

18  
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**FENOMENO DE SEDIMENTACION EN UN  
CANAL TRIDIMENSIONAL**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
(AREA MECANICA)  
P R E S E N T A :

**MARGARITA AVIÑA HERNANDEZ**

ASESOR: DR. ARTURO PALACIO PEREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F.

1997

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

*Agradezco de todo corazón*

*A la U.N.A.M.*

*A la Facultad de Ingeniería*

*Al Instituto de Ingeniería*

*Al Doctor Arturo Dalacio*

*Al Doctor Alejandro Rodríguez*

*Al Maestro Martín Salinas*

*A mi familia por su apoyo, paciencia y comprensión sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible.*

## Indice

Capítulo I. Objetivo.....	1
Capítulo II. Introducción.....	3
3.1 Antecedentes.....	3
2.2 Propiedades del sedimento.....	5
2.2.1 Densidad y porosidad.....	5
2.2.2 Forma.....	6
2.2.3 Tamaño.....	7
2.2.4 Diámetros.....	7
2.2.5 Velocidad de caída de partícula.....	8
2.2.5.1 Partículas no esféricas.....	9
2.2.5.2 Efecto de la concentración de sedimentos.....	10
2.3 Propiedades del fluido.....	10
2.3.1 Densidad.....	11
2.3.2 Viscosidad.....	11
2.4 Iniciación de movimiento.....	12
2.5 Transporte de carga en suspensión.....	15
2.6 Ecuación de balance de masa para la concentración.....	15
2.7 Formulación matemática.....	21
2.7.1 Superficies sólidas.....	21
2.7.2 Modelo k-ε.....	24
2.7.3 Ecuación de continuidad.....	29
2.7.4 Ecuación de cantidad de movimiento.....	29
2.7.5 Ecuación de transporte de sedimentos.....	30
Capítulo III. Modelo.....	31
3.1 Transporte de sedimentos por suspensión.....	31
3.2 Condiciones de frontera.....	32
3.2.1 Cantidad de movimiento.....	33

3.2.2 Conservación de masa.....	33
3.2.3 Modelo de turbulencia k.....	33
3.2.4 Rapidez de disipación turbulenta.....	33
3.2.5 Concentraciones de sedimento.....	34
3.3 Condiciones Iniciales.....	34
3.4 Método de solución.....	34
Capítulo IV. Análisis de resultados.....	36
4.1 Sedimentador tridimensional.....	36
4.1.1 Mallado.....	38
4.1.2 Perfiles de velocidad.....	39
4.1.3 Perfiles de concentración.....	40
4.2 Sedimentador bidimensional.....	44
4.2.1 Mallado.....	44
4.2.2 Perfiles de velocidad y de sedimento.....	44
4.3 Diferencias centradas y hacia adelante.....	47
Capítulo V. Aplicaciones.....	49
5.1 Introducción.....	49
5.2 Sistema de coordenadas.....	50
5.3 Discusión de resultados.....	50
5.3.1 Hidrodinámica.....	51
5.3.2 Distribución de sólidos en suspensión.....	52
Capítulo V. Conclusiones.....	64
Referencias.....	66
Bibliografía.....	66
Apéndice 1. Q1 del sedimentador tridimensional.....	i

Apéndice 3. Q1 del sedimentador bidimensional.....v  
Apéndice 3. Ground sel sedimentadot tridimensional.....x  
Apéndice 4. Ground del sedimentador bidimensional.....xxviii

## SIMBOLOGIA

### Latinas

a	altura de referencia (m)
a	eje (factor de forma de partícula)
A	constante (ley logarítmica de pared)
b	eje (factor de forma de partícula)
B	constante (ley logarítmica de pared)
$c_a$	concentración de referencia para $y=a$ ( $m^3_o/m^3_a$ )
c	concentración ( $m^3_o/m^3_a$ )
c	Chezy (ecuaciones empíricas de transporte)
$C_D$	coeficiente de arrastre (-)
$C_1, C_2$	constantes
$C_3, C_\mu$	constantes
$d_{50}$	tamaño mediano de partícula (m)
d, D	diámetro de la partícula (m)
$D^*$	parámetro de partícula (-)
e	factor de corrección
E	parámetro de rugosidad (ley logarítmica de pared)
f	fuerza (N)
F	factor de forma
$F_D$	fuerza de arrastre (N)
$F_g$	fuerza gravitacional (N)
$F_p$	fuerza perturbadora (N)
g	aceleración debido a la gravedad ( $m/s^2$ )
h	tirante (m)
k	energía cinética turbulenta (J)
$k^+$	altura adimensional de rugosidad
m	masa (kg)
p	porosidad (-)
P	presión (Pa)
$q_s$	gasto unitario de sedimento ( $m^2/s$ )
$Re$	número de Reynolds
s	densidad específica
s	coeficiente de fricción
u	velocidad (m/s)
ue	velocidad de corriente
$u^*$	velocidad de cortante (m/s)
$u^*, cr$	velocidad crítica cortante (m/s)

$u^+$	velocidad adimensional
$w_s$	velocidad de sedimentación (m/s)
$u_{res}$	velocidad resultante paralela a la pared
$x$	coordenada
$y$	coordenada
$y^+$	distancia adimensional a la pared
$z$	coordenada
$Z$	número de suspensión

### Griegas

$\alpha$	constante
$\beta$	ángulo de reposo
$\delta$	ancho de capa límite
$\epsilon_{ec}$	coeficiente de mezclado de sedimento relacionado con la corriente
$\epsilon_f$	coeficiente de mezclado de fluido
$\Gamma$	coeficiente
$\kappa$	constante de von Kármán
$\lambda$	parámetro de concentración adimensional
$\rho$	densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$\tau_b$	cortante en el piso (Pa)
$\tau_{b,cr}$	cortante crítico en el piso (Pa)
$\mu$	viscosidad dinámica (Pa.s)
$\nu$	viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)
$\sigma$	número de Schmid (-)
$\theta$	número de Schields (-)
$\theta_{cr}$	número de Schields crítico (-)
$\xi$	gradiente de presión (N/m <sup>3</sup> )
$\chi$	constante

### Subíndices

$k$	energía cinética turbulenta
$s$	sedimento
$\epsilon$	dissipación de la energía cinética turbulenta
$m$	mezcla de fluido-sedimento

---

## CAPITULO I

### OBJETIVO

El predecir el fenómeno de sedimentación de sólidos en suspensión se ha convertido en una necesidad tanto industrial como ecológica, p.e. reducción de costos en diseño y operación de tanques sedimentadores, evitar que canales de riego se bloqueen provocando una mala irrigación de las cosechas o que ocurra una inundación de los campos, dar adecuado mantenimiento de los canales para la navegación, lograr retirar la máxima cantidad de sedimentos abrasivos en aguas destinadas a accionar una turbina o que serán bombeadas, en la obtención de agua potable, o simplemente retirar el exceso de sólidos en suspensión en ríos o lagos para favorecer la fauna y vida silvestre.

Realizar trabajo experimental para cada opción de diseño resulta muy costoso en tiempo, recursos humanos y materiales, y por ello se requiere de métodos computacionales avanzados para poder predecir el transporte de sedimento.

El objetivo de esta tesis es desarrollar un modelo numérico capaz de dar una primera aproximación confiable del comportamiento de las partículas en suspensión, tal que sienta las bases del diseño o prediseño de un canal, tanque sedimentador o cualquier sistema dependiente del transporte de sedimentos.

Un segundo punto que cubrirá este trabajo será el validar el modelo numérico obtenido, comparando los resultados que este arroje con resultados experimentales reportados en la literatura.

El tercer y último objetivo fundamental, será mostrar la aplicación del modelo

---

---

numérico en un caso práctico de flujo tridimensional con marcada asimetría, en donde los modelos empíricos de parámetros concentrados presentan grandes limitaciones.

---

## CAPITULO II

### INTRODUCCION

#### 2.1 Antecedentes

La sedimentación por gravedad es el tratamiento más común y aplicado para la remoción de los sólidos en suspensión en aguas de desecho. Dado que la inversión en los tanques de sedimentación es generalmente el 30% de la inversión total del sistema incluyendo bombas, desarenadores, etc., [1] la determinación de la eficiencia, es decir, el porcentaje de remoción de sólidos de un tanque sedimentador, ha sido el objeto de numerosos estudios teóricos y experimentales.

Las características más importantes de las partículas en suspensión son la distribución de tamaños y la densidad, que junto con la concentración de partículas en suspensión y la densidad del fluido, determinan la distribución de velocidad de sedimentación de las mismas. Las características de las partículas en suspensión pueden ser afectadas a su vez por las características de flujo (distribución de viscosidad turbulenta), porque puede ocurrir aglomeración de partículas o un rompimiento. Además la distribución de la densidad del fluido depende de los campos de concentración.

El patrón de flujo y las trayectorias seguidas por las partículas en suspensión a través del sedimentador, están necesariamente enlazadas la una a la otra y al desempeño del tanque sedimentador. Además, el campo de flujo determina la distribución de la difusividad turbulenta a través del tanque, que a su vez determina el nivel de mezclado de partículas. Mientras que el mezclado puede realzar la aglomeración de partículas, ciertamente actúa contra la gravedad tratando de mantener las partículas sólidas en

---

suspensión y hasta puede causar la resuspensión de partículas que ya se habían sedimentado. Por lo tanto, la determinación del campo de flujo y las características de la turbulencia es esencial para la predicción de la eficiencia del tanque.

La obtención del campo de flujo puede ser lograda ya sea experimentalmente o teóricamente a través del uso de modelos matemáticos. La determinación experimental del campo de flujo es una tarea ardua que sin embargo, puede proveer información importante sobre la hidrodinámica del tanque bajo estudio. Frecuentemente la información experimental es específica del tanque y dichas mediciones tienen aplicación limitada al estudio y diseño de otros tanques. Por esta razón, distribuciones teóricas simplificadas para la velocidad y difusividad turbulenta han sido usadas frecuentemente en el desarrollo de métodos de predicción para el campo de flujo y eficiencia de sedimentación.

Existen diversos estudios en los cuales han sido propuestos perfiles de velocidad unidireccional uniforme [Camp (1946), Dobbins (1944)] y logarítmico o parabólico [Sarikaya(1977)]; sin embargo estos ignoran las complejidades hidrodinámicas, tales como regiones de recirculación en el tanque real. Las simplificaciones asociadas a la imposición de perfiles de velocidad, son realistas sólo para ciertas partes del tanque y fuerzan al ingeniero a usar grandes factores de seguridad en el diseño para compensar imprecisiones derivadas de dichas suposiciones.

Modelos numéricos más sofisticados para el cálculo del campo de flujo han sido propuestos recientemente, y permiten predecir dicho campo de flujo en tanques de sedimentación con cierto éxito. Estos modelos emplean varias formas de formulación de campo de flujo estable medio [Abdel-Gaward(1985), Celik-Rodi-Stamou(1985), Imam(1981)] o inestable [Stamou-Adams(1985)]. Técnicas de diferencia finita o elemento finito son usadas para la solución numérica de las ecuaciones de flujo y de partículas en suspensión. Algunos modelos emplean una simple suposición considerando constante la difusividad turbulenta [Imam-McCorquodale(1984)], mientras otros usan un modelo más refinado de turbulencia, como por ejemplo el modelo k-ε [Rodi(1980)].

---

Dicho modelo determina la distribución de viscosidad turbulenta y la difusividad turbulenta sobre un campo de flujo resolviendo ecuaciones de transporte para la energía cinética del movimiento turbulento  $k$  y su rapidez de disipación  $\epsilon$ .

## 2.2 Propiedades del sedimento

El transporte y deposición del sedimento no sólo depende de las características del flujo sino también de las propiedades del sedimento; la velocidad de sedimentación de una partícula caracteriza directamente su reacción al flujo. Para la descripción de sedimentos son necesarios la distribución frecuencial del tamaño de partícula y velocidad de sedimentación de las mismas. La floculación es importante en el comportamiento de sedimentos finos y en muchos casos puede ser el factor principal en determinar la velocidad de sedimentación.

El sedimento es un material fragmentario formado primordialmente por la desintegración física y química de las rocas de la corteza terrestre. Dichas partículas varían en tamaño y forma, así como en gravedad específica y composición mineral; los materiales predominantes son cuarzo y minerales de arcilla. Estos últimos tienen una estructura que cambia fácilmente en medios salinos (floculación) bajo la influencia de fuerzas electrostáticas (fuerzas cohesivas). Consecuentemente hay una diferencia fundamental en sedimentación entre la arena y los minerales de arcilla.

### 2.2.1 Densidad y porosidad

La densidad  $\rho_s$  del cuarzo y los minerales de arcilla son aproximadamente iguales, con un valor promedio de  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ . La densidad del sedimento seco es la masa del sedimento seco por unidad de volumen (concentración) y es igual a:

$$\rho_{seco} = (1 - p) \rho_s \quad (2.1)$$

donde  $p$  es el factor de porosidad. La densidad húmeda o masa volumétrica del material depositado es la masa del agua y sedimento por unidad de volumen:

$$\rho_{\text{húmedo}} = p \rho + (1 - p) \rho_s \quad (2.2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

La porosidad del sedimento está relacionada frecuentemente con la forma en que el sedimento es depositado (precipitado). Un acomodo fácil ocurre cuando los sedimentos se depositan en aguas tranquilas. Existen básicamente cuatro arreglos de acomodo para partículas esféricas. El arreglo más inestable es el cúbico con las esferas formando un cubo, resultando en una porosidad del 48%. El arreglo romboidal con las esferas en los huecos de las otras ofrece el acomodamiento más estable y de menor porosidad, 26%. Una arena gruesa de diversos tamaños tiene típicamente una porosidad del 40% y una arena fina uniforme la tendrá de un 45%. Los depósitos consistentes de arcilla, arena y materiales orgánicos son llamados lodos, y pueden tener un factor grande de porosidad, hasta del 80%.

### 2.2.2 Forma.

La forma de las partículas está generalmente representada por el factor de forma de Corey definido como:

$$SF = \frac{c}{(ab)^{0.5}} \quad (2.3)$$

donde:

$a$  = longitud del eje más largo perpendicular a otros dos ejes

$b$  = longitud del eje medio perpendicular a otros dos ejes

$c$  = longitud del eje más corto perpendicular a otros dos ejes.

---

El factor SF de la arena natural es de aproximadamente 0.7.

### 2.2.3 Tamaño

Usualmente los sedimentos son referidos como grava, arena o arcilla. Estos términos se refieren al tamaño de la partícula, el cual varía entre 256 mm y 0.24  $\mu\text{m}$ .

### 2.2.4. Diámetros

Los diámetros típicos son:

- diámetro de tamiz, es el diámetro de la esfera igual a la longitud del lado de la abertura de un tamiz cuando a través del mismo la partícula pasa.
- diámetro nominal, es el diámetro de una esfera que tiene un mismo volumen que la partícula.
- diámetro estándar de caída, es el diámetro de una esfera que tiene una gravedad específica de 2.65 y que tiene la misma velocidad de caída que la partícula en agua quieta y destilada a 24°C.

Una muestra natural de sedimentos contiene partículas de varios tamaños. La distribución de tamaños de dicha muestra es la distribución de material de sedimentos por porcentaje de peso, usualmente representado como una distribución de frecuencia.

La distribución de frecuencia está representada por:

- Tamaño mediano de la partícula,  $d_{50}$  que es el tamaño para el cual 50% del peso es más fino.
- Tamaño de partícula medio,  $d_m = \sum (p_i d_i) / 100$  donde  $p_i$  es el porcentaje por peso de cada fracción de tamaño de grano  $d_i$ .
- Desviación estándar,  $\sigma_d = \sum p_i (d_i - d_m)^2 / 100$

### 2.2.5. Velocidad de caída de partícula.

Básicamente la velocidad de caída es una propiedad de comportamiento. La velocidad terminal de caída ( $W_s$ ) de una esfera es la que se presenta cuando la fuerza de arrastre del fluido sobre la partícula está en equilibrio con la fuerza de gravedad, dando:

$$W_s = \left[ \frac{4(s-1)gd}{3 C_D} \right]^{0.5} \quad (2.4)$$

donde

$W_s$  = velocidad terminal de caída

$d$  = diámetro de esfera

$C_D$  = coeficiente de arrastre

$g$  = aceleración de la gravedad

$s$  = gravedad específica

El coeficiente de arrastre  $C_D$  es una función del número de Reynolds, definido como  $Re = W_s d / \nu$ , donde  $\nu$ , es la viscosidad cinemática. En la región de Stokes ( $Re < 1$ ), el coeficiente de arrastre está dado por  $C_D = 24/Re$ , lo cual da por resultado:

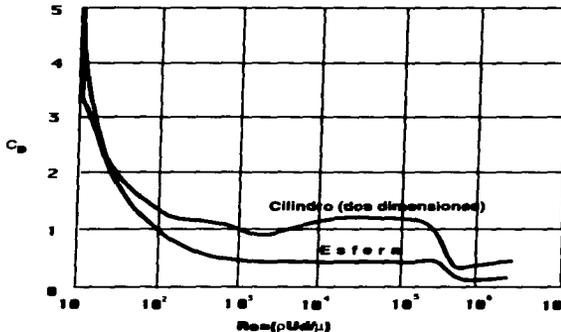


Fig. 2.1. Coeficiente de arrastre para un cilindro y una esfera.

---


$$W_s = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \quad (2.5)$$

Afuera de la región de Stokes no existe una expresión simple para el coeficiente de arrastre. El valor de  $C_D$  decrece rápidamente afuera de la región de Stokes ( $Re < 1$ ) y se vuelve casi constante para  $10^3 < Re < 10^5$ , lo que se puede apreciar en la figura 2.1. El efecto de la temperatura en la velocidad de caída está tomado en cuenta por el coeficiente de viscosidad cinemática  $\nu$ . El efecto mayor ocurre para los diámetros de esfera más pequeños.

### 2.2.5.1. Partículas no esféricas

La velocidad terminal de caída para sedimento no esférico puede ser determinada a partir de las siguientes fórmulas:

$$W_s = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \quad 1 < d < 100 \mu\text{m}$$

$$W_s = \frac{10\nu}{d} \left[ \left( 1 + \frac{0.01(s-1)gd^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad 100 < d < 1000 \mu\text{m}$$

$$W_s = 1.1[(s-1)gd]^{0.5} \quad d > 1000 \mu\text{m} \quad (2.6)$$

donde  $d$  es el diámetro de tamiz.

---

### 2.2.5.2. Efecto de la concentración de sedimentos

La velocidad de caída de una sola partícula está modificada por la presencia de otras partículas. Una pequeña nube de partículas en fluido claro tendrá una velocidad de caída mayor que para una sola partícula. Experimentos con suspensiones uniformes de sedimento y fluido han mostrado que la velocidad de caída es fuertemente reducida con respecto a la de una sola partícula, cuando la concentración de sedimento es grande. Este efecto es conocido como "sedimentación entorpecida" y es causado por el flujo de retorno inducido por las velocidades de sedimentación.

De acuerdo con Richardson y Zaki (1954), la velocidad de caída de una suspensión de fluido-sedimento puede ser determinada como:

$$W_{s,m} = (1-c) \gamma W_s \quad (2.7)$$

donde:

$W_{s,m}$  = velocidad de caída de partícula en una suspensión

$c$  = concentración volumétrica de sedimento

$\gamma$  = coeficiente

El coeficiente  $\gamma$  varía de 4.6 a 2.3 para  $Re$  incrementando de  $10^{-1}$  a  $10^3$ . Para partículas en un rango de 50 a 500  $\mu m$  bajo condiciones de flujo normal el coeficiente  $\gamma$  es cercano a 4.

### **2.3 Propiedades del fluido**

Las propiedades relevantes del fluido son la densidad y viscosidad.

### 2.3.1. Densidad

La densidad de agua fresca varía con la temperatura como sigue:

$\rho=999.9 \text{ kg/m}^3$	$T_e=0^\circ\text{C}$
$\rho=1000 \text{ kg/m}^3$	$T_e=4^\circ\text{C}$
$\rho=999.5 \text{ kg/m}^3$	$T_e=12^\circ\text{C}$
$\rho=999.0 \text{ kg/m}^3$	$T_e=16^\circ\text{C}$
$\rho=998.3 \text{ kg/m}^3$	$T_e=20^\circ\text{C}$
$\rho=995.7 \text{ kg/m}^3$	$T_e=30^\circ\text{C}$

lo cual se aprecia en la figura 2.2.

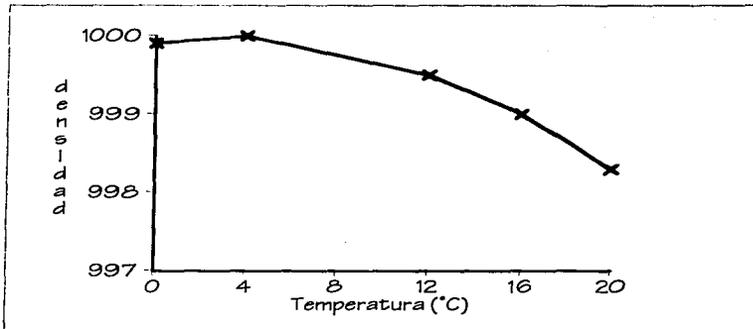


Fig.2.2 Variación de la densidad del agua con la temperatura

### 2.3.2. Viscosidad

El coeficiente de viscosidad cinemática  $\nu$  se define como:

---

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.8)$$

en donde:

$v$  = coeficiente de viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

$\mu$  = coeficiente de viscosidad dinámica ( $Ns/m^2$ )

$\rho$  = densidad de fluido ( $kg/m^3$ )

El coeficiente de viscosidad está influenciado por el sedimento. Para suspensiones diluidas Einstein [2] encontró:

$$v_m = v(1 + 2.5c) \quad (2.9)$$

en donde:

$v_m$  = coeficiente de viscosidad cinemática mezcla fluido-sedimento

$v$  = coeficiente de viscosidad cinemática de agua clara

$c$  = concentración volumétrica de sedimento ( $m^3_{\text{sedimento}}/m^3_{\text{agua}}$ )

Basado en experimentos con concentraciones de volumen en el rango de  $c=0.1$  a  $0.6$  Bagnol (1954) encontró:

$$v_m = v(1 + \lambda)(1 + 0.5\lambda) \quad (2.10)$$

en donde:

$\lambda = [(0.74/c)^{1/3} - 1]^{-1}$  = parámetro de concentración adimensional.

#### 2.4 Iniciación de movimiento

En esta sección así como las dos siguientes, 2.5 y 2.6, se abordará el inicio de movimiento, el transporte de carga y la ecuación de balance de masa para la

concentración, tal y como se suele plantear de manera analítica el problema de la predicción del sedimento en suspensión. Sólo se incluye de manera ilustrativa, ya que el modelo que se desarrolla en esta tesis emplea un enfoque diferente y no contempla en sí estas consideraciones.

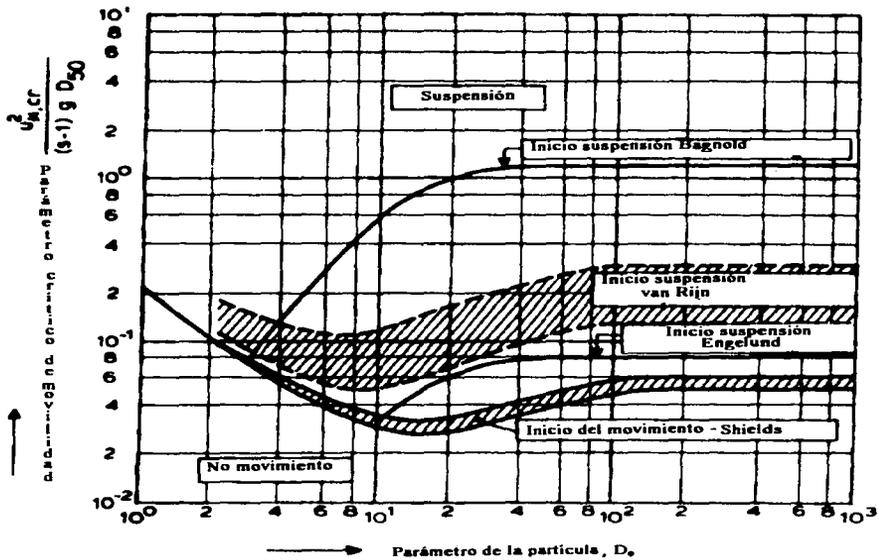
El movimiento de partícula ocurre cuando las fuerzas hidráulicas sobre una partícula son mayores que la fuerza crítica hidráulica para el inicio de movimiento. La fuerza perturbadora  $F_p$  es proporcional al esfuerzo cortante de lecho  $\tau_b$  y al área superficial de partícula ( $F_p = \tau_b d^2$ ). La fuerza estabilizadora es igual al peso de la partícula sumergida ( $F_e = (\rho_s - \rho) g d^3$ ).

El movimiento de partícula es iniciado cuando el momento de la fuerza del fluido  $F_p$  se vuelve mayor que el momento de la fuerza de gravedad, dando:

$$\frac{\tau_{b,cr}}{(\rho_s - \rho) g d} \geq \theta_{cr} \quad (2.11)$$

donde:  $\tau_{b,cr}$  es el esfuerzo crítico cortante de lecho. El número crítico de Shields,  $\theta_{cr}$ , depende de las condiciones hidráulicas cerca del lecho, de la forma de partícula y de la posición de la partícula relativa a otras partículas. La condición hidráulica cerca del lecho es una función del número de Reynolds, definido como  $Re^* = u^* d / \nu$  donde  $u^*$  es la velocidad de cortante dada por  $u^* = (\tau/\rho)^{1/2}$ ; por lo que  $\theta_{cr} = F(Re^*)$ .

Muchos experimentos se han realizado para definir  $\theta_{cr}$  como una función de  $Re^*$ . Los experimentos de Shields (1936) relacionados a un lecho liso son los más usados. Shields utilizó como su definición de esfuerzo crítico cortante de lecho, al valor del esfuerzo cortante de lecho donde los valores de transporte extrapolados (medidos) son cero (figura 2.3).



**Fig.2.3 Curva de Shields**

Yalin (1972) demostró que la curva de Shields puede ser expresada en términos del parámetro de partícula  $D^*$ . Aplicando estos parámetros, la curva de Shields puede ser expresada como:

$$\theta_{cr} = 0.24 D^{*-1} \quad \text{para } 1 < D^* \leq 4$$

$$\theta_{cr} = 0.14 D^{*-0.64} \quad \text{para } 4 < D^* \leq 10$$

$$\theta_{cr} = 0.04 D^{*-0.1} \quad \text{para } 10 < D^* \leq 20$$

$$\theta_{cr} = 0.013 D^{*0.29} \quad \text{para } 20 < D^* \leq 150$$

$$\theta_{cr} = 0.055 \quad \text{para } D^* > 150 \quad (2.12)$$

donde:

$$\theta_{cr} = \tau_{b,cr} / ((\rho_s - \rho) g d_{50}) = \text{número crítico de Shields}$$

$$D^* = [(s-1) g / \nu]^2 d_{50}$$

## 2.5 Transporte de carga en suspensión

El transporte de carga está definido como la integral del producto de la velocidad ( $u$ ) y la concentración ( $c$ ), como sigue:

$$q_{s,c} = \int_a^h u c dz \quad (2.13)$$

Para poder aplicar la ecuación se necesita conocer los perfiles de velocidad de concentración y una concentración a un nivel de referencia  $z=a$  cerca del fondo.

## 2.6 Ecuación de balance de masa para la concentración

En un flujo uniforme y estable en equilibrio en la dirección vertical, el transporte relacionado con la turbulencia y la gravedad puede ser expresado como:

$$c W_{s,m} + \epsilon_s \frac{dc}{dz} = 0 \quad (2.14)$$

donde:

$c$  = concentración de sedimento a una altura "z" del lecho

$W_{s,m}$  = velocidad de caída de partícula en una mezcla de fluido- sedimento

$\epsilon_s$  = coeficiente de mezclado de sedimento relacionado con la corriente

El coeficiente de difusión de sedimento  $\epsilon_s$  está relacionado con el coeficiente de mezclado de fluido  $\epsilon_f$  de la siguiente manera:

$$\epsilon_s = \beta \phi \epsilon_f \quad (2.15)$$

donde el factor  $\beta$  describe la diferencia en la difusión de una partícula-fluido y una partícula discreta de sedimento. Basado en la ecuación 2.14, Coleman calculó los coeficientes de mezclado de sedimento.

Varias distribuciones de mezclado de fluido ( $\epsilon_f$ ) están dadas por las siguientes expresiones:

constante:

$$\epsilon_f = \frac{1}{\alpha_1} \kappa u_*' c h$$

lineal:

$$\epsilon_f = \frac{1}{\alpha_2} \kappa u_*' c h \frac{z}{h}$$

---

parabólica:

$$\epsilon_f = \kappa u^* c h \frac{z}{h} (1 - \frac{z}{h})$$

parabólica lineal:

$$\epsilon_f = \kappa u^* c h \frac{z}{h} (1 - \frac{z}{h}) \quad \text{para } \frac{z}{h} < 0.5$$

$$\epsilon_f = 0.25 \kappa u^* c h \quad \text{para } \frac{z}{h} \leq 0.5 \quad (2.16)$$

donde:

$u^* c$  = velocidad de corriente relacionada al cortante de lecho

$h$  = profundidad del agua

$z$  = coordenada vertical

$\kappa$  = constante de von Kármán = 0.4

$\alpha_1, \alpha_2$  = constantes

El factor  $\phi$  de la ecuación 2.15, expresa la influencia del sedimento en la estructura turbulenta del fluido. Van Rijn (1984) lo define como:

$$\phi = 1 + (c/c_0)^{0.8} - 2(c/c_0)^{0.4} \quad (2.17)$$

donde:

$c$  = concentración local volumétrica

$c_0$  = concentración máxima = 0.65

---

### Perfiles de concentración

Al integrar la ecuación de convección y difusión (2.14), se obtienen los siguientes perfiles:

constante

$$\frac{c}{c_a} = e^{-\alpha_1 (Z/h)(z-a)}$$

lineal

$$\frac{c}{c_a} = (a/z) \alpha_2 Z$$

parabólico

$$\frac{c}{c_a} = \left( \frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right) Z$$

parabólico lineal

$$\frac{c}{c_a} = \left( \frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right) Z \quad \text{para } \frac{z}{h} < 0.5$$

$$\frac{c}{c_a} = \left( \frac{a}{h-a} \right) Z (e)^{-4Z(z-h-0.5)} \quad \text{para } \frac{z}{h} \geq 0.5 \quad (2.18)$$

donde:

$c$  = concentración a una altura  $z$  sobre el lecho

$c_a$  = concentración de referencia a una altura  $z=a$  sobre el lecho

$h$  = profundidad del agua

$Z = W_b / (\kappa u_{*c}) =$  número de suspensión

Los métodos más comunes para obtener la tasa de transporte en suspensión, al igual que el transporte de fondo, son semilempíricos y se describen a continuación de acuerdo a sus autores:

Einstein (1950):

$$q_{s,c} = 11.6 u_{*c}^3 c_a a [I_2 + I_1 \ln(30.2 e h/d_{65})]$$

$$I_1 = 0.216 \frac{AZ^{-1} \int_A^1 (1-z')^Z dz'}{(1-A)^Z z'}$$

$$I_2 = 0.216 \frac{AZ^{-1} \int_A^1 (1-z')^Z \ln(z') dz'}{(1-A)^Z z'} \quad (2.19)$$

donde:

$q_{s,c}$  = transporte de carga en suspensión ( $m^2/s$ )

$u_{*c}$  = velocidad de cortante de grano ( $m/s$ )

$c_a$  = concentración de referencia (-)

$a$  = referencia de nivel (m)

$h$  = profundidad del agua (m)

$d$  = diámetro de partícula (m)

$A = a/h =$  nivel de referencia adimensional

$z' = z/h =$  coordenada vertical adimensional

---

Z= número de suspensión (-)

$\kappa$ = constante de von Kármán

$W_s$ = velocidad de caída de sedimento en agua clara (m/s)

$e$ = factor de corrección

De acuerdo con Einstein, el transporte de carga en suspensión está relacionado con la velocidad de cortante de grano,  $u^*_{*c}$  y no con la velocidad de cortante,  $u^*_c$ .

Bagnol (1966):

Introdujo un concepto de balance de energía, y relacionó el transporte de carga suspendida con el trabajo hecho por el fluido.

$$q_{s,c} = \frac{e_s (1 - e_b)}{(\rho_s - \rho) g (W_s / u - \tan \beta)} \tau_b u \quad (2.20)$$

donde:

$q_{s,c}$ = transporte de carga suspendida (m<sup>2</sup>/s)

$e_s$ = factor de eficiencia (=0.02) (-)

$e_b$ = factor de eficiencia (=0.01) (-)

$\tau_b$ = cortante (N/m<sup>2</sup>)

$u$ = velocidad (m/s)

$W_s$ = velocidad de caída de partícula (m/s)

$\beta$ = ángulo de reposo (-)

Bijker (1971):

Basado en el concepto de Einstein (1950), propone:

$$q_{s,c} = 1.83 q_{b,c} [12 + 11 \ln (33h/\kappa s)] \quad (2.21)$$

$q_{b,c}$ = transporte de carga de lecho

---

$a=ks$ =nivel de referencia

$I_1$  y  $I_2$ = integrales de Einstein (ec 2.17)

$$q_{b,c} = b u_* c d^{5.0} e^{-0.27/(\mu\theta)} \quad (2.22)$$

$\theta$ = parámetro de movilidad

$\mu$ = factor de forma de lecho=  $(c/c')^{1.5}$

$c$ = coeficiente de Chézy

$c'$ = coeficiente de Chézy relacionado con el grano

$b$ = coeficiente=5

van Rijn (1984):

Se apoya en una distribución parabólica-lineal de concentración, de velocidad logarítmica y con una corrección para altas velocidades, obtiene:

$$q_{s,c} = \frac{u_* c c_a}{\kappa} \left( \frac{a}{h-a} \right) Z' \left[ \int_a^{h-z} \frac{(h-z)}{z} Z' \ln(z) + \int_{0.5h}^h e^{-4Z'(z/h - 0.5)} \ln(z) dz \right] \quad (2.23)$$

## 2.7 FORMULACION MATEMATICA

### 2.7.1. Superficies sólidas

Ludwig Prandtl y Theodore von Kármán dedujeron que el perfil de forma de la capa límite consiste de una capa interior, una exterior y, además, de una intermedia traslapada entre estas dos:

Capa interior: el esfuerzo viscoso (molecular) domina

Capa exterior: el esfuerzo turbulento domina

---

---

Capa intermedia: ambos tipos de esfuerzos son importantes, el perfil conecta las regiones exteriores e interiores.

Para la ley interna, Prandtl (1933) infirió que el perfil dependería del esfuerzo de pared cortante, de las propiedades del fluido y de la distancia "y" de la pared. Esto es:

$$u = f(\tau_w, \rho, \mu, y)$$

Por otro lado, para la capa exterior, Kármán dedujo en 1930 que la pared actúa sólo como un medio de retraso, reduciendo la velocidad local  $u(y)$  debajo de la velocidad de corriente  $U_e$ , en forma independiente de la viscosidad  $\mu$ , pero dependiente del esfuerzo cortante de pared  $\tau_w$ , del ancho de capa  $\delta$  y del gradiente de presión  $dp_e/dx$ :

$$U_e - u = f(\tau_w, \rho, y, \delta, \frac{dp_e}{dx})$$

Finalmente, para la capa traslapada simplemente se especifica que las funciones externas e internas se fusionan en una región finita intermedia:

$$U_{\text{interna}} = U_{\text{externa}}$$

Mediante el uso de análisis dimensional, la ley interna queda:

$$\frac{u}{u^*} = f\left(\frac{y - u^*}{\nu}\right)$$

donde:

$$u^* = (\tau_w / \rho)^{1/2} \tag{2.24}$$

La variable  $u^*$  tiene unidades de velocidad y es llamada velocidad de cortante de pared. Así mismo, por análisis dimensional para la ley externa:

$$\frac{U_e - u}{u^*} = g(y/\delta, \xi)$$

$$\xi = \frac{\delta}{\tau_w} \frac{d p_e}{d x} \quad (2.25)$$

A cualquier posición dada la función  $g(y/\delta)$  dependerá del gradiente de presión y por lo tanto de  $\xi$ .

Dándole a  $\xi$  un valor particular, entonces la función de traslape se resuelve igualando los perfiles interno y externo:

$$\frac{u}{u^*} = f\left(\frac{du^*}{v} y\right) = \frac{U_e}{u^*} - g\left(\frac{y}{\delta}\right)$$

Las variables internas son:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y u^*}{v} + B$$

Las variables externas son:

$$\frac{U_e - u}{u^*} = -\frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\delta} + A \quad (2.26)$$

$\kappa$  y  $B$  son constantes para flujo turbulento y  $A$  varía con el gradiente de presión  $\xi$ .

La ley logarítmica de pared se usará en el modelo  $k-\epsilon$  en la siguiente sección.

### 2.7.2. El modelo k-ε

Las dos ecuaciones que representan este modelo, son para un flujo elíptico (fuera de la capa límite), con número de Reynolds alto.

Energía cinética turbulenta:

$$\frac{\delta k}{\delta t} + u\frac{\delta k}{\delta x} + v\frac{\delta k}{\delta y} + w\frac{\delta k}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta x} \left[ \frac{\nu_t \delta k}{\sigma_k \delta x} \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[ \frac{\nu_t \delta k}{\sigma_k \delta y} \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[ \frac{\nu_t \delta k}{\sigma_k \delta z} \right] + P_k - \epsilon \quad (2.27)$$

Rapidez de disipación:

$$\frac{\delta \epsilon}{\delta t} + u\frac{\delta \epsilon}{\delta x} + v\frac{\delta \epsilon}{\delta y} + w\frac{\delta \epsilon}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta x} \left[ \frac{\nu_t \delta \epsilon}{\sigma_\epsilon \delta x} \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[ \frac{\nu_t \delta \epsilon}{\sigma_\epsilon \delta y} \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[ \frac{\nu_t \delta \epsilon}{\sigma_\epsilon \delta z} \right] + C_1 P_k \frac{\epsilon}{k} + C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.28)$$

donde  $P_k$  es la rapidez de producción de  $k$ , que se determina a su vez a partir del tensor de esfuerzos turbulento.  $\sigma_k$  y  $\sigma_\epsilon$  son números de Prandtl, que relacionan la difusión turbulenta de  $k$  y  $\epsilon$  ( $\nu_k$ ,  $\nu_\epsilon$ ) con la viscosidad turbulenta:  $\sigma_k = \nu_t/\nu_k$  y  $\sigma_\epsilon = \nu_t/\nu_\epsilon$ . La viscosidad turbulenta está dada por:

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (2.29)$$

Las cinco constantes empíricas en estas relaciones tienen los siguientes valores de acuerdo con Launder y Spalding (1974):

$$C_\mu = 0.09 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

Estos valores no son universales, desafortunadamente, sino que tienen que ser modificados para casos como chorros y flujos de recirculación.

Dado que la viscosidad molecular y los efectos de capa límite son omitidos, el modelo debe usarse sólo para capas exteriores y capas traslapadas. Cerca de la pared, se asume que la ley logarítmica se mantiene. Los cálculos de k-ε comienzan en un punto  $y_p$  en la región logarítmica, donde las variables son calculadas como sigue:

$$\frac{u_p}{u^*} = 1 + \frac{\ln(u^* y_p / \nu)}{\kappa} + B \quad k_p = \frac{u^{*2}}{C_\mu^{1/2}} \quad \epsilon_p = \frac{u^{*3}}{\kappa y_p} \quad (2.30)$$

El uso de las funciones de pared mencionadas son discutidas en detalle por Launder y Spalding (1974) y por Gossman (1969).

El modelo k-ε es utilizado para altos números turbulentos de Reynolds, no cercanos a la pared. Al disminuir el número de Reynolds, las constantes  $C_\mu$  y  $C_2$ , al menos, se vuelven variables. Entonces ajustando el modelo k-ε, de la ley logarítmica para pared lisa resulta:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + A \quad (2.31)$$

donde:

$u^+$  = velocidad adimensional =  $u_{res}/u^*$

$u_{res}$  = velocidad resultante paralela a la pared

$y^+$  = distancia adimensional a la pared =  $(u^*y)/\nu$

A = constante

---

haciendo

$$A = \ln(e^{\kappa A}/\kappa)$$

donde  $\kappa$  es la constante de von Kármán, la ecuación 2.31 puede escribirse:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (2.32)$$

donde:

$$E = e^{\kappa A} \quad (2.33)$$

La ley logarítmica para una pared rugosa es:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y/\kappa) + B \quad (2.34)$$

donde  $B$  es una constante. Arreglando esta ecuación como la 2.32:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y/\kappa) + \frac{1}{\kappa} \ln(e^{\kappa B}) \quad (2.35)$$

Dado que  $y/\kappa = y^+/k^+$ , la ecuación 2.35 se escribe:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+/k^+ e^{\kappa B}) \quad (2.36)$$

donde:

$$k^+ = \kappa u^*/\nu$$

Por lo que la ecuación 2.36 se reduce a:

---

---

$$E = e(\kappa B)/\kappa + \quad (2.37)$$

Esta ecuación 2.37 sirve para encontrar el coeficiente local de fricción "s" definido como:

$$s = \frac{\tau}{\rho u_{res}^2} \quad (2.38)$$

Como el esfuerzo de fricción está dado por:

$$\tau = \rho u^*{}^2 \quad (2.39)$$

entonces s es igual a:

$$s = 1/(u^*)^2 \quad (2.40)$$

Substituyendo esta expresión en la ecuación logarítmica de pared, y desarrollando se obtiene que:

$$s = (\kappa / \ln(E y^*))^2 \quad (2.41)$$

y dado que  $Re = u^* y^+$ , la ecuación 2.41 se reduce a:

$$s = (\kappa / \ln(E Re s^{1/2}))^2 \quad (2.42)$$

La ecuación 2.42 permite determinar el coeficiente de fricción local de manera iterativa. El valor de E va a depender de la rugosidad de la superficie.

---

---

Lisa ( $0 \leq k^+ \leq 3.7$ ):

$$E = E_m = e^k/A$$

$$A = 5.0$$

Transición ( $3.7 \leq k^+ \leq 100$ ):

$$E = [\alpha(k^+/\beta)^2 + (1-\alpha)/E_m^2]^{1/2}$$

donde:

$$\alpha = (1 + 2 X_{3c} - 3 X_{2c})$$

$$X_c = 0.02248(100 - k^+)(k^+)^{-0.564}$$

$$\beta = 29.7$$

Rugosa ( $k^+ > 100$ ):

$$E = \frac{\beta}{k^+} \quad (2.43)$$

A partir del coeficiente  $\epsilon$  se obtiene el término fuente de la ecuación de cantidad de movimiento para cada velocidad paralela a la pared en las celdas inmediatas a la misma. Este término es la fuerza que produce el esfuerzo cortante sobre la pared y está dado por:

$$S\phi = \tau A = \epsilon A \rho U_{res}^2 \quad (2.44)$$

De acuerdo a Launder y Spalding, para las celdas inmediatas a una pared, el valor de  $k$  y  $\epsilon$  se debe fijar con los valores siguientes:

$$k_p = \frac{2 U^2}{0.0905}$$

$$\epsilon_p = \frac{k \cdot 1.5 (0.1643/w)}{L}$$

(2.45)

donde L es la distancia del piso al primer nodo

### 2.7.3. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad de masa está dada por:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0$$

(2.46)

Donde u, v y w son las componentes de velocidad en cada una de las direcciones coordenadas x, y, z.

### 2.7.4. Ecuación de cantidad de movimiento

Para la dirección x:

$$\rho \left[ \frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} + w \frac{\delta u}{\delta z} \right] = \rho g_x - \frac{\delta p}{\delta x} + \delta \left[ 2\mu \frac{\delta u}{\delta x} \right] + \delta \left[ \mu \frac{\delta u + \delta v}{\delta y} \right] + \delta \left[ \mu \frac{\delta u + \delta w}{\delta z} \right]$$

Para la dirección y:

$$\rho \left[ \frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + w \frac{\delta v}{\delta z} \right] = \rho g_y - \frac{\delta p}{\delta y} + \delta \left[ \mu \frac{\delta u + \delta v}{\delta y} \right] + \delta \left[ 2\mu \frac{\delta v}{\delta y} \right] + \delta \left[ \mu \frac{\delta v + \delta w}{\delta z} \right]$$

Para la dirección z:

$$\rho \left[ \frac{\delta w}{\delta t} + u \frac{\delta w}{\delta x} + v \frac{\delta w}{\delta y} + w \frac{\delta w}{\delta z} \right] = \rho g_z - \frac{\delta p}{\delta w} + \delta \left[ \mu \left[ \frac{\delta u + \delta w}{\delta z \delta x} \right] \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[ \mu \left[ \frac{\delta v + \delta w}{\delta z \delta y} \right] \right] + \delta \left[ 2\mu \frac{\delta w}{\delta z} \right] \quad (2.47)$$

### 2.7.5. Ecuación de transporte de sedimentos

El transporte de sedimento suspendido puede ser calculado con la ecuación de convección-difusión para la concentración de sedimento, C

$$\frac{\delta C}{\delta t} + u \frac{\delta C}{\delta x} + v \frac{\delta C}{\delta y} + w \frac{\delta C}{\delta z} = \delta \left( \Gamma \frac{\delta C}{\delta x} \right) + \delta \left( \Gamma \frac{\delta C}{\delta y} \right) + \delta \left( \Gamma \frac{\delta C}{\delta z} \right) \quad (2.48)$$

Para calcular el transporte turbulento, se recurre a un modelo de turbulencia con base en el concepto de difusividad turbulenta

$$-vC = \Gamma \frac{\delta C}{\delta y} \quad (2.49)$$

Donde  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \frac{\nu}{\sigma} \quad (2.50)$$

donde  $\sigma$  es el número de Schmidt que se puede considerar constante e igual a 0.7, considerando que el transporte de masa y cantidad de movimiento son semejantes (Stamou (1989)).

En condiciones de equilibrio, el flujo hacia abajo debido a la gravedad es igual al flujo hacia arriba por la turbulencia. Entonces la deposición de sedimentos es igual a la resuspensión de los mismos, y no hay acumulación o erosión en el fondo. En este caso el flujo ha alcanzado su capacidad máxima de transporte de sedimentos  $q_{s,m}$  (el flujo está saturado), y no hay variación longitudinal, esto es:  $dq_{s,m}/dx = 0$

En condiciones de no equilibrio se tiene:

---

$$\frac{v_x}{\sigma} \frac{\delta C}{\delta y} + vC = D-F = -\frac{dq_s}{dx} \quad (2.51)$$

donde  $D$  es la rapidez de deposición de sedimentos en la frontera del arrastre de fondo (igual a  $vCb$ ), y  $F$  es la resuspensión. El problema para modelar el transporte de sedimentos en condiciones de no equilibrio es que no se conoce a priori esta condición de frontera.

Para el caso presente se consideran condiciones de equilibrio, por lo que se asume que  $D = F$ , y en consecuencia no se modela el arrastre de fondo. Las partículas suspendidas de sedimentos se suponen como un material discreto.

---

---

## CAPITULO III

### MODELO NUMÉRICO

#### 3.1. Transporte de sedimento por suspensión.

El transporte por suspensión se modela a partir de la ecuación de transporte escalar (concentración), ecuación (2.48). Dicho escalar, que representa la concentración del sedimento, no afecta la hidrodinámica del flujo, ya que solamente es un marcador transportado por el fluido. Se puede reescribir como:

$$\frac{\delta C}{\delta t} + u \frac{\delta C}{\delta x} + v \frac{\delta C}{\delta y} + w \frac{\delta C}{\delta z} = \delta_x (\Gamma \delta C) + \delta_y (\Gamma \delta C) + \delta_z (\Gamma \delta C) \quad (3.1)$$

A esta ecuación difusiva-convectiva se le añade un término fuente producto de la convección creada por la velocidad de sedimentación de las partículas, esto es, dicha fuente modela el efecto gravitatorio sobre el sedimento:

$$V_s \frac{\delta C}{\delta y} \quad (3.2)$$

La ecuación resultante de la suma de las ecuaciones 3.1 y 3.2, es la expresión matemática que se utiliza para modelar el transporte de sedimento por suspensión, siendo una ecuación para cada tamaño representativo de partícula.

Si se observa el término fuente anterior se ve que tiene, en general, un signo negativo debido a la derivada parcial (concentraciones menores a alturas mayores). El efecto numérico de esta fuente es que quita sedimento (concentración), del dominio computacional para crear con esto un perfil en equilibrio. Este sedimento que en realidad cae a través de la columna de fluido al piso del canal, desde el punto de vista de la simulación numérica se elimina.

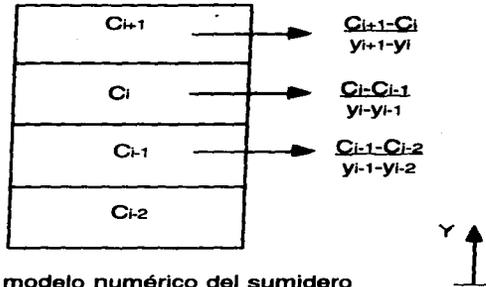


fig 3.1 modelo numérico del sumidero

### 3.2 Condiciones de frontera

Siendo las coordenadas cartesianas, y: vertical, x: transversal, z: longitudinal

#### 3.2.1. Condiciones de frontera para la ecuación de cantidad de movimiento

- Velocidad uniforme a la entrada
- Salida convectiva
- En la superficie libre:  $\frac{dy}{dy} = 0$
- En las paredes: fricción  $S_\phi = A_s v^2_p$  y la velocidad de pared,  $v_{pared} = 0$

#### 3.2.2. Condiciones de frontera para la conservación de masa

- Gasto uniforme a la entrada
- A la salida  $P_0$  de referencia
- En la superficie libre:  $Gasto = 0$

---

### 3.2.3. Condiciones de frontera para el modelo de turbulencia

Energía turbulenta (k):

-Entrada:  $k=3.3u^*2$

-La salida es convectiva, o sea que sólo el flujo por convección afecta a la variable en esta frontera. En otras palabras el transporte difusivo es cero.

-Superficie:  $\frac{dk}{dy} = 0$

-Pared:  $k = u^{*2}/Cv^{0.5}$  donde  $u^{*2} = 0.004u_0^2$  y  $u^*$  es calculado de los factores de fricción para flujo turbulento en canal, y  $u_0$  es la velocidad de entrada.

### 3.2.4. Condiciones de frontera para la rapidez de disipación turbulenta:

-Entrada:  $\epsilon = u^{*2}u_0/h$ , donde  $u^*=0.004u_0^2$ ,  $u_0$ =velocidad de entrada,  $h$ =tirante.

- Salida convectiva

-Superficie:  $\frac{d\epsilon}{dy} = 0$

-Pared:  $\epsilon = \frac{k^{1.5}(0.1643/k)}{L}$

$L$ =distancia del pieo al primer nodo

### 3.2.5. Condiciones de frontera para las concentraciones del sedimento

-Entrada: concentración uniforme

-Salida convectiva

---

---

-En la superficie:  $\frac{dC}{dy}=0$

-En pared:  $\frac{dC}{dy}=0$

### 3.3. Condiciones Iniciales

No existen condiciones iniciales específicas, se pueden añadir algunas como el perfil de concentraciones, perfil de velocidades, concentración inicial en ciertas celdas (en el piso por ejemplo), etc. Sin embargo, su implementación no es obligatoria.

### 3.4. Método de solución

Cada una de las ecuaciones de transporte descritas en la sección 2.7 se discretiza utilizando el método de volumen finito. Es decir, el dominio de solución es subdividido en pequeños volúmenes de control, asociando a cada uno de ellos un punto nodal. Las variables escalares y la presión son almacenadas en las caras de los volúmenes localizadas entre los puntos nodales. De esta manera, los volúmenes de control para las velocidades quedan defasados con respecto a los empleados para las variables escalares.

Este método de discretización es empleado por PHOENICS, que es el código utilizado para llevar a cabo las simulaciones numéricas [Ludwig et al (1990)] que se presentan en este estudio.

El algoritmo de solución se basa en el procedimiento iterativo de Patankar y Spalding, SIMPLE [Patankar (1972)], pero es modificado de acuerdo al algoritmo de Spalding (1982), SIMPLEST. En términos generales, las variables escalares tales como  $k$ ,  $\epsilon$  y las concentraciones, se resuelven utilizando el método implícito de Stone (1968). En seguida, las velocidades se obtienen al resolver las ecuaciones de cantidad de movimiento utilizando los valores de presión de la iteración previa; posteriormente, la

---

ecuación de continuidad es ajustada resolviendo una ecuación de corrección de presión que determina los ajustes requeridos para las velocidades y las presiones. Este procedimiento es repetido varias veces hasta que la solución cumple con un criterio de convergencia especificado.

---

## CAPITULO IV

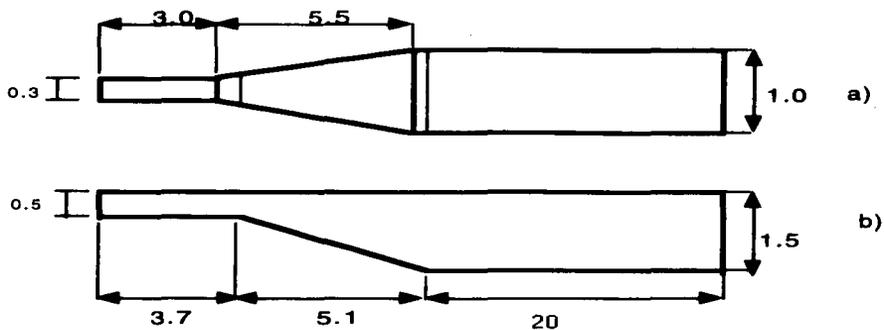
### 4.1 ANALISIS DE RESULTADOS

El modelo numérico desarrollado e implantado en el código numérico PHOENICS, se calibró y comprobó con datos experimentales reportados en la literatura de dos sedimentadores, siendo uno de ellos bidimensional y el otro tridimensional. Adicionalmente, se llevaron a cabo pruebas empleando dos esquemas diferentes de discretización del término fuente que se incluye en la ecuación de transporte de sedimentos.

#### 4.1 Sedimentador tridimensional

El sedimentador tridimensional mostrado en la figura 4.1 es el reportado por Olsen y Skoglund [5] que se encuentra en el SINTEF (Laboratorio Hidrotécnico de Noruega). En él hicieron varias mediciones, las cuales fueron proporcionadas directamente por dichos autores, y en su artículo reportan los resultados obtenidos por ellos.

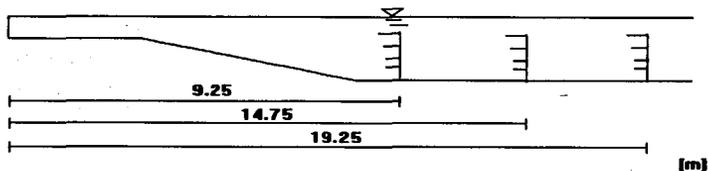
Las características del sedimento se muestran en la tabla 4.1. Así mismo, los puntos donde fueron tomadas las mediciones de la concentración de sedimentos se ilustran en la figura 4.2, mientras que la tabla 4.2 muestra las coordenadas y concentraciones de los tres perfiles.



**Figura 4.1** Sedimentador tridimensional, dimensiones en m. a) vista de planta, b) vista lateral

Tamaño	Diámetro (mm)	Vel. sed. (cm/s)	Gasto (kg/s)
1	0.45	7.0	0.0625
2	0.30	4.0	0.0625
3	0.20	2.5	0.0625
4	0.10	0.8	0.0625

**Tabla 4.1.** Características del sedimento



**Figura 4.2.** Puntos de medición de concentración de sedimento

#### 4.1.1 Mallado

Para este sedimentador se realizaron dos mallados, el primero de 11x11x41 y el segundo de 11x21x60 en las direcciones x,y,z, respectivamente, es decir, se

Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	concentración (m <sup>3</sup> sed/m <sup>3</sup> agua)
9.25	0.5	1.3	0.0001634
		0.2	0.0002169
		0.4	0.0002163
		0.07	0.0002205
14.75	0.5	1.2	0.00009738
		0.6	0.0001462
		0.3	0.00013
		0.05	0.0001412
19.25	0.5	1.2	0.00005073
		0.5	0.00008222
		0.203	0.0001095
		0.07	0.0001065

**Tabla 4.2.** Concentraciones medidas para sedimentador tridimensional

---

emplearon un total de 13 860 volúmenes de control. El segundo mallado se muestra en la figura 4.3. El tanque sedimentador fue dividido en cuatro secciones: para el primer mallado la entrada de 3 m tiene asignadas 5 celdas, la segunda de 0.7 m tiene 11 celdas, la tercera de 5.1 m con 15 celdas y la cuarta de 9.2 m tiene 20 celdas. La distribución de celdas en cada tramo es uniforme.

El número de celdas para el segundo mallado es el mismo en x pero el número de celdas en z es mayor: 60, con 15, 10, 15 y 20 celdas respectivamente para cada sección, y con 21 celdas en y. El objetivo de haber dividido el tanque en cuatro secciones con diferente distribución de celdas, fue el poder tener una mayor resolución del comportamiento hidrodinámico y de los sedimentos en aquellas áreas que se consideran de mayor importancia.

Debido a que las velocidades a la salida del sedimentador eran afectadas considerablemente por la turbulencia, lo que modificaba a su vez el comportamiento de los sedimentos, el número de Prandtl turbulento fue variado de 1.3 a 0.9 siguiendo la recomendación de Olsen y Skoglund [5]. Al hacer las respectivas simulaciones para dichos números de Prandtl, se notó un cambio muy favorable y las simulaciones restantes se hicieron con el número de Prandtl 0.9.

#### 4.1.2. Perfiles de velocidad

En la figura 4.4 se muestran los resultados de cuatro diferentes casos comparando los perfiles de velocidad vertical medidos a diferentes distancias sobre la línea de flujo con los perfiles obtenidos a partir del modelo numérico. Cada uno de los casos difiere en cuanto a la densidad de la malla y a la asignación de rugosidad. Dichas pruebas fueron indispensables para tratar de reproducir los perfiles de flujo de la manera más correcta posible, para así concentrar el esfuerzo en la formulación y predicción del transporte de sedimentos.

El caso A utiliza una malla de  $11 \times 11 \times 41$  y cuenta con rugosidad de 0.1 en los primeros

---

3,7 m. El caso B es el mismo que el A, sólo que esta vez la rugosidad está en todo el canal. Para el caso C se utiliza una malla de 11x21x60 y, al igual que el caso B, tiene rugosidad en todo el canal. Finalmente el caso D tiene el mismo mallado que el C pero, como en el caso A, la rugosidad sólo está asignada los primeros 3.7 m.

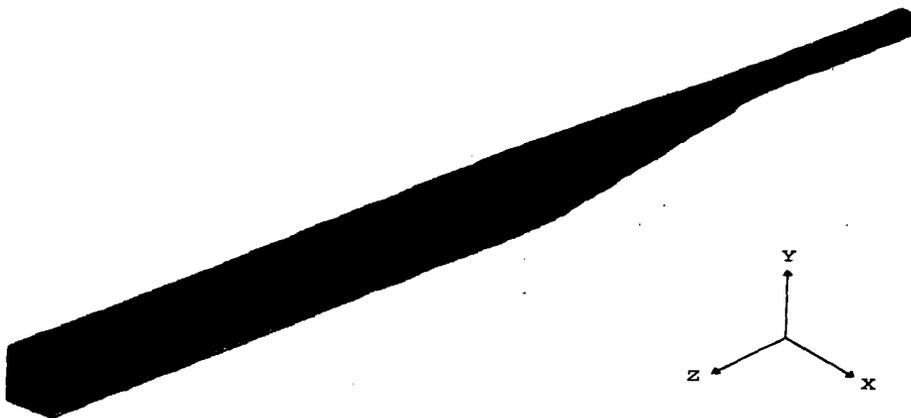
La zona de mayor interés en esta figura es la zona de expansión, ya que ahí se presentan los efectos más importantes de turbulencia. Como se puede notar, los casos que concuerdan con los perfiles de velocidad medidos en esta zona, son el B y el C, lo que indica que la rugosidad es más correcta en estos casos que en el A y D. También se puede notar que el mallado para el caso B, que es menos fino que el C, mejor concuerda con los demás perfiles de velocidad. Las distancias de los diferentes perfiles de velocidad aquí mostrados son: 4 m, 6 m, 8 m, 10 m y 12 m, medidos desde el origen.

Aún cuando desde el punto de vista hidrodinámico resulta evidente que asignar rugosidad a todo el canal arroja los mejores resultados, en la siguiente sección se justifica, a partir de los resultados de concentración, el uso de rugosidad de manera parcial.

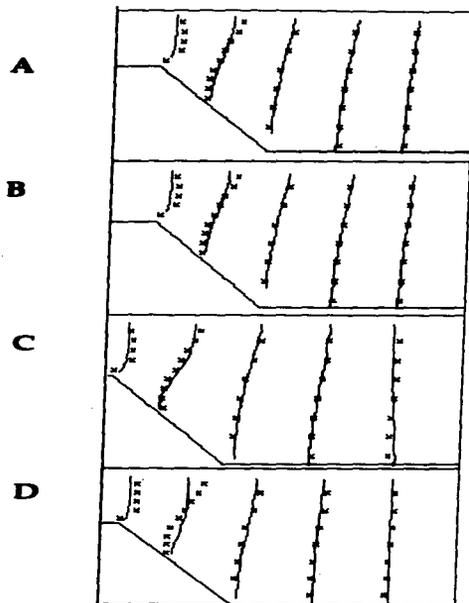
#### 4.1.3. Perfiles de concentración

En la figura 4.5 se muestran perfiles verticales de concentración de sedimentos en la línea central de flujo. De manera global, todos los casos se ajustan bien a los perfiles medidos, notándose una mejor correlación en los casos A y D, siendo este último el que mejor los representa en la primera sección.

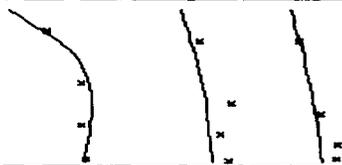
Equiparando los resultados obtenidos en todos los casos tanto para la hidrodinámica como para el comportamiento de sedimentos, se puede elegir al caso D como el que más asemeja a los valores medidos, aunque en sí, entre los 4 casos no hay diferencias muy marcadas.



**Fig.4.3** Mallado de 11x21x60 celdas del sedimentador tridimensional



**Fig.4.4** Perfiles de velocidad verticales obtenidos y medidos a lo largo del canal. Las líneas corresponden a los valores obtenidos y las cruces a los medidos.

**A****B****C****D**

**Fig.4.5.** Perfiles de concentración verticales a lo largo del canal. Las líneas son los valores obtenidos y las cruces los medidos.

---

## 4.2 Sedimentador bidimensional

Este sedimentador se encuentra en Sarnia, Canadá y ya ha sido estudiado ampliamente por varios autores, entre ellos Stamou-Rodi [1], Dobbins (1994), Camp (1946) y Abdel-McCorquodale (1985). Las características del sedimento son las que se muestran en la tabla 4.3.

### 4.2.1. Mallado

El mallado que se realizó es de 60x30 celdas y los cálculos se realizaron para tres valores diferentes de flujo unitario: 37, 60 y 110 m/d.

### 4.2.2 Perfiles de velocidad y de sedimentos

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran la comparación entre los perfiles de velocidad y concentración obtenidos y los medidos para el caso de flujo intermedio de 60 m/d.

Como se puede observar en la figura 4.6, los perfiles de velocidad obtenidos no concuerdan con los medidos. esto era de esperarse ya que en la realidad este sedimentador cuenta con dos baffles a la entrada, ninguno de los cuales llega a la superficie. Este arreglo provoca que el flujo sea tridimensional, formando una zona de separación justo después de los baffles y extendiéndose los vórtices a lo largo del canal. A pesar de la discrepancia en la distribución de velocidad, los perfiles de concentración mostrados en la figura 4.7 indican una buena correlación entre los datos experimentales y los numéricos. Esto se puede explicar si se observa que para

Tamaño	Vel. Sedim. (mm/s)	Fracción (%)
1	2.25	40
2	1.5	15
3	1.1	15
4	0.9	5
5	0.56	5
6	0	20

tabla 4.3. Sedimentos tanque bidimensional

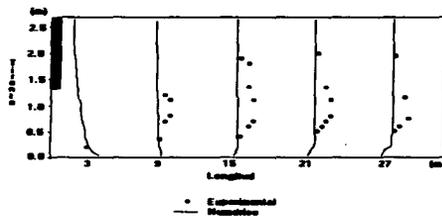
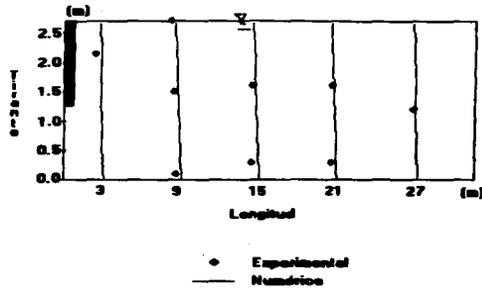


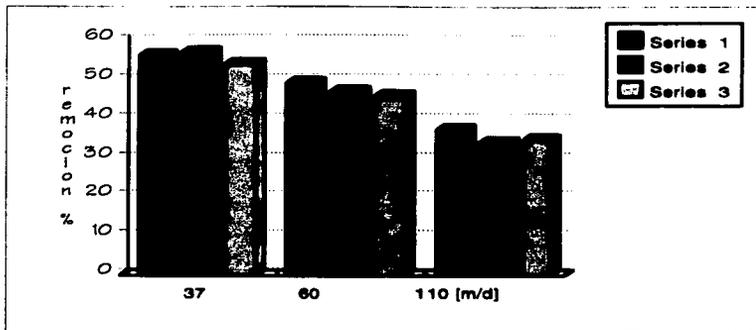
Fig.4.6 Perfiles de velocidad obtenidos y medidos



**fig 4.7** Perfiles de concentración para el sedimentador bidimensional.

la profundidad a la cual fueron medidas las concentraciones, los valores de velocidad también coinciden en general, ya que éstos últimos difieren físicamente a 1 m del fondo, donde el flujo se acelera.

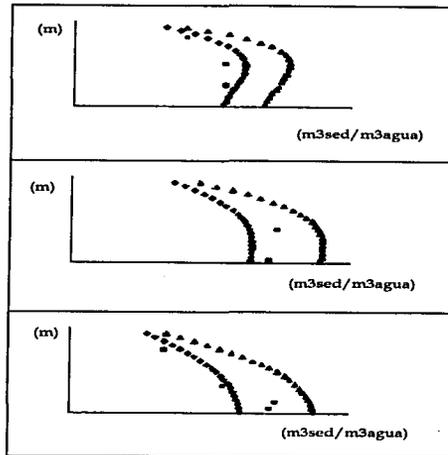
Por otro lado, al comparar las eficiencias de remoción con las medidas y las obtenidas por Stamou-Rodi (figura 4.8), si bien es cierto que en promedio los valores calculados concuerdan mejor con los medidos experimentalmente, no difieren mayormente de ambos.



**fig. 4.8** Eficiencia de remoción. Serie 1-Stamou-Rodi, serie2- valores medidos, serie3- valores calculados

#### 4.3 Diferencias centradas y hacia adelante

Para un mismo caso del sedimentador tridimensional, se resolvió la ecuación de la concentración de sedimentos empleando dos esquemas distintos: con diferencias hacia adelante y diferencias centradas. Los resultados se pueden observar en la figura 4.9. Se puede apreciar que el esquema de diferencias hacia adelante es el que mejor se ajusta a los datos experimentales. Esto se puede asociar al hecho de que tal esquema es consistente con la forma en que son resueltas las ecuaciones por medio del algoritmo SIMPLEST ya descrito en la sección 3.4.



**Fig. 4.9** Diferencias centradas ▲ , diferencias hacia adelante ◆ y valores medidos ■

---

## CAPITULO V

### APLICACIONES

#### 5.1 Introducción

El diseño del desarenador de la obra de toma de un río se realiza con base en el rango de tamaños de los sedimentos esperados, los gastos que se tendrán para irrigación o bombeo, la topografía del sitio, la máxima concentración de sólidos en suspensión y el máximo tamaño de partículas que se admite aguas abajo de la obra, además de la capacidad de regulación de la obra hidráulica.

Si bien existen varios métodos posibles para efectuar la separación, el que se considera en este estudio es una separación por gravedad en un tanque rectangular con entradas, salidas y dimensiones de acuerdo a los planos que han sido proporcionados para la toma de Río Verde por la CNA. El propósito del estudio es determinar la eficiencia de remoción de sólidos en suspensión del desarenador para el rango de gastos que se tendrán en la obra de toma sobre dicho río, 6 y 12 m<sup>3</sup>/s.

Al no disponer de la granulometría de los sedimentos del río, los resultados que se presentan son para las distribuciones representativas de tamaños de partículas menores de 0.10 mm de diámetro. Es evidente que para  $D_{50}$  mayores, las velocidades de sedimentación son también mayores y por ende las eficiencias de remoción se incrementarán significativamente para los gastos considerados. Una vez conocidos los tamaños esperados y las magnitudes máximas de concentraciones de sólidos en suspensión, que pueden provocar un deterioro acelerado de los impulsores de las bombas por abrasión, se podrá utilizar el modelo desarrollado para cuantificar los gastos máximos que garanticen la remoción de los sólidos en suspensión de mayor riesgo, o bien proponer modificaciones al desarenador para mejorar su desempeño.

---

Con el fin de obtener resultados de eficiencia que sean comparables con mediciones experimentales, en vez de emplear un valor promedio de la velocidad de sedimentación  $V_s$  para los sólidos en suspensión, se han considerado dos distribuciones de dicha velocidad en función de la fracción de masa de los sólidos en la entrada, figura 5.1.

### 5.2 Sistema de coordenadas

El problema general a ser considerado es el de un flujo incompresible, tridimensional y en estado permanente, de un canal que recibe el gasto determinado a través de un par de compuertas situadas en la parte inferior del canal, y descarga por la parte superior de un costado del canal. La figura 5.2 muestra esquemáticamente el sistema y las dimensiones principales del mismo.

Para discretizar el dominio, se emplea un sistema de coordenadas cartesianas, utilizando como variables independientes las direcciones  $x$ - $y$ - $z$ , adoptándose como coordenada vertical a  $y$ . Adicionalmente, se emplea una técnica de bloqueo de celdas, que impide el flujo a través de porciones sólidas sin incurrir en deformaciones innecesarias en el dominio computacional. La misma figura 5.2 presenta la malla empleada. El número total de celdas utilizadas en cada dirección es de  $32 \times 25 \times 33$ , dando lugar a un total de 26,400 nodos. Este número de celdas y su distribución, fueron resultado de un estudio preliminar de independencia de malla que permite afirmar que los resultados obtenidos ya no varían apreciablemente con un mayor refinamiento de la malla.

### 5.3 Discusión de resultados

Los resultados que a continuación se presentan, están divididos en dos partes; la primera describe el comportamiento hidrodinámico del desarenador y posteriormente se muestran contornos de distribución espacial de sólidos en suspensión y se incluyen gráficas de tipo  $x$ - $y$  que permiten comparar el funcionamiento del desarenador bajo

---

dos diferentes gastos de operación. Finalmente, se determina la eficiencia de remoción de l desarenador para las condiciones prescritas.

### 5.3.1. Hidrodinámica

Dada la absoluta similitud cualitativa en los patrones de flujo, se presentan solamente las figuras correspondientes al gasto de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . En la figura 5.3 se muestran los vectores de velocidad en los tres planos adyacentes a la descarga del desarenador. En el plano lateral es notorio que la máxima velocidad tiene lugar en la parte de entrada al canal, mientras que en la parte superior se genera una zona de recirculación que induce un flujo a contracorriente en los planos horizontales superiores. De igual manera, se detectan zonas muertas en las esquinas del desarenador indicada por el color y magnitud de las flechas correspondientes a los vectores. Esta vista global muestra el carácter tridimensional del flujo que excluye la posibilidad de un análisis bidimensional del problema.

En los planos transversales mostrados en la figura 5.4 correspondientes a la entrada, a un plano justo antes de la descarga y en plena descarga, respectivamente, se muestra la evolución de vórtices longitudinales. En el último plano se genera un vórtice tridimensional por la cercanía de la pared frontal. La compleja estructura tridimensional del flujo se aprecia más claramente en la figura 5.5, donde el plano intermedio revela los múltiples cambios de dirección del flujo. Las figuras 5.6, 5.7 y 5.8 muestran la vista de planta correspondiente a los planos horizontales de la figura anterior. En el fondo del desarenador, figura 5.6, se aprecian tres aspectos importantes: el efecto de la columna que separa las compuertas de entrada abarca prácticamente la mitad de la longitud, la generación de dos vórtices de diferente magnitud en las esquinas, en particular el punto de separación en la pared opuesta a la descarga se localiza aproximadamente en el primer tercio de la longitud del vertedor, lo cual explica la alta concentración de sólidos en suspensión que se analiza posteriormente.

---

Una inspección del plano horizontal a la profundidad media del desarenador, figura 5.7, indica que la estructura encontrada en la parte inferior cambia completamente, formándose zonas de baja velocidad en la parte superior localizada por encima de las compuertas, la cual coincide con el plano del eje del vórtice, y generándose una aceleración del flujo debido a la presencia de la descarga. Finalmente, la figura 5.8 correspondiente al plano superior, muestra como a excepción de la zona de descarga, el flujo se mueve a contracorriente.

Las vistas laterales en el plano opuesto a la descarga, figura 5.9, y en el propio plano de descarga, figura 5.10, muestran las diferencias tanto en el tamaño como en la magnitud de las zonas de recirculación, que son determinantes en la cuantificación y distribución de la concentración de sólidos en suspensión.

### 5.3.2. Distribución de sólidos en suspensión

En la figura 5.11 se presentan dos vistas isométricas de los contornos de sólidos en suspensión, para los planos localizados en las fronteras, (a), y para los tres planos transversales correspondientes a la figura 5.4, (b). La escala de colores representa la concentración de sólidos, donde el valor azul corresponde al valor mínimo, y el rojo al máximo. Este valor es de 100 g/l, que es la condición de ingreso al desarenador, razón por la cual en la zona de las compuertas predomina dicho color.

En la zona de descarga, presentada en la figura 5.11a, se distinguen los gradientes en los planos horizontal y vertical, que indican por un lado la distribución no uniforme de sólidos en suspensión en todo el dominio, y por otro, que las concentraciones de los mismos en la descarga tienen valores superiores a los 59 g/l.

La figura 5.11.b, por su parte, indica que las altas concentraciones de sólidos se mantienen cerca del fondo, con una distribución estratificada en el plano anterior a la descarga y casi uniforme en la mayor parte del último plano. Vale la pena hacer notar que en este último plano los valores se incrementan debido al arrastre del flujo

---

proveniente de la parte inferior del desarenador. El plano correspondiente al ingreso de flujo, muestra que la formación del vórtice favorece a la zona de mínima concentración.

La figura 5.12 presenta vistas laterales correspondientes a dos planos verticales: uno en el lado opuesto de la descarga, (a), y otro en la sección de descarga, (b). De la figura 5.11.b resulta evidente que la distribución de los sólidos en suspensión cerca del vertedor rebasa los 59 g/l, llegando hasta un valor de 88 g/l en el extremo lejano del mismo. De igual manera, resulta claro que en el plano opuesto de la descarga se presentan los valores mínimos de concentración de sólidos en suspensión. La ausencia de color rojo en las proximidades de la descarga, indica la máxima eficiencia de remoción para las partículas más pesadas, es decir, aquellas con máxima velocidad de sedimentación.

Finalmente, en la figura 5.13 se grafica la eficiencia de remoción del desarenador para los dos gastos de operación. Como era de esperarse, la eficiencia se incrementa a medida que aumenta la velocidad de sedimentación y es mayor para el gasto más bajo, tendiendo a separarse a medida que aumenta el tamaño de las partículas. Cabe mencionar que estas curvas de eficiencia resultaron independientes de la distribución de fracciones de masa de sólidos en suspensión, porque no se refieren al comportamiento global del desarenador, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura. Sin embargo, la eficiencia total de remoción sí depende tanto del gasto como de las fracciones de masa. Para el caso presente se obtuvieron los valores siguientes de eficiencia total,  $\eta$ :

$\eta_{total}$	$V_{s1}$	$V_{s2}$
$Q1=6,000l/s$	19.3%	34.4%
$Q2=12,000l/s$	10.0%	17.9%

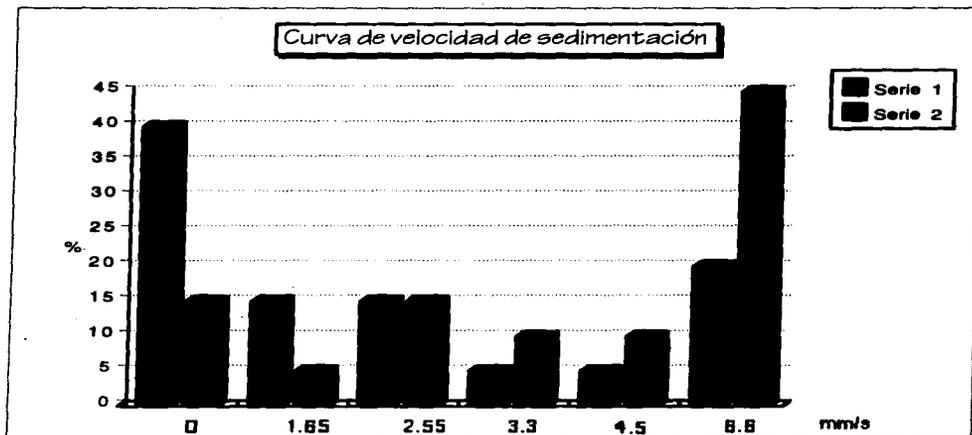


Fig. 5.1. Distribución de la velocidad de sedimentación para las diferentes fracciones de masa de los sedimentos. La serie 1 es la distribución  $V_{s1}$  y la serie 2 es la distribución  $V_{s2}$ .

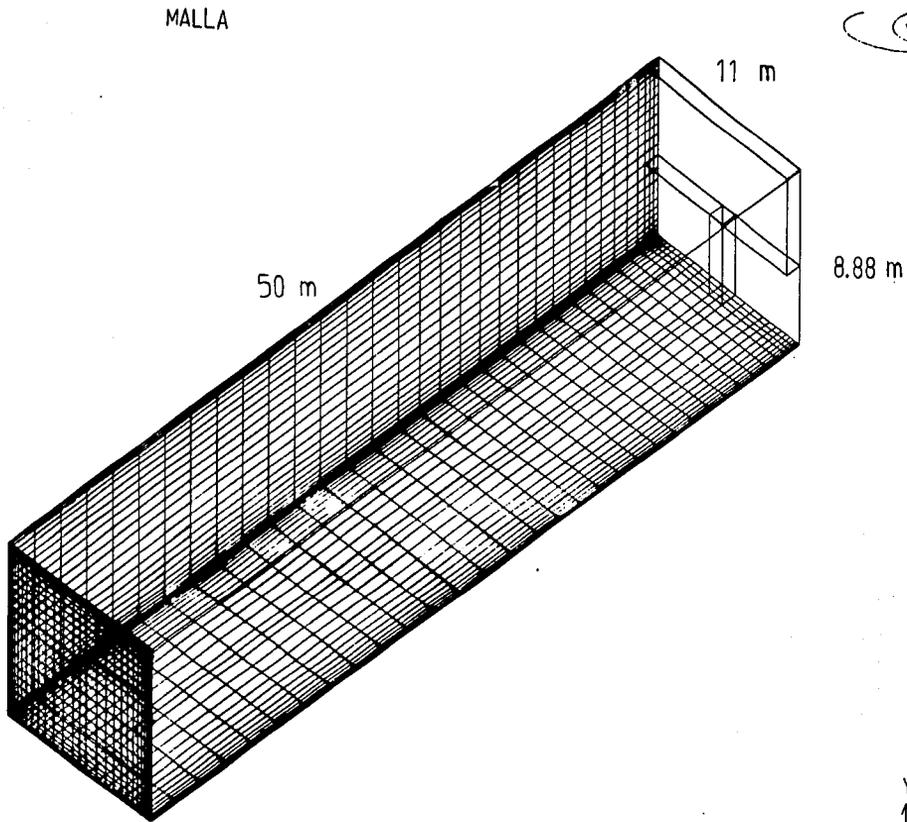
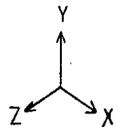
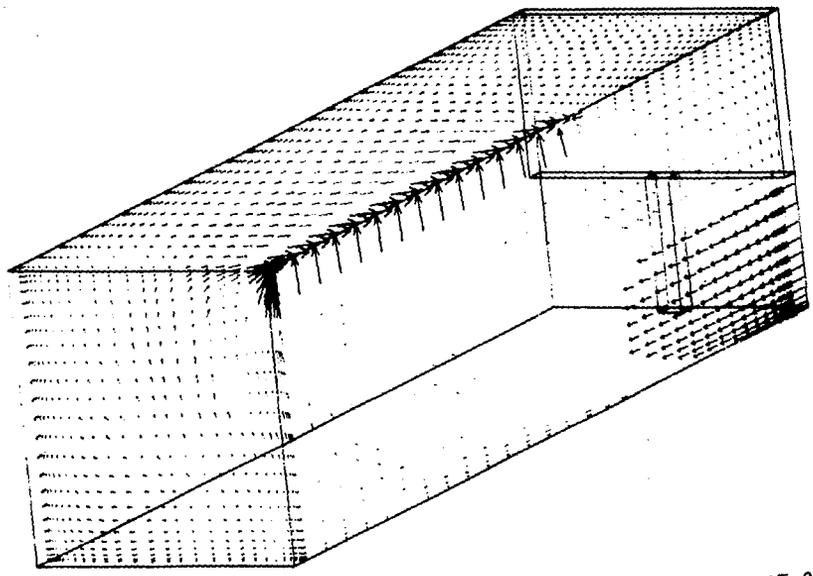


Fig.5.2. Representación geométrica del desarenador y discretización del dominio.





→ : .25 m/s.

Min : 2.8415E-03

Max : 1.3711E-01

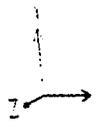
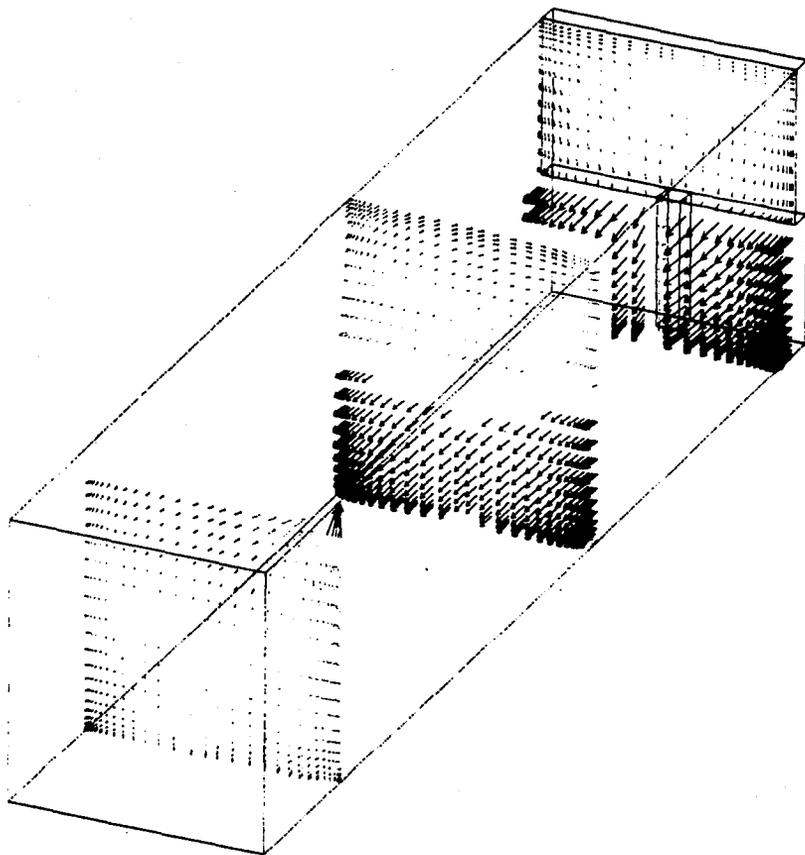


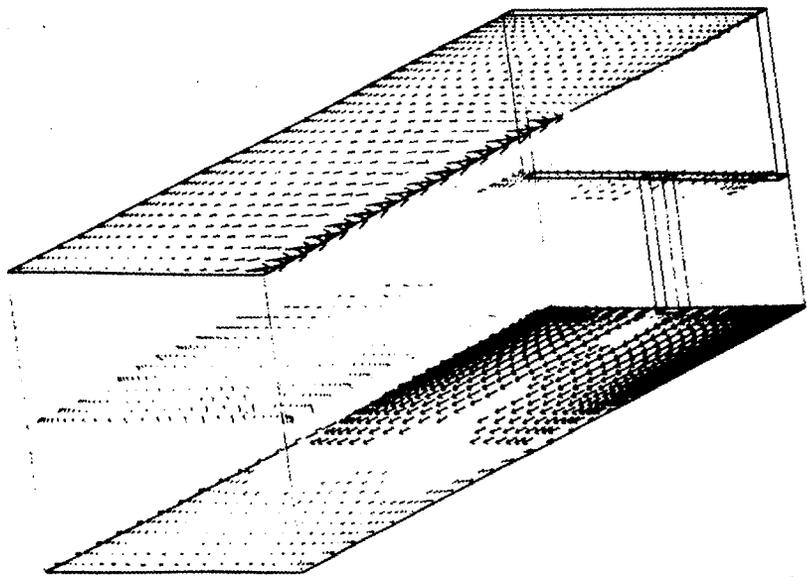
Fig. 5.3 Distribución de velocidades en las fronteras del desarenador



→ : 0.25 m/s.      Mir : 2.4046E-03      Max : 1.5026E-01

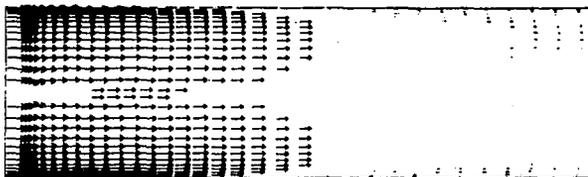


Fig. 5.4 Velocidades en tres planos transversales: en el ingreso, antes de la descarga y en la descarga.



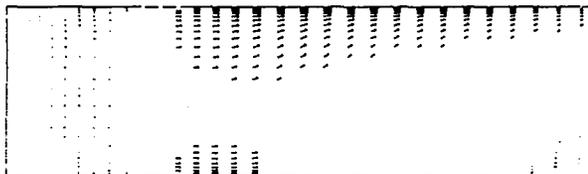
→ 0.26 m/s.      Min : 1.0194E-03      Max : 1.5208E-01

Fig. 5.5 Velocidades en tres planos horizontales: en el fondo, intermedio y superior



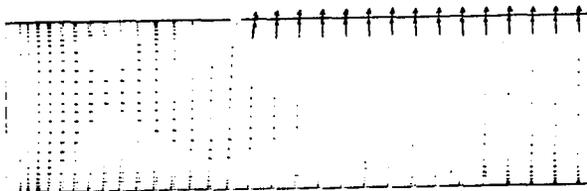
→ 0.41 m/s      Min: 1.024E-03      Max: 1.5208E-01

Fig. 5.6 Vista de planta de las velocidades en el fondo



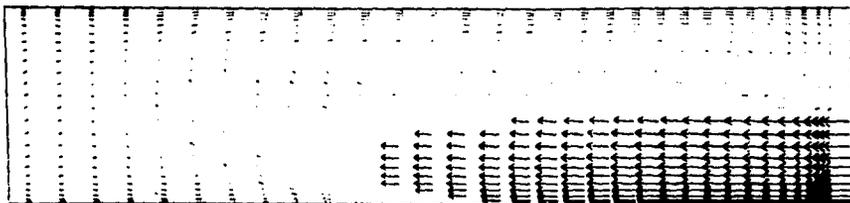
→ 0.41 m/s      Min: 2.7505E-03      Max: 6.4682E-02

Fig. 5.7 Vista de planta de las velocidades en el plano intermedio



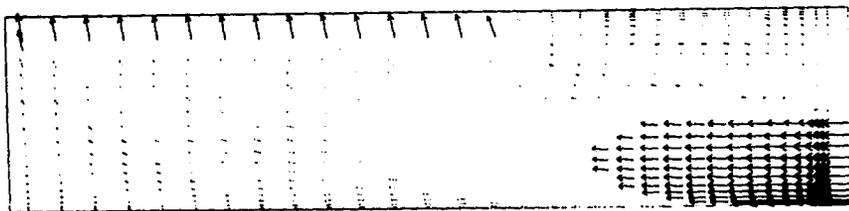
→ 0.41 m/s      Min: 1.1706E-03      Max: 1.4359E-01

Fig. 5.8 Vista de planta de las velocidades en el plano de la descarga



→ : .41 m/s.      Min : 2.4539E-03      Max : 1.5016E-01

Fig. 5.9. Vista lateral de las velocidades en el plano opuesto a la descarga

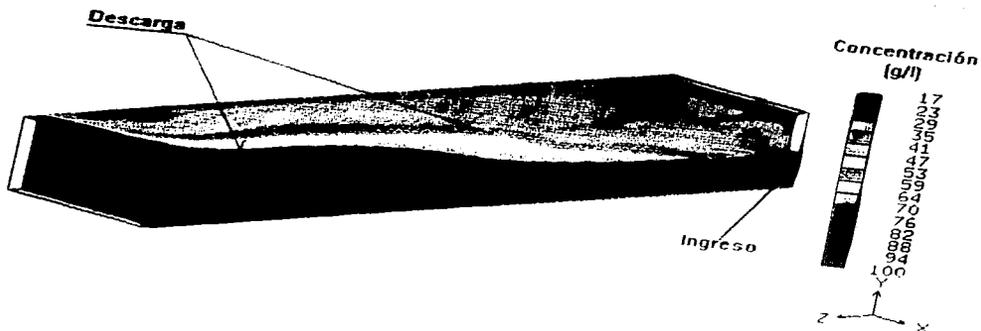


→ : .41 m/s.      Min : 1.7912E-03      Max : 1.4528E-01

Fig. 5.10 Vista lateral de las velocidades en el plano de la descarga

Vista isométrica  
Planos superiores

(a)



Vista isométrica  
Planos transversales

(b)

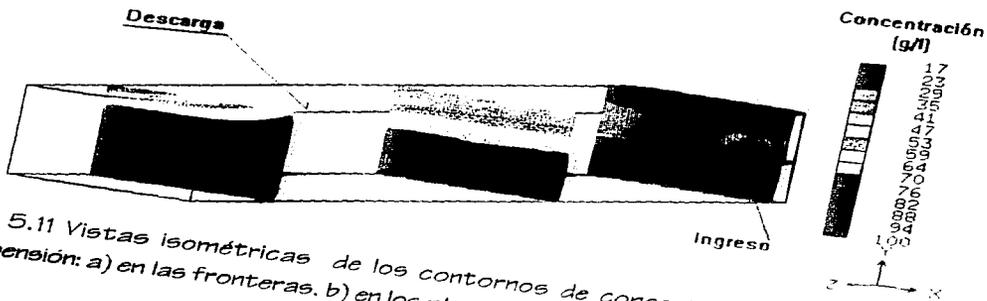
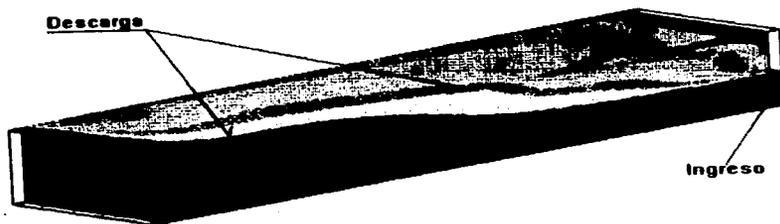


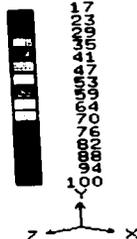
Fig. 5.11 Vistas isométricas de los contornos de concentración de sólidos en suspensión: a) en las fronteras. b) en los planos transversales

Vista isométrica  
Planos superiores

(a)

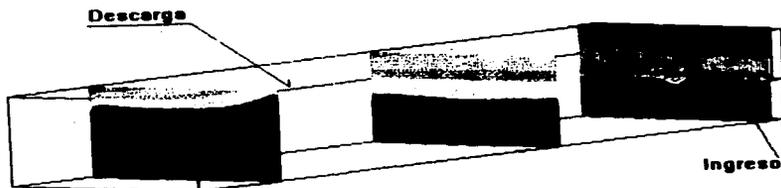


Concentración  
(g/l)



Vista isométrica  
Planos transversales

(b)



Concentración  
(g/l)

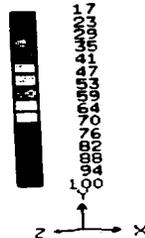
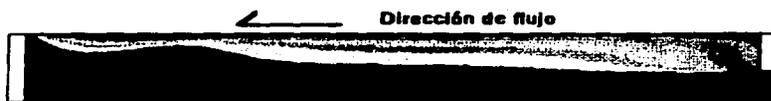


Fig. 5.11 Vistas isométricas de los contornos de concentración de sólidos en suspensión: a) en las fronteras, b) en los planos transversales

Vista lateral  
Plano opuesto a la descarga

(a)

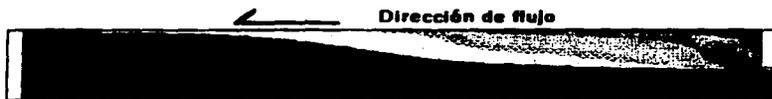


Concentración  
(g/l)



Vista lateral  
Plano de descarga

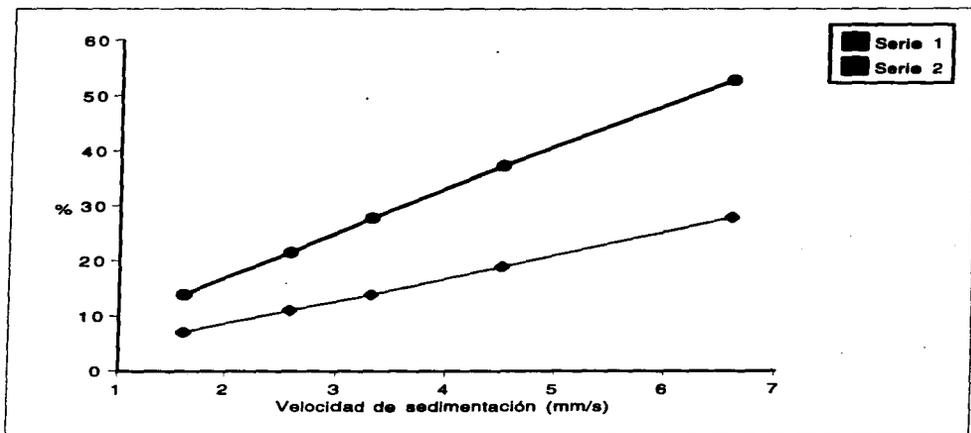
(b)



Concentración  
(g/l)



Fig. 5.12 Distribución espacial de la concentración de sólidos en suspensión en dos planos laterales: a) opuesto a la descarga, b) en la descarga



**Fig. 5.18** Eficiencia de remoción de sólidos en suspensión para el desarenador en estudio, considerando las diferentes fracciones de masa. La serie 1 es el gasto de 12,000 l/s, la serie 2 es el gasto de 6,000 l/s.

---

## CAPITULO VI

### Conclusiones

El modelo numérico desarrollado demostró ser eficaz en la simulación del comportamiento de los sólidos en suspensión y en la predicción de la remoción de los mismos. Esto fue especialmente significativo para el sedimentador tridimensional que presentaba una geometría compleja. Es de suponer que si se contara con la información completa del sedimentador bidimensional, su representación numérica en tres dimensiones arrojaría resultados aún más cercanos a la realidad, sobre todo en lo concerniente a los perfiles de velocidad.

Este modelo resultó ser una herramienta muy útil para realizar diseños preliminares de sedimentadores o en el rediseño de los mismos, ya que se pueden ensayar en forma relativamente sencilla modificaciones a la geometría que permiten mejorar su funcionamiento.

Al aplicar el modelo desarrollado al caso de la toma del río Verde descrito en el capítulo V, se determinó que la eficiencia total del desarenador depende tanto del gasto de operación como de la distribución de fracciones de masa, mientras que la eficiencia de remoción para un tamaño de partículas específico no depende de la diferencias en las fracciones de masa de las partículas en suspensión que ingresan al desarenador. Así, a partir de las simulaciones realizadas se ha podido cuantificar la diferencia de operar el desarenador con uno u otro gasto bajo las condiciones establecidas del problema.

Cabe mencionar que las concentraciones de sedimento utilizadas fueron bajas y que al tener concentraciones altas, presumiblemente afectaría al comportamiento del flujo al modificar la viscosidad del mismo y a la velocidad de sedimentación. Sin embargo, dichos efectos también podrían incorporarse al

---

modelo.

Para una mejor representación del comportamiento del fenómeno de sedimentación, habría que añadirle al presente modelo el arrastre de sedimento en el lecho, incluyendo la resuspensión ya que actualmente sólo representa el transporte por suspensión.

---

## Referencias

- [1] Stamou, A.; Adams, E.; Rodi W. (1989) "Numerical Modeling of Flow and Settling in Primary Rectangular Clarifiers", Journal of Hydraulic Research, Vol.27, No.5, pp.665-682.
- [2] Rijn, L. van (1989) "Sediment Transport by Currents and Waves" Delf Hydraulics, Holland
- [3] Launder, B.E.; Spalding, D.B. (1974), Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.3, pp.269-289.
- [4] Patankar, S. (1980) "Numerical Heat and Fluid Flow" McGraw-Hill, USA.
- [5] Olsen, N.; Skoglund, M. (1994) "Three Dimensional Numerical Modeling of Water and Sediment Flow in a Sand Trap", Journal of Hydraulic Research, Vol.32, No.6, pp. 833-844.
- [6] Stamou, A.; Adams, E.; Rodi, W. (1989) "Numerical Modeling of Flow and Settling in Primary Rectangular Clarifiers", Journal of Hydraulic Research, Vol.27, No.5, pp.665-682.

## Bibliografía

- \* Abdel-Gawad, S.M.; McCorquodale, J.A. (1985) "Numerical Simulation of Rectangular Settling Tanks", J. Hyd. Res., Vol.23, No.2, pp.85-97.
- \* Adams, E.W.; Rodi, W. (1990) "Modeling Flow and Mixing in Sedimentation Tanks" J. Hyd. Div. ASCE Vol.116, No.7, pp.85-97
- \* Ackers, P. (1983) "Sediment Transport Problems in Irrigation Systems Design" Developments in Hydraulic Engineering 1, London
- \* Celik, I.; Rodi, W. (1988) "Modeling Suspended Sediment Transport in Non equilibrium Situations", J. of Hyd. Div. ASCE, Vol.114, No.10, pp.1157-1191..
- \* Celik, I.; Rodi, W. (1991) "Suspended Sediment-Transport Capacity for Open Channel Flow", J. of Hyd. Div. ASCE, Vol.117, No.2, pp.191-204.

- 
- \* Cèlik,I;Rodi,W(1991), "Suspended Sediment-Transport Capacity for Channel Flow", J. of Hyd. Div. ASCE, Vol.117, No.2, pp.101-114.
  - \* Chow, Y (1959) "Open Channel Hydraulics", McGraw-Hill, USA.
  - \* De Vantier, B.; Narayanaswami, R. (1986) "A k- $\epsilon$  Based Model for Sediment Transport", Third International Symposium on River Sedimentation, The University of Mississippi, pp.1407-1415.
  - \* Englund, F. (1965) "A Note on the Vedernikov's Criterion", La Houille Balanche, No.6, pp.801-802
  - \* Graf, H (1971) "Hydraulics of Sediment Transport" McGraw-Hill, USA
  - \* Hoyal, D; Atkinso, J; Depinto, J; Taylor, S. (1995) "Effect of Turbulence on Sediment Deposition", J. of Hyd. Div., Vol.33, No.3, pp.349-360.
  - \* Imam, E.; McCorquodale, J.A.; Bewtra, W. (1982) "Numerical Modeling of Sedimentation Tanks" J. of Hyd. Div. ASCE Vol.109, No.12, pp.1740-1754.
  - \* Johns, B; Chescher, T.J; et al (1990) "The Modeling of Sand Wave Evolution from Suspended and Bed Load Transport of Sediment", J. of Hyd. Div, Vol.28, No.3, pp.335-374.
  - \* Kerssens, P; Prins, A; van Rijn, L (1979) "Model for Suspended Sediment Transport", J. of Hyd. Div. ASCE, al.105, No. NY5, pp.461-476.
  - \* Launder, B.E.; Spalding, D.B. (1974), "Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering", Vol.3, pp.269-289.
  - \* Lyn, A; Stamou, I; Rodi, W "Density Currents and Shear Induced Flocculation in Sediment Tanks", J. of Hyd. Div. ASCE, Vol.118, No.6, pp.849-867.
  - \* Mallin, M; Parry, J (1987) "Turbulent Heat and Momentum Transfer in Rough Tubes", Report CHAM/146, CHAM
-

- 
- \* Maza, J.; (1989) "Manual de Ingeniería de Ríos, Erosión y Obras de Protección", Instituto de Ingeniería, UNAM.
  - \* Nakagawa, H.; Tsujimoto, T. (1980) "Sand Bed Instability due to Bed Load Motion", J. of Hyd. Div. ASCE, Vol. 106, No. HY12, pp. 2029-2051.
  - \* Ni, J.; Wang, G. (1991) "Vertical Sediment Distribution", J. of Hyd. Div. ASCE, Vol. 117, No. 9, pp. 1184-1194.
  - \* Odgaard, J.; Wang, Y. (1991) "Sediment Management with Submerged Vanes I: Theory", J. of Hyd. Div. ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 267-282.
  - \* Olsen, N.; Skoglund, M. (1994) "Three Dimensional Numerical Modeling of Water and Sediment Flow in a Sand Trap", J. of Hyd. Div., Vol. 32, No. 6, pp. 833-844.
  - \* Pacheco-C (1989) "Transport of Sediments: Analytical Solution", J. of Hyd. Res. 27 No. 4, pp. 501-518.
  - \* Stamou, A.; Adams, E.; Rodi, W. (1989) "Numerical Modeling of Flow and Settling in Primary Rectangular Clarifiers", J. of Hyd. Div., Vol. 27, No. 5, pp. 665-682
  - \* Raudkivi, A. (1993) "Sedimentation, Exclusion and Removal of Sediment from Diverted Water" A.A. Balkema, Rotterdam.
  - \* Rijn, L. van (1989) "Sediment Transport by Currents and Waves" Delf Hydraulics, Holland
  - \* Rosten, H.; Worrel, J. (1988) "Generalized Wall Functions for Turbulent Flow Including Wall Roughness", Report CHAM/88/2, CHAM
  - \* Teisson, Ch.; Latteux, B. (1986) "A Depth-Integrated Bidimensional Model of Suspended Sediment Transport" Third International Symposium on River Sedimentation, The University of Mississippi, pp. 441-429.
  - \* Vanoni, Vito (1977) "Sediment Engineering", ASCE Manual and Reports on
-

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

---

Engineering Practice, New York.

- \* White Frank (1991) "Viscous Fluid Flow", McGraw-Hill, Second Edition USA.
- \* Woo, H.S.; Julien, P.Y.; Richardson, E.V.(1989) "Suspension of Large Concentration of Sands", J. Hyd. Div. ASCE Vol.114.No.8.pp.888-899
- \* Zhou,S; McCorquodale,J;Vtasovic,Z.(1992) "Influence of Density on Circular Clarifiers with Baffles", J. of Hyd. Div. ASCE,Vol.118,No.6,p.829-847.
- \* Zyserman,J.;Fredsoe,J. (1994) "Data Analysis of Bed Concentration of Suspended Sediment", J. of Hyd. Div. ASCE,Vol.120,No.9,pp.1021-1041.

## Apéndice 1. Q1 del sedimentador tridimensional

- Initialize the TURBULENCE KINETIC ENERGY  
IINIT(KE) = kein
- Initialize the KINETIC ENERGY DISSIPATION RATE  
IINIT(EP) = epsin
- Initialize the USER VARIABLE 1  
IINIT(c1) = 30.000E+00

.....  
Group 12. Convection and diffusion adjustments  
.....

Group 13. Boundary & Special Source

rg(7)=uin\*1.60  
PATCH(BFCENT, LOW, 1, NX, 1, NY, 1, 1, 1, LSTEP)  
COVAL(BFCENT, P1, FIXFLU, RHO1 = uin)  
COVAL(BFCENT, W1, ONLYMS, uin)  
COVAL(BFCENT, V1, ONLYMS, 0.000E+00)  
COVAL(BFCENT, U1, ONLYMS, 0.000E+00)  
COVAL(BFCENT, KE, ONLYMS, kein)  
COVAL(BFCENT, EP, ONLYMS, epsin)  
COVAL(BFCENT, c1, ONLYMS, 0.0001068)  
COVAL(BFCENT, c2, ONLYMS, 0.0001068)  
COVAL(BFCENT, c3, ONLYMS, 0.0001068)  
COVAL(BFCENT, c4, ONLYMS, 0.0001068)

- WALL Boundary Condition, Named FONDO  
PATCH(FONDO, SWALL, 1, NX, 1, 1, 1, NZ, 1, LSTEP)  
COVAL(FONDO, U1, GRND2, 0.000E+00)  
COVAL(FONDO, W1, GRND2, 0.000E+00)  
COVAL(FONDO, KE, GRND2, GRND2)  
COVAL(FONDO, EP, GRND2, GRND2)  
walla=0.001

- WALL Boundary Condition, Named Pared1  
PATCH(PARED1, wWALL, nx, nx, 1, ny, 1, nz, 1, LSTEP)  
COVAL(PARED1, w1, GRND2, 0.000E+00)  
COVAL(PARED1, V1, GRND2, 0.000E+00)  
COVAL(PARED1, KE, GRND2, GRND2)  
COVAL(PARED1, EP, GRND2, GRND2)

- WALL Boundary Condition, Named Pared2  
PATCH(PARED2, eWALL, 1, 1, 1, ny, 1, nz, 1, LSTEP)  
COVAL(PARED2, w1, GRND2, 0.000E+00)  
COVAL(PARED2, V1, GRND2, 0.000E+00)  
COVAL(PARED2, KE, GRND2, GRND2)  
COVAL(PARED2, EP, GRND2, GRND2)

- PATCH(SALIDA01, HIGH, 1, NX, 1, NY, NZ, NZ, 1, LSTEP)  
COVAL(SALIDA01, P1, FIXP, 0.0)  
COVAL(SALIDA01, U1, ONLYMS, SAME)  
COVAL(SALIDA01, V1, ONLYMS, SAME)  
COVAL(SALIDA01, W1, ONLYMS, SAME)  
COVAL(SALIDA01, C1, ONLYMS, SAME)  
COVAL(SALIDA01, C2, ONLYMS, SAME)  
COVAL(SALIDA01, C3, ONLYMS, SAME)  
COVAL(SALIDA01, C4, ONLYMS, SAME)

- patch(sumidero, phasem, 1, nx, 1, ny, 1, nz, 1, lstep)  
coval(sumidero, c1, grnd, grnd)  
coval(sumidero, c2, grnd, grnd)  
coval(sumidero, c3, grnd, grnd)  
coval(sumidero, c4, grnd, grnd)

## Apéndice 1. Q1 del sedimentador tridimensional

```
surridero=skip
real(frac);frac=1.0
rg(1)=0.07*frac
rg(2)=0.04*frac
rg(3)=0.025*frac
rg(4)=0.008*frac
.....
Group 14. Downstream Pressure For PARAB
.....
Group 15. Terminate Sweeps

LSWEEP=5
restrf(p1,u1,v1,w1,ke,ep)
.....
Group 16. Terminate Iterations
.....
Group 17. Relaxation
  *AUTOMATIC FALSE-TIME-STEP RELAXATION APPLIED TO U1
  relax(p1,linrx,0.5)
REAL(SCALEL,SCALEU);SCALEL= 1.000E-00;SCALEU= 1.000E+00
RELAX(U1,FALSDT, 1.000E+00*SCALEL/SCALEU)
RELAX(V1,FALSDT, 1.000E+00*SCALEL/SCALEU)
RELAX(W1,FALSDT, 1.000E+00*SCALEL/SCALEU)
RELAX(KE,FALSDT, 1.000E+00*SCALEL/SCALEU)
RELAX(EP,FALSDT, 1.000E+00*SCALEL/SCALEU)
RELAX(c1,FALSDT, 1.000E+01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(c2,FALSDT, 1.000E+01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(c3,FALSDT, 1.000E+01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(c4,FALSDT, 1.000E+01*SCALEL/SCALEU)
.....
Group 18. Limits
.....
Group 19. EARTH Calls To GROUND Station
.....
Group 20. Preliminary Printout
ECHO = T
.....
Group 21. Print-out of Variables
  * Printout for the PRECIURE
OUTPUT(P1,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(U1,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(V1,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(KE,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(EP,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(c1,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(c2,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(c3,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(c4,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(c5,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(c6,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(c7,n,N,N,Y,Y)
.....
Group 22. Monitor Print-Out
.....
Group 23. Field Print-Out & Plot Control
  * Frequency of tabulation/plots of Spot/Residuals Values
  * (DO NOT Reset)
NPLT=1
  * Print TABLES AND PLOTS of Spot-Values and Residuals
```

## Apéndice 1. Q1 del sedimentador tridimensional

IIAIBL=3

.....  
Group 24. Dumps For Restarts

- Save the Final Flow Field in a RE-START File

SAVE=T; NSAVE=CHAM

.....  
STOP

## Apéndice 2. Q1 del sedimentador bidimensional

```
IALK=F;RUN(1,1);VDU=0
.....
* GROUP 1. Run title and other preliminaries.
*
TEXT(SEDIMENTADOR VLR STAMOU Y RODI)
*
* Si LC(1)=1 tomara diferencias centradas
LC(1)=F
.....
* GROUP 2. Transience; time-step specification
*
.....
* GROUP 3. X-direction grid specification.
*
* Cartesian Grid Selected
CARTES=T
* Extent of the Domain in the X-Direction
XULAST= 3.270E+01
* Number of Cells in the X-Direction
NX=60
* Equal Grid Spacing in the X-Direction
GRDPWR(X,NX,XULAST, 1.000E+00)
INTEGER(NXF01,NXLO1); NXF01=1; NXLO1=NX
*
.....
* GROUP 4. Y-direction grid specification.
*
* Extent of the Domain in the Y-Direction: 2.700E+00
* Number of Cells in the Y-Direction
NY=30
* Equal Grid Spacing in Subregion 1
SUBGRD(Y,1,15, 1.350E+00, 1.300E+00)
INTEGER(NYF01,NYLO1); NYF01=1; NYLO1=15
* Equal Grid Spacing in Subregion 2
SUBGRD(Y,16,24, 8.100E-01, 1.000E+00)
SUBGRD(Y,16,24, 5.100E-01, 1.000E+00)
SUBGRD(Y,16,24, 1.050E-00, 1.000E+00)
INTEGER(NYF02,NYLO2); NYF02=16; NYLO2=24
* Equal Grid Spacing in Subregion 3
SUBGRD(Y,25,30, 5.400E-01, 1.000E+00)
SUBGRD(Y,25,30, 8.400E-01, 1.000E+00)
SUBGRD(Y,25,30, 3.000E-01, 1.000E+00)
INTEGER(NYF03,NYLO3); NYF03=25; NYLO3=30
*
.....
* GROUP 5. Z-direction grid specification.
*
.....
* GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion.
*
.....
* GROUP 7. Variables stored, solved & named.
*
Solve(P1,u1,v1)
solve(c1,c2,c3,c4,c5,c6)
store(enu1,c7,c8)
.....
* GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices.
*
```

## Apêndice: 2. Q1 del sedimentador bidimensional

```

.....
* GROUP 9. Properties of the medium (or media).
*
* Set First-Phase Density Value
RHO1= 9.980E+02
* Set Laminar Kinematic Viscosity
ENUL= 1.080E-06
* Set Schmidt Number for USER VARIABLE 1
PRI(c1)=1.000
PRI(c2)=1.000
PRI(c3)=1.000
PRI(c4)=1.000
PRI(c5)=1.000
PRI(c6)=1.000
PRI(ep)=0.400
PRI(ke)=1.4
* Select K-E Turbulence Model
ENUT = CMU * (Mixing-StrLen) * K**0.5
EL1 = (CD * K**1.5)/E
TURMOD(KEMODL)
*
store(ke,ep)
.....
* GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties.
*
.....
* GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields.
*
real(uin);uin=21E-3
real(kein,epsin);kein=(uin**2.0)*0.310
epsin=(0.1643*(kein)**1.5)/(0.30*1.3500)
* Initialize the PREC1URE
FIINIT(P1)= 1.000E-10
* Initialize the X-DIRECTION VELOCITY COMPONENT
FIINIT(U1)= uin
* Initialize the Y-DIRECTION VELOCITY COMPONENT
FIINIT(V1)= 1.000E-10
* Initialize the TURBULENT KINETIC ENERGY
FIINIT(KE)= kein
* Initialize the KINETIC-ENERGY DICIPATION RATE
FIINIT(EP)= epsin
* Initialize the USER VARIABLE 1
FIINIT(c1)= 30.000E+00
*
.....
* GROUP 12. Convection and diffusion adjustments.
*
.....
* GROUP 13. Boundary conditions and special sources.
*
rg(7)=uin*2.70
PATCH(BFCENT, WEST, NXF01, NXF01, NYF01, NYL01,1,1,1,1)
COVAL(BFCENT, P1, FIXFLU,RHO1+ uin)
COVAL(BFCENT, U1, ONLYMS, uin)
COVAL(BFCENT, V1, ONLYMS, 0.000E+00)
COVAL(BFCENT, KE, ONLYMS, kein)
COVAL(BFCENT, EP, ONLYMS, epsin)
COVAL(BFCENT, c1, ONLYMS, 1.500E+01)
COVAL(BFCENT, c2, ONLYMS, 5.000E+00)

```

## Apéndice 2. Q1 del sedimentador bidimensional

```
COVAL(BFCENT, c3, ONLYMS, 1.500E+01)
COVAL(BFCENT, c4, ONLYMS, 1.000E+01)
COVAL(BFCENT, c5, ONLYMS, 1.000E+01)
COVAL(BFCENT, c6, ONLYMS, 4.500E+01)
COVAL(BFCENT, c1, ONLYMS, 4.000E+01)
COVAL(BFCENT, c2, ONLYMS, 1.500E+01)
COVAL(BFCENT, c3, ONLYMS, 1.500E+01)
COVAL(BFCENT, c4, ONLYMS, 5.000E+00)
COVAL(BFCENT, c5, ONLYMS, 5.000E+00)
COVAL(BFCENT, c6, ONLYMS, 2.000E+01)
* OUTLET Boundary Condition, Named SALIDA01
PATCH(SALIDA01, EAST, NXL01, NXL01, NYF03, NYL03,1,1,1,1)
COVAL(SALIDA01, P1, FIXp, 0.000E+00)
COVAL(SALIDA01, KE, ONLYMS,SAME)
COVAL(SALIDA01, EP, ONLYMS,SAME)
COVAL(SALIDA01, c1, ONLYMS,SAME)
COVAL(SALIDA01, c2, ONLYMS,SAME)
COVAL(SALIDA01, c3, ONLYMS,SAME)
COVAL(SALIDA01, c4, ONLYMS,SAME)
COVAL(SALIDA01, c5, ONLYMS,SAME)
COVAL(SALIDA01, c6, ONLYMS,SAME)
* WALL Boundary Condition, Named FONDO
PATCH(FONDO, SWALL, NXF01, NXL01, NYF01, NYF01,1,1,1,1)
COVAL(FONDO, U1, GRND2, 0.000E+00)
COVAL(FONDO, KE, GRND2,GRND2)
COVAL(FONDO, EP, GRND2,GRND2)
* PLATE Boundary Condition, Named PLATE01
PATCH(PLATE01, WEST, NXF01, NXF01, NYF02, NYL03,1,1,1,1)
COVAL(PLATE01, U1, FIXVAL, 0.000E+00)
* PLATE Boundary Condition, Named PLATE03
PATCH(PLATE03, EAST, NXL01, NXL01, NYF01, NYL02,1,1,1,1)
COVAL(PLATE03, U1, FIXVAL, 0.000E+00)
*
patch(sumidero,phasem,2,nx-1,2,ny,1,1,1,1)
caval(sumidero,c1,grnd,grnd)
caval(sumidero,c2,grnd,grnd)
caval(sumidero,c3,grnd,grnd)
caval(sumidero,c4,grnd,grnd)
caval(sumidero,c5,grnd,grnd)
caval(sumidero,c6,grnd,grnd)
real(frac);frac=1.0
rg(1)=0.0000*frac
rg(2)=0.0005*frac
rg(3)=0.0005*frac
rg(4)=0.0011*frac
rg(5)=0.0015*frac
rg(6)=0.0022*frac
*
.....
* GROUP 14. Downstream preclure for PARAB=.TRUE..
*
.....
* GROUP 15. Termination of sweeps.
*
LSWEEP=200
restr1(all)
* Number of Iterative Sweeps (Outer Iterations)
RESREF(P1)= 1.000E-10
* Reference Residual for the X1-DIRECTION VELOCITY COMPONENT
```

## Apéndice 2. Q1 del sedimentador bidimensional

RESREF(U1)= 1.000E-10  
• Reference Residual for the Y-DIRECTION VELOCITY COMPONENT  
RESREF(V1)= 1.000E-10  
• Reference Residual for the TURBULENT KINETIC ENERGY  
RESREF(KE)= 1.000E-10  
• Reference Residual for the KINETIC-ENERGY DISSIPATION RATE  
RESREF(EP)= 1.000E-10  
• Reference Residual for the USER VARIABLE 1  
RESREF(c1)= 1.000E-10  
RESREF(c2)= 1.000E-10  
RESREF(c3)= 1.000E-10  
RESREF(c4)= 1.000E-10  
RESREF(c5)= 1.000E-10  
RESREF(c6)= 1.000E-10

•  
• GROUP 16. Termination of iterations.  
•  
• Linear-Iterations and Termination Criterion for P1  
•  
• GROUP 17. Under-relaxation devices.  
•  
• Automatic False-Time-Step Relaxation Applied to U1  
REAL(SCALE,SCALEU);SCALE= 9.000E-01;SCALEU= 2.200E-02  
RELAX(U1,FALSDT, 3.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
• Automatic False-Time-Step Relaxation Applied to V1  
RELAX(V1,FALSDT, 3.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
• Automatic False-Time-Step Relaxation Applied to KE  
RELAX(KE,FALSDT, 3.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
• Automatic False-Time-Step Relaxation Applied to EP  
RELAX(EP,FALSDT, 3.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
• Automatic False-Time-Step Relaxation Applied to c1  
RELAX(c1,FALSDT, 2.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
RELAX(c2,FALSDT, 2.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
RELAX(c3,FALSDT, 1.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
RELAX(c4,FALSDT, 1.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
RELAX(c5,FALSDT, 1.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
RELAX(c6,FALSDT, 1.000E+00\*SCALE/SCALEU)  
•  
• GROUP 18. Limits on variables or increments to them.  
•  
• GROUP 19. Data communicated by satellite to GROUND.  
•  
• GROUP 20. Preliminary print-out.  
•  
• Activate Printout of Satellite Data.  
ECHO=1  
•  
• GROUP 21. Print-out of variables.  
•  
• Printout for the PREC1URE  
OUTPUT(P1,n,N,N,Y,Y,Y)  
• Printout for the X-DIRECTION VELOCITY COMPONENT  
OUTPUT(U1,n,N,N,Y,Y,Y)  
• Printout for the Y-DIRECTION VELOCITY COMPONENT

## Apéndice 2. Q1 del sedimentador bidimensional

```
OUTPUT(V1,n,N,N,Y,Y,Y)
  * Printout for the TURBULENT KINETIC ENERGY
OUTPUT(K1,n,N,N,Y,Y,Y)
  * Printout for the KINETIC ENERGY DISSIPATION RATE
OUTPUT(IP,n,N,N,Y,Y,Y)
  * Printout for the USER VARIABLE 1
OUTPUT(c1,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c2,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c3,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c4,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c5,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c6,n,N,N,Y,Y,Y)
  *
  * .....
  * GROUP 22. Spot-value print-out.
  *
  * X-Direction Index of Spot-Value
IXMON=59
  * Y-Direction Index of Spot-Value
IYMON=26
  *
  * .....
  * GROUP 23. Field print-out and plot control.
  *
  * Frequency of tabulation/plots of Spot/Residuals Values
  * (DO NOT Reset)
NPLT=1
  * Print TABLES AND PLOTS of Spot-Values and Residuals
I1ABL=3
  *
  * .....
  * GROUP 24. Preparations for continuation runs.
  *
  * Save the Final Flow Field in a RE-START File
SAVE=T; NSAVE=CHAM
  *
  * .....
STOP
```

### Apéndice 3. Ground del sedimentador tridimensional.

C Este ground es el usado junto con QSEDINF1 para el primer  
C analisis del desarenador.

PROGRAM MAIN  
C FILE NAME GROUND.FIN-----200190

C THIS IS THE MAIN PROGRAM OF EARTH

C (C) COPYRIGHT 1984, LAST REVISION 1989.  
C CONCENTRATION HEAT AND MOMENTUM LTD. ALL RIGHTS RESERVED.  
C This subroutine and the remainder of the PHOENICS code are  
C proprietary software owned by Concentration Heat and Momentum  
C Limited, 40 High Street, Wimbledon, London SW19 5AU, England.

C PROGRAM MAIN

C 1 The following COMMON's, which appear identically in the  
C satellite MAIN program, allow up to 50 dependent variables to  
C be solved for (or their storage spaces to be occupied by  
C other variables, such as density). If a larger number is  
C required, the PARAMETER NUMPHI should be reset to the required  
C larger number. Numbers less than 50 are not permitted.

C PARAMETER (NUMPHI=50, NM=NUMPHI,NM4=NM\*4)

C COMMON/LGE4/L4(NM)  
1/LDB1/L5(NM)/IDA1/I1(NM)/IDA2/I2(NM)/IDA3/I3(NM)/IDA4/I4(NM)  
1/IDA5/I5(NM)/IDA6/I6(NM)/GI1/I7(NM)/GI2/I8(NM)/HDA1/IH1(NM)  
1/GH1/IH2(NM)/RDA1/R1(NM)/RDA2/R2(NM)/RDA3/R3(NM)/RDA4/R4(NM)  
1/RDA5/R5(NM)/RDA6/R6(NM)/RDA7/R7(NM)/RDA8/R8(NM)/RDA9/R9(NM)  
1/RDA10/R10(NM)/RDA11/R11(NM)  
1/GR1/R12(NM)/GR2/R13(NM)/GR3/R14(NM)/CR4/R15(NM)  
1/IPIP1/IP1(NM)/HPIP2/IHP2(NM)/RPIP1/RVAL(NM)/LPIP1/LVAL(NM)  
1/IFPL/IPLO(NM)/RFPL1/ORPRIN(NM)/RFPL2/ORMAX(NM)  
1/RFPL3/ORMIN(NM)/IDA7/ID7(NM)/IDAB/IDB(NM)  
LOGICAL L1,L2,L3,L4,L5,DBCFIL,LVAL  
CHARACTER\*4 IH1,IH2,IHP2,NSDA

C COMMON/F01/I9(NM4)  
COMMON/DISC,DBCFIL  
COMMON/LUNITS/LUNIT(60)

C EXTERNAL WAYOUT

C 2 Set dimensions of data-for-GROUND arrays here. WARNING: the  
C corresponding arrays in the MAIN program of the satellite  
C (see SATLIT) must have the same dimensions.  
C PARAMETER (NLG=20, NIG=20, NRC=100, NCC=10)

C COMMON/LGRND/LG(NLG)/ICRND/IG(NIG)/RGRND/RC(NRC)/CGRND/CG(NCC)  
LOGICAL LG  
CHARACTER\*4 CG

C 3 Set dimensions of data-for-GREX arrays here. WARNING: the  
C corresponding arrays in the MAIN program of the satellite  
C (see SATLIT) must have the same dimensions.  
C PARAMETER (NLSG=20, NISG=20, NRSG=100,NCSCG=10)

C COMMON/LSG/LSCG(NLSC)/ISC/ISCG(NISC)/RSG/RSGD(NRSG)/CSG/CSGD(NCSCG)

### Apéndice 3. Ground del sedimentador tridimensional.

```

LOGICAL LSGD
CHARACTER*4 CSGD)
C
C 4 Set dimension of patch--name array here. WARNING: the array
C NAMPAT in the MAIN program of the satellite must have the
C same dimension.
C PARAMETER (NPNAM=1000)
C
COMMON/NPAT/NAMPAT(NPNAM)
COMMON/LWFUN1/DOSKIN(NPNAM)
COMMON/LWFUN2/DHCHKD(NPNAM)
CHARACTER*8 NAMPAT
C
C CONFIG FILE name declaration.
COMMON/CNFG/CNFIG
CHARACTER CNFIG*48
C
C 5 The numbers in the next statement indicates how much computer
C memory is to be set aside for storing the main and auxiliary
C variables. The user may alter them if he wishes, to accord
C with the number of grid nodes and dependent variables he is
C concerned with.
C PARAMETER (NFDIM=2500000)
C
COMMON F(NFDIM)
C
C 6 The following three statements concern storage for the PATCH-wise
C variables. If more than 30 PATCH-wise variables are required
C NPVDM should be increased and the common block /LBPV/ in the
C include file GRDLOC15 should be lengthened.
C PARAMETER (NPVDM=31)
COMMON/INDPV/NPVMX,NIMAX,NITOT,LOPV(NPVDM)
C
CALL SUB2(NPVMX,NPVDM,NIMAX,NPVDM)
C
CALL CNFGZZ(2)
CALL EARSET(1)
CALL OPENFL(6)
C
CALL MAIN1(NFDIM,NUMPHI,NLSC,NISG,NRSG,NCSG,NLG,NIG,NRG,NCG)
CALL WAYOUT(0)
STOP
END
C.....
C.....
SUBROUTINE GROUND
  INCLUDE 'SATEAR'
  INCLUDE 'GRDLOC'
  INCLUDE 'GRDEAR'
  INCLUDE 'GRDBFC'
c
capp este include es para determinar areas y volúmenes en BFC
EQUIVALENCE (I2,I2STEP)
CXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX USER SECTION STARTS:
C
capp hay que comentar las 2 líneas siguientes para usar GRDBFC
COMMON/NMFILS/NMFIL(60)
CHARACTER NMFIL*48
C 1 Set dimensions of data--for--GROUND arrays here. WARNING: the
C corresponding arrays in the MAIN program of the satellite

```

### Apéndice 3. Ground del sedimentador tridimensional.

```

C and EARTH must have the same dimensions.
PARAMETER (NLG=20, NIG=20, NRG=100, NCG=10)
C
COMMON/LGRND/LG(NIG)/IGRND/IG(NIG)/RGRND/RG(NRG)/CGRND/CG(NCG)
LOGICAL LG
CHARACTER*4 CG
C
C 2 User dimensions own arrays here, for example:
C
C DIMENSION GUH(10,10),GUC(10,10),GUX(10,10),GUZ(10)
PARAMETER (NPNAM=1000)
PARAMETER(NXDIM=100,NYDIM=100)
DIMENSION GSEDIM(NYDIM,NXDIM),GYCOORD(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gcao(NYDIM,NXDIM),gseval(NYDIM,NXDIM)
C
C
COMMON/NPAT/NAMPAT(NPNAM)
COMMON/LWFUN1/DOSKIN(NPNAM)
COMMON/LWFUN2/DHCHKD(NPNAM)
CHARACTER*8 NAMPAT
C
C 3 User places his data statements here, for example:
C
DATA NXDIM,NYDIM/10,10/
SAVE varmor,altura,iindx1,iindx2,itime,itime1,itime2,ieasp
C
C 4 Insert own coding below as desired, guided by GREX examples.
C Note that the satellite-to-GREX special data in the labelled
COMMONS /RSG/, /ISC/, /LSG/ and /CSG/ can be included and
used below but the user must check GREX for any conflicting
uses. The same comment applies to the EARTH-spare working
arrays EASP1, EASP2,.....EASP20. In addition to the EASPs,
there are 10 GRound-earth SPare arrays, GRSP1,.....GRSP10,
supplied solely for the user, which are not used by GREX. If
the call to GREX has been deactivated then all of the arrays
may be used without reservation.
C
C
IXL=IABS(IXL)
IF(IGR.EQ.13) GO TO 13
IF(IGR.EQ.19) GO TO 19
GO TO (1,2,3,4,5,6,25,8,9,10,11,12,13,14,25,25,25,19,20,25,
125,23,24),IGR
25 CONTINUE
RETURN
C.....
C
C --- GROUP 1. Run title and other preliminaries
C
1 GO TO (1001,1002),ISC
1001 CONTINUE
call make(yg2d)
call make(grsp1)
C
C User may here change message transmitted to the VDU screen or
batch-run log file.
C
IF(IGR.EQ.1.AND.ISC.EQ.1) THEN
CALL WRYS40('GROUND file is GROSEDIM.F of: 190392 ')
CALL WRYS40('PHOENICS version number is : 1.5.3 ')
ENDIF
C

```

### Apéndice 3. Ground del sedimentador tridimensional.

```

RI IURN
1002 CONTINUE
RE IURN
C-----
C--- GROUP 2. Transience; time-step specification
C-----
C--- GROUP 3. X-direction grid specification
C-----
C--- GROUP 4. Y-direction grid specification
C-----
C--- GROUP 5. Z-direction grid specification
C-----
C--- GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion
C-----
C--- GROUP 7. Variables stored, solved & named
C-----
C--- GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices
C-----
C--- GROUP 9. Properties of the medium (or media)
C-----
C--- GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties
C-----
C--- GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields
C-----
C--- GROUP 12. Convection and diffusion adjustments
C-----
C--- GROUP 13. Boundary conditions and special sources
C
C          Index for Coefficient - CO
C          Index for Value      - VAL
13 CONTINUE
GO TO (130,131,132,133,134,135,136,137,138,139,1310,
1311,1312,1313,1314,1315,1316,1317,1318,1319,1320,1321),ISC
130 CONTINUE
C----- SECTION 1 ----- coefficient = GRND
capp Source term for sedimentation of C1: Vs/dy(Cy+1-2Cy+Cy-1)
Capp LG(1)=T implica diferencias centradas; F es hacia adelante
if(indvar.eq.c1) then
  gvs=rg(1)
else if(indvar.eq.c2) then
  gvs=rg(2)
else if(indvar.eq.c3) then
  gvs=rg(3)
else if(indvar.eq.c4) then
  gvs=rg(4)
else if(indvar.eq.c5) then
  gvs=rg(5)
else if(indvar.eq.c6) then
  gvs=rg(6)
endif
if(bfc) then
  call glizyx(69,izstep,gycoor,nydim,nxdim)
else
  call getyx(yg2d,gycoor,nydim,nxdim)
endif
if(LG(1)) THEN
do jx=1,nx
  do jy=1,ny
    gdy=gycoor(jy+1,jx)-gycoor(jy-1,jx)
  
```

### Apéndice 3. Ground del sedimentador tridimensional.

```

    if(jy.eq.1) gdy = gycoor(jy+1,jx) - gycoor(jy,jx)
    if(jy.eq.ny) gdy = gycoor(jy,jx) - gycoor(jy-1,jx)
    gsedim(jy,jx) = gvs/gdy
  end do
end do
ELSE
do jx = 1,nx
  do jy = 1,ny
    gdy = gycoor(jy+1,jx) - gycoor(jy,jx)
    if(jy.eq.ny) gdy = gycoor(jy,jx) - gycoor(jy-1,jx)
    gsedim(jy,jx) = gvs/gdy
  end do
end do
ENDIF
call setyx(co,gsedim,nydim,nxdim)
RETURN
131 CONTINUE ----- SECTION 2 ----- coefficient = GRND1
RETURN
132 CONTINUE ----- SECTION 3 ----- coefficient = GRND2
RETURN
133 CONTINUE ----- SECTION 4 ----- coefficient = GRND3
RETURN
134 CONTINUE ----- SECTION 5 ----- coefficient = GRND4
RETURN
135 CONTINUE ----- SECTION 6 ----- coefficient = GRND5
RETURN
136 CONTINUE ----- SECTION 7 ----- coefficient = GRND6
RETURN
137 CONTINUE ----- SECTION 8 ----- coefficient = GRND7
RETURN
138 CONTINUE ----- SECTION 9 ----- coefficient = GRND8
RETURN
139 CONTINUE ----- SECTION 10 ----- coefficient = GRND9
RETURN
1310 CONTINUE ----- SECTION 11 ----- coefficient = GRND10
RETURN
1311 CONTINUE ----- SECTION 12 ----- value = GRND
C-----
C.....
capp Source term for sedimentation of C1: Vs/dy(Cy+1-2Cy+Cy-1)
capp Source term for sedimentation replaced: Vs/dy(Cy+1-Cy)
if(indvar.eq.c1) then
  call gelyx(c1,gsedim,nydim,nxdim)
else if(indvar.eq.c2) then
  call gelyx(c2,gsedim,nydim,nxdim)
else if(indvar.eq.c3) then
  call gelyx(c3,gsedim,nydim,nxdim)
else if(indvar.eq.c4) then
  call gelyx(c4,gsedim,nydim,nxdim)

```

### Apéndice 3. Ground del sedimentador tridimensional.

```

else if(indvar.eq.c5) then
  call getyx(c5,gsedim,nydim,nxdim)
else if(indvar.eq.c6) then
  call getyx(c6,gsedim,nydim,nxdim)
endif
IF(LC(1)) THEN
do jx=1,nx
  do jy=1,ny
    gsedim(jy,jx)=gsedim(jy+1,jx)+gsedim(jy,jx)-gsedim(jy-1,jx)
    if (jy.eq.ny) gsedim(jy,jx)=0.
    if (jy.eq.1) gsedim(jy,jx)=gsedim(jy+1,jx)
  end do
end do
ELSE
do jx=1,nx
  do jy=1,ny
    gsedim(jy,jx)=gsedim(jy+1,jx)
    if (jy.eq.ny) gsedim(jy,jx)=0.
    if (jy.eq.1) gsedim(jy,jx)=gsedim(jy+1,jx)
  end do
end do
ENDIF
call setyx(val,gsedim,nydim,nxdim)
RETURN
1312 CONTINUE
C----- SECTION 13 ----- value = GRND1
if(iz.eq.nz) return
if (isweep.gt. 10) then
call getyx(c1,gcaa,nydim,nxdim)
ix=10pvar(pvstrs,IPNAME('ESFUERZO'),0)
do m=1,nx
  gxx=(ix+m)
  gua=(gxx/1000.0)**.5
  if (gua.lt. 2.0e-2) then
    goto 110
  else
    gsh= gua**.2/((2.651-1)*9.81+0.00062)
    gca=(0.331*(gsh-0.045)**1.75)/
    & (1+(0.331/0.46)*(gsh-0.045)**1.75)
    gcaa(1,m)=gca
  c write(6,*)'lau',gxx,'u*',gua,'gsh',gsh,'ca',gca
  end if
110 end do
else
do m=1,nx
  gcaa(1,m)=0.2
end do
end if
call setyx(val,gcaa,nydim,nxdim)
RETURN
1313 CONTINUE
C----- SECTION 14 ----- value = GRND2
call gtizyx(69,izstep,gycoor,nydim,nxdim)
do jy=1,ny
  do jx=1,nx
    gseval(jy,jx)=-4.64e-5*gycoor(jy,jx)+0.0002205
  end do
end do
call setyx(val,gseval,nydim,nxdim)

```

Apéndice 3. Ground del sedimentador tridimensional.

```

      RETURN
1314 CONTINUE
C----- SECTION 15 ----- value = GRND3
      RETURN
1315 CONTINUE
C----- SECTION 16 ----- value = GRND4
      RETURN
1316 CONTINUE
C----- SECTION 17 ----- value = GRND5
      RETURN
1317 CONTINUE
C----- SECTION 18 ----- value = GRND6
      RETURN
1318 CONTINUE
C----- SECTION 19 ----- value = GRND7
      RETURN
1319 CONTINUE
C----- SECTION 20 ----- value = GRND8
      RETURN
1320 CONTINUE
C----- SECTION 21 ----- value = GRND9
      RETURN
1321 CONTINUE
C----- SECTION 22 ----- value = GRND10
      RETURN
C.....
C--- GROUP 14. Downstream pressure for PARAB=.TRUE.
C.....
C--- GROUP 15. Termination of sweeps
C--- GROUP 16. Termination of iterations
C--- GROUP 17. Under-relaxation devices
C--- GROUP 18. Limits on variables or increments to them
C.....
C--- GROUP 19. Special calls to GROUND from EARTH
C
19 GO TO (191,192,193,194,195,196,197,198),ISC
191 CONTINUE
C *----- SECTION 1 ---- Start of time step.
      RETURN
192 CONTINUE
C *----- SECTION 2 ---- Start of sweep.
      RETURN
193 CONTINUE
C *----- SECTION 3 ---- Start of iz slab.
      RETURN
194 CONTINUE
C *----- SECTION 4 ---- Start of iteration.
      RETURN
195 CONTINUE
C *----- SECTION 5 ---- Finish of iteration.
      RETURN
196 CONTINUE
C *----- SECTION 6 ---- Finish of iz slab.
      RETURN
197 CONTINUE
C *----- SECTION 7 ---- Finish of sweep.
c... C7 es la suma de todas las fracciones Ci
      if((isweep.eq.isweep.or.enulfw) then
          call fn14(grsp1,c1,c2,c3,c4,c5,0.0,1.,1.,1.,1.)

```

Apéndice 3. Ground del sedimentador tridimensional.

```

call fn10(c7,grsp1,c6,0.0,1.,1.)
call fn2(c8,vist,0.0,1.0/rg(7))
endif
ii(isweep.eq.isweep-1) then
  call getsor('BFCENT',c1,gc1ent)
  call getsor('SALIDA01',c1,gc1sa)
c   call getsor('BFCENT',c2,gc2ent)
c   call getsor('SALIDA01',c2,gc2sa)
c   call getsor('BFCENT',c3,gc3ent)
c   call getsor('SALIDA01',c3,gc3sa)
c   call getsor('BFCENT',c4,gc4ent)
c   call getsor('SALIDA01',c4,gc4sa)
c   call getsor('BFCENT',c5,gc5ent)
c   call getsor('SALIDA01',c5,gc5sa)
c   call getsor('BFCENT',c6,gc6ent)
c   call getsor('SALIDA01',c6,gc6sa)
  gefic1=(gc1ent+gc1sa)/gc1ent
  write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C1 es',gefic1
  endif
c   gefic2=(gc2ent+gc2sa)/gc2ent
c   write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C2 es',gefic2
c   gefic3=(gc3ent+gc3sa)/gc3ent
c   write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C3 es',gefic3
c   gefic4=(gc4ent+gc4sa)/gc4ent
c   write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C4 es',gefic4
c   gefic5=(gc5ent+gc5sa)/gc5ent
c   write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C5 es',gefic5
c   gefic6=(gc6ent+gc6sa)/gc6ent
c   write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C6 es',gefic6
RETURN
19B CONTINUE
C * ----- SECTION 8 ---- Finish of time step.
C
C.....
C--- GROUP 20. Preliminary print-out
C.....
C--- GROUP 21. Print-out of variables
C--- GROUP 22. Spot-value print-out
C.....
C--- GROUP 23. Field print-out and plot control
C.....
C--- GROUP 24. Dumps for restarts
C.....

```

#### Apéndice 4. Ground del sedimentador bidimensional

A CONTINUACIÓN SE PRESENTA EL ÚNICO GRUPO QUE DIFIERE DEL GROUND DEL SEDIMENTADOR TRIDIMENSIONAL. LOS DEMÁS GRUPOS SON IGUALES.

```

C--- GROUP 19. Special calls to GROUND from EARTH
C
  19 GO TO (191,192,193,194,195,196,197,198),JSC
  191 CONTINUE
C * ----- SECTION 1 ---- Start of time step.
  RETURN
  192 CONTINUE
C * ----- SECTION 2 ---- Start of sweep.
  RETURN
  193 CONTINUE
C * ----- SECTION 3 ---- Start of iz slab.
  RETURN
  194 CONTINUE
C * ----- SECTION 4 ---- Start of iteration.
  RETURN
  195 CONTINUE
C * ----- SECTION 5 ---- Finish of iteration.
  RETURN
  196 CONTINUE
C * ----- SECTION 6 ---- Finish of iz slab.
  197 CONTINUE
C * ----- SECTION 7 ---- Finish of sweep.
  C7 es la suma de todas las fracciones Ci
  if(isweep.eq.isweep.or.enusfw) then
    call fn14(grsp1,c1,c2,c3,c4,c5,0.0,1.,1.,1.,1.)
    call fn10(c7,grsp1,c6,0.0,1.,1.)
    call fn2(c8,vist,0.0,1.0/rq{7})
  endif
  if(isweep.eq.isweep-1) then
    call getsor('BFCENT',c1,gc1ent)
    call getsor('SALIDA01',c1,gc1sal)
    call getsor('BFCENT',c2,gc2ent)
    call getsor('SALIDA01',c2,gc2sal)
    call getsor('BFCENT',c3,gc3ent)
    call getsor('SALIDA01',c3,gc3sal)
    call getsor('BFCENT',c4,gc4ent)
    call getsor('SALIDA01',c4,gc4sal)
    call getsor('BFCENT',c5,gc5ent)
    call getsor('SALIDA01',c5,gc5sal)
    call getsor('BFCENT',c6,gc6ent)
    call getsor('SALIDA01',c6,gc6sal)
    gfc1=(gc1ent+gc1sal)/gc1ent
    write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C1 es',gfc1
  endif
  gfc2=(gc2ent+gc2sal)/gc2ent
  write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C2 es',gfc2
  gfc3=(gc3ent+gc3sal)/gc3ent
  write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C3 es',gfc3
  gfc4=(gc4ent+gc4sal)/gc4ent
  write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C4 es',gfc4
  gfc5=(gc5ent+gc5sal)/gc5ent
  write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C5 es',gfc5
  gfc6=(gc6ent+gc6sal)/gc6ent
  write(14,*) 'Eficiencia de remocion de C6 es',gfc6
  RETURN

```