras que el modelo k-ε se utiliza

¹⁵ (Olsen, 2012)

¹⁶ (Olsen N. , 2012)



para calcular el esfuerzo cortante turbulento. Estas ecuaciones para un flujo de densidad no compresible y constante se expresan de la siguiente manera (17).

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j)$$

El primer término de la izquierda es un término transitorio, mientras que el segundo es un término convectivo. Al lado derecho de la ecuación, el primer término hace referencia a la presión mientras que el segundo refiere al esfuerzo de Reynolds.

Modelo de Turbulencia k-ε

El concepto de viscosidad con el modelo de turbulencia k-ε se utiliza para modelar el término de esfuerzo de Reynolds.

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

Los dos primeros términos del lado derecho de la ecuación forman 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-ε se expresa como:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon}$$

Definiéndose la energía cinética turbulenta k como:

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

k se modela como:

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

Donde P_k es dado por:

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

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

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

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

¹⁷ (Olsen N. , 2012)



Leyes de Pared

Se usa la ley de pared de los límites aproximados, según lo 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.

4.2.3 Modelo del Transporte de Sedimentos

El transporte de sedimentos convencionalmente se divide en, carga de fondo y carga suspendida. El movimiento y dispersión de sedimentos suspendidos en un cuerpo de agua, es calculado mediante la ecuación de Convección-Difusión con la fórmula de Van Rijn ⁽¹⁸⁾.

En la ecuación de convección-difusión el primer término expresa la convección de los sedimentos, es decir sedimentos transportados a través de las paredes del volumen finito, debido a la velocidad del agua en la pared. El segundo término indica la velocidad de caída de los sedimentos.

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

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

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

S_c es el número de Schmidt ajustado a 1 por defecto en el modelo (SSIM), aunque este puede ser modificado.

Para la carga suspendida Van Rijn desarrolló la siguiente fórmula de concentración.

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

Donde:

D_{50} = Diámetro de la partícula de sedimento

τ = Esfuerzo de corte en la cama

τ_c = Esfuerzo de corte crítico para el movimiento de partículas de sedimento

ρ_s = Densidad del sedimento

ρ_w = Densidad del agua

ν = Viscosidad del agua

g = Aceleración de la gravedad

a = Nivel de referencia equivalente a la altura de rugosidad

¹⁸ (Olsen N. , 2012)



4.2.4 Capacidades y Limitaciones del modelo SSIIM

La implementación de SSIIM puede ser hecha para múltiples aplicaciones, siendo de gran interés el cálculo de flujo de agua y de flujo y transporte de sedimentos, tema que engloba las siguientes posibles simulaciones ⁽¹⁹⁾:

- Cálculo de flujo permanente de agua con superficie y fondo de agua fijos.
- Cálculo de flujo no permanente de sedimentos con superficie y fondo de agua fijos.
- Cálculo de flujo no permanente de agua con superficie y fondo de agua fijos.
- Cálculo de flujo no permanente de agua con movimiento de la superficie de agua y fondo fijo.
- Cálculo de flujo no permanente de agua y sedimentos con superficie de agua fija y fondo móvil.
- Cálculo de flujo no permanente de agua y sedimentos con superficie y fondo de agua móviles.

Así mismo, SSIIM presenta algunas limitaciones:

- No considera los términos de difusión no ortogonales.
- En el mallado, las líneas en dirección vertical deben ser exactamente verticales.
- La viscosidad cinemática del fluido es equivalente a la del agua a 20°C. Ésta característica es parte de la codificación de SSIIM, por lo que, no se puede modificar.
- Debido a que el programa no ha sido desarrollado para ambientes marinos, los efectos de gradientes de densidad a causa de las diferencias de salinidad, no son consideradas.

4.2.5 Funcionamiento

SSIIM utiliza el método del volumen de control, es decir que, el cuerpo de agua a modelar debe discretizarse en volúmenes tridimensionales definidos por celdas en tres direcciones de preferencia ortogonales, cuyo tamaño y alineamiento tiene mayor influencia en la convergencia, precisión y tiempo computacional de la simulación.

Como todo programa de CFD, SSIIM consta de tres pasos:

1. Pre-procesamiento.- Generación de la malla e ingreso de datos de entrada. Para el mallado debe considerarse la perpendicularidad de las líneas de cada celda; no deben existir ángulos menores a 45°, de no ser así, la convergencia de la solución es más lenta o no se da ⁽²⁰⁾.
2. Cálculos.- Cálculos de la velocidad del agua, flujo de sedimentos, cambios en los niveles de agua, etc. El cálculo finaliza 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 (X, Y y Z), continuidad, modelo de turbulencia k- ϵ , son menores a 1E⁻³ y se escribe el archivo de resultados.

¹⁹ (Olsen N. , 2012)

²⁰ (Olsen N. , 2012)



3. Post-procesamiento.- Visualización de resultados, ya sea con las vistas en planta, transversal o longitudinal generadas en SSIIM propiamente o a través de programas como, Tecplot y ParaView. Se generan vistas en 2D y 3D de la red y se visualizan los resultados de las variables que intervienen en la modelización del cuerpo de agua.

4.2.6 Ejecución de SSIIM y Procedimientos

Para ejecutar la simulación, al abrir el programa SSIIM emerge una ventana en la cual se ingresan los datos de entrada que el programa requiere para la generación del cuerpo de agua mediante una malla computacional. Los datos requeridos son: longitud, ancho y profundidad del cuerpo de agua, así como el número de secciones transversales y longitudinales que conformarán la malla. (Figura 12). Dados los datos iniciales, aparece la ventana principal del programa en la cual, está presente la barra de herramientas con las que se puede trabajar manualmente para editar la red del mallado y dar forma a la misma (en caso de geometría sencilla), editar datos de sedimentos, para activar vistas en planta, longitudinal y transversal del cuerpo de agua, para visualizar los vectores de velocidad del flujo, etc. (Figura 13). Una vez ingresados los datos de la geometría y mallado, en el mismo directorio se generan tres archivos nuevos (Figura 14): *boogie*, *control* y *koordina* los mismos que, para ser leídos o modificados, necesitan del bloc de notas.

Archivos de Pre - Procesamiento

Koordina.- Aquí se guardan el número de secciones transversales y longitudinales con las que se ha generado la malla computacional. Su formato es como sigue:

i j x y z

Donde:

- i: número de secciones transversales del nodo
- j: número de secciones longitudinales del nodo
- x: coordenada en las abscisas del nodo
- y: coordenada en las ordenadas del nodo
- z: coordenada en el eje vertical del nodo

En el presente trabajo, por haberse tratado de geometrías diferentes a las convencionales, ha sido necesario modificar éste archivo para obtener el mallado ideal para la modelización. Un método muy práctico recomendado para resolver esto es mediante el uso de Autocad, Excel y el editor de mallas de SSIIM ⁽²¹⁾.

En base a los planos de Autocad con la geometría del cuerpo de agua a simular, se ha realizado una propuesta de mallado, dividiendo en tantos segmentos como se requiera a las líneas de contorno (laterales, de entrada y salida) del cuerpo de agua. Para obtener un buen mallado tanto en dirección longitudinal (x), transversal (y) y vertical (z), se ha procurado que cada volumen mantenga la misma relación de longitud en las tres dimensiones. Los puntos de los segmentos que integran las líneas de contorno, se han unido mediante una polilínea y fueron exportados a Excel con ayuda del comando *List* de Autocad.

²¹ (Ordinola, 2009)



Realizado esto, se han modificado los puntos en Excel de tal manera que su formato sea el mismo que el del archivo *koordina* y se han reemplazado los nuevos puntos en el archivo generado inicialmente. Se ha procedido con la ejecución del programa, implementándose la geometría con la opción *View*→ *GridEditor* y luego con *Generate*→ *Transfinite I*→ *Implementation*.

En un principio, el valor de la coordenada z es asumida cero, esto se debe a que los valores de los diferentes niveles verticales no han sido modificados. Se ha creado entonces un archivo adicional llamado *geodata* el cual fue editado con Excel y el bloc de notas.

Geodata.- Contiene la topografía o batimetría sobre la que se ha de moldear el fondo del cuerpo de agua. Aquí se ha definido el valor de z según el formato que se indica abajo. Al ser leído e implementado con las opciones *View*→ *Grid Editor* y *Generate*→ *Implementation* por SSIIM, se modifica el archivo *koordina*, tomando los nuevos valores productos de la interpolación de las curvas de nivel contenidas en el archivo *geodata*. Su formato es el siguiente:

$$E \quad x \quad y \quad z$$

Donde:

E: se usa para contar el número de puntos.

x: coordenada en las abscisas.

y: coordenada en las ordenadas.

z: altura del fondo de agua.

Después de la última línea con las coordenadas del último punto, se ha agregado una línea más con el siguiente formato:

$$Z \quad x_T \quad y_T \quad z_T$$

Donde:

x_T : total de coordenadas en x

y_T : total de coordenadas en y

z_T : total de coordenadas en z

Implementada la geometría en su totalidad (Figura 15 y Figura 17), para empezar la simulación se ha definido los procesos de cálculo en dos etapas; la primera que es la referente al patrón de flujo de agua (Figura 16) y la segunda al flujo de sedimentos (Figura 24). Para ello se ha modificado el archivo control generado inicialmente.

Innflow.- Este archivo se usa para leer las velocidades en tres direcciones para la condición de frontera aguas arriba. Al correr SSIIM el programa busca el archivo y usa los datos. Si el archivo no existe, se escribe un mensaje de advertencia en el archivo *boogie* y el programa continúa normalmente.

En cada línea se inicia con el caracter E, seguido de los índices j, k (horizontal y vertical) y los componentes de velocidad x, y, z de cada una de las celdas de la sección transversal aguas arriba (Figura 20). El archivo presenta la siguiente estructura:

$$E \quad j \quad k \quad x \quad y \quad z$$



Control.- En este archivo se almacenan los algoritmos necesarios para la simulación, es decir, aquí se ingresan las condiciones hidráulicas y numéricas que van a gobernar el modelo. El ingreso de dichas condiciones se ha realizado mediante los data set, los cuales cumplen con el siguiente formato:

“Letra mayúscula” “Número” “Datos”

En el cuadro siguiente, se muestran los comandos empleados en el *archivo control* para la simulación del patrón de flujo ⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾:

T	Título de la simulación.
F 2 W	Ejecución automática del cálculo de flujo.
G 1	Número de secciones, transversales, longitudinales y 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 de agua.
W 1	M de Strickler, caudal de entrada y tirante aguas abajo.
W 2	Secciones de análisis para la interpolación de la superficie de agua.
W 4	Condiciones de pared.
K 1	Total de iteraciones e intervalo de actualización de la superficie de agua.
K 2	Leyes de pared laterales y superficie.

Tabla 11.- Archivo control - Cálculo del flujo de agua

Una vez que se ha corrido SSIIM con este nuevo archivo control, se genera automáticamente en el mismo directorio donde se está corriendo el programa, un archivo llamado *result*, el cual contiene los cálculos del flujo de agua, que se han tomado para el cálculo del flujo de sedimentos. Resuelto el cálculo del flujo de agua, se ha procedido con el cálculo de flujo y transporte de sedimentos con los algoritmos descritos a continuación:

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 θ
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 de sedimentos, sin que se vuelva a calcular el flujo de agua.
G 1	Número de secciones, transversales, longitudinales y 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 de agua.
G 21	Algoritmo para 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 en el 100%
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	Secciones de análisis para la interpolación de la superficie de agua.
W 4	Condiciones de pared.
K 1	Total de iteraciones e intervalo de actualización de la superficie de agua.
K 2	Leyes de pared laterales y superficie.

Tabla 12.- Archivo control – Cálculo flujo de sedimentos

²² (Ordinola, 2009)

²³ (Agraval, 2005)

²⁴ (Olsen N. , 2012)



Archivos de Post – Procesamiento

Result.- Este archivo de salida se escribe luego de converger el cálculo del flujo de agua. Los resultados descritos son los valores de cinco variables calculadas para cada celda. Dichas variables son: Velocidad del agua en tres direcciones (x,y,z), presión, energía cinética de turbulencia (k) y la disipación de la energía turbulenta (ϵ). Este archivo ha sido usado como dato de entrada para los cálculos del flujo de sedimentos.

Boogie.- Aquí se registran los resultados intermedios del cálculo; muestra la eficiencia de atrapamiento y distribución del tamaño del grano del sedimento. Si se usa la opción F1 D, es posible obtener parámetros de las secciones transversales como área de la sección transversal, radio hidráulico, velocidad promedio y tirante de agua. Si al realizar la simulación se presentan problemas en la convergencia o con el mallado, es en este archivo donde se registran los posibles errores cometidos. Si los resultados son satisfactorios, *boogie* indica también la memoria computacional requerida para la convergencia.

Conres.- Es un archivo que se escribe luego del cálculo del flujo de sedimentos. Cada línea presenta tres índices que indican el número del nodo, seguido del valor de la concentración total y por último se escriben las concentraciones (como fracciones de volumen) para cada tamaño de partícula.

Fracres.- Cada línea del archivo describe una célula del fondo. Los dos primeros números identifican la célula en la red estructurada. El tercer número da el espesor de la capa activa de sedimentos en metros, seguida de las fracciones de cada tamaño de sedimentos. Por último se indica el valor de la capa inactiva y las fracciones de cada tamaño de sedimentos en esta capa.

XCYC y Koosurf .- Contienen la geometría de la rejilla, estos archivos se usan cuando se reinician cálculos que han cambiado la malla. El *koosurf* es idéntico al archivo *koordina*, excepto que el nivel de la superficie es también escrita en cada línea. El archivo *xcyc* contiene los valores de las direcciones x, y y z de todas las intersecciones de la malla.

4.2.7 Simulación numérica e implementación de SSIIM

Luego de revisar y analizar las condiciones de ensayo y finalidad de estudio, tanto en los modelos físicos (Yellow River y CFE) como en el modelo numérico para el diseño del sistema de lavado (SEDICON). De acuerdo a los objetivos del presente trabajo, se ha visto procedente simular únicamente el tramo que comprende a la zona de sedimentación de la cámara, así como el optar por dividir en dos partes la simulación en SSIIM para poder comparar y discutir los resultados bajo las diferentes condiciones.

Las razones para dicha división son las siguientes:

- En ninguno de los tres casos revisados se presenta un estudio completo del comportamiento de flujo de agua y de sedimentos en la cámara sedimentadora.
- Las condiciones de entrada, material, granulometrías y geometría del desarenador especialmente en la sección transversal, difieren en los tres informes revisados.



- El estudio desarrollado por la CFE en el modelo físico, se centra más en las capacidades del sistema de lavado (SEDICON), al enfatizar las condiciones de desazolve.
- El registro del patrón de flujo de agua limpia y comportamiento hidráulico de la cámara sedimentadora, se realiza únicamente en el modelo físico Yellow River.
- El comportamiento de los sedimentos fue estudiado solo a nivel de prototipo en el informe de diseño y cálculo del sistema de lavado SEDICON.
- En los ensayos de prueba de los dos sistemas de lavado (BIERI y SEDICON) en los modelos físicos, se colocó el sedimento directamente en la tolva, lo cual no permitió registrar y evaluar el asentamiento y distribución del mismo.

Lo expuesto anteriormente ha llevado a plantear y realizar la simulación numérica de acuerdo al siguiente esquema:

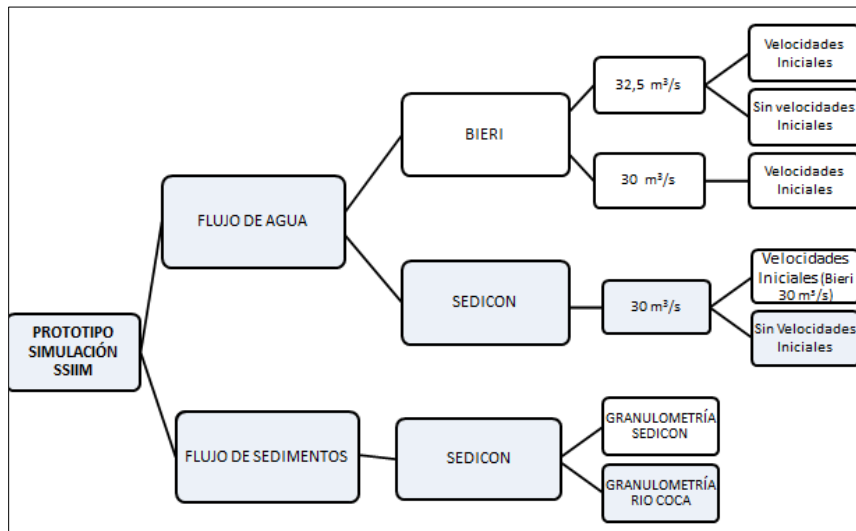


Figura 11.- Diseño del proceso de simulación en SSIIM

Las celdas resaltadas en color corresponden a un desarrollo completo de los análisis y resultados.

La primera parte comprende la *simulación del flujo de agua* limpia para dos escenarios diferentes:

- *Escenario 1:* Condiciones iniciales propuestas en el estudio del modelo físico Yellow River. Es decir, geometría BIERI para caudal de $32.5\text{m}^3/\text{s}$ y niveles normales de operación; planteando la simulación con y sin valores iniciales de velocidad. Se ha llevado a cabo esta simulación con el fin de observar la importancia de dar velocidades iniciales y evaluar la sensibilidad del modelo numérico; ante el cambio de parámetros en las condiciones de borde y parámetros matemáticos para el cálculo en SSIIM. En esta configuración de modelización, se ha simulado también con un caudal $30\text{m}^3/\text{s}$ a fin de obtener datos de velocidades iniciales que se han aplicado en el Escenario 2.
- *Escenario 2:* Condiciones del diseño definitivo. Geometría (SEDICON) para caudal $30\text{m}^3/\text{s}$, planteando la simulación con y sin valores iniciales de velocidad.



De la simulación del flujo de agua se han obtenido resultados como, vectores de velocidad de flujo en secciones longitudinales y transversales, velocidades horizontales, esfuerzos de corte en el fondo de la cámara y localización de flujos preferenciales.

La segunda parte constituye la *simulación del flujo de sedimentos*. Una vez resuelta la simulación del flujo de agua para el Escenario 2 sin considerar valores iniciales de velocidad, se llevó a cabo la simulación del flujo de sedimentos para dos granulometrías diferentes:

- Granulometría 1: Planteada por SEDICON para el diseño del sistema de lavado. Esta simulación se ha hecho con la finalidad de comparar los resultados del estudio con la simulación.
- Granulometría 2: Perteneciente al cauce natural (Rio Coca).

Los resultados de esta parte de la simulación muestran valores de concentración de sedimentos, zonas de depósito a lo largo de la cámara, diámetro mínimo retenido, aspectos de la eficiencia del desarenador.

4.3 Simulación del Flujo de Agua

4.3.1 SEDICON (Sin velocidades iniciales)

Condiciones Iniciales

La simulación numérica del flujo de agua sin carga de sedimentos para los diseños definitivos del desarenador con sistema de lavado SEDICON se ha realizado como paso previo al cálculo del Flujo de sedimentos con las siguientes condiciones iniciales.

Simulación del Flujo de Agua en la Cámara Desarenadora Geometría - Sedicon	
Condiciones Iniciales	
Sistema de Lavado	Sedicon
Número de Cámaras	8
Caudal Entrada	27,70 m ³ /s
Caudal de Lavado	2,3 msnm
Nivel de Agua en la Cámara	1275,10 msnm
Rugosidad Ho (Bien Terminado)	0,013
Temperatura de Agua	20 °C

Tabla 13.- Condiciones Iniciales – Simulación de flujo (Geometría SEDICON)

El caudal de entrada, corresponde al caudal normal de operación (30m³/s) para cada una de las 8 cámaras cuando se capta 222m³/s, el nivel de agua en la desviación es de 1275.5msnm y el nivel el cuenco amortiguador de 1274.73msnm.

Geometría

Para el estudio del patrón de flujo de agua y flujo de sedimentos, no se consideró toda la geometría de la cámara N°8 del desarenador desde la entrada hasta el cuenco amortiguador. Para el estudio se ha tomado un tramo de 159m de longitud por 13m de ancho comprendido entre la tercera rejilla tranquilizadora y la compuerta que conecta con el cuenco estabilizador. Es decir se ha modelado geoméricamente una zona

previa a la cámara de sedimentación (3m), cámara de sedimentación (150m), y una parte de la conexión con el cuenco estabilizador (6m). El valor del nivel de agua 1275.10msnm que se indica en las condiciones iniciales corresponde a 11.40m desde la base en la geometría ingresada. Esto se puede observar claramente en el *Anexo 1*.

Archivo Control - Generación de la Malla Computacional

La malla computacional que contiene la geometría de los volúmenes que integran el cuerpo de agua a modelar, se ha generado mediante Autocad hasta definir las dimensiones más convenientes para los volúmenes (Capítulo 4.2.6). En esta etapa también se ha revisado zonas con geometrías que puedan provocar divergencia o lenta convergencia (cuando se forman ángulos menores a 45°). Se realizaron 2 modificaciones.

- En la zona inicial de la cámara se incrementaron 3m en los cuales se mantiene la geometría de la sección transversal de la cámara, por conveniencia de cálculo en SSIIM. *Anexo 1*
- La segunda variación en el mallado tiene que ver con la modificación de la geometría al final de la cámara al conectarse con el canal que conduce hacia el cuenco estabilizador. Aquí se ha cambiado la pared vertical al final de la cámara por una inclinada que forma un ángulo de 72° con la horizontal. *Anexo 1*

Luego de revisar bibliografía referente al mallado y consultar con el manual de SSIIM, se optó por trabajar con un mallado cuyos volúmenes sean de aproximadamente 1m en las tres dimensiones. Para esto se establecieron los siguientes números de secciones:

- 159 Secciones Transversales
- 15 Secciones Longitudinales
- 13 Secciones Verticales

Al abrir SSIIM, la información requerida inicialmente son los valores de longitud, ancho del canal, nivel de agua en el cuerpo, número de secciones transversales y número de secciones longitudinales.

Una vez ingresados estos datos una nueva ventana emerge donde se muestran los valores de los residuales que luego al correr la simulación, indican la convergencia del modelo.

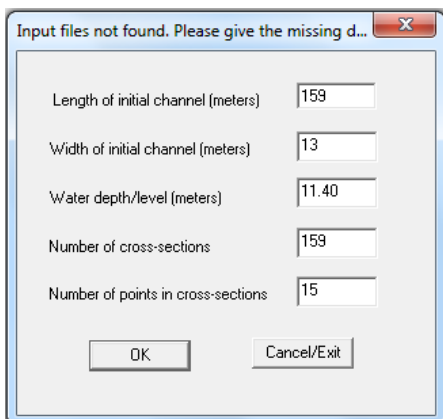


Figura 12.- Valores de entrada
SSIIM-SEDICON

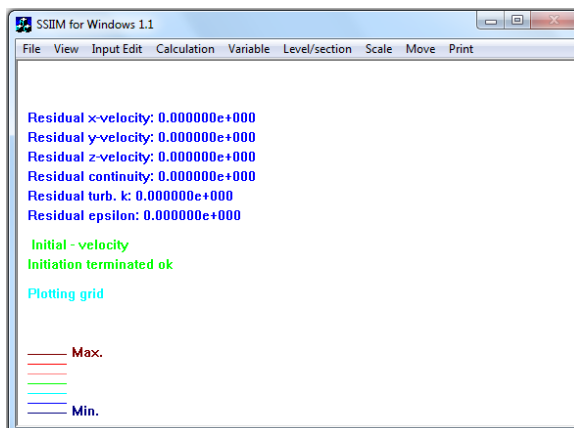


Figura 13.- Ventana previa a la
Simulación-SSIIM



A continuación al recurrir a los comandos *View → Grid Editor*, *View → Cross Section*, *View → Longitudinal*, es posible visualizar una malla rectangular con el número de secciones indicadas anteriormente. Esta malla debe ser modificada en el archivo *koordina* con las coordenadas de los puntos sacados de los planos de Autocad que definen los límites del cuerpo de agua y las secciones transversales. Para esto se cierra SSIIM y en el directorio donde se ejecutó el programa aparecen los archivos que se generan automáticamente dentro de los cuales está el *koordina*.

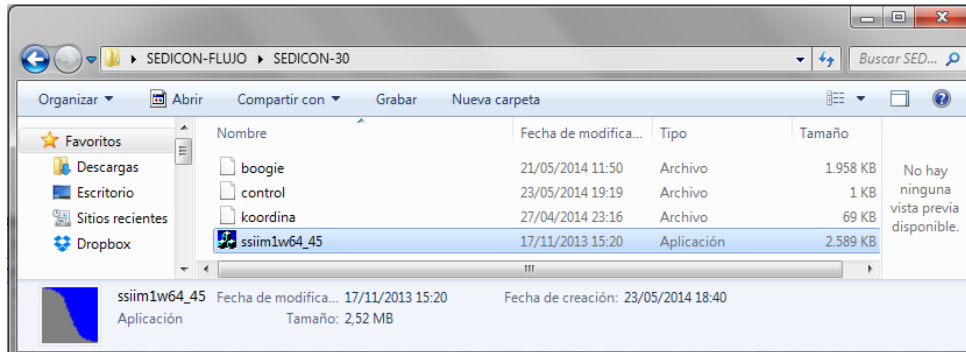


Figura 14.- Archivos boogie, control y koordina generados automáticamente en SSIIM

Una vez editada la malla en Excel y Bloc de Notas se reemplaza el archivo *koordina* inicial. Dada la simplicidad de la geometría de la cámara se omitió la creación del archivo *geodata* para los niveles de la cama, por lo que estos fueron modificados también en el archivo *koordina* simultáneamente con las coordenadas X y Y.

El archivo *koordina* finalmente obtenido corresponde a:

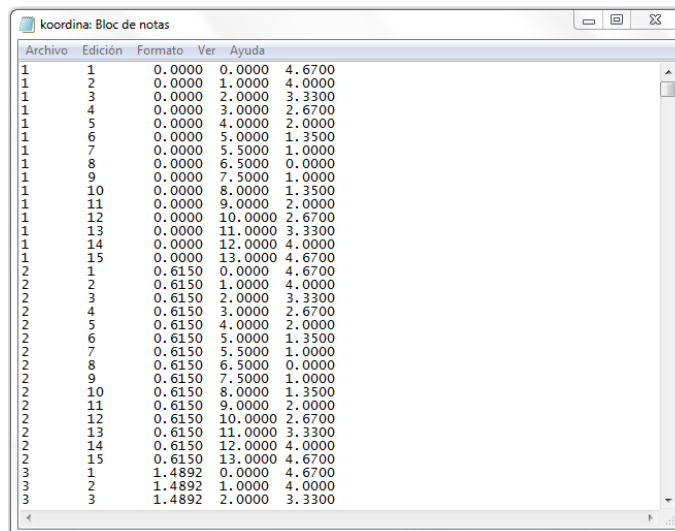


Figura 15.- Estructura del archivo koordina modificado.

También debe modificarse el archivo *control* con los data sets para la simulación del flujo de agua. El archivo control empleado se muestra en la figura siguiente:

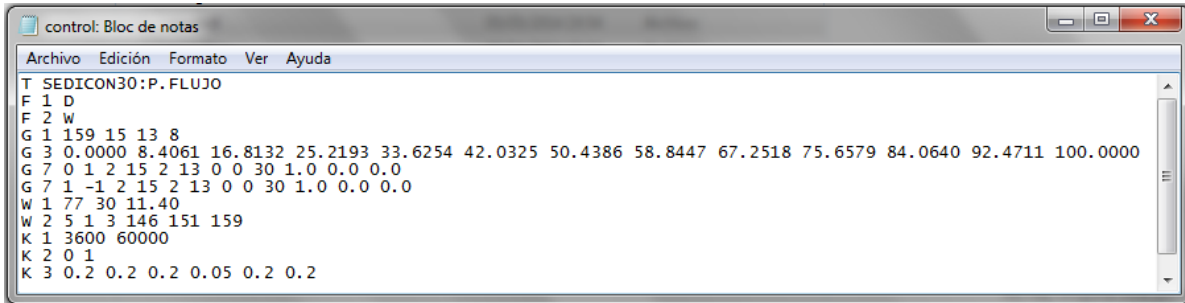


Figura 16.- Archivo control - Simulación de flujo de agua – sin velocidades iniciales

Al correr nuevamente SSIIM con los archivos *koordina* y *control* modificados, y visualizado el mallado definitivo se tiene:

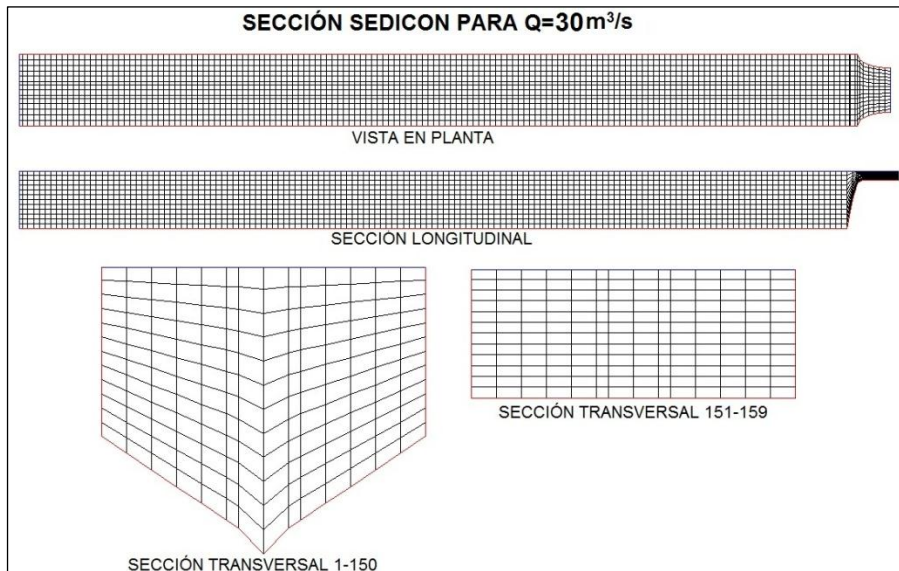


Figura 17.- Secciones del mallado – SSIIM

Finalmente, mediante los comandos *Calculation* → *Waterflow 3D* se calcula el flujo de agua y tras esperar el tiempo que esta simulación requiere para que su solución converja (residuales menores a $1E^3$), se obtuvieron los siguientes valores en los residuales.

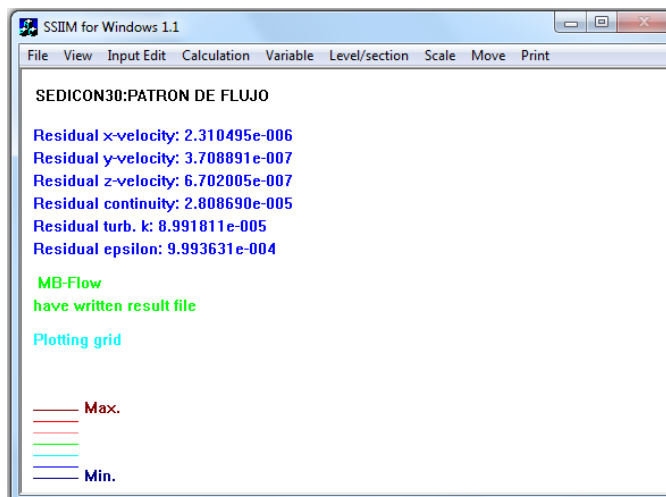


Figura 18.- Residuales luego de la convergencia – Cálculo flujo de agua

4.3.2 SEDICON (Con velocidades iniciales)

Condiciones Iniciales

También se ha estudiado el comportamiento del patrón de flujo de agua, cuando a la entrada de la cámara se da valores iniciales de velocidad. Es decir, la velocidad inicial no está condicionada únicamente por el caudal y el área de la sección transversal de ingreso, sino por corrientes de flujo preferencial formadas en el canal que conecta la captación con la cámara sedimentadora. Las velocidades iniciales aplicadas a las condiciones geométricas y de caudal del diseño definitivo, se sacaron a partir de las mediciones obtenidas en la simulación BIERI para caudal de $30\text{m}^3/\text{s}$ como se explica más adelante.

Los otros valores de entrada para la simulación como caudal, niveles de operación, rugosidad, etc. son los mismos indicados en la Tabla 13.

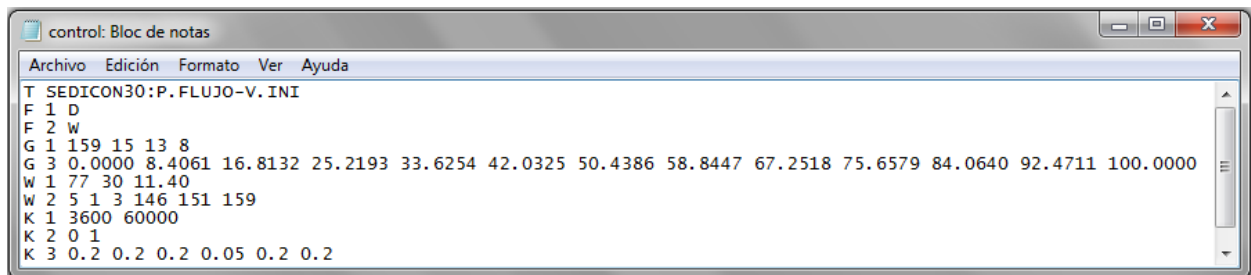
Geometría

En cuanto a la geometría se mantiene la misma indicada en la Figura 17.

Archivo Control - Generación de la Malla Computacional

Al incorporar velocidades iniciales, el archivo control difiere en el uso del data set G7, el cual se suprime ya que el programa debe leer un archivo de entrada denominado *inflow* (creado en el directorio donde está el ejecutable de SSIIM), que contiene las velocidades para cada celda del mallado de la primera sección transversal del modelo numérico.

La estructura del archivo control es la que muestra a continuación:



```

control: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
T SEDICON30:P. FLUJO-V. INI
F 1 D
F 2 W
G 1 159 15 13 8
G 3 0.0000 8.4061 16.8132 25.2193 33.6254 42.0325 50.4386 58.8447 67.2518 75.6579 84.0640 92.4711 100.0000
W 1 77 30 11.40
W 2 5 1 3 146 151 159
K 1 3600 60000
K 2 0 1
K 3 0.2 0.2 0.2 0.05 0.2 0.2

```

Figura 19.- Archivo control - Simulación de flujo de agua – con velocidades iniciales

Para obtener las velocidades a partir de puntos ya conocidos y poder asignar valores a cada celda, para crear el archivo *inflow*, con ayuda de Autocad Civil 3D se han interpolado los valores de velocidad conocidos y se han generado curvas de velocidad dentro de la sección de estudio.

La figura a continuación indica la interpolación generada en Autocad Civil 3D y el archivo *inflow* estructurado a partir de la gráfica.

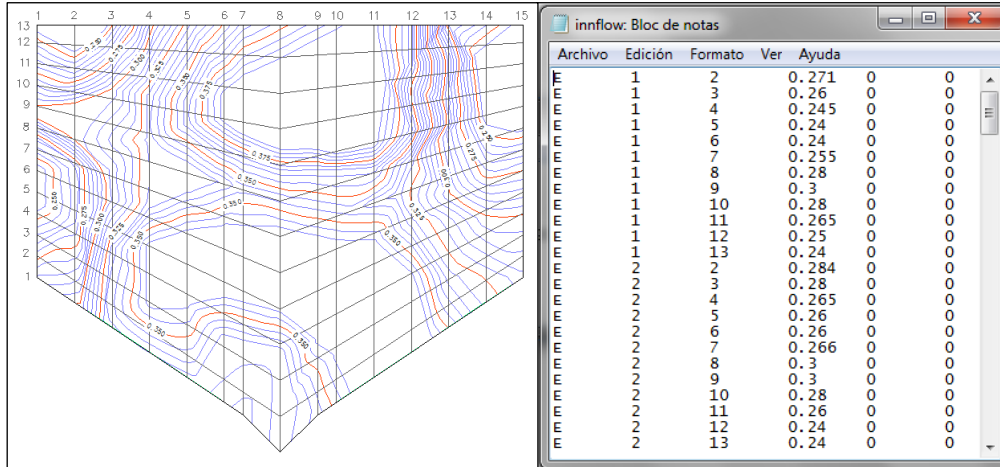


Figura 20.- Interpolación de velocidades y archivo inflow

Con el mismo archivo *koordin* y al igual que en la simulación anterior, mediante los comandos *Calculation* → *Waterflow 3D* se ha calculado el flujo de agua y la convergencia respectiva (residuales menores a $1E^{-3}$).

4.3.3 BIERI (Sin velocidades iniciales)

Puesto que se ha descrito detalladamente, en la sección anterior, el proceso para el cálculo del flujo de agua con y sin velocidades iniciales. En esta parte se resaltarán aspectos importantes tomados en cuenta, para la simulación de la cámara desarenadora con geometría BIERI estudiada en el modelo físico Yellow River.

Condiciones Iniciales

La simulación del flujo de agua sin carga de sedimentos para el modelo físico Yellow River se realizó para las siguientes condiciones:

Simulación del Flujo de Agua en la Cámara Desarenadora Geometría - Bieri	
Condiciones Iniciales	
Sistema de Lavado	Bieri
Número de Cámaras	7
Caudal Entrada	32,50 m ³ /s
Nivel de Agua en la Cámara	1275,17 msnm
Rugosidad Hormigon	0,013
Temperatura de Agua (Simulación)	20 °C

Tabla 14.- Condiciones iniciales – Simulación de flujo de agua (Geometría BIERI)

El caudal de entrada, corresponde a un caudal de 32.50m³/s para cada una de las 7 cámaras cuando se capta 222m³/s, el nivel de agua en la desviación es de 1275.5msnm y el nivel el cuenco amortiguador de 1274.73msnm.

Geometría

Al igual que en la geometría del diseño definitivo (SEDICON), no se considera toda la geometría de la cámara N°7, también se ha tomado un tramo (159m de longitud por 13m de ancho) comprendido entre la tercera rejilla tranquilizadora y la compuerta que conecta con el cuenco estabilizador. Es decir se ha modelado geoméricamente, una zona previa a la cámara de sedimentación (3m), cámara de sedimentación (150m), y una parte de la conexión con el cuenco estabilizador (6m). El valor del nivel de agua 1275.17msnm que se indica en las condiciones iniciales corresponde a 9.85m desde la base en la geometría ingresada.

Archivo Control - Generación de la Malla Computacional

La estructura del archivo control es semejante a la explicada para la simulación SEDICON sin velocidades iniciales. Respecto a la malla, en este caso se optó por trabajar con volúmenes de aproximadamente 1m en las tres dimensiones. Para esto se plantearon los siguientes números de secciones:

- 159 Secciones Transversales
- 14 Secciones Longitudinales
- 12 Secciones Verticales

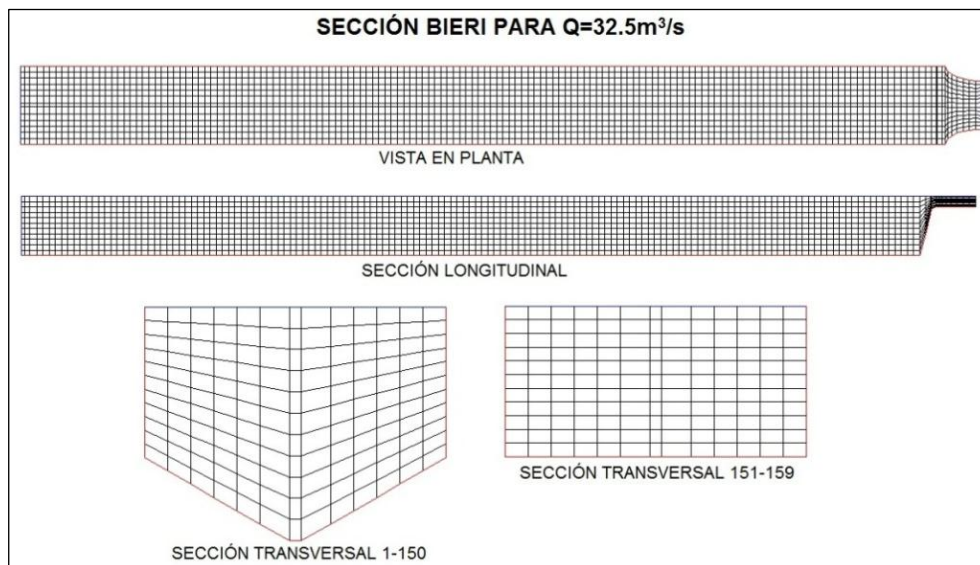


Figura 21.- Secciones del mallado – SSIIM

4.3.4 BIERI (Con velocidades iniciales)

Condiciones Iniciales

Para esta simulación, los valores de entrada son los expuestos en la Tabla 14 pero añadiendo a esto velocidades iniciales a la entrada de la cámara. Las velocidades iniciales ingresadas en la primera sección se obtienen de las mediciones dadas en el modelo físico Yellow River (Geometría BIERI) para caudal de $32.5 \text{ m}^3/\text{s}$ a los 2 m de la tercera rejilla tranquilizadora. Las cuales, según el informe fueron tomados con un medidor de corriente LS-40 de hélice.

Geometría

La geometría usada es la misma indicada en la Figura 21.

Autoría: Bernarda Luzuriaga H.
Diana Amaya Z.

Archivo Control - Generación de la Malla Computacional

La estructura del archivo *control* se ha modificado de tal manera que quede como el que se indica en la Figura 19. Es decir, se ha suprimido el data set G7, para que el programa lea el archivo *inflow*. En el modelo físico se tomaron 24 mediciones en la sección transversal las cuales fueron ingresadas en Autocad Civil 3D. Mediante interpolación se determinaron los valores de velocidad para cada celda del mallado, con el fin de elaborar el archivo *inflow* con la estructura antes indicada. La siguiente figura muestra las mediciones del modelo físico y las curvas generadas mediante interpolación, para dar valores de velocidad a las celdas de la malla.

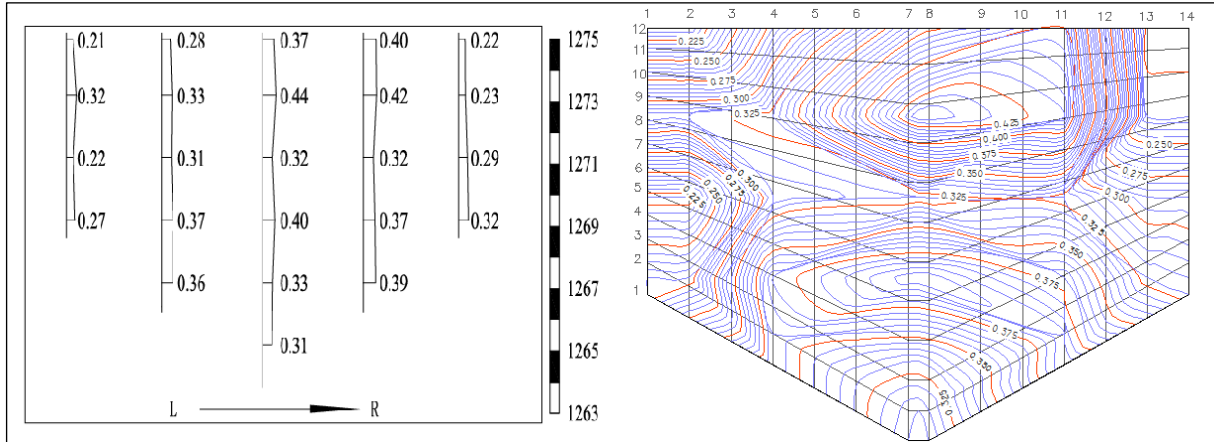


Figura 22.- Interpolación de velocidades a partir del modelo físico

Una vez estructurado el archivo *inflow* y al ejecutar SSIM, la primera sección registra las velocidades iniciales de la siguiente manera.

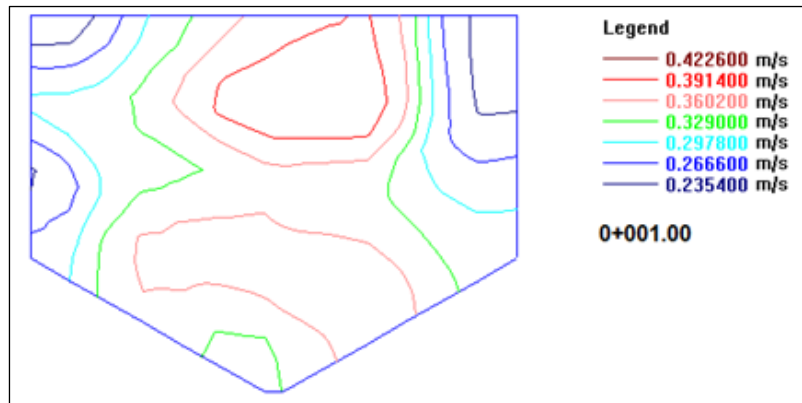


Figura 23.- Primera sección en SSIM con velocidades iniciales

4.3.5 BIERI para caudal de 30 m³/s (con velocidades iniciales)

Para esta simulación se tomaron los archivos generados en BIERI con caudal 32.50 m³/s y se modificó el valor del caudal de entrada en el archivo *control* por un valor de 30 m³/s. Este cambio se hizo con la finalidad de obtener velocidades en la cuarta sección (cuando se estabiliza el modelo numérico), las cuales se aplicaron como velocidades iniciales en la simulación SEDICON para 30 m³/s (Figura 20) y poder evaluar su efecto.



4.4 Simulación del Transporte de Sedimentos

Para determinar la eficiencia del desarenador, SSIIM establece situaciones específicas como: geometría estática (nivel de agua y cauce) y flujo permanente. Evaluándolos en un período corto de tiempo, en el cual no se esperan variaciones importantes físicas, en el fondo (por erosión y/o depósito), ni de las condiciones hidráulicas. Por lo tanto, los algoritmos a usarse deben garantizar flujo de agua permanente y condiciones de sedimentos no permanentes (situación pseudo-estática). Dichas condiciones no permanentes en los sedimentos se dan debido a que ingresan con una concentración constante, pero su comportamiento una vez dentro de la cámara no es permanente.

Una vez resuelto el comportamiento hidráulico (simulación del flujo de agua sin carga de sedimentos) del cuerpo de agua, se inicia la simulación del flujo de sedimentos al introducir el material sólido expresado como concentración. Para resolver esto, SSIIM requiere la generación de un nuevo archivo *control* y la lectura del archivo *result* producto de la simulación del flujo de agua limpia. El estudio del flujo de sedimentos en el diseño definitivo (geometría SEDICON) se ha llevado a cabo para dos granulometrías como se indicó al inicio de esta sección:

4.4.1 SEDICON - Granulometría del Cauce Natural (Río Coca)

Condiciones Iniciales - Características del Sedimento

La simulación del flujo de sedimentos para el diseño definitivo del desarenador se realiza a partir de los resultados de la simulación del flujo de agua (SEDICON 30 m³/s), sin considerar velocidades iniciales. La granulometría para el primer caso corresponde a la del cauce natural (Río Coca) y presenta las siguientes características:

Concentración a la entrada: 5 kg/m³.

Densidad de los sedimentos 2.65 gr/cm³

Distribución granulométrica: 9 tamaños representativos, de los cuales los 6 son menores al diámetro de la partícula de diseño.

Las velocidades de sedimentación han sido calculadas con el criterio de Fair y Geyer (25).

GRANULOMETRÍA CAUCE NATURAL (RIO COCA)							
N° Partícula	Diámetro (mm)	% Pasa	% Retenido	Concentración kg/m ³	Concentración Inicial (kg/30 m ³)	Diámetro (m)	Velocidad de Sedimentación (m/s)
1	2,00	100	0			0,00200	0,3374
2	0,50	99	1	0,05	1,50	0,00050	0,1132
3	0,25	95	4	0,20	6,00	0,00025	0,4330
4	0,10	49	46	2,30	69,00	0,00010	0,0084
5	0,07	29	20	1,00	30,00	0,00007	0,0042
6	0,06	24	5	0,25	7,50	0,00006	0,0031
7	0,05	17	7	0,35	10,50	0,00005	0,0022
8	0,04	12	5	0,25	7,50	0,00004	0,0014
9	0,01	3	9	0,45	13,50	0,00001	0,0001
			3	0,15	4,50		
TOTAL			100	5,00	150		

Tabla 15.- Granulometría del cauce natural (Río Coca)

²⁵ (Romero Rojas, 2000)



Archivo Control – Ejecución en SSIIM

El archivo *control* para el cálculo del flujo de sedimentos debe incluir necesariamente los data sets F37 y F68 que le dan las condiciones no permanentes. Además debe contener datos de entrada de los sedimentos como: densidad específica y parámetro de Shields (F11), distribución granulométrica (N), concentración del afluente (I), tamaño de la partícula y su respectiva velocidad de sedimentación (S), etc.

Algunos data sets usados en el cálculo del flujo de agua se mantienen como: G1, G3, G7 que tienen que ver con la geometría del cuerpo de agua. También se conservan W1 y W2 que tienen que ver con los parámetros de entrada como caudal, tirante aguas abajo, número de Strickler y secciones de interpolación para los cálculos.

La estructura del archivo *control* con cada uno de los data sets que intervienen en el cálculo del flujo de sedimentos se describen detalladamente en la Tabla 12 de la sección 4.2.6. Para este caso, usando la granulometría del cauce natural (Rio Coca) el archivo *control* para sedimentos queda como se muestra a continuación:

```

control: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
T F. SEDI-G. PROTOTIPO
F 1 D
F 2 RIS
F 4 0.5 50 0.0001
F 11 2.65 0.052
F 33 50 100
F 37 1
F 68 2
G 1 159 15 13 8
G 3 0.0000 8.4061 16.8132 25.2193 33.6254 42.0325 50.4386 58.8447 67.2518 75.6579 84.0640 92.4711 100.0000
G 7 0 1 2 15 2 13 0 0 30 1.0 0.0 0.0
G 7 1 -1 2 15 2 13 0 0 30 1.0 0.0 0.0
G 21 1 4 2 15 2 13
G 21 1 33 2 15 2 13
G 21 1 62 2 15 2 13
G 21 1 91 2 15 2 13
G 21 1 120 2 15 2 13
G 21 1 149 2 15 2 13
G 21 1 159 2 15 2 13
I 1 1.5
I 2 6.0
I 3 69.0
I 4 30.0
I 5 7.50
I 6 10.50
I 7 7.5
I 8 18
S 1 0.000500 0.11320
S 2 0.000250 0.43300
S 3 0.000100 0.00840
S 4 0.000070 0.00420
S 5 0.000060 0.00310
S 6 0.000050 0.00220
S 7 0.000040 0.00140
S 8 0.000010 0.00010
N 0 1 0.01
N 0 2 0.04
N 0 3 0.46
N 0 4 0.20
N 0 5 0.05
N 0 6 0.07
N 0 7 0.05
N 0 8 0.12
B 0 0 0 0
W 1 77.00000 30 11.40
W 2 5 1 3 146 151 159
K 1 360 60000
K 2 0 1
K 3 0.5 0.5 0.5 0.1 0.3 0.3
K 5 1 1 1 1 1
K 6 1 1 1 0 0
    
```

Figura 24.- Archivo control – Cálculo flujo de sedimentos – granulometría cauce natural (Rio Coca)

Para correr la parte complementaria de la simulación y resolver el flujo de sedimentos es necesario crear un nuevo directorio donde deben estar el ejecutable de SSIIM, archivo *koordina*, nuevo archivo *control* y la copia del archivo *result* del flujo de agua limpia calculado en la primera parte de la simulación.

Al ejecutar el programa se observa en la pantalla principal los cambios de los tiempos de paso de acuerdo a lo establecido en el F33. Los resultados del flujo de sedimentos se escriben cuando se alcanza el número de iteraciones especificadas en el data set K1. En este caso se escriben cuando las iteraciones llegan a 360 con tiempos de paso de 50, es decir a los 18000 segundos (360 x 50). Así el sedimento que entra a la

Autoría: Bernarda Luzuriaga H.
Diana Amaya Z.

cámara tras 18000 segundos es de 2700000 kg (18000s x 150kg/s), lo que en volumen de sedimentos considerando un peso específico de 2650kg/m³ es de 1018.9 m³.

Los archivos que se generan en el directorio donde se ejecuta SSIIM, cuando se resuelve el flujo de sedimentos son: *bedfrac*, *boogie*, *conres*, *fracres*, *koosurf* y *xcyc*.

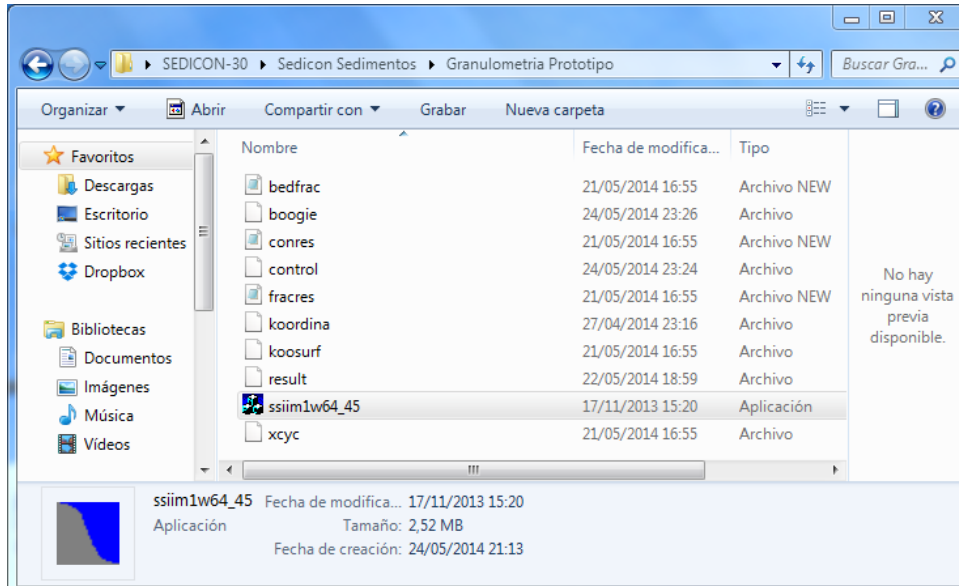


Figura 25.- Archivos de resultados para el cálculo del flujo de sedimentos

Los resultados que se obtienen son los siguientes:

Archivo *boogie*

Eficiencia, en la sección *morphology* del archivo *boogie* se muestra el tiempo en segundos, el número de iteraciones y 7 columnas cuyos valores de concentración se expresan como fracción de volumen. Cada columna indica lo siguiente:

- Primera: Muestra una numeración correspondiente a la nomenclatura de los diámetros de sedimento (ingresados en el data set I) que intervienen en la simulación.
- Segunda: Entrada de sedimentos
- Tercera: Salida de sedimentos
- Cuarta: Capa activa de la carga de fondo
- Quinta: Capa inactiva de la carga de fondo
- Sexta: Carga suspendida
- Séptima: Defecto de continuidad, producto de simular una condición pseudo-estática. Se debe procurar que el defecto sea menor a 0.01

Concentración en secciones de interés, mediante los data sets G21 se ingresan al archivo control las secciones donde se quiere conocer la concentración. En el caso de la cámara del desarenador, los G21 se registran cada 30 m, es decir al final de cada una de las 5 unidades.

En el archivo *boogie*, la concentración en la sección se expresa en kg/s. y las secciones se numeran de menor a mayor, como se ve en la siguiente figura:

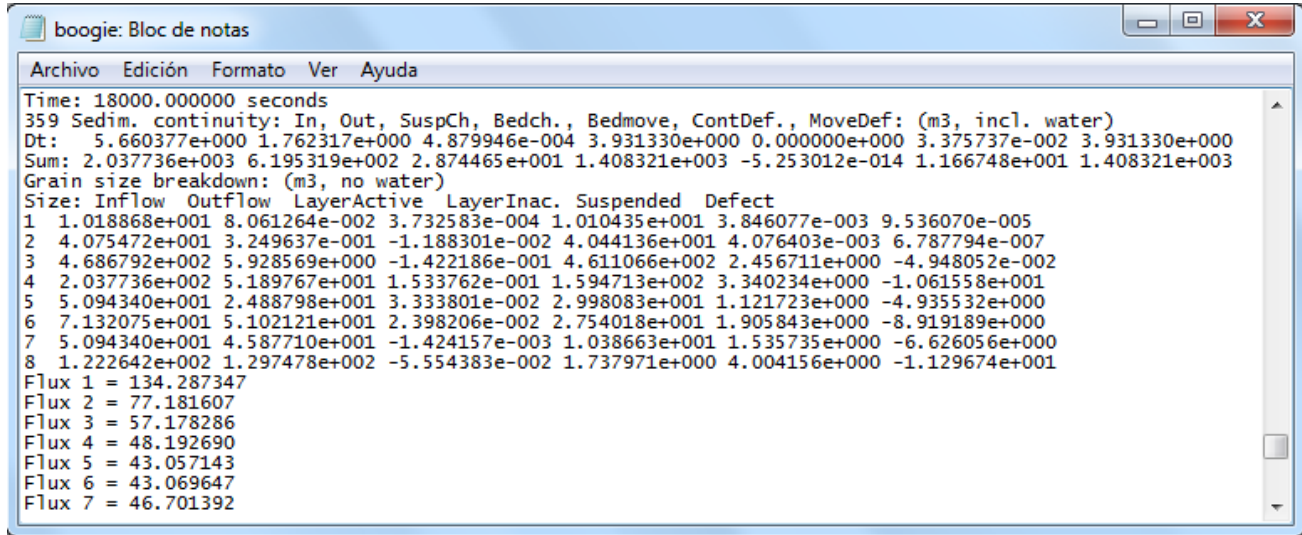


Figura 26.- Archivo boogie – Eficiencia y concentraciones en secciones de interés (18000s)

Volumen en metros cúbicos del cambio total en el fondo, este valor es dado al final del archivo *boogie*. De acuerdo al manual de SSIIM un metro cúbico de sedimentos en el fondo contiene aproximadamente 0.5m^3 de agua y 0.5m^3 de partículas de sedimento, cuyo peso seco es de 1320kg ($0.5\text{m}^3 \times 2650\text{kg/m}^3$).

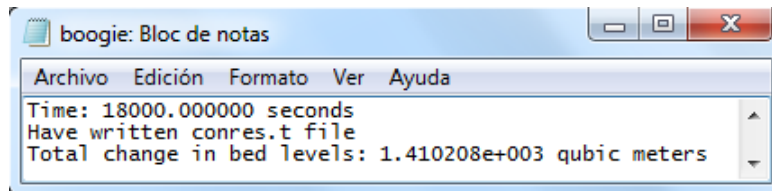


Figura 27.- Volumen del cambio total en el fondo

Visualizador gráfico de SSIIM

- Curvas de concentración en la sección transversal.
- Curvas de concentración en planta
- Altura de depósito de sedimentos.

Ejemplos de estos gráficos son visibles en el Anexo 3.



4.4.2 SEDICON (Granulometría SEDICON)

Condiciones Iniciales - Características del Sedimento

Cuando se diseñó el sistema de lavado, se buscó dar condiciones desfavorables de granulometría y velocidad de sedimentación. Por esta razón se planteó una granulometría diferente a la del prototipo con las siguientes características.

Concentración a la entrada: 5 kg/m³

Densidad de los sedimentos 2.65 gr/cm³

Distribución granulométrica: 8 tamaños representativos, de los cuales los 4 son menores al diámetro de la partícula de diseño (< 0.25mm).

Las velocidades de sedimentación han sido calculadas con el criterio de D.G. Thomas (26).

GRANULOMETRÍA SEDICON							
N° Partícula	Diámetro (mm)	% Pasa	% Retenido	Concentración kg/m ³	Concentración Inicial (kg/30 m ³)	Diámetro (m)	Velocidad de Sedimentación (m/s)
1	1,700	96	4	0,20	6,00	0,001700	0,18300
2	0,850	74	22	1,10	33,00	0,000850	0,11500
3	0,420	50	24	1,20	36,00	0,000420	0,06100
4	0,310	38	12	0,60	18,00	0,000310	0,02630
5	0,141	24	14	0,70	21,00	0,000141	0,01620
6	0,106	21	3	0,15	4,50	0,000106	0,01150
7	0,053	8	13	0,65	19,50	0,000053	0,00252
8	0,027	3	5	0,25	7,50	0,000027	0,00066
			3	0,15	4,50		
TOTAL			100	5	150		

Tabla 16.- Granulometría propuesta por SEDICON para el sistema de lavado

La simulación del flujo de sedimentos se realizó también a partir de los resultados de la simulación del flujo de agua (SEDICON 30 m³/s), sin considerar velocidades iniciales.

Archivo Control – Ejecución en SSIIM

El archivo *control* y su ejecución en SSIIM se elaboró de la misma manera que lo explicado anteriormente para el caso de la granulometría del cauce natural.

Con la simulación bajo estas condiciones se ha buscado comparar lo simulado con los resultados de eficiencia del informe de diseño del sistema de lavado SEDICON.

²⁶ (Jacobsen, 2012)



5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Patrón de flujo de agua Prototipo (SEDICON 30m³/s sin velocidades iniciales)

Vectores de Velocidad	Cámara	Planta		A lo largo de los 149m de la cámara las líneas de corriente se distribuyen de manera uniforme. No se forman flujos preferenciales o vórtices.														
		Longitudinal		El flujo presenta un comportamiento laminar. Los vectores de velocidad indican que la tendencia del flujo se desarrolla de manera longitudinal.														
		Transversal		La corriente principal tiene una tendencia central														
	Salida de la Cámara	Planta		En la zona de transición donde se reduce el área de la sección transversal, los vectores de velocidad indican un aumento de velocidad; sin embargo hasta el punto de estudio el flujo aun es laminar.														
		Longitudinal		El flujo se direcciona hacia la superficie durante la reducción de la sección														
		Transversal		Internamente los vectores de velocidad convergen hacia el centro y producen aumentos de velocidad, luego cambian de dirección hacia las paredes del canal y nuevamente convergen hacia el centro. Esto indica la posible formación de turbulencia en puntos mas bajos.														
Velocidades Horizontales	Planta (Nivel N° 13)		<table border="0"> <tr> <td>En la cámara</td> <td>Máximo</td> <td>0.333m/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Mínimo</td> <td>0.250m/s</td> </tr> <tr> <td>En la transición</td> <td>Máximo</td> <td>2.40m/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Mínimo</td> <td>0.380m/s</td> </tr> <tr> <td>Salida (canal rectangular)</td> <td>Máximo</td> <td>2.810m/s</td> </tr> </table>	En la cámara	Máximo	0.333m/s		Mínimo	0.250m/s	En la transición	Máximo	2.40m/s		Mínimo	0.380m/s	Salida (canal rectangular)	Máximo	2.810m/s
	En la cámara	Máximo	0.333m/s															
	Mínimo	0.250m/s																
En la transición	Máximo	2.40m/s																
	Mínimo	0.380m/s																
Salida (canal rectangular)	Máximo	2.810m/s																
Sección Transversal N° 141		<table border="0"> <tr> <td colspan="3">Sección Transversal N° 141</td> </tr> <tr> <td>Maxima</td> <td>0,299</td> <td>m/s</td> </tr> <tr> <td>Mínima</td> <td>0,175</td> <td>m/s</td> </tr> </table>	Sección Transversal N° 141			Maxima	0,299	m/s	Mínima	0,175	m/s							
Sección Transversal N° 141																		
Maxima	0,299	m/s																
Mínima	0,175	m/s																
Número de Froude		El número de Froude en la cámara oscila entre los valores (0,025 y 0,52). Al ser menor a 1 indica que el flujo es subcrítico.																
Esfuerzo de Corte		Los esfuerzos de corte son bajos a lo largo de toda la cámara (0,07 -0,12)N/m ² . Pero la salida alcanzan valores de hasta 24,7N/m ² debido a la reducción de la sección e incremento de velocidades del flujo de agua.																

Tabla 17.- Patrón de flujo de agua sin considerar velocidades iniciales – SEDICON (30m³/s)



5.2 Patrón de flujo de agua Prototipo (SEDICON 30m³/s considerando velocidades iniciales)

Vectores de Velocidad	Cámara	Planta	Presenta el mismo comportamiento registrado en la simulación para condiciones sin velocidades iniciales.	
		Longitudinal		
		Transversal	Los vectores de velocidad se concentran hacia 5 puntos preferenciales y mantienen esa tendencia durante los primeros 30m. A partir de los 31m de la cámara hasta la transición de salida los vectores se direccionan hacia las paredes de la cámara.	
	Salida de la Cámara	Planta	Presenta el mismo comportamiento registrado en la simulación para condiciones sin velocidades iniciales.	
		Longitudinal		
		Transversal		
Velocidades Horizontales	Planta	En la cámara	Máximo	0.371m/s
			Minimo	0.297m/s
		En la transición	Máximo	2.050m/s
			Minimo	0.790m/s
	Salida (canal rectangular)	Máximo	2.880m/s	
	Secciones Transversales	Sección Transversal N° 141		
		Maxima	0,398	m/s
		Minima	0,218	m/s
Número de Froude	El número de Froude en la cámara oscila entre los valores (0,03 y 0,68). Al ser menor a 1 indica que el flujo es subcrítico.			
Esfuerzo de Corte	Los esfuerzos de corte son bajos a lo largo de toda la cámara (0,09 - 0,25)N/m ² . Pero la salida alcanzan valores de hasta 26,8 N/m ² debido a la reducción de la sección e incremento de velocidades del flujo de agua.			

Tabla 18.- Patrón de flujo de agua considerando velocidades iniciales – SEDICON 30m³/s

Cuando no se dan velocidades iniciales en la entrada de la cámara la simulación se ejecuta con velocidades condicionadas únicamente por el caudal y el área de la sección transversal. Mientras que al dar valores iniciales es posible integrar comportamientos del flujo de agua precedentes a la zona de estudio.

En el caso del prototipo, al realizar la simulación sin velocidades iniciales, en la cámara se registra una velocidad máxima de 0.34m/s (Nivel 13); mientras que al ingresar condiciones iniciales estas influyen a lo largo de toda la cámara, pero sobre todo en la primera unidad (30m), alcanzando velocidades de hasta 0.38m/s (Nivel 13), la cual supera la velocidad de diseño de 0.35m/s. Anexo 2

Cuando se dan velocidades iniciales, se registran velocidades mayores a la de diseño, sin embargo el patrón de flujo tiene el mismo comportamiento, es decir flujo laminar.

El número de Froude menor a uno indica flujo subcrítico para ambos casos.

En lo que respecta al esfuerzo de corte, este aumenta cuando aumenta la velocidad.



5.3 Patrón de flujo de sedimentos - prototipo (SEDICON 30 m³/s)

Para determinar la eficiencia del desarenador, en SSIIM se considera que una cantidad insignificante de sedimentos fluye cerca del fondo y que la mayor parte se halla en suspensión. La solución del flujo de sedimentos se resuelve haciendo uso de la ecuación de convección difusión.

Para llevar a cabo la simulación se han analizado y variado ciertos parámetros, a fin de observar su efecto en el patrón del flujo de sedimentos y la eficiencia de la cámara desarenadora.

El modelo se corrió durante 18000 segundos con un tiempo de paso de 50 segundos con el archivo control indicado en la figura 24.

5.3.1 Granulometría del cauce natural (Río Coca)

La curva de distribución granulométrica del cauce natural, que se estudia para determinar la eficiencia, posee arenas y finos (limo - arcilla), de los cuales aproximadamente el 70% de los sedimentos son arenas y el 30% son finos (Tabla 15).

Eficiencia

La eficiencia se determina en función de los volúmenes de afluencia y efluencia de los sedimentos para cada tamaño en la cámara sedimentadora dados como fracción de volumen (m³). También es posible observar la cantidad de sedimentos presentes en la capa inactiva, activa y la carga suspendida.

Para efectos de comparación, la eficiencia del desarenador se ha calculado para:

- Todas las partículas (arena, limo y arcillas).....66 %
- Solo arenas.....99 %
- Solo Finos.....41 %

CÁLCULO DE EFICIENCIA - GRANULOMETRÍA CAUCE NATURAL (RIO COCA)												
	N°	Tamaño (mm)	Afluencia de Sedimentos (m ³)	Efluencia de Sedimentos (m ³)	Capa Activa (m ³)	Capa Inactiva (m ³)	Carga Suspendida (m ³)	Defecto		% Remoción		
								Defecto (m ³)	Defecto %	Remoción Total %	Remoción Arena %	Remoción Limos y Arcillas %
Arena Media 2,00 mm↓	1	0,5	10,19	0,08	0,00	10,10	0,00	0,00	0,0	99	99	
Arena Fina 0,250 mm↓	2	0,25	40,75	0,32	-0,01	40,44	0,00	0,00	0,0	99	99	
	3	0,1	468,68	5,93	-0,14	461,11	2,46	-0,05	0,0	99	99	
Limos Arcillas 0,075 mm↓	4	0,07	203,77	51,90	0,15	159,47	3,34	-10,62	-5,2	75		75
	5	0,06	50,94	24,89	0,03	29,98	1,12	-4,94	-9,7	51		51
	6	0,05	71,32	51,02	0,02	27,54	1,91	-8,92	-12,5	28		28
	7	0,04	50,94	45,88	0,00	10,39	1,54	-6,63	-13,0	10		10
										66	99	41

Tabla 19.- Eficiencia del desarenador (SEDICON 30m³/s) – Granulometría cauce natural

Según los resultados obtenidos, los valores de remoción son satisfactorios para el diámetro de la partícula de diseño (0.25mm) ya que se alcanza el 99%.

Concentración en Secciones de Interés

Se determinaron concentraciones en diferentes secciones transversales a lo largo de la cámara específicamente al término de cada unidad. Los resultados muestran que hay



una gran reducción en las 2 primeras unidades, es decir, en los 60 metros iniciales se retiene cerca de los 2/3 de sedimento que ingresa al sistema.

Concentración en Secciones de Interés			
	N°	Sección	Concentración (kg/s)
Entrada	1	4	134,29
Unidad 1	2	33	77,18
Unidad 2	3	62	57,18
Unidad 3	4	91	48,19
Unidad 4	5	120	43,06
Unidad 5	6	149	43,07
Salida	7	159	46,70

Tabla 20.- Concentración de sedimentos en secciones de interés – Granulometría cauce natural

Mediante el visualizador gráfico de SSIIM es posible observar también concentraciones totales o por tamaño de sedimento como fracción de volumen en diferentes secciones transversales o a diferentes niveles desde el fondo como se aprecia en el Anexo 3.

Cambios en el Fondo

Según el archivo de resultados de SSIIM, el volumen del cambio total en el fondo de la cámara es de: 1410 m³.

5.3.2 Granulometría propuesta por SEDICON

Se estudió también la eficiencia del desarenador para el escenario de diseño del sistema de lavado SEDICON. Es decir con una granulometría compuesta de aproximadamente el 90% de arenas y 10% de finos. Donde los criterios aplicados para la determinación de la velocidad de caída (D.G. Thomas) son mucho más conservadores respecto al usado en la granulometría del prototipo (Fair y Geyer).

Eficiencia

Para efectos de comparación, la eficiencia del desarenador se ha calculado para:

- Todas las partículas (arena, limo y arcillas).....78 %
- Solo arenas.....97 %
- Solo Finos.....41 %

CÁLCULO DE EFICIENCIA - GRANULOMETRÍA SEDICON												
N°	Tamaño (mm)	Afluencia de Sedimentos (m ³)	Efluencia de Sedimentos (m ³)	Capa Activa (m ³)	Capa Inactiva (m ³)	Carga Suspendida (m ³)	Defecto		% Remoción			
							Defecto (m ³)	Defecto %	Remoción Total %	Remoción Arena %	Remoción Limos y Arcillas %	
Arena Media 2,00 mm↓	1	1,700	40,75	1,00	-0,06	39,81	0,01	0,00	0,0	98	98	
	2	0,850	224,15	5,53	-0,33	218,86	0,08	0,01	0,0	98	98	
	3	0,420	244,53	6,10	-0,34	238,61	0,17	0,01	0,0	98	98	
	4	0,310	122,26	3,09	-0,11	119,12	0,20	-0,01	0,0	97	97	
Arena Fina 0,250 mm↓	5	0,141	142,64	3,68	0,02	138,66	0,39	-0,02	0,0	97	97	
	6	0,106	30,57	0,84	0,06	29,59	0,13	-0,02	-0,1	97	97	
Limos Arcillas 0,075 mm↓	7	0,053	132,45	85,72	0,77	58,04	3,32	-14,98	-11,3	35		35
	8	0,027	83,60	81,10	-0,03	4,71	2,62	-8,86	-10,6	3		3
										78	97	19

Tabla 21.- Eficiencia del desarenador (SEDICON 30m³/s) – Granulometría SEDICON



Según los resultados obtenidos los valores de remoción son satisfactorios para el diámetro de la partícula de diseño (0.25mm) ya que se alcanza el 97%.

Al contrastar estos valores de eficiencia con los alcanzados según los estudios del diseño del sistema de lavado SEDICON se observan diferencias del 7% en eficiencia general y 2% en eficiencia para partículas mayores a 0.25mm

Concentración en Secciones de Interés

Se determinaron concentraciones en las mismas secciones transversales que en la simulación anterior, es decir al término de cada unidad. Los resultados muestran que hay una gran reducción en la primera unidad, es decir en los 30 metros iniciales se retiene más de los 2/3 de sedimento que ingresa al sistema.

Concentración en Secciones de Interés			
	N°	Sección	Concentración (kg/s)
Entrada	1	4	92,80
Unidad 1	2	33	31,34
Unidad 2	3	62	26,69
Unidad 3	4	91	24,56
Unidad 4	5	120	22,97
Unidad 5	6	149	23,94
Salida	7	159	28,54

Tabla 22.- Concentración de sedimentos en secciones de interés – Granulometría SEDICON

Cambios en el Fondo

Volumen del cambio total en el fondo: 1654 m³

5.3.3 Pruebas de sensibilidad - simulación del flujo de sedimentos

Para la prueba de sensibilidad en el cálculo del flujo de sedimentos se varió el valor del parámetro de Shields entre 0.047 que es el valor de defecto en SSIIM y el valor de 0.056 que se establece en la literatura convencional como límite para inicio de movimiento.

Luego de ejecutar las simulaciones, se determinó que el porcentaje de remoción de los sedimentos no varía en más del 1%, por lo que la eficiencia prácticamente es la misma.

Eficiencia			
Shields	Remoción Total	Remoción Arena	Remoción Limos y Arcillas
0,047	77,76	97,44	18,72
0,052	77,81	97,46	18,89
0,056	77,88	97,48	19,08

Tabla 23.- Prueba de sensibilidad - Variando el parámetro de Shields

Con ambas granulometrías la eficiencia del desarenador es alta cuando se evalúan solo partículas de arena o partículas superiores a la partícula de diseño.



5.4 Patrón de flujo de agua - Bieri 32.5 m³/s Sin velocidades iniciales

		Modelo Físico	Simulación	Comentario															
Cámara	Planta			Tanto en el modelo físico como en el modelo numérico, a lo largo del tramo de la cámara desarenadora (149m), se registra una distribución uniforme de las líneas de corriente.															
	Longitudinal			Del mismo modo que el comportamiento en planta, los vectores de velocidad indican una distribución uniforme y que la tendencia del flujo se desarrolla de manera longitudinal, en el modelo físico y numérico.															
	Transversal	No se registra comportamiento del patrón de flujo.		El modelo numérico indica que la corriente principal tiende a concentrarse al centro de la cámara.															
Salida de la Cámara	Planta			En la zona de transición (modelo físico y numérico), donde se reduce el área de la sección transversal, los vectores de velocidad muestran mayor concurrencia produciendo un aumento de velocidad. Sin embargo, el flujo es laminar a lo largo de todo el canal.															
	Longitudinal			El flujo se direcciona hacia la superficie durante la reducción de la sección.															
	Transversal	No se registra comportamiento del patrón de flujo.		El comportamiento de los vectores de velocidad, en la cámara desarenadora, indica que dichos vectores se direccionan hacia la superficie de agua y en la salida del canal adoptan un comportamiento distinto, unos convergen hacia el centro y otros hacia la pared derecha lo cual indica la posible formación de turbulencia en puntos mas bajos.															
Planta (Nivel No 13)				<table border="0"> <tr> <td>En la cámara</td> <td>Máximo</td> <td>0.348m/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Mínimo</td> <td>0.297m/s</td> </tr> <tr> <td>En la transición</td> <td>Máximo</td> <td>1.979m/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Mínimo</td> <td>0.705m/s</td> </tr> <tr> <td>Salida (canal rectangular)</td> <td>Máximo</td> <td>2.298m/s</td> </tr> </table>	En la cámara	Máximo	0.348m/s		Mínimo	0.297m/s	En la transición	Máximo	1.979m/s		Mínimo	0.705m/s	Salida (canal rectangular)	Máximo	2.298m/s
En la cámara	Máximo	0.348m/s																	
	Mínimo	0.297m/s																	
En la transición	Máximo	1.979m/s																	
	Mínimo	0.705m/s																	
Salida (canal rectangular)	Máximo	2.298m/s																	
Secciones Transversales				<p style="text-align: center;">Sección Transversal N° 141</p> <table border="0"> <tr> <td>Máxima</td> <td>0.344</td> <td>m/s</td> </tr> <tr> <td>Mínima</td> <td>0.212</td> <td>m/s</td> </tr> </table>	Máxima	0.344	m/s	Mínima	0.212	m/s									
Máxima	0.344	m/s																	
Mínima	0.212	m/s																	

Tabla 24.- Patrón de flujo de agua sin considerar velocidades iniciales - BIERI 32.5m³/s



Tanto en el modelo físico como en la simulación, los vectores de velocidad indican que la tendencia del flujo se desarrolla de manera longitudinal y no hay la presencia de flujos preferenciales o formación de vórtices, por lo que hasta el punto de estudio, el patrón de flujo tiene un comportamiento laminar. Sin embargo, como se puede observar en la figura del modelo físico y simulación (en la salida), el flujo se vuelve turbulento.

5.5 Patrón de flujo de agua - Bieri 32.5 m³/s considerando velocidades iniciales

Vectores de Velocidad	Cámara	Planta	Presenta el mismo comportamiento registrado en la simulación sin velocidades iniciales.		
		Longitudinal			
	Salida de la Cámara	Transversal	Los vectores de velocidad se concentran en puntos preferenciales en la superficie y fondo manteniendo este comportamiento durante los primeros 30m. A partir de los 31m de la cámara hasta los 141m los vectores se direccionan hacia las paredes en el fondo (en la zona trapezoidal) y en la parte rectangular se dirigen a la superficie. En la zona de la transición de salida, los vectores se direccionan hacia las paredes de la cámara.		
		Planta	Presenta el mismo comportamiento registrado en la simulación sin velocidades iniciales.		
Velocidades Horizontales	Planta	Longitudinal			
		Transversal			
		En la cámara	Máximo	0.417m/s	
			Minimo	0.250m/s	
		En la transición	Máximo	2.177m/s	
			Minimo	0.701m/s	
		Salida (canal rectangular)	Máximo	2.545m/s	

Tabla 25.- Patrón de flujo de agua considerando velocidades iniciales - BIERI 32.5m³/s

Cuando se consideran velocidades iniciales, el comportamiento del flujo es diferente, alrededor de los primeros 30m se observa la presencia de flujos preferenciales, siendo éstos más visibles en las primeras secciones y disminuyendo en tanto la longitud avanza. Esto se puede confirmar con lo registrado en el Anexo 4.

5.5.1 Pruebas de sensibilidad - simulación del flujo de agua

Las pruebas de sensibilidad se realizaron con el objetivo de tener resultados que nos permitan evaluar la influencia de parámetros numéricos, condiciones hidráulicas y físicas en la simulación.

Como una primera prueba, se obtuvieron velocidades horizontales variando el nivel de operación en la cámara hasta la salida, con los siguientes resultados:



		1275.17msnm		1275.19msnm	
		Sin Velocidades Iniciales m/s	Con Velocidades Iniciales m/s	Sin Velocidades Iniciales m/s	Con Velocidades Iniciales m/s
0+004.00	Máxima	0.3062	0.4195	0.3055	0.4195
	Mínima	0.3049	0.2394	0.3042	0.2394
0+021.00	Máxima	0.3075	0.4010	0.3067	0.4010
	Mínima	0.2828	0.2562	0.2822	0.2562
0+141.00	Máxima	0.3440	0.3875	0.3432	0.3876
	Mínima	0.2120	0.2183	0.2114	0.2181
0+158.00	Máxima	2.3773	2.6357	2.3508	2.6127
	Mínima	1.9739	2.1302	1.9520	2.1111

Tabla 26.- Velocidades máximas y mínimas en secciones de interés, variando el nivel de operación.

Los niveles se variaron entre 1275.17msnm y 1275.19 msnm, que fue lo descrito en el modelo físico. Según lo registrado, la influencia del cambio de nivel de operación, sobre las velocidades horizontales afecta al tercer decimal cuando las lecturas se realizan en m/s, por lo que puede decirse que no es apreciable.

En la segunda prueba, las velocidades horizontales fueron registradas para el nivel de operación más alto (1275.19msnm) con diferentes valores de rugosidad.

		$\eta=0.013$		$\eta=0.015$		$\eta=0.017$	
		Sin Velocidades Iniciales m/s	Con Velocidades Iniciales m/s	Sin Velocidades Iniciales m/s	Con Velocidades Iniciales m/s	Sin Velocidades Iniciales m/s	Con Velocidades Iniciales m/s
0+004.00	Máxima	0.3055	0.4195	0.3055	0.4191	0.3055	0.4187
	Mínima	0.3042	0.2394	0.3040	0.2400	0.3036	0.2398
0+021.00	Máxima	0.3067	0.4010	0.3070	0.3997	0.3074	0.3983
	Mínima	0.2822	0.2562	0.2778	0.2564	0.2727	0.2526
0+141.00	Máxima	0.3432	0.3875	0.3461	0.3895	0.3494	0.3919
	Mínima	0.2114	0.2562	0.2022	0.2109	0.1928	0.2032
0+158.00	Máxima	2.3508	2.6127	2.3484	2.6104	2.3456	2.6077
	Mínima	1.9520	2.1111	1.9690	2.0854	1.8951	2.0526

Tabla 27.- Velocidades máximas y mínimas en secciones de interés, variando coeficiente de rugosidad.

Los resultados de esta prueba, para el caso sin velocidades iniciales, no muestran variaciones importantes en las dos primeras abscisas y el máximo valor de la tercera. En el valor mínimo de la tercera abscisa hay una notoria diferencia entre las velocidades correspondientes a rugosidad 0.013 y 0.017, 0.21m/s y 0.19m/s respectivamente. Las velocidades para la abscisa cuatro varían en el tercer decimal.

Una tercera prueba se hizo con los valores más altos del nivel de operación y rugosidad, realizando variaciones en los coeficientes de relajación. Se cambiaron los data sets correspondientes al número de iteraciones y paso de tiempo, dando valores altos y bajos para ver su influencia.



		K1 Y K3 Bajos		K1 Y K3 Altos	
		Sin Velocidades Iniciales	Con Velocidades Iniciales	Sin Velocidades Iniciales	Con Velocidades Iniciales
		m/s	m/s	m/s	m/s
0+004.00	Máxima	0.3055	0.4187	0.3055	0.4187
	Mínima	0.3064	0.2398	0.3036	0.2398
0+021.00	Máxima	0.3074	0.3983	0.3074	0.3983
	Mínima	0.2727	0.2526	0.2727	0.2526
0+141.00	Máxima	0.3494	0.3919	0.3494	0.3919
	Mínima	0.1928	0.2032	0.1928	0.2032
0+158.00	Máxima	2.3456	2.6077	2.3456	2.6077
	Mínima	1.8951	2.0526	1.8951	2.0526

Tabla 28.- Velocidades máximas y mínimas en secciones de interés, variando coeficientes de relajación.

Para K1 y K3, bajos y altos, y sin condiciones de velocidad inicial; el valor de velocidad es exactamente el mismo, excepto en el mínimo correspondiente a la primera abscisa. Para el caso con condiciones iniciales, todos los valores en las cuatro abscisas son los mismos.

Como resultado de éstas pruebas de sensibilidad se puede decir que, dado el caso, no se refleja mayor diferencia en las velocidades del flujo de agua, pues éstos valores difieren casi en su totalidad en el tercer decimal y para fines prácticos no se considera velocidades con más de dos decimales, teniendo entonces como resultados finales los datos expuestos en las secciones 5.4 y 5.5. Una ampliación de estos ensayos está en el Anexo 4.

Se usaron los resultados del modelo físico para contrastar el comportamiento del patrón de flujo de agua y velocidades ante variaciones:

- En las velocidades iniciales
- En la rugosidad
- En el nivel de agua
- En los coeficientes de relajación en SSIIM

Lo que se pudo evaluar durante todos los cambios aplicados al modelo es que, el hecho de dar velocidades iniciales influye en 0.05m/s, mientras que al variar los parámetros estudiados en las pruebas de sensibilidad la influencia en las velocidades no supera 0.01m/s. Los resultados de velocidades en la simulación, con condiciones iniciales de velocidad, se asemejan más a lo medido en el modelo físico a lo largo de toda la cámara.



6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se ha realizado la construcción del modelo numérico SSIIM para el desarenador del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair utilizándose la información y los resultados de los modelos físicos: i) Modelo de Yellow River (China), y ii) Modelo físico de la Comisión Federal de Electricidad (México), así como los resultados de la modelización numérica del prototipo para el Proyecto que fuera ejecutada mediante 2D “SED-TRAP”, para realizar un estudio comparativo del desempeño del modelo de estudio.
- Se ha realizado para el Proyecto, la simulación de los procesos de flujo en dos escenarios que reproducen las condiciones establecidas en el modelo físico de Yellow River, y que pronostican el comportamiento de la obra bajo las condiciones establecidas en el modelo de la CFE.
- Se ha realizado la simulación de procesos de transporte de sedimento para el modelo sistema de lavado de sedimento (SEDICON) adoptado por el Proyecto
- En la simulación realizada en el prototipo, el estudio permite establecer que obviar velocidades de entrada como condición de frontera tienen un efecto de subestimación de las velocidades de flujo en la cámara de sedimentación. Para el análisis realizado, y considerando valores de entrada de velocidad, el modelo SSIIM registra valores de hasta 0.38 m/s el cual, aunque corresponde a flujo laminar, es superior al valor de diseño de 0.35 m/s. Por otro lado, la no consideración de velocidades de entrada al modelo, indica velocidades máximas en la cámara de tan solo 0.34 m/s.
- En referencia a los procesos de transporte de sedimento, para el estudio se ha considerado la distribución granulométrica del prototipo (material del Río Coca), que presenta aproximadamente 70% de arena y 30% de material fino.
- La eficiencia del desarenador ha sido evaluada de manera discriminada por tamaño de partículas, obteniéndose valores de 66% (total de la mezcla), 99% de atrapamiento para el caso de arenas, y 41% de atrapamiento para el caso de partículas finas.
- Adicionalmente, el estudio permite caracterizar la variación de la concentración de carga en suspensión para diferentes secciones de interés, las mismas que van desde 134 kg/s en la entrada, hasta 47 kg/s a la salida de la estructura.
- Como un escenario adicional de modelización, se consideró la distribución granulométrica propuesta por el diseño de SEDICON, mismo que considera una proporción de 90% de arena y 10% de material fino. Para este escenario, el



estudio mediante modelo SSIIM indica eficiencia de atrapamiento de 78% para el total de la mezcla, 97% para arenas y 41% de atrapamiento para finos.

- En consideración del diámetro de interés para el proyecto (0.25mm), los resultados permiten concluir que existe una excelente eficiencia de retención.
- Para la granulometría del río Coca, se proyecta adicionalmente, un cambio en la configuración del fondo equivalente a un volumen de 1410 m³ correspondiente a un periodo de simulación de 18000 s (5 horas), mientras que para la granulometría ensayada por Sedicon se obtendría un volumen de 1654 m³.
- El análisis del parámetro crítico para considerar movimiento incipiente, permite establecer que la influencia en el resultado referente a remoción de sedimento es menor a 1%, por lo tanto no es un parámetro sensible en la modelización numérica.
- En lo que respecta a la implementación de la simulación con geometría Bieri, lo que se pudo evaluar durante todos los cambios aplicados al modelo es que, el hecho de dar velocidades iniciales incrementa las velocidades en (0.05 - 0.07)m/s en la cámara, 0.2m/s en la transición y 0.25m/s en la salida. Mientras que al variar los parámetros estudiados en las pruebas de sensibilidad la influencia en las velocidades no supera 0.01m/s.
- La eficiencia del desarenador es satisfactoria. Pues se alcanzan altas retenciones para tamaños de sedimento superiores a 0.075mm.
- Se recomienda, como trabajo complementario realizar una calibración final del modelo SSIIM para el proyecto Coca Codo Sinclair, para ello será necesario realizar la medición de parámetros importantes de flujo para diferentes condiciones de operación de la obra y para diferentes secciones. Este trabajo, si bien es exhaustivo, se considera importante para disponer de una herramienta más completa que permitirá la toma de decisiones y la optimización de su funcionamiento.
- Sobre la base del estudio comparativo realizado entre los resultados obtenidos por SSIIM y los resultados que fueran obtenidos por los modelos físicos, se concluye que el modelo numérico SSIIM es adecuado para el análisis y simulación de procesos de flujo y procesos de transporte de sedimentos asociados a obras hidráulicas para sedimentación.
- Es necesario indicar sin embargo, la importancia que tiene la generación de un archivo de control bien estructurado que contenga información y parámetros de



contorno apropiados que reflejen las reales condiciones o condiciones esperadas en las cuales se desempeñará la obra a estudiar.

- La implementación de la geometría, para la simulación del cuerpo de agua, es el proceso que mayor tiempo cuidado requiere, pues de éste depende el éxito para obtener una buena malla computacional que genere resultados confiables. Se recomienda realizar pruebas de validación y de afinamiento de la configuración de la malla.
- Por otro lado, es recomendable realizar diversos ensayos en una misma simulación, variando los intervalos de paso de tiempo para cada iteración, cambiando coeficientes de relajación, etc. a fin de obtener una buena convergencia y estabilidad de la simulación.
- Se recomienda continuar con el estudio del modelo numérico SSIIM, realizando la implementación en modelos hidráulicos construidos o que se prevean construir a través del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos de la Universidad de Cuenca, a fin de evaluar el desempeño en otros aspectos como: transporte de carga de lecho en embalses, variación de la tasa de concentración en bocatomas, campos de flujo en obras anexas como vertederos, desagües de fondo, entre otras.



7 BIBLIOGRAFÍA

www.ccs.gob.ec. (2012). Recuperado el 5 de Noviembre de 2013, de http://www.ccs.gob.ec/index.php?option=com_allvideoshare&view=video&slg=coca-codo-001&orderby=default&Itemid=132

Agraval, A. (Junio de 2005). Master Thesis. *Numerical Modelling of Sediment Flow in Tala Desilting Chamber*. Trondheim, Norway.

Fernandez, J., Delgado, P., Herrero, S., & Saleté, E. (2011). *Simulación tridimensional del flujo fluvial en el barranco del Bufadero, en Tenife, mediante ANSYS-CFX y XFlow*. Recuperado el 29 de Abril de 2013, de www.ingenieriadelagua.com: <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2011/pdf/p492.pdf>

Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. (2011). *Desing report - Volume II - Hydrologic and sediment analysis*. Quito - Ecuador.

Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. (2013). *Memoria de cálculo hidráulico del desarenador en la obra de captación*. Quito, Ecuador.

Krochin, S. (1978). *Diseño Hidráulico*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

Martín Vide, J. (2003). *Ingeniería de Ríos*. Universidad Politécnica de Cataluña - Cataluña: Alfaomega Grupo Editor.

Naylor, T. (1996). *Técnicas de Simulación en Computadoras*.

Novak, P., Moffat, A., & Nalluri, C. (2001). *Estructuras Hidráulicas* (2a Edición ed.). Mc Graw-Hill, Interamericana S.A.

Olsen, N. (2000). *CFD Algorithms for Hydraulic Engineering*. Noruega: The Norwegian University of Science and Technology.

Olsen, N. (2012). *Numerical Modelling and Hydraulics*. Trondheim: Department of hydraulic and Environmental Engineering The Norwegian University of Science and Technology.

Ordinola, J. (2009). *Simulación numerica tridimensional del comportamiento hidráulico del embalse Limón - Proyecto Olmos*. Piura - Perú.

Reyes, J. (2003). XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. *Problemas presentados y soluciones adoptadas, durante el diseño, de los desarenadores construidos en el Perú*, (pág. 10). Iquitos, Perú.

Rocha, A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Lima - Perú: Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil.

Sparrow, E. (2008). Recuperado el 15 de Julio de 2013, de Universidad Nacional del Santa - Biblioteca Central: http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/publicacionez/trabajo_de_desarenador1__tmp4a134267.pdf



Vásquez, J. (2003). *www.oocities.org/hidropiura*. Recuperado el 15 de Abril de 2013, de Modelación Numérica en Hidráulica: <http://www.oocities.org/hidropiura/ModelNum.pdf>

Yellow River Engineering Consulting Co. (2012). *Experimental Research on Performance of Newly Added Sedimentation Sub-basin and Desilting System of the CCS Hydropower Station Complex*.

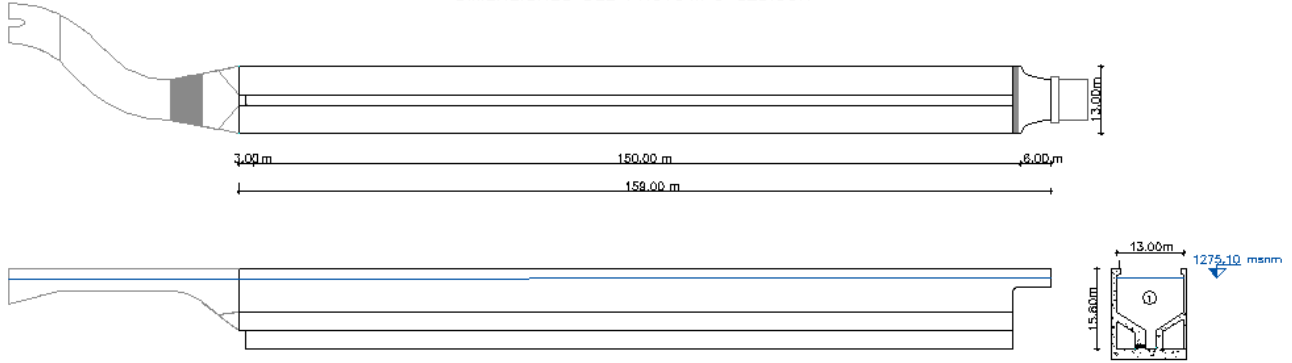
Yellow River Engineering Consulting Co. (2012). *Investigación experimental sobre el rendimiento de la cámara #7 del desarenador de la central hidroeléctrica CCS*. Zhengzhou - China.



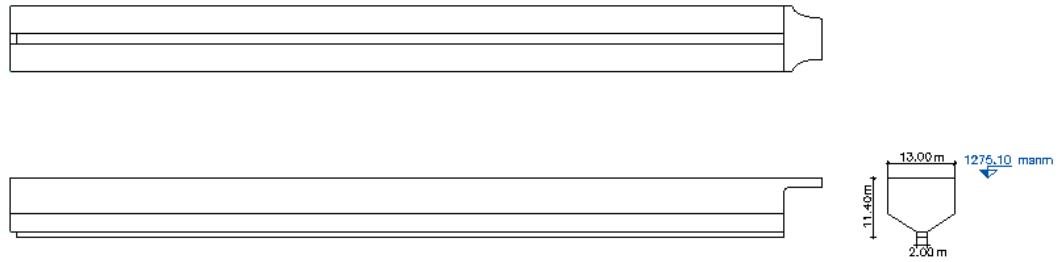
ANEXOS

ANEXO 1: Condiciones para simulación – SEDICON $Q=30.0 \text{ m}^3/\text{s}$

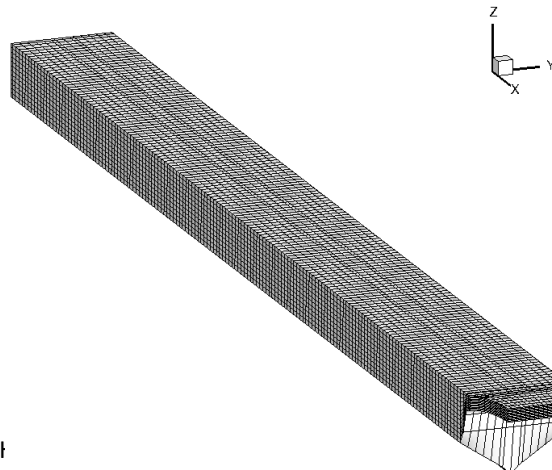
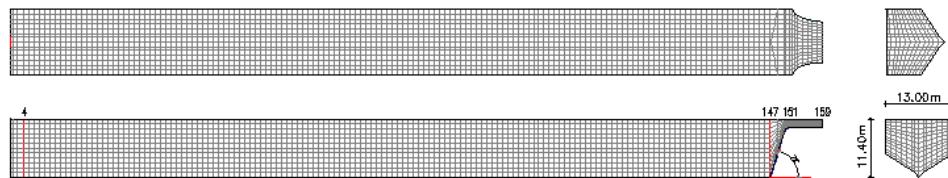
DIMENSIONES DEL PROTOTIPO SEDICON



VOLUMEN MODELADO NIVEL 1275.10msnm – SEDICON



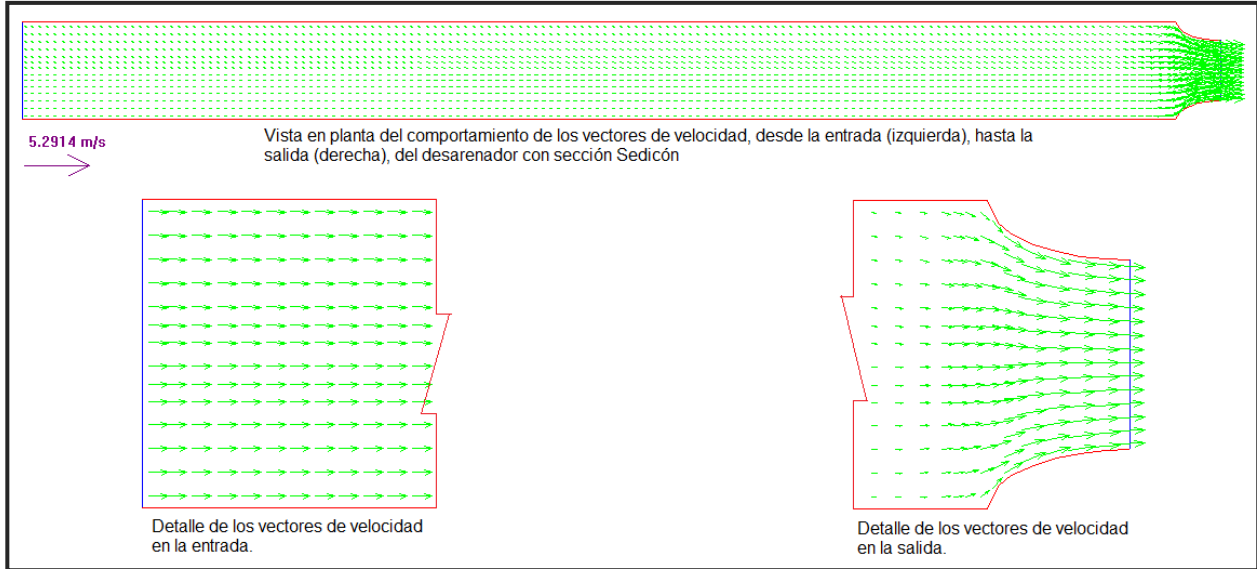
PROPUESTA DE MALLADO – SEDICON



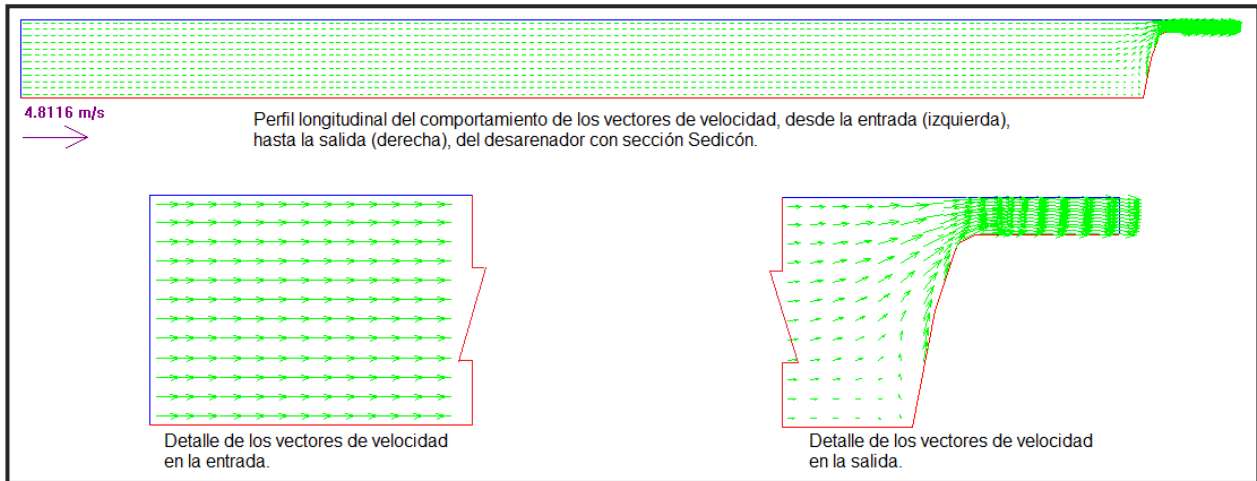
ANEXO 2: Resultados en SSIIM - Patrón de flujo de agua prototipo (SEDICON 30m³/s)

Vectores de velocidad

Planta

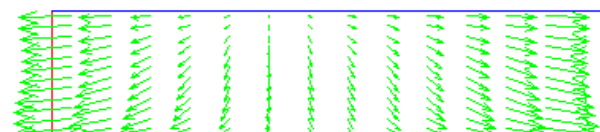
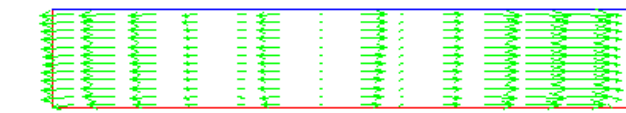
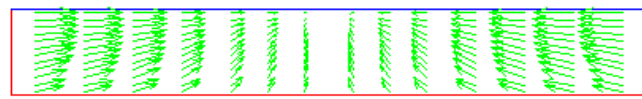
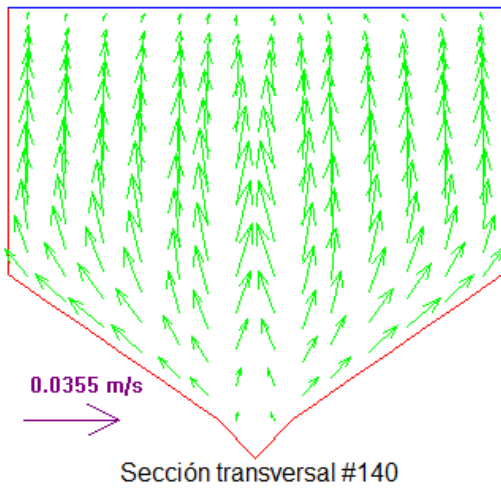
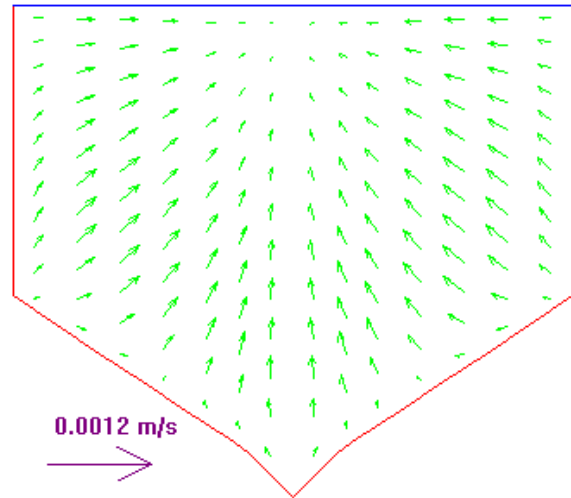
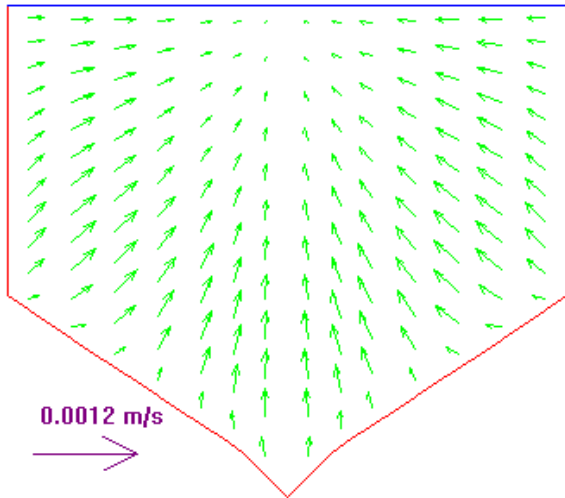
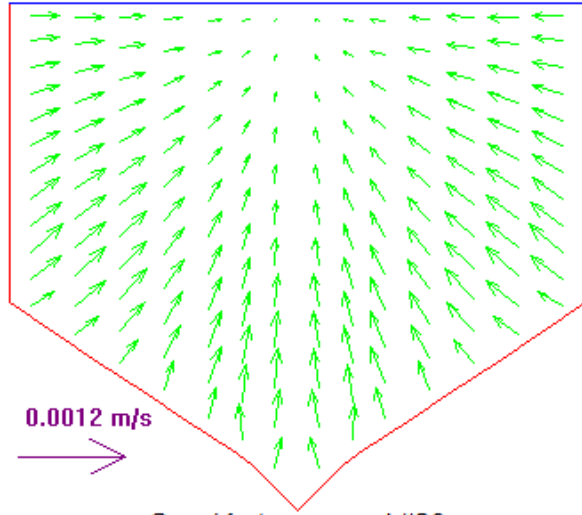
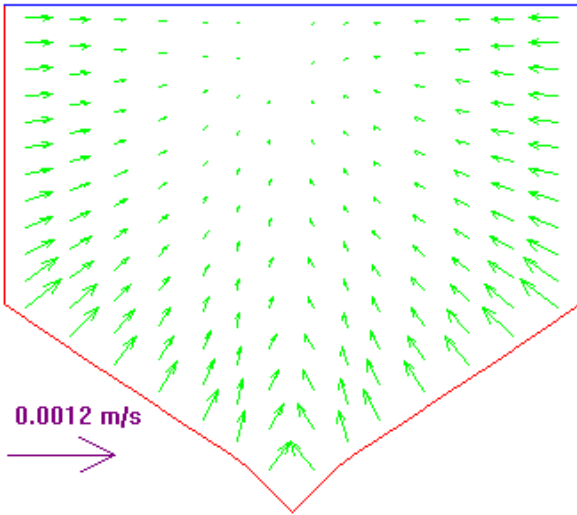


Logitudinal





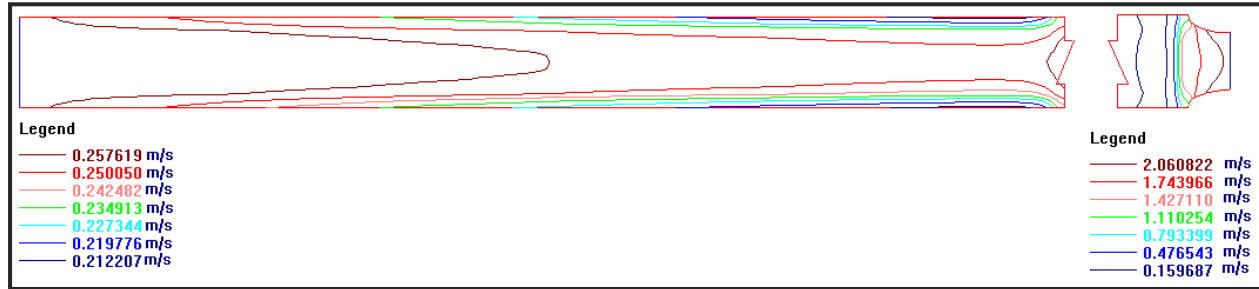
Transversal



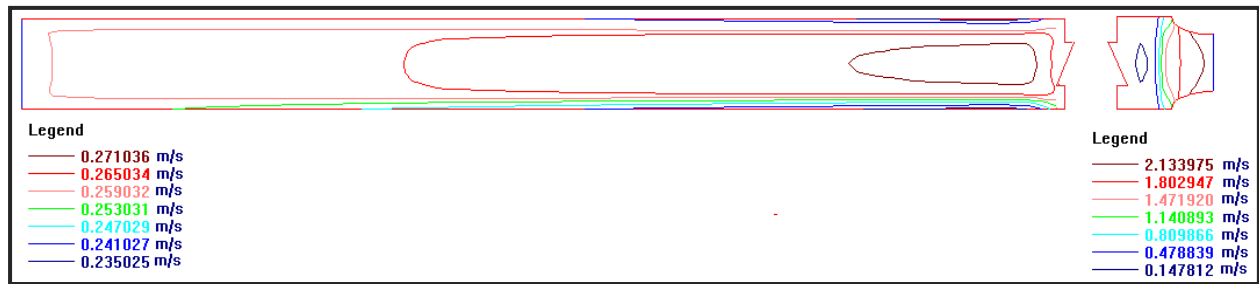


Velocidad horizontal en diferentes niveles

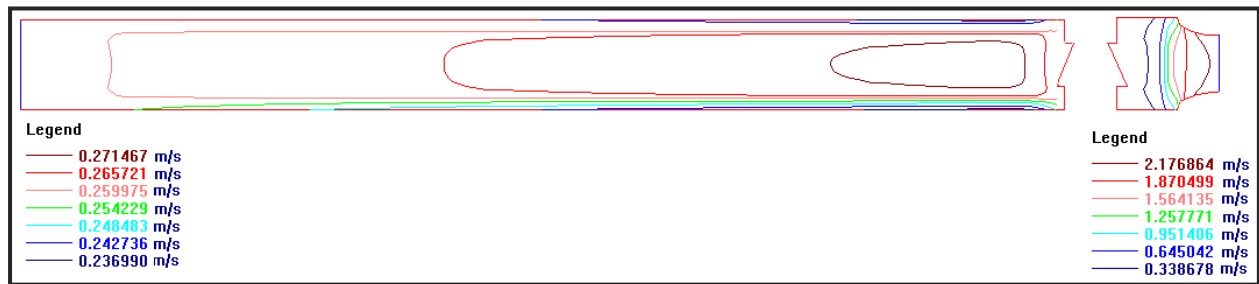
Planta



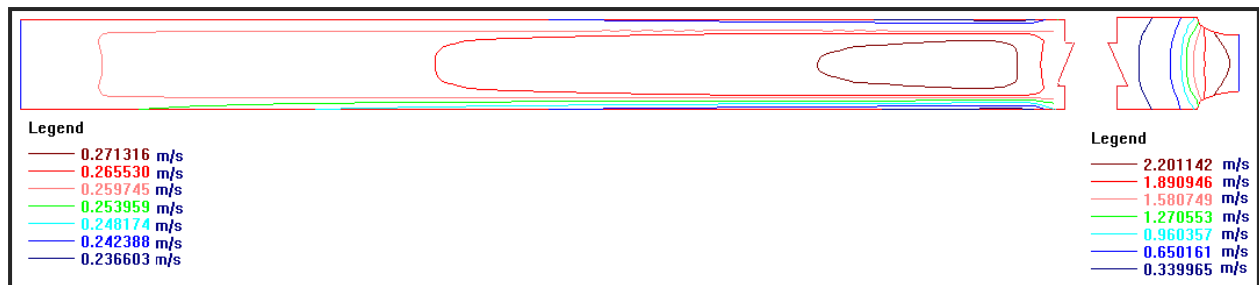
Nivel #3



Nivel #6



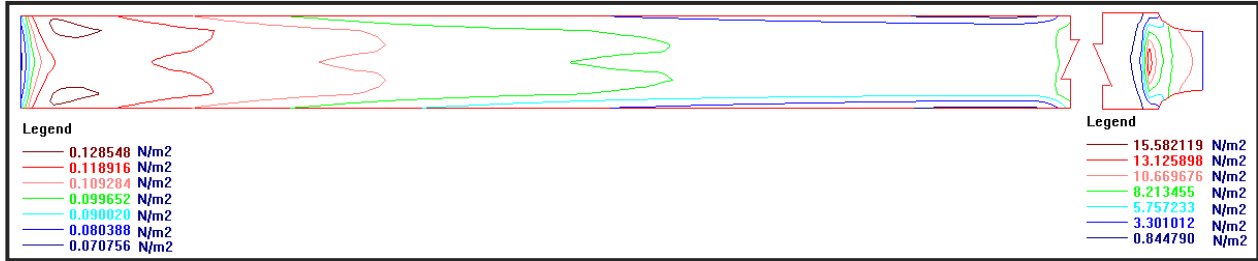
Nivel #9



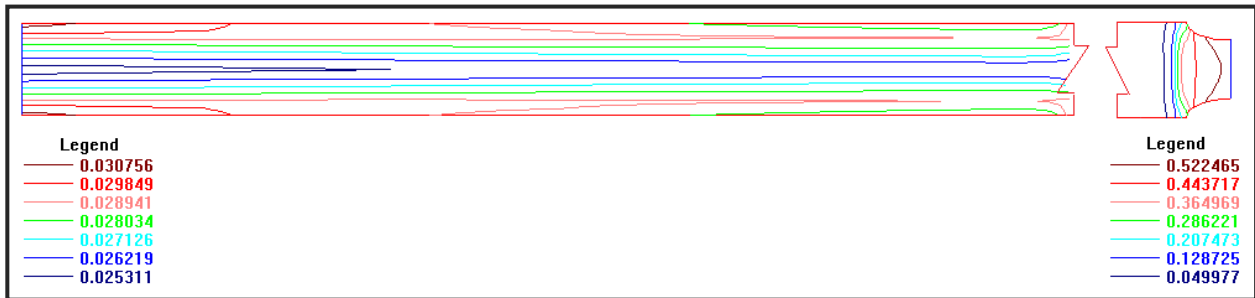
Nivel #13



Esfuerzos de corte en el fondo

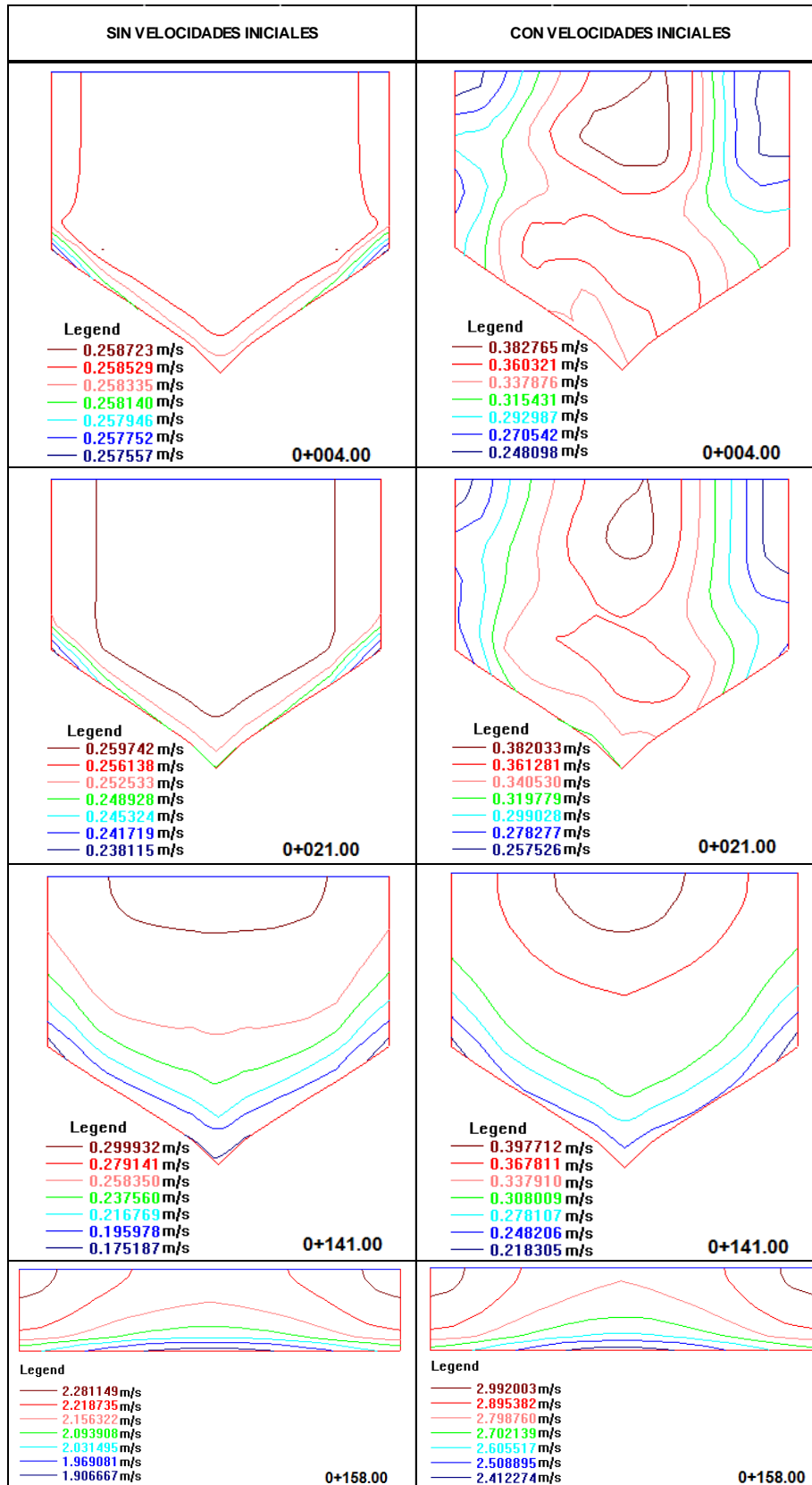


Número de Froude





Velocidad horizontal en diferentes secciones transversales con y sin velocidades iniciales

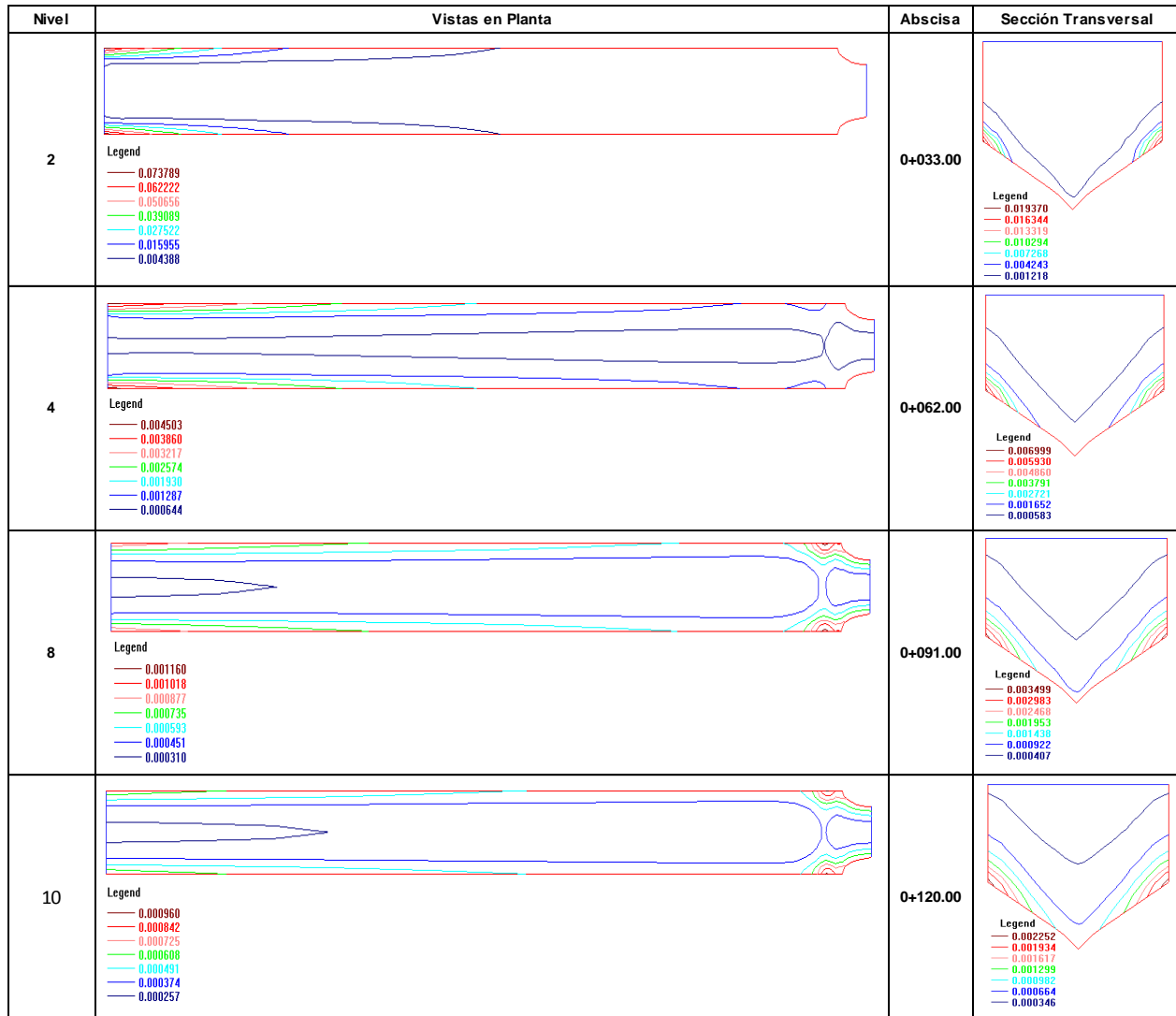


Autoría: Bernarda Luzuriaga H.
Diana Amaya Z.

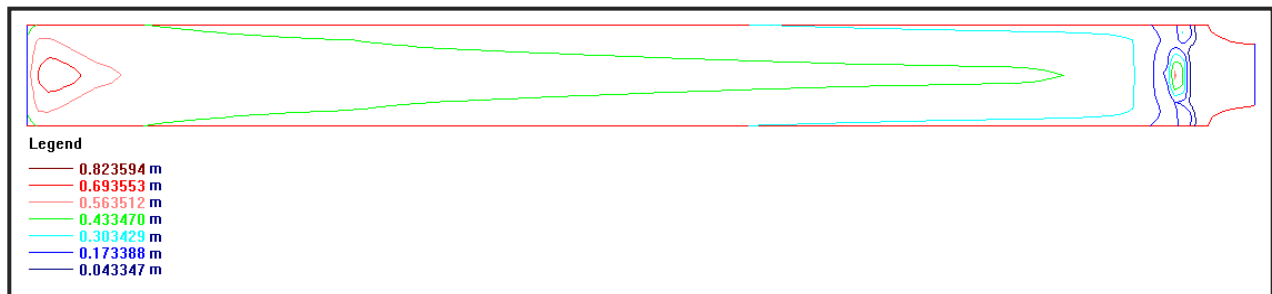


ANEXO 3: Resultados en SSIIM - Patrón de flujo de sedimentos prototipo (SEDICON 30 m³/s)

**Concentración de sedimentos
Planta y Secciones Transversales**



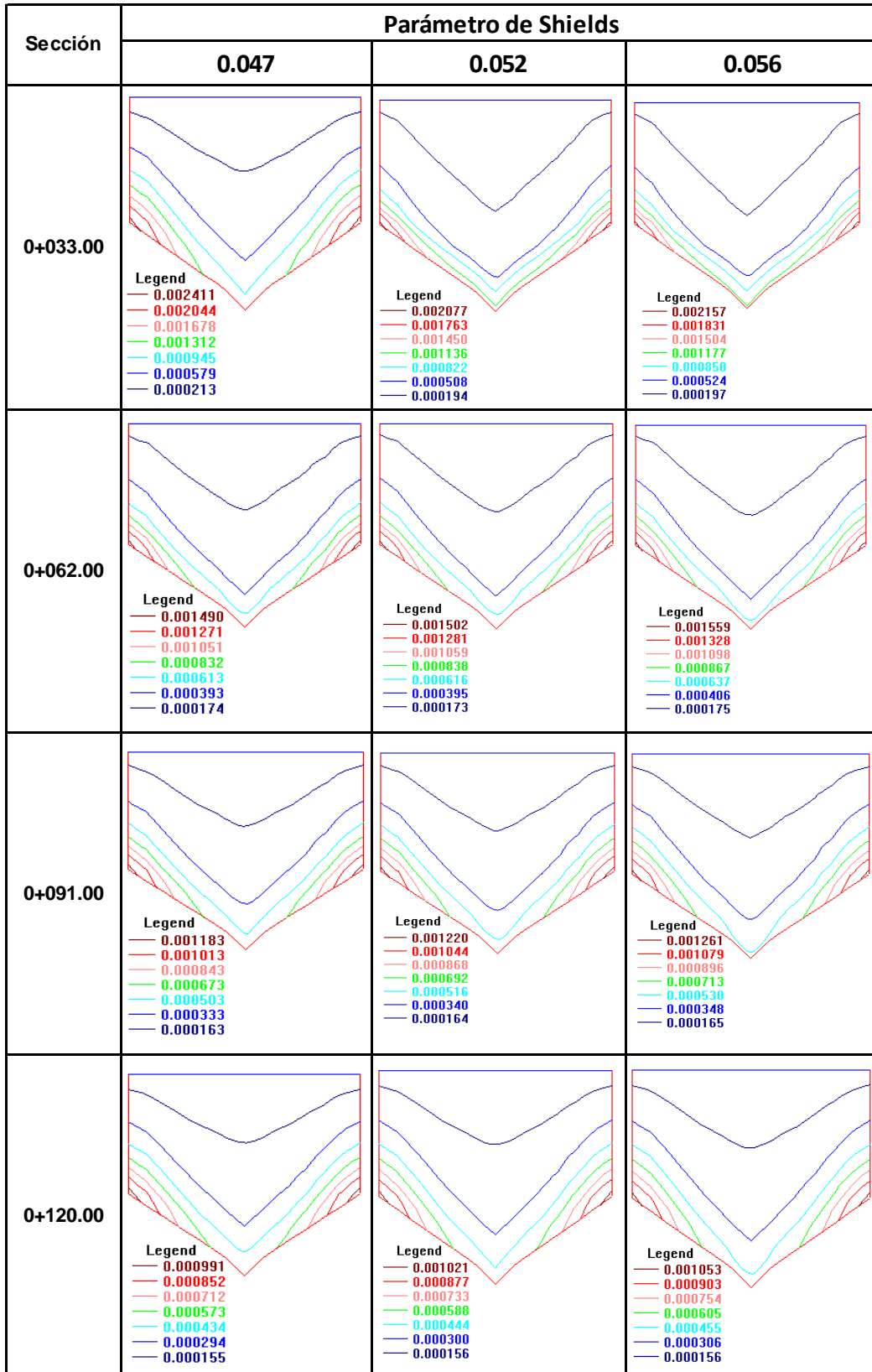
Altura de depósito de sedimentos





Concentración de sedimentos variando el parámetro de Shields - SEDICON

Secciones transversales

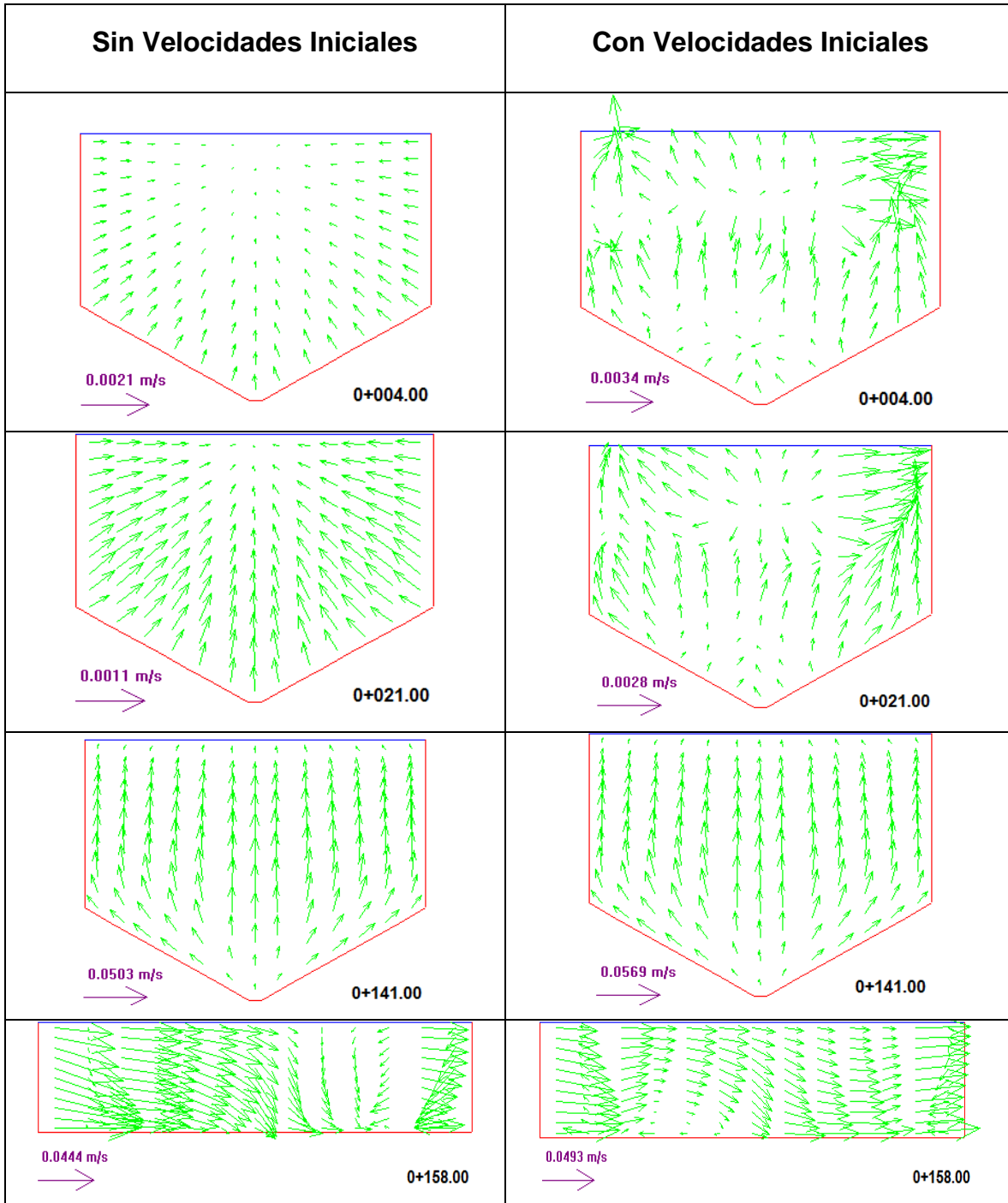




ANEXO 4: Resultados en SSIIM-Patrón de flujo de agua BIERI 32.5 m³/s

Vectores de velocidad considerando condiciones iniciales de velocidad y sin considerar.

Secciones Transversales



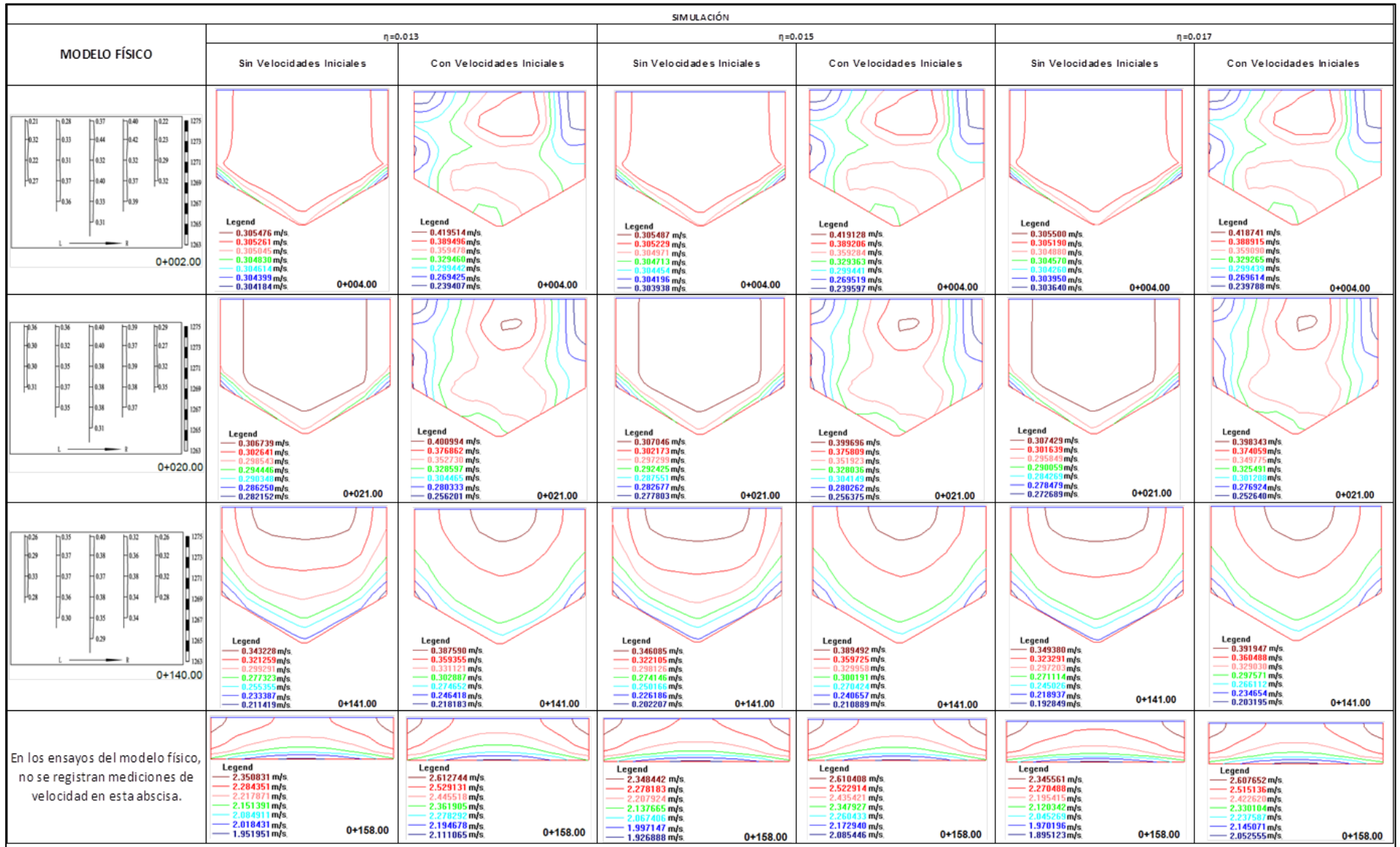


Velocidad horizontal con diferentes niveles de operación con y sin condiciones iniciales de velocidad
Secciones Transversales

MODELO FÍSICO	SIMULACIÓN			
	1275.17msnm		1275.19msnm	
	Sin Velocidades Iniciales	Con Velocidades Iniciales	Sin Velocidades Iniciales	Con Velocidades Iniciales
<p>0+002.00</p>	<p>0+004.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.306222 m/s 0.306005 m/s 0.305788 m/s 0.305572 m/s 0.305355 m/s 0.305138 m/s 0.304921 m/s 	<p>0+004.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.419503 m/s 0.389488 m/s 0.359474 m/s 0.329459 m/s 0.299444 m/s 0.269430 m/s 0.239415 m/s 	<p>0+004.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.305476 m/s 0.305261 m/s 0.305045 m/s 0.304830 m/s 0.304614 m/s 0.304398 m/s 0.304184 m/s 	<p>0+004.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.419514 m/s 0.389496 m/s 0.359478 m/s 0.329460 m/s 0.299442 m/s 0.269425 m/s 0.239407 m/s
<p>0+020.00</p>	<p>0+021.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.307489 m/s 0.303373 m/s 0.299257 m/s 0.295143 m/s 0.291027 m/s 0.286912 m/s 0.282797 m/s 	<p>0+021.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.400952 m/s 0.376832 m/s 0.352711 m/s 0.328591 m/s 0.304471 m/s 0.280350 m/s 0.256230 m/s 	<p>0+021.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.306739 m/s 0.302641 m/s 0.298545 m/s 0.294448 m/s 0.290348 m/s 0.286250 m/s 0.282152 m/s 	<p>0+021.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.400994 m/s 0.376862 m/s 0.352730 m/s 0.328597 m/s 0.304465 m/s 0.280333 m/s 0.256201 m/s
<p>0+140.00</p>	<p>0+141.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.343980 m/s 0.321905 m/s 0.299830 m/s 0.277755 m/s 0.255680 m/s 0.234002 m/s 0.212066 m/s 	<p>0+141.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.387516 m/s 0.359308 m/s 0.331101 m/s 0.302893 m/s 0.274685 m/s 0.246477 m/s 0.218269 m/s 	<p>0+141.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.343228 m/s 0.321259 m/s 0.299291 m/s 0.277323 m/s 0.255355 m/s 0.233387 m/s 0.211419 m/s 	<p>0+141.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.387590 m/s 0.359355 m/s 0.331121 m/s 0.302887 m/s 0.274652 m/s 0.246418 m/s 0.218183 m/s
<p>En los ensayos del modelo físico, no se registran mediciones de velocidad en esta abscisa.</p>	<p>0+158.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.377320 m/s 2.310085 m/s 2.242850 m/s 2.175615 m/s 2.108380 m/s 2.041145 m/s 1.973910 m/s 	<p>0+158.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.535706 m/s 2.551447 m/s 2.467187 m/s 2.382928 m/s 2.298668 m/s 2.214409 m/s 2.130150 m/s 	<p>0+158.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.350831 m/s 2.294351 m/s 2.237871 m/s 2.181391 m/s 2.124911 m/s 2.068431 m/s 1.951951 m/s 	<p>0+158.00</p> <p>Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.512744 m/s 2.529131 m/s 2.445518 m/s 2.361905 m/s 2.278292 m/s 2.194678 m/s 2.110665 m/s



Velocidad horizontal con diferentes coeficientes de rugosidad con y sin condiciones iniciales
Secciones Transversales



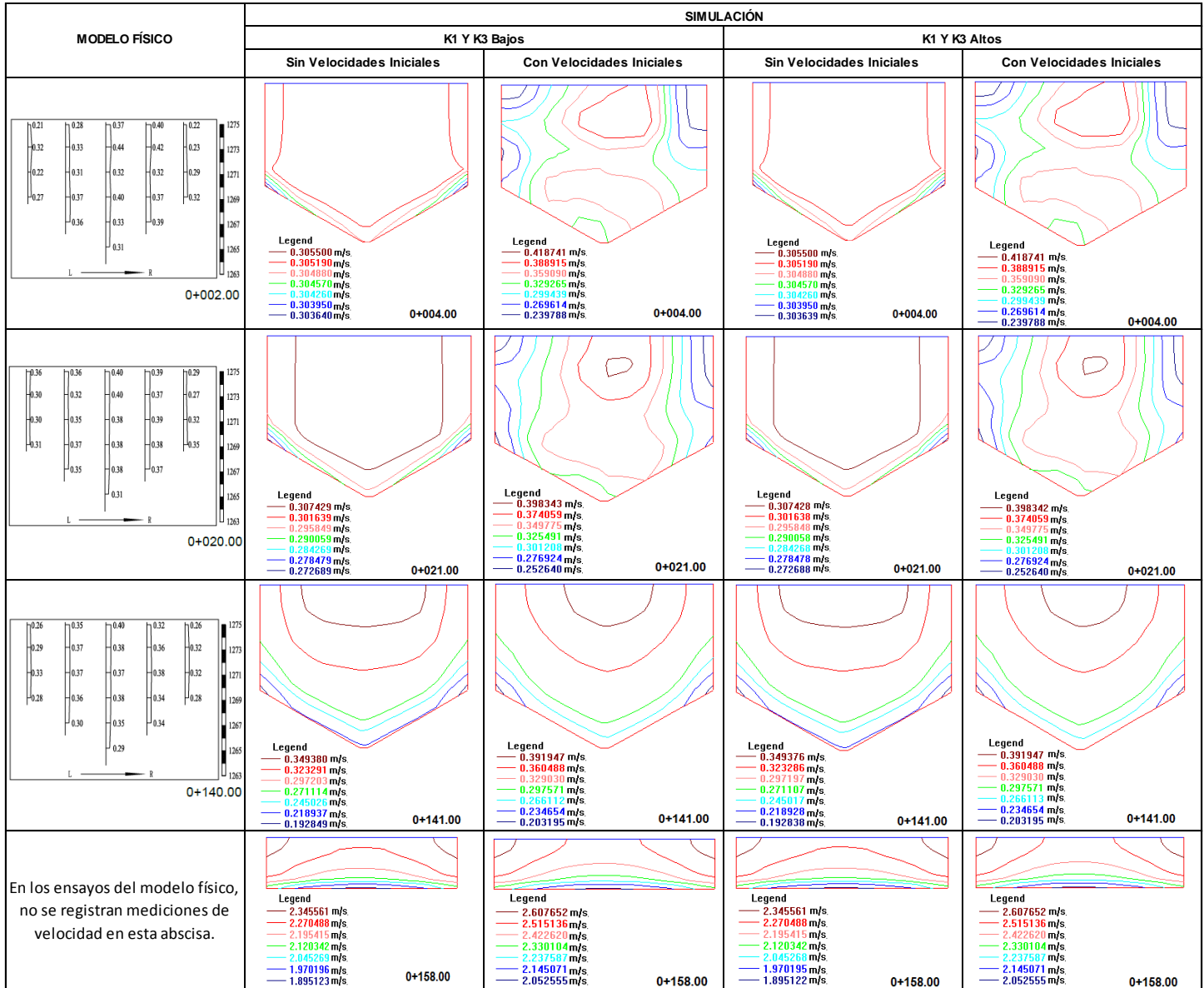
En los ensayos del modelo físico, no se registran mediciones de velocidad en esta abscisa.

Autoría: Bernarda Luzuriaga H.
Diana Amaya Z.



Velocidad horizontal con diferentes coeficientes de relajación con y sin condiciones iniciales

Secciones Transversales





UNIVERSIDAD DE CUENCA

Table with 5 columns: i, j, x, y, z. Rows 49-52 (j=1-15) and 50-52 (j=1-15). Values range from 0.000 to 13.500.

Table with 5 columns: i, j, x, y, z. Rows 53-54 (j=1-15) and 55-56 (j=1-15). Values range from 0.000 to 13.500.

Table with 5 columns: i, j, x, y, z. Rows 57-59 (j=1-15) and 60-64 (j=1-15). Values range from 0.000 to 13.500.

Table with 5 columns: i, j, x, y, z. Rows 61-63 (j=1-15) and 64-65 (j=1-15). Values range from 0.000 to 13.500.

Autoría: Bernarda Luzuriaga H. Diana Amaya Z.



i	j	x	y	z
145	1	147.615	0.000	4.670
145	2	147.615	1.000	4.000
145	3	147.615	2.000	3.330
145	4	147.615	3.000	2.670
145	5	147.615	4.000	2.000
145	6	147.615	5.000	1.350
145	7	147.615	5.500	1.000
145	8	147.615	6.500	0.000
145	9	147.615	7.500	1.000
145	10	147.615	8.000	1.350
145	11	147.615	9.000	2.000
145	12	147.615	10.000	2.670
145	13	147.615	11.000	3.330
145	14	147.615	12.000	4.000
145	15	147.615	13.000	4.670
146	1	148.643	0.000	4.670
146	2	148.643	1.000	4.000
146	3	148.643	2.000	3.330
146	4	148.643	3.000	2.670
146	5	148.643	4.000	2.000
146	6	148.643	5.000	1.350
146	7	148.643	5.500	1.000
146	8	148.643	6.500	0.000
146	9	148.643	7.500	1.000
146	10	148.643	8.000	1.350
146	11	148.643	9.000	2.000
146	12	148.643	10.000	2.670
146	13	148.643	11.000	3.330
146	14	148.643	12.000	4.000
146	15	148.643	13.000	4.670
147	1	149.671	0.000	4.670
147	2	149.671	1.000	4.000
147	3	149.671	2.000	3.330
147	4	149.671	3.000	2.670
147	5	149.671	4.000	2.000
147	6	149.671	5.000	1.350
147	7	149.671	5.500	1.000
147	8	149.671	6.500	0.000
147	9	149.671	7.500	1.000
147	10	149.671	8.000	1.350
147	11	149.671	9.000	2.000
147	12	149.671	10.000	2.670
147	13	149.671	11.000	3.330
147	14	149.671	12.000	4.000
147	15	149.671	13.000	4.670
148	1	150.699	0.000	6.290
148	2	150.699	1.000	6.290
148	3	150.699	2.000	6.290
148	4	150.699	3.000	6.290
148	5	150.699	4.000	6.290
148	6	150.699	5.000	6.290
148	7	150.699	5.500	6.290
148	8	150.699	6.500	6.290
148	9	150.699	7.500	6.290
148	10	150.699	8.000	6.290
148	11	150.699	9.000	6.290
148	12	150.699	10.000	6.290
148	13	150.699	11.000	6.290
148	14	150.699	12.000	6.290
148	15	150.699	13.000	6.290

i	j	x	y	z
149	1	151.489	0.000	8.700
149	2	151.489	1.000	8.700
149	3	151.489	2.000	8.700
149	4	151.489	3.000	8.700
149	5	151.489	4.000	8.700
149	6	151.489	5.000	8.700
149	7	151.489	5.500	8.700
149	8	151.489	6.500	8.700
149	9	151.489	7.500	8.700
149	10	151.489	8.000	8.700
149	11	151.489	9.000	8.700
149	12	151.489	10.000	8.700
149	13	151.489	11.000	8.700
149	14	151.489	12.000	8.700
149	15	151.489	13.000	8.700
150	1	151.683	0.000	9.290
150	2	151.683	1.000	9.290
150	3	151.683	2.000	9.290
150	4	151.683	3.000	9.290
150	5	151.683	4.000	9.290
150	6	151.683	5.000	9.290
150	7	151.683	5.500	9.290
150	8	151.683	6.500	9.290
150	9	151.683	7.500	9.290
150	10	151.683	8.000	9.290
150	11	151.683	9.000	9.290
150	12	151.683	10.000	9.290
150	13	151.683	11.000	9.290
150	14	151.683	12.000	9.290
150	15	151.683	13.000	9.290
151	1	152.489	0.000	9.700
151	2	152.489	1.000	9.700
151	3	152.489	2.000	9.700
151	4	152.489	3.000	9.700
151	5	152.489	4.000	9.700
151	6	152.489	5.000	9.700
151	7	152.489	5.500	9.700
151	8	152.489	6.500	9.700
151	9	152.489	7.500	9.700
151	10	152.489	8.000	9.700
151	11	152.489	9.000	9.700
151	12	152.489	10.000	9.700
151	13	152.489	11.000	9.700
151	14	152.489	12.000	9.700
151	15	152.489	13.000	9.700
152	1	152.989	0.000	9.700
152	2	152.989	1.000	9.700
152	3	152.989	2.000	9.700
152	4	152.989	3.000	9.700
152	5	152.989	4.000	9.700
152	6	152.989	5.000	9.700
152	7	152.989	5.500	9.700
152	8	152.989	6.500	9.700
152	9	152.989	7.500	9.700
152	10	152.989	8.000	9.700
152	11	152.989	9.000	9.700
152	12	152.989	10.000	9.700
152	13	152.989	11.000	9.700
152	14	152.989	12.000	9.700
152	15	152.989	13.000	9.700

i	j	x	y	z
153	1	153.441	0.951	9.700
153	2	153.441	1.493	9.700
153	3	153.441	2.375	9.700
153	4	153.441	3.256	9.700
153	5	153.441	4.138	9.700
153	6	153.441	5.019	9.700
153	7	153.441	5.619	9.700
153	8	153.441	6.500	9.700
153	9	153.441	7.382	9.700
153	10	153.441	7.981	9.700
153	11	153.441	8.862	9.700
153	12	153.441	9.744	9.700
153	13	153.441	10.624	9.700
153	14	153.441	11.507	9.700
153	15	153.441	12.049	9.700
154	1	154.025	1.404	9.700
154	2	154.025	2.132	9.700
154	3	154.025	2.860	9.700
154	4	154.025	3.588	9.700
154	5	154.025	4.316	9.700
154	6	154.025	5.044	9.700
154	7	154.025	5.772	9.700
154	8	154.025	6.500	9.700
154	9	154.025	7.228	9.700
154	10	154.025	7.956	9.700
154	11	154.025	8.684	9.700
154	12	154.025	9.412	9.700
154	13	154.025	10.140	9.700
154	14	154.025	10.868	9.700
154	15	154.025	11.596	9.700
155	1	154.950	1.849	9.700
155	2	154.950	2.513	9.700
155	3	154.950	3.178	9.700
155	4	154.950	3.842	9.700
155	5	154.950	4.507	9.700
155	6	154.950	5.171	9.700
155	7	154.950	5.836	9.700
155	8	154.950	6.500	9.700
155	9	154.950	7.165	9.700
155	10	154.950	7.829	9.700
155	11	154.950	8.494	9.700
155	12	154.950	9.158	9.700
155	13	154.950	9.822	9.700
155	14	154.950	10.487	9.700
155	15	154.950	11.151	9.700
156	1	155.932	2.151	9.700
156	2	155.932	2.649	9.700
156	3	155.932	3.291	9.700
156	4	155.932	3.933	9.700
156	5	155.932	4.575	9.700
156	6	155.932	5.216	9.700
156	7	155.932	5.858	9.700
156	8	155.932	6.500	9.700
156	9	155.932	7.142	9.700
156	10	155.932	7.784	9.700
156	11	155.932	8.426	9.700
156	12	155.932	9.068	9.700
156	13	155.932	9.709	9.700
156	14	155.932	10.351	9.700
156	15	155.932	10.849	9.700

i	j	x	y	z
157	1	156.941	2.350	9.700
157	2	156.941	2.788	9.700
157	3	156.941	3.407	9.700
157	4	156.941	4.026	9.700
157	5	156.941	4.644	9.700
157	6	156.941	5.263	9.700
157	7	156.941	5.882	9.700
157	8	156.941	6.500	9.700
157	9	156.941	7.119	9.700
157	10	156.941	7.737	9.700
157	11	156.941	8.356	9.700
157	12	156.941	8.975	9.700
157	13	156.941	9.593	9.700
157	14	156.941	10.212	9.700
157	15	156.941	10.650	9.700
158	1	157.962	2.463	9.700
158	2	157.962	2.930	9.700
158	3	157.962	3.525	9.700
158	4	157.962	4.120	9.700
158	5	157.962	4.715	9.700
158	6	157.962	5.310	9.700
158	7	157.962	5.905	9.700
158	8	157.962	6.500	9.700
158	9	157.962	7.095	9.700
158	10	157.962	7.690	9.700
158	11	157.962	8.285	9.700
158	12	157.962	8.881	9.700
158	13	157.962	9.476	9.700
158	14	157.962	10.071	9.700
158	15	157.962	10.537	9.700
159	1	159.002	2.500	9.700
159	2	159.002	3.071	9.700
159	3	159.002	3.643	9.700
159	4	159.002	4.214	9.700
159	5	159.002	4.785	9.700
159	6	159.002	5.357	9.700
159	7	159.002	5.928	9.700
159	8	159.002	6.500	9.700
159	9	159.002	7.071	9.700
159	10	159.002	7.643	9.700
159	11	159.002	8.214	9.700
159	12	159.002	8.785	9.700
159	13	159.002	9.357	9.700
159	14	159.002	9.928	9.700
159	15	159.002	10.500	9.700