



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA

**“DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA
VELOCIDAD DE CAÍDA DE SEDIMENTOS
COHESIVOS EN SUSPENSIÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A:

JAVIER MORENO GUEVARA



DIRECTOR DE TESIS: DR. JUAN ANTONIO GARCÍA ARAGÓN

TOLUCA, MÉXICO, 2013.



**C. JAVIER MORENO GUEVERA
PASANTE DE INGENIERÍA CIVIL
P R E S E N T E**

En respuesta a su solicitud, a continuación transcribo el tema aprobado por esta Dirección, que propuso el **DR. JUAN ANTONIO GARCÍA ARAGÓN**, con el fin de que lo desarrolle en la modalidad de **TESIS**, le informo que se autoriza la **impresión de su trabajo** para presentar su Evaluación Profesional.

**“DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE CAÍDA DE SEDIMENTOS
COHESIVOS EN SUSPENSIÓN”**

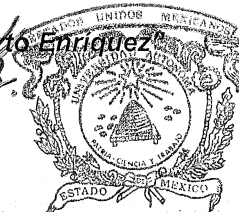
	ÍNDICE
CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO 2	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 3	TÉCNICAS ÓPTICAS
CAPÍTULO 4	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 5	RESULTADOS
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted tomar nota de que, en cumplimiento a lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito indispensable para sustentar su Evaluación Profesional.

Asimismo, para la elaboración de la **TESIS** y demás trámites, deberá sujetarse a la reglamentación respectiva de esta Universidad.

**A T E N T A M E N T E
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO**

“2013, 50 Aniversario Luctuoso del Poeta Heriberto Enriquez”



DR. DAVID DE LEÓN ESCOBEDO
DIRECTOR

**FACULTAD DE INGENIERIA
U.A.E.M.**

DLE/agk©

A MI MADRE

A MI PADRE

A MI HERMANO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis Padres, quienes me han brindado apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida y mi carrera profesional, sin sus consejos, enseñanzas y su amor, nada de esto hubiera sido posible. Las palabras no bastan.

Al Dr. Juan Antonio García Aragón por su paciencia, apoyo y por la confianza que depositó en mí para la realización de este trabajo.

Al Dr. Humberto Salinas Tapia por su ayuda en gran parte de este trabajo ya que sin sus conocimientos, disposición y tiempo no hubiera sido posible la culminación del mismo.

Al M. Victor Javier Díaz Palomares por sus consejos y palabras de aliento a lo largo de este proceso.

A mis compañeros Leonarda María Flores Gutiérrez y Boris Miguel López Rebollar por su amistad y apoyo.

Y a todos lo que directa o indirectamente hicieron posible este trabajo.

Gracias.

RESUMEN

Los sistemas de recirculación para acuicultura presentan el problema de la remoción de sólidos en suspensión. Estos sólidos presentan un comportamiento cohesivo, forman flóculos o agregados que tienen características de sedimentación muy diferentes a las partículas no-cohesivas. En la literatura científica no existen modelos apropiados de su comportamiento hidrodinámico. La dificultad reside en que un flóculo puede ser considerado un micro-ecosistema con funciones o comportamientos autónomos e interactivos de tipo físico, químico y biológico. Una de las mayores dificultades es definir de manera apropiada la densidad de los agregados. Existen varias expresiones matemáticas que se adaptan a determinado tipo de sedimento. En esta investigación se utilizó una expresión apropiada para los agregados provenientes de comida para peces. Por medio de un balance entre las fuerzas gravitacionales que hacen sedimentar el flóculo y la fuerza de arrastre del fluido se logró desarrollar una expresión matemática para la velocidad de caída de los flóculos en la cual los parámetros b , y c de la expresión para la densidad fueron calibrados experimentalmente. Para el efecto se realizaron experimentos en un modelo reducido de un tanque de recirculación, circular y con paredes de plexiglás, utilizando técnicas ópticas. La técnica privilegiada fue la velocimetría por rastreo de partículas (PTV). La Velocimetría por Rastreo de partículas (PTV), es una técnica ideal para determinar la velocidad de partículas dispersas en un sistema bifásico, por ejemplo la determinación de velocidad de las gotas de agua de un jet (spray), burbujas de aire en un flujo de agua, partículas sólidas en un tanque de mezclado, entre muchos otros procesos prácticos. El modelo teórico de velocidad de caída para flóculos desarrollado en esta investigación presenta un buen ajuste con los resultados experimentales obtenidos con PTV.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE SÍMBOLOS	xi

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación y alcances	1
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Sedimentos	5
2.1.1 Clasificación de los sedimentos	6
2.1.2 Sedimentos no cohesivos	6
2.1.3 Sedimentos cohesivos	6
2.2 Velocidad de caída de sedimentos no cohesivos	8
2.2.1 Ecuación de Stokes	8
2.2.2 Ecuación de Hallermaier	10
2.2.3 Ecuación de Salinas y García	11
2.3 Velocidades de caída de sedimentos cohesivos	13
2.3.1 Características de los flóculos	13
2.3.1.1 Densidad	14

2.3.1.1.1	Determinación experimental de la densidad de un flóculo	16
2.3.1.2	Porosidad	17
2.3.1.3	Tamaño y forma de los flóculos	17
2.3.2	Fórmula para determinar la velocidad de caída.....	18

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS ÓPTICAS

3.1	Técnicas ópticas en 2D	19
3.2	PIV: Velocimetría por imágenes de partículas	21
3.3	PTV: Velocimetría por rastreo de partículas	23

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4.1	Sistema experimental.....	26
4.2	Tanque de recirculación	27
4.2.1	Campos de velocidad en 2D y perfiles de velocidad en el tanque de recirculación	32
4.3	Equipo de velocimetría	35
4.4	Calibración del sistema	36
4.4.1	Calibración del caudal.....	36
4.4.2	Calibración de los sistemas PIV y PTV	37
4.5	Selección de las partículas sedimentarias	40
4.5.1	Determinación de la densidad de las partículas sedimentarias.....	41
4.6	Diseño experimental	42
4.7	Desarrollo experimental para velocidad de caída	44
4.8	Adquisición de imágenes	44
4.9	Procesamiento de imágenes	47
4.10	Desarrollo experimental para las pruebas de sedimentación	52

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1	Ajustes para sedimentos Clase A	57
5.2	Ajustes para sedimentos Clase B	62
5.3	Ajustes para sedimentos Clase C	69
5.4	Concentraciones para pruebas de sedimentación	81

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
--------------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA	87
--------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imágenes obtenidas durante la experimentación	18
Figura 2. Sistema PIV (Salinas 2007).....	21
Figura 3. Fases de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (Salinas 2007). 23	
Figura 4. Diferencia de imágenes de PTV y PIV (Salinas 2007)	25
Figura 5. Esquema del tanque con recirculación de flujo (Flores y López 2012)	28
Figura 6. Configuración “A” utilizada	29
Figura 7. Configuración para la dirección de difusores (Flores y López 2012).....	30
Figura 8. Ubicación de difusores y área de análisis (Flores y López 2012)	30
Figura 9. Configuración de salida de agua tipo rejilla (Modificada Flores y López 2012)31	
Figura 10. Campos de velocidad para la configuración A	33
Figura 11. Perfiles de velocidad para la configuración A.	34
Figura 12. Accesorios de velocimetría instalados	36
Figura 13. Alturas de análisis.	39
Figura 14. Arreglo del sistema de captura de imágenes	43
Figura 15. Componentes y procedimiento del sistema de captura de imágenes (Modificado de Salinas 2007).	45
Figura 16 Secuencia de adquisición de dos imágenes. a) Monopulsada para PIV b) Doble pulsada para PTV (Modificado de Salinas 2007).	46
Figura 17. Imagen doble pulsada (Flores y López 2012).....	48
Figura 18. Pares de partículas (Flores y López 2012)	48
Figura 19. Interfaz del programa para procesamiento de imágenes de PTV	52
Figura 20. Conos Imhoff	53
Figura 21. Dispositivo para toma de muestras	54
Figura 22. Muestras tomadas para pruebas de sedimentación	55
Figura 23. Partículas sedimentadas.....	55
Figura 24. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 0 min	57
Figura 25. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 10 min	58
Figura 26. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 15 min	58

Figura 27. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 19 min	59
Figura 28. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 20 min	59
Figura 29. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 25 min	60
Figura 30. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 30 min	60
Figura 31. Histogramas de frecuencias de la Clase A de t = 0 min a t = 19 min	61
Figura 32. Histogramas de frecuencias de la Clase A de t = 20 min a t = 30 min	61
Figura 33. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 0 min	63
Figura 34. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 5 min	63
Figura 35. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 10 min	64
Figura 36. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 15 min.....	64
Figura 37. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 20 min	65
Figura 38. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 25 min	65
Figura 39. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 30 min	66
Figura 40. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 35 min	66
Figura 41. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 40 min	67
Figura 42. Histogramas de frecuencia para la Clase C de t = 0 min a t = 15 min	67
Figura 43. Histogramas de frecuencia para la Clase C de t = 20 min a t = 25 min	68
Figura 44. Histogramas de frecuencia para la Clase C de t = 40 min.....	68
Figura 45. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 0 min	70
Figura 46. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 5 min.....	70
Figura 47. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 10 min	71
Figura 48. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 15 min.....	71
Figura 49. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 20 min	72
Figura 50. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 25 min.....	73
Figura 51. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 30 min	73
Figura 52. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 35 min	74
Figura 53. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 40 min	74
Figura 54. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 45 min	75
Figura 55. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 50 min	75
Figura 56. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 55 min.....	76
Figura 57. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 60 min	76

Figura 58. Histogramas de frecuencia para la Clase C de $t = 0$ min a $t = 15$ min	77
Figura 59. Histogramas de frecuencia para la Clase C de $t = 20$ min a $t = 35$ min	77
Figura 60. Histogramas de frecuencia para la Clase C de $t = 40$ min a $t = 55$ min	78
Figura 61. Histogramas de frecuencia para la Clase C de $t = 60$ min	78
Figura 62. Velocidades de caída medias (cm/s)	80
Figura 63. Concentraciones para sedimentos Clase A.....	82
Figura 64. Concentraciones para sedimentos Clase B	83
Figura 65. Concentraciones para sedimentos Clase C	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de los parámetros de la ecuación para determinar R_p	13
Tabla 2. Datos de la configuración utilizada (Flores y López 2012)	29
Tabla 3. Regiones de análisis en el tanque de recirculación	38
Tabla 4. Tamices empleados en el cribado	40
Tabla 5. Clases de sedimentos por diámetro	41
Tabla 6. Densidades para las distintas clases de sedimentos	42
Tabla 7. Número de imágenes capturadas	47
Tabla 8. Grupos de análisis	56
Tabla 9. Comparación de velocidades de caída medias (cm/s)	79
Tabla 10. Concentraciones para sedimentos Clase A	82
Tabla 11. Concentraciones para sedimentos Clase B	83
Tabla 12. Concentraciones para sedimentos Clase B	84

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

a, b	Coefficientes experimentales para la determinación de la velocidad de caída
A_s	Peso de la muestra para densidad
C	Concentración de sedimento
C_D	Coefficiente de arrastre
D	Diámetro de la partícula o del flóculo
D_f	Diámetro equivalente
D_{gr}	Diámetro adimensional de Yalin
g	Constante gravitacional
F	Dimensión fractal
F_d	Fuerza de flotación
K	Peso del agua + peso de arena + peso del frasco
k₁ k₂ k₃ k₄	Constantes para la determinación de la velocidad de caída
M_f	Masa del flóculo
M_p	Masa de la partícula primaria
M_w	Masa del agua
R_f	Número de Reynolds del fluido
R_p	Número de Reynolds de la partícula
V_f	Volumen del flóculo
V_{fr}	Volumen del frasco
V_m	Volumen de muestra
V_s	Volumen del sedimento en el cono Imhoff
V_p	Volumen de la partícula primaria
W	Peso sumergido
w_s	Velocidad de caída de sólidos
w_f	Peso del frasco
θ	Porosidad del flóculo
μ	Viscosidad dinámica del agua
ν	Viscosidad cinemática del agua
ρ_s	Densidad del sedimento seco

ρ_f	Densidad de la partícula o del flóculo
ρ_p	Densidad de la partícula primaria
ρ_w	Densidad del agua

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación y alcances

El comportamiento de los sedimentos cohesivos en los ecosistemas acuáticos ha sido objeto de muchos estudios (Ongley et al. 1992, Phillips and Walling 1999, Krishnappan 2000, Droppo. and Ongley 2000, Droppo 2001). Sin embargo no existen modelos apropiados de su comportamiento hidrodinámico. La dificultad reside en que un flóculo puede ser considerado un micro-ecosistema con funciones o comportamientos autónomos e interactivos de tipo físico, químico y biológico (Droppo 2005). Es decir no existen entidades físicas estáticas transportadas en la columna de agua, en cambio los flóculos son partículas dinámicas con una componente cambiante en sus comportamientos físicos, químicos y biológicos producto de su interacción con la columna de agua. El proceso de floculación (agregación de partículas) se ha modelado siguiendo tres enfoques; el primero asume que la coagulación Browniana se espera para partículas finas en líquidos con poco movimiento, el segundo asume que la coagulación por corte se espera en partículas de tamaño mediano con líquidos en movimiento y el tercero asume que la coagulación por sedimentación diferencial se espera para partículas muy grandes.

En el proceso de floculación el tamaño efectivo de la partícula se incrementa por varios órdenes de magnitud con respecto a las partículas individuales y por supuesto son variables la forma del flóculo, su porosidad y composición particular. Por lo tanto la velocidad de caída del flóculo y su transporte dependen de esas variables además de las características del flujo, especialmente la turbulencia. Las partículas individuales pueden sedimentar con un flóculo de tamaño, porosidad y forma particular o seguir en suspensión. Las consecuencias ambientales dependen por lo tanto de la interacción de una serie de variables y los modelos matemáticos

existentes para flujo bifásico no son capaces de representar adecuadamente el comportamiento del flóculo.

En los modelos simples que incorporan la floculación, se obtiene la velocidad de sedimentación de las partículas de forma singular o en forma de flóculos (Krank y Milligan, 1992; Lavelle, 1993). Diversos estudios se han llevado a cabo, para la determinación de la velocidad de sedimentación, encontrando que la densidad efectiva de los flóculos decrece cuando se incrementa el tamaño del flóculo (Dyer et al., 1996, Droppo 2005, Droppo et al. 2000).

Varios autores han tratado de verificar la hipótesis de que la velocidad de sedimentación de los flóculos es controlada por la turbulencia (Jackson, 1995; Ruiz y Izquierdo, 1997). Krank y Milligan (1992) y Eisma et al. (1996) han efectuado observaciones de reducción del tamaño del flóculo asociado con la turbulencia. Un trabajo desarrollado recientemente por García-Aragón et al. (2011b) demuestra que la densidad de los flóculos es dependiente de la tasa de corte y por tanto comprueba la hipótesis señalada.

Para este proyecto se utilizó un tanque circular que reproduce las condiciones de un tanque para acuicultura. Presenta un flujo circular con entradas de agua a diferentes alturas de la columna de agua, el flujo es suministrado por un tanque elevado de nivel constante para permitir un caudal estacionario. En el centro del tanque se tiene un sedimentador que permite evacuar los sólidos. Se utilizarán sedimentos cohesivos provenientes de alimentos normales para peces. Se pretende utilizar en este proyecto varias técnicas de medición para determinar las velocidades de caída de los sedimentos. Los métodos de análisis más apropiados para este caso son los ópticos. Estas técnicas son de carácter no intrusivo (entre las más importantes están la Velocimetría por imágenes de partículas (PIV) y la Velocimetría por rastreo de partículas (PTV) las cuales permiten determinar las velocidades de caída de los flóculos sin perturbar el flujo. Con los datos experimentales se podrá calibrar modelos teóricos para la velocidad de caída de los flóculos.

1.2 Hipótesis

A partir de mediciones de velocidades de caída de agregados, provenientes de alimento para peces, en un modelo físico que represente un tanque de recirculación para acuicultura, y utilizando la relación entre el tamaño de un agregado y su densidad, se puede calibrar un modelo para determinar la velocidad de caída de éstos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Proponer un modelo para determinar la velocidad de caída de sedimentos cohesivos provenientes de comida para peces, que toma en cuenta la variación de la densidad de estos con el tamaño del agregado y el efecto de la turbulencia generado por un flujo circular propio de los tanques de recirculación para acuicultura.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir la distribución adecuada de los difusores en el modelo físico para producir una hidrodinámica apropiada para sedimentación de agregados (flóculos).
- Instrumentar adecuadamente el montaje experimental para permitir la captura de imágenes de los flóculos, para medir velocidades de caída con la técnica PTV.
- Seleccionar en la literatura científica un modelo que relacione la densidad de los flóculos con el tamaño de los mismos.
- Desarrollar un modelo teórico para la determinación de la velocidad de caída de los flóculos que utilice la relación seleccionada para su densidad.

- Calibrar el modelo teórico con los datos experimentales de velocidad de caída.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Sedimentos

Se consideran como sedimentos a las partículas desprendidas de rocas y suelos y que son transportadas por las corrientes de agua así como por los vientos. Estas partículas después de ser transportadas, son depositadas finalmente a lo largo de los cauces de los ríos, en lagos o lagunas, en el mar y en las partes bajas de las cuencas.

Es difícil precisar las fuentes que generan los sedimentos que están presentes en el lecho de los ríos; sin embargo, de acuerdo con la definición previa una de las fuentes principales la conforman los suelos y rocas que se encuentran en su cuenca, el agua y el viento son las principales fuentes de erosión y transporte. Por otra parte, debido al quehacer del ser humano en el medio en el que se desenvuelve, las fuentes de sedimento pueden clasificarse en dos grupos: naturales y artificiales.

Algunos de las fuentes naturales de generación de sedimento son la erosión de la superficie del terreno, erosión del cauce principal del río y sus cauces tributarios, los movimientos naturales del terreno entre otros.

Por otro lado, las fuentes artificiales de sedimentos las constituyen la destrucción de la vegetación, la explotación de minas y canteras, los desechos urbanos e industriales y por supuesto las obras de ingeniería. Para los sedimentos provenientes de las obras de ingeniería es conveniente hacer una distinción de estos, debido a que su tratamiento es distinto para cada uno de ellos. En primer lugar se encuentran los sedimentos que se originan en la superficie de la cuenca, seguido de éstos se encuentran los sedimentos que provienen del fondo y de las

orillas de los ríos y finalmente los sedimentos que provienen de los desechos urbanos e industriales.

2.1.1 Clasificación de los sedimentos

Los sedimentos de origen natural, por su condición, están compuestos por una gran diversidad de partículas las cuales difieren entre sí en tamaño, forma y densidad. Se pueden diferenciar dos clases de sedimentos debido a la resistencia que presentan a ser arrastrados así como su comportamiento ante el efecto de ser transportados por una corriente de agua. Es así, que se tienen principalmente dos clases de sedimentos: cohesivos y no cohesivos.

2.1.2 Sedimentos no cohesivos

También son denominados materiales granulares y son los que están formados por granos finos o gruesos de partículas sueltas tales como las arenas y gravas. En este tipo de sedimentos predomina fuertemente la fuerza de gravedad sobre cualquier otra fuerza, por esta razón todas las partículas no-cohesivas tienen un comportamiento muy similar. Las fuerzas de arrastre y sustentación son resistidas principalmente por el peso propio de las partículas.

2.1.3 Sedimentos cohesivos

Este tipo de sedimento está formado principalmente por partículas de grano muy fino, constituidas por minerales de arcilla, así como minerales inorgánicos y materia orgánica. Los minerales inorgánicos están formados por minerales de arcilla (por ejemplo, sílice, alúmina, montmorillonita, illita, caolinita) y no minerales de arcilla (por ejemplo, cuarzo, carbonatos, feldespato y mica, entre otros). Los materiales orgánicos pueden existir como residuos vegetales, animales y bacterias (Sepúlveda 2004).

Estas partículas se mantienen unidas por la fuerza de cohesión, la cual se opone a que las partículas individuales sean separadas o arrancadas de conjunto. Esta fuerza es mucho mayor

que el peso de cada grupo de partículas, y es la que resiste las fuerzas de arrastre y sustentación originadas por el flujo del agua.

Los sedimentos cohesivos se caracterizan principalmente por la gran fuerza intermolecular entre sus partículas debido a su carga iónica; y a medida que disminuye el tamaño de la partícula, su superficie por unidad de volumen aumenta y las fuerzas entre las partículas son las que dominan el comportamiento del sedimento.

Por lo tanto, una vez que la cohesión ha sido vencida pueden llegar a comportarse como no cohesivos, aunque éstos serán suspendidos con mayor facilidad, ya que debido a su tamaño, su peso prácticamente no influye en sus movimientos y cuando el movimiento del flujo es reducido, muchas de ellas, tales como los coloides no se depositan a menos que exista la presencia de elementos que faciliten la floculación.

En la rama de la acuicultura los principales sedimentos presentes en los tanques son de origen orgánico. Son comúnmente definidos como biosólidos y están compuestos por heces y alimento no ingerido por los peces (Masaló 2008).

La naturaleza física y química de estos sedimentos los lleva a desarrollar una gran superficie de contacto por unidad de masa, tener una alta capacidad de retención así como poder agregarse y desagregarse entre ellos mediante el proceso de floculación. Este proceso además de depender de las características fisicoquímicas del sedimento, depende del agua en la que estén suspendidos así como también de distintos mecanismos físicos del flujo tales como la turbulencia y la tasa de corte presente en los tanques de sedimentación.

2.2 Velocidad de caída de sedimentos no cohesivos

Uno de los parámetros más importantes en el transporte de sedimentos es la velocidad de caída. Se han realizado diversas investigaciones su cálculo, se conocen dos enfoques para determinar este parámetro: a) uno es el enfoque teórico principalmente basado en la ecuación de Stokes para partículas esféricas y Reynolds de la partícula menor a la unidad, b) el otro es basado en fórmulas empíricas producto de resultados experimentales (Salinas y García, 2011).

La velocidad de caída de partículas de sedimentos naturales (w_s), en tanques de sedimentación (fluidos sin movimiento), ha sido estudiada basándose en el trabajo de Stokes (1851) para partículas esféricas principalmente (Stokes, 1851; Rubey, 1933; Hallermeier, 1981; Dietrich, 1982; Ahrens 2000; She et al., 2005). Para el caso de fluidos en movimiento, y con partículas no esféricas, la velocidad de caída se ha venido relacionando con fórmulas obtenidas de experimentos con fluidos en reposo. Recientemente (Salinas y García 2011) han propuesto una fórmula empírica que tiene en cuenta el efecto del movimiento del fluido.

2.2.1 Ecuación de Stokes

La ecuación de Stokes permite determinar la velocidad de caída de partículas esféricas con número de Reynolds menor a uno en un fluido en reposo. La velocidad de caída puede ser calculada por el balance entre el peso sumergido de la partícula y la fuerza de resistencia (fuerza de arrastre) provocada por el fluido (Salinas y García, 2011).

La fuerza de arrastre se expresa de la siguiente manera:

$$F_D = C_D \rho_w \pi \frac{D^2}{4} \frac{w_s^2}{2} \quad (1)$$

Donde C_D es el cociente de arrastre, ρ_w la densidad del agua, $\pi \frac{D^2}{4}$ es el área proyectada de la partícula en dirección de la caída, w_s la velocidad de caída.

El peso sumergido (W) que representa el balance de las fuerzas de gravedad y flotación de una partícula de sedimento esférico:

$$W = \frac{1}{6} D^3 \pi (\rho_s - \rho_w) g \quad (2)$$

Donde D , es el diámetro equivalente de la partícula, ρ_s y ρ_w son las densidades del sedimento, del agua y g es la aceleración de la gravedad,

El balance de fuerzas ($W = F_d$) de una esfera de diámetro D sedimentando con velocidad w_s

$$w_s^2 = \frac{4(\rho_s - \rho_w) g D}{3 C_D \rho_w} \quad (3)$$

Donde C_d es el coeficiente de arrastre. Para $Re < 1$ $C_d = 24/Re$ y $Re = \rho_w w_s D / \mu$ donde μ es la viscosidad del agua. Al utilizar la ecuación (3) y reemplazar C_d se obtiene la ecuación de Stokes:

$$w_s = \frac{(\rho_s - \rho_w) g D^2}{18 \mu} \quad (4)$$

Para fines de cálculo, el diámetro de la partícula se expresa de forma adimensional, definido como parámetro de Yalin (D_{gr}).

$$D_{gr} = D \sqrt[3]{\frac{g(s-1)}{\nu^2}} \quad (5)$$

Donde s es la densidad relativa $\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right)$; ν es la viscosidad cinemática del fluido.

La ecuación de Stokes se puede escribir en función del D_{gr} como:

$$R_p = \frac{D_{gr}^3}{18} \quad (6)$$

Donde se define como:

$$R_p = \frac{w_s D}{\nu} \quad (7)$$

2.2.2 Ecuación de Hallermeier

Con el avance de las técnicas experimentales actualmente la velocidad de caída de las partículas naturales se determina de esta manera y con los datos resultantes se desarrollan relaciones empíricas. La mayoría de estas relaciones determinan la velocidad de caída considerando partículas esféricas pero para el caso de los sedimentos naturales estos poseen una forma no-esférica e irregular (Salinas, 2007).

La determinación de la velocidad de caída considerando partículas esféricas difiere con la de sedimentos naturales, derivado de su forma y tamaño irregular. Debido a estas diferencias, varias fórmulas han sido propuestas para calcular la velocidad de caída de sedimentos naturales (Rubey, 1933; Graf, 1971; Hallermeier, 1981; Dietrich, 1982; Van Rijn, 1984a; Cheng, 1997; Jiménez y Madzen; 2003; She et al., 2005, Salinas y García, 2011).

Hallermeier (1981) establece tres ecuaciones que describen la relación entre la velocidad de caída y el parámetro de Yalin (D_{gr}), cada ecuación es válida para un cierto rango del parámetro adimensional D_{gr} , esto es:

$$R_p = \frac{D_{gr}^3}{18} \quad (D_{gr} \leq 3.42) \quad (8)$$

$$R_p = \frac{D_{gr}^{2.1}}{6} \quad (3.42 < D_{gr} \leq 21.54) \quad (9)$$

$$R_p = 1.05 D_{gr}^{1.5} \quad (D_{gr} \geq 21.54) \quad (10)$$

Si despejamos de la ecuación (5) a D, tenemos lo siguiente:

$$D = \frac{D_{gr}}{\sqrt[3]{\frac{g(s-1)}{v^2}}} \quad (11)$$

Si se sustituyen las ecuaciones de Hallermeier en la ecuación 7, se tienen las siguientes expresiones de velocidades de caída (Salinas 2007):

$$w_s = \sqrt[3]{g v (s-1)} \frac{D_{gr}^2}{18} \quad (D_{gr} \leq 3.42) \quad (12)$$

$$w_s = \sqrt[3]{g v (s-1)} \frac{D_{gr}^{1.1}}{6} \quad (3.42 < D_{gr} \leq 21.5) \quad (13)$$

$$w_s = \sqrt[3]{g v (s-1)} D_{gr}^{0.5} \quad (D_{gr} \geq 21.54) \quad (14)$$

2.2.3 Ecuación de Salinas y García

Para calcular la velocidad de sedimentación utilizando fórmulas empíricas, se han llevado a cabo diversos experimentos (Ahrens, 2000; Dietrich, 1982; Hartman et al., 1994; Rubey, 1933; Jiménez y Mazden, 2003; She et al., 2005; Camenen, 2007; Salinas y García 2011).

Esta ecuación a diferencia de la presentada en la literatura es la única que considera el efecto del movimiento del fluido sobre la velocidad de caída de la partícula, relacionando la velocidad del fluido (u) y la velocidad de sedimentación de la partícula w_s .

Considerando el movimiento del fluido Salinas y García (2011) obtuvieron una relación, en función de diferentes parámetros, del número de Reynolds de la partícula con el D_{gr} . En esta se tiene en cuenta el efecto de un flujo transversal en la velocidad de caída de la siguiente manera:

$$R_p = k_3 D_{gr}^{k_1} \quad (15)$$

Donde k_1 es un parámetro que depende sólo del Reynolds del fluido $R_f = Uh/\nu$ (en los modelos para tanque sin movimiento, este parámetro es nulo), donde U es la velocidad media del fluido; h es el tirante y k_3 es un parámetro que depende de R_f y de D_{gr}

Para determinar el parámetro k_3 se usa la expresión:

$$k_3 = \left(e^{\left(\frac{1}{R_f}\right)^{k_2}} - 1 \right) \quad (16)$$

Sustituyendo el valor de k_3 en la ecuación (15), se tiene que el valor de R_p de la partícula es:

$$R_p = \left(e^{\left(\frac{1}{R_f}\right)^{k_2}} - 1 \right) D_{gr}^{k_1} \quad (17)$$

Despejando la velocidad de caída del Reynolds de la partícula, ecuación (7), sustituyendo y simplificando se tiene la ecuación de Salinas y García (2011) para la velocidad de caída:

$$w_s = \sqrt[3]{g(s-1)\nu} \left(e^{\left(\frac{1}{R_f}\right)^{k_2}} - 1 \right) D_{gr}^{(k_1-1)} \quad (18)$$

En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros k_1 y k_2 de la ecuación obtenida; parámetros obtenidos de forma experimental.

Tabla 1. Valores de los parámetros de la ecuación para determinar R_p

	$1.86 \leq D_{gr} \leq 10.5$		$D_{gr} \geq 10.5$
	$R_f \leq 4200$	$R_f \geq 10\ 000$	$R_f \geq 10\ 000$
k_1	2.4	2.4	1.65
k_2	0.295	0.26	0.102

2.3 Velocidad de caída de sedimento cohesivos

2.3.1 Características de los flóculos

Los flóculos o agregados de partículas cohesivas son considerados microsistemas con funciones o comportamientos autónomos interactivos, son partículas dinámicas con una componente cambiante en sus comportamientos físicos, químicos y biológicos, producto de su interacción el agua (Droppo et al., 2000; Droppo, 2001). Los procesos de floculación se han modelado siguiendo tres enfoques (Milligan y Hill, 1988):

- a) Coagulación Browniana, para líquidos con poco movimiento.
- b) Coagulación por corte, se lleva a cabo en partículas de tamaño mediano con líquidos en movimiento.
- c) Coagulación por sedimentación diferencial (se presenta en partículas grandes).

Las principales variables físicas que se consideran en un flóculo son: su densidad; su porosidad; forma; tamaño y composición teniendo en cuenta las partículas que la componen (partículas primarias), por lo que la velocidad de caída y transporte dependen de estas variables y también de las características del flujo, principalmente de la turbulencia.

2.3.1.1 Densidad

Se ha demostrado que los flóculos no son partículas esféricas, si no que tienen formas irregulares y es común que se representen como objetos fractales.

La densidad efectiva de un flóculo formado por partículas de diferentes tamaños puede ser expresada como:

$$\rho_f = \rho_p \frac{\sum_{i=1}^k d_i^3}{D_f^3} \quad (19)$$

Donde d_i representa el diámetro de la partícula primaria y D_f es el diámetro equivalente de una esfera compuesta por k partículas primarias, ρ_p densidad de las partículas primarias (Khelifa *et al.*, 2006).

Sin embargo la obtención de la densidad efectiva ha sido ampliamente estudiada (Winterwerp, 1998; Lau y Krishnappan, 1997; Kranenburg, 1994; Mc Cave, 1984; Hawley 1982 y Tambo y Watanabe, 1979).

Tambo y Watanabe (1979) proponen el cálculo de la densidad efectiva como:

$$\rho_f - \rho_w = 0.0013 \left(\frac{D}{d}\right)^{-0.9} \quad (20)$$

Hawley (1982) calcula la densidad efectiva como:

$$\rho_f - \rho_w = (\rho_p - \rho_w) \left(\frac{D}{d}\right)^{-0.9} \quad (24)$$

MacCave (1984) obtuvo expresiones para calcular la densidad efectiva en función del tamaño de los agregados esto es:

$$\rho_f - \rho_w = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{Para } D \leq 1 \mu m \\ \alpha D^{-0.42} & \text{Para } 1 \leq D \leq 50 \mu m \\ \alpha D^{-1.3} & \text{Para } 50 \leq D \leq 1200 \mu m \\ 0.003 & \text{Para } D \geq 1200 \mu m \end{array} \right\} \quad (21)$$

Lau y Krishnappan (1997) proponen el cálculo de la densidad efectiva mediante la siguiente expresión:

$$\rho_f - \rho_w = (\rho_p - \rho_w) \exp(-bD)^c \quad (22)$$

Donde ρ_f es la densidad del flóculo, ρ_p la densidad de las partículas primarias, ρ_w la densidad del agua, D es el diámetro del flóculo, b y c son constantes que dependen del tipo de sedimento y de la tasa de corte.

Para el caso de flóculos conformados por partículas primarias esféricas de idéntico diámetro d , Kranenburg (1994) propone la siguiente ecuación para la densidad de los flóculos.

$$\rho_f - \rho_w = (\rho_p - \rho_w) \left(\frac{D}{d} \right)^{F-3} \quad (23)$$

Donde ρ_f , es la densidad del flóculo; ρ_p , densidad de las partículas primarias y F es la dimensión fractal.

En esta expresión Kranenburg introduce el concepto de dimensión fractal. Esta dimensión es una medida de la compacidad del flóculo. Entre más denso sea un flóculo, F se acerca a 3 y en la medida en que su densidad sea menor baja de 1, este concepto considera la estructura de un flóculo como una agregación de partículas primarias de un mismo diámetro d que forman un agregado equivalente a una esfera de diámetro D .

2.3.1.1.1 Determinación experimental de la densidad de un flóculo

Experimentalmente se puede obtener una estimación de la densidad de un agregado por medio de la medición de la densidad de un flóculo (ρ_f). El método sería el siguiente:

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_f} = \frac{\text{Masa del floc}}{\text{Volumen del floc}} \quad (24)$$

La masa del flóculo se puede establecer de la siguiente manera en función de la masa de la partículas primarias (M_p).

$$M_f = M_p + M_w \quad (25)$$

Donde la masa del agua (M_w) se obtiene:

$$M_w = \rho_w(V_f - V_p) \quad (26)$$

Sustituyendo en la ecuación (25) se tiene:

$$M_f = M_p + \rho_w \left(V_f - \frac{M_p}{\rho_p} \right) \quad (27)$$

Sustituyendo (27) en (24) se obtiene entonces la densidad del flóculo:

$$\rho_f = \frac{M_p + \rho_w \left(V_f - \frac{M_p}{\rho_p} \right)}{V_f} \quad (28)$$

Donde: M_w , es la masa del fluido; V_p , es el volumen de la partícula primaria y V_f es el volumen del flóculo.

2.3.1.2 Porosidad

Con respecto a la suposición de que todas las partículas son esféricas y así permanecen, se ha demostrado que los flóculos son partículas irregulares y es común que se representen como objetos fractales. Pero su propiedad más importante, es que la porosidad de un flóculo aumenta al incrementar su tamaño. La porosidad de un flóculo θ se define como:

$$\frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_p - \rho_w} = 1 - \theta \quad (29)$$

Li y Ganczarczyk (1989) presentan una relación entre la porosidad θ de un flóculo y su dimensión fractal F esto es:

$$\theta = 1 - k_4 D^{F-3} F \quad (30)$$

Donde: k_4 es una constante y D es el diámetro del flóculo. La dimensión fractal F varía entre 1 y 3, para cuando $F = 3$ se considera una esfera sólida. La variación de F no sólo depende del tamaño, para floculación ortokinética, también depende de la tasa de corte (García Aragón et al., 2011b).

Utilizando la fórmula de Kranenburg la porosidad de un flóculo esférico es:

$$1 - \theta = \left(\frac{D}{d}\right)^{F-3} \quad (31)$$

2.3.1.3 Tamaño y forma de los flóculos

De acuerdo con los datos experimentales obtenidos por técnicas ópticas (PIV Y PTV) se puede observar que los flóculos, presentan formas muy diversas. En la formación de los flóculos debido a los mecanismos de agregación y ruptura presentan diferentes tamaños como se puede observar en la Figura 1. Esta imagen fue obtenida mediante técnicas ópticas (PTV).

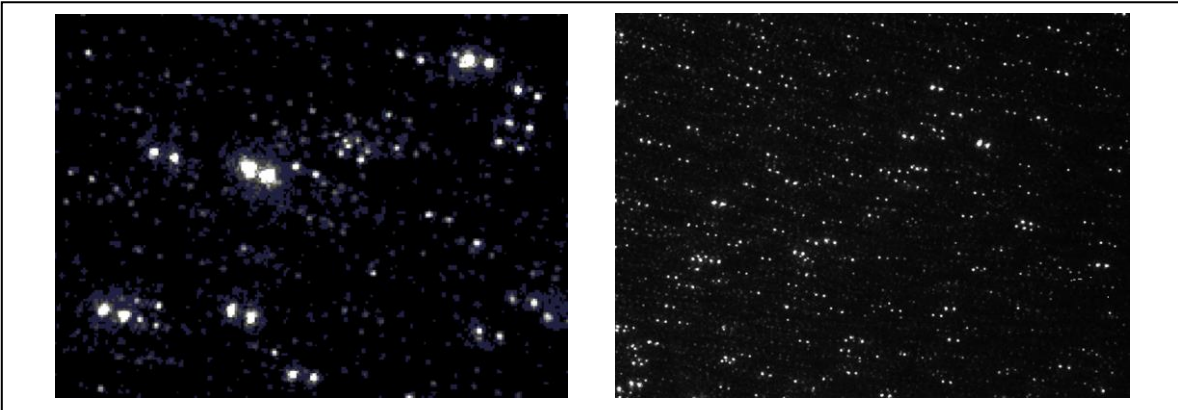


Figura 1. Distintos tamaños de flóculos

2.3.2 Fórmula para determinar la velocidad de caída

Uno de los parámetros más importantes en la velocidad de caída de sedimentos cohesivos, es la densidad (flóculos). En esta investigación se utilizará la ecuación (22) para la densidad de un flóculo propuesta por Lau y Krishnappan (1977)

Utilizando la ecuación 22 y sustituyéndola en la ley de Stokes, ecuación (15), se obtiene:

$$W_s = \frac{(\rho_p - \rho_w)gD^2}{18\mu} \exp(-bD^c) \quad (32)$$

Considerando la aceleración de la gravedad $g = 9.81 \text{ m/seg}^2$ y dividiendo entre ρ_w , se tiene:

$$W_s = \frac{0.545}{\nu} \left(\frac{\rho_p}{\rho_w} - 1 \right) D^2 \exp(-bD^c) \quad (33)$$

En vista de que b y c se han calculado experimentalmente para el diámetro D en micrones y la viscosidad cinemática del agua es $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ se tiene la siguiente expresión:

$$W_s = \left(\frac{\rho_p}{\rho_w} - 1 \right) D^2 \exp(-bD^c - 14.42) \quad (34)$$

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS ÓPTICAS

3.1 Técnicas ópticas en 2D

Las técnicas ópticas utilizadas para el estudio del comportamiento de los fluidos en la mecánica e hidráulica, hacen posible la obtención de una grabación óptica, es decir de una imagen con las propiedades físicas del campo de flujo en estudio.

Además, algunas técnicas de diagnóstico óptico permiten determinar las propiedades de los campos de flujo, tal como la presión, temperatura, densidad y velocidad es objetivo de diversos trabajos de investigación; estos parámetros son relevantes en distintos campos de la ciencia, tecnología e ingeniería.

En las últimas décadas las técnicas ópticas se han desarrollado enormemente y enfocado principalmente a la medición de los campos de velocidad del flujo de fluidos (Raffel et al., 1998) los cuales, tienen aplicación práctica en la aeronáutica, turbo maquinaria, transferencia de calor, transporte, geofísica, entre otras, donde se han obtenido resultados interesantes, principalmente en el cálculo de perfiles de velocidad, deformaciones y caracterizaciones de partículas.

Las técnicas ópticas de mayor uso en el estudio del flujo de fluidos en 2D, son las técnicas de velocimetría óptica. Las técnicas de velocimetría óptica son técnicas no intrusivas e instantáneas, usadas para visualización cualitativa y diagnóstico de un campo de flujo cuantitativo (Adrian, 1991; Salinas, 2007). La técnica se basa en la captura de imágenes sucesivas de una región iluminada por una hoja de luz láser, de un flujo con partículas trazadoras para la identificación correcta del campo de flujo. Las técnicas se dividen en dos

categorías; que dependen de la densidad de partículas; para imágenes muy densas, se aplican algoritmos que se utilizan en forma local como los de correlación cruzada; para imágenes con baja densidad de partículas los algoritmos aplicados son de rastreo del movimiento individual de las partículas. Esta división se trata como dos técnicas separadas PIV (Particle Image Velocimetry) y PTV (Particle Tracking Velocimetry).

Una de las aplicaciones importantes de la técnica PTV es en el flujo en dos fases, principalmente en el transporte de sedimentos no cohesivos campo en el cual se han obtenido resultados en la caracterización de las partículas y la determinación de la velocidad de caída de sedimentos no cohesivos (arenas) así como el coeficientes de arrastre en fluidos en movimiento (Salinas et al., 2006, Salinas, 2007). Estos parámetros han permitido plantear modelos matemáticos considerando la hidrodinámica del flujo (Salinas et al., 2007) así como calcular la eficiencia de las técnicas en la determinación de la velocidad de caída de partículas no uniformes y no esféricas en fluidos en movimiento.

No obstante, que cada técnica ofrece ventajas y desventajas, en la determinación de campos de velocidades en 2D casi en forma instantánea, la técnica PIV es la más idónea en la mecánica de fluidos (Adrian, 1991). Es muy útil en la determinación de los campos de velocidad para todo tipo de flujos (turbulentos y no turbulentos) mientras que la técnica PTV en 2D, además de obtener los campos de velocidad del fluido, también permite obtener la velocidad de caída de partículas sedimentarias no cohesivas para diferentes tamaños y tipos de sedimentos (Salinas, 2007). Por lo que, se pueden adaptar a la determinación de la velocidad de sedimentación tamaño y densidad de partículas cohesivas (de flóculos), así como el cálculo de la velocidad y forma de las burbujas de agua en sistemas de recirculación.

Las técnicas PIV y PTV se han utilizado ampliamente en la medición de la velocidad en muchas aplicaciones que involucran flujo de fluidos, estas técnicas permitirán analizar también los factores hidrodinámicos del flujo y el proceso de formación de los flóculos para con ello eficientar la eliminación de sedimentos en sistemas de recirculación. Esos resultados se pueden utilizar para la validación de modelos matemáticos

3.2 PIV: Velocimetría por imágenes de partículas

La técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV), permite determinar el campo instantáneo de velocidades en un plano del fluido. Para determinar el comportamiento del fluido es necesario agregar partículas trazadoras de la misma densidad del fluido para que éstas sean arrastradas por el flujo y adquieran la velocidad del fluido, esta característica permite determinar los vectores velocidad del fluido ya que fluido y partículas tienen la misma velocidad.

En la Figura 2 se muestra un sistema PIV que consiste en un láser pulsado y arreglos ópticos que forman una lámina delgada de luz que penetra en el fluido, ubicando las partículas trazadoras ya que éstas dispersan la luz del láser, la posición es registrada por una cámara con sensor CCD. La técnica PIV es una técnica de visualización cuantitativa, visualiza el flujo y realiza medidas cuantitativas de velocidad.

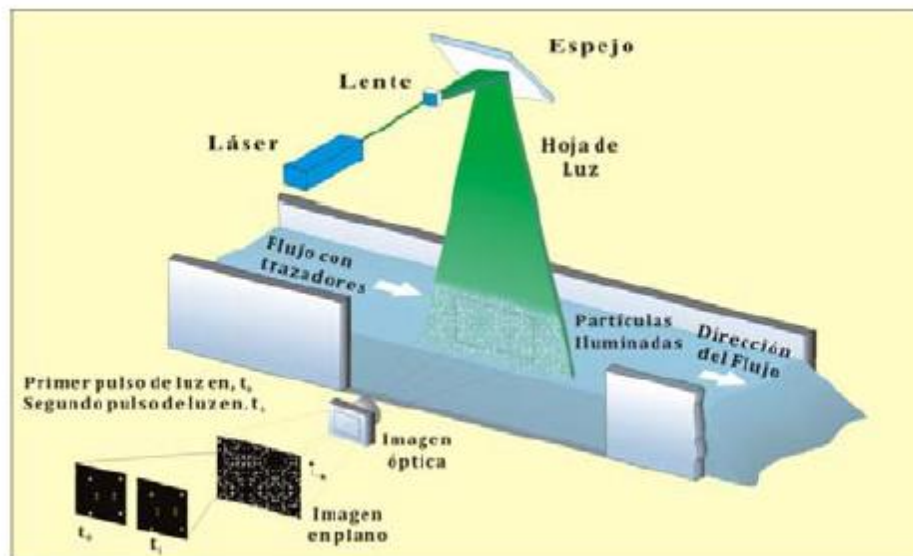


Figura 2. Sistema PIV (Salinas 2007)

La técnica PIV consiste en iluminar una región de observación mediante una lámina de luz láser donde las partículas son visualizadas y su imagen es registrada en dos instantes de tiempo t_0 y t_1 en un intervalo de tiempo Δt que debe coincidir con el pulso de luz para

determinar el desplazamiento Δx de las partículas, se conoce el tiempo y la distancia y aplicando la fórmula de la velocidad instantánea de un fluido (Adrián 1991) se obtiene la siguiente expresión:

$$\bar{u} = \frac{\Delta(\bar{x},t)}{\Delta t} \quad (35)$$

La técnica PIV consta de cuatro aspectos importantes:

- **Sembrado de partículas:** que consiste en agregar partículas de la misma densidad del fluido al flujo.
- **Iluminación del plano a investigar:** esta iluminación se realiza por medio de un láser y dispositivos ópticos
- **Adquisición de imágenes:** se registra con cámaras con sensores CCD
- **Procesamiento de imágenes:** que se lleva a cabo mediante técnicas de correlación que puede ser en una imagen doble pulso (autocorrelación) o dos imágenes monopulso (correlación cruzada).

Este método permite determinar el desplazamiento medio de un grupo de partículas en un intervalo de tiempo en áreas o regiones, el software presenta los vectores velocidad mediante mapas donde se aprecia la dirección del flujo y la magnitud de la velocidad. La Figura 3 esquematiza las etapas de la técnica PIV.

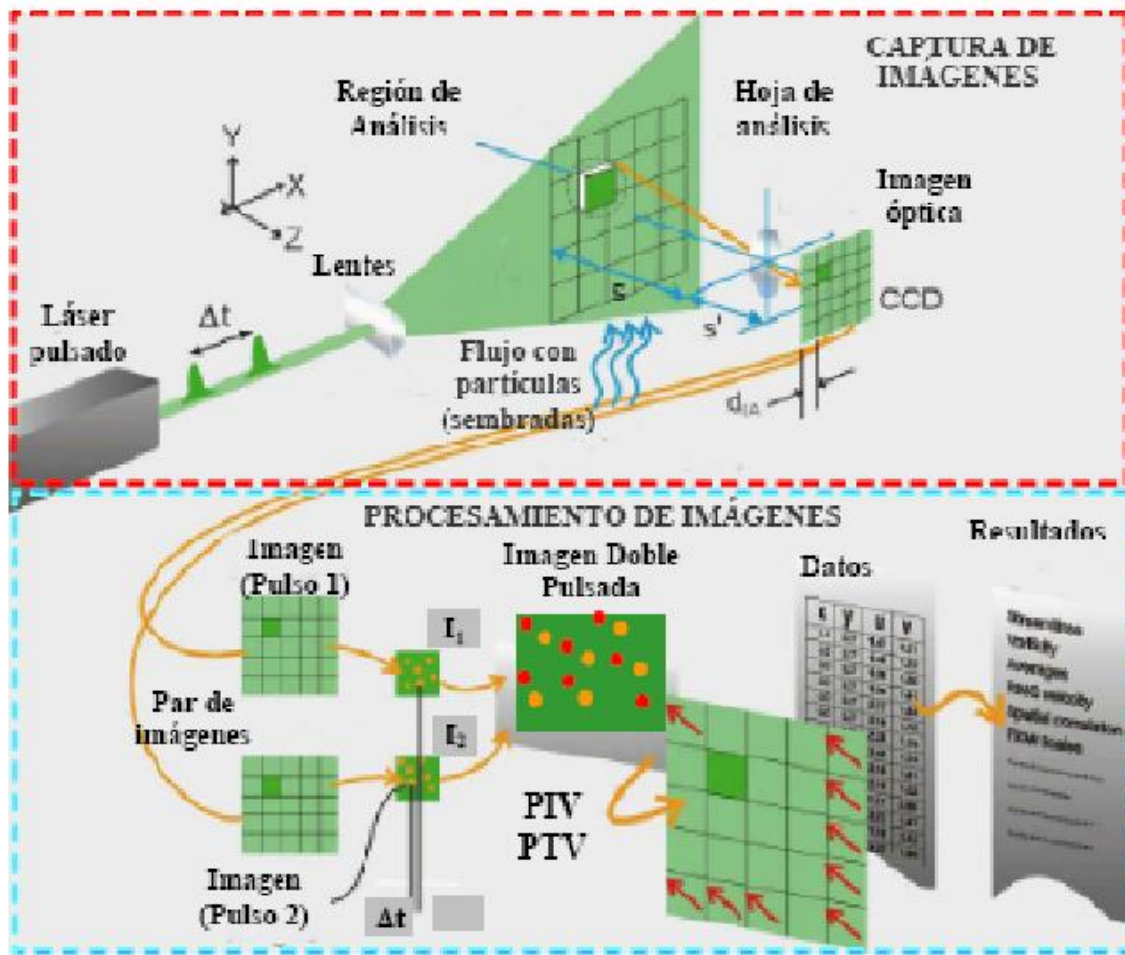


Figura 3. Fases de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (Salinas 2007).

3.3 PTV: Velocimetría por rastreo de partículas

La velocimetría por rastreo de partículas (PTV) tiene el mismo principio que PIV, sin embargo, la técnica PTV se utiliza para determinar la velocidad de una partícula individual conociendo su desplazamiento en un intervalo de tiempo, para su aplicación se requiere una baja concentración de partículas dentro del fluido, siendo ésta su principal diferencia con respecto a la técnica PIV, como se muestra en la Figura 4.

A diferencia de PIV que calcula velocidades a partir de un grupo de partículas, PTV identifica cada partícula de forma individual, así como su desplazamiento. Ya que se conoce el tiempo

que existe entre los pulsos de luz, se puede calcular la velocidad de cada partícula identificada.

Los aspectos importantes de PTV, al igual que PIV son: sembrado de partículas, iluminación del plano de estudio y adquisición de imágenes. La parte de adquisición de imágenes para PTV es la misma que para PIV, donde se requiere como mínimo dos imágenes continuas (imágenes monopulso), o bien una imagen con dos cuadros de captura en dos tiempos sucesivos (imagen multipulso). La técnica PTV presenta dificultades de aplicación en flujos rápidos, debido a la rapidez de los tiempos de captura entre imágenes (pulsos de luz), lo cual hace casi imposible la obtención de dos imágenes o una imagen multipulsada (Wernet, 1999).

Para determinar la velocidad individual de cada partícula por (PTV) se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

- Identificación de las partículas de una imagen de partículas, esta detección se realiza en función de los niveles de grises de dos imágenes consecutivas (imagen monopulso) o de una imagen con dos cuadros en tiempos consecutivos (imagen multipulso).
- La determinación de los pares de partículas, esto es, identificar las partículas en la imagen del primer pulso (primer cuadro), con su correspondiente par en el segundo pulso (segundo cuadro).

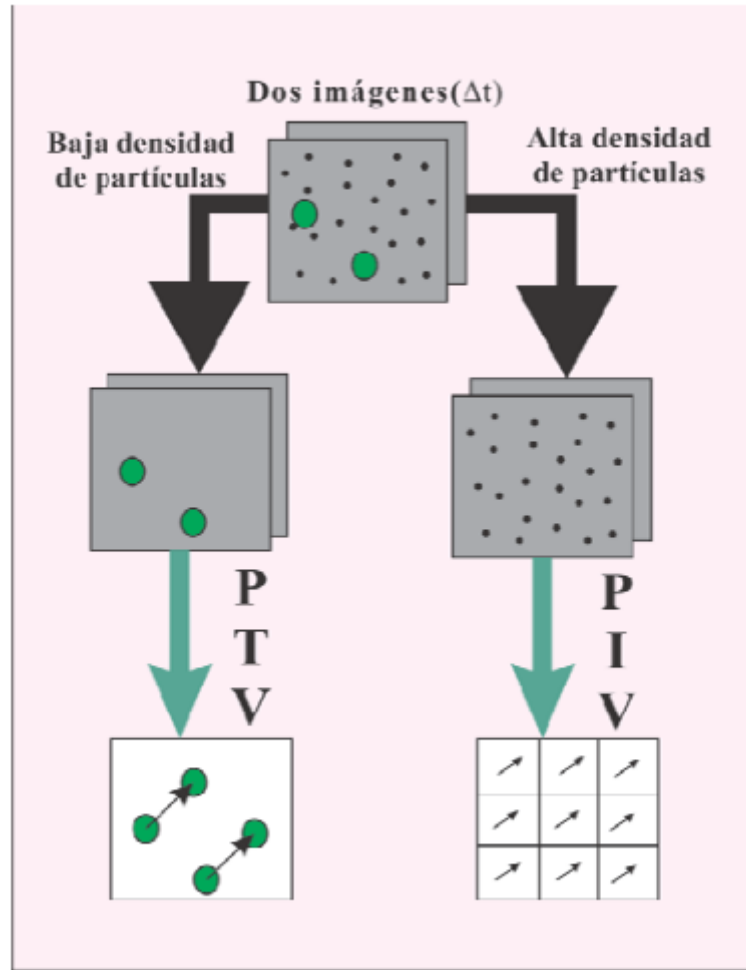


Figura 4. Diferencia de imágenes de PTV y PIV (Salinas 2007)

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la instalación y el desarrollo de los experimentos realizados para la determinación de la velocidad de caída de los sedimentos así como la obtención y procesamiento de los resultados. Todo esto se llevó a cabo en las instalaciones del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) en el Laboratorio de Modelos Hidráulicos en el área de visualización, la cual cuenta con un tanque de recirculación de agua así como el equipo necesario para las técnicas PIV y PTV.

4.1 Sistema experimental

Para la realización de los experimentos que se detallan a continuación se hizo uso principalmente de dos grupos de dispositivos: el equipo hidráulico y el equipo de velocimetría para la captura de las imágenes

En lo que respecta al equipo hidráulico se hizo uso de un tanque de recirculación previamente instalado en el laboratorio el que fue usado anteriormente para determinar los campos de velocidad del fluido, por lo cual se hicieron adecuaciones mínimas para la realización de las pruebas necesarias para este trabajo.

Para la captura de imágenes fue necesario contar con un sistema óptico que permitiera dirigir una hoja de luz láser hacía la zona determinada de análisis; así como un arreglo de cámaras para la captura.

4.2 Tanque de recirculación

Se utilizó un tanque circular de 103 cm de diámetro y 35 cm de altura hecho a base de marcos de ángulos de 1" y paredes de acrílico transparente (plexiglás). Cuenta con un sistema de recirculación de agua con aditamentos que permiten controlar la carga en el depósito y el caudal dentro del mismo. Posee una bomba de 1.5 HP de potencia, tubería de PVC hidráulico de 25 mm de diámetro para succión, la alimentación del tanque es enteramente por gravedad, por medio de dos arreglo de difusores, con tubería de 13 mm (1/2") y 19 mm (3/4") de diámetro con boquillas de diferentes diámetros. Para controlar el caudal en el tanque, el sistema de entrada de agua cuenta con dos válvulas de paso, cada una para cada arreglo de difusores. Este arreglo se puede observar en la Figura 5.

Los arreglos de difusores están contruidos de tal manera que pueden controlar la dirección y la velocidad que éstos le pueden dar al flujo. El número, diámetro y orientación de dichos difusores utilizados en el presente trabajo fueron determinados a partir de los resultados experimentales de Flores y López (2012).

En la Tabla 2 se muéstralos datos de la configuración de difusores utilizada en el presente trabajo donde se muestra la dirección y el diámetro de cada uno de ellos como se puede apreciar en la Figura 6.

De acuerdo con los resultados obtenidos para pruebas de sedimentación, utilizando esta configuración dentro del tanque aquí detallado, después de 5 minutos de haber ingresado el sedimento al tanque la concentración disminuye un 50% en todo el tanque. Para esta configuración el tiempo de retención es de 21 minutos, en ese tiempo la concentración ha decrecido en un 80%. En cuanto a la eficiencia de sedimentación la concentración medida en la salida del tanque fue la mínima comparada con otras configuraciones que fueron puestas a prueba y en la purga del sistema la concentración se mantuvo constante lo cual evidencia que durante el tiempo que el sedimento está en el tanque el flujo lo dirige hacia la parte baja del mismo (Flores y López 2012).

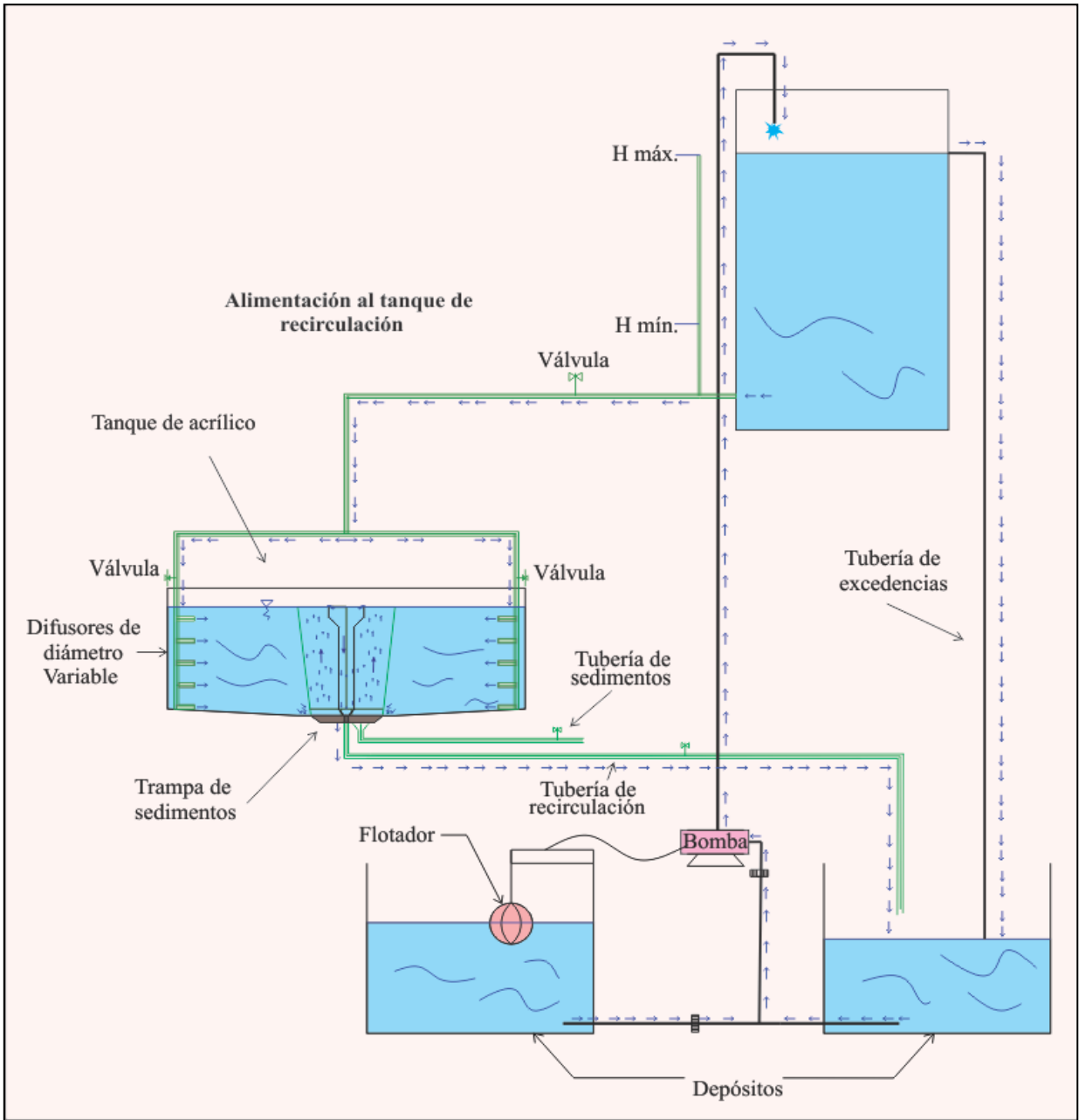


Figura 5. Esquema del tanque con recirculación de flujo (Flores y López 2012).

Tabla 2. Datos de la configuración utilizada (Flores y López 2012)

Configuración	Difusor		Dirección del difusor (°)					Observaciones
	Diámetro (mm)	Tipo	1	2	3	4	5	
A	3.18	Tapón	45	30	45	90	135	Un tren de difusores verticales, más un difusor en la superficie, adaptado mediante un brazo. El brazo esta a 40° respecto al 0° (pared de acrílico), y el difusor esta a 60° respecto al brazo.



Figura 6. Configuración “A” utilizada

En la Figura 7 se muestra como se determina la dirección de los difusores, donde el ángulo para cada difusor se mide a partir de la tangente de la pared del tanque. A partir de la

configuración de los difusores la región de análisis para la captura de imágenes se hace a un ángulo de 135° con respecto a la posición original de los difusores (Figura 8).

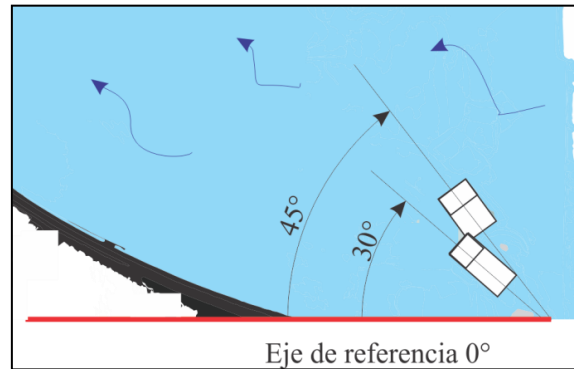


Figura 7. Configuración para la dirección de difusores (Flores y López 2012).

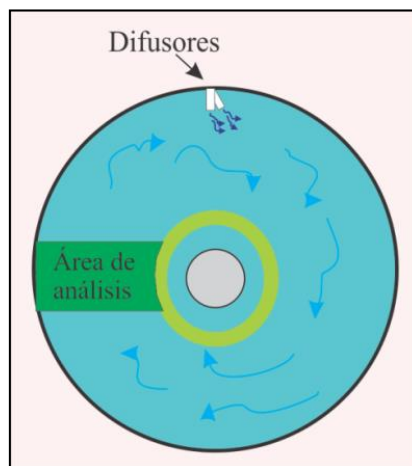


Figura 8. Ubicación de difusores y área de análisis (Flores y López 2012).

En lo que respecta al sistema de salida de agua del tanque, este funciona de acuerdo a una modificación del principio de hidrociclones (Timmons et al. 1998) que consiste en dos tubos concéntricos instalados en el centro del tanque.

El tubo externo presenta una serie de ranuras en la parte inferior, que permite la entrada de agua y sedimentos, esto ocasiona que el agua que ingresa por el tubo exterior ascienda hasta alcanzar el nivel del tubo interior, el cual está conectado con el sistema de salida. De este modo se controla el tirante dentro del tanque y se produce una zona de velocidad

prácticamente nula en el tubo exterior, lo que propicia condiciones óptimas para la sedimentación de las partículas. Esta zona cuenta con una trampa de sedimentos que consta de un recipiente que sobresale por la parte inferior del tanque en donde se depositan los sedimentos hasta que son removidos a través de la tubería de purga. Bajo estas condiciones se genera una alta tasa de extracción de sedimentos (Figura 9).

Para el sistema de salida se utilizó un tubo de salida con ranuras perimetrales de 1 cm de ancho y 5 cm de altura con una separación entre ellas de 2 cm tipo rejilla, ya que de esta manera se permite la entrada de sedimentos hacia el tubo interior, pero no su regreso hacia el área de flujo en el tanque. Con esta configuración tipo rejilla se tiene una entrada uniforme por todo el perímetro del tubo, así el flujo que entra al hidrociclón pierde energía y no produce una trayectoria recta dentro del mismo evitando el regreso del flujo (Flores y López 2012).

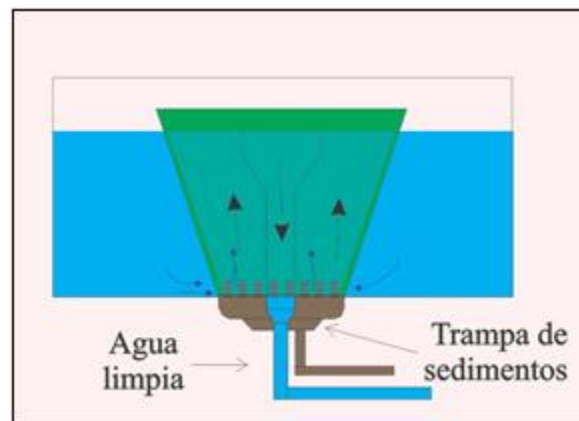


Figura 9. Configuración de salida de agua tipo rejilla (Modificado de Flores y López 2012)

4.2.1 Campos de velocidad en 2D y perfiles de velocidad en el tanque de recirculación.

A continuación se presenta un resumen de los campos de velocidad en 2D y los perfiles de velocidad para la configuración utilizada en el presente trabajo propuesta por Flores y López (2012) la cual resultó eficiente en la eliminación de los sedimentos en forma natural.

En las figuras 10 y 11 se presentan los campos y los perfiles de velocidad de la configuración de difusores, ésta tuvo un caudal de 9.91 lpm, con una velocidad máxima de 11.05 cm/s en la pared del tanque a una altura de 15 cm y una velocidad mínima de 3.75 cm/s cerca del tubo del hidrociclón exterior a una altura de 15 cm.

La figura 11 muestra los perfiles de velocidad, que son casi verticales, presentando un incremento en la velocidad no solo cerca de la superficie del agua, sino en todas las alturas dentro del ancho comprendido desde la posición 0 hasta la posición de 17.5 cm.

Por otro lado, los perfiles de velocidad generados a partir de la distancia de 22.5 cm hasta 32.5 cm indican que la velocidad en éstas posiciones disminuye gradualmente desde la superficie del agua hacia el fondo del tanque. También se puede observar una pequeña curvatura en la parte superior de los perfiles (figura 10) que significa el aumento en la velocidad del fluido en la superficie.

Con las características que presentó el flujo en esta configuración, los perfiles mostrados en la figura 11 indican que el comportamiento de las partículas podría lograr una sedimentación eficiente de las mismas, así como unas condiciones óptimas para el cultivo de peces. Esto gracias a que se logró tener una velocidad mayor cerca de la superficie del agua en todo el ancho de estudio del tanque, la cual fue disminuyendo gradualmente hacia el fondo del tanque y hacia el centro de éste, proporcionando así una fácil canalización de las partículas hacia la trampa de sedimentos y conservando diferentes velocidades de flujo dentro del tanque para que los peces seleccionen cómodamente distintas zonas donde puedan nadar.

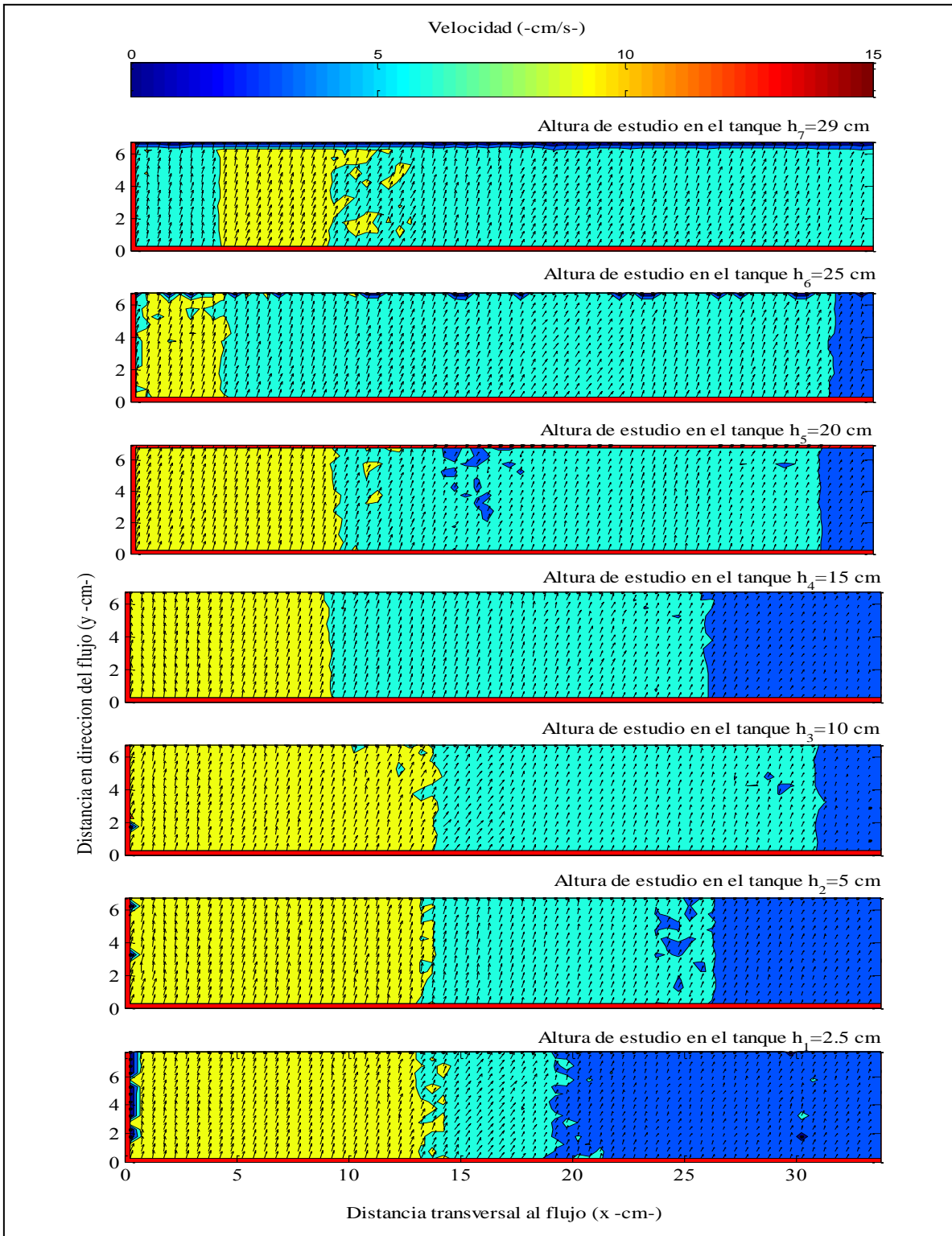


Figura 10 Campos de velocidad para la configuración A.

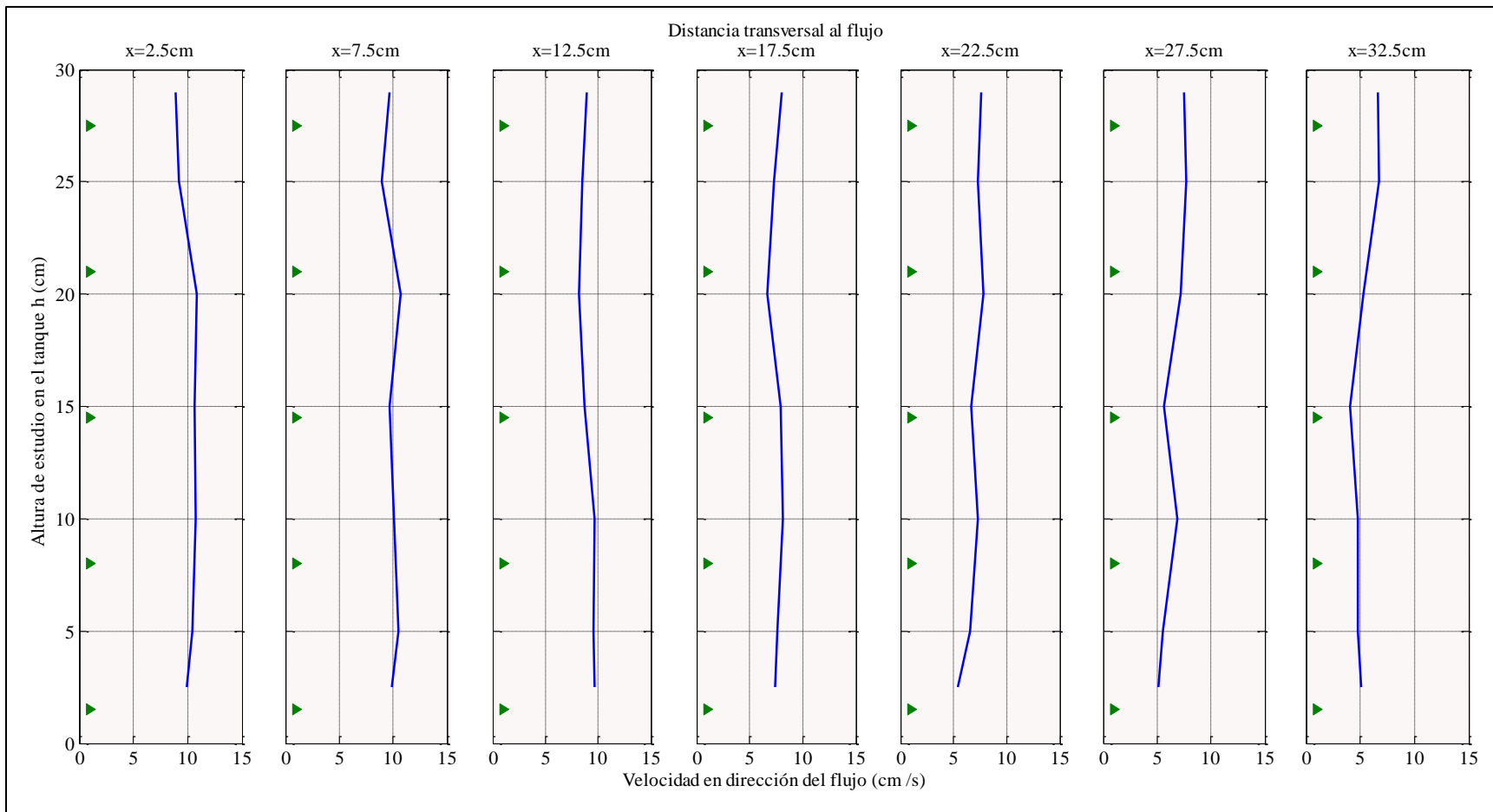


Figura 11. Perfiles de velocidad para la configuración A.

4.3 Equipo de velocimetría

El equipo de velocimetría utilizado para los experimentos fue: una fuente de luz láser Nd:YAG de doble cavidad (doble pulsado) de 15 mJ, accesorios ópticos tales como lentes cilíndricos, espejos, monturas, entre otros, necesarios para generar la hoja de luz láser y dirigirla hacia el área de análisis.

Para la obtención de las imágenes se utilizaron dos cámaras con sensor CCD marca LUMENERA de resolución temporal de 60 fps y resolución espacial de 640 x 480 píxeles. También, se utilizó una cámara con sensor CCD de marca JAI con resolución temporal de 250 fps y resolución espacial máxima de 1600 x 1400 píxeles, ambas equipadas con lentes de marca NIKKON de 50 mm.

Las cámaras se colocaron de frente al tanque y el láser fue direccionado de manera que la hoja de luz iluminara todo el tirante del mismo, las cámaras fueron puestas lo más cercanas entre sí para poder captar la mayor área posible para lo cual se adecuó una estructura hecha a base de perfiles de aluminio que permitía desplazar las cámaras de arriba hacia abajo para visualizar el área deseada del tirante dentro del tanque, tal como se muestra en la Figura 12.

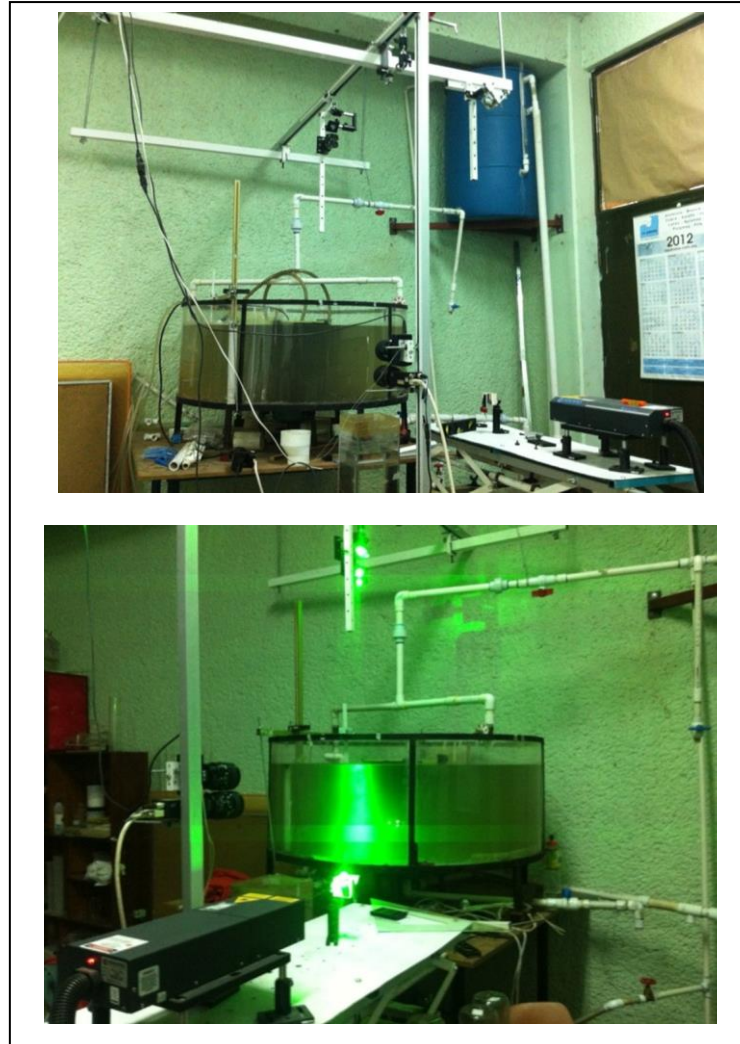


Figura 12. Equipo de velocimetría instalado.

4.4 Calibración del sistema

4.4.1 Calibración del caudal

Para la realización de los experimentos fue necesario tener un control acerca del caudal de entrada y salida del sistema de recirculación durante el tiempo de desarrollo de los experimentos. Para este fin se consideró el sistema de recirculación como un sistema cerrado, donde el volumen total dentro del sistema se mantuvo constante y por ende el caudal también, para ello el equipo de bombeo suministró un caudal constante para asegurar una carga

invariable dentro del tanque. La medición del caudal se determinó de manera volumétrica, tomando en cuenta el volumen de agua que salía del sistema en un tiempo específico.

Para medir el caudal se utilizó un recipiente de 4 litros y para medir con mayor precisión se utilizaron probetas de 1 litro; se realizaron 4 mediciones con 10 repeticiones cada una, considerando una carga de agua constante dentro del sistema en cada una de ellas. Para tener datos más precisos en cada medición se tomaron diferentes volúmenes. Para medir el tiempo se utilizó un cronómetro con precisión de hasta centésimas de segundo.

Para la primera etapa de experimentación, esto es para los sedimentos no-cohesivos mayores a 75 micrones, el caudal promedio fue de 9.91 l/min, el cual es similar al obtenido para la configuración “A” mencionada en Flores y López 2012

Por otro lado, para los sedimentos cohesivos menores de 75 micrones se realizaron las mediciones del caudal mencionadas y se trabajó con un caudal promedio de 6.14 l/min, resultando un tiempo de retención de 38 minutos, este tiempo fue ideal para que las partículas permanecieran mayor tiempo dentro del tanque y así comenzar el proceso de floculación para observar el comportamiento de los flóculos.

4.4.2 Calibración de los sistemas PIV y PTV

Previo a la instalación definitiva de los equipos propios para la realización de las pruebas de PIV y PTV fue necesario la adecuación y puesta a punto de todos los elementos involucrados en este proceso para de este modo tener una mayor certidumbre en los datos obtenidos.

En primer lugar se realizaron pruebas con sedimentos en su estado natural, esto es, sin una clasificación previa de tamaño o densidad. Esta prueba consistió en observar la caída de los sedimento en un flujo estático. Para ello se utilizó un recipiente de cristal con forma rectangular de 15.5 x 15.5 cm y 40 cm de altura el cual permitía observar de manera clara y sencilla la trayectoria de los sedimentos al caer dentro del fluido; así como también se hizo uso

del equipo de iluminación láser, para poder observar la región de interés y una cámara de alta velocidad para la captura de las imágenes, ésta fue instalada sobre un trípode el cual permitía el desplazamiento vertical de la cámara para captar la altura total del recipiente. Los resultados obtenidos de esta prueba fueron útiles para la visualización preliminar de las partículas sedimentarias, así como para conocer ciertos parámetros para el procesamiento de las imágenes de los experimentos posteriores.

Con los datos de diámetro y velocidad obtenidos de esta prueba fue posible llevar el experimento hacia el tanque de recirculación.

Antes de comenzar las capturas de imágenes de las partículas sedimentarias fue necesario determinar la región óptima dentro de la altura del tirante del tanque la cual contara con las condiciones necesarias para que la sedimentación de los sedimentos fuera posible, para ello se instaló una cámara frente al tanque que fue desplazada de manera vertical con ayuda de un trípode, esto para poder observar la totalidad del tirante de agua.

Para observar el comportamiento del flujo en toda la altura del tanque fue necesario dividir el tirante en 5 áreas para una mayor calidad de imagen y certeza en los resultados. Cada imagen comprendió una región de 7 cm y se presenta un único traslape de 5 cm que permite observar la totalidad tirante. Las alturas se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 13.

Tabla 3. Regiones de análisis en el tanque de recirculación

Altura	Región medida desde el fondo
H5	22.8 cm – 29.5 cm
H4	21.2 cm – 28.1 cm
H3	14.3 cm – 21.2 cm
H2	7.4 cm – 14.3 cm
H1	0.6 cm – 7.4 cm

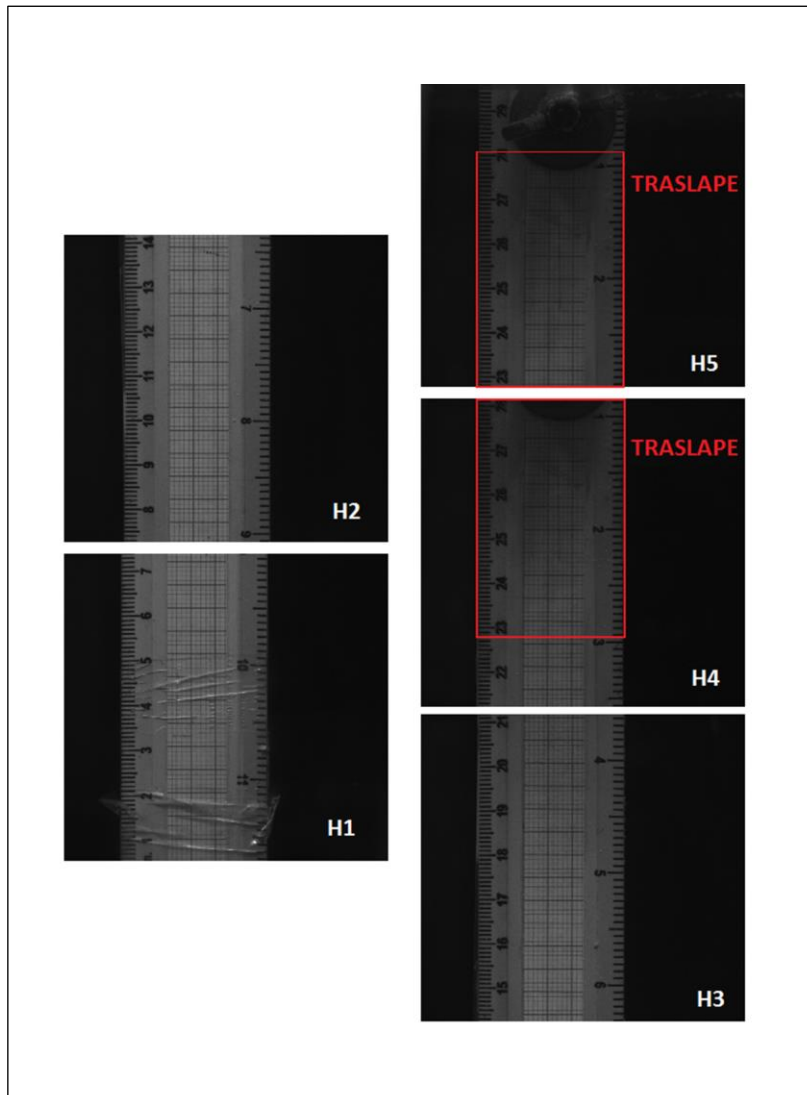


Figura 13. Alturas de análisis.

Una vez determinadas las regiones de captura, se obtuvieron las imágenes con la ayuda de la fuente de luz láser y la cámara y posteriormente se procesaron para conocer el comportamiento del flujo.

De acuerdo con los resultados de velocidad obtenidos se determinó que el área óptima para la captura de imágenes con partículas sedimentarias fue la altura H3 ya que la velocidad en esta zona es de hasta 10.8 cm/s y las velocidades en las alturas inferiores van disminuyendo gradualmente lo que propicia una mayor sedimentación de las partículas. Cabe mencionar que

debido a que solo se contaba con una cámara para captar las imágenes sólo se trabajó en una altura de análisis, siendo esta la que presentaba mejores condiciones para la sedimentación de las partículas. Cabe mencionar que debido a que solo se contaba con una cámara para captar las imágenes sólo se trabajó en una altura de análisis, siendo esta la que presentaba mejores condiciones para la sedimentación de las partículas.

4.5 Selección de las partículas sedimentarias

Para la realización de los experimentos se utilizó alimento para peces con denominación #0 de la marca “El pedregal” con diámetro nominal 0.60mm, debido a las propiedades del mismo fue necesaria su caracterización ya que el diámetro es grande para considerarlo como sedimento cohesivo, principalmente en cuanto al diámetro de las partículas, para ello se realizó un tamizado con mallas de cribado para poder así contar con distintos diámetros con los cuales poder trabajar.

Se utilizaron 3 tamices distintos para cribar el material los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Tamices empleados en el cribado

Malla	Abertura (mm)
50	0.297
100	0.149
200	0.074

Una vez tamizado el material se decidió trabajar únicamente con los sedimentos que pasaron la malla 100, los retenidos en la malla 200 y con los que pasarón a través de la malla 200, esto debido a que estos representaban de mejor manera el comportamiento de las partículas cohesivas analizadas en este trabajo. Considerando lo anterior se trabajó con los siguientes diámetros de análisis mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Clases de sedimentos por diámetro

Clase de sedimento	Designación	Diámetro (mm)
A	Retiene 100	$D > 0.149$
B	Retiene 200	$0.074 < D < 0.149$
C	Pasa 200	$D < 0.074$

4.5.1 Determinación de la densidad de las partículas sedimentarias

Para la determinación de la densidad de los sedimentos, se recurrió a la utilización del frasco Chapman el cual también es empleado para la obtención de la densidad y gravedad relativa de los suelos finos.

Se determinaron las densidades del material retenido por la malla no. 50, retenido por la malla no. 100 y por la malla no. 200.

Se realizaron dos pruebas por cada diámetro.

Para el material retenido por las mallas no. 50 y no. 100 se utilizó en cada prueba una muestra de 100 g, mientras que para el material retenido en la malla no. 200 se utilizó una muestra de 50 g.

La densidad fue calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$\rho_s = \frac{A_s}{V_{fr} - (K - W_f - A_s)} \quad (36)$$

Donde:

K = Peso de agua + Peso del sedimento + Peso frasco (g)

A_s = Peso de la muestra (g)

W_f = Peso del frasco (g)

V_{fr} = Volumen del frasco = 450ml

Una vez realizada la prueba para los distintos diámetros se llegó a los resultados mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Densidades para las distintas clases de sedimentos

Densidad (g/ml)			
	Prueba 1	Prueba 2	Promedio
Retenido No 50	1.2722	1.328	1.3
Retenido No 100	1.3495	1.385	1.36
Retenido No 200	1.497	1.3297	1.413

4.6 Diseño experimental

Los experimentos realizados como parte de este trabajo fueron desarrollados en tres distintas etapas, cada una correspondiendo a los distintos diámetros analizados.

La primera etapa corresponde al material retenido en la malla 100, la segunda para el material que retiene la malla 200 y por último, la tercera etapa, para el material que pasa la malla 200.

Para cada una de las etapas de experimentación se consideró trabajar con 3 distintas concentraciones dentro del tanque, estas fueron 50 mg/l, 100 mg/l y 200 mg/l. Sin embargo después de una experimentación preliminar con las primeras dos concentraciones se decidió que no era posible trabajar con ellas ya que no se tenía una densidad de sedimento en el tanque lo suficientemente considerable para observar un número significativo de partículas en la zona de captura de imágenes.

De esta manera para, cada una de las etapas se contó con dos equipos para la toma de imágenes los cuales fueron:

- Cámara CCD marca Jai
- Cámara CCD marca LUMENERA

Ambas cámaras fueron colocadas en un arreglo a base de perfiles de aluminio lo cual permitía que ambas enfocaran el área de interés y así tener mayor precisión en cuanto a la captura de imágenes para cada etapa de experimentación, dicho arreglo muestra en la Figura 14.

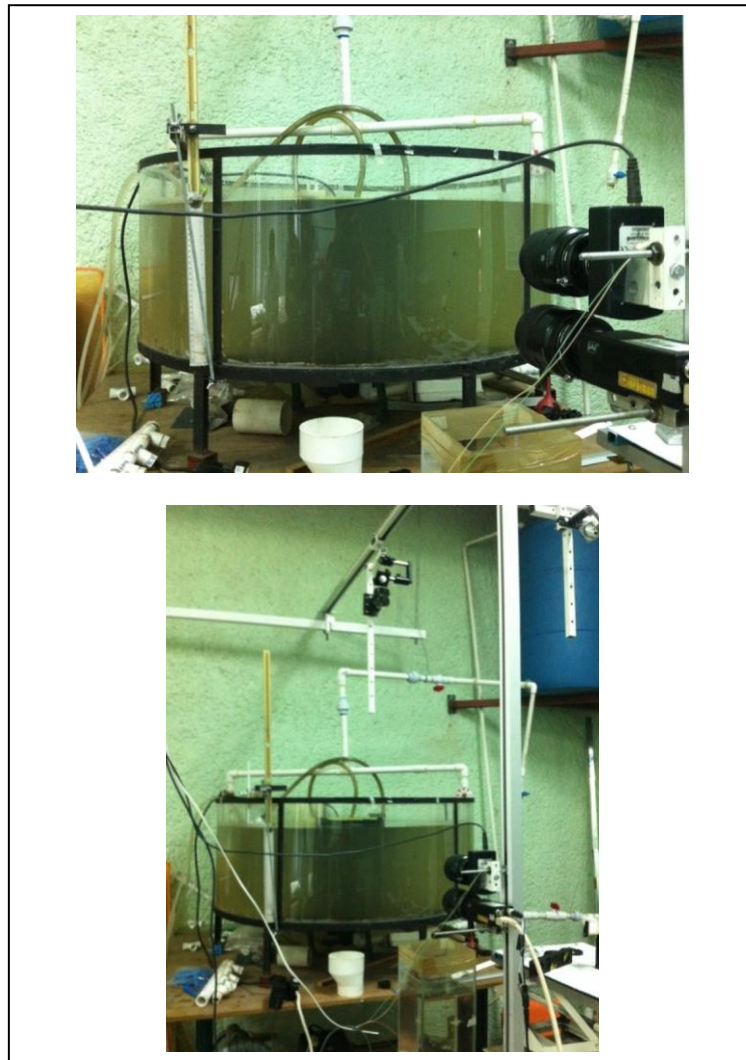


Figura 14. Arreglo del sistema de captura de imágenes

4.7 Desarrollo experimental para la velocidad de caída

Como se mencionó en el apartado anterior la experimentación se llevó a cabo en tres etapas.

Para la primera etapa, los sedimentos retenidos en la malla no. 100, se realizó solamente un bloque de captura de imágenes a lo largo de 30 minutos, con capturas de 90 imágenes cada 5 minutos, es decir, se tuvieron 7 capturas con 90 imágenes cada una, dando un total de 630 imágenes para el análisis de este diámetro de sedimento.

La segunda etapa de experimentación que corresponde a los sedimentos retenidos en la malla 200, contó con 4 bloques de captura de imágenes, con un tiempo total promedio del experimento de 30 minutos cada uno, en esta etapa se capturaron 50 imágenes cada 5 minutos, con lo cual se obtuvo un total de 350 imágenes por bloque y un gran total de 1400 imágenes para todo los experimentos.

Para la última etapa de experimentos se realizaron 2 bloques de capturas de imágenes con una duración de 60 minutos y al igual que las etapas anteriores se dividió en intervalos de 5 minutos para los cuales se tomaron 90 imágenes, teniendo así 1170 imágenes por bloque y 2340 imágenes totales en lo que respecta a esta etapa de experimentación.

Cabe mencionar que para las primeras dos etapas mencionadas se trabajó con la configuración de difusores “A” descrita en apartados anteriores, con lo que se tuvo un tiempo de experimentación por bloque de 30 minutos, mientras que para los sedimentos que pasaron la malla 200 se empleó un dispositivo de salida de flujo de agua hacia el tanque en forma de tubo perforado, esto para que el tiempo de retención del agua en el tanque y por consiguiente el tiempo total del experimento fuera extendido hasta llegar así a los 60 minutos.

4.8 Adquisición de imágenes

Las imágenes capturadas para la técnica PTV fueron adquiridas con la cámara LUMENERA (60 fps) de 600 x 480 pixeles. La característica de este equipo es grabar imágenes multipulsadas, controladas desde un sincronizador.

En la Figura 15 siguiente se muestran los componentes y el procedimiento del sistema de captura de imágenes.

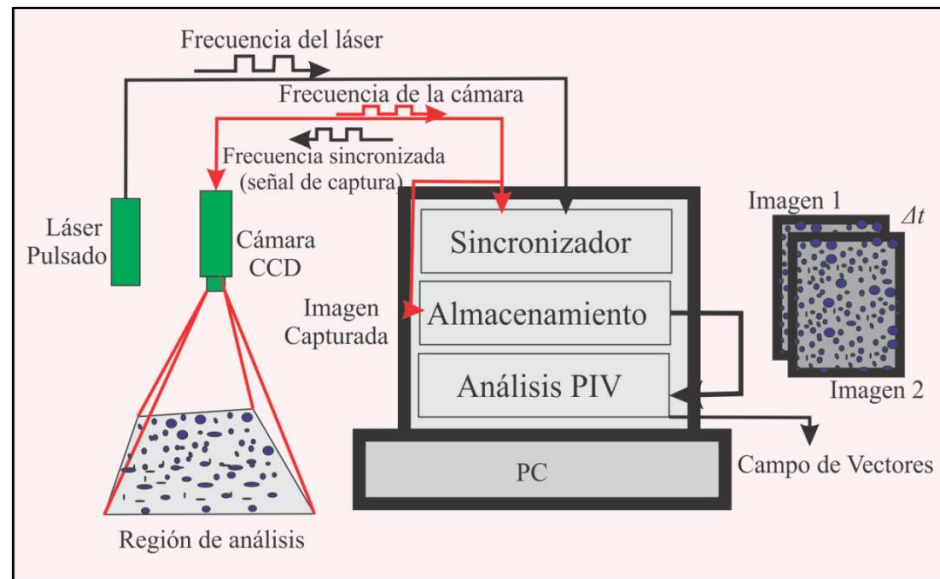


Figura 15. Componentes y procedimiento del sistema de captura de imágenes (Modificado de Salinas 2007).

La cámara LUMENERA se activa con un tiempo de exposición para cada imagen, mientras que la fuente de luz es pulsada dos veces con tiempo de separación conocido, y estos deben ser captados por la cámara en una imagen, lo que da como consecuencia una imagen doble pulsada, es decir, las partículas trazadoras son iluminadas con el primer pulso de luz, congelando la posición de las partículas por la cámara (corresponde a la posición inicial de las partículas) y posteriormente un incremento de tiempo se dispara el segundo pulso de luz láser y se congelan las partículas en una nueva posición (posición final). Con los tiempos de separación de los pulsos de láser (generalmente muy cortos) se identifica el espacio recorrido por la partícula.

Para las imágenes con PIV, se utilizó la cámara con sensor CCD marca JAI (250 fps) de 1600 x 1200 pixeles. Esta cámara es especial para sistemas PIV, ya que permite adquirir imágenes a alta velocidad. Con ella se pueden capturar imágenes con separación de 4 micro segundos,

tiempo suficiente para detectar el movimiento de los trazadores. Así derivado de la rapidez de la cámara, es indispensable la sincronía con la fuente de luz láser, esto con la finalidad que el primer pulso de luz coincida con la imagen 1 y el segundo con la imagen 2, y así obtener dos imágenes consecutivas con el tiempo ente pulsos conocidos. Esto produce dos imágenes independientes en dos pulsos sucesivos. La Figura 16 muestra la forma de operación de la sincronía de adquisición de imágenes para PIV y PTV (Flores y López 2012).

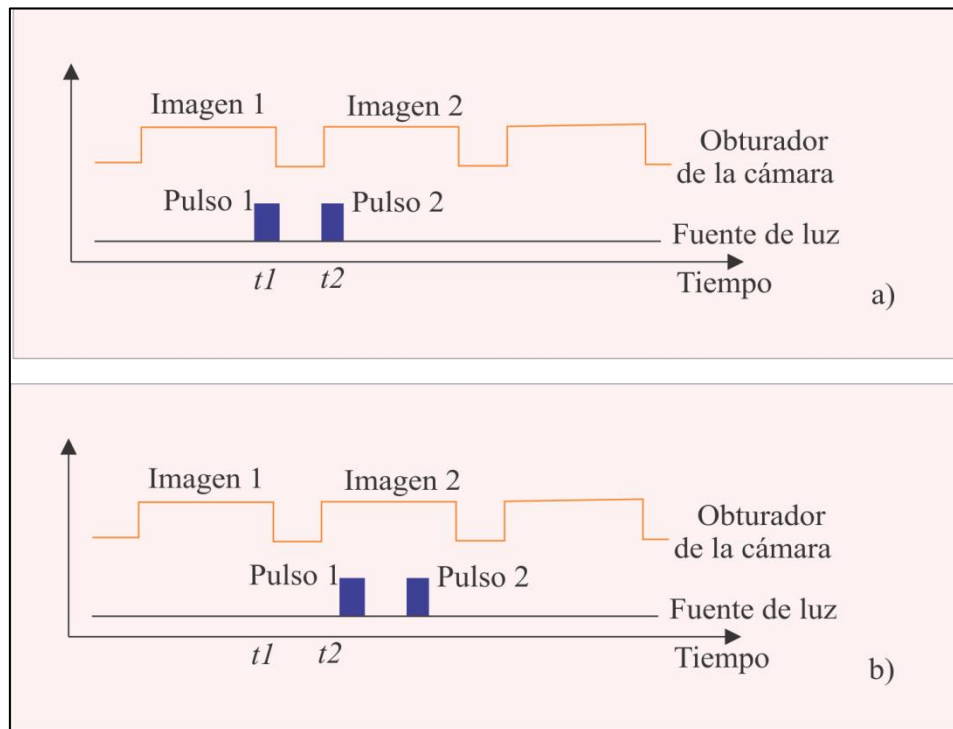


Figura 16. Secuencia de adquisición de dos imágenes. a) Monopulsada para PIV
b) Doble pulsada para PTV (Modificado de Salinas 2007).

En la Tabla 7 presenta un resumen del número de imágenes obtenidas para cada clase de sedimento en los distintos experimentos realizados para este trabajo.

Tabla 7. Número de imágenes capturadas

Sedimentos	Técnica	
	PIV	PTV
	Número de imágenes	
Clase A	630	630
Clase B	1400	1400
Clase C	2340	2340

4.9 Procesamiento de imágenes

El procesamiento de las imágenes, se realizó aplicando la técnica PTV. El procesamiento con PTV, se realizó utilizando el software PTV-SED. Este software realiza reconocimiento partículas de forma individual, para posteriormente identificar los pares correspondientes (Salinas et al., 2006). Estos pares de partículas corresponden a la misma partícula en dos instantes de tiempo, localizada en la misma imagen (imagen doble pulsada).

En la Figura 17 se muestra una imagen doble pulsada, adquirida con la cámara CCD marca LUMENERA. Puede observarse claramente que es una imagen con varios pares de partículas. Sin embargo, también se presentan partículas consideradas como no-deseadas, ya que representan vectores de velocidad erróneos, este tipo de partículas no son consideradas en los resultados finales.

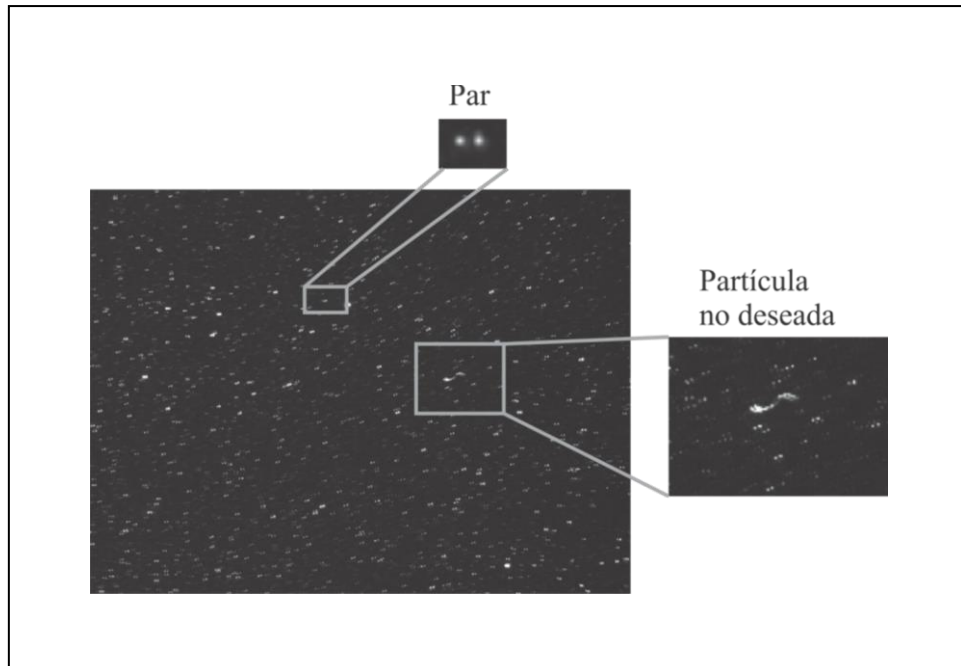


Figura 17. Imagen doble pulsada (Flores y López 2012)

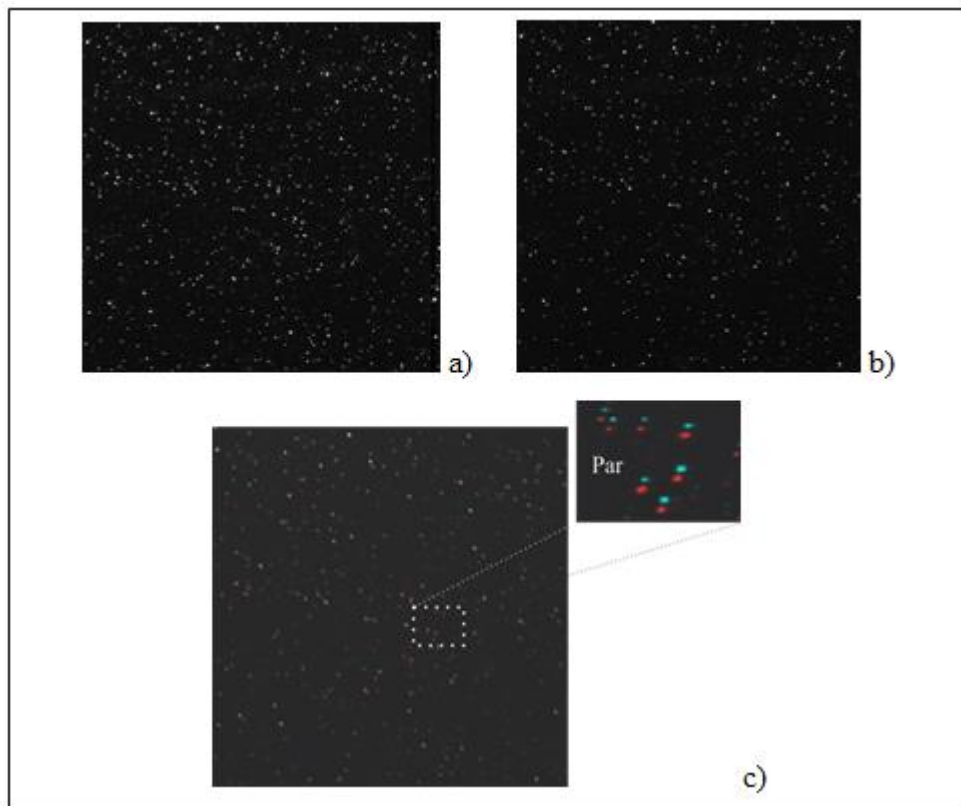


Figura 18. Pares de partículas (Flores y López 2012)

Para el procesamiento de imágenes doble pulsadas capturadas con la cámara CCD marca LUMENERA se utilizó el software “PTV- SED” (Figura 18), el cual consta de cinco partes:

1. **Parámetros de entrada:** se obtienen de las corridas experimentales y se describen a continuación:
2. **Pulso (ms)**, es la separación en tiempo entre los pulsos de luz láser, es decir es el tiempo correspondiente a la posición inicial y final de la partícula en una imagen doble pulsada o entre dos imágenes monopulsadas.
 - 2.1 **Magnificación (M)**, este parámetro es la relación entre el tamaño del objeto (unidad de medida) y tamaño de la imagen (píxeles), es decir es el número de píxeles que corresponden a una unidad de medida lineal (milímetros, centímetros o metros).
 - 2.2 **Los parámetros “Noise inicial” y “Length inicial”** (ruido inicial y longitud de ruido inicial) contienen valores iniciales predefinidos, los cuales son empleados para el proceso de filtrado de la primer imagen y estos varían de acuerdo con la calidad de la imagen a mejorar.
3. **Criterios de detección de partículas.** En esta fase se introduce el probable intervalo de distancia (d) que recorren las partículas un instante de tiempo, se considera la distancia mínima y máxima que puede recorrer una partícula, la cual se determina de acuerdo con velocidad y diámetro, éste parámetro permite discriminar diferentes tamaños de partículas.

También, dentro de estos criterios, es necesario considerar la dirección probable de la partícula (θ), para ello se introduce el rango de dirección de una partícula. Para conocer este dato es necesario considerar el efecto de turbulencia y la dirección del

flujo, y con ello poder inferir el ángulo mínimo y máximo que puede tener un par de partículas.

Debido a que el proceso de imágenes se realiza considerando la intensidad de luz que refracta una partícula, y que no todas tienen la misma intensidad (umbral), para lograr la identificación de las partículas correctas de acuerdo a su tamaño, es necesario el manejo de umbrales. Por lo tanto, en las celdas de “Thres” (threshold, umbral) se introducen los valores requeridos, en un rango de 0 a 255, es decir 0 se considera negro y 255 blanco intenso (máxima intensidad), entonces los valores de estos parámetros varían de acuerdo con la calidad de la imagen y el tamaño de la partícula. Mientras los valores de “TP” (thickness particle, espesor de partículas) delimitan el intervalo correspondiente al tamaño de las partículas dentro de la imagen.

4. **Selección de una imagen inicial.** Este apartado, permite seleccionar una imagen inicial, para definir los parámetros óptimos de procesamiento, es importante que para cada grupo de imágenes se definan todos los parámetros de proceso.

5. **Mejora de la imagen.** Este módulo del software permite mejorar la calidad de la imagen con la finalidad de que el software detecte claramente las partículas, la mejora se realiza mediante un filtrado pasa bajas y/o pasa altas, es decir, elimina todo el ruido de luz (reflejos) que provocan resultados erróneos durante el procesamiento confusiones a la hora de determinar los vectores de velocidad.

En este apartado se hace una copia de la imagen para ser modificada, sin alterar la original. Se eligen los valores óptimos de “noise” y “length”, (correspondiente al ruido y al tamaño máximo de la partícula) para “noise” se tiene un rango de valores de 0.05 hasta 2.0 con incrementos de 0.05, donde el valor 0.05 presenta una imagen totalmente en blanco y 2.0 presenta una imagen en negro. Para “length”, se tiene un rango de valores de 1 hasta 20 con incrementos de 1. Mientras más cercano sea éste parámetro a 1, la partícula tiende a ser larga, es decir, contiene mayor número de píxeles, de lo

contrario, cuando este valor aumenta, los pixeles de la partícula tienden a desaparecer haciéndola más pequeña y nítida.

Una vez definidos los parámetros óptimos de filtrado, se realiza el procesamiento de la imagen, y los parámetros se van modificando de acuerdo a los resultados obtenidos, y se consideran los adecuados hasta que se tenga el número máximo de partículas para una imagen. El programa identifica los pares de partículas que cumplieron con los parámetros introducidos y muestra los vectores encontrados y el número de partículas detectadas.

Esta etapa es parte fundamental del software ya que con los parámetros de entrada, los criterios de detección de partículas y de mejora de la imagen, se realiza el procesamiento de todo el grupo de imágenes de la corrida correspondiente.

6. **Procesamiento del grupo de imágenes**, una vez definidos los parámetros óptimos de procesamiento de imágenes, se aplicó este módulo, para realizar el procesamiento del grupo de imágenes para cada corrida. En el apartado de imágenes se anota el nombre correspondiente a cada imagen que para este trabajo fueron nombradas ‘**imS00##**’ el número era asignado del 1 al 90 de acuerdo al orden en que fueron capturadas.
7. **El procesamiento de las imágenes**. El desarrollo detallado del algoritmo de PTV para determinar la velocidad de partículas no esféricas y no uniformes se presenta en Salinas et al., (2006).

A manera de resumen se presenta el desarrollo del algoritmo en seis pasos:

- Identificación de máximas intensidades para determinado tamaño de partículas.
- Determinación de la forma de partícula.
- Cálculo del centroide de la imagen de la partícula.
- Identificación de los pares de partículas.
- Determinación de la velocidad de la partícula.
- El proceso se repite para otro tamaño de partículas.

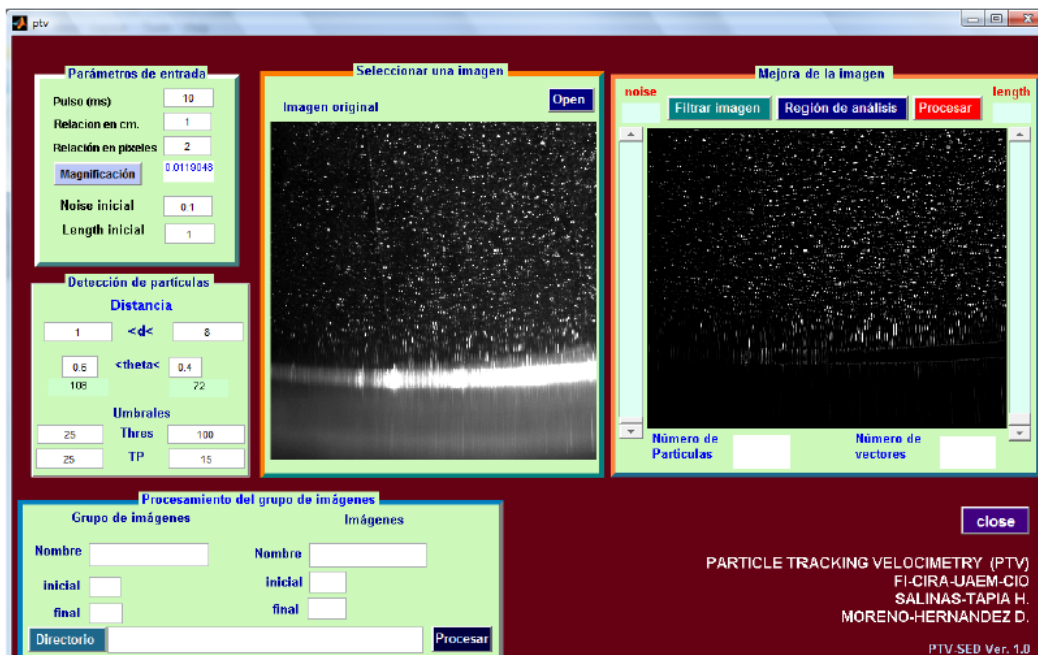


Figura 19. Interfaz del programa para procesamiento de imágenes de PTV.

4.10 Desarrollo experimental para las pruebas de sedimentación

Paralelo a los experimentos correspondientes a la velocidad de caída, se complementó el trabajo determinando el nivel de sedimentación a través del tiempo el cual coincide con el tiempo de captura. Para este fin se llevaron a cabo las pruebas en base a la norma NMX-AA-004-SCFI-2001, “Análisis de agua - Determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba”. Esta norma establece el procedimiento para obtener datos de concentración de sólidos suspendidos sedimentados en un cierto periodo de tiempo, utilizando como material principal conos Imhoff, el procedimiento se describe de manera general a continuación.

- a) Se llena el cono Imhoff con la muestra a analizar hasta la marca de 1,000 ml., procurando que la temperatura de dicha muestra se encuentre a temperatura ambiente.
- b) Se coloca el cono en la gradilla, la cual debe estar a nivel horizontal.
- c) Se deja reposar la muestra durante un periodo de 45 minutos para que sedimenten los sólidos.

- d) Se despegan los sólidos adheridos a las paredes del cono y se deja la muestra durante otros 15 minutos más.
- e) Finalmente se toma lectura de los sólidos acumulados al fondo del cono, este valor se anota en una tabla teniendo como unidades ml/l de sólidos sedimentable.

En la Figura 20 se aprecia la disposición de los conos durante la realización de la prueba de sedimentación.



Figura 20. Conos Imhoff.

Para la obtención de las muestras para sedimentación fue necesaria la fabricación de un dispositivo, mostrado en la Figura 21, el cual permitiera extraer agua del tanque cerca de la región de análisis sin alterar las condiciones del flujo en esa sección que afectarían los resultados de la velocidad de caída.

El dispositivo consta de una manguera montada sobre un perfil de acero, la cual estaba colocada a la misma altura de la región de captura de las imágenes, esta manguera bajo el principio de sifón succiona el agua hacia afuera del sistema y se almacenaba en envases de plástico transparentes de 1 litro para posteriormente con los conos Imhoff determinar la concentración de sedimentos suspendidos.

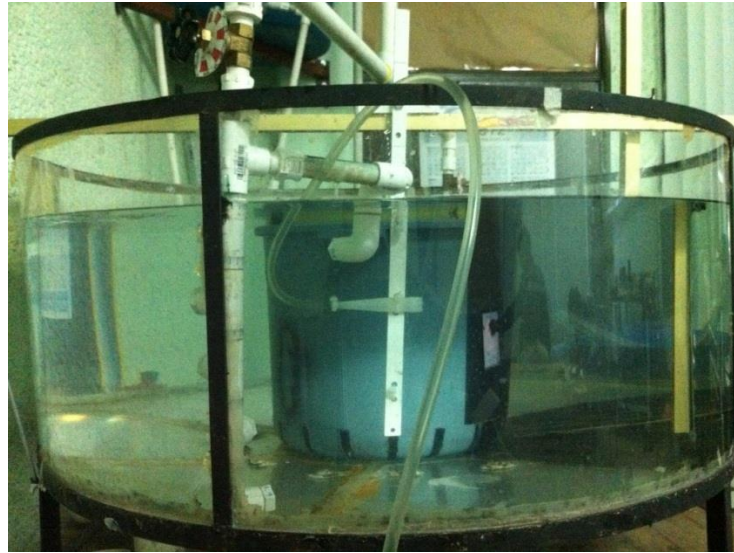


Figura 21. Dispositivo para toma de muestras.

La toma de muestras se realizó a la par que las pruebas para la velocidad de caída en intervalos de 5 minutos, esto para dar tiempo a la formación de los flóculos del material y así analizar de mejor manera el nivel de sedimentación a lo largo del tiempo.

Se trabajó con 3 clases de sedimentos: los sedimentos clase A, aquellos que pasan la malla 100, clase B, aquellos que son retenidos en la malla 200 y finalmente los clase C, los que pasan la malla 200.

Para los sedimentos de clase A y B, donde el tiempo del experimento fue de 30 minutos, se obtuvieron 7 muestras y para los sedimentos clase C, con tiempo de 60 minutos, 13 muestras, como se aprecia en la Figura 22.



Figura 22. Muestras tomadas para pruebas de sedimentación.

Una vez obtenidas las muestras se aplicó el procedimiento antes descrito para la obtención de las concentraciones de sólidos sedimentados (Figura 23).

Cabe mencionar que a pesar de que se tomaron gran número de muestras en la mayoría de las pruebas para los últimos tiempos medidos los sólidos sedimentados eran prácticamente nulos por lo que no se pudo obtener una medición precisa de ellos.



Figura 23. Partículas sedimentadas

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Para claridad en el análisis de los resultados se denominarán las tres clases de sedimentos utilizados en los experimentos como A, B y C de acuerdo a la Tabla 8.

Tabla 8. Grupos de análisis

Clase A	Clase B	Clase C
Retenido en malla 100 de 0.149 mm	Retenido en malla 200 de 0.074 mm	Pasan malla 200 de 0.074 mm

Se debe observar que en todos los experimentos se encontraron tamaños menores que la apertura del tamiz utilizado, en vista de que son compuestos de materiales orgánicos e inorgánicos que se aglomeran de forma natural y al entrar en contacto con el agua tienden a disgregarse. Este fenómeno es diferente al de coagulación donde la aglomeración tiene que ver con fuerzas cohesivas entre sedimentos luego de contactos facilitados por la hidrodinámica.

5.1 Ajustes para sedimentos Clase A

Las siguientes figuras 24 a 30 presentan los resultados experimentales de velocidades de caída de sedimentos de la clase A calculados por medio de la técnica PTV. Con estos resultados se utilizaron diferentes modelos de velocidad de caída para sedimentos no-cohesivos (ecuaciones 8, 12, 13, 14, 18) encontrándose que la que produce un mejor ajuste es la 18 (Salinas y García) la cual se presenta en las figuras mencionadas (línea roja).

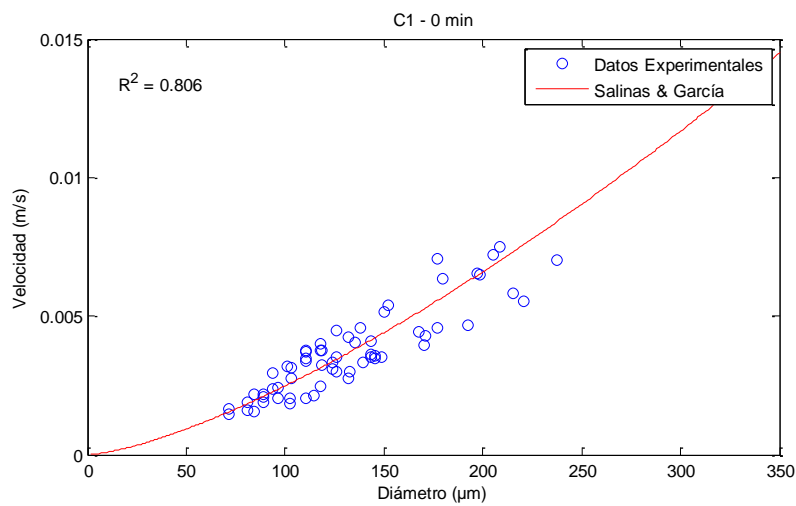


Figura 24. Velocidades de caída sedimentos Clase A para $t = 0$ min

El coeficiente de correlación de 0.806 es adecuado mostrando la bondad del ajuste de la ecuación de Salinas y García.

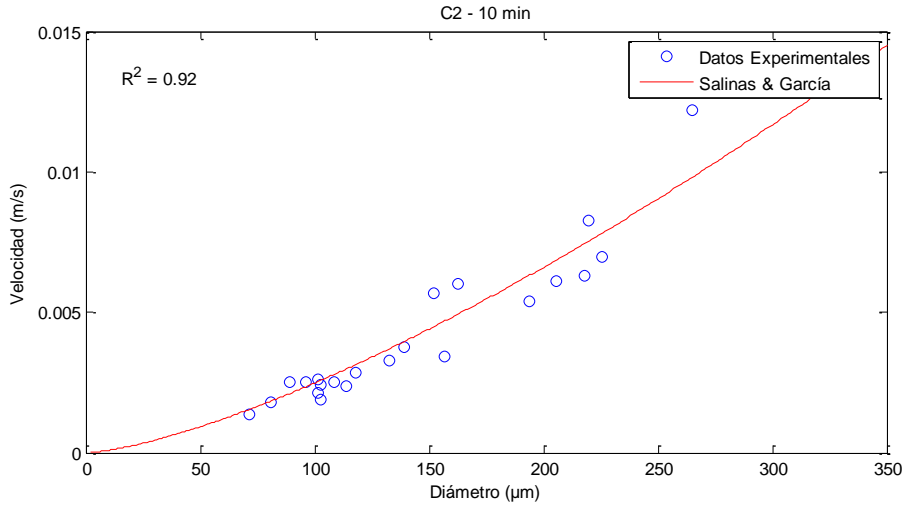


Figura 25. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 10 min

El coeficiente de correlación de 0.92 es muy bueno mostrando la bondad del ajuste de la ecuación de Salinas y García.

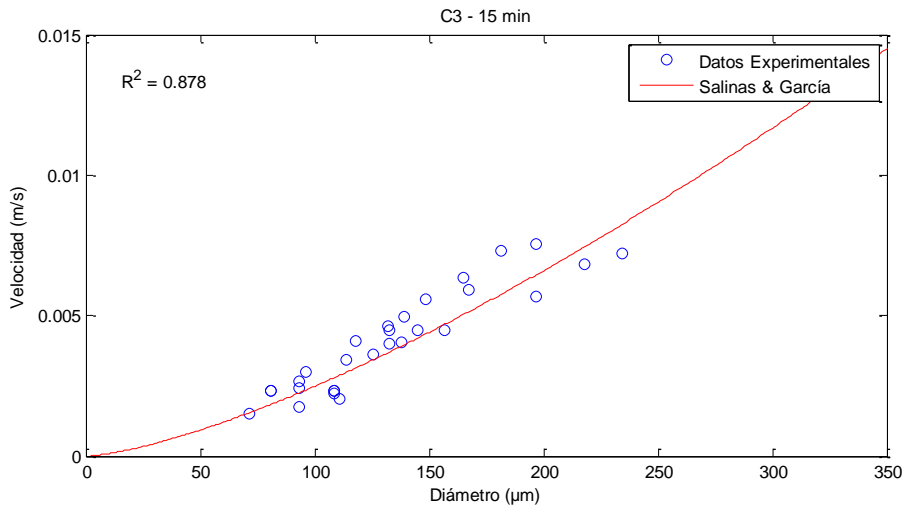


Figura 26. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 15 min

El coeficiente de correlación de 0.878 es adecuado mostrando la bondad del ajuste de la ecuación de Salinas y García.

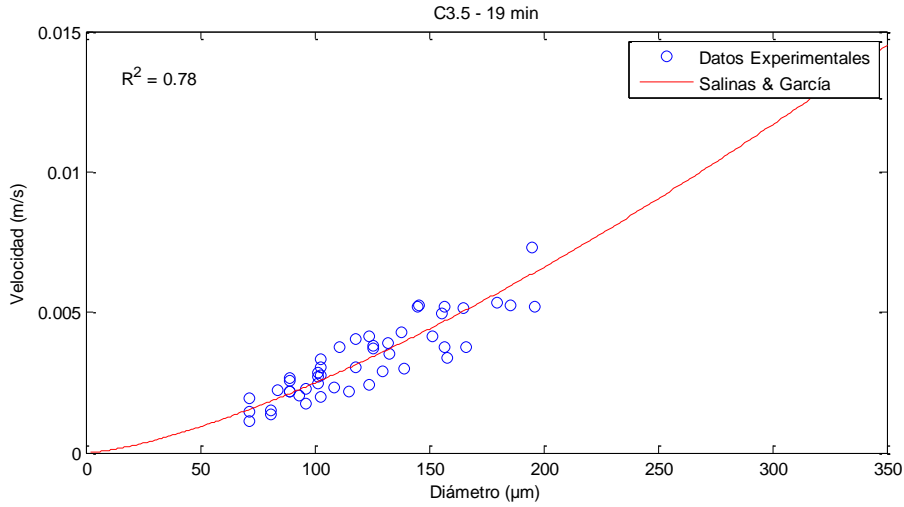


Figura 27. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 19 min

El coeficiente de correlación de 0.76 es adecuado mostrando que los datos se ajustan a la ecuación de Salinas y García para sedimentos no-cohesivos..

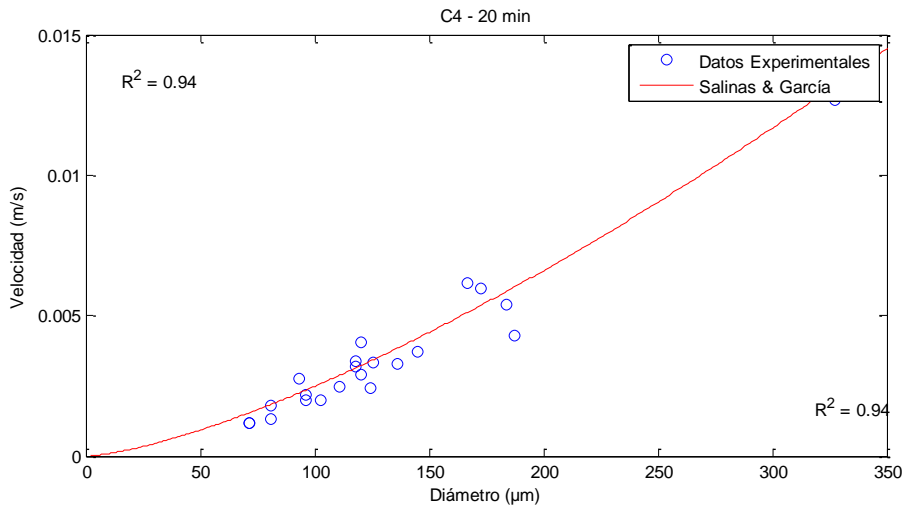


Figura 28. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 20 min

El coeficiente de correlación de 0.94 es excelente mostrando la bondad del ajuste de la ecuación de Salinas y García.

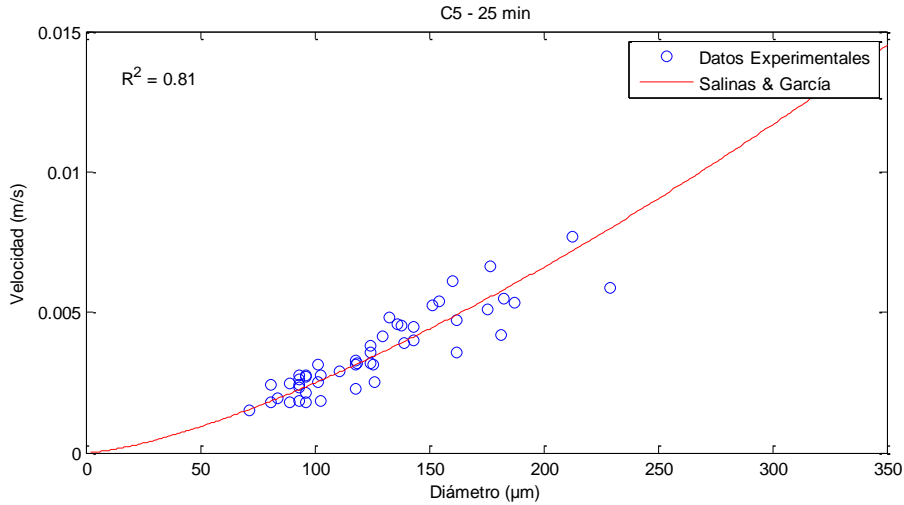


Figura 29. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 25 min

El coeficiente de correlación de 0.81 es adecuado mostrando que los datos se ajustan a la ecuación de Salinas y García para sedimentos no-cohesivos.

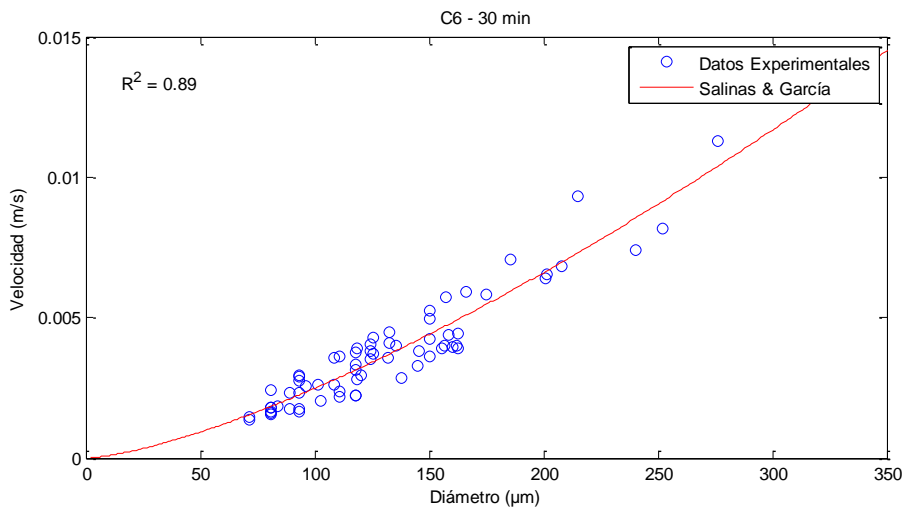


Figura 30. Velocidades de caída sedimentos Clase A t = 30 min

El coeficiente de correlación de 0.89 es adecuado mostrando que los datos se ajustan a la ecuación de Salinas y García (2011) para sedimentos no-cohesivos.

Las siguientes figuras 31 y 32 presentan la frecuencia de ocurrencia de los diferentes diámetros en cada uno de los periodos de captura de imágenes para el cálculo de la velocidad de caída de sedimentos de clase A.

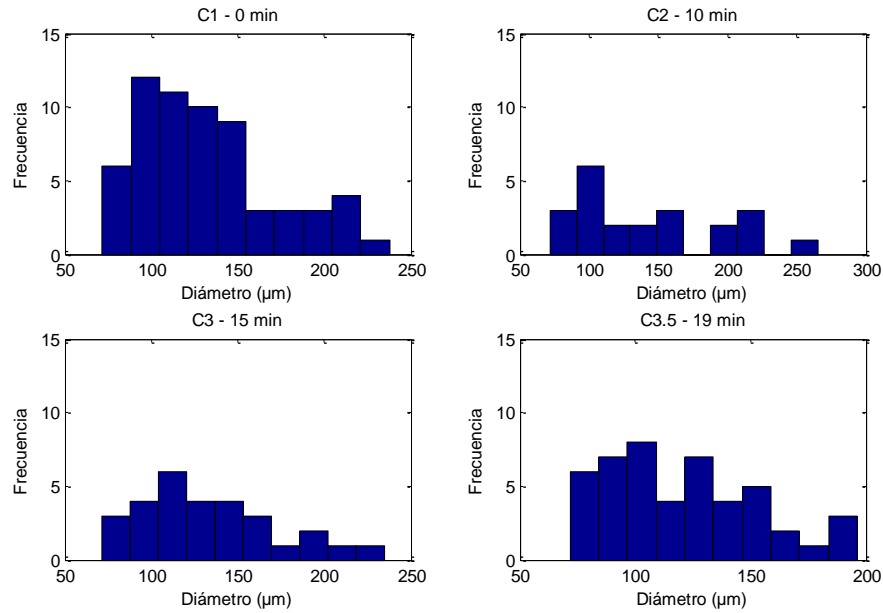


Figura 31. Histogramas de frecuencias de la Clase A de $t = 0$ min a $t = 19$ min

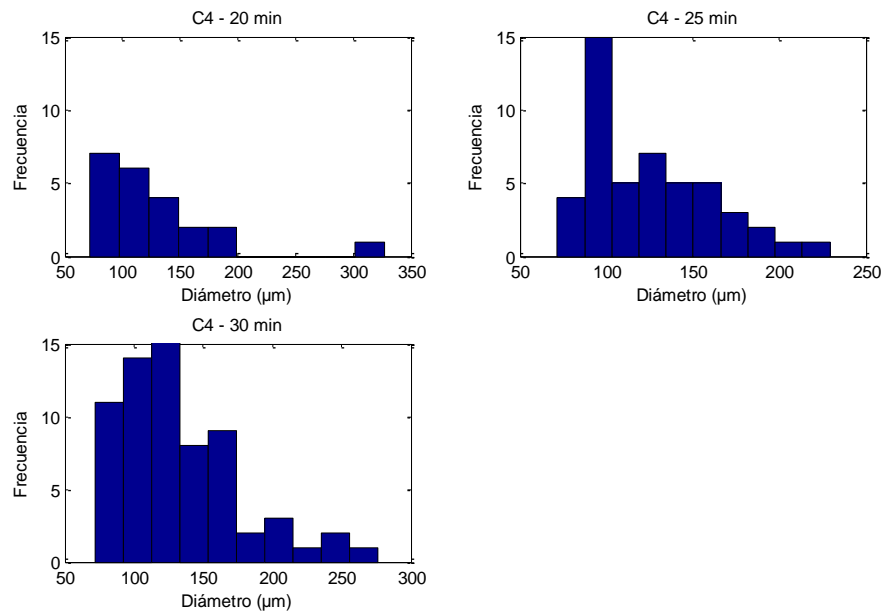


Figura 32. Histogramas de frecuencias de la Clase A de $t = 20$ min a $t = 30$ min

Los resultados de velocidades calculadas por PTV para sedimentos del grupo A se ajustaron de manera adecuada a la ecuación de Stokes modificada por Salinas y García (2011), (ecuación 18). Es decir tuvieron un comportamiento no-cohesivo, ver figuras (24 a 30). El rango de tamaños se mantuvo entre 0.1 mm (100 micrones) y 0.25 mm (250 micrones). En este experimento no se aprecia un efecto de aglomeración de partículas puesto que se encuentran en un rango cercano al valor del tamiz utilizado de 0.15 mm. La ecuación de ajuste tiene en cuenta el efecto de la turbulencia del fluido en el cálculo de la velocidad de caída de los sedimentos en suspensión, son escasas las formulas en la literatura científica que tienen en cuenta ese efecto.

En los histogramas de frecuencias de diámetro no se nota un claro aumento de los diámetros a medida que pasa el tiempo del experimento. Esto se debe a las propiedades de los sedimentos que en el momento de ingresar al agua no se consideran del todo cohesivos, contrario a lo obtenido en los otros grupos.

5.2 Ajustes para sedimentos Clase B

Las siguientes figuras 33 a 41 presentan los resultados experimentales de velocidades de caída de sedimentos de la clase B calculados por medio de la técnica PTV. Con estos resultados se utilizó el modelo propuesta en esta investigación para la velocidad de caída de sedimentos cohesivos (ecuación 34). Hubo necesidad de calibrar los parámetros b y c para cada periodo de captura de datos experimentales. En las figuras se muestran los valores de b y c que mejor reproducen los valores experimentales y la curva de ajuste resultante (línea roja).

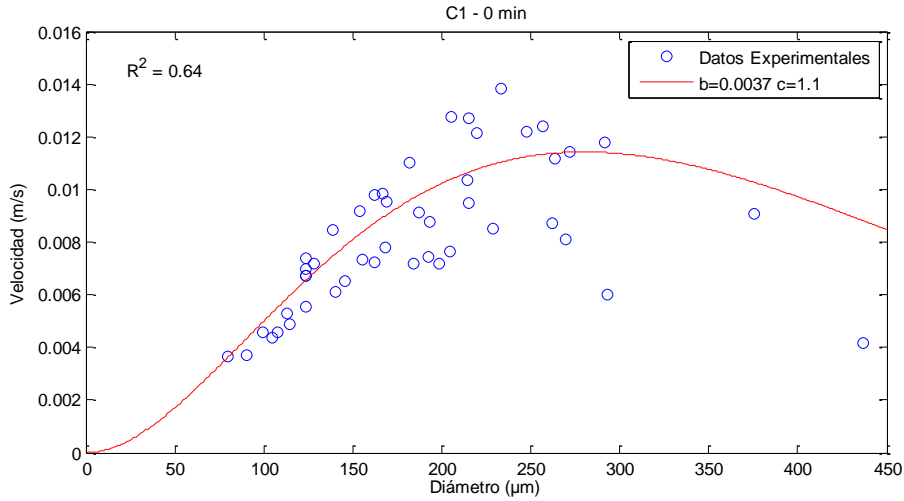


Figura 33. Velocidades de caída sedimentos Clase B $t = 0$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.0037 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.64 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

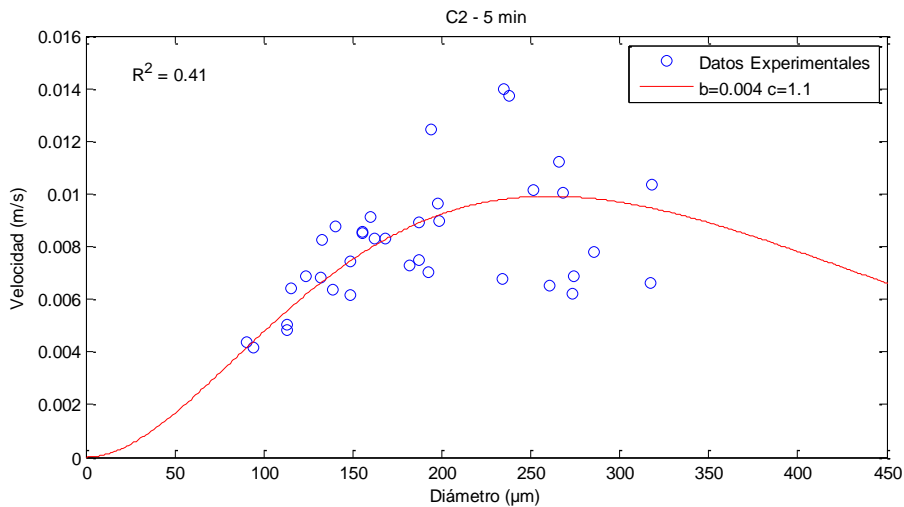


Figura 34. Velocidades de caída sedimentos Clase B $t = 5$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.004 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.41 es aceptable, existe algo de dispersión por las limitaciones del método en 2D, pero demuestran que la ecuación 34 es adecuada.

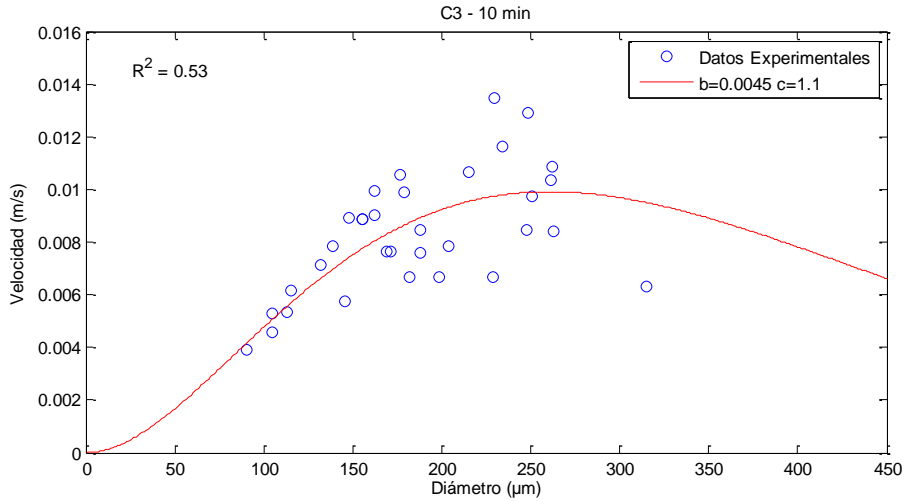


Figura 35. Velocidades de caída sedimentos Clase B $t = 10$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.0045 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.53 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

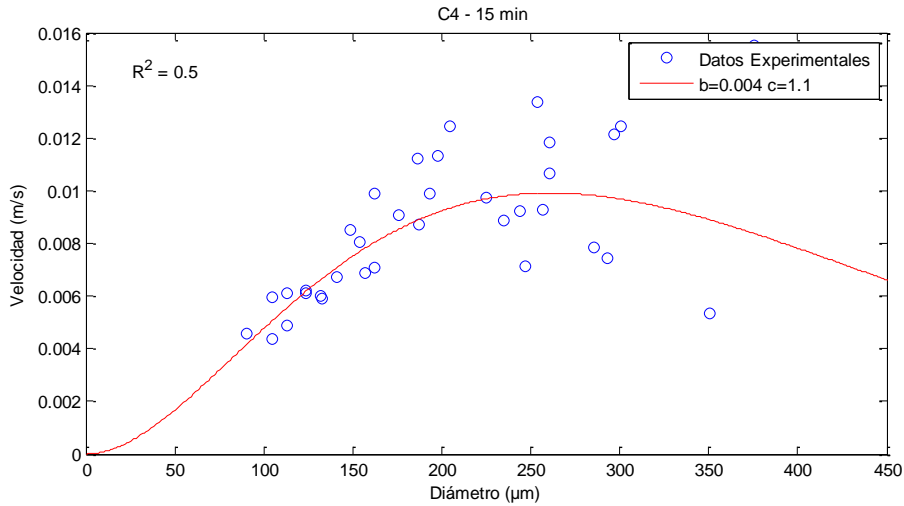


Figura 36. Velocidades de caída sedimentos Clase B $t = 15$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.004 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.5 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

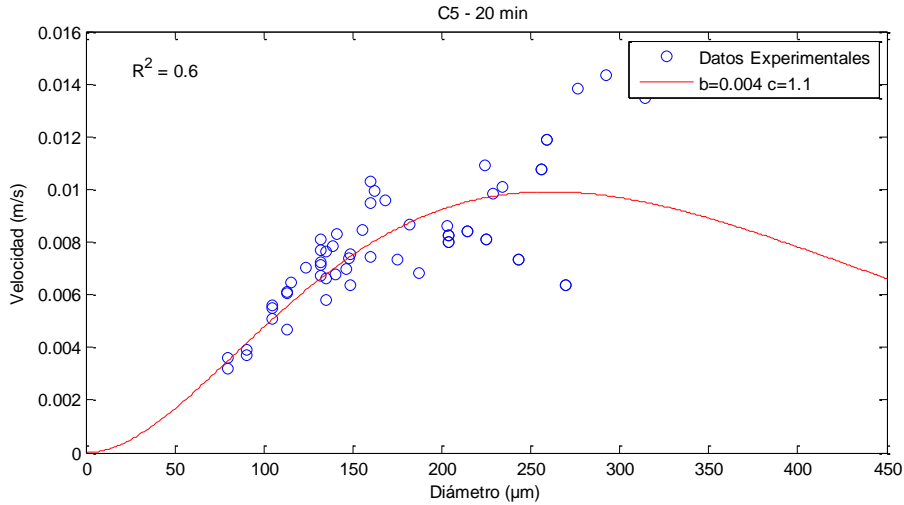


Figura 37. Velocidades de caída sedimentos Clase B $t = 20$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.004 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.60 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

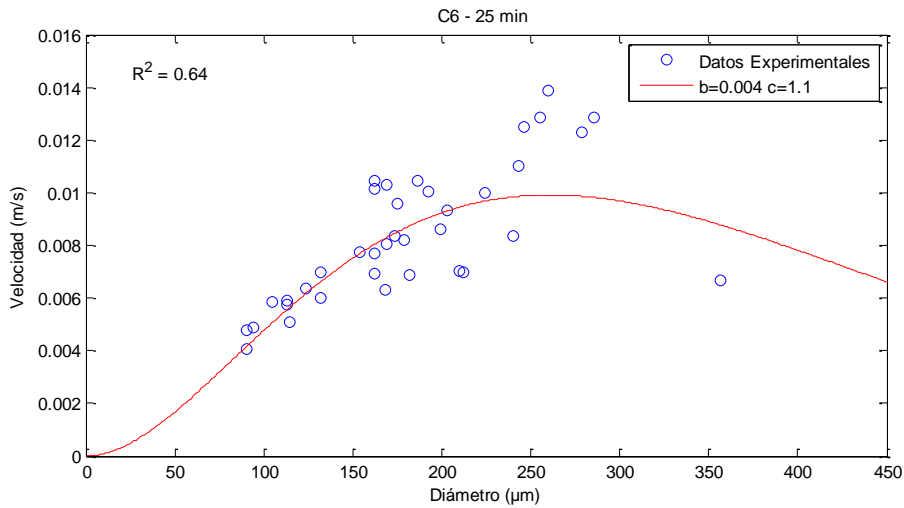


Figura 38. Velocidades de caída sedimentos Clase B $t = 25$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.004 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.64 demuestra la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

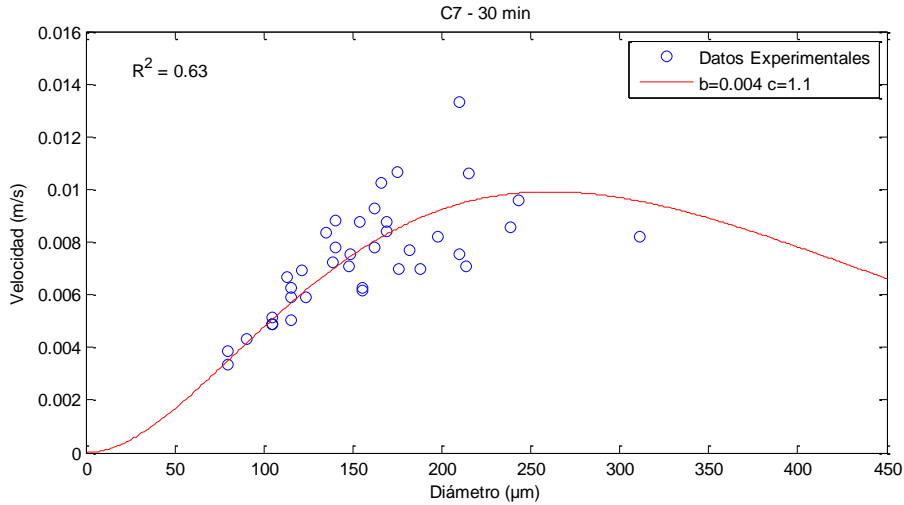


Figura 39. Velocidades de caída sedimentos Clase B $t = 30$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.004 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.63 indica que la ecuación 34 es capaz de reproducir los resultados experimentales..

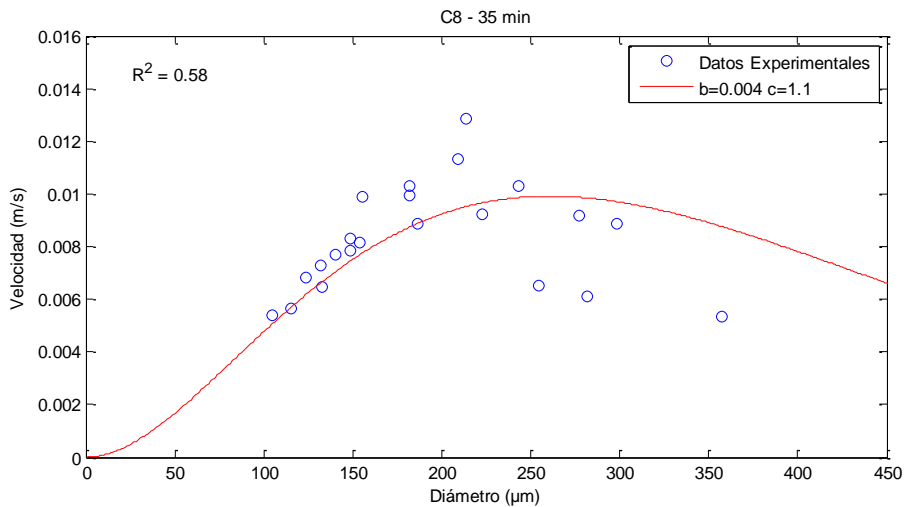


Figura 40. Velocidades de caída sedimentos Clase B $t = 35$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.004 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.58 indica que la ecuación 34 es capaz de reproducir los resultados experimentales..

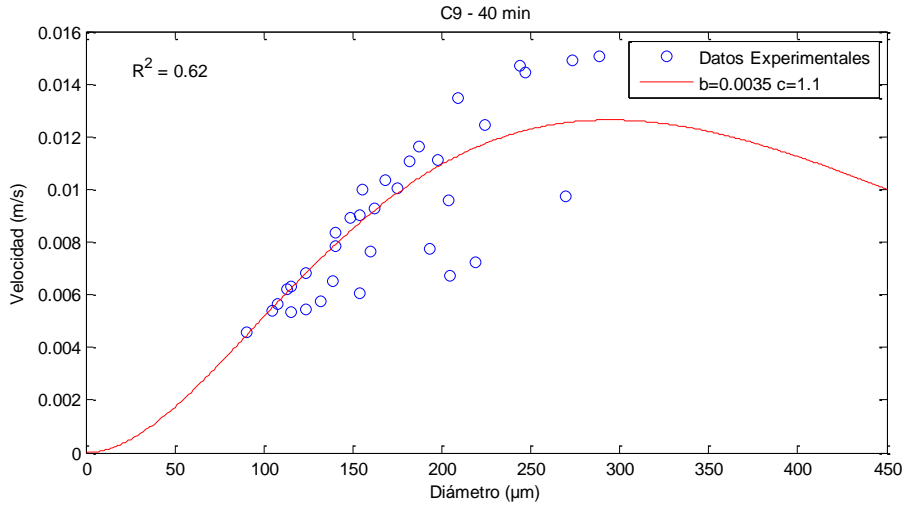


Figura 41. Velocidades de caída sedimentos Clase B t = 40 min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.0035 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.62 indica que la ecuación 34 es capaz de reproducir los resultados experimentales..

Las siguientes figuras 42 a 44 presentan la frecuencia de ocurrencia de los diferentes diámetros en cada uno de los periodos de captura de imágenes para el cálculo de la velocidad de caída de sedimentos de clase B.

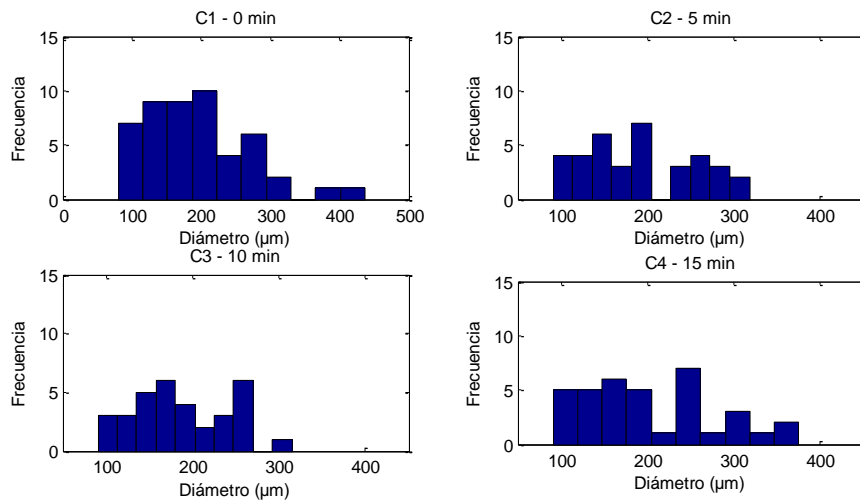


Figura 42. Histogramas de frecuencia para la Clase B de t = 0 min a t = 15 min

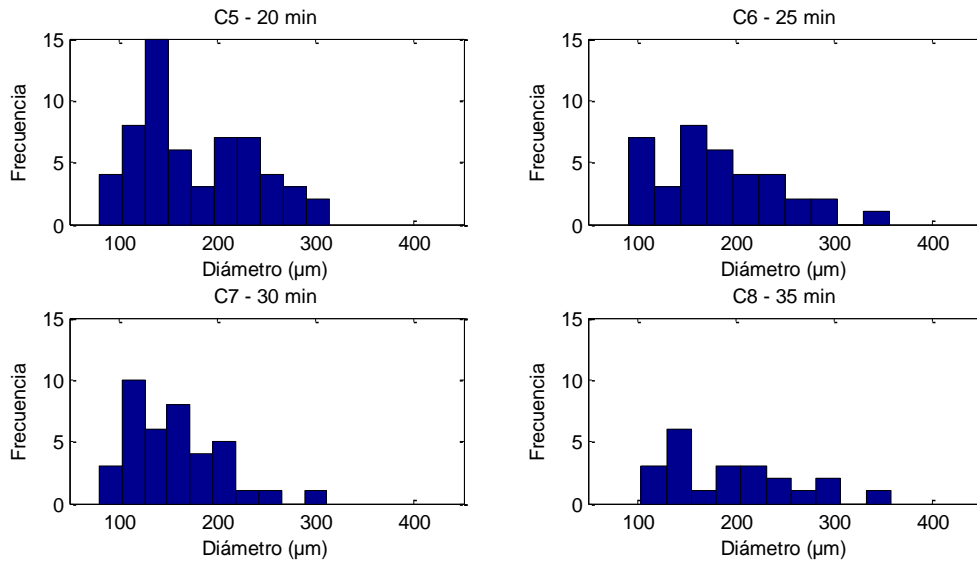


Figura 43. Histogramas de frecuencia para la Clase B de $t = 20$ min a $t = 25$ min

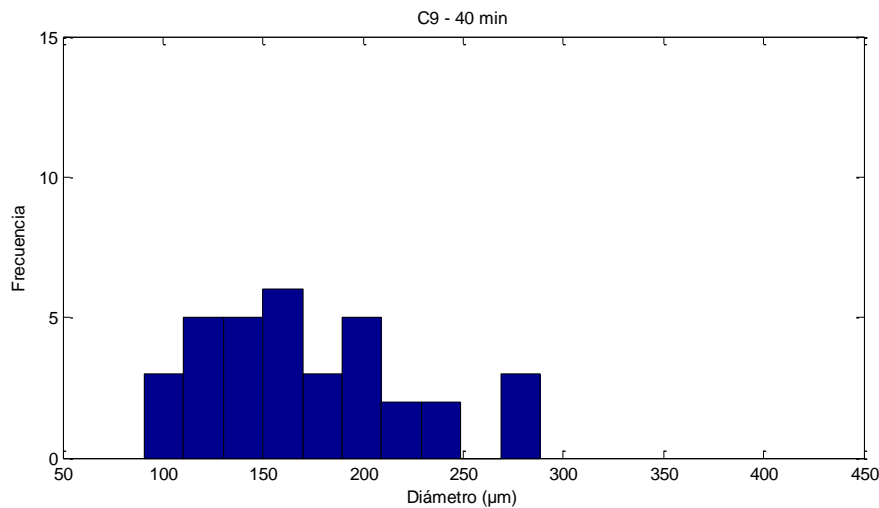


Figura 44. Histogramas de frecuencia para la Clase B de $t = 40$ min

Los resultados de velocidades de caída medidos por medio de la técnica PTV se ajustaron de manera adecuada a la ecuación (34) obtenida al reemplazar en la fórmula de Stokes la ecuación de Lau y Krishnappan (1977) para la densidad de un flóculo. Es decir presentaron un comportamiento cohesivo. Los valores promedio de los coeficientes b y c que mejor reprodujeron los resultados fueron de 0,004 y 1,1 respectivamente. El rango de tamaños

encontrado corrobora este hecho pues se pudieron medir flóculos desde 80 micrones hasta 400 micrones. Esto fue en cierta forma inesperado puesto que teóricamente sedimentos mayores de 65 micrones deberían presentar comportamiento no-cohesivo. Sin embargo en vista de la aglomeración inicial de estos sedimentos por su conformación, al entrar en contacto con el agua se disgregaron y aparecieron partículas de tamaño menor, es decir cohesivas. Estas partículas por efecto de la hidrodinámica volvieron a tener contacto con otras partículas y el proceso de floculación se presentó, tal como se describe de manera teórica. Es importante notar que los flóculos formados son bastante compactos y no presentaron disminución en la velocidad de caída para tamaños inferiores a 300 micrones. Para tamaños superiores sí se presenta una disminución en la velocidad de caída tal como lo expresa la curva de ajuste teórica (figuras 33 a 41). Sin embargo se debe notar que la gran mayoría de los flóculos observados y medidos por la técnica PTV se encuentran en tamaños menores a 400 micrones. La curva teórica predice una disminución de la velocidad de caída para tamaños mayores y se requerirían más datos experimentales de esos tamaños para corroborar ese comportamiento.

Del análisis de los histogramas se puede notar un aumento en los diámetros mayores a 200 micrones para tiempos experimentales entre 20 y 30 minutos. Esto se debe al carácter cohesivo de estos sedimentos que como se explicó anteriormente al disgregarse en agua presentan partículas menores a 65 micrones. Para tiempos mayores a 30 minutos este comportamiento ya no se refleja y la explicación probable es el intercambio de agua necesario dadas las limitaciones de nuestro tanque experimental.

5.3 Ajustes para sedimentos Clase C

Las siguientes figuras 45 a 57 presentan los resultados experimentales de velocidades de caída de sedimentos de la clase C calculados por medio de la técnica PTV. Con estos resultados se utilizó el modelo propuesta en esta investigación para la velocidad de caída de sedimentos cohesivos (ecuación 34). Hubo necesidad de calibrar los parámetros b y c para cada periodo de captura de datos experimentales. En las figuras se muestran los valores de b y c que mejor reproducen los valores experimentales y la curva de ajuste resultante (línea roja).

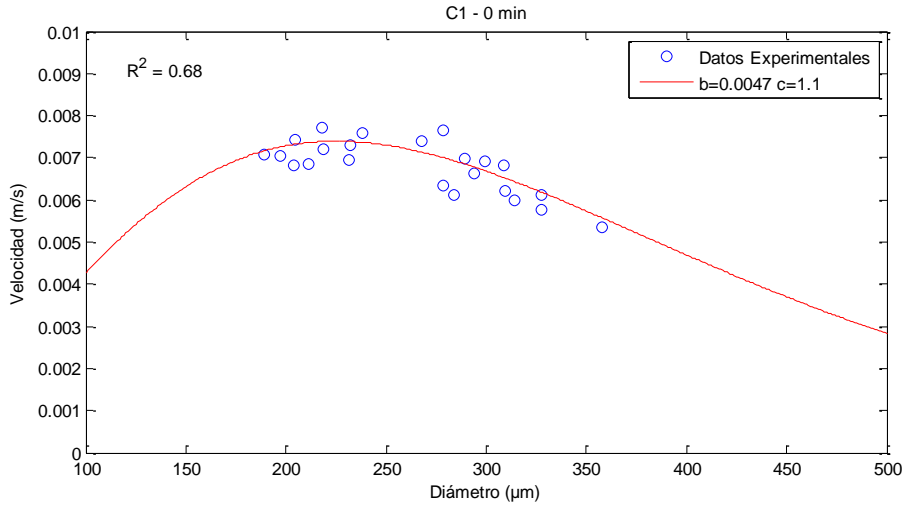


Figura 45. Velocidades de caída sedimentos Clase C $t = 0$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.0047 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.68 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

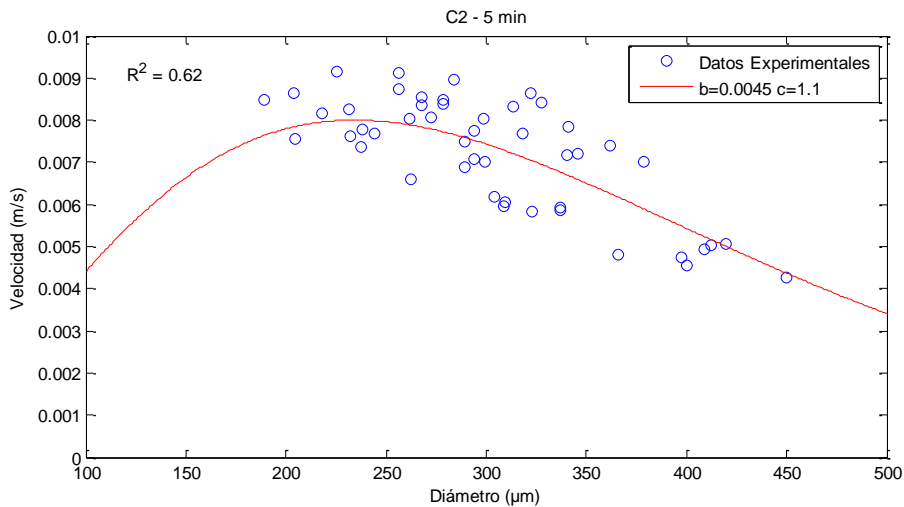


Figura 46. Velocidades de caída sedimentos Clase C $t = 5$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.0045 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.62 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

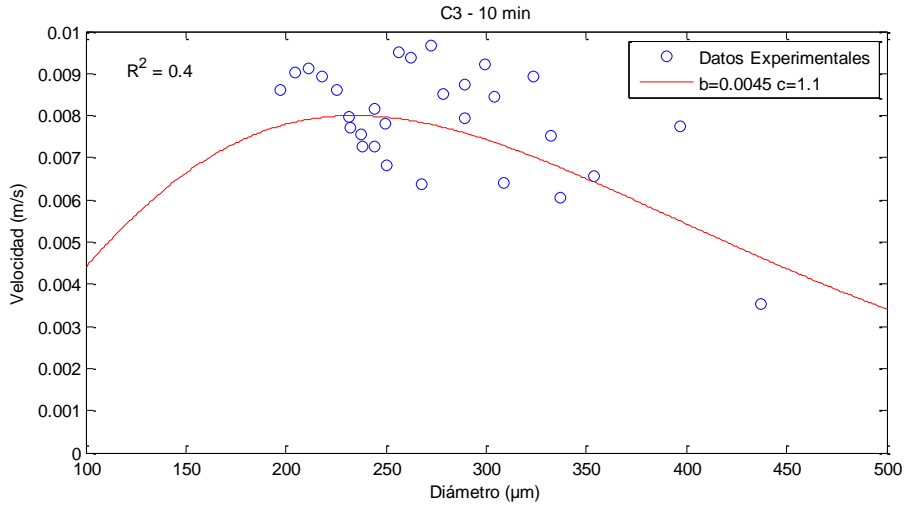


Figura 47. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 10 min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.004 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.4 indica que existe algo de dispersión en los resultados lo cual puede ser debido a la forma muy irregular de estos flóculos, lo cual afecta la eficacia del algoritmo al tratar de formar pares. Sin embargo muestra que la ecuación 34 es capaz de reproducir los resultados experimentales.

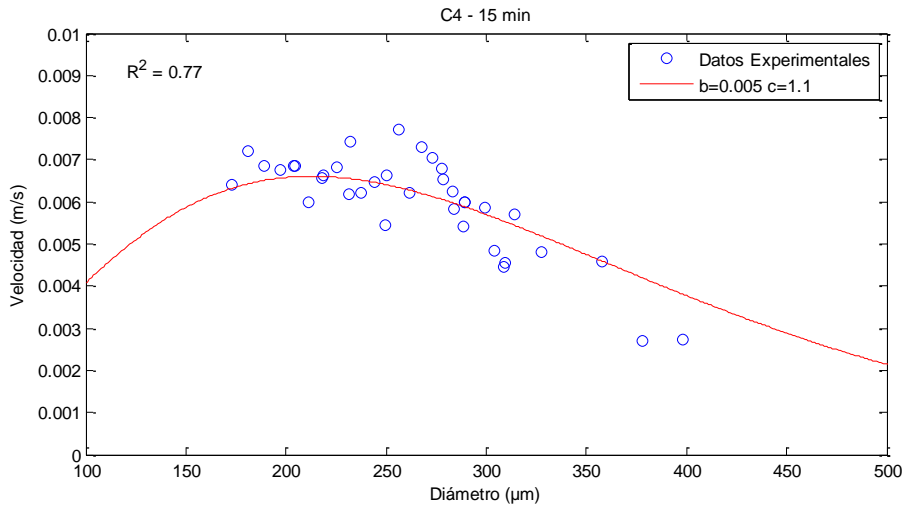


Figura 48. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 15 min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.005 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.77 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

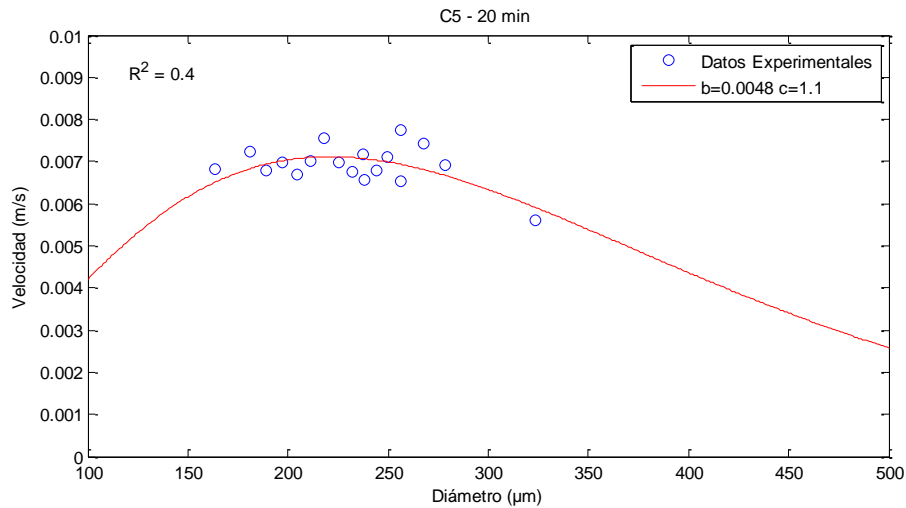


Figura 49. Velocidades de caída sedimentos Clase C $t = 20$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.0048 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.4 indica que existe algo de dispersión en los resultados lo cual puede ser debido a la forma muy irregular de estos flóculos y al carácter tridimensional de estos el cual no es captado en las imágenes bidimensionales de esta investigación. Sin embargo muestra que la ecuación 34 es reproduce la tendencia en los resultados experimentales..

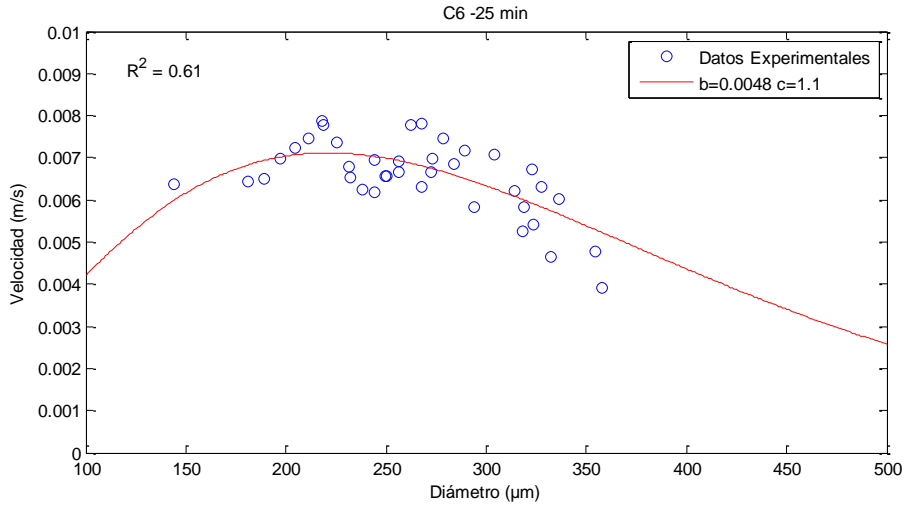


Figura 50. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 25 min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para t=25 minutos, fueron 0.0048 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.61 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

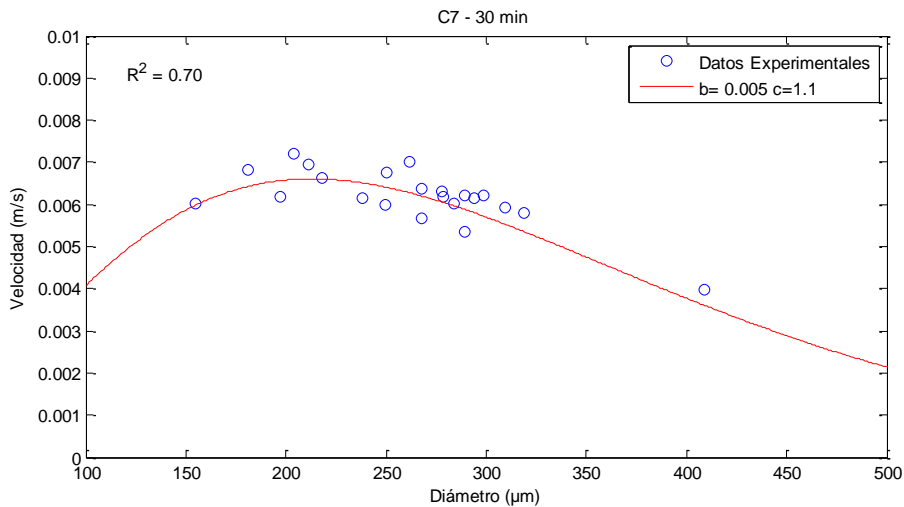


Figura 51. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 30 min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.005 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.70 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

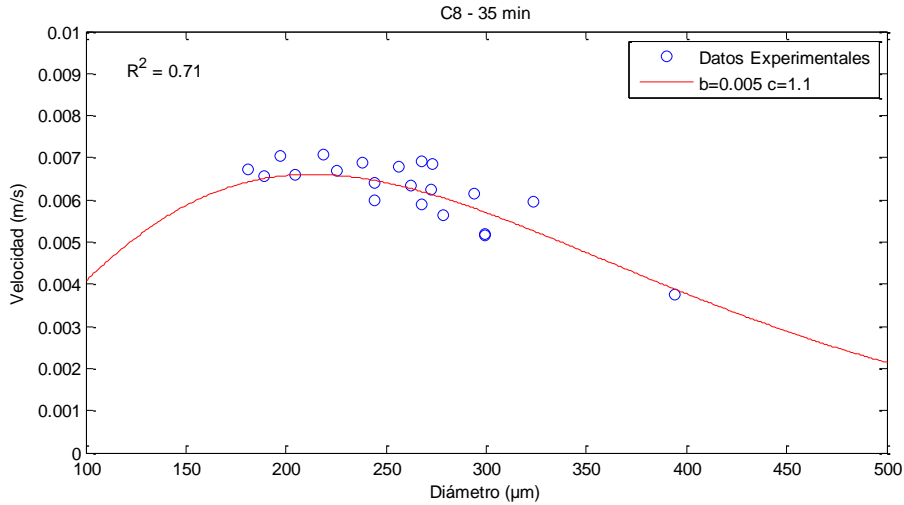


Figura 52. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 35 min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.005 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.71 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

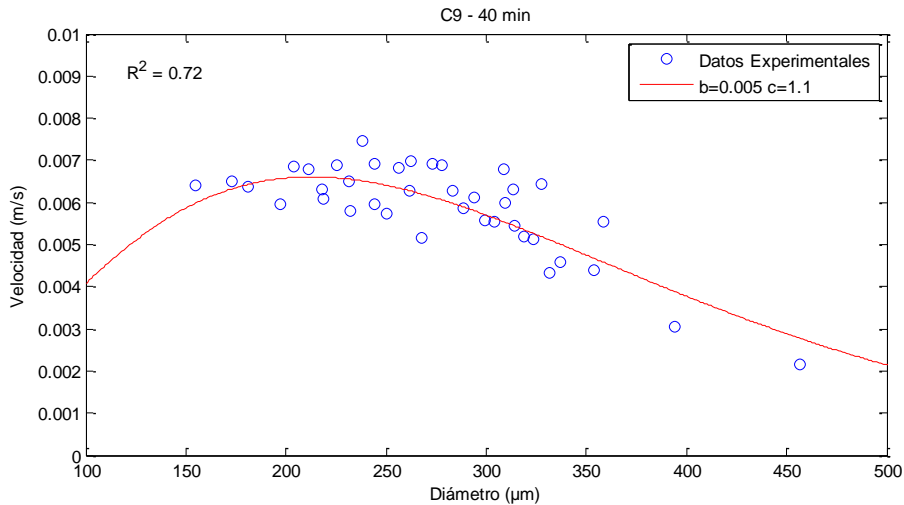


Figura 53. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 40 min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.005 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.72 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34, incluso para valores grandes de diámetros de los flocs (más de 400 µm).

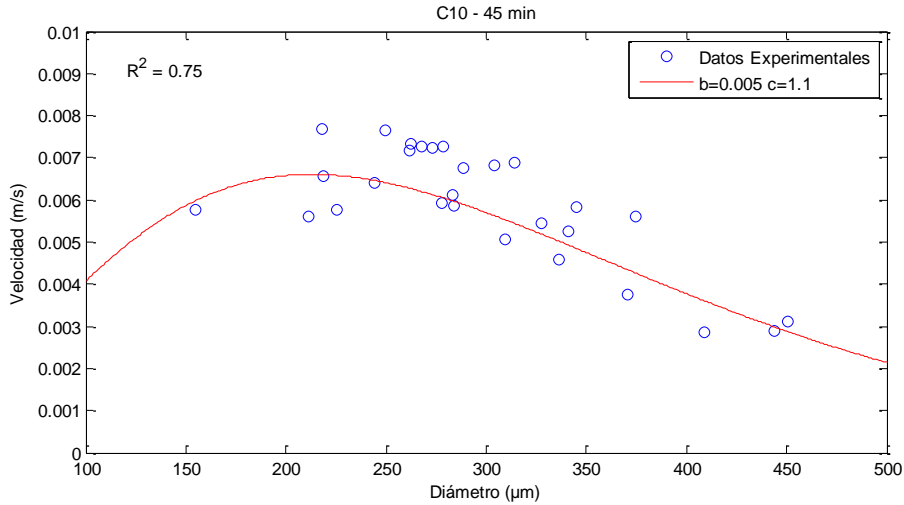


Figura 54. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 45 min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.005 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.78 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34, incluso para valores grandes de diámetros de los flocs..

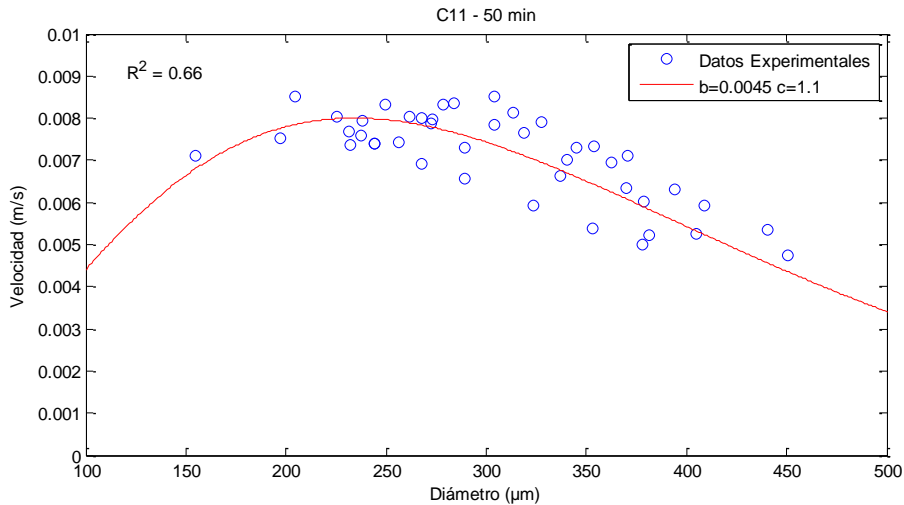


Figura 55. Velocidades de caída sedimentos Clase C t = 50 min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.0045 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.66 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34, incluso para valores grandes de diámetros de los flóculos.

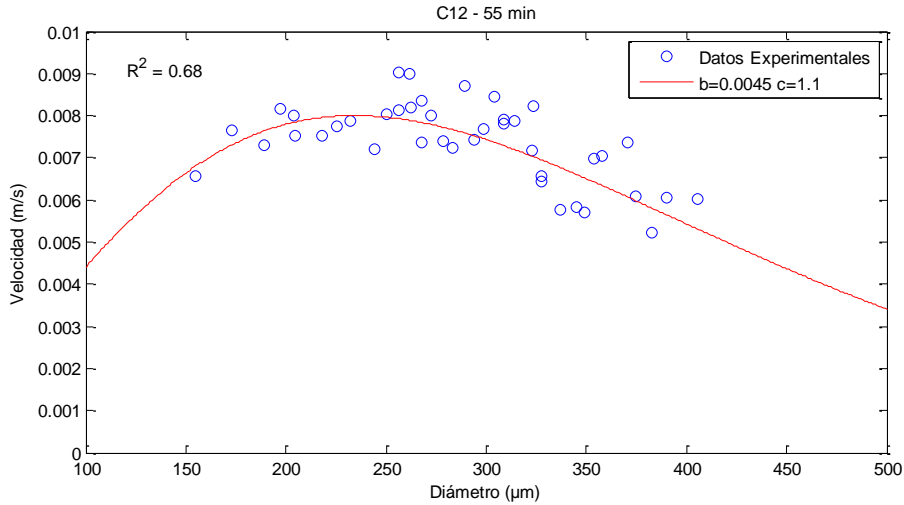


Figura 56. Velocidades de caída sedimentos Clase C $t = 55$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.0045 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.68 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

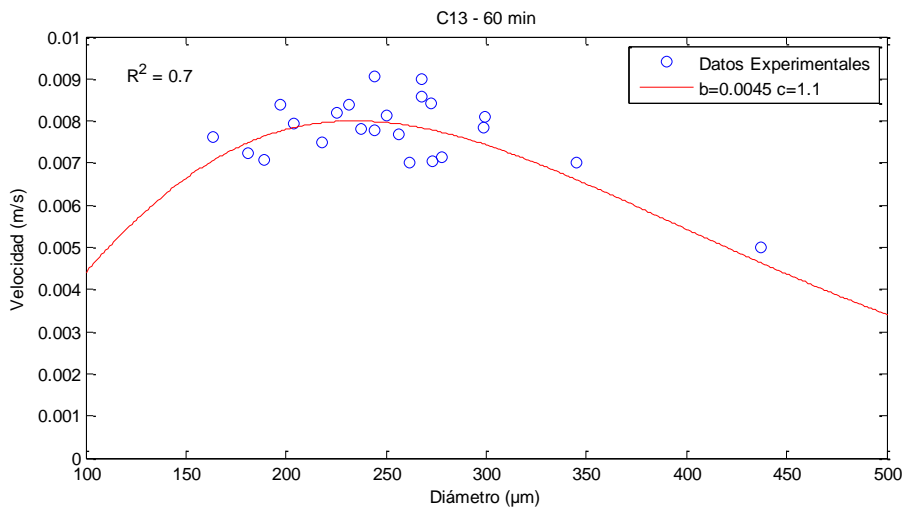


Figura 57. Velocidades de caída sedimentos Clase C $t = 60$ min

Los valores de b y c que mejor reprodujeron los datos experimentales para este tiempo de captura fueron 0.0045 y 1.1 respectivamente. El coeficiente de correlación obtenido de 0.70 corrobora la buena reproducción de resultados por la ecuación 34.

Las siguientes figuras 58 a 61 presentan la frecuencia de ocurrencia de los diferentes diámetros en cada uno de los periodos de captura de imágenes para el cálculo de la velocidad de caída de sedimentos de clase C.

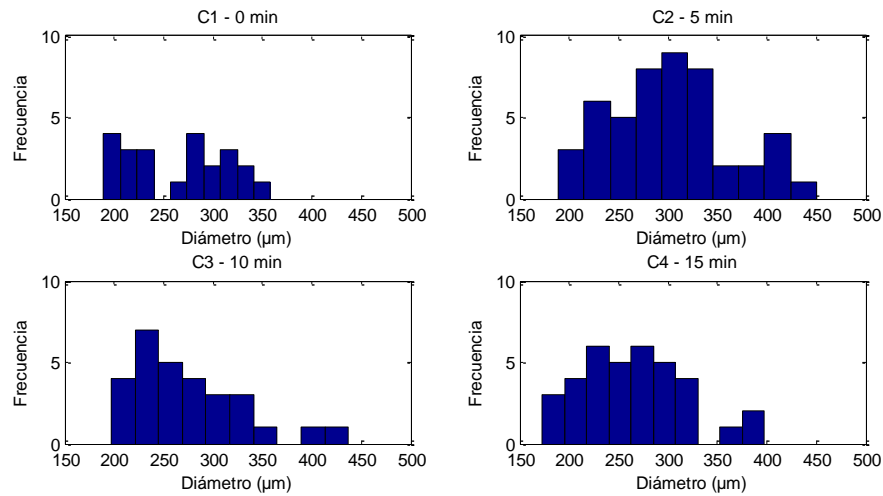


Figura 58. Histogramas de frecuencia para la Clase C de $t = 0$ min a $t = 15$ min

En estos histogramas se nota un incremento de los diámetros a medida que aumenta el tiempo del experimento, lo cual es un indicio del proceso de floculación de los sedimentos clase C que presentan un comportamiento típicamente cohesivo.

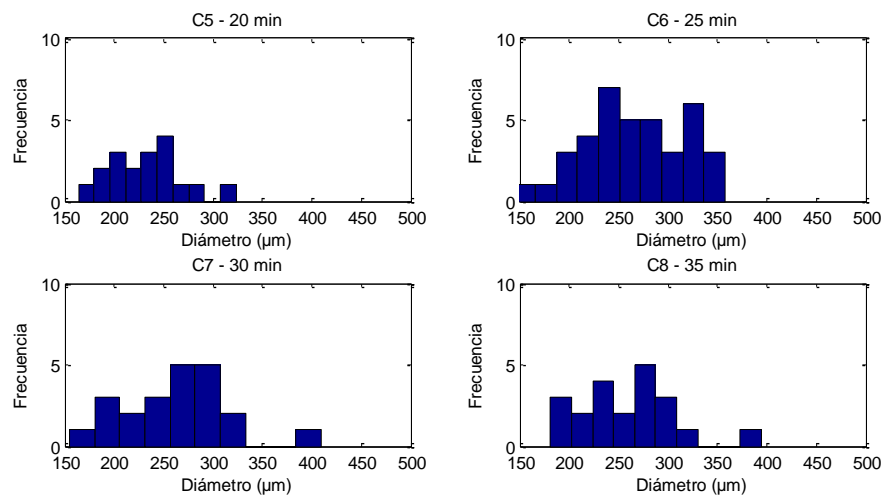


Figura 59. Histogramas de frecuencia para la Clase C de $t = 20$ min a $t = 35$ min

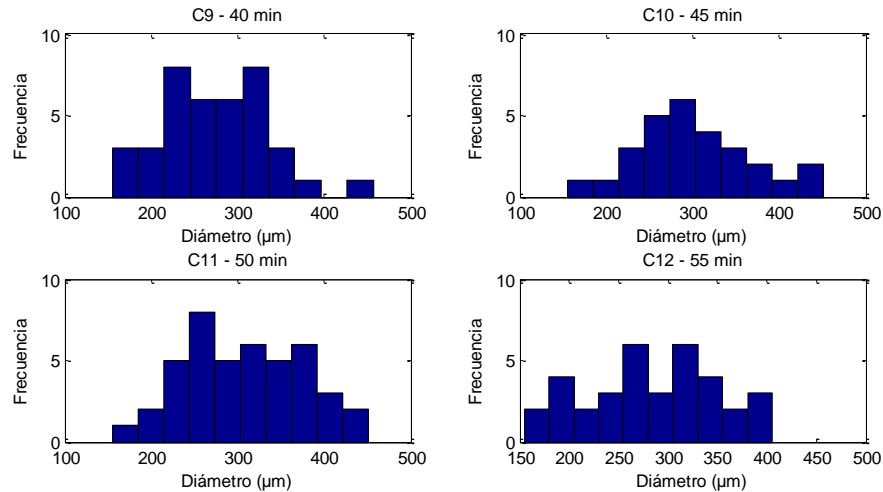


Figura 60. Histogramas de frecuencia para la Clase C de $t = 40$ min a $t = 55$ min

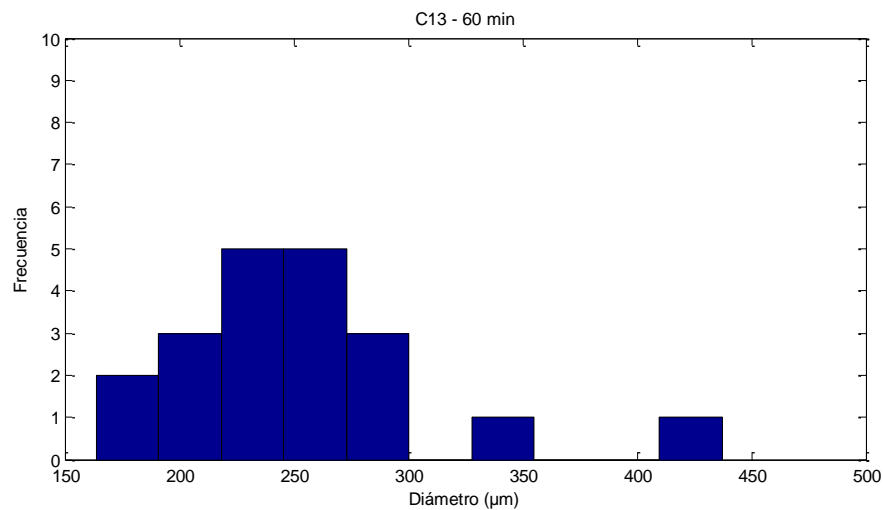


Figura 61. Histogramas de frecuencia para la Clase C de $t = 60$ min

Este grupo tal como se esperaba presentó un comportamiento típicamente cohesivo. Los resultados de mediciones de velocidades de caída por PTV se ajustaron a la ecuación (34) con valores promedio de $b = 0.0045$ y de $c = 1.1$. En este grupo se presentaron tamaños superiores a 300 micrones mostrando un gran efecto de coagulación. Sin embargo, las velocidades de caída demuestran diferentes tipos de consistencia de los flóculos. Para tamaños entre 100 y 200 micrones las velocidades de caída del grupo C son mayores a las velocidades de caída del grupo B. Esto quiere decir que para esos tamaños los flóculos del grupo C son más compactos, poseen mayor número de partículas primarias y menos agua. Sin embargo, para

valores superiores a los 200 micrones esa tendencia se invierte y las velocidades de caída del grupo C son muy inferiores a las del grupo B mostrando que para esos tamaños los flóculos del grupo C son menos compactos (menos densos). En efecto se aprecia que para tamaños mayores de 200 ya hay un efecto de disminución de la velocidad de caída. La Tabla 9 compara las velocidades de caída medias según las curvas de mejor ajuste para cada uno de los grupos lo cual corrobora la diferencia de comportamiento de los flóculos en los grupos B y C y de las partículas en el grupo A.

Del análisis de los histogramas se puede notar un aumento en los diámetros mayores a 200 micrones para tiempos experimentales entre 20 y 30 minutos. Esto se debe al carácter cohesivo de estos sedimentos ya que están compuestos por partículas primarias menores a 65 micrones. Para tiempos mayores a 40 minutos se nota un incremento importante de diámetros mayores a 300 micrones.

Tabla 9. Comparación de velocidades de caída medias (cm/s)

Tamaño micrones	Grupo A	Grupo B	Grupo C
100	1.74	0.48	0.62
150	2.20	0.75	0.68
200	4.78	0.93	0.80
250	5.88	0.99	0.79
300	8.06	0.97	0.74
350		0.89	0.66
400		0.78	0.54

La Figura 62 presenta estas comparaciones.

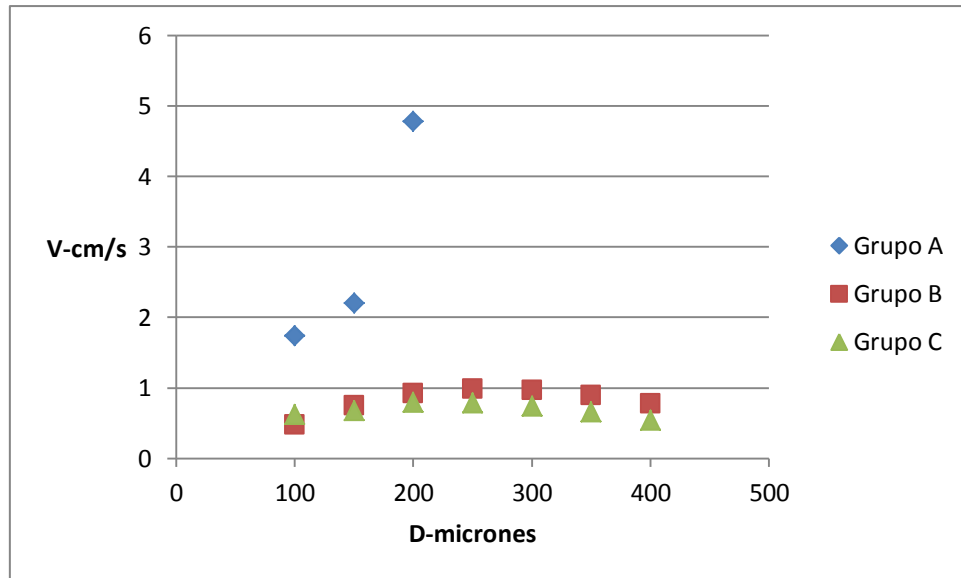


Figura 62. Velocidades de caída medias (cm/s)

El comportamiento de la velocidad de caída de los flóculos en el grupo C es típico de sedimentos cohesivos sometidos a una alta tasa de corte. Numerosos modelos en la literatura científica Khelifa and Hill (2006) predicen un aumento continuo de la velocidad de caída con el aumento del tamaño del flóculo. Desafortunadamente esos modelos han sido calibrados con datos experimentales provenientes de experimentos en tanques de sedimentación donde no hay un movimiento en la dirección transversal a la velocidad de caída. En experimentos con sedimentos cohesivos sometidos altas tasas de corte (Droppo et al. 2000, Krishnappan et al. 2002, García-Aragón et al. 2011b) se ha demostrado que la velocidad de caída decrece de manera sustancial cuando el tamaño de los flóculos se incrementa. Este hecho explica la disminución casi a cero de las velocidades de caída de los flóculos y la obtención de concentraciones de equilibrio en experimentos de deposición de sedimentos cohesivos sujetos a altas tasas de corte durante experimentos de larga duración, más de cuatro horas. Los experimentos llevados a cabo en esta investigación son de duración media, cerca de una hora, por limitaciones en el montaje experimental que exige un cambio de líquido en el tanque en ese tiempo. Igualmente la tasa de corte no es muy alta por lo cual la disminución de las velocidades de caída, la cual se puede apreciar en los datos experimentales, no llega a valores suficientes para condiciones de concentraciones de equilibrio.

5.4 Concentraciones de sólidos de las pruebas de sedimentación

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de sedimentación realizadas para cada clase de sedimento analizado, se muestran gráficas en las cuales se aprecia el comportamiento que tiene la concentración de sedimentos en la zona de análisis a lo largo del tiempo del experimento.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos en las pruebas arrojaron datos de concentración de sólidos en unidades de ml/l, por lo que fue necesario mostrar los datos en mg/l; para ello se utilizó la ecuación 37:

$$C = \frac{\rho_s V_s}{V_m} \quad (37)$$

Donde C es la concentración de sólidos en miligramos por litro, ρ_s la densidad del sedimento seco en miligramos por mililitro, V_s el volumen del sedimento en el cono en mililitros y V_m el volumen de la muestra en litros.

Finalmente se dividió el resultado de la concentración entre 230 lts, que representa el volumen de agua dentro del tanque, para así tener un valor de concentración en mg/l.

Para los sedimentos clase A sólo se tuvo sedimentación en el área de análisis hasta los 15 minutos después de haber empezado el experimento, como se observa en la Figura 63, debido a que el tamaño de las partículas corresponde a sedimentos no-cohesivos lo que corrobora que su velocidad de caída es mayor por lo cual no existen partículas suspendidas en el tanque. La Tabla 10 presenta un resumen de éstos datos.

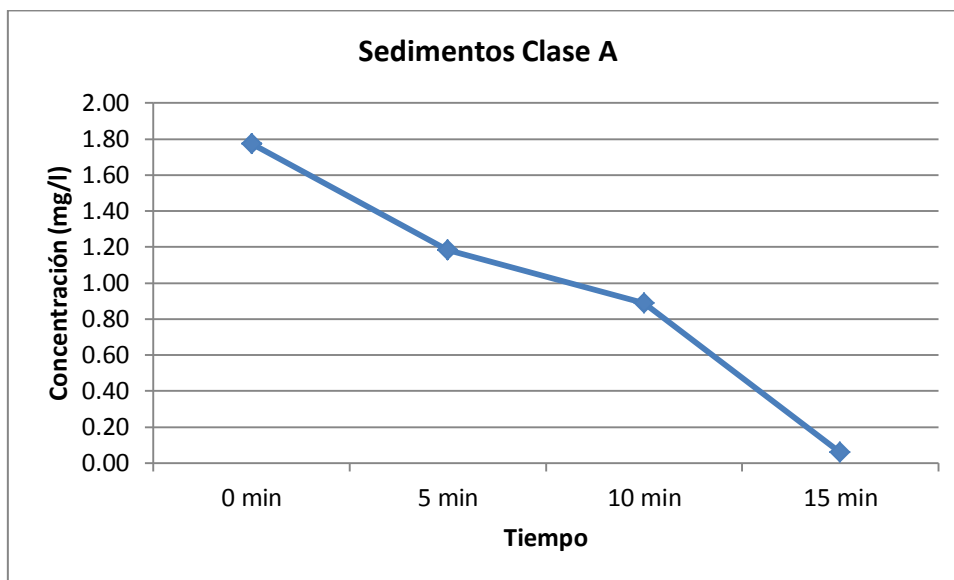


Figura 63. Concentraciones para sedimentos Clase A

Tabla 10. Concentraciones para sedimentos Clase A

	Tiempo	Concentración (ml/l)	Concentración (mg/l)
t ₀	0 min	0.3	1.77
t ₁	5 min	0.2	1.18
t ₂	10 min	0.15	0.89
t ₃	15 min	0.01	0.06

Debido a su carácter cohesivo los sedimentos clase B, se mantuvieron durante mayor tiempo suspendidos dentro del tanque ya que, como se aprecia en las gráficas de velocidad de caída (Figuras 33 a 41), debido a la aglomeración de las partículas esta velocidad comienza a disminuir debido a la porosidad de los flóculos, lo que se refleja en una mayor concentración se sedimentos y un mayor tiempo de suspensión de los mismos (Figura 64).

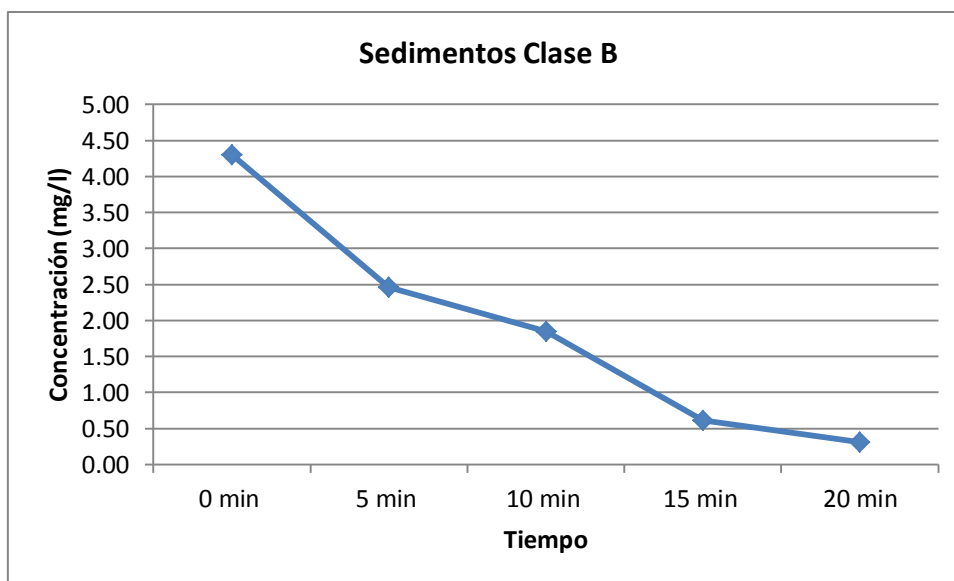


Figura 64. Concentraciones para sedimentos Clase B

Tabla 11. Concentraciones para sedimentos Clase B

	Tiempo	Concentración (ml/l)	Concentración (mg/l)
t ₀	0 min	0.7	4.30
t ₁	5 min	0.4	2.46
t ₂	10 min	0.3	1.84
t ₃	15 min	0.1	0.61
t ₄	20 min	0.05	0.31

Finalmente para las partículas clase C, a pesar de su comportamiento cohesivo no reflejaron una concentración tan significativa como los de clase B, pero sin embargo la concentración se mantuvo casi constante hasta los 10 minutos, como se aprecia en la Figura 65, debido a que su velocidad de caída es menor con respecto a sedimentos de mayor tamaño, lo cual propicia que se mantengan suspendidos una mayor cantidad de tiempo. Lo anterior se refleja en la disminución de la concentración solo hasta después de los 10 minutos antes mencionados.

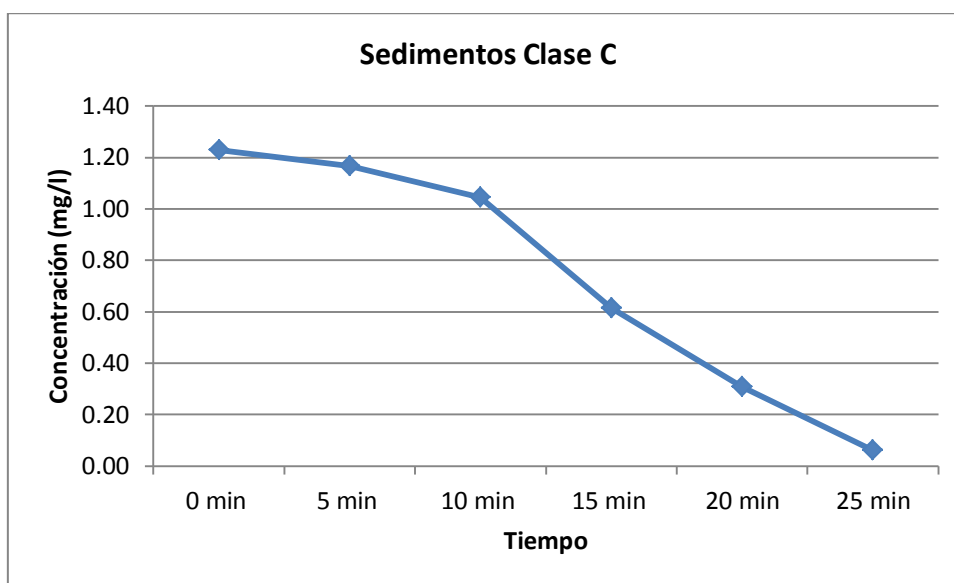


Figura 65. Concentraciones para sedimentos Clase C

Tabla 12. Concentraciones para sedimentos Clase B

	Tiempo	Concentración (ml/l)	Concentración (mg/l)
t0	0 min	0.2	1.23
t1	5 min	0.19	1.17
t2	10 min	0.17	1.04
t3	15 min	0.1	0.61
t4	20 min	0.05	0.31
t5	25 min	0.01	0.06

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente investigación se pudo utilizar un modelo físico reducido de un tanque para recirculación en acuicultura con el objetivo de determinar las características de sedimentación de los agregados formados con comida para peces.

Se pudo determinar que los difusores deben ser convenientemente distribuidos en la columna de agua del tanque de manera que las mayores velocidades ocurran cerca de la superficie y las menores cerca del fondo. De esta manera se facilita el proceso de coagulación por contacto en la parte superior de la columna de agua y el proceso de sedimentación en la parte inferior de la columna de agua. La configuración A utilizada es representativa de este tipo de comportamiento, el brazo en la parte superior incrementa las velocidades cerca de la superficie y los difusores en el fondo están dispuestos a contraflujo para disminuir la velocidad en el fondo.

Para la medición de las velocidades de caída de los flóculos se demostró que la técnica de velocimetría por rastreo de partículas (PTV) es apropiada. La anterior técnica no altera el flujo y con ella se puede determinar el diámetro de las partículas y su respectiva velocidad de caída. La técnica permitió la medición de velocidades de caída de flóculos de tamaños entre los 50 y 500 micrones de manera bastante adecuada. Los resultados muestran cierta dispersión, lo cual puede tener diversas causas. La primera es el carácter tridimensional de los agregados. La técnica de PTV utiliza una imagen bidimensional, es decir sólo se aprecia una de las caras del flóculo. Por lo tanto dos flóculos con una misma área (según las imágenes de PTV) pueden tener volúmenes diferentes pues no se aprecian sus otras caras y por lo tanto su velocidad de caída es diferente. La única manera de evitar ese error es utilizar una técnica tridimensional como 3D-PTV o técnicas holográficas. Otra fuente de error puede ser el algoritmo de PTV, el cual identifica pares según la intensidad de luz de los pixeles, y en formas no esféricas como los flóculos puede confundir algunas partículas.

Se analizaron diferentes modelos teóricos para velocidades de caída de sedimentos no-cohesivos y sedimentos cohesivos. Estos modelos se utilizaron para reproducir los datos experimentales de velocidades de caída por PTV. Se demostró que los sedimentos clase A tienen comportamiento no-cohesivo y que el modelo más apropiado fue el presentado por Salinas y García (ecuación 18). Igualmente se demostró que el modelo teórico propuesto en esta investigación (ecuación 34) para determinar la velocidad de caída de los agregados (sedimentos cohesivos clases B y C) es capaz de reproducir de manera adecuada los resultados experimentales. Sin embargo los parámetros b y c del modelo que relaciona la densidad de los flóculos con su tamaño deben ser obtenidos de una calibración con datos experimentales, pues esta investigación ha demostrado que esos parámetros no sólo dependen del tipo de sedimento, es decir sus características físicas, sino también de la hidrodinámica del medio en que encuentran, es decir turbulencia y tasa de corte.

Se recomienda para trabajos futuros utilizar técnicas ópticas en tres dimensiones lo que permitiría reducir la dispersión en los datos experimentales de velocidad de caída debido a las características tridimensionales de la forma de los flóculos, las cuales no se pueden observar con técnicas en dos dimensiones.

BIBLIOGRAFÍA

- Adrian, R. J. (1991). "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics". *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23, pp. 262-304.
- Ahrens, J.P. 2000. A fall velocity equation. *J. Water Por. Cost. Ocean Engng.* Vol 126, No. 6, pp.99-102.
- Camenen, B. 2007. Simple and general formula for the setting velocity of particles. *J. Hydraulic. Eng.* Vol 133, No. 2, pp 229- 233.
- Dietrich, W.E. 1982. Settling velocity of natural particles. *Water Resour. Res.*, 18(6), pp. 1615-1626.
- Droppo IG, Walling DE and Ongley ED. 2000. The influence of floc size, density and porosity on sediments and contaminant transport. In: Stone, M. (ed). *The Role of Erosion and Sediment Transport in Nutrient and Contaminant Transfer*, Waterloo, Canada. IAHS Publ. No. 263:141-147.
- Droppo I.G. (2001). Rethinking what constitutes suspended sediment. *Hydrological processes*, 14, 653-667.
- Droppo I.G (2005). Suspended sediment transport-Flocculation and particle characteristics. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Edited by M.G. Anderson. John Wiley & sons,Ltd.
- Eisma, D., A.J. Bale, M.P. Dearnaley, M.J. Fennessy, W. Van Leussen, M.A. Maldiney, A. Pfeiffer and J.T. Wells (1996) Intercomparison of in situ suspended matter (floc) size measurements. *Journal of Sea Research*, 36 (1-2), 3-14.
- García-Aragón, J., Droppo I., Krishnappan B., Trapp B. Y Jaskot C. (2011a). Erosion characteristics and floc strength of Athabasca River cohesive sediments *Journal of Soil and sediments*. 11 (2).
- García Aragón J.A., Droppo I.G., Krishnappan B., Trapp B. Y Jaskot C. (2011b) Experimental assessment of Athabasca river cohesive sediment deposition dynamics. *Water Quality Research journal of Canada*. Vol. 46, No.1, pp: 87-96.
- Graf, W. H. (1971) *Hydraulics of sediment transport*. Mc Graw Hill New York.
- Hawley, N. (1982) Settling velocity distribution of natural aggregates. *J.Geophys. Res.* 87 (C12). pp. 9489-9498.
- Hallenmeier, J. (1981) Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains. *Sedimentology*, 28, pp. 859 -865.

- Hartman, M., Tanka, O., and Svoboda, K. (1994) Free settling of non-spherical particles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol 33, pp. 1979-1983.
- Jackson, G.A. (1995) Comparing observed changes in particle size spectra with those predicted using coagulation theory. *Deep-Sea Research II*, 42(1), 159-184.
- Jiménez, A. J. and Madzen, O.S. (2003) A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments. *J. of Water Port, Coastal and Ocean Eng.* Vol. 129, No. 2, pp 69-78.
- Khelifa A. and Hill P.S. 2006. Models for effective density and settling velocity of flocs. *Jour.nal of Hydraulic Research*, Vol. 44 No. 3, pp: 390:401.
- Kranck, K. and T.G. Milligan (1992) Characteristics of suspended particles at an 11- hour anchor station in San Francisco Bay, California. *Journal of Geophysical Research*, 97 (C7), 11,373 - 11,382
- Kranenburg, C. (1994) On the fractal structure of cohesive sediment aggregates. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol. 31, pp 451-460.
- Krishnappan BG. and Marsalek J. (2002) Modelling of flocculation and transport of cohesive sediment from an on-stream stormwater detention pond. *Water Res.* 36, pp: 3849-3859.
- Krishnappan B. (2000) In situ size distribution of suspended particles in the Fraser river. *J. Hydraulic Eng. ASCE*. 126 (8), 561-569.
- Lau, Y.L. and Krishnappan, B.G. (1977) Measurement of size distribution of settling flocs. *NWRI Publication No. 97-223*.
- Lavelle, J.W. (1993) A model for estuarine sedimentation involving marine snow. In: *Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport*. Coastal and Estuarine Studies Series, 42, A.J. Mehta (ed), American Geophysical Union, Washington, 148-166.
- Li D.-H. and Ganczarczyk J. (1992) Advective transport in activated sludge flocs. *Environ. Sci. Technol.* 23, 1385-1389.
- Masaló I Ll. I. (2008) Hydrodynamic characterization of aquaculture tanks and design criteria for improving self cleaning properties.
- MaCave, I.N. (1984) Size Spectra and Aggregation of suspended Particles in the Deep Ocean. *Deep Sea Res.* 31(4), pp 329-352.
- Milligan, T.G., and P.S. Hill (1998) A laboratory assessment of the relative importance of turbulence, particle composition, and concentration in limiting maximal floc size. *Journal of Sea Research*, 30(3/4), pp. 227-241.

- Nicholas A.P. and Walling D.E. (1996) The significance of particle aggregation in the overbank deposition of suspended sediment on river floodplains. *Journal of Hydrology*, 186, 275–293.
- Ongley E.D., Krishnappan B.G., Droppo I.G., Rao S.S. and Maguire R.J. (1992) Cohesive sediment transport: Emerging issues for toxic chemical management. *Hydrobiologia*, 235/236, 177–187.31, 31.
- Phillips J.M. and Walling D.E. (1999) The particle-size characteristics of fine-grained channel deposits in the river Exe Basin. *Hydrological Processes*, 13, 1–19.
- Raffel, M., Willert, C. E. and Kompenhans, J. (1998). “Particle Image Velocimetry”. Ed. Springer.
- Rubey, W. (1933) Settling velocities of gravel, sand and silt particles. *Am. J. Sci.* Vol. 25 . pp 325-338.
- Ruiz, J. and Izquierdo A. (1997) A simple model for de break-up of the marines aggregates by turbulent shear. *Oceanologica Acta*, 20(4), pp. 597-606.
- Salinas T. H. (2007) Determinación de parámetros para flujo bifásico (sólido-líquido) por medio de técnicas ópticas. Tesis de doctorado en Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Fac. Ingeniería, UAEM, Toluca, México.
- Salinas T. H. Y García A. J. (2011) Fórmula experimental para la velocidad de caída de sedimentos en flujo transversal. *Tecnología y ciencias del agua*, vol II, núm. 2, abril - junio de 2011, pp175 – 182.
- Sepúlveda B. C. (2004) Procesos y Modelos numéricos de transporte de sedimentos cohesivos. Universidad de Valparaíso. Facultad de Ingeniería.
- She, K., Trim, L., and Pope, D. (2005) Fall velocity of natural sediment particles: a simple mathematical presentation of the fall velocity law. *J. Hydraul. Res.* Vol 43, No. 2, pp 189-195.
- Tambo, N. and Watanabe, Y. (1979) Physical Aspect of Flocculation Process- I. Fundamental Treatise. *Water Res.* 13. Pp 429-439.
- Timmons, M. B., Summerfelt, S. T., Vinci, B. J. (1998). “Review of circular tank technology and management”. *Aquacultural Engineering* 18, pp. 51-69
- Van Rijn, L.C. (1984a) Sediment Transport, Part II: Suspend load Transport. *Hydr. Engrg., ASCE*, 1104(11), pp. 1613-1641.

Wernet, M. P. (1999) Fuzzy logic enhanced digital PIV processing software, 18th International Congress on Instrumentation for Aerospace Simulation Facilities (ICIASF), Toulouse, France.

Winterwerp, J.C. (1998) A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediments. *J. Hydraul. Res.* 36 (3), 309-326