



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DINAMICA DE  
SEDIMENTOS COHESIVOS EN SUSPENSION EN UN  
FLUJO TURBULENTO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL**

**NICOLAS ALBERTO PUENTES PALMA**

**PROFESOR GUIA**

**ALDO JORGE TAMBURRINO TAVANTZIS**

**PROFESORES INTEGRANTES**

**YARKO IVAN NIÑO CAMPOS**

**RAUL ALEJANDRO LOPEZ ALVARADO**

**Santiago de Chile**

**JUNIO 2007**

## RESUMEN

Existen diversos problemas relacionados a los sedimentos cohesivos en calidad de aguas, transporte de finos y variados problemas ambientales. Dentro de los motivos de estos problemas se puede nombrar su gran superficie de contacto por unidad de masa, su alta capacidad de sorción y su capacidad de agregarse y desagregarse al realizar el proceso de floculación.

Los procesos de floculación dependen de las propiedades fisicoquímicas del sedimento y del agua, como también de varios mecanismos físicos de los cuales la turbulencia es uno de los más importantes.

En el presente trabajo de título se tiene como objetivo estudiar experimentalmente, en una columna de agua, la interacción entre la turbulencia y sedimentos cohesivos en suspensión, para esto se diseñó, construyó y puso en marcha una columna de agua dentro de la cual se encuentran unos agitadores laterales, los cuales cumplen la función de generar la turbulencia y así suspender el sedimento.

La manera de analizar los flóculos en suspensión fue filmándolos dentro del estanque, y por el contraste que se genera al colocar un foco de luz en contra de la cámara, se logró determinar las áreas y diámetros promedios de los flóculos en el tiempo al analizar los cuadros de cada video. Mediante un ADV se determinó las características del flujo las cuales se relacionaron con las características de los flóculos. Se utilizó bentonita como sedimento cohesivo, y se realizaron 9 diferentes experiencias, siendo éstas la combinación de 3 estados turbulentos y 3 concentraciones

El comportamiento general de cada experiencia fue que las partículas en suspensión fueron desagregándose en el tiempo con un comportamiento relativamente exponencial.

Al analizar los resultados, se propuso y utilizó dos diferentes relaciones de floculación, tomando en cuenta las concentraciones y energías cinéticas turbulentas promedios. Con esto se determinaron parámetros para la modelación de los procesos de agregación y desagregación de floculos en un campo turbulento.

## AGRADECIMIENTOS

Bueno, es complicado lograr expresar lo que siento, pero es imposible negar que este momento es especial. No creó que nadie cuando termina una carrera le de lo mismo terminarla, realmente es un paso o etapa muy importante, por lo menos para mi, ya que no pensé lograr llegar algún día a estas instancias o vivir este momento.

Al escribir esto, lo primero que se me viene a la cabeza, antes que cualquier cosa, es la imagen de una persona que no hay día que no me acuerde de él, si po de ti, de ti papito, puta que ganas que estuvieras acá y justo hoy que es el día del padre, Feliz Día Papá donde te encuentres.

Sin lugar a dudas, mis primeros agradecimientos y dedicatoria es a mis padres, a ti mamá por toda tu dedicación incondicional y a ti viejo que yo se que me estas escuchando. De igual forma, les dedico esto a toda mi familia especialmente a mis tres hermanos Ana, Nelson y Rodrigo y mis queridos siete sobrinos Camila, Ignacio, Paula, Agustín, Valentina, Maria José y Huguito.

También les agradezco a mis profesores Don Aldo Tamburrino y Don Yarko Niño por su paciencia, entrega de conocimientos y experiencia al momento de llevar a cabo este trabajo, ya que sin su ayuda no habría logrado llegar a este momento.

No puedo dejar de nombrar a Juan y Manuel que hicieron que mi estadía en el laboratorio fuera muy grata y amena, gracias por toda su ayuda y por esos asados y conversaciones inolvidables.

Por ultimo, agradecerles a todos los que aportaron un granito de arena en este trabajo, Cristian, Jorge, Kiriaco, Julio, Chago y a todos los que hicieron que mi paso por esta universidad no fuera solo ramos y pruebas sino que también amigos, Ale, Tania, Camila, Paula (s), Marcela, Carola, Fabiola, Romina, Helen, Dani, Dogui, Pancho, Cesar (s), Molder, Jose, Chagui, Rodrigo (s), Mario, Luigui, Polo, Rufo, Lalo (s), Micky, Muga, Berro, Diego, Paipa, JP Lagos, P Prieto, Hugo, Mickel, APP, Munizaga.....

# Índice

1. Introducción y Objetivos .....	8
2. Antecedentes Bibliográficos.....	12
2.1 Turbulencia.....	12
2.1.1 Descripción Física de la Turbulencia .....	13
2.1.2 Ecuaciones Relacionadas a Flujos Turbulentos.....	14
2.1.3 Análisis De Velocidades Turbulentas.....	16
2.2 Sedimento Cohesivo .....	17
2.3 Instrumentos Utilizados Para Medir Características de los Flóculos .....	24
2.3.1 Contadores Láser de Partículas (LISST) .....	25
2.3.2 INSSECT .....	26
2.3.3 CIS 100 .....	28
2.3.4 PDA (Photometric Dispersion Analyser) .....	29
2.4 Generadores de Turbulencia por Medio de una Grilla Oscilante .....	30
3. Instalación Experimental y Metodología.....	36
3.1 Instalación Experimental .....	36
3.1.1 Columna de Agua .....	36
3.1.2 Cámara de Alta Velocidad.....	38
3.1.3 Acoustic Doppler Velocimeter (ADV).....	38
3.1.3.1 Descripción.....	38
3.1.3.2 Volumen de Control y Ejes Cartesianos.....	39
3.1.3.3 Operación y Validación de Velocidad.....	40
3.1.3.4 Sistema de Movimiento del ADV Sobre la Columna .....	41
3.1.4 Sedimento Utilizado .....	42
3.1.4.1 Composición y Estructura de la Bentonita .....	42
3.1.4.2 Propiedades Físicoquímicas de la Bentonita .....	43

3.1.4.2.1 Superficie Especifica .....	43
3.1.4.2.2 Capacidad de Intercambio Catiónico.....	44
3.1.4.2.3 Hidratación e Hinchamiento.....	44
3.1.4.2.4 Plasticidad.....	45
3.1.5 Voltímetro y Foco Luz Continua.....	45
3.1.5.1 Voltímetro.....	45
3.1.5.2 Foco de Luz Continua .....	46
3.2 Metodología de Trabajo.....	47
3.2.1 Trabajo Previo .....	47
3.2.2 Experimentación.....	47
3.2.2.1 Generalidades .....	47
3.2.2.2 Procedimiento.....	48
3.2.3 Metodología de Medición y Análisis de Datos con Il ADV.....	49
3.2.3.1 Metodología de Medición con el ADV .....	49
3.2.3.2 Análisis de los Datos Medidos con el ADV.....	52
3.2.4 Metodología de Grabación y Análisis de Imágenes con la Cámara.....	53
3.2.4.1 Metodología de Grabación con la Cámara.....	53
3.2.4.2 Análisis de Imágenes con la Cámara.....	54
3.2.5 Metodología y Análisis de Experiencias con Sedimento.....	56
3.2.5.1 Microscopio.....	56
3.2.5.1.1 Análisis y Resultados de das Fotografías.....	56
3.2.5.2 Granulometría Láser.....	57
4. Presentación y Análisis de Resultados Experimentales .....	60
4.1 Resultados y Análisis de Velocidades.....	60
4.2 Resultados y Análisis de Grabaciones.....	77
4.2.1 Análisis de Promedios de Tamaños en el Tiempo.....	82
4.2.1.1 Proposición de Modelo de Floculación .....	84
4.2.1.2 Modelo de Floculación Usado Por Winterwerp (1998) .....	87

5. Conclusiones y Comentarios .....	106
5.1 Instalación Experimental y Método Experimental .....	106
5.2 Análisis de los Resultados .....	107
5.3 Recomendaciones .....	109
6. Bibliografía .....	112
7. Anexos .....	116
7.1 Anexo A: Tablas de cálculos con velocidades por plano e intensidad turbulenta....	116
7.2 Anexo B: Datos Numéricos del Comportamiento del N° de Partículas, Sumas de Áreas, Área Mín. y Área Máx. en el tiempo por experiencia:.....	121
7.3 Anexo C: Resultados Iteraciones Modelo Propuesto .....	124

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCION Y OBJETIVOS**

# 1. Introducción y Objetivos

Diversos problemas de calidad de aguas superficiales, estuarios, embalses, estabilidad de canales, obras de drenaje superficial, están relacionados al comportamiento y características de los “sedimentos cohesivos” o finos.

La importancia del sedimento cohesivo radica en dos temas, en transporte de finos y calidad de aguas. Lo cual los hace responsables por ejemplo de:

1. Pérdida de capacidad en embalses (y su vida útil), ya que, a diferencia del material grueso, los finos llegan hasta el mismo muro y su sedimentación abarca toda la zona de aguas calmas (alta capacidad de sorción).
2. La formación de deltas (alta capacidad de sorción).
3. Corrientes de turbidez en estuarios.
4. De la carga de demanda bioquímica de oxígeno y del transporte de diversos contaminantes tales como metales pesados, bacterias y virus.
5. Estabilidad en canales y obras de drenaje superficial (alta capacidad de sorción).

Los granos de estos sedimentos no se presentan separadamente, como las arenas por ejemplo, sino como agregados o aglomerados de partículas, llamados flóculos, que suelen estar compuestos por una gran cantidad de partículas de sólidos, y tener por lo tanto formas y densidades completamente distintas a las partículas individuales.

La formación de flóculos depende no sólo de la concentración de los sólidos suspendidos, sino también de la turbulencia del escurrimiento, de los distintos iones presentes en el agua, de la temperatura, además de la presencia de materia orgánica coloidal, microbios y polímeros orgánicos segregados por algas y bacterias que son pegajosas y afectan significativamente los procesos de agregación.

En ríos, por lo general la turbulencia del escurrimiento mantiene permanentemente en suspensión a los sedimentos finos. Sin embargo, en escenarios con menor intensidad de la turbulencia, como por ejemplo en ambientes marinos en general y estuarios en particular, los sedimentos encuentran condiciones propicias para la depositación y de tal modo el lecho de esos ambientes se transforman en el último sumidero de los contaminantes.

Los procesos de agregación y rompimiento de flóculos en un flujo turbulento han sido descritos cualitativamente, pero su modelación es un tema que solo en el último decenio ha comenzado a ser abordado, considerando la interacción de los flóculos con la turbulencia del flujo. Una gran dificultad en la modelación de estos procesos radica en la necesidad de poder cuantificar ciertos parámetros, los que necesariamente requieren que sean determinados empíricamente.

De este modo, el aporte del tema de memoria es no solo conocer los procesos involucrados en la interacción sedimento cohesivo – turbulencia, sino también determinar algunos parámetros claves requeridos para la modelación de ellos.

El objetivo o motivación principal de este trabajo de título es: Estudiar experimentalmente, en una columna de agua, la interacción entre la turbulencia y sedimentos cohesivos en suspensión.

Para lograr esto se tiene como objetivos específicos:

- Habilitar la instalación experimental.
- Caracterizar los sedimentos (concentraciones, tamaños, densidades, etc.) en función de los parámetros que definen el campo turbulento.
- Estudiar directa o indirectamente la dinámica de formación y desagregación de flóculos en un campo turbulento.
- Obtener relaciones que permitan caracterizar en función de la turbulencia del flujo, el comportamiento (agregación, desagregación, concentraciones, etc.) de los sedimentos cohesivos en suspensión.

- Determinar los efectos de la concentración del sedimento cohesivo y la turbulencia del flujo en la dinámica de agregación y desagregación de flóculos.
- Obtener parámetros para la modelación de los procesos de formación y desagregación de flóculos en un campo turbulento.

Esta memoria se encuentra estructurada por 5 capítulos (más bibliografía y anexos), cada uno está conformado por lo siguiente:

- En el Capítulo 2 se presenta una revisión de antecedentes bibliográficos relacionados y necesarios a este estudio experimental.

- En el Capítulo 3 se describe la instalación experimental, todos sus componentes y características, como también la metodología usada para los trabajos de laboratorio y análisis de resultados.

- En el Capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos en las experiencias de laboratorio, desarrollándole el análisis correspondiente.

- En el Capítulo 5 se resumen las conclusiones y comentarios tomando en cuenta todos los puntos anteriores.

**CAPÍTULO 2**  
**ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS**

## **2. Antecedentes Bibliográficos**

En este capítulo se comenta sobre los antecedentes relacionados con este tema de memoria, como también algunas consideraciones acerca de la turbulencia y los sedimentos cohesivos, ya que, estos son los dos conceptos que al juntarse fueron analizados experimentalmente.

### **2.1 Turbulencia**

Una de las complicaciones más importantes en el estudio de flujo de fluidos surge del hecho de que a partir de cierto número de Reynolds crítico la estructura del flujo deja de ser laminar. En otras palabras, un flujo no puede ser laminar para altos números de Reynolds. El número de Reynolds representa una medida de la magnitud relativa de la inercia con respecto a los efectos viscosos.

Podemos decir, entonces, que si en un flujo los efectos inerciales dominan entonces el flujo no puede ser laminar. La pérdida de laminaridad la llamamos simplemente turbulencia. La turbulencia aparece porque los flujos son, en general, inestables bajo perturbaciones pequeñas si los efectos viscosos son más pequeños que los inerciales. La gran mayoría de los flujos en ingeniería son turbulentos.

Se llama turbulencia al estado de un flujo que se caracteriza por su naturaleza fluctuante y aparentemente aleatoria, estando asociados generalmente a procesos de mezcla y de transporte en el medio ambiente. Es el resultado de la pérdida de estabilidad de un flujo laminar. Los flujos laminares están caracterizados por el hecho de que las partículas de fluido se mueven en capas o láminas. Las partículas que están en cierta lámina, permanecen en ella. No pueden cambiar de capa.

Para el caso de un flujo con número de Reynolds más alto que un cierto número de Reynolds crítico, el movimiento de las partículas se vuelve más tridimensional y agitado. Las capas de fluido se intersectan y se mezclan; además, cambian como función del tiempo de forma aparentemente aleatoria. Es difícil, por esto, describir matemáticamente a un flujo turbulento.

### 2.1.1 Descripción Física de la Turbulencia

La turbulencia puede describirse físicamente como se cita a continuación:

Tanto la presión como la velocidad fluctúan alrededor de un valor medio. Las fluctuaciones son aleatorias y de naturaleza tridimensional. Las capas de fluido están acomodadas en estructuras coherentes llamadas remolinos o vórtices. Los vórtices tienen una amplia distribución de tamaños, que van desde la dimensión del flujo (tamaño del contenedor) hasta el tamaño en el cual se disipa el movimiento bajo la acción de la viscosidad.

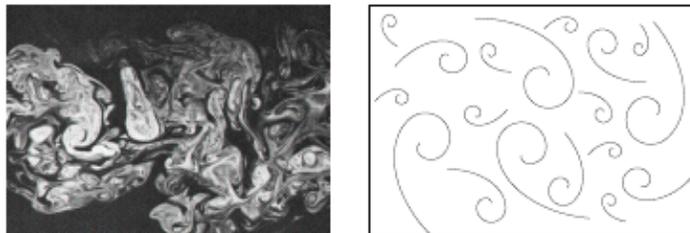


Figura 2.1: Ejemplo Capas De Fluido

Las fluctuaciones de velocidad y presión, en realidad se distribuyen de una forma característica y no enteramente al azar.

Un flujo turbulento es autónomo, ya que, puede mantenerse turbulento a si mismo, por lo cual la ruptura sucesiva de vórtices a escalas más pequeñas, llevará eventualmente a la generación de vórtices del tamaño de la escala de Kolmogorov. Una vez alcanzado este tamaño, el movimiento se disipa por el efecto de la viscosidad. En otras palabras, un flujo turbulento decaerá progresivamente a menos que exista un mecanismo de entrada de energía. (<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3166/1/55133-1.pdf> (anexo A)).

### 2.1.2 Ecuaciones Relacionadas a Flujos Turbulentos

Las escalas de longitudes en flujos turbulentos son variadas, éstas pueden estar limitadas por las características físicas del lugar donde se produce el flujo o por los efectos difusivos de la viscosidad molecular.

El primero que determinó cómo analizar las velocidades de este tipo de flujos fue Reynolds, el cual propuso descomponer las velocidades instantáneas del flujo en un promedio temporal ( $\overline{U}_i$ ) más una fluctuación ( $U_i'$ ), es decir:

$$U_i = \overline{U}_i + U_i'$$

De donde:

$$U_i' = U_i - \overline{U}_i$$

A continuación se muestran las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido incompresible (en notación tensorial y promediadas temporalmente), éstas son la conservación de la cantidad de movimiento (Navier-Stoke) y la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_j \partial X_j}$$

$$\rho \left( \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_j} \right) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial X_i} + \mu \nabla^2 \overline{U}_i + \frac{\partial}{\partial X_i} \left( -\rho \overline{U_j' U_i'} \right)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_i} = 0$$

El término  $-\rho \overline{U_j' * U_i'}$  es conocido como Esfuerzo de Reynolds y cumple la función de simplificar las ecuaciones antes descritas, pero a su vez agrega más incógnitas (problema de cierre de la turbulencia).

Otros términos importantes de conocer son el valor medio de la energía cinética turbulenta por unidad de masa y el RMS (Root Mean Square), este último corresponde a la raíz de la varianza de las velocidades instantáneas:

$$k = \frac{\overline{U'^2} + \overline{V'^2} + \overline{W'^2}}{2}$$

$$I_i = \sqrt{\overline{U_i'^2}}$$

La viscosidad turbulenta puede modelarse a través de la expresión conocida como la fórmula de Kolmogorov-Prandtl:

$$\nu_t = c_\mu' \sqrt{k} L$$

Donde  $c_\mu'$  es una constante empírica y L la escala de los vórtices.

Rescribiendo la ecuación de Navier-Stokes en función de la energía cinética turbulenta se tiene:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{U_i' p'}}{\partial X_i} - \frac{\partial \overline{U_i' k'}}{\partial X_i} - \overline{U_i' U_j'} \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_j} + \overline{\nu U_j'} \frac{\partial^2 \overline{U_j'}}{\partial X_j \partial X_j}$$

### 2.1.3 Análisis De Velocidades Turbulentas

Existen variadas formas de analizar una serie de datos de velocidades de un flujo, Entre los que se encuentran la función de auto correlación, la correlación cruzada y el análisis de densidad espectral.

La función de auto correlación es la correlación de una señal consigo misma y se calcula con la siguiente expresión:

$$R_{(u)}(\Delta t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t) \cdot u'(t + \Delta t) dt$$

Donde:

$R_{u'}(\Delta t)$  : auto correlación de la componente  $u'$  .

$t$  : tiempo (seg.).

$u'$  : fluctuación longitudinal de la velocidad.

$T$  : período de medición.

La correlación cruzada expresa qué tan similares son dos señales de tiempo  $a(t)$  y  $b(t)$  para diferentes desfases de tiempo  $\Delta t$ . Está definida como:

$$R_{(ab)}(\Delta t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a(t) \cdot b(t + \Delta t) dt$$

La densidad de energía espectral es la integral de la transformada de Fourier al cuadrado de la señal de velocidades. Dada una señal  $g(t)$ , se define su densidad espectral de energía como aquella función de la frecuencia  $Y_g(w)$  que permite escribir:

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Y_g(w) dw$$

Donde:

$$Y_g(w) = |F[g(t)]|^2$$

Siendo F la transformada de Fourier.

## 2.2 Sedimento Cohesivo

Existen diversas parametrizaciones para determinar el flujo de partículas, como función de las características del sedimento y del propio flujo, lo que permite abordar el estudio del material en suspensión a partir de diferentes modelos. Sin embargo, en la mayoría de ellos se considera materiales no cohesivos. Para este tipo de sedimento, las partículas pueden ser definidas en función de su densidad, diámetro y forma, lo que permite definir, la velocidad de depositación de las mismas y los procesos de erosión y transporte.

Por el contrario, para materiales cohesivos, los parámetros de control para el sedimento dependen de muchas propiedades, tanto características de las partículas, como del agua del medio en que se encuentran. Por tanto, para este tipo de sedimento, los términos correspondientes a erosión y depositación del material en suspensión necesarios para el cálculo de flujo de partículas resultan mucho más complejos de analizar.

El sedimento cohesivo consiste predominantemente en partículas de materia arcillosa, y en menor porcentaje de limo, arena y materia orgánica. Este sedimento está sujeto a los procesos de la agregación (debido a las características fisicoquímicas de los minerales de la arcilla), desintegración, depositación y erosión.

La mezcla turbulenta del líquido hace que los agregados suspendidos, de este tipo de sedimento, se pongan en contacto, induciendo la agregación adicional y produciendo el crecimiento de agregados más grandes. Simultáneamente, la fuerza generada por el líquido interrumpe que estos agregados puedan soportar los esfuerzos de corte.

La frecuencia con la cual las partículas chocan, crecen y se rompen (al estar suspendidas) depende en gran parte de la intensidad de la turbulencia (rangos de velocidad, esfuerzo de corte) y, en segundo plano, de la gravedad (Maggi, 2005). Los flóculos más grandes sedimentan más rápidamente que los flóculos pequeños y se acumulan en el lecho, por lo tanto, la estructura de la estratificación del lecho es de agregados pequeños sobre agregados grandes.

Cuando las fluctuaciones turbulentas son suficientemente intensas, los agregados que forman la parte superior del lecho se levantan y se suspenden, por lo tanto, esos agregados participan en las reacciones de la floculación otra vez.

El proceso dinámico de la floculación depende de las tasas de agregación y desagregación de los sedimentos. Los procesos de agregaciones entre las partículas, están relacionadas con el movimiento Browniano, las tensiones de corte de la corriente, y la sedimentación diferencial de las partículas. En relación al proceso de desagregación es muy importante la tensión de corte del flujo, que aunque no exista choque de partículas es capaz de generar el rompimiento de los flóculos. Las colisiones debidas a las tensiones de corte son originadas por los gradientes de velocidad generados en el seno del fluido, y son particularmente importantes en los cuerpos de agua naturales, donde el escurrimiento es altamente turbulento. Las perturbaciones de la corriente aumentan la probabilidad de choque entre las partículas, sin embargo, un aumento importante de la turbulencia tenderá más a quebrar los flóculos ya formados que a promover su crecimiento. (Trento y Vinzon, 2004)

Trento, en el trabajo “DINÂMICA DA FLOCULAÇÃO NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FINOS” 2005, muestra la ecuación de balance para el espectro continuo, que comprende todos los procesos de agregación por colisiones binarias, movimiento Browniano, tensores de corte de un escurrimiento turbulento y la sedimentación diferencial.

Esta ecuación está dada en términos de número de partículas  $n(v)$  donde  $v$  es el volumen:

$$\frac{\partial n(v)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^v \beta(\bar{v}, v - \bar{v}) n(\bar{v}) n(v - \bar{v}) d\bar{v} - \int_0^\infty \beta(v, \bar{v}) n(v) n(\bar{v}) d\bar{v} - \frac{g(\rho_s - \rho_w)}{18 * \mu} \left( \frac{6}{\pi} \right)^{2/3} v^{2/3} \frac{\partial n(v)}{\partial z}$$

Donde el primer término del lado derecho representa la colisión de partículas que producen un agregado de volumen  $v$ , y  $\beta$  es la función de frecuencia de colisión para todos los mecanismos de agregación. El segundo término es la remoción de partículas por coagulación y el último término es la remoción de partículas por sedimentación de acuerdo a la ley de Stokes.

Muchos estudios han demostrado que la función de frecuencia de choque de las partículas, es decir, la distribución de los tamaños de las partículas cohesivas en suspensión en el tiempo, se puede expresar o está gobernada por tres comportamientos diferentes dependiendo del mecanismo de floculación del que se esté hablando (Trento y Vinzon, 2004). A continuación se muestran dichas expresiones:

1) Floculación por movimiento Browniano:

$$\beta_b(v_i, v_j) = K_b \frac{(v_i^{1/3} + v_j^{1/3})^2}{v_i^{1/3} v_j^{1/3}}$$

Donde:

$v_i, v_j$  : Volúmenes de partículas clase  $i$  y  $j$  respectivamente.

$d_p$  : Diámetro de la partícula.

2) Floculación por tensiones de corte en un escurrimiento turbulento:

$$\beta_{sh}(v_i, v_j) = \sqrt{\frac{8\pi}{15}} GR_{ij}^3 = 1.3GR_{ij}^3$$

G: gradiente de velocidad media del fluido.

$$G = \sqrt{\frac{\tau_b u_* (1 - \zeta)}{\mu h K \zeta}} \approx \sqrt{\frac{\tau_b u_*}{\mu z K}}$$

Donde:

$\zeta$ : z/h con z la altura desde el lecho.

K : Coeficiente de Von Karman (0.41).

$\mu$  : Viscosidad dinámica del fluido.

$\tau$  : Tensión de corte.

$u_*$  : Velocidad de Corte.

3) Floculación por sedimentación diferencial, la función frecuencia de colisión para densidad constante está dada por:

$$\beta_{ds}(v_i, v_j) = \left(\frac{6}{\pi}\right)^{4/3} \frac{\pi g (\rho_s - \rho_w)}{72 \mu} (v_i^{1/3} + v_j^{1/3})^2 |v_i^{2/3} - v_j^{2/3}|$$

Con  $\rho_w$  la densidad del fluido.

Trento (2005), muestra gráficamente el comportamiento de estas tres funciones de frecuencia, para partículas de diámetro 25 micrones que colisionan con partículas de diámetros entre 0.1 y 200 micrones, donde el eje x representa diámetro de floculos en [ $\mu\text{m}$ ] y el eje y cada función de frecuencia en [ $\text{cm}^3/\text{seg}$ ]:

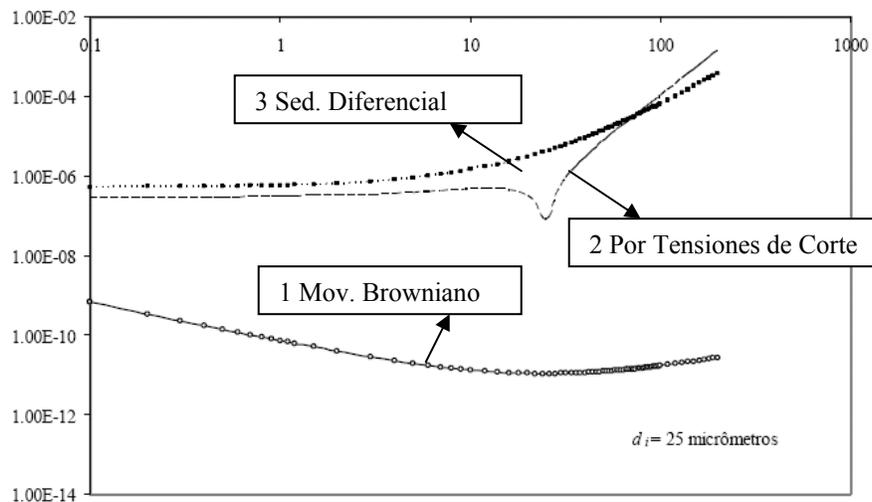


Figura 2.2: Funciones de Frecuencia de Colisión de Partículas.

Dentro de los modelos matemáticos de floculación descritos por Trento destacan dos, el Modelo de Farley y Morel y el Modelo de Winterwerp:

El primero de Farley Y Morel (1986) estudió la cinética de sedimentación, para esto realizaron mediciones de concentraciones de flóculos formados por goetita y esferas de cobre en un tubo de sedimentación y luego representaciones numéricas. Las hipótesis del modelo de floculación son las siguientes:

- 1) Se supone la esfericidad de las partículas antes y después de cada agregación.
- 2) Las funciones de colisión (para el movimiento Browniano, las tensiones de corte y la sedimentación diferencial) son aditivas.
- 3) La eficiencia de los mecanismos de agregación es independiente de los tamaños de las partículas.
- 4) La densidad de los flóculos se mantiene constante.
- 5) La columna de agua es verticalmente homogénea con respecto a la concentración.

De esta manera, expresaron la tasa de remoción de sólidos como la suma de tres expresiones potenciales, proponiendo la siguiente expresión:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\beta_{ds} C^{2.3} - \beta_{sh} C^{1.9} - \beta_b C^{1.3}$$

Donde  $\beta_{ds}$ ,  $\beta_{sh}$  y  $\beta_b$  son los mecanismos de floculación antes mencionados.

El segundo modelo de Winterwerp determina la evolución temporal de los flóculos en una columna de agua, esto lo propone de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial d_f}{\partial t} = K_A C G d_f^{(4-nf)} - K_B G^{(q+1)} d_f^{(2q+1)} (d_f - d_p)^p$$

Donde  $d_p$  y  $d_f$  son el diámetro medio de la partícula y el diámetro medio de los flóculos respectivamente,  $K_A$  es un parámetro de agregación y  $K_B$  un parámetro de desagregación de flóculos,  $p$  y  $q$  son constantes empíricas determinados en laboratorio.

El término  $nf$  corresponde a la dimensión fractal y tiene valores típicos entre 1.7 y 2.2 con un valor promedio de 2 (Kranenburg, 1994; Winterwerp, 1998). También para partículas esféricas y valores de Reynolds menores a 1,  $nf$  puede tomar un valor de 3 (Winterwerp, 2000).

El comportamiento dinámico de una suspensión de sedimento cohesivo es marcado fuertemente por su capacidad para formar los agregados distribuidos sobre una amplia gama de tamaños. Esta capacidad es una característica intrínseca del sedimento, aunque también el medio desempeña un papel fundamental.

La distribución de tamaño del flóculo es fundamental para caracterizar al sedimento en suspensión porque se correlaciona al tiempo de permanencia del sedimento en la columna del agua. La evidencia experimental ha demostrado que tanto la erosión como la depositación de sedimentos cohesivos son controladas por *la tensión de corte del suelo o velocidad no erosiva* frente a la acción hidrodinámica del flujo.

El grado de cohesión depende de los tamaños relativos y de las cantidades de diversos granos de suelos y materiales arcillosos presentes.

Cuando 80 a 90 por ciento del material del depósito es menor que la malla 200 (0.075mm), una pequeña cantidad, 5 a 10 por ciento de arcilla, el suelo clasificado puede ser como cohesivo (Pouey, 1999).

La descripción completa de la estructura de un suelo cohesivo requiere de un conocimiento de las fuerzas interparticulares y del arreglo geométrico o *textura* de las partículas. Es casi imposible medir los campos de fuerzas que rodean directamente partículas de arcilla; en consecuencia, la *textura* es el principal foco en los estudios de suelos cohesivos.

De dichos estudios, las fuerzas entre partículas parecen originarse de tres tipos diferentes de cargas eléctricas: *enlaces iónicos* (debidos a una deficiencia de electrones en las capas exteriores de átomos que componen las unidades básicas del suelo), *enlaces de Van der Waals* (debidos a alteraciones en el número de electrones en cualquier instante a un lado del núcleo atómico) y *otros* (incluye enlaces de hidrógeno y la atracción gravitacional entre dos cuerpos) (Pouey, 1999).

Para estudiar el comportamiento de materiales cohesivos desde el punto de vista del transporte hidráulico, lo que más interesa son las propiedades de las partículas en conjunto, es decir, la adhesión entre las partículas, la resistencia al corte, la composición granulométrica de la fracción gruesa, la composición mineral e índice de plasticidad.

Las principales características de suelos cohesivos se pueden resumir en función de los límites de Atterberg. (Ayala, 1984).

Las propiedades físicas fundamentales de los suelos cohesivos son:

- Peso específico.
- Porosidad (volumen de poros por unidad de volumen de suelo).
- Humedad (cantidad de agua contenida en los poros).
- Plasticidad (capacidad de variar la forma sin conformarse fisuras, conservando aquella luego de quitada la carga).

- Cohesión (fuerzas intermoleculares que interfieren la ruptura del conjunto).
- Angulo de fricción interna.
- Hinchamiento (capacidad de disminuir la cohesión en el supuesto de saturarse el suelo hasta destruir su estructura).
- Heterogeneidad (existencia de capas intermedias finas de suelo, con otras cualidades, incrustaciones, etc.).
- Integridad (modificación de la estructura en su estado natural).

### **2.3 Instrumentos Utilizados Para Medir Características de los Flóculos**

Las dos características que más a menudo se utilizan para caracterizar los flóculos son su tamaño y velocidad de sedimentación, ya que estas características tienen implicaciones para sedimentología así como también para los estudios ópticos.

También es de interés la estructura y la composición de los flóculos. Estas características tienen que ser determinadas in situ, debido a la naturaleza frágil de los flóculos. Para este propósito, se ha desarrollado una gran variedad de instrumentos, los cuales han sido construidos para medir, determinar o modelar las propiedades y características de los flóculos. Una de las características en común de todos estos instrumentos son sus grandes costos por lo que es difícil contar con ellos.

A continuación se presentan algunos de los instrumentos:

### **2.3.1 Contadores Láser de Partículas (LISST)**

LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry), se basa en la tecnología de difracción láser para determinar el tamaño de partículas suspendidas, la característica fundamental es que la dispersión delantera de la luz (small-angle) es dominada por la difracción de las partículas, por lo tanto, la difracción es insensible a la composición de la partícula.

La difracción por sí misma contiene la información sobre el tamaño de la partícula. Así, midiendo la dispersión de ángulos pequeños (small-angle), los instrumentos de la serie de LISST obtienen las calibraciones para una amplia gama de tamaños (200:1), sin importar la composición de la partícula.

El primer sistema o tipo de contador láser de partículas, es el LISST-100. Este instrumento mide la concentración y la distribución del tamaño. Hay 3 modelos: Tipo-B (1.25- 250 micrones), Tipo-C (2.5 a 500 micrones) y LISST-FLOC (7.5 a 1.500 micrones).

Estos sistemas entregan no solamente la distribución del tamaño, ellos también entregan el volumen óptico que dispersa la función. El segundo sistema que siguió fue el LISST-ST incorporando a una columna de sedimentación, este sistema entrega la distribución de la velocidad de sedimentación. Siguió después la serie LISST-25.

El LISST-25 es un instrumento sumergible de dispersión láser que muestra la concentración del volumen y el tamaño medio. Es un instrumento del campo de medidas "in-situ" que supera el problema histórico de las calibraciones que cambian con el tamaño de partícula. El LISST-25 tiene dos detectores especialmente diseñados que miden la luz dispersada, para entregar el volumen total de la partícula y las concentraciones totales del área de la partícula.

Un medidor láser in situ de la partícula, LISST-100, fue utilizado para describir la variación espacial del coeficiente de atenuación del rayo de luz ( $c$ ), de los espectros del tamaño de la partícula y de las densidades agregadas entre Dinamarca y Suecia (Mikkelsen, O. A, 2000). Los resultados probaron que los parámetros antes dichos variaron perceptiblemente dentro de la longitud investigada (aproximadamente 2 kilómetros).

Con el advenimiento del LISST-100, ha llegado a ser posible medir simultáneamente valores de  $c$ , de volúmenes de concentración y de los espectros del tamaño de partícula.

El LISST-100 sin embargo, es el primer láser in situ que mide  $c$ , volumen de concentración y los espectros in situ del tamaño de partícula.

En este estudio (Mikkelsen, O. A, 2000), el LISST-100 fue utilizado para obtener distribuciones de tamaños de partículas. Las muestras de agua fueron tomadas simultáneamente con las medidas LISST-100. Se demuestra cómo las partículas floculan sobre un tiempo y una distancia relativamente cortos y cómo es posible utilizar el LISST-100 para calcular la densidad medias eficaz de las partículas en la suspensión.

### **2.3.2 INSSECT**

INSSECT (in situ size and settling column tripod), es una estructura que incluye una cámara fotográfica digital, una columna en donde se coloca una cámara de video, una trampa diseñada para los flóculos que se son capturados intactos, un medidor láser (LISST-100), un sensor óptico y otros pequeños artefactos. Fue diseñada para el uso en exámenes semi-sinópticos de la variación espacial de las características del flóculo, tales como tamaño y la velocidad de sedimentación y los factores que las influyen en los lugares poco profundos en las aguas continentales.

Este instrumento se describe en el paper de Mikkelsen, O. A (2004). Aquí se describe los varios componentes del INSSECT y se presentan los resultados obtenidos de las primeras experiencias en las que fue utilizado (en el océano), demostrando su capacidad de dar vuelta en la corriente y de capturar los flóculos intactos.

En comparación con análisis recientes de otros mecanismos de medición, se pudo ver que los resultados fueron similares.

El INSSECT, tiene la capacidad de medir simultáneamente tamaño ambiente del flóculo, tamaño del flóculo que sedimenta, velocidad de sedimentación y la tensión de Reynolds. Las partículas que se incorporan en la base de la columna de sedimentación son almacenadas en tazas pequeñas que contienen un gel transparente llamado polyacrylamide (PAA), permitiendo un análisis más extremo (en el laboratorio) de la estructura y el tamaño de partículas sedimentadas.

También existen tazas sin el gel las cuales se utilizan para medir el flujo del sedimento y para el análisis de los espectros primarios de los granos finos. Un sensor acústico modular de la velocidad (MAVS) mide turbulencia, mientras que un sensor óptico del backscatter (OBS) se utiliza para estimar la turbiedad.

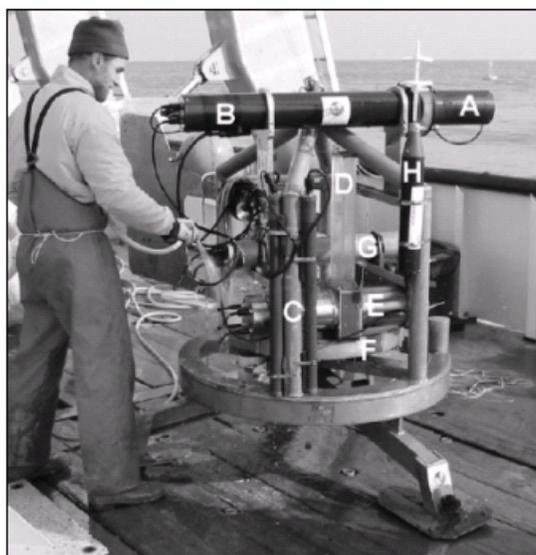


Figura 2.3: Fotografía de INSSECT.

(A) Cámara digital para flóculos; (B) OBS; (C) Baterías para cámara digital de video; (D) Columna de sedimentación; (E) Cámara digital de video (CDV); (F) Trampa de sedimento; (G) Controlador de CDV y OBS; (H) MAVS.

### 2.3.3 CIS 100

El Ankersmid CIS-100 es un sistema automatizado de inspección para el análisis del tamaño de la partícula en el rango de operación de 0.5-3600 micrones de radio y la caracterización de una forma dinámica.

Este sistema emplea mediciones de canales del láser y del vídeo respectivamente. Juntos, ambos canales proporcionan toda la información necesaria para analizar y caracterizar partículas esféricas, partículas no esféricas y alargadas, con una alta resolución, exactitud y con la capacidad de repetición.

El CIS-100 proporciona la mejor solución para la diversidad de tamaños de la partícula, para una aplicación en ambientes seco y mojado. Rápido y fácil de utilizar, el CIS-100 es una herramienta óptima para el control de calidad y el uso en laboratorios.

Combina únicamente dos canales que miden de forma independientemente: El canal del láser para el análisis físico de la medición del tamaño de la partícula y el canal de video para la visualización y la caracterización dinámica de la forma.

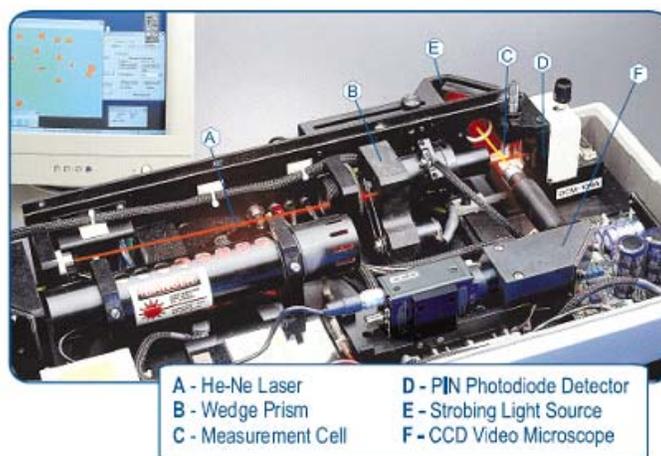


Figura 2.4: Fotografía de CIS-100.

El CIS-100 fue utilizado en el proceso de lodos activados (tratamiento biológico más extenso de aguas residuales) para cuantificar y modelar el proceso de la floculación en clarificadores secundarios.

Las características relacionadas con la formación de flóculos es uno de los mayores inconvenientes en este tipo de procesos siendo difícil de ser predicho y de ser controlado (Govoreanu R., 2004).

Inicialmente, Govoreanu R., 2004 intento medir las características morfológicas del flóculo (e.g. el tamaño del flóculo y las distribuciones de tamaño y la dimensión fractal). Debido a la naturaleza biológica frágil, a la estructura irregular y a la composición heterogénea de los flóculos, el procedimiento de la medida puede afectar los resultados y conducir a una interpretación errónea de los datos.

Después de un estudio comprensivo de la literatura de los instrumentos disponibles, dicho estudio seleccionó, un (a) *Mastersizer S* (Malvern, Reino Unido), el cual es un analizador modular del tamaño de partícula que ofrece mayor flexibilidad a la medida, pudiendo medir tamaños en muestras mojadas y secas, un (b) *CIS-100* (Ankersmid, Bélgica) y un (c) sistema automático de análisis de imagen (IMAN) para realizar las medidas.

Estos dispositivos fueron seleccionados debido a sus diversos principios de la medida, que permite obtener mucha información (a veces complementaria) con respecto a la dinámica de proceso, así como debido a sus capacidades en línea del análisis y requisitos similares de la preparación y de la manipulación de la muestra.

#### **2.3.4 PDA (Photometric Dispersion Analyser)**

El analizador fotométrico de la dispersión, PDA 2000, es un monitor que fue diseñado para analizar suspensiones y flóculos que fluyen, para laboratorios de investigación y usos industriales. Proporciona una indicación sensible de cambios en el estado de la agregación de la suspensión (floculación) o de la desagregación (dispersión). La formación y la fractura de flóculos se pueden también analizar por el PDA 2000, y son aplicables sobre una amplia gama de concentraciones y de tamaños de partículas.

El PDA 2000, es un instrumento que se utiliza comúnmente para medir, en pequeña escala, el funcionamiento de la floculación.

El instrumento utiliza la dispersión de la luz para determinar el grado de agregación de la partícula en un tanque de floculación. El líquido del tanque se envía vía a un tubo de 1 mm<sup>3</sup> al instrumento. Aquí la corriente del líquido pasa a través de un haz de luz que es enviada a un diodo electro luminoso.

La fluctuación se puede medir y exhibir usando el software LabView. Los análisis son provechosos solamente en el caso de que exista una agregación de partículas.

El PDA realmente no puede medir el tamaño de la partícula pero será calibrado para que en un futuro pueda determinar el tamaño de los agregados. (*Dana Munson. and Dr. Joel DuCoste, "Calibration of Photometric Dispersion Analyzer for Particle Size Measurement"*).

## **2.4 Generadores de Turbulencia por Medio de una Grilla Oscilante**

Varios estudios experimentales han sido realizados para investigar el comportamiento, las propiedades y procesos relacionados a los sedimentos cohesivos, la mayoría de estos estudios analizan la estructura de los flóculos, su agregación y desagregación, en régimen turbulento.

Las instalaciones generadoras de turbulencia mas utilizadas para este tipo de experimentos son: Grillas o rejillas oscilantes (la cual este ubicada en el fondo de la columna de agua), sistemas con hélices e inyección por chorros.

Las grillas oscilan a una frecuencia determinada, generando una turbulencia de pequeña escala casi homogénea en ausencia de esfuerzo de corte. Para el caso de chorros inmersos la generación de turbulencia es totalmente hidráulica, ya que el nivel de turbulencia depende de los caudales de los chorros.

En el año 2005 Gratiot N., H. Hichallet y M. Mory, compararon el flujo que sedimenta de una mezcla de sedimento cohesivo medida en un líquido quieto con la alcanzada en un flujo turbulento.

Para altas concentraciones (10-200 [gL<sup>-1</sup>]), demostraron que el flujo que sedimenta en un líquido turbulento es mucho más grande que el estimado en un líquido quieto (hasta dos órdenes de magnitud). Y para rangos bajos de la concentración del sedimento cohesivo en suspensión, es decir, menores a 10 [gL<sup>-1</sup>], el flujo que sedimenta no se ve modificado por la presencia de la turbulencia.

El estudio realizado por estos autores tiene como objetivo el cuantificar el efecto de la turbulencia en el flujo que sedimenta de una suspensión de sedimento cohesivo. Esto se llevó a cabo con una mezcla fluida completamente mezclada del fango la cual es introducida en una caja dentro de la cual se genera un flujo difusivo de la turbulento revolviendo con una “Grilla Oscilante”.

Existen dos flujos opuestos en este sistema uno es el flujo que sedimenta gravitacionalmente y el otro el flujo turbulento ascendente, los cuales dentro de un tiempo conducen a un estado de equilibrio. Gratiot N., H. Hichallet y M. Mory, comprobaron que en un flujo quieto, el flujo que sedimenta en función de la concentración media del sedimento en suspensión, cumplen el mismo comportamiento que el determinado por otros autores, el cual se muestra en el gráfico de la izquierda en la Figura 2.5:

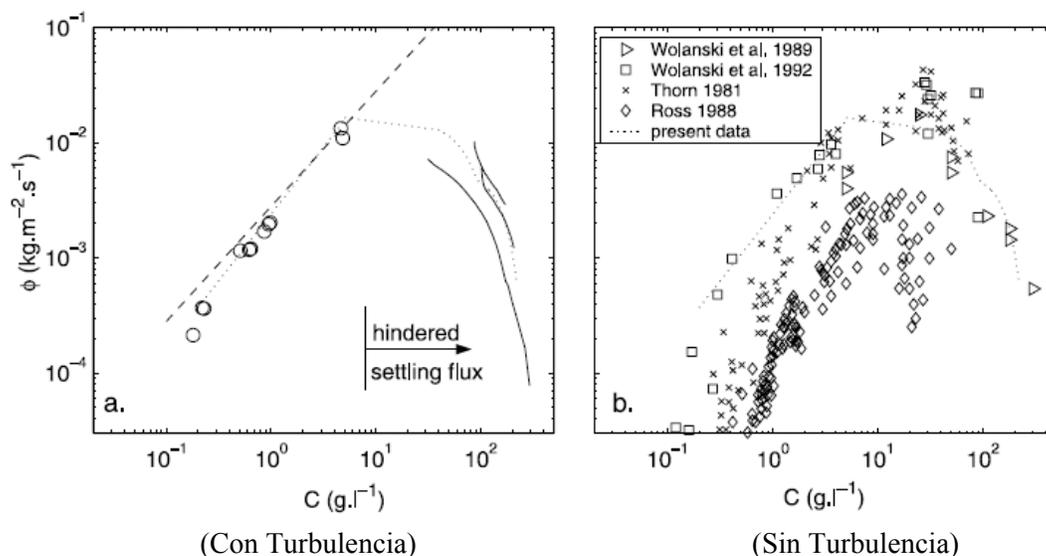


Figura 2.5: Variación del flujo que sedimenta v/s Concentración del sedimento en suspensión (Gratiot N., H. Hichallet y M. Mory, 2005).

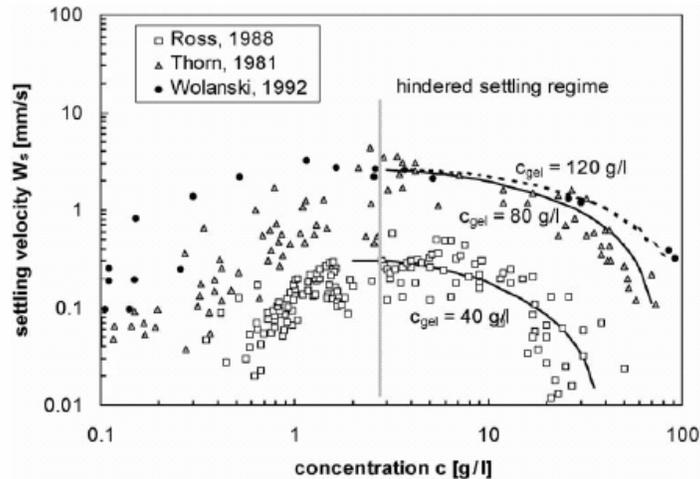


Figura 2.6: Velocidad de Sedimentación  $v/s$  Concentración del sedimento en suspensión (J.C. Winterwerp, 2002)

Además, se considera generalmente que hasta algunos gramos por litro, la floculación de partículas individuales conduce a un aumento en el flujo que sedimenta, mientras que sobre 10 a 20  $[gL^{-1}]$  el flujo que sedimenta comienza a disminuir. Este proceso tiene una implicación importante para la distribución del sedimento suspendido en un flujo natural. Por lo tanto, la dependencia no lineal del flujo que sedimenta con la concentración se considera, a menudo, que desempeña un papel dominante en la formación y el mantenimiento de estratificaciones (llamadas *Lutoclines*) marcadas en la columna de agua.

En 2004, Michallet H. y M. Mory, utilizaron un modelo llamado “K- $\epsilon$ ” (energía cinética turbulenta – tasa de disipación de la energía cinética turbulenta) para describir el estado de sedimentos de grano fino mantenidos en suspensión por efecto de turbulencia puramente difusiva, esto en relación a experimentos que generan la turbulencia por medio de una “Grilla Oscilante”. Estos autores relacionan este comportamiento (de los sedimentos en suspensión) al número de Rouy y al producto del número de Richardson con el número de Rouse.

$$Rou(z) = \frac{W_s}{\sqrt{k(z)}}$$

$$Ri(z) = \frac{G\sqrt{k(z)}C(z)}{\varepsilon(z)}$$

Donde:

$W_s$ : Velocidad de Sedimentación.

$k$  : Energía Cinética Turbulenta.

$G$  :  $g(\rho_s - \rho_w) / \rho_s \rho_w$  .

$C$  : Concentración.

$\varepsilon$  : Tasa de Disipación de Energía.

Se muestra que al aplicar turbulencia en la columna de agua se forman dos capas, una de sedimento cohesivo en suspensión y otra de agua puramente clara (sin sedimento), estas dos capas están separadas por una interfase llamada “lutoclina” (al igual que Gratiot N., H. Hichallet y M. Mory, 2005).

El equilibrio de la capa en suspensión está relacionada con: la concentración a una distancia cero de la rejilla, la velocidad de sedimentación y los parámetros de oscilación de la rejilla.

El objetivo principal del estudio de Gratiot es analizar la existencia de la interfaz “lutoclina” (bajo qué condiciones se forma), por medio del modelo “ $k$ - $\varepsilon$ ”, es decir, se busca investigar cómo una suspensión de la partícula modifica el decaimiento de la turbulencia con respecto al decaimiento de la capa de agua clara (capa sobre la interfase), y entender cómo éste producirá la formación de la “lutoclina”. Esta última se forma en un estado de equilibrio, después de cierto tiempo y una vez alcanzada la concentración de saturación (Gratiot N., H. Hichallet, y M. Mory, 2005).

En los resultados obtenidos se puede destacar los efectos del número de Rouse y el producto del número de Richardson con el número de Rouse, en relación a las capas que rodean la “lutoclina”.

Por un lado, se logra ver una concentración media homogénea cuando  $Rou_0$  está debajo de 0.01. Cuando el producto del número de  $Rou$  con el de Richardson es pequeño, el decaimiento de la turbulencia es afectado por la suspensión de la partícula solamente a una distancia muy corta de la “lutoclina”. La transición que conduce a la formación de la “lutoclina” es muy repentina y el número de Richardson del flujo es cercano a 1 cerca de la interfaz.

Por otra parte, un decaimiento simultáneo de la concentración y de la turbulencia del sedimento se observa cuando el número de  $Rou$  es mayor que 0.01.

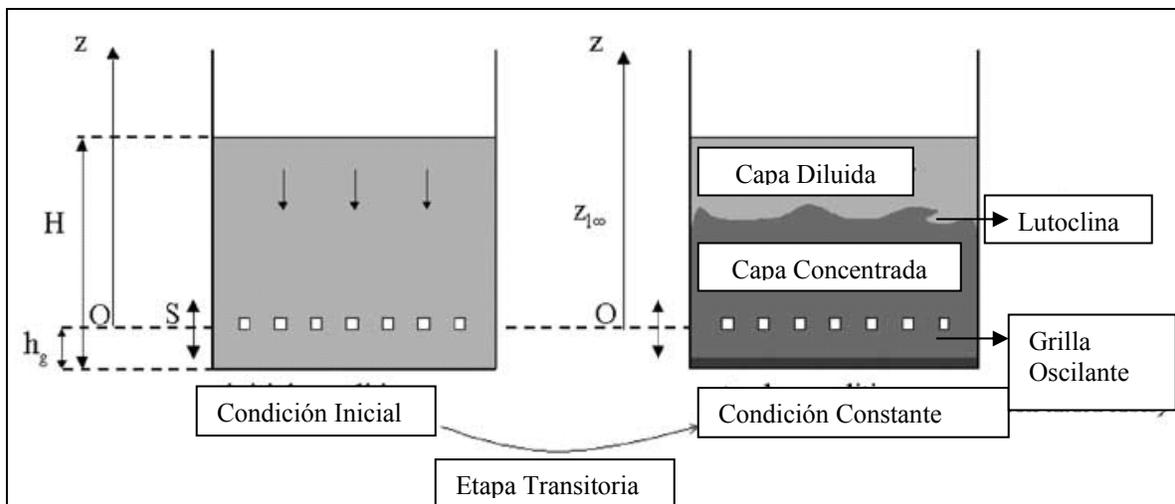


Figura 2.7: Esquema de las estructuras experimentales.

**CAPÍTULO 3**  
**INSTALACION EXPERIMENTAL Y**  
**METODOLOGIA**

### **3. Instalación Experimental y Metodología**

En este capítulo se explica y describe la instalación experimental, detallando cada una de sus componentes, como también los demás elementos o instrumentos utilizados en las experiencias. Por otra parte, se describe las metodologías de trabajo y medición efectuadas en este estudio.

#### **3.1 Instalación Experimental**

A continuación se presentan las características y especificaciones de los materiales e instrumentos utilizados en laboratorio:

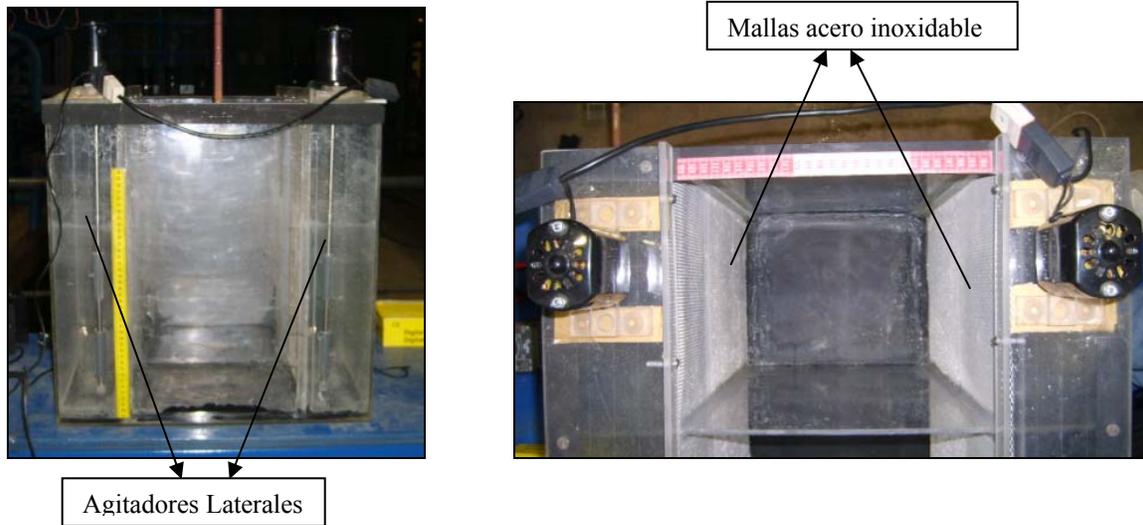
##### **3.1.1 Columna de Agua**

La columna de agua estaba contenida en un estanque rectangular consistente en un cubo de acrílico (paredes 5 milímetros de espesor) de paredes de  $50 \times 50 \text{ cm}^2$  y  $25 \times 50 \text{ cm}^2$ , es decir, un volumen de  $50 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$ .

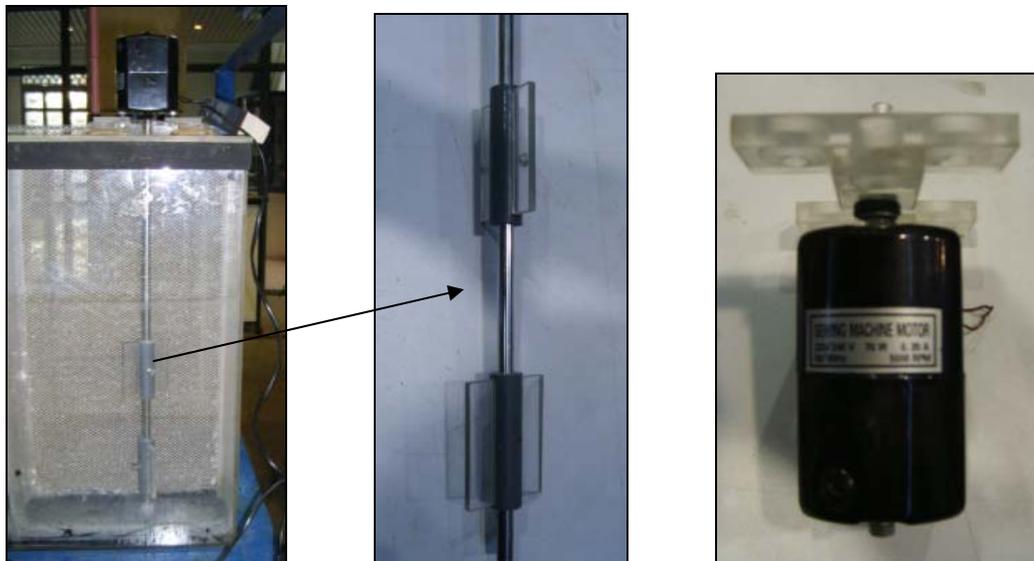
Dentro del estanque se encuentran ubicados dos agitadores laterales, uno en cada pared de  $25 \times 50 \text{ cm}^2$ , cada uno de ellos es manejado a través de un motor. Los motores se encuentran conectados en serie y unidos a un potenciómetro, el cual tiene la propiedad de regular la velocidad de giro de éstos. A través de este sistema es que se logra generar la turbulencia dentro de la columna de agua y así suspender el sedimento dentro de ella.

Cada agitador está compuesto por dos paletas rectangulares de  $7 \times 2 \text{ cm}$  (a cada lado) de acrílico firmadas a un eje de acero inoxidable, siendo este eje el que va unido al motor. Estos agitadores son paralelos a las paredes de la columna. La razón de esto es evitar todo tipo de patrón dentro flujo, es decir, lo más desordenado posible, ya que al colocar los agitadores en forma perpendicular a las paredes se formaba un remolino.

También para evitar mayormente este tipo de problemas generado por los agitadores, se colocaron dos mallas de acero inoxidable, de manera que los agitadores queden entre esta malla y la pared. A continuación se muestran la columna de agua y los agitadores laterales:



Figuras 3.1 y 3.2: Fotografías del estanque de acrílico.



Figuras 3.3, 3.4 y 3.5: Fotografías de los agitadores laterales.

### 3.1.2 Cámara de Alta Velocidad

Para realizar las grabaciones de las partículas en suspensión se cuenta con una cámara de alta velocidad con una capacidad de grabación de 300 cuadros (Cuadros) por segundo y una resolución hasta 512x512 píxeles. Esta cámara viene con un programa por medio del cual es posible elegir los cuadros por segundo y la velocidad de obturación a la cual se desea grabar.

Unido a la cámara se utilizó un lente para poder filmar desde más cerca. Este lente tiene la capacidad de cambiar de lugar el foco, alejarse o acercarse y aumentar o disminuir la luz de entrada a la cámara.



Figuras 3.6 y 3.7: Fotografías de cámara de alta velocidad.

### 3.1.3 Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

#### 3.1.3.1 Descripción

Para la determinación de las tres componentes de las velocidades instantáneas del flujo se utilizó un velocímetro acústico Doppler tridimensional (ADV, Acoustic Doppler Velocity) de la fábrica Sontek, el cual determina la velocidad mediante el cambio de frecuencia que tiene una onda reflejada, por medio del efecto Doppler.

El principio de operación de este instrumento para determinar las velocidades instantáneas corresponde a una onda sonora enviada por un transmisor, de frecuencia conocida, y al llegar este pulso al volumen de control o medición (el cual está ubicado a 5 cm de la punta del instrumento), éste es reflejado hacia los receptores, gracias a la presencia de algún material o burbujas que estén presentes en el fluido. Los receptores registran el cambio de frecuencia debido a la velocidad de las partículas, con este cambio de frecuencia se determina la velocidad de las partículas en el volumen de control.



Figura 3.8: Fotografía Del Velocímetro Tridimensional.

### **3.1.3.2 Volumen de Control y Ejes Cartesianos**

El volumen de muestreo se puede representar como un cilindro de 4.5 mm de alto y 6mm de diámetro, encontrándose a 5 cm del emisor en la dirección del eje del instrumento, distancia necesaria para que las velocidades medidas no sean afectadas por la presencia del sensor.

La componente z de los ejes cartesianos, coincide con la dirección del eje del instrumento, encontrándose las otras dos componentes en forma perpendicular a esta (x e y).

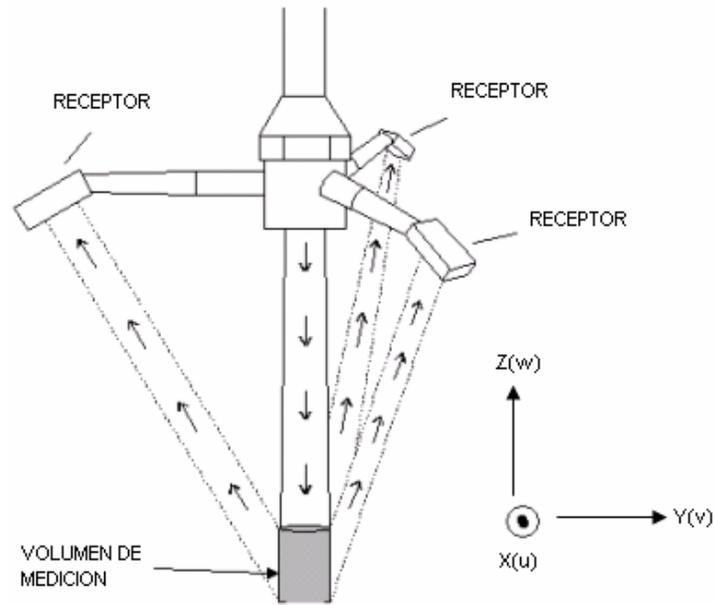


Figura 3.9: Esquema Sistema De Medición y Dirección De Ejes.

### 3.1.3.3 Operación y Validación de Velocidad

Para llevar a acabo la operación del equipo se uso un software desarrollado por ADV Sontek denominado ADV.EXE. Este programa requiere como datos de entrada, la temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la salinidad (en ppm), con lo cual puede calcularse la velocidad del sonido en el agua.

También es necesario seleccionar el rango de velocidades de manera de cubrir el mayor valor esperado, pero este rango debe ser el más cercano al valor máximo de manera de minimizar el error de las mediciones.

Rango De Velocidad [cm/seg]	Máxima Velocidad Horizontal [cm/seg]	Máxima Velocidad Vertical [cm/seg]
entre -5 y +5	entre -30 y +30	entre -8 y +8
entre -10 y +10	entre -60 y +60	entre -15 y +15
entre -30 y +30	entre -120 y +120	entre -30 y +30
entre -100 y +100	entre -300 y +300	entre -75 y +75
entre -250 y +250	entre -360 y +360	entre -90 y +90

Tabla 3.1: Características de las mediciones máximas.

Por cada medición el ADV registra 9 valores: tres velocidades en coordenadas cartesianas, tres correlaciones (una para cada receptor) y tres valores que indican la relación entre la magnitud de la señal recibida y el ruido de la misma (una para cada receptor). Para determinar la calidad de los datos se utilizan las correlaciones y los valores de SNR (magnitud relativa de la señal).

La relación de cuánto se parecen entre sí los conjuntos de datos es llamado coeficiente de correlación y para realizar obtener datos de velocidades aceptables (y turbulencia) este coeficiente debe estar entre 70 y 100%.

La magnitud de la señal recibida es una medida de la intensidad de las ondas acústicas reflejadas y el velocímetro expresa esta magnitud como la razón entre la señal y el ruido, conocido como SNR y se define como:

$$SNR = 20 * \log\left(\frac{I}{N}\right)$$

Donde I es la intensidad de la señal y N es la magnitud del ruido. Este valor tiene unidades de decibeles y para obtener datos de velocidades aceptables (y turbulencia) debe ser mayor a 15 decibeles.

#### **3.1.3.4 Sistema de Movimiento del ADV Sobre la Columna**

El ADV está instalado sobre el estanque, afirmado por un carro que se puede mover a lo largo y ancho de la columna, sobre una estructura metálica. También es posible regular la altura del instrumento al estar puesto en el carro sobre la estructura.

La idea de este carro es poder medir con el ADV en cualquier posición dentro de la columna de agua y poder mantenerlo fijo en dicha posición, durante el tiempo que sea necesario.



Figuras 3.10 y 3.11: Fotografías Carro Sobre Columna.

### **3.1.4 Sedimento Utilizado**

De los sedimentos cohesivos que fueron utilizados en laboratorio, se eligió bentonita, debido a que era el sedimento que mejor lograba suspender al generar la turbulencia con los agitadores laterales dentro de la columna de agua.

#### **3.1.4.1 Composición y Estructura de la Bentonita**

Gran parte de los minerales de arcilla están formados por dos unidades estructurales básicas diferentes, silicatos y aluminatos. Ambas unidades se combinan formando partículas que se caracterizan por tener una gran superficie específica (gran relación entre el área y la masa), característica que determina el comportamiento del material.

La bentonita es una arcilla compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, con independencia de su génesis y modo de aparición. Las esmectitas son filosilicatos, presentando una gran diversidad composicional.

Su estructura se basa en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidróxilos. Los oxígenos se unen formando capas de extensión infinita con coordinación tetraédrica.

Tres de cada cuatro oxígenos están compartidos con los tetraedros vecinos. Una capa octaédrica entre dos tetraédricas, unidas fuertemente por enlace covalente, forman la unidad estructural básica de las esmectitas.

La presencia de la superficie interlaminar así como de una débil carga en la misma, son características esenciales de este grupo de minerales. Como consecuencia de ello son capaces de incluir en ella no sólo cationes hidratados, sino también agua u otros líquidos polares, dando lugar a una mayor separación de las capas (aumento de su espaciado reticular) y por lo tanto “hinchamiento”.

#### **3.1.4.2 Propiedades Físicoquímicas de la Bentonita**

Las propiedades fisicoquímicas de la bentonita se obtienen a partir de:

- Un tamaño muy pequeño de la partícula.
- Una morfología laminar (filosilicatos).
- Las sustituciones isomorfas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

A continuación se describen algunas de las propiedades fisicoquímicas:

##### **3.1.4.2.1 Superficie Específica**

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que ésta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en  $\text{m}^2/\text{gr}$ . Las bentonitas poseen una elevada superficie específica entre 150-800  $\text{m}^2/\text{gr}$ .

### **3.1.4.2.2 Capacidad de Intercambio Catiónico**

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral.

Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

1. Sustituciones isomorfas dentro de la estructura, independientes del pH y la actividad ionica del medio.
2. Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas, dependientes del pH y la actividad ionica del medio.
3. Disociación de los grupos hidroxilos accesibles, dependientes del pH y la actividad ionica del medio.

En el caso de las bentonitas la capacidad de intercambio catiónico varía entre 70 y 130 meq/100 g.

### **3.1.4.2.3 Hidratación e Hinchamiento**

La hidratación y deshidratación de la superficie interlaminar son también propiedades únicas de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos de la bentonita. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento.

Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. Cuando el catión interlaminar es el  $\text{Na}^+$ , las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, y si por el contrario, tienen  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

#### **3.1.4.2.4 Plasticidad**

Las esmectitas son especialmente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma un recubrimiento sobre las partículas laminares de esmectita produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las esmectitas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, extremadamente pequeño tamaño de partícula (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

#### **3.1.5 Voltímetro y Foco Luz Continua.**

##### **3.1.5.1 Voltímetro**

Para poder medir de alguna forma la velocidad de los motores, se eligió una forma indirecta, la cual no determina la velocidad sino la diferencia de voltaje que pasan por los motores. Para esto se cuenta con un Voltímetro, el cual se muestra en la Figura.



Figura 3.12: Fotografía Voltímetro.

### 3.1.5.2 Foco de Luz Continua

Al realizar experimentos y análisis pruebas de las grabaciones de las partículas en suspensión con luz de corriente alterna, se presentan cambios de intensidad que a simple vista no se perciben, pero sí al ver los cuadros de los videos. Este cambio de intensidad produce que las partículas aparezcan y desaparezcan en el tiempo lo que hace difícil estudiar su comportamiento (la metodología de grabación se explica mas adelante en el Punto 3.2.4).

Es por esto que para poder analizar las partículas de las grabaciones fue necesario tener un foco de iluminación continuo, con este foco es posible hacer que no se vean cambios de intensidad en los videos y así poder trabajar de mejor manera con los cuadros de las imágenes.

La forma de generar esta luz en forma continua es con un foco a batería el cual unido a un transformador de corriente alterna en continua logra generar la luz requerida para evitar el problema de intensidad antes mencionado.



Figura 3.13: Fotografía Foco Luz Continua.

## **3.2 Metodología de Trabajo**

### **3.2.1 Trabajo Previo**

- Se buscó y analizó la información bibliográfica relacionada con el tema, ya sea, información general sobre sedimentos cohesivos, experimentos similares e instrumentos utilizados para analizar flóculos.
- Habilitación la instalación experimental, para lo cual se contó con el apoyo del taller mecánico del Departamento.
- Selección del sedimento cohesivo a utilizar en el estudio experimental, el cual fue facilitado por el IDIEM. De los tres sedimentos cohesivos facilitados Kaolinita, Bentonita y Pumacita, se eligió Bentonita, como se menciona anteriormente. Esta elección se debió a que la Bentonita era la que más se lograba suspender al poner en marcha los agitadores y la con mayor características cohesivas.

### **3.2.2 Experimentación**

#### **3.2.2.1 Generalidades**

- Se definió la instrumentación y las técnicas a utilizar en los experimentos de laboratorio. Estas técnicas fueron concretadas en experimentos prueba.
- Se realizaron experimentos finales, en los cuales se utilizó las técnicas e instrumentación seleccionadas en los experimentos de prueba, como también la metodología y análisis a seguir.
- Se determinaron las características (propiedades) del sedimento por métodos experimentales.

### 3.2.2.2 Procedimiento

Para los trabajos de laboratorio se procedió de la siguiente manera:

- Se analizó el flujo turbulento para tres diferentes velocidades de los motores. Para esto se midió con el ADV en diferentes posiciones dentro de la columna de agua.
- Se realizaron grabaciones durante un tiempo determinado (24 min), para 9 diferentes casos en una misma posición. Los nueve casos corresponden a la combinación de 3 velocidades de los motores con 3 concentraciones diferentes del sedimento, cabe señalar que estas concentraciones son pequeñas, debido a que para altas concentraciones (mayores a 0.1030 gr/lit) no se lograron buenas grabaciones, ya que las imágenes se tornan difusas. Por esto se eligieron concentraciones menores a 0.1 gr/lit (Tabla 3.2).
- Se realizó dos diferentes experiencias para analizar las propiedades de la Bentonita. (Tabla 3.3).

<b>Experiencias</b>		
Experiencia	Energía Cinética Turbulenta [ $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ]	Concentración [gr/lit]
A	9.23	0.0129
B	7.61	0.0129
C	5.66	0.0129
D	9.23	0.0258
E	7.61	0.0258
F	5.66	0.0258
G	9.23	0.0515
H	7.61	0.0515
I	5.66	0.0515

Tabla 3.2: Experiencias De Laboratorio.

<b>Experiencias Sedimento</b>	
1	Fotografía Microscopio
2	Granulometría Láser

Tabla 3.3: Experiencias Con Sedimento.

### 3.2.3 Metodología de Medición y Análisis de Datos con el ADV

#### 3.2.3.1 Metodología de Medición con el ADV

Para poder caracterizar la turbulencia dentro de la columna de agua fue necesario medir series de velocidades en diferentes puntos. Para esto fue necesario, primero que todo, determinar el tiempo de medición o muestreo con el ADV. Para esto se midió durante 3 minutos en diferentes posiciones graficando las velocidades medias acumuladas y la desviación estándar. Los resultados se ven las siguientes Figuras 3.14 y 3.15:

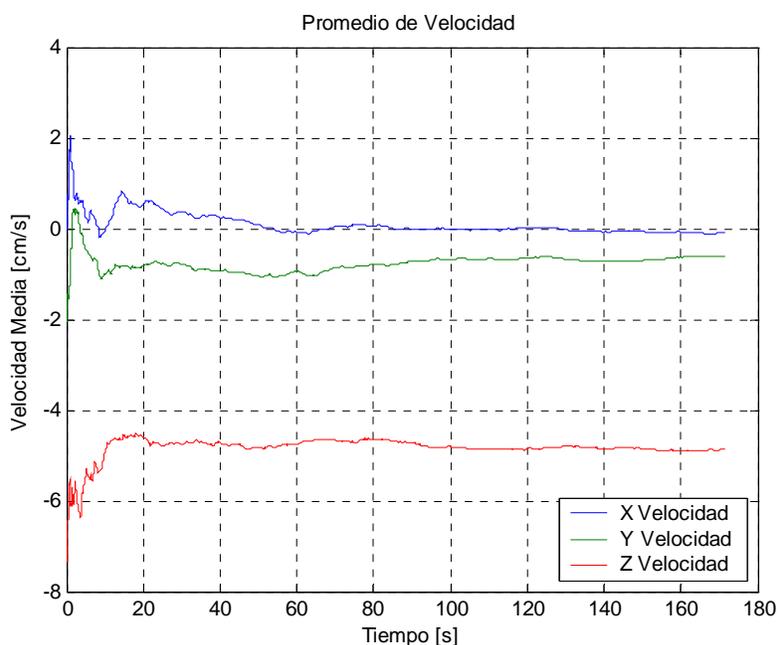


Figura 3.14: Velocidades Medias.

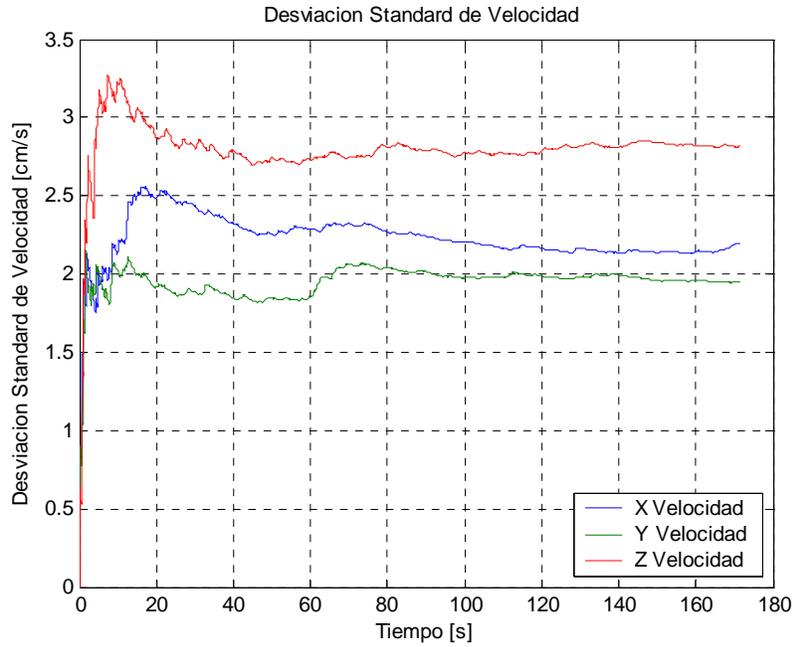


Figura 3.15: Desviación Estándar De Velocidad.

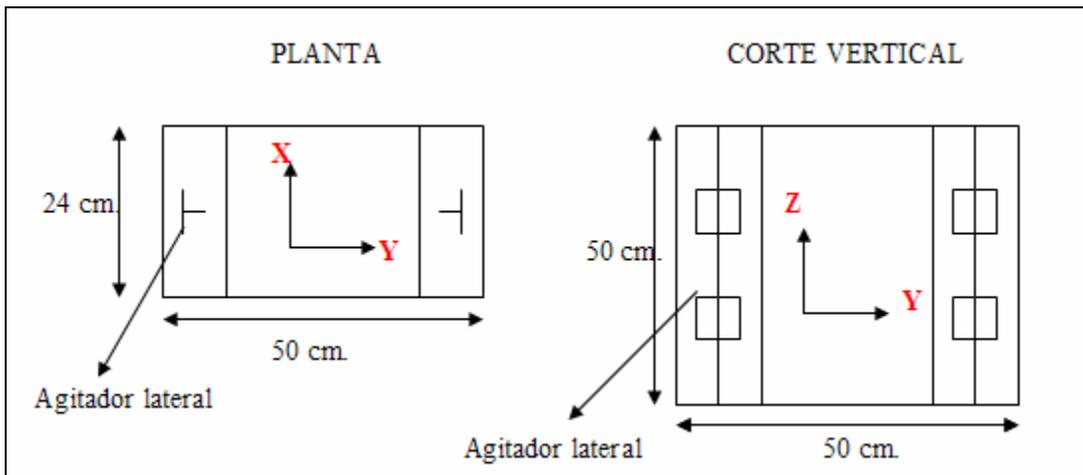


Figura 3.16: Direcciones Ejes Cartesianos en el Estanque ( $x=u$ ;  $y=v$ ;  $z=w$ ).

Como se logra apreciar el tiempo de medición para el cual las series de datos convergen es de 120 a 140 segundos aproximadamente.

Luego de conocer el tiempo de muestreo se procedió a definir la posición y número de puntos a medir. Se determinó medir en tres planos y en nueve puntos dentro de cada uno.

Todo esto en la mitad del volumen dentro de la columna de agua, ya que, se supuso que las características del flujo son simétricas entre ambas mitades.

El volumen de agua dentro del cual se esta trabajando es de **38.8 litros** y los planos y puntos de medición se muestran en las Figuras siguientes:

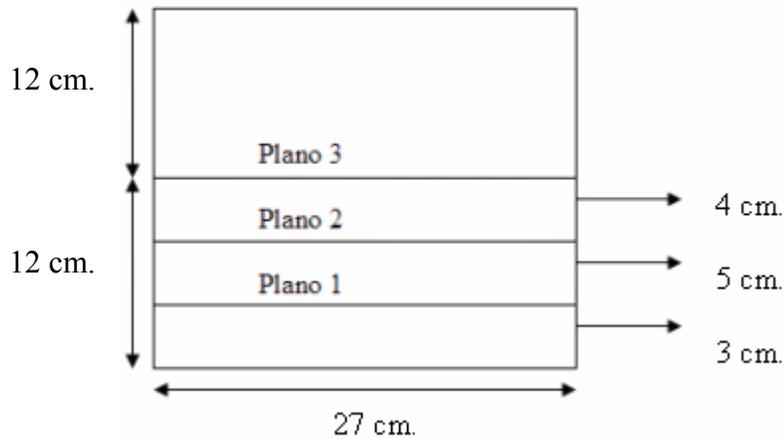


Figura 3.17: Esquema Planos de Medición (Planta).

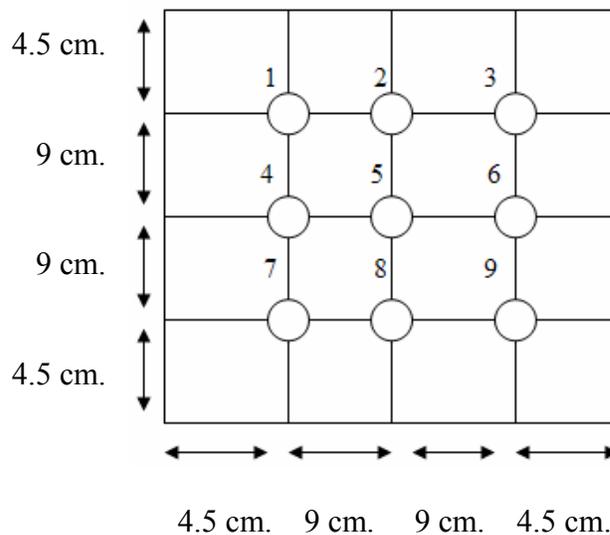


Figura 3.18: Puntos de Medición en Cada Plano (Corte Vertical).

Nota: Las Figuras 3.17 y 3.18 no se considera el área ocupada por los agitadores laterales.

### 3.2.3.2 Análisis de los Datos Medidos con el ADV

Los resultados obtenidos del ADV para los 27 puntos y las tres intensidades turbulentas (o velocidades de los motores) fueron analizados por una rutina programada en software Matlab 6.5 la cual entrega los datos y gráficos mostrados en las tablas 3.4 y 3.5 respectivamente. También se realizaron las curvas de nivel de la energía cinética turbulenta de los tres planos para las tres turbulencias, las cuales se muestran en el Anexo A.

<b>Calculos Con Velocidades (ADV)</b>	
Promedio de velocidades en los tres ejes (u, v, w)	$\langle u \rangle$ [cm/s]
	$\langle v \rangle$ [cm/s]
	$\langle w \rangle$ [cm/s]
Esfuerzos de Reynolds	$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
	$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
	$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
Esfuerzos de Reynolds partidos por Energia Cinetica Turbulenta	$\langle u'v' \rangle / k$
	$\langle u'w' \rangle / k$
	$\langle v'w' \rangle / k$
RMS en los tres ejes (u, v, w)	RMS(u) [cm/s]
	RMS(v) [cm/s]
	RMS(w) [cm/s]
Promedio de velocidades medias instantaneas en los tres ejes (u, v, w)	$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
	$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
	$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
Energia cinetica Turbulenta	k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]

Tabla 3.4: Cálculos Realizados Con Datos de Velocidades.

<b>Gráficos Con Velocidades (ADV)</b>
Señal De Velocidades
Desviación Standard de Velocidad
Promedio de Velocidad
Función de Auto Correlación
Función de Correlación Cruzada
Densidad de Energía Espectral

Tabla 3.5: Gráficos Realizados Con Datos de Velocidades.

### 3.2.4 Metodología de Grabación y Análisis de Imágenes con la Cámara.

La caracterización o análisis de las imágenes se realizó por medio del software Matlab 6.5. Este programa tiene la propiedad de examinar los Cuadros (cuadros del video o grabación) de cualquier video en formato AVI.

#### 3.2.4.1 Metodología de Grabación con la Cámara.

La manera por la cual se analizó o caracterizó el comportamiento del sedimento, con la turbulencia, al estar dentro de la columna de agua, fue por medio del contraste generado por las partículas en suspensión al grabar en un plano determinado.

Por un lado, del plano de grabación, se encuentra ubicada la cámara (de alta velocidad) y por el otro lado (opuesto a la cámara), se ilumina el plano con el foco de luz continua, y de esta manera se logra obtener el contraste antes mencionado, es decir, las partículas que pasen por el plano de grabación se verán mas oscuras, ya que, están iluminadas desde atrás. Es de esta forma indirecta por la cual se relacionara la energía cinética turbulenta con la dinámica y tamaño de los flóculos.

Primero que todo, se eligió o determinó el lugar y área (dentro de la columna de agua) en donde se realizaron las grabaciones, esta área (de grabación) está ubicado a 4 cm. de la pared y en el centro del plano formado por el agua. Luego de realizar grabaciones a diferentes áreas la elegida fue de 1 cm<sup>2</sup> y coincidente con el plano 1.

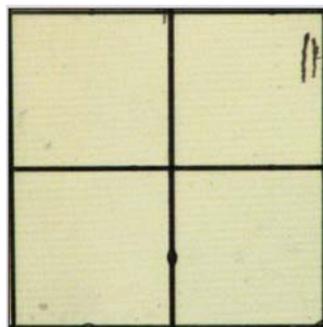


Figura 3.19: Grilla (cuadrados de 5 mm.) Usada Para Enfocar 1 cm<sup>2</sup>.

Luego, para cada experiencia, se grabó 1023 Cuadros (30 por cada segundo), con una velocidad de obturación de 1/1000 y una resolución de 512 x 512 cada 4 minutos durante 28 minutos. Antes de comenzar a grabar (para cada experiencia), fue necesario calibrar cuánta luz se deja pasar a través de la cámara de manera de lograr el mayor contraste posible, pero sin saturar la imagen.

### **3.2.4.2 Análisis de Imágenes con la Cámara.**

Una vez guardados los videos en formato AVI, se procedió a analizarlos a través de una rutina programada en el software Matlab 6.5 antes mencionado. Por cada experiencia se analizaron 1 cada 15 Cuadros, 64 cada 4 minutos, es decir, 448 Cuadros en total.

A cada uno de los 448 Cuadros, la rutina tiene la función de transformar todo el fondo a negro y las partículas en suspensión que se encuentran en el plano focal dejarlas en blanco. De esta manera, se logra obtener el área (aproximada) de cada partícula y el número de partículas para cada frame.

A cada frame se le determinó:

1. Área de cada partícula.
2. Número de partículas.
3. Área Promedio.
4. Área mínima.
5. Área máxima.

Luego de obtener todos los datos de cada frame se procedió a graficar y analizar los resultados de manera de obtener relaciones que nos permitieran deducir o postular algún tipo de ecuación que caracterizara el comportamiento de los flóculos del sedimento al encontrarse con las diferentes turbulencias aplicadas.

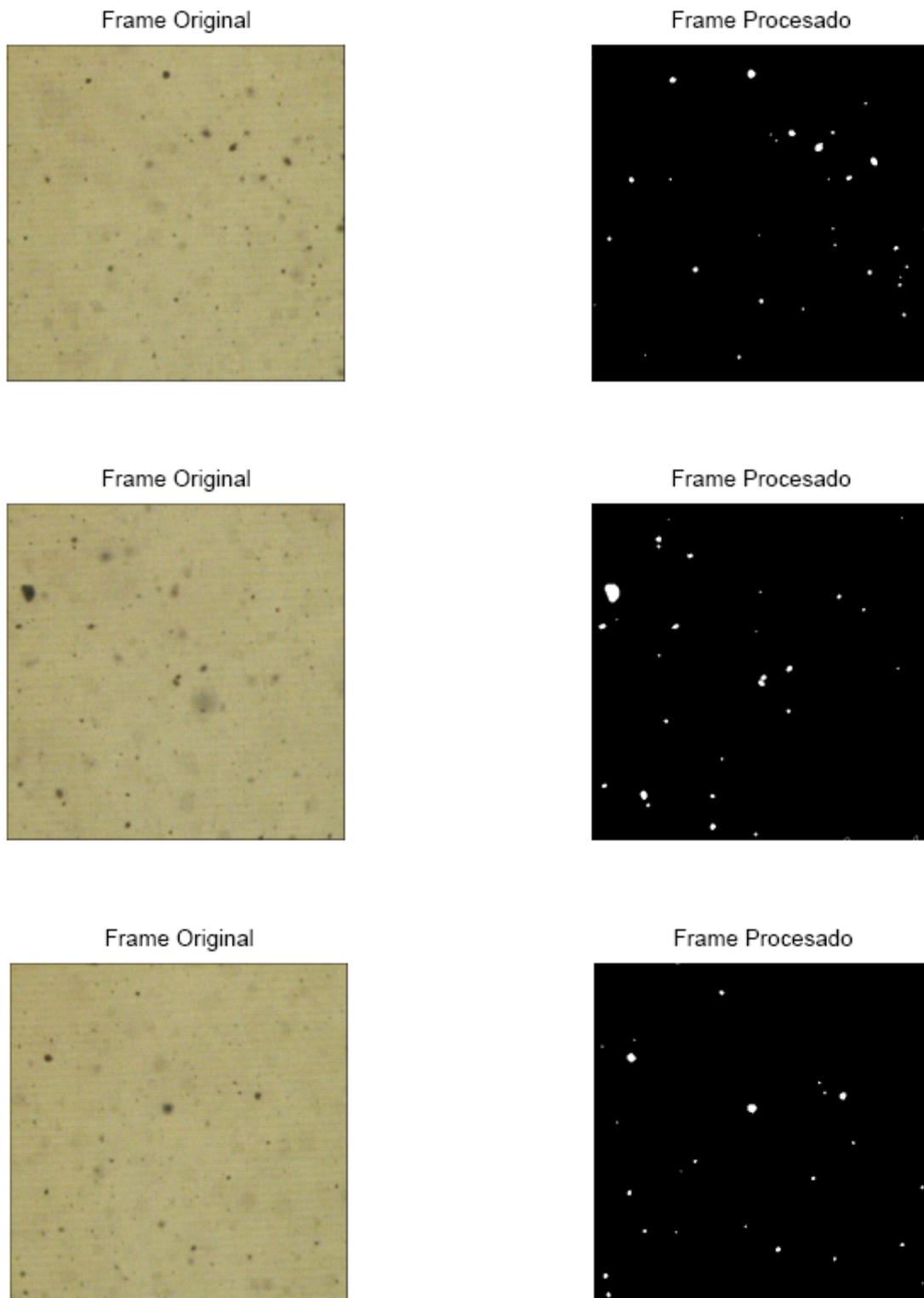


Figura 3.20: Ejemplos de Procesamiento de Cuadros.

### 3.2.5 Metodología y Análisis de Experiencias con Sedimento.

#### 3.2.5.1 Microscopio.

Un método para medir el tamaño de las partículas es fotografiándolas a través de un microscopio, para luego analizar las fotografías para sacar una estadística de tamaños.

Para realizar esta experiencia se contó con la ayuda del laboratorio de calidad de aguas. En este lugar se tomaron la fotos a muestras secas del sedimento.

##### 3.2.5.1.1 Análisis y Resultados de las Fotografías.

Luego de tomar un gran número de fotos (90 aproximadamente), se determinó el área de todas las partículas de cada una de las fotos a través de una rutina programada en el software Matlab 6.5, muy similar a la forma de analizar los Cuadros de los videos. Una vez obtenidas todas las áreas de las partículas, con esta rutina se creó una curva granulométrica del sedimento (con las áreas en píxeles), y para obtener el diámetro medio se contó con la escala de la Figura 3.21:

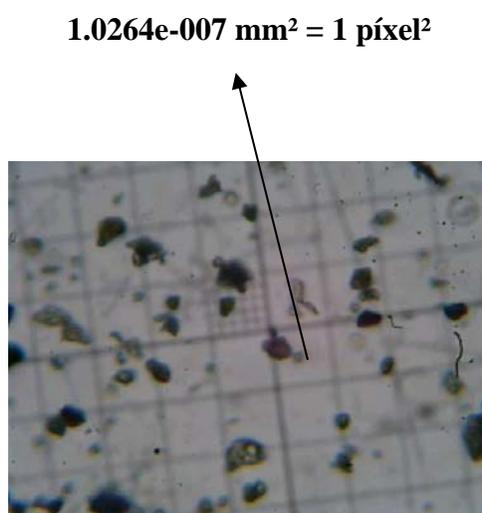


Figura 3.21: Fotografía microscopio.

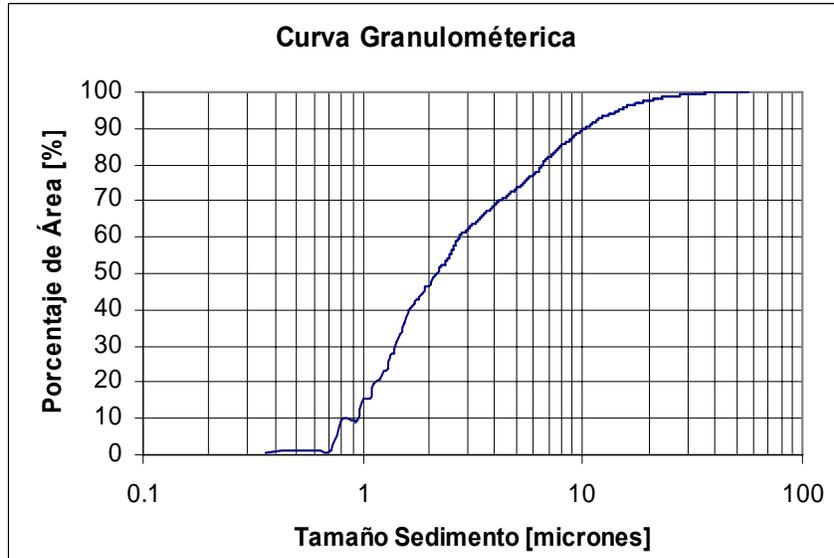


Figura 3.22: Curva Granulométrica (método microscopio).

Con la escala antes mencionada se obtiene que el diámetro medio de la bentonita, es decir, el  $d_{50}$  es de aproximadamente 2.2 micrones. Esto corresponde a un área en píxeles de 36 píxeles cuadrados aproximadamente.

### 3.2.5.2 Granulometría Láser.

Por medio del instrumento “Mastersizer 2000” (Figura 3.23) se determinó el tamaño de la Bentonita por difracción láser. Los diferentes accesorios permiten la homogeneización de la muestra. Uno para dispersión en aire (Scirocco) y el otro para dispersión en fases líquidas (Hydro SM e Hydro $\mu$ P).

Este equipo puede medir, con elevada precisión, tamaños de partícula entre 0,1 $\mu$ m y 2000 $\mu$ m de materiales de naturaleza muy diferente (fármacos, pigmentos, arcillas, polímeros, cenizas, catalizadores, biomateriales), en estado sólido o dispersos en una fase líquida (emulsiones y suspensiones) o en una fase gas. Mediante esta técnica es posible analizar el tamaño de partícula de suspensiones y emulsiones en todo tipo de medio dispersante (agua, alcoholes, disolventes orgánicos, aceites, isoparafinas, aire, etc.).

Hay que remarcar, que en esta técnica, la medida del tamaño de partícula se realiza sobre toda la muestra escogida como representativa del material. Es decir, toda la muestra que se introduce dentro del instrumento pasa a través del haz láser, y por lo tanto el resultado obtenido depende de todas las partículas presentes en la muestra medida.



Figura 3.23: Mastersizer 2000.

El resultado entregado por el Mastersizer 200 se muestra en la Figura 3.24:

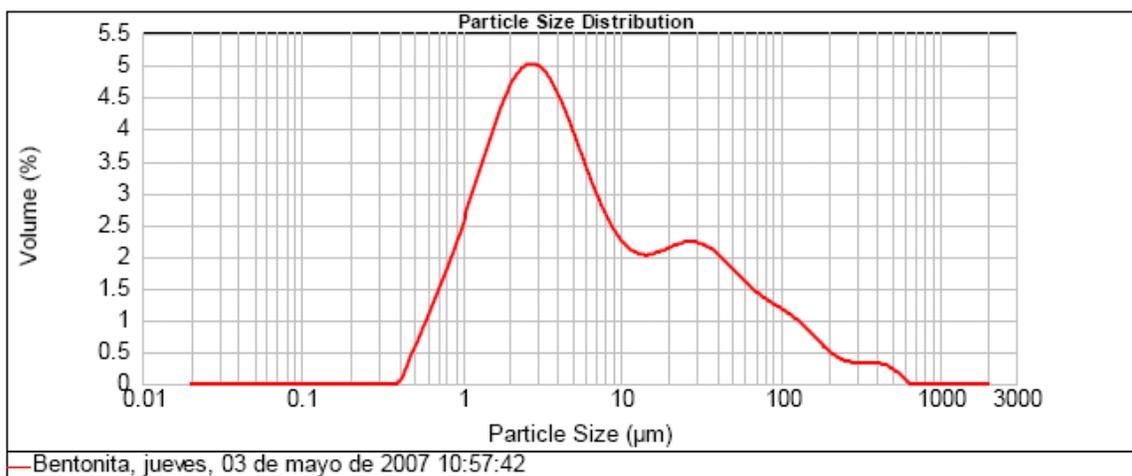


Figura 3.24: Resultados Difracción Láser.

También se entrega como datos el  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  y  $d_{90}$ :

$d_{10} = 1.176$  micrones;  $d_{50} = 4.669$  micrones y  $d_{90} = 63.98$  micrones.

**CAPÍTULO 4**  
**PRESENTACION Y ANALISIS DE**  
**RESULTADOS**

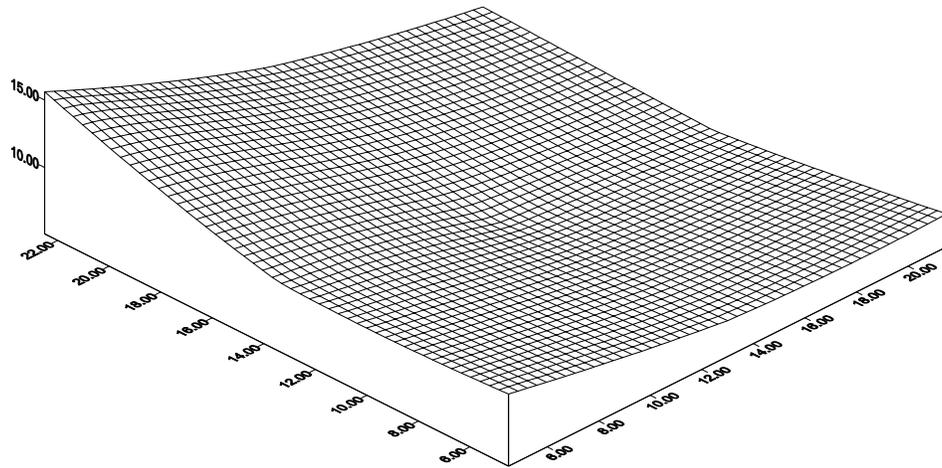
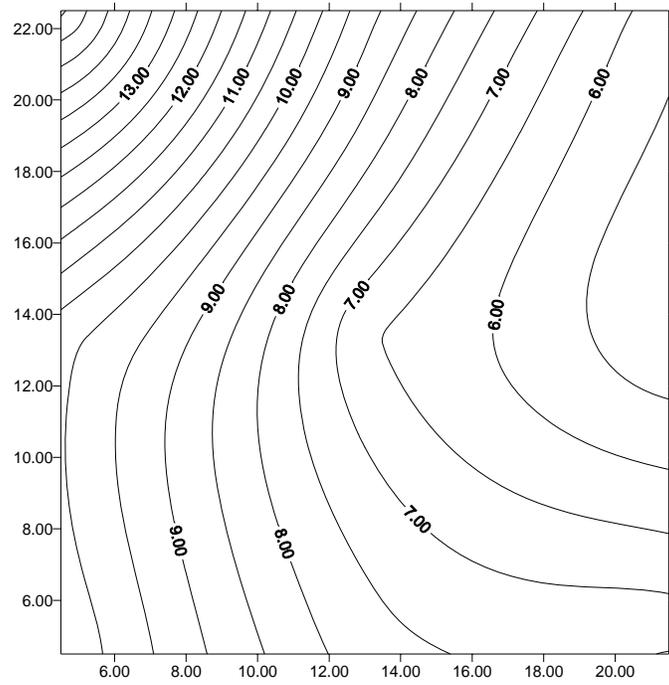
## **4. Presentación y Análisis de Resultados Experimentales**

En este capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos luego de realizar la metodología antes mencionada, como también el análisis correspondiente entre la energía cinética turbulenta y la dinámica de los flóculos de bentonita. Además se realiza un análisis de errores para los cálculos y grabaciones.

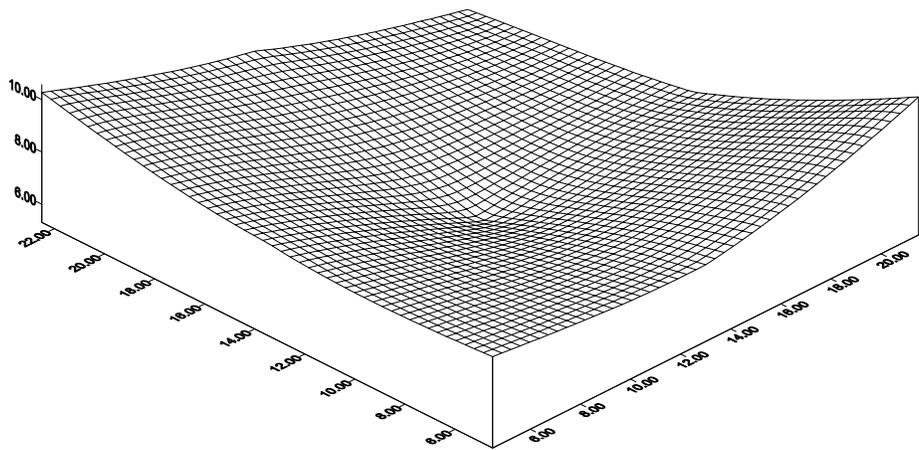
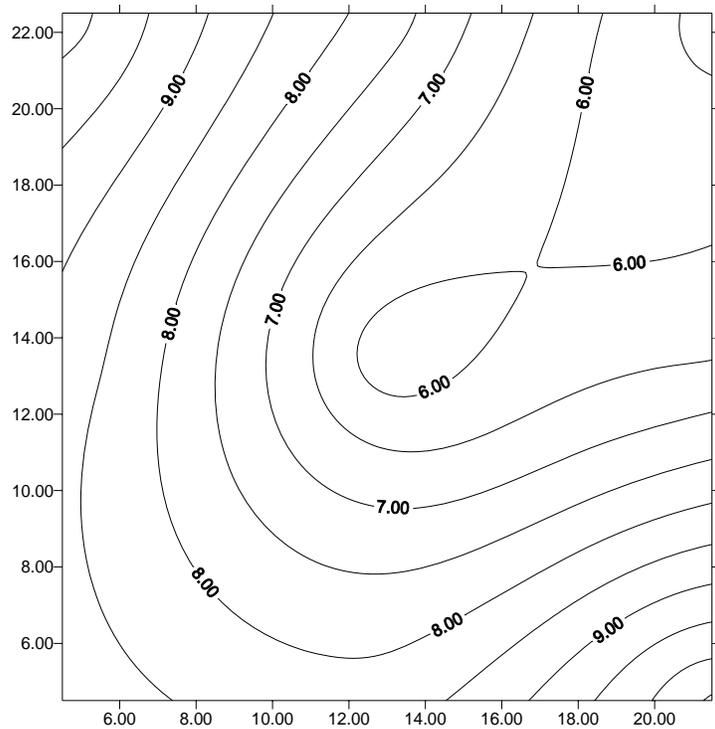
### **4.1 Resultados y Análisis de Velocidades**

Luego de filtrar los datos de velocidades, para correlaciones mayores a 70% y SNR mayores a 15 db para las 81 mediciones (27 para cada velocidad de los motores), los resultados y cálculos obtenidos se muestran en el Anexo A.

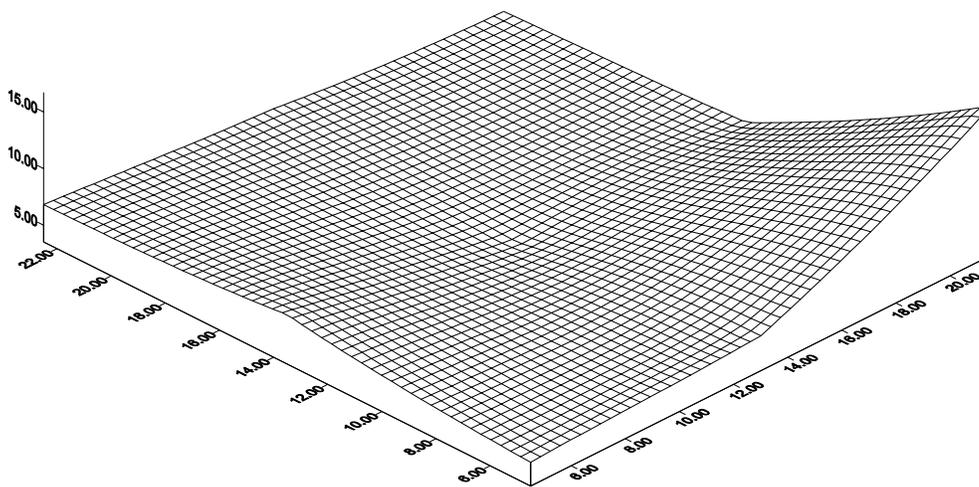
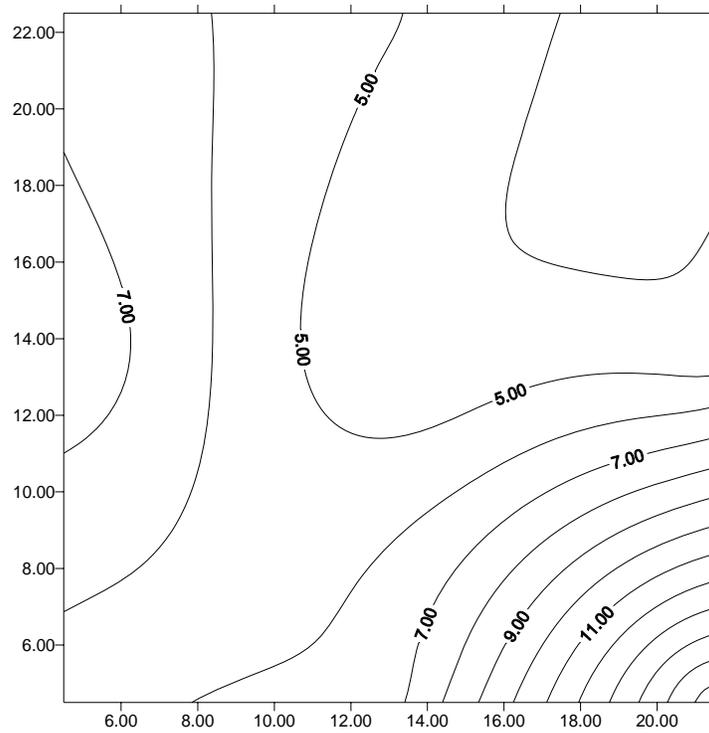
A continuación se muestran las curvas de nivel de energía cinética turbulenta por plano:



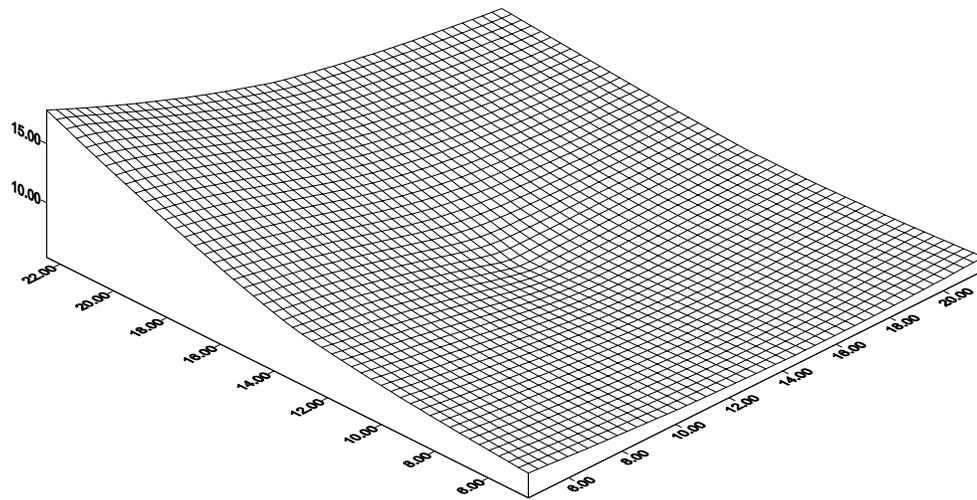
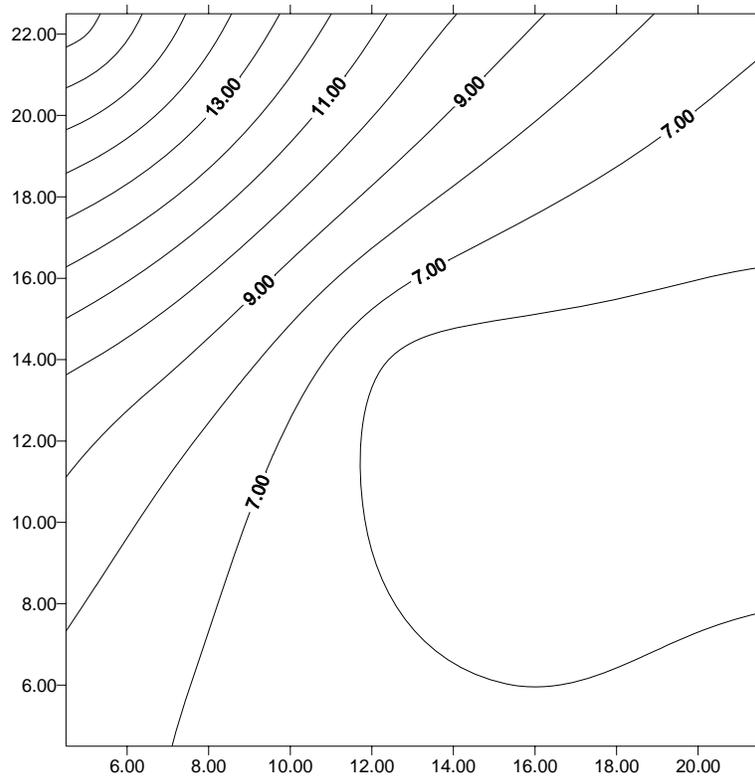
**Figuras 4.1: Energía Cinética Turbulenta Alta - Plano 1**



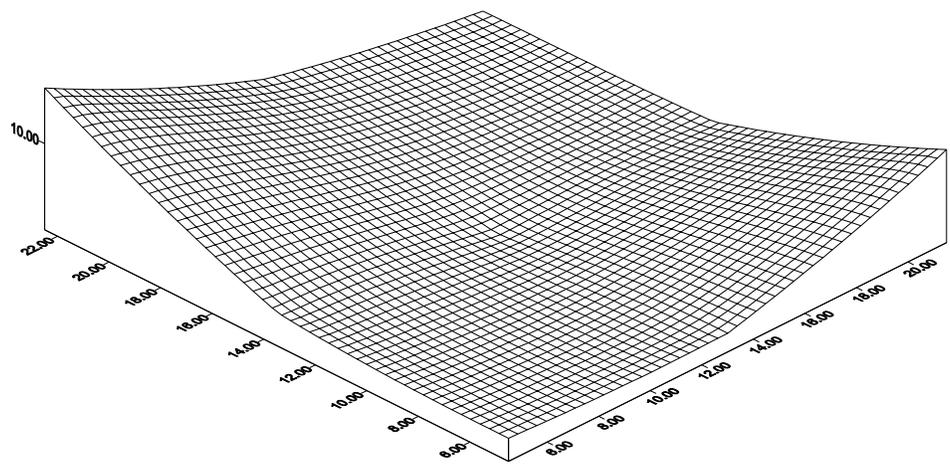
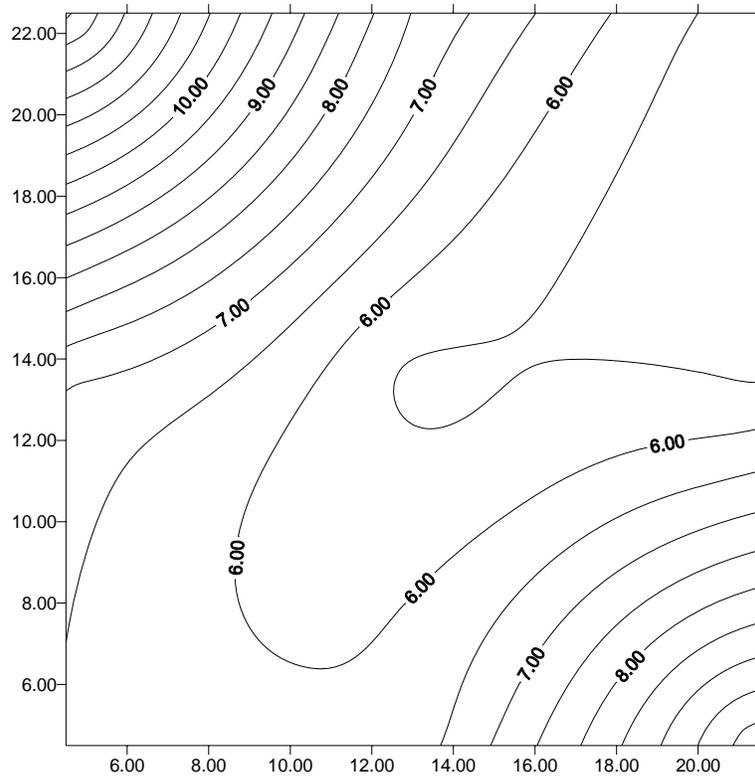
**Figuras 4.2: Energía Cinética Turbulenta Media - Plano 1**



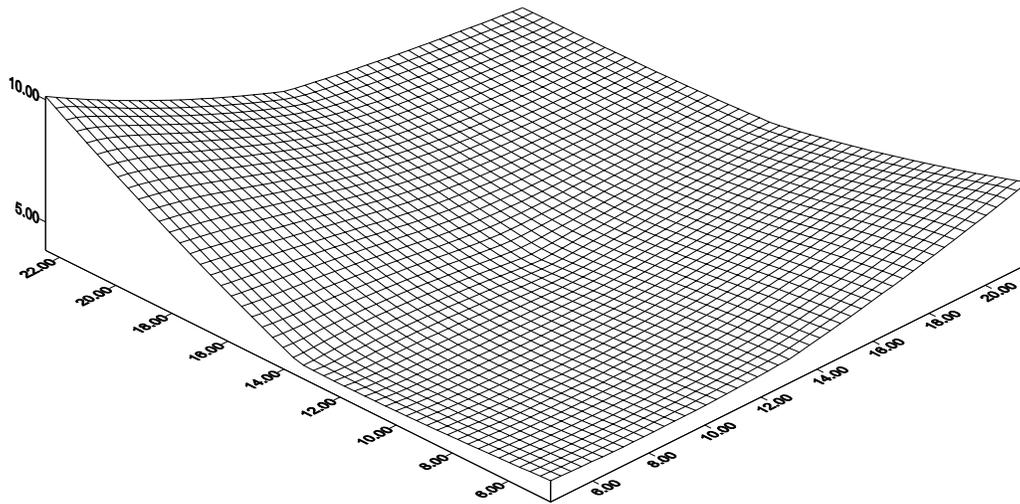
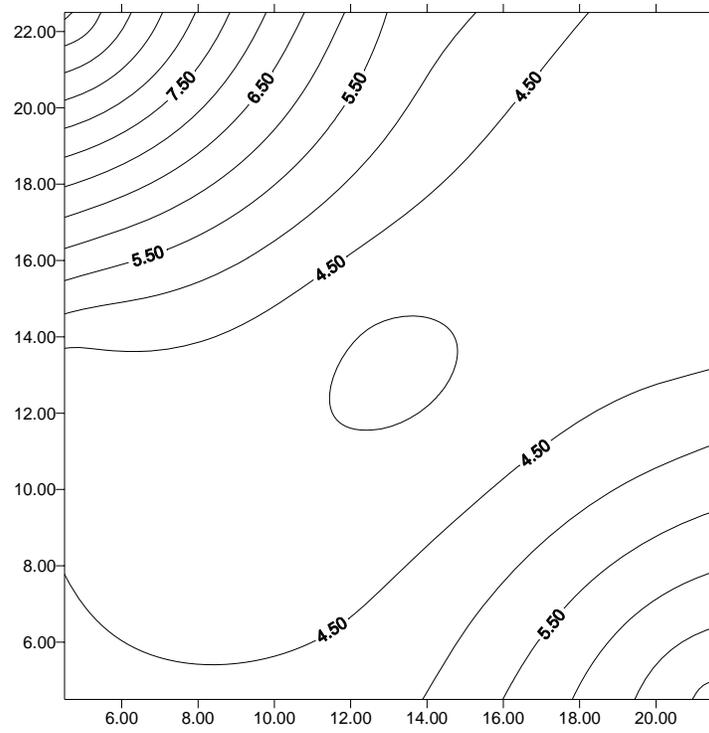
**Figuras 4.3: Energía Cinética Turbulenta Baja - Plano 1**



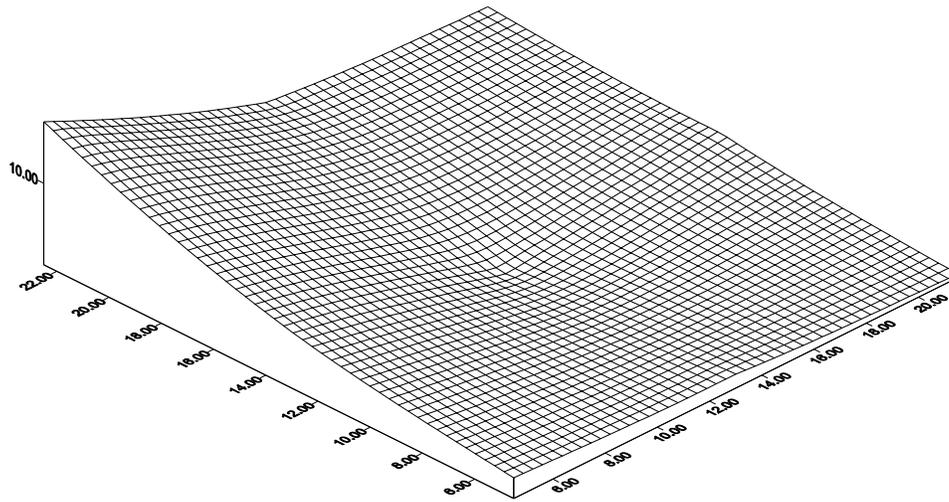
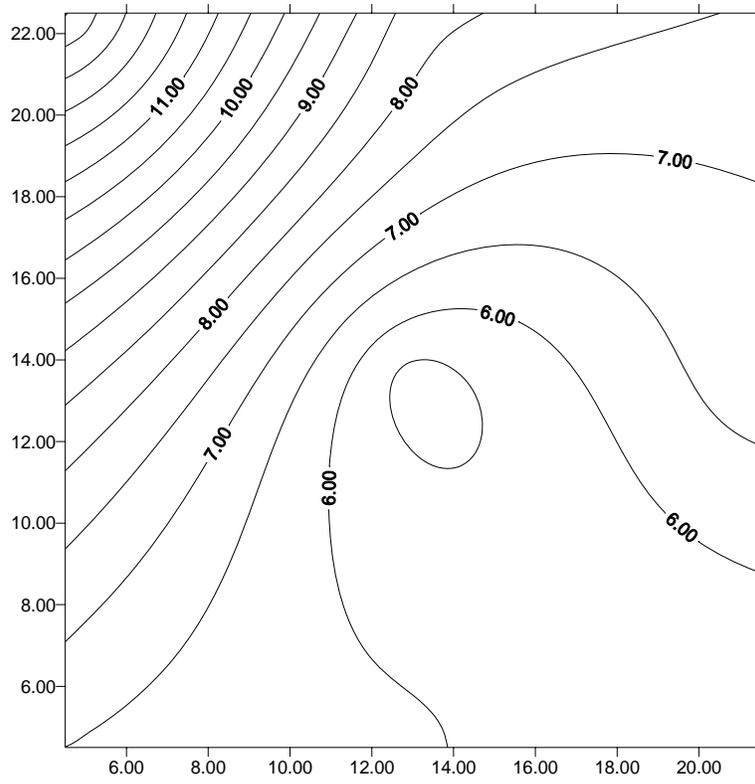
**Figuras 4.4: Energía Cinética Turbulenta Alta - Plano 2**



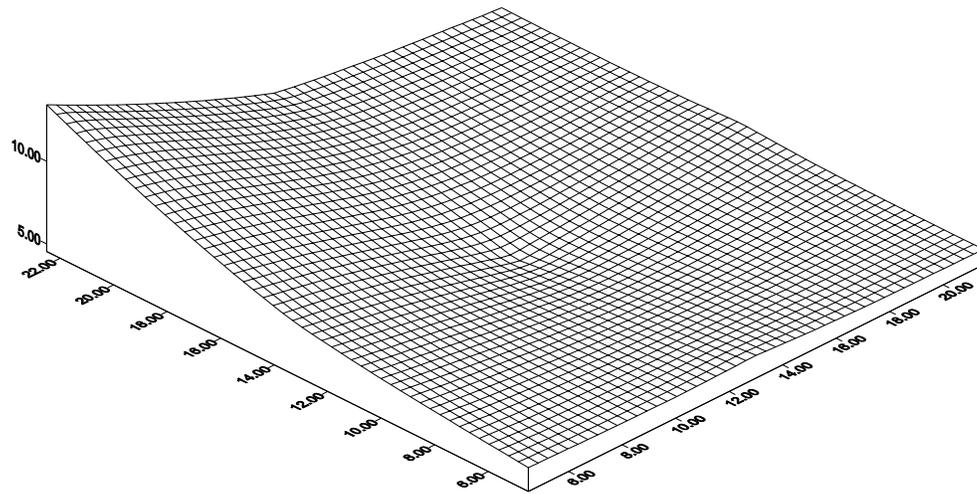
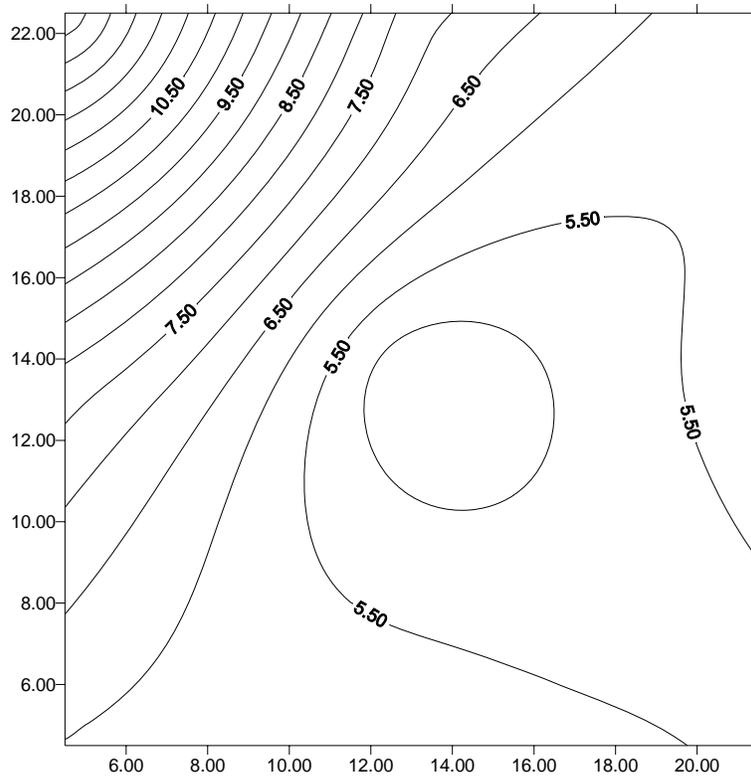
**Figuras 4.5: Energía Cinética Turbulenta Media - Plano 2**



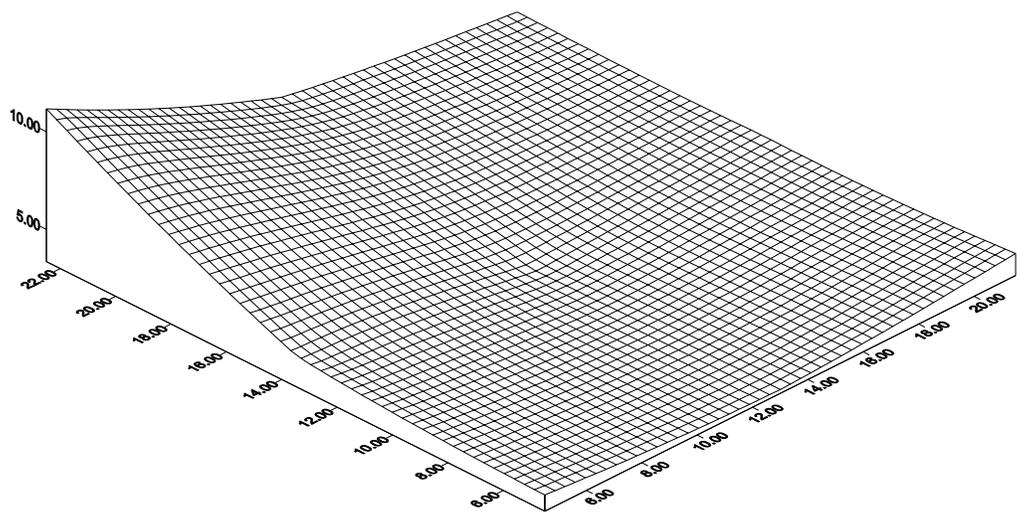
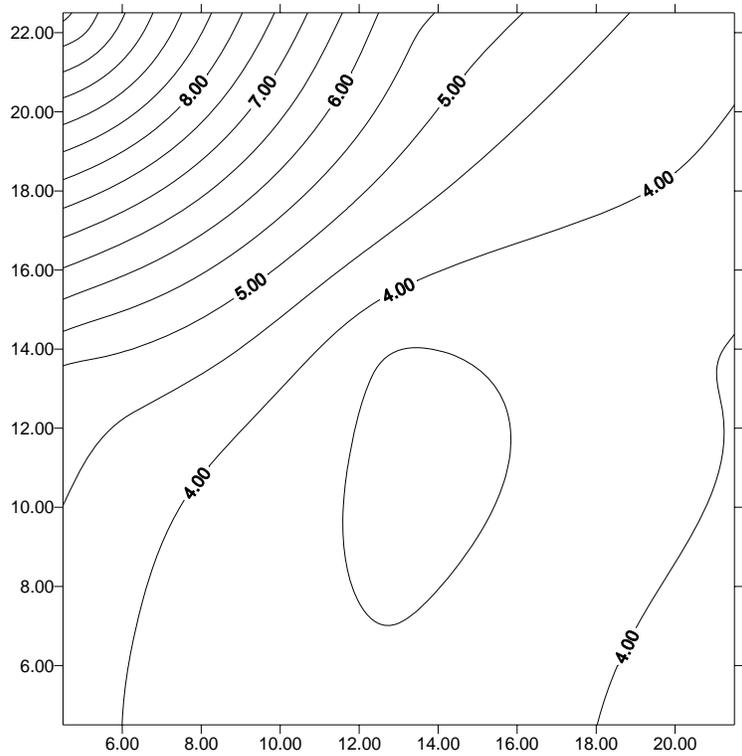
**Figuras 4.6: Energía Cinética Turbulenta Baja - Plano 2**



**Figuras 4.7: Energía Cinética Turbulenta Alta - Plano 3**



**Figuras 4.8: Energía Cinética Turbulenta Media - Plano 3**



**Figuras 4.9: Energía Cinética Turbulenta Baja - Plano 3**

Para cada variable que caracteriza la turbulencia se calculó su promedio espacial ponderado, según el porcentaje del volumen de agua que tengan asociados cada uno de los 27 puntos medidos. Este promedio ponderado se calculó para cada plano por separado y para todos los datos. Los resultados se muestran a continuación. Tablas 4.10; 4.11 y 4.12:

<b>Promedios Ponderados Intensidad Turbulencia Alta</b>				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Todo
$\langle u \rangle$ [cm/s]	0.18	-0.19	-0.55	0.05
$\langle v \rangle$ [cm/s]	0.81	-0.46	-0.96	0.00
$\langle w \rangle$ [cm/s]	-3.56	-1.11	-0.99	-2.28
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.55	0.84	0.47	0.61
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-1.02	-1.65	-0.42	-1.02
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.23	-0.62	0.23	-0.24
$\langle u'v' \rangle / k$	0.07	0.09	0.04	0.05
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.08	-0.12	-0.05	-0.08
$\langle v'w' \rangle / k$	-0.02	-0.07	0.00	-0.03
RMS(u) [cm/s]	2.38	2.45	2.53	2.66
RMS(v) [cm/s]	2.16	1.97	2.18	2.42
RMS(w) [cm/s]	1.85	2.02	1.98	2.11
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	6.84	7.10	6.56	7.38
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	5.27	4.33	4.89	5.37
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	4.03	5.00	4.15	4.82
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	9.72	9.47	8.17	9.23

Tabla 4.1: Promedios Ponderados Intensidad Turbulenta Alta.

<b>Promedios Ponderados Intensidad Turbulencia Media</b>				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Todo
$\langle u \rangle$ [cm/s]	0.37	0.54	-0.14	0.35
$\langle v \rangle$ [cm/s]	0.86	-0.28	-1.02	-0.10
$\langle w \rangle$ [cm/s]	-3.33	-2.02	-0.78	-2.34
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.48	0.62	0.27	0.53
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.72	-1.08	-0.88	-0.86
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.00	-0.31	0.15	-0.15
$\langle u'v' \rangle / k$	0.07	0.08	0.04	0.08
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.08	-0.12	-0.11	-0.10
$\langle v'w' \rangle / k$	0.00	-0.05	0.00	-0.02
RMS(u) [cm/s]	2.17	2.36	2.33	2.69
RMS(v) [cm/s]	2.05	2.06	1.98	2.59
RMS(w) [cm/s]	1.75	2.14	2.04	2.11
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	5.50	5.75	5.54	5.97
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	4.81	4.25	3.95	4.77
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	3.52	5.07	4.62	4.80
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	8.15	7.36	7.05	7.61

Tabla 4.2: Promedios Ponderados Intensidad Turbulenta Media.

<b>Promedios Ponderados Intensidad Turbulencia Baja</b>				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Todo
$\langle u \rangle$ [cm/s]	0.58	0.13	-0.21	0.23
$\langle v \rangle$ [cm/s]	1.46	0.11	-0.68	0.46
$\langle w \rangle$ [cm/s]	-3.18	-1.62	-0.55	-1.98
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.01	0.57	0.19	0.21
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.25	-0.91	-0.59	-0.54
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.14	-0.13	0.11	-0.06
$\langle u'v' \rangle / k$	0.05	0.11	0.03	0.06
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.06	-0.14	-0.09	-0.09
$\langle v'w' \rangle / k$	-0.01	-0.03	0.01	-0.01
RMS(u) [cm/s]	2.05	2.03	1.87	2.00
RMS(v) [cm/s]	2.09	1.81	1.79	1.93
RMS(w) [cm/s]	1.92	1.80	1.76	1.84
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	4.43	4.27	3.57	4.14
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	4.63	3.33	3.26	3.87
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	4.14	3.52	3.67	3.83
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	6.00	5.56	5.25	5.66

Tabla 4.3: Promedios Ponderados Intensidad Turbulenta Baja.

Se puede apreciar de los datos obtenidos en las Tablas N° 4.1 a 4.3 que para los casos de los esfuerzos de Reynolds,  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle u'w' \rangle$  y  $\langle v'w' \rangle$ , el plano 2 presenta la mayor diferencia en los tres casos (de turbulencias), siendo el valor mayor en módulo (por plano) para todas las turbulencias. Los otros dos planos 1 y 3, presentan una diferencia menor entre ellos. Esto se puede ver gráficamente en los Figuras 4.10 a 4.12.

Además es posible apreciar que los valores de los promedios totales de los esfuerzos (antes mencionados), también experimentan un aumento (en módulo) a medida que aumenta la velocidad de rotación de las hélices (agitadores laterales) (ver Figura 4.13).

También es posible apreciar que los valores de los promedios de las velocidades medias,  $\langle u \rangle$  y  $\langle v \rangle$ , van disminuyendo desde el plano 1 al 3. Para el caso de  $\langle w \rangle$  los valores van aumentando desde el plano 1 al 3. Estas disminuciones y aumento tienen una tendencia aproximadamente lineal en la mayoría de los casos. Esto se puede ver gráficamente en los Figuras 4.14 a 4.16. Los casos 1, 2 y 3 de las Figuras 4.13 y 4.17 corresponden a las intensidades turbulentas baja media y alta respectivamente. La pared nombrada en los gráficos corresponde a la pared más cercana y paralela al plano 1.

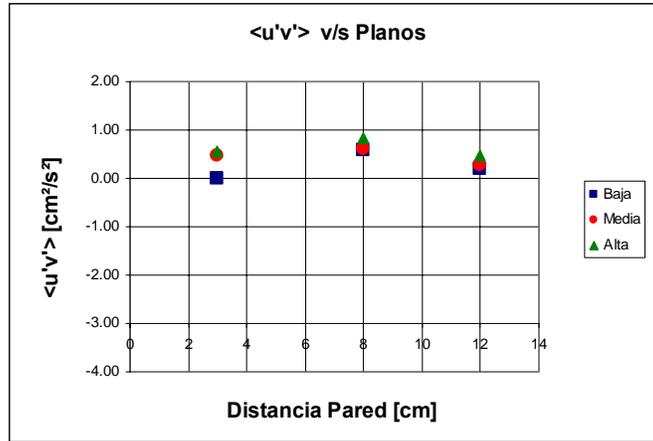


Figura 4.10: Distribución Esfuerzo Reynolds por plano para cada turbulencia

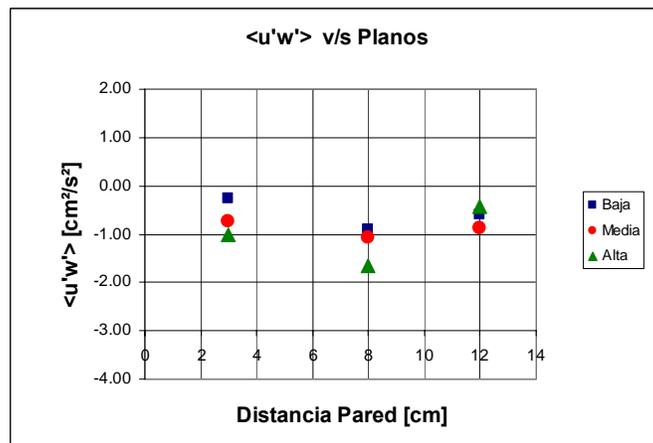


Figura 4.11: Distribución Esfuerzo Reynolds por plano para cada turbulencia

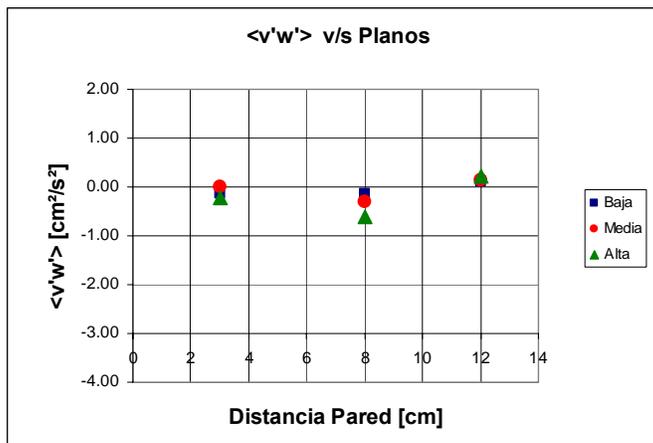


Figura 4.12: Distribución Esfuerzo Reynolds por plano para cada turbulencia.

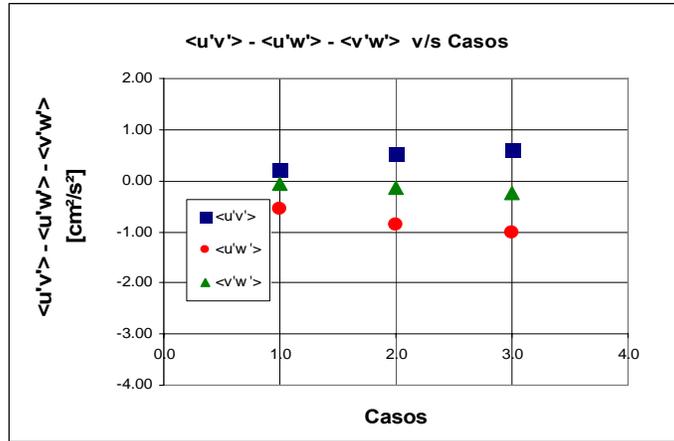


Figura 4.13: Esfuerzo de Reynolds Promedios Por Turbulencia.

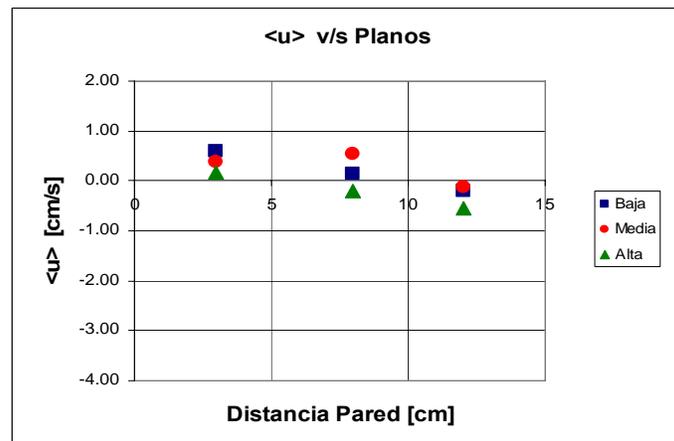


Figura 4.14: Promedio velocidad (u) por plano para cada turbulencia.

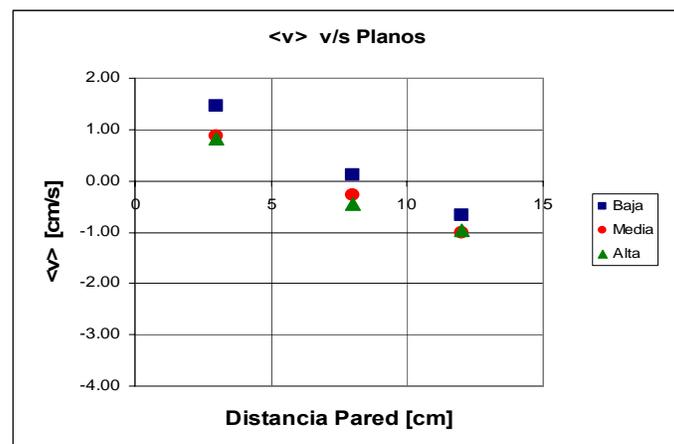


Figura 4.15: Promedio velocidad (v) por plano para cada turbulencia.

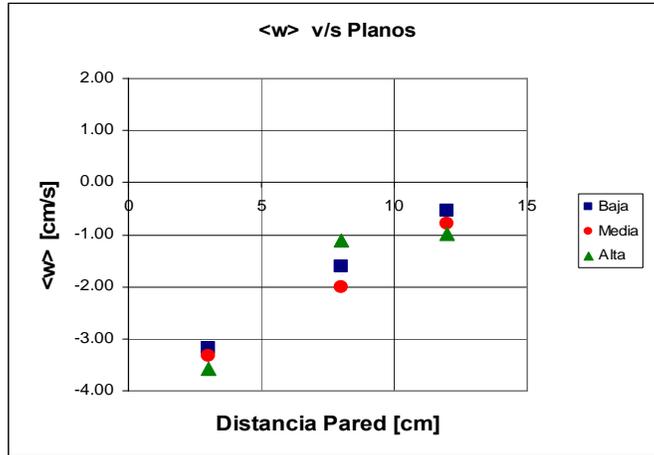


Figura 4.16: Promedio velocidad ( $w$ ) por plano para cada turbulencia.

El promedio ponderado de todos los datos para el  $\langle u^2 \rangle$ ,  $\langle v^2 \rangle$  y  $\langle w^2 \rangle$  van aumentando desde la turbulencia baja a la alta. Lo mismo ocurre para la energía cinética turbulenta, tal como debe ocurrir al aumentar la velocidad de los motores (ver Figura 4.17).

Además se puede apreciar que el valor de  $k$  disminuye desde el plano 1 al 3 para las tres turbulencias (ver Figura 4.18).

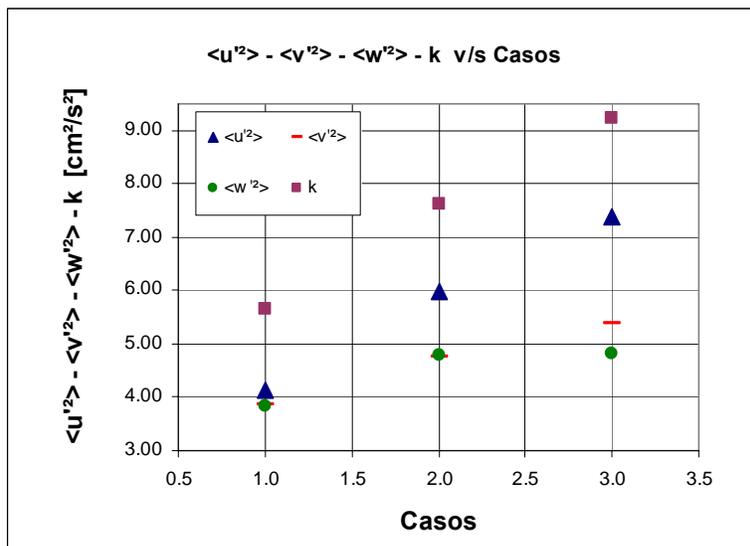


Figura 4.17: Variación de  $\langle u^2 \rangle$  -  $\langle v^2 \rangle$  -  $\langle w^2 \rangle$  y  $k$  para cada turbulencia

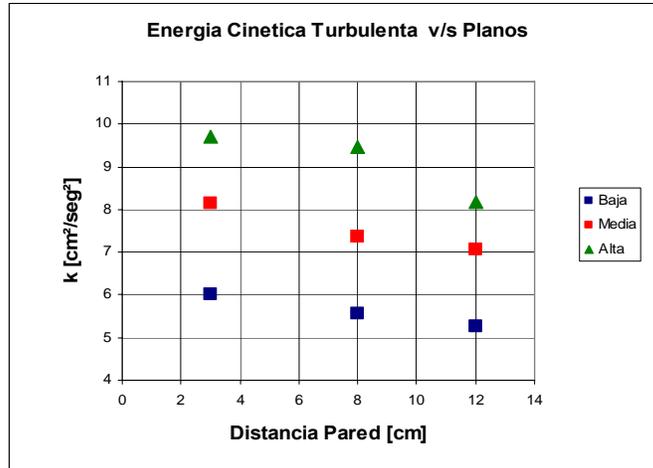


Figura 4.18: Variación de la energía cinética turbulenta promedio por plano para cada caso.

A continuación se entregan unos gráficos representativos de la auto correlación, correlación cruzada y análisis de densidad espectral de los datos de velocidades:

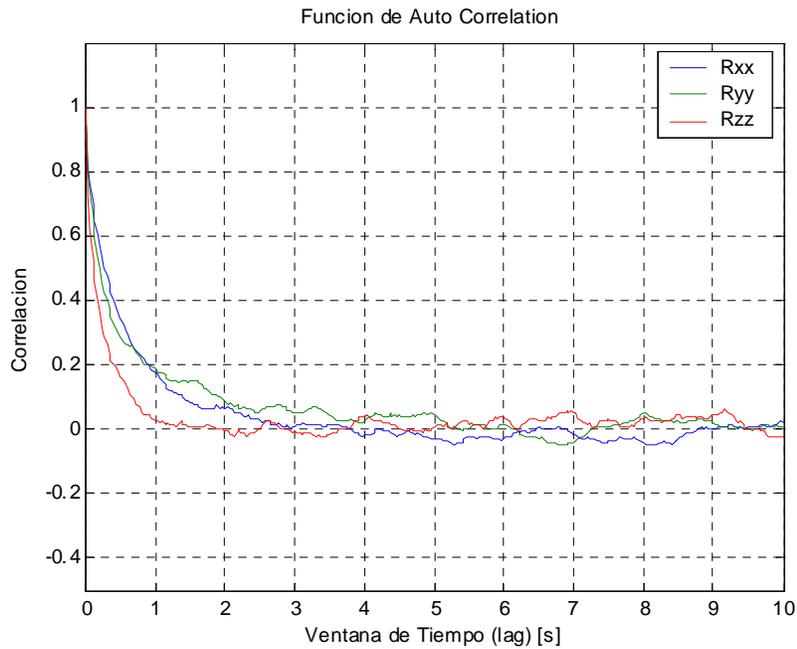


Figura 4.19: Función de auto correlación.

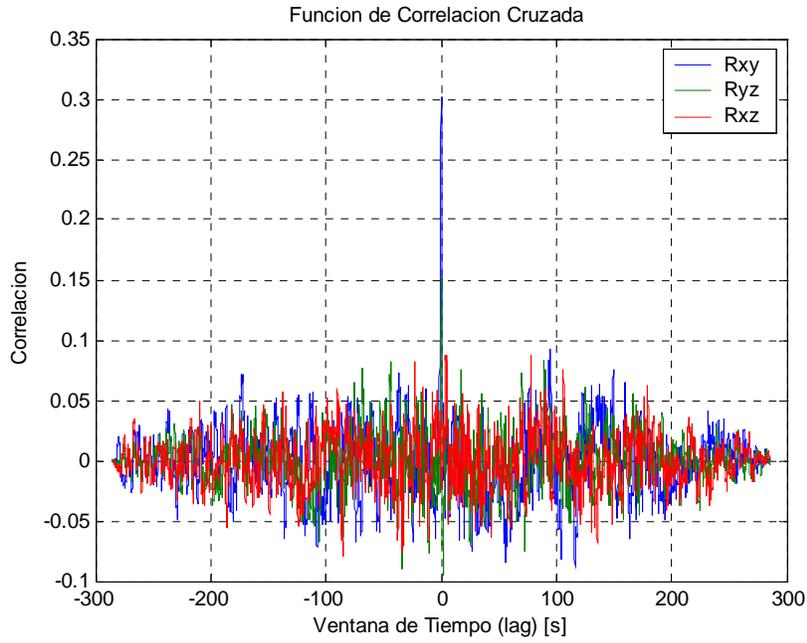


Figura 4.20: Función de correlación cruzada.

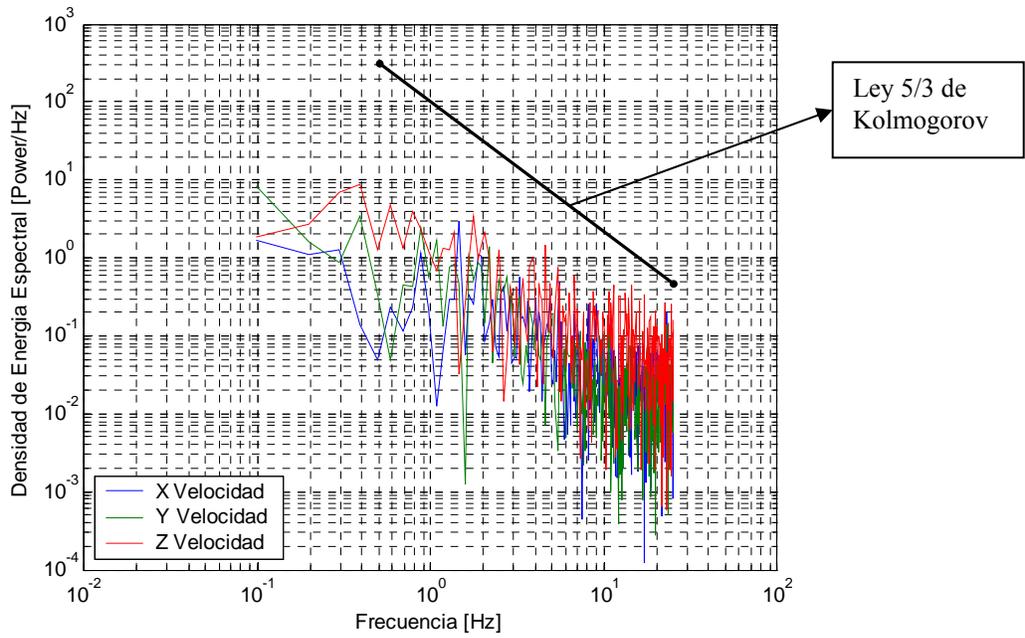


Figura 4.21: Densidad de energía espectral.

## 4.2 Resultados y Análisis de Grabaciones

En este punto se darán a conocer los resultados del procesamiento de los cuadros de los videos para cada una de las 9 experiencias, es decir, áreas y números de partículas por cuadro en los tiempos especificados en la metodología (Capítulo 3). Todos estos resultados son los entregados por la rutina programada en el software Matlab 6.5, la cual se anexara en forma digital. Esto corresponde a los valores de las áreas (de flóculos) de todos los cuadros procesados de todas las experiencias.

Experiencias		
Experiencia	Energía Cinética Turbulenta [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Concentración [gr/lt]
A	9.23	0.0129
B	7.61	0.0129
C	5.66	0.0129
D	9.23	0.0258
E	7.61	0.0258
F	5.66	0.0258
G	9.23	0.0515
H	7.61	0.0515
I	5.66	0.0515

Tabla 4.4: Experiencias De Laboratorio.

De los grupos de 64 cuadros (separados cada 15) analizados cada 4 minutos se obtuvo un promedio de todos los grupos y se trabajo con este valor promedio para cada tiempo, los comportamientos gráficos del número de floculos, suma de áreas, área máxima y área mínima en el tiempo y por experiencia se muestran a continuación:

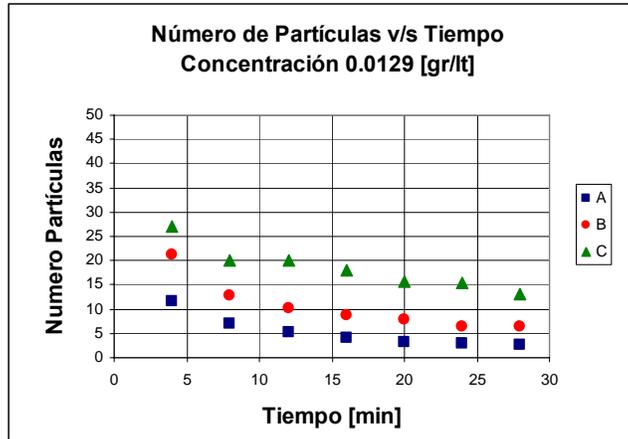


Figura 4.22: Comportamiento número de floculos en el tiempo (concentración baja).

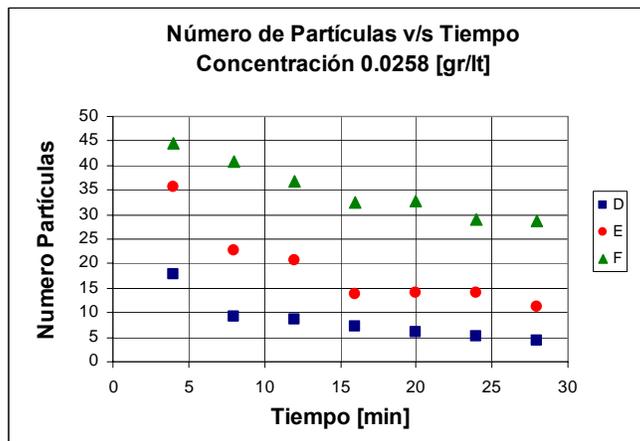


Figura 4.23: Comportamiento número de floculos en el tiempo (concentración media).

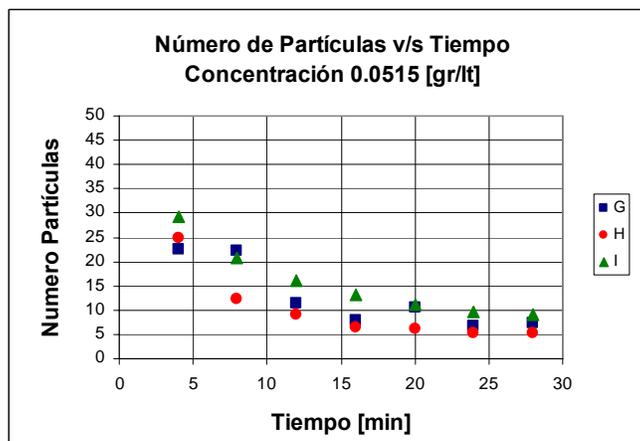


Figura 4.24: Comportamiento número de floculos en el tiempo (concentración alta).

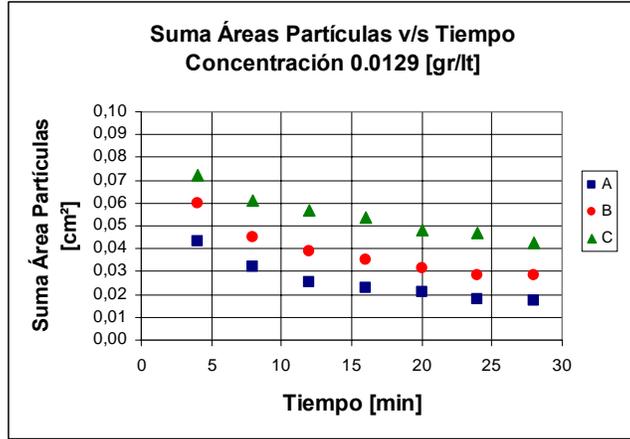


Figura 4.25: Comportamiento suma de áreas en el tiempo (concentración baja).

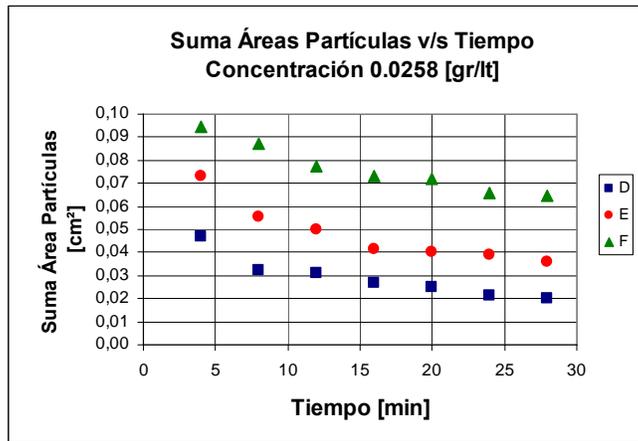


Figura 4.26: Comportamiento suma de áreas en el tiempo (concentración media).

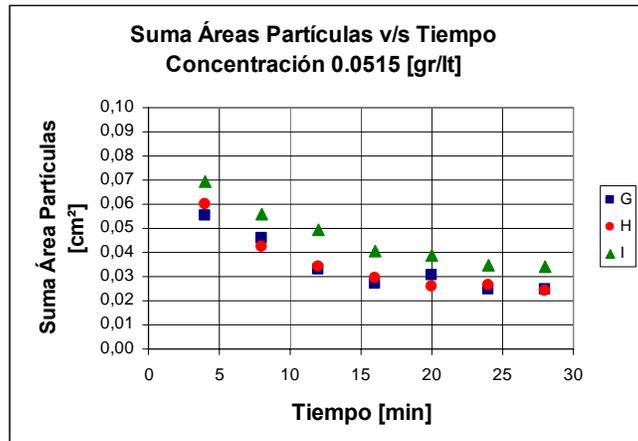


Figura 4.27: Comportamiento suma de áreas en el tiempo (concentración alta).

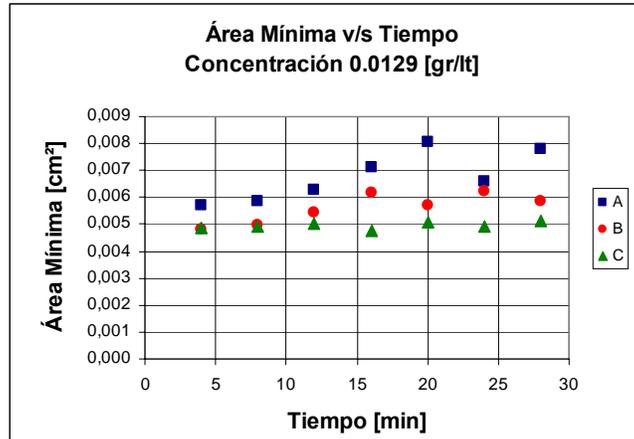


Figura 4.28: Comportamiento área mínima en el tiempo (concentración baja).

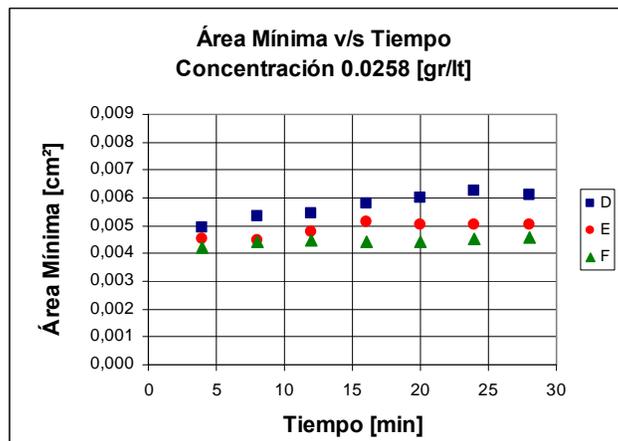


Figura 4.29: Comportamiento área mínima en el tiempo (concentración media).

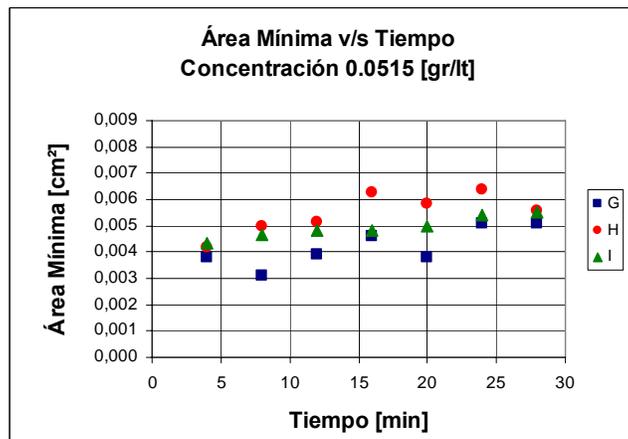


Figura 4.30: Comportamiento área mínima en el tiempo (concentración alta).

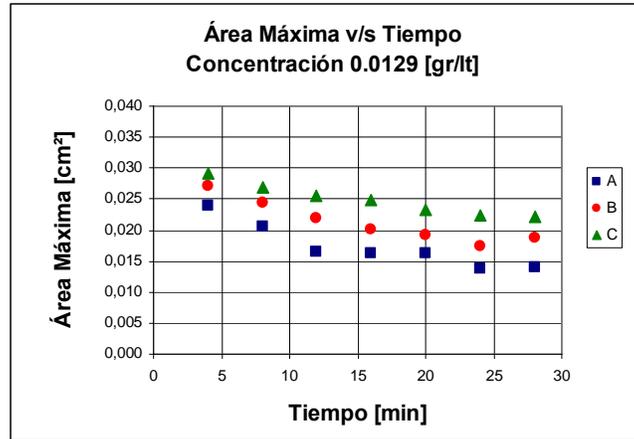


Figura 4.31: Comportamiento área máxima en el tiempo (concentración baja).

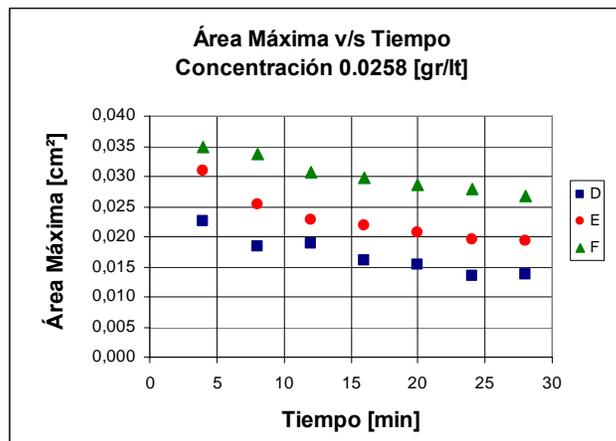


Figura 4.32: Comportamiento área máxima en el tiempo (concentración media).

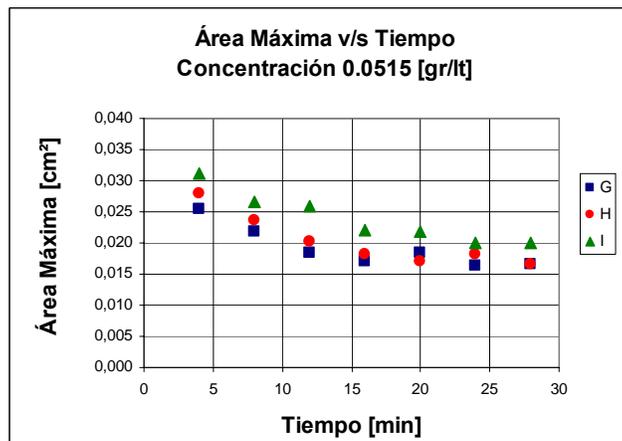


Figura 4.33: Comportamiento área máxima en el tiempo (concentración alta).

En el Anexo B se puede ver las tablas con los datos del número de partículas, sumas de áreas, área mínima y área máxima en función del tiempo.

#### 4.2.1 Análisis de Promedios de Tamaños en el Tiempo

Con los datos de las tablas anteriores, se transforma el área promedio (por cuadro) de cada experiencia a diámetros equivalentes de partículas en píxeles y en centímetros. Para esto se supone un área circular y para la transformación a centímetros se sabe que 1 cm. = 512 píxeles.

$$\boxed{\text{Area Promedio} = \frac{\pi * D^2}{4}} \quad \text{Y} \quad \boxed{\frac{D_{\text{píxeles}}}{512} = D_{\text{centímetros}}}$$

Con esto se obtienen los siguientes resultados:

tiempo [minutos]	Diámetros Promedios					
	EXPERIENCIA A		EXPERIENCIA B		EXPERIENCIA C	
	Píxeles	cm	Píxeles	cm	Píxeles	cm
4	6.52	0.0127	6.66	0.0130	7.09	0.0139
8	6.10	0.0119	6.47	0.0126	6.94	0.0136
12	5.75	0.0112	6.28	0.0123	6.53	0.0128
16	5.79	0.0113	6.20	0.0121	6.45	0.0126
20	5.93	0.0116	5.83	0.0114	6.22	0.0122
24	5.31	0.0104	5.71	0.0112	6.14	0.0120
28	5.44	0.0106	5.78	0.0113	6.09	0.0119

Tabla 4.5: Diámetros Promedios Experiencias A, B y C (concentración baja).

tiempo [minutos]	Diámetros Promedios					
	EXPERIENCIA D		EXPERIENCIA E		EXPERIENCIA F	
	Píxeles	cm	Píxeles	cm	Píxeles	cm
4	5.77	0.0113	6.33	0.0124	7.25	0.0142
8	5.47	0.0107	5.98	0.0117	6.99	0.0136
12	5.55	0.0108	5.63	0.0110	6.53	0.0128
16	5.12	0.0100	5.80	0.0113	6.60	0.0129
20	5.17	0.0101	5.52	0.0108	6.42	0.0125
24	4.76	0.0093	5.27	0.0103	6.25	0.0122
28	5.00	0.0098	5.43	0.0106	6.18	0.0121

Tabla 4.6: Diámetros Promedios Experiencias D, E y F (concentración media).

tiempo [minutos]	Diámetros Promedios					
	EXPERIENCIA G		EXPERIENCIA H		EXPERIENCIA I	
	Píxeles	cm	Píxeles	cm	Píxeles	cm
4	6.01	0.0117	6.16	0.0120	6.57	0.0128
8	4.97	0.0097	6.22	0.0122	6.24	0.0122
12	5.02	0.0098	5.84	0.0114	6.26	0.0122
16	4.92	0.0096	5.84	0.0114	5.80	0.0113
20	4.81	0.0094	5.45	0.0106	5.97	0.0117
24	4.95	0.0097	5.79	0.0113	5.68	0.0111
28	4.85	0.0095	5.43	0.0106	5.94	0.0116

Tabla 4.7: Diámetros Promedios Experiencias G, H y I (concentración alta).

Graficando los datos de las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se tienen:

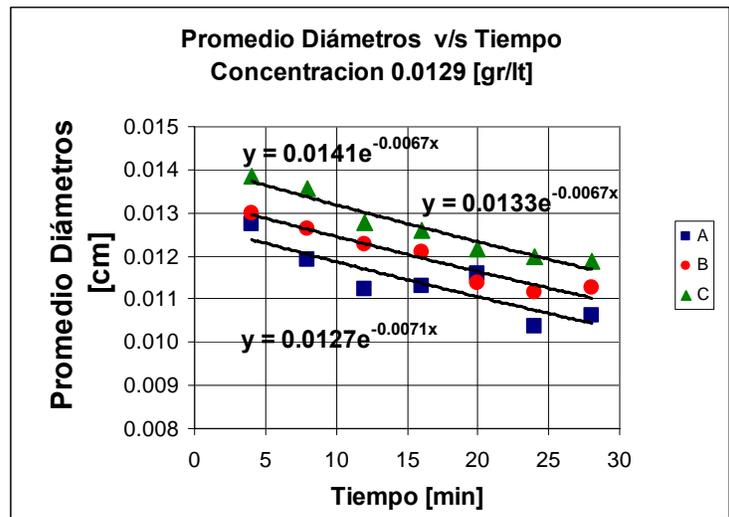


Figura 4.34: Promedios de diámetros en el tiempo (concentración baja).

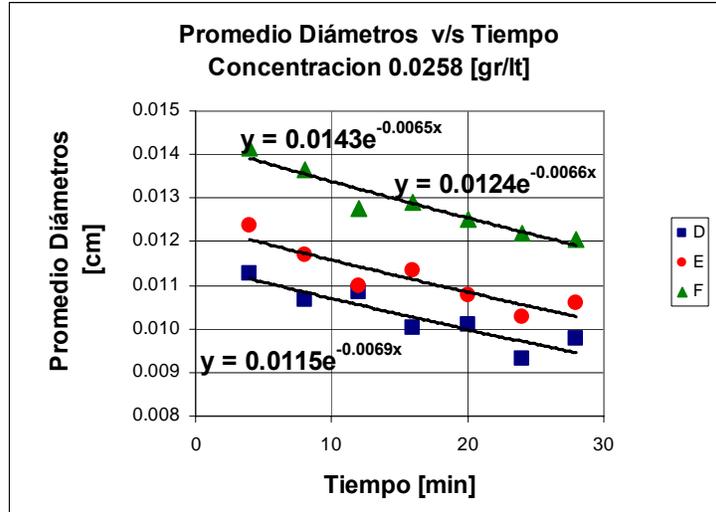


Figura 4.35: Promedios de diámetros en el tiempo (concentración media).

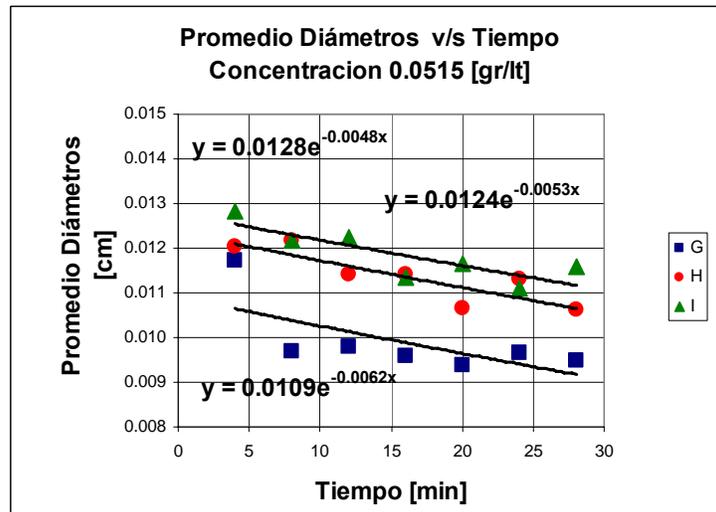


Figura 4.36: Promedios de diámetros en el tiempo (concentración alta).

#### 4.2.1.1 Proposición de Modelo de Floculación

Analizando los gráficos anteriores, de cada una de las 9 experiencias, se puede proponer el siguiente comportamiento de los flóculos en el tiempo:

$$D = D_0 \exp(-\alpha t)$$

Donde el factor  $\alpha$  de la exponencial tiene el siguiente comportamiento:

1. Para una misma concentración,  $\alpha$  aumenta a medida que aumenta la turbulencia.
2. Para una misma turbulencia,  $\alpha$  disminuye a medida que aumenta la concentración.

Por esto se postula lo siguiente:

$$D = D_0 \exp\left[-\left(\frac{Ak}{B+c}\right)t\right]$$

Donde:

D : Diámetro Partícula [cm].

$D_0$  : Constante conocida [cm].

$k$  : Energía Cinética Turbulenta [ $\text{cm}^2/\text{seg}^2$ ].

$c$  : Concentración.

A y B : Constantes por conocer.

$t$  : tiempo [min.].

Para obtener los valores de las constantes A y B se utilizará el método de mínimos cuadrados, ya que, se tienen en total 63 ecuaciones (cada experiencia tiene 7 valores de “D” asociados) y 2 incógnitas. Para se cambia la ecuación anterior por:

$$\ln(D) = \ln(D_0) - \left(\frac{Ak}{B+c}\right)t$$

Entonces se busca minimizar:

$$\sum_1^{63} \left[ \ln(D_0) - \left(\frac{Ak_i}{B+c_i}\right)t_i - \ln(D_i) \right]^2$$

Luego derivando la sumatoria anterior para A (A1) y B (A2) se obtiene respectivamente:

$$A1 = \frac{\sum_1^{63} \frac{(\ln(D_0) - \ln(D_i))k_i t_i}{B + c_i}}{\sum_1^{63} \frac{(t_i k_i)^2}{(B + c_i)^2}} \quad \text{y} \quad A2 = \frac{\sum_1^{63} \frac{(\ln(D_0) - \ln(D_i))k_i t_i}{(B + c_i)^2}}{\sum_1^{63} \frac{(t_i k_i)^2}{(B + c_i)^3}}$$

Ahora para lograr conseguir los valores de A y B se igualan las ecuaciones anteriores, e iterando para distintos valores de B se consigue el valor de A hasta que  $A1 = A2$  y el valor de B correspondiente. Estos valores de A y B son los que resultan de realizar el método de mínimos cuadrados antes mencionado. Los resultados de las iteraciones son los siguientes:

$$A = 1.5869 \text{ E-}07$$

$$B = 1.6433 \text{ E-}04$$

Ahora graficando para cada experiencia  $D(t)/D_0$  v/s  $\exp(-\alpha t)$  se tiene:

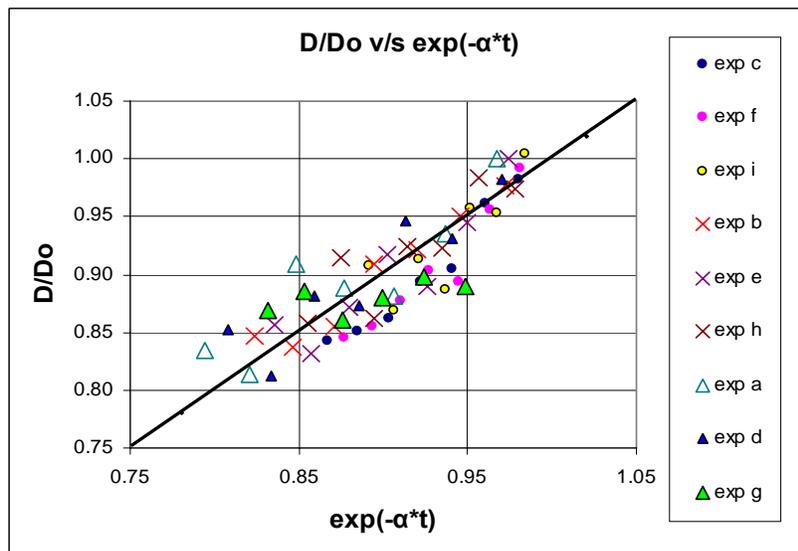


Figura 4.37:  $D(t)/D_0$  v/s  $\exp(-\alpha t)$  para todas las experiencias.

Se puede ver que los resultados de las iteraciones convergen a una recta de pendiente 1, y eso es lo que debería ocurrir si el modelo propuesto esta correcto, pero aunque se puede apreciar cierta convergencia, esta no es muy fuerte, ya que no todos los puntos están sobre la recta. Los resultados de las iteraciones se muestran en el Anexo C.

Al chequear los valores de  $\alpha$  calibrados (Tabla 4.8) se puede observar que cumplen con los supuestos propuestos de:

- Para una misma concentración,  $\alpha$  aumenta a medida que aumenta la turbulencia.
- Para una misma turbulencia,  $\alpha$  disminuye a medida que aumenta la concentración.

$\alpha$ Experimental	$\alpha$ Calibrado	k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	C [gr/lit]
-0.0056	-0.0083	9.23	0.0129
-0.0061	-0.0068	7.61	0.0129
-0.0086	-0.0051	5.66	0.0129
-0.0074	-0.0077	9.23	0.0258
-0.0061	-0.0064	7.61	0.0258
-0.0069	-0.0047	5.66	0.0258
-0.0071	-0.0068	9.23	0.0515
-0.0053	-0.0056	7.61	0.0515
-0.0034	-0.0042	5.66	0.0515

Tabla 4.8:  $\alpha$  calibrado del modelo propuesto.

#### 4.2.1.2 Modelo de Floculación Usado Por Winterwerp (1998)

Winterwerp en 1998, postula un modelo de floculación por efecto del esfuerzo de corte turbulento en los procesos de floculación de sedimentos cohesivos. Los flocs son tratados como entidades fractales y se omiten (en este modelo) todos los efectos secundarios en estos procesos. La manera de capturar el efecto de la turbulencia es a través del parámetro de disipación G, el cual esta relacionado con la micro escala de Kolmogorov y la tasa de disipación por unidad de masa ( $\epsilon$ ).

El modelo de floculación mostrado por Winterwerp es la suma de dos procesos, el de agregación y el de desagregación de partículas. Las tasas de crecimiento de partículas debido a ambos procesos son las siguientes:

$$\frac{dd_f}{dt} (\text{agregacion}) = -\frac{3 e_c \Pi e_d c}{2 f_s n f \rho_s} G d_p^{nf-3} d_f^{4-nf} = K_A c G d_f^{4-nf}$$

$$\frac{dd_f}{dt} (\text{desagregacion}) = -\frac{a e_b}{n f} d_f G \left( \frac{d_f - d_p}{d_p} \right)^p \left( \frac{\mu G}{F_y / d_f^2} \right)^q = -K_B G^{q+1} d_f^{2q+1} (d_f - d_p)^p$$

Sumando ambas ecuaciones anteriores se llega a la ecuación diferencial para la floculación de sedimento cohesivo bajo la influencia del esfuerzo de corte turbulento propuesto por Winterwerp:

$$\frac{dd_f}{dt} = K_A C G d_f^{(4-nf)} - K_B G^{(q+1)} d_f^{(2q+1)} (d_f - d_p)^p$$

Luego esta ecuación se puede transformar a la forma:

$$\frac{dd_f}{K_A C G d_f^{(4-nf)} - K_B G^{(q+1)} d_f^{(2q+1)} (d_f - d_p)^p} = dt$$

De esta forma resolveremos numéricamente esta ecuación de manera de obtener los valores de  $K_A$  y  $K_B$  que se ajusten a los resultados de las experiencias realizadas en laboratorio.

Llamando:

$$f(d_f) = \frac{1}{K_A C G d_f^{(4-nf)} - K_B G^{(q+1)} d_f^{(2q+1)} (d_f - d_p)^p}$$

Se tiene:

$$\int f(d_f) \partial d_f = \frac{1}{2} (f_1 + f_2) \Delta d_f = \Delta t$$

De esta manera para un  $\Delta d_f$  dado (pequeño), es posible determinar el tiempo para diferentes valores de  $d_f$  y para todas las experiencias. Los datos utilizados para determinar los valores de  $f(d_f)$  son los mostrados en la Tabla 4.25.

La manera de determinar los valores de  $K_A$  y  $K_B$  fue minimizando la diferencia de los  $d_f$  medidos (63 en total (7 por experiencia)) con los  $d_f$  calculados para el mismo tiempo, es decir:

$$\text{Min} \left( \sum_1^{63} (d_{f \text{ medido}} - d_{f \text{ calculado}})^2 \right)$$

El valor obtenido de la suma como resultado de esta minimización fue de 6.415 E-06. y los valores de  $K_A$  y  $K_B$  de terminados fueron:

<b>Resultados <math>K_A</math> y <math>K_B</math></b>		
$K_A$	[cm <sup>2</sup> /gr]	1.2
$K_B$	[seg <sup>0.5</sup> /cm <sup>2</sup> ]	0.039

Además para determinar el valor de  $G$  se utilizó la siguiente fórmula:

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \approx \sqrt{\frac{k^{3/2}}{b\nu}}$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido,  $k$  la energía cinética turbulenta y  $b$  el ancho de la columna de agua (Distancia entre mallas de acero inoxidable).

A continuación se presentan las características de cada experiencia y los resultados del modelo para cada una de ellas. También se muestran los datos en común para todas las experiencias.

<b>Características Experiencias</b>				
Experiencia	k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	C [gr/lt]	G [1/s]	Tamaño (t=0) [cm]
A	9.23	0.0129	8.94	0.0127
B	7.61	0.0129	7.73	0.0133
C	5.66	0.0129	6.19	0.0141
D	9.23	0.0258	8.94	0.0115
E	7.61	0.0258	7.73	0.0124
F	5.66	0.0258	6.19	0.0143
G	9.23	0.0515	8.94	0.0109
H	7.61	0.0515	7.73	0.0124
I	5.66	0.0515	6.19	0.0128

Tabla 4.9: Características experiencias.

<b>Datos Todas Experiencias</b>		
v	[cm <sup>2</sup> /s]	0.013
b	[cm]	27
dp	[cm]	0.00022
nf	**	2
q	**	0.5
p	**	1
delta df	[cm]	-0.0008

Tabla 4.10: Valores utilizados para todas las experiencias

Los valores de p, q y nf son los utilizados por Winterwerp en 1998. y el valor de dp es el obtenido por medio del microscopio (2.2 micrones).

Los resultados por experiencia, medidos y modelados, son los siguientes:

Experiencia A				
Datos Experiencia		Resultados Modelo		
Tiempo Medido [seg]	df Medido [cm]	df calculado [cm]	f(df cal.)	Tiempo Calculado [seg]
0	0.0127	0.0127	-481533.40	0
240	0.0127	0.0119	-586450.79	427.194
480	0.0119	0.0111	-724203.68	951.455
720	0.0112	0.0103	-908712.52	1604.622
960	0.0113	0.0095	-1161625.64	2432.757
1200	0.0116	0.0087	-1517825.94	3504.538
1440	0.0104	0.0079	-2035920.96	4926.037
1680	0.0106	0.0071	-2819423.09	6868.174

Tabla 4.11: Datos y Resultados Experiencia A Para Ka y Kb.

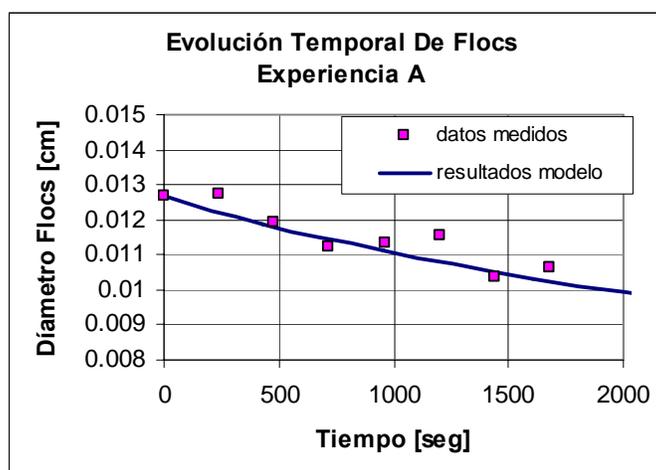


Figura 4.38: Evolución Temporal de Flóculos Experiencia A.

Experiencia B				
Datos Experiencia		Resultados Modelo		
Tiempo Medido [seg]	df Medido [cm]	df calculado [cm]	f(df cal.)	Tiempo Calculado [seg]
0	0.0133	0.0133	-520868.734	0
240	0.0130	0.0125	-628540.335	459.764
480	0.0126	0.0117	-768057.889	1018.403
720	0.0123	0.0109	-952122.955	1706.475
960	0.0121	0.0101	-1200035.648	2567.339
1200	0.0114	0.0093	-1542067.177	3664.180
1440	0.0112	0.0085	-2027484.045	5092.000
1680	0.0113	0.0077	-2740047.024	6999.013

Tabla 4.12: Datos y Resultados Experiencia B Para Ka y Kb.

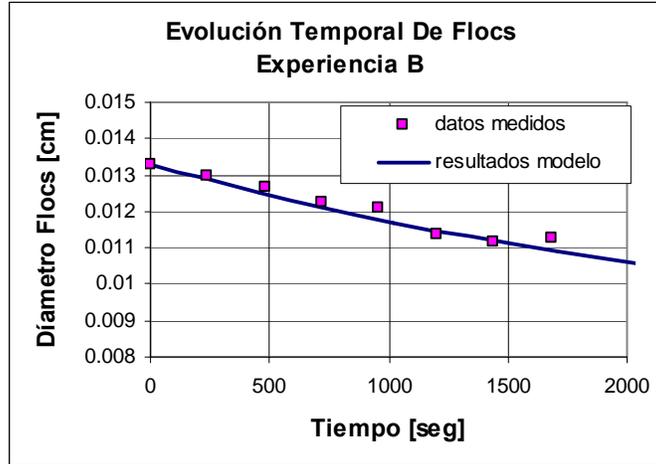


Figura 4.39: Evolución Temporal de Flóculos Experiencia B.

Experiencia C				
Datos Experiencia		Resultados Modelo		
Tiempo Medido [seg]	df Medido [cm]	df calculado [cm]	f(df cal.)	Tiempo Calculado [seg]
0	0.0141	0.0141	-609874.797	0
240	0.0139	0.0133	-727890.809	535.106
480	0.0136	0.0125	-878432.232	1177.635
720	0.0128	0.0117	-1073523.304	1958.418
960	0.0126	0.0109	-1330942.873	2920.204
1200	0.0122	0.0101	-1677712.031	4123.666
1440	0.0120	0.0093	-2156222.890	5657.240
1680	0.0119	0.0085	-2835489.842	7653.925

Tabla 4.13: Datos y Resultados Experiencia C Para Ka y Kb.

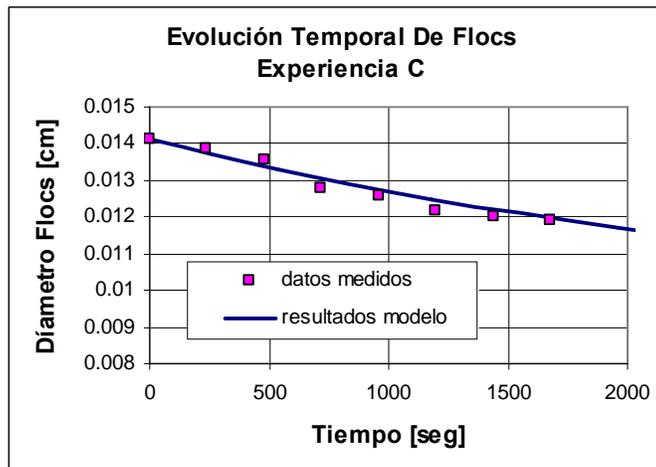


Figura 4.40: Evolución Temporal de Flóculos Experiencia C.

<b>Experiencia D</b>				
<b>Datos Experiencia</b>		<b>Resultados Modelo</b>		
Tiempo Medido [seg]	df Medido [cm]	df calculado [cm]	f(df cal.)	Tiempo Calculado [seg]
0	0.0115	0.0115	-658329.192	0
240	0.0113	0.0107	-820009.418	591.335
480	0.0107	0.0099	-1039287.669	1335.054
720	0.0108	0.0091	-1344282.246	2288.482
960	0.0100	0.0083	-1781335.903	3538.730
1200	0.0101	0.0075	-2430433.855	5223.437
1440	0.0093	0.0067	-3437534.513	7570.625
1680	0.0098	0.0059	-5087919.610	10980.806

Tabla 4.14: Datos y Resultados Experiencia D Para Ka y Kb.

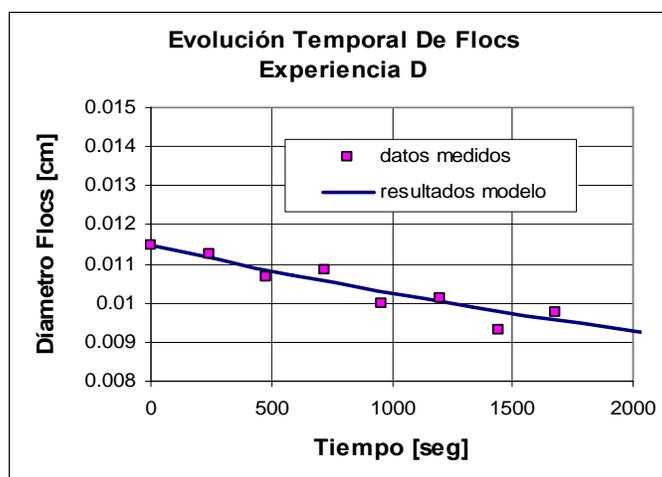


Figura 4.41: Evolución Temporal de Flóculos Experiencia D.

<b>Experiencia E</b>				
<b>Datos Experiencia</b>		<b>Resultados Modelo</b>		
Tiempo Medido [seg]	df Medido [cm]	df calculado [cm]	f(df cal.)	Tiempo Calculado [seg]
0	0.0124	0.0124	-651752.661	0
240	0.0124	0.0116	-798451.434	580.082
480	0.0117	0.0108	-992702.851	1296.543
720	0.0110	0.0100	-1255450.890	2195.805
960	0.0113	0.0092	-1619762.395	3345.890
1200	0.0108	0.0084	-2139873.388	4849.744
1440	0.0103	0.0076	-2908854.069	6869.235
1680	0.0106	0.0068	-4095353.434	9670.918

Tabla 4.15: Datos y Resultados Experiencia E Para Ka y Kb.

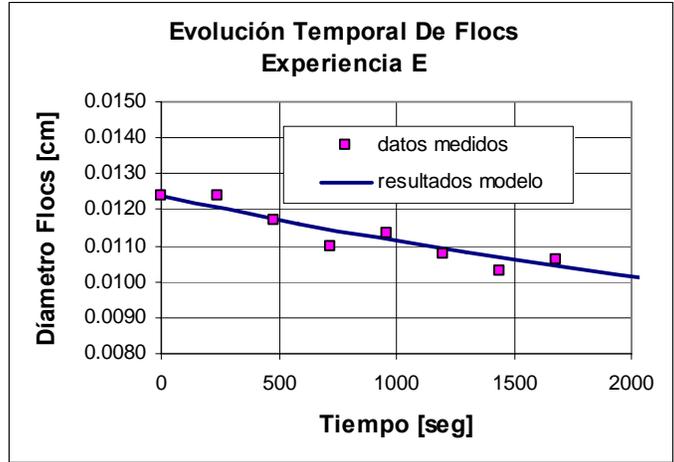


Figura 4.42: Evolución Temporal de Flóculos Experiencia E.

Experiencia F				
Datos Experiencia		Resultados Modelo		
Tiempo Medido [seg]	df Medido [cm]	df calculado [cm]	f(df cal.)	Tiempo Calculado [seg]
0	0.0143	0.0143	-591189.334	0
240	0.0142	0.0135	-704275.513	518.186
480	0.0136	0.0127	-848148.462	1139.156
720	0.0128	0.0119	-1034041.803	1892.032
960	0.0129	0.0111	-1278490.613	2817.045
1200	0.0125	0.0103	-1606496.342	3971.039
1440	0.0122	0.0095	-2057049.618	5436.458
1680	0.0121	0.0087	-2693187.033	7336.552

Tabla 4.16: Datos y Resultados Experiencia F Para Ka y Kb.

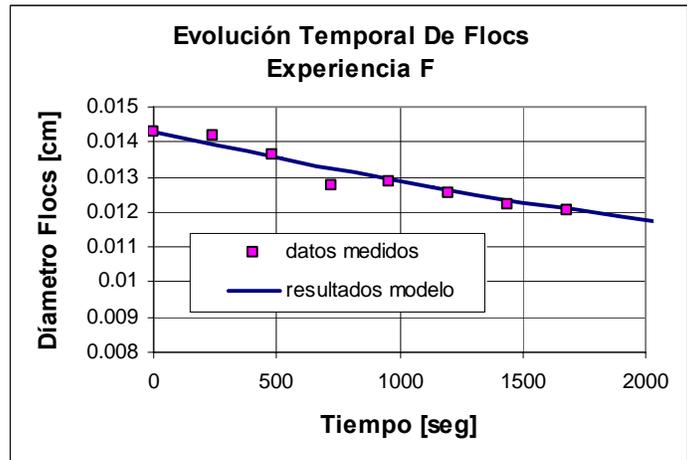


Figura 4.43: Evolución Temporal de Flóculos Experiencia F.

Experiencia G				
Datos Experiencia		Resultados Modelo		
Tiempo Medido [seg]	df Medido [cm]	df calculado [cm]	f(df cal.)	Tiempo Calculado [seg]
0	0.0109	0.0109	-795210.705	0
240	0.0117	0.0101	-1005417.915	720.251
480	0.0097	0.0093	-1296786.962	1641.133
720	0.0098	0.0085	-1712618.751	2844.896
960	0.0096	0.0077	-2327198.902	4460.823
1200	0.0094	0.0069	-3275109.639	6701.746
1440	0.0097	0.0061	-4817091.388	9938.627
1680	0.0095	0.0053	-7502985.668	14866.657

Tabla 4.17: Datos y Resultados Experiencia G Para Ka y Kb.

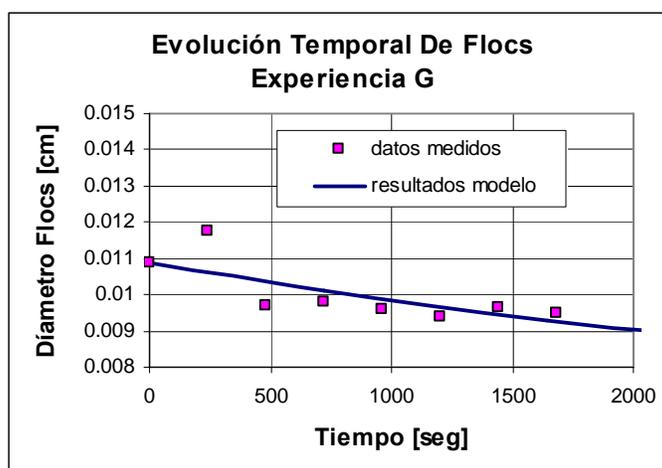


Figura 4.44: Evolución Temporal de Flóculos Experiencia G.

Experiencia H				
Datos Experiencia		Resultados Modelo		
Tiempo Medido [seg]	df Medido [cm]	df calculado [cm]	f(df cal.)	Tiempo Calculado [seg]
0	0.0124	0.0124	-667714.086	0
240	0.0120	0.0116	-819452.593	594.867
480	0.0122	0.0108	-1020899.982	1331.008
720	0.0114	0.0100	-1294208.677	2257.051
960	0.0114	0.0092	-1674523.624	3444.544
1200	0.0106	0.0084	-2219823.683	5002.283
1440	0.0113	0.0076	-3030301.956	7102.333
1680	0.0106	0.0068	-4289098.277	10030.093

Tabla 4.18: Datos y Resultados Experiencia H Para Ka y Kb.

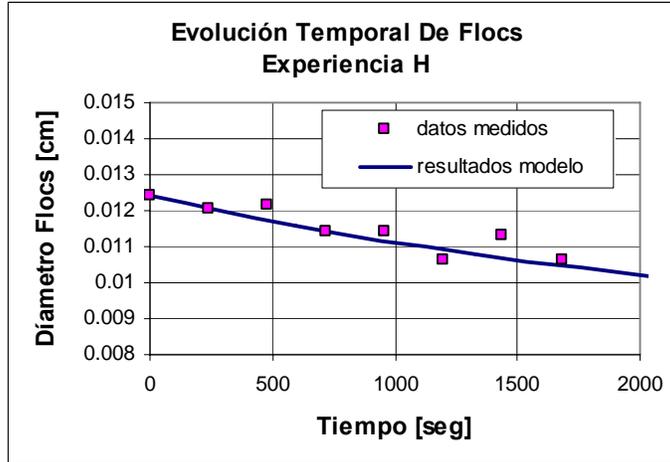


Figura 4.45: Evolución Temporal de Flóculos Experiencia H.

<b>Experiencia I</b>				
<b>Datos Experiencia</b>		<b>Resultados Modelo</b>		
Tiempo Medido [seg]	df Medido [cm]	df calculado [cm]	f(df cal.)	Tiempo Calculado [seg]
0	0.0128	0.0128	-850170.819	0
240	0.0128	0.0120	-1036750.523	754.77
480	0.0122	0.0112	-1282199.285	1682.35
720	0.0122	0.0104	-1611705.103	2839.91
960	0.0113	0.0096	-2064586.836	4310.43
1200	0.0117	0.0088	-2704486.936	6218.06
1440	0.0111	0.0080	-3638920.563	8755.42
1680	0.0116	0.0072	-5059079.417	12234.62

Tabla 4.19: Datos y Resultados Experiencia I Para Ka y Kb.

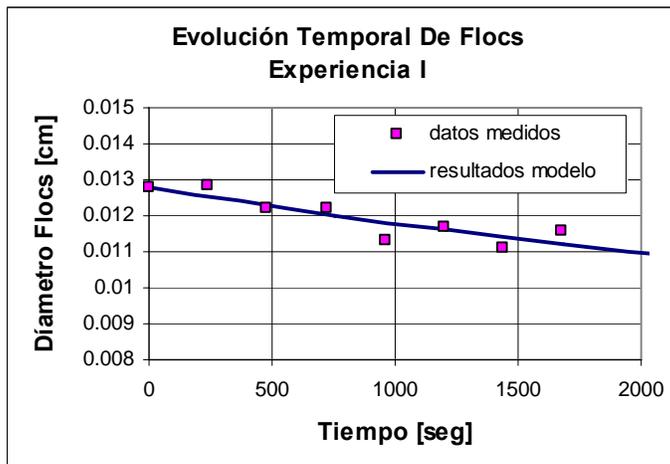


Figura 4.46: Evolución Temporal de Flóculos Experiencia I.

Como se puede ver en los gráficos de todas las experiencias anteriores, esta ecuación de evolución de los flóculos en el tiempo planteada por Winterwerp se ajusta mucho mejor a los datos obtenidos experimentalmente (para los valores de  $K_a$  y  $K_b$  obtenidos), a diferencia de la ecuación propuesta en el punto 4.2.1.1 de este capítulo.

Los valores de  $K_a$   $1.2 \text{ cm}^2/\text{gr}$  y  $K_b$   $0.039 \text{ seg}^{1/2}/\text{cm}^2$  se diferencian de los valores obtenidos por Winterwerp en 1998 que son de  $146 \text{ cm}^2/\text{gr}$  y  $1.4 \text{ seg}^{1/2}/\text{cm}^2$  respectivamente. Esto puede deberse a usar diferentes materiales.

Según Winterwerp el diámetro de equilibrio del floc, es:

$$\frac{\partial d_f}{\partial t} = 0 \Rightarrow d_e = d_p + \frac{K_A C}{K_B \sqrt{G}}$$

Con esto nos da que los diámetros de equilibrio para cada una de las experiencias son:

Dímetros de Equilibrio		
Experiencia	de [cm]	de/dp
A	0,000466	2,12
B	0,000482	2,19
C	0,000509	2,31
D	0,000681	3,10
E	0,000714	3,24
F	0,000768	3,49
G	0,001111	5,05
H	0,001176	5,34
I	0,001285	5,84

Tabla 4.20: Díametros de Flóculos de Equilibrio.

Se puede apreciar que a medida que disminuye la turbulencia, para una misma concentración, el tamaño del flóculos de equilibrio va aumentando. También el tamaño de los flóculos de equilibrio aumenta a medida que aumenta la concentración. Por lo tanto los tamaños de los flóculos en equilibrio son inversamente proporcionales a la intensidad turbulenta y directamente proporcionales a la concentración.

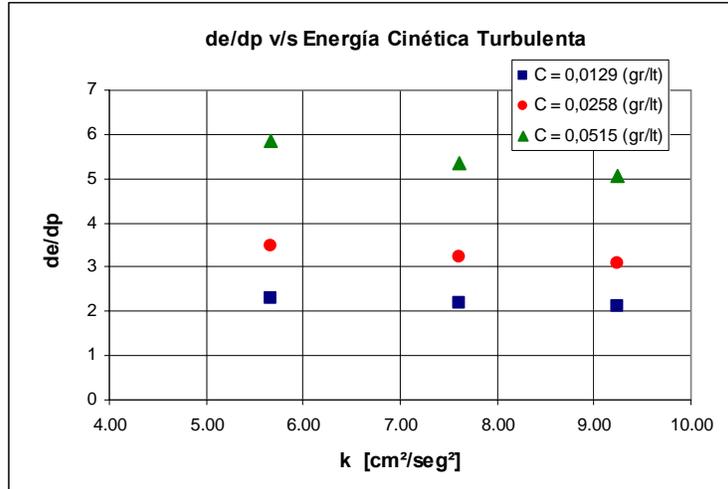


Figura 4.47: de/dp v/s energía cinética turbulenta promedio.

Cabe señalar que para los cambios de turbulencia y concentración utilizados, los cambios de concentraciones influyen más fuertemente en los cambios de los flóculos de equilibrio, es decir, independiente del valor de la turbulencia, el valor de los flóculos de equilibrio va a ser mayor para una concentración mayor.

Por otro lado es interesante analizar gráficamente las curvas (de evolución de flóculos en el tiempo) ajustadas anteriormente, es decir, ver el comportamiento para una misma turbulencia variando la concentración y viceversa.

Los gráficos se muestran a continuación:

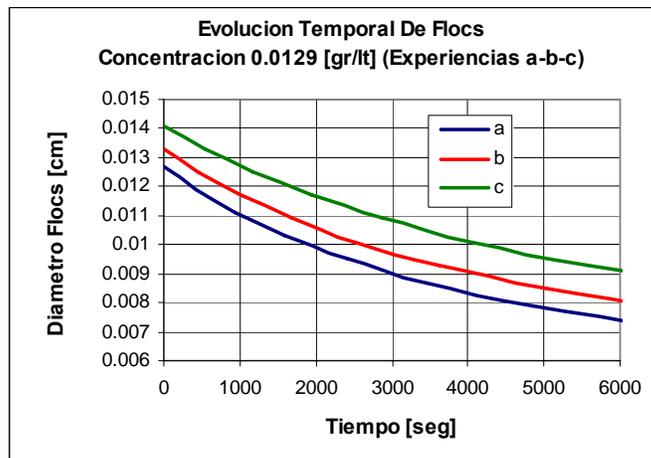


Figura 4.48: Evolución Temporal de Flóculos Concentración 0.0129 [gr/lt].

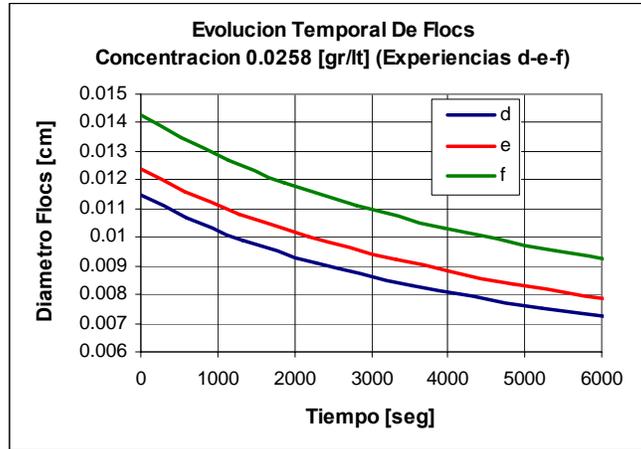


Figura 4.49: Evolución Temporal de Flóculos Concentración 0.0258 [gr/l].

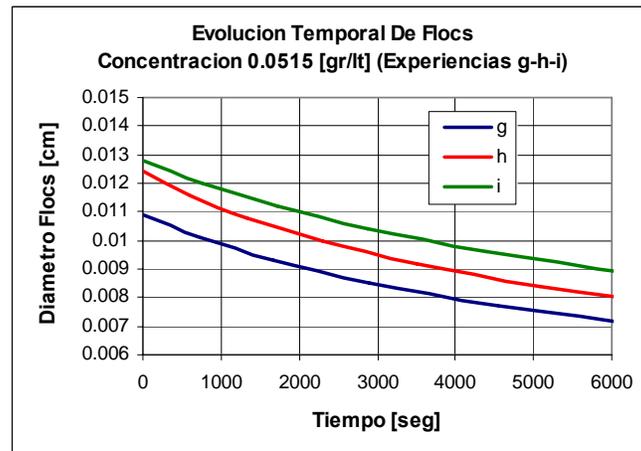


Figura 4.50: Evolución Temporal de Flóculos Concentración 0.0515 [gr/l].

Se puede ver que para una misma concentración, los tamaños de los flóculos son menores a mayor turbulencia, esto para cualquier tiempo, ya que, como se dijo anteriormente, el tamaño del flóculos de equilibrio es inversamente proporcional a la turbulencia. Un factor importante por lo cual se cumple el mismo comportamiento, en los tres graficos anteriores, es que para  $t=0$  los tamaños de los flóculos eran menores para mayores turbulencias. Esto nos muestra el efecto de la turbulencia en la evolución temporal de los flóculos.

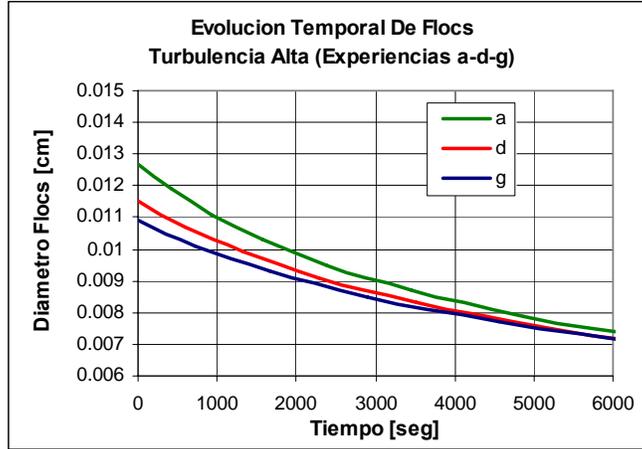


Figura 4.51: Evolución Temporal de Flóculos Turbulencia Alta.

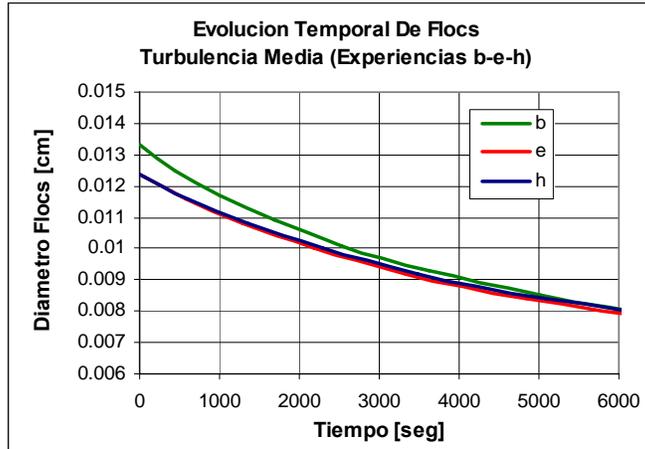


Figura 4.52: Evolución Temporal de Flóculos Turbulencia Media.

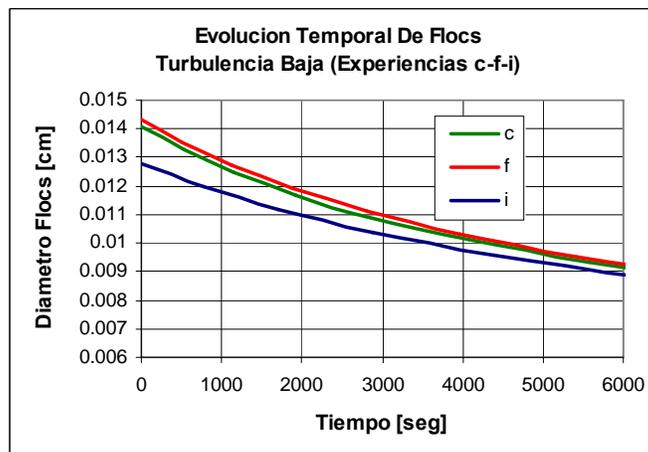


Figura 4.53: Evolución Temporal de Flóculos Turbulencia Baja.

Para los casos en que se mantiene la turbulencia y se cambia la concentración, no es posible apreciar el mismo comportamiento para los tres casos (como ocurre en los otros tres casos contrarios), esto depende en gran parte a los valores de los diámetros en  $t=0$ .

Como un posible análisis del comportamiento se podría decir que en un comienzo, a menor concentración mayor los tamaños de los flóculos, pero esto no ocurre en todos los casos, tal como se puede apreciar en los gráficos anteriores, el único caso en que se cumple totalmente es en el gráfico 4.29.

Lo que si se puede concluir con mayor seguridad es que después de un cierto tiempo, los tamaños de los flóculos son mayores mientras mayor es la concentración, es decir, la disminución de tamaños de flóculos en el tiempo es mas rápida mientras menor es la concentración. Esto se comprueba con los diámetros de equilibrio, ya que, estos son mayores para concentraciones mayores.

Como una forma de incluir el efecto del tamaño del flóculo en  $t=0$  dentro del análisis, se graficara para los datos modelados y experimentales lo siguiente:

$$D^* = \frac{df - df(t=0)}{df(\text{equilibrio}) - df(t=0)} \quad \text{v/s Tiempo}$$

De esta manera, se graficaran simultáneamente las experiencias en donde se tenga una misma concentración o una misma turbulencia. En cada grafico se incluirán los datos medidos con los modelados.

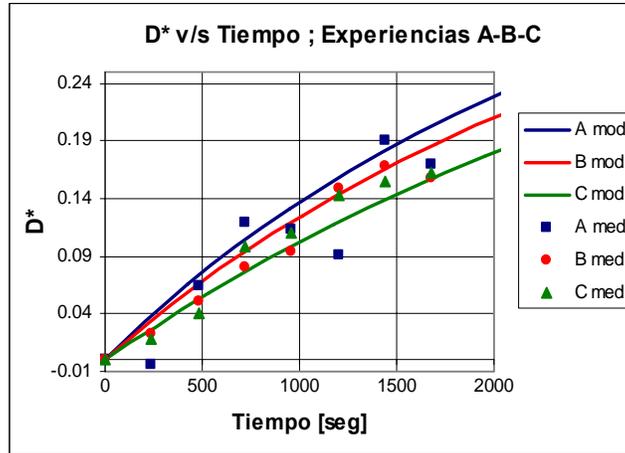


Figura 4.54: Diámetro Adimensional v/s Tiempo – Concentración Baja.

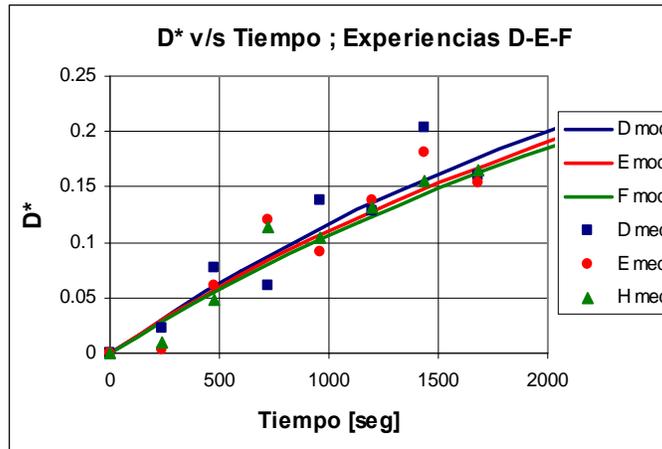


Figura 4.55: Diámetro Adimensional v/s Tiempo – Concentración Media.

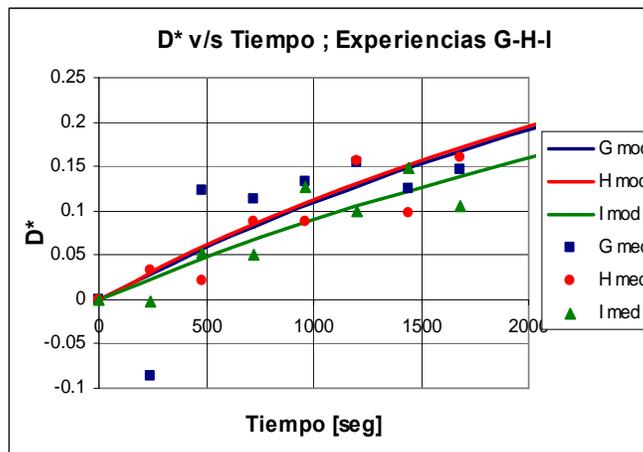


Figura 4.56: Diámetro Adimensional v/s Tiempo – Concentración Alta.

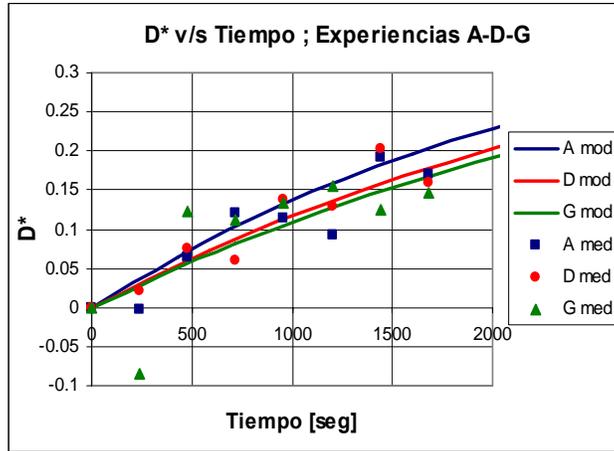


Figura 4.57: Diámetro Adimensional v/s Tiempo – Turbulencia Alta.

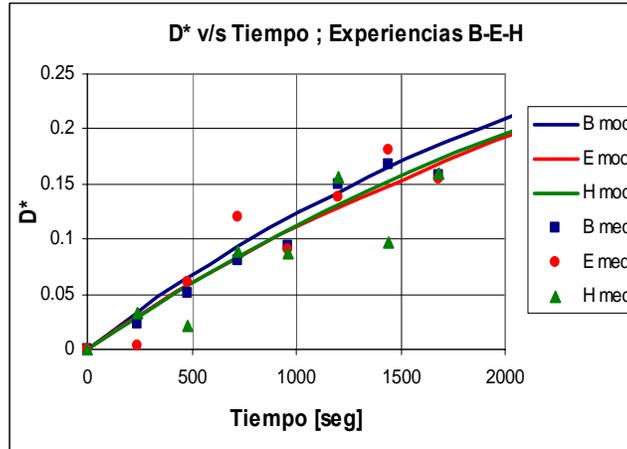


Figura 4.58: Diámetro Adimensional v/s Tiempo – Turbulencia Media.

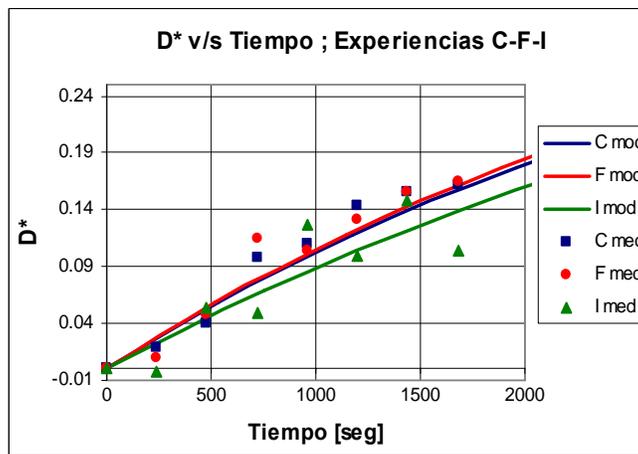


Figura 4.59: Diámetro Adimensional v/s Tiempo – Turbulencia Baja.

Lo que debería ocurrir es que las curvas de los datos modelados colapsaran a una misma curva, pero esto no ocurre en su totalidad, aunque si se acercan bastante. El motivo por el cual las curvas no se ajustan en una sola, es que el tiempo utilizado no es adimensional como lo es el diámetro ( $D^*$ ). Este tiempo utilizado debería ser adimensional, pero la fórmula del modelo de Winterwerp, no permite con facilidad deducir el tiempo adimensional a utilizar.

**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

## 5. Conclusiones y Comentarios

### 5.1 Instalación Experimental y Método Experimental

Con respecto a la instalación experimental diseñada y utilizada en este trabajo se puede concluir que después de varios arreglos (llevados a cabo en la puesta en marcha), se logró cumplir exitosamente con los objetivos de su diseño, siendo el más importante o principal: “lograr suspender el sedimento cohesivo creando un flujo turbulento” (bajo condiciones relativamente controladas) dentro de la columna de agua.

También, el sistema de movimiento del ADV, funcionó correctamente al utilizarlo para medir velocidades en algún punto en el interior de la columna.

Para lograr generar la turbulencia se utilizó dos agitadores laterales, compuestos por un motor unido a un eje con paletas. Una manera de evitar la formación de corrientes secundarias fue colocando los ejes de los agitadores paralelos a la pared y separándolos del lugar de medición con una malla de acero inoxidable (ver punto 3.1.1).

El sedimento cohesivo utilizado en este estudio fue bentonita, este sedimento fue sometido a dos diferentes experiencias para determinar su tamaño medio. Estas experiencias fueron granulometría láser, fotografías al microscopio.

La forma de medir las concentraciones dentro de la estructura fue pesando el sedimento antes de introducirlo en el agua y midiendo el volumen de agua utilizado. El volumen de agua utilizado para todas las experiencias fue de 38.8 litros y los pesos de sedimento fueron 0.5, 1 y 2 gramos, teniéndose concentraciones de 0.0129 [gr/lt], 0.0258 [gr/lt] y 0.0515 [gr/lt] respectivamente.

Para poder definir las diferentes velocidades de giro de los motores se usó un voltímetro, el cual nos dio la diferencia de voltaje que pasa a través de éstos. De esta manera se utilizaron tres diferentes diferencias de voltajes para cada turbulencia 150, 170 y 190 Volt, las que generaban una energía cinética turbulenta media de 5.66, 7.61 y 9.23 [cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] respectivamente.

La metodología de registro utilizada o experimentada en este trabajo, tiene la característica de analizar los flóculos en suspensión a través del contraste generado entre un foco de luz continua y la cámara de alta velocidad. De esta manera, se grabó en un área de 1 cm<sup>2</sup> (512x512 píxeles) 1023 cuadros (30 por segundo) cada 4 minutos en un total de 28 minutos, todo esto para cada experiencia.

Cabe señalar que la información recopilada en este trabajo fue de 27 series de velocidades (con el ADV) para cada una de las tres velocidades de los agitadores, los puntos de medición se dividen en tres planos y 9 puntos por plano.

Además se almacenó la información de 480 cuadros (analizados por medio de una rutina programada en el software Matlab 6.5 R13) para cada una de las 9 experiencias (ver punto 3.2.4).

## **5.2 Análisis de los Resultados**

Las características de la turbulencia, dentro de la columna de agua, muestran que la instalación experimental logra generar un régimen turbulento.

Al analizar los datos de las series de velocidades para las tres turbulencias, se observa que los esfuerzos de corte aumentan en módulo a medida que aumenta la velocidad de los agitadores, cumpliéndose además que  $\langle u'w' \rangle > \langle u'v' \rangle > \langle v'w' \rangle$ .

En relación a  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$  y  $\langle w'^2 \rangle$  se puede ver que aumentan a medida que aumenta la turbulencia y se cumple que para los promedios totales  $\langle u'^2 \rangle > \langle v'^2 \rangle > \langle w'^2 \rangle$ .

La energía cinética turbulenta, como debe cumplirse, aumenta su valor a medida que se incrementa la velocidad de los agitadores, esto ocurre para los promedios por plano y totales. También se cumple que  $k(\text{plano1}) > k(\text{plano2}) > k(\text{plano 3})$ . Donde el plano 1 es el cercano a la pared y el 3 está en el plano de simetría del estanque.

Se observa además que los aumentos de los esfuerzos de corte son mayores (en 7 de los 9 casos) en relación a los aumentos de la energía cinética turbulenta, al variar la turbulencia dentro de la columna de agua. El  $\langle u'w' \rangle$  aumenta 59% y 19%,  $\langle u'v' \rangle$  aumenta 152% y 15% y el  $\langle v'w' \rangle$  aumenta 150% 60%, mientras que la energía cinética turbulenta aumenta 34% y 21%.

Por otra parte, el análisis de las características de agregación y desagregación de flóculos, para cada experiencia, es decir, para las combinaciones de las 3 turbulencias y 3 concentraciones, muestran cómo un análisis general, que las partículas en suspensión van desagregándose en el tiempo con un comportamiento similar (exponencial) en cada experiencia.

Para lograr obtener relaciones que nos permitan caracterizar, en función de la turbulencia del flujo, el comportamiento (agregación, desagregación, concentraciones, etc.) de la bentonita en suspensión, se trabajó con las energías cinéticas turbulentas promedio, las concentraciones y los promedios de los diámetros de flóculos en el tiempo.

De las dos relaciones analizadas, el decaimiento exponencial propuesto en este estudio y la de Winterwerp, la que mejor se comporta o se ajusta a los resultados experimentales es la segunda (ver puntos 4.2.1.1 y 4.2.1.2), esto es de esperar, ya que tiene una base física en su origen. Para ambas relaciones se obtuvo parámetros para la modelación de los procesos de agregación y desagregación de floculos en un campo turbulento, estos parámetros son:

Parámetros Modelo Propuesto		Parámetros Modelo de Winterwerp	
A	B	$K_A$	$K_B$
*	*	[cm <sup>2</sup> /gr]	[seg <sup>0.5</sup> /cm <sup>2</sup> ]
1.587E-07	1.643E-04	1.2	0.039

Tabla 5.1: Parámetros De Modelación.

En cuanto a los efectos de la turbulencia del flujo y la concentración en la dinámica de agregación y desagregación, se puede concluir que para el modelo propuesto a mayor turbulencia (energía cinética turbulenta) menor es el diámetro de las partículas y a mayor concentración menor diámetro de floculos. Esto se puede apreciar en los gráficos de cada experiencia (con los datos experimentales) y en la fórmula propuesta al analizar dichos gráficos. (Ver punto 4.2.1.1).

Al analizar los efectos de la turbulencia y la concentración en el modelo propuesto por Wintenwerp, éste da como resultado que a mayor turbulencia menor el tamaño de los flóculos en el tiempo y menor el diámetro de equilibrio.

Con respecto a la concentración se puede afirmar que en los análisis gráficos, a menor concentración (en general) mayor los diámetros de los flóculos, pero esto solo hasta un tiempo determinado donde se cumple que los diámetros son mayores para mayores concentraciones, esto se prueba al ver los diámetros de equilibrio ( $d_e$ ) (ver tabla 4.35). Esto esta directamente relacionado o depende en gran parte al valor del diámetro inicial ( $t=0$ ) de los flóculos, el cual puede variar dependiendo de las condiciones iniciales de cada experiencia, las cuales se trato de que fueran similares para cada experiencia.

### **5.3 Recomendaciones**

Para futuros trabajos experimentales, se recomienda construir la misma columna de agua pero con dimensiones más chicas para poder caracterizar mejor las cualidades del flujo y además, debido a que solo era posible grabar a no mas de 6 o 7 cm. de la pared, podría estar sobredimensionada el tamaño de la columna en relación al área o volumen de grabación. La recomendación de construir una nueva columna de agua es también debido a que al decidir disminuir su volumen se producían pequeñas filtraciones por el lecho de esta.

También se recomienda tener especial cuidado con la malla de puntos a elegir para medir series de velocidades con el ADV, ya que, en algunos rincones, se contaba con muchos valores de correlaciones menores a 70%.

Para corregir esto se midió durante un tiempo mayor en los puntos de la malla que generaban bajas correlaciones, de manera de obtener la mayor cantidad de datos con correlaciones sobre el 70%.

Sería interesante estudiar el comportamiento de otros sedimentos cohesivos y de mas combinaciones de turbulencias y concentraciones. El problema es que hay un cierto valor de la concentración para el cual las grabaciones de video ya no se logran ver muy bien.

Una mejor manera de hacer girar los motores o agitadores podría ser teniendo un solo motor externo el cual a través de una huincha o cinta haga girar los ejes y así poder medir la frecuencia de giro de la cinta para determinar diferentes velocidades de los agitadores. También de esta manera se logra evitar que los motores (o motor) esté sobre la columna y genere vibraciones que puedan afectar en las mediciones.

## **BIBLIOGRAFIA**

## 6. Bibliografía

- Ayala L., 1984, “**Hidraulica del transporte de sedimentos**” número CRH 84-4-D, Parte 1, Universidad de Chile.
  
- Govoreanu R., 2004, “**dynamica van actief-slib flocculatie: on-line meetmethodologie en modelbouw**” Summary of thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor (Ph.D.) in Applied Biological Sciences: Environmental Technology.
  
- Gratiot N., H. Hichallet, and M. Mory, 2005, “**On the determination of the settling flux of cohesive sediments in a turbulent fluid**” Journal of Geophysical Research, vol. 110, c06004.
  
- Gratiot N., Mathieu Mory and Daniel Auchère, 2000, “**An acoustic Doppler velocimeter (ADV) for the characterisation of turbulence in concentrated fluid mud**”, Journal of Continental Shelf Research 20, 1551-1567.
  
- Kranenburg C., 1999, “**Effects of floc strength on viscosity and deposition of cohesive sediment suspensions**” journal of Continental Shelf Research 19, 1665-1680.
  
- Kranenburg C., 1994, “**The fractal structure of cohesive sediment aggregates**” Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 39, pp 451-460.
  
- Maggi F., 2005, “**Flocculation dynamics of cohesive sediment**”. Report N° 05-1, Delft University of Technology.
  
- Michallet H. and M. Mory, 2004, “**Modelling of sediment suspensions in oscillating grid turbulence**”, Journal of Fluid Dynamics Research 35, 87–106.

- Mikkelsen, O. A., Milligan T.G., P.S. Hill and Moffatt D. 2004, **“INSSECT – an instrumented platform for investigating floc properties close to the seabed”**, Limnol. Oceanogr. Methods 2, 226-236.
  
- Mikkelsen, O. A., and M. Pejrup, 2000, **“In situ particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume”**, Mar. Geol. 170: 443-459.
  
- 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 and settling behaviour”** Journal of Sea Research 39, 227–241.
  
- Pouey N., 1999, **“Erosión hídrica en cursos de llanura sobre suelos cohesivos”**, edición en Internet: <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/erosion/tapa.html>.
  
- Tomomasa Tatsumi and Takahiro Yoshimura, 2004, **“Inertial similarity of velocity distributions in homogeneous isotropic turbulence”** journal of Fluid Dynamics Research 35, 123–158.
  
- Trento A.E., 2005, **“Dinâmica da flocculação no transporte de sedimentos finos”**, XV, 170 p. 29,7 cm. (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
  
- Trento A.E. y B.Vinzon, 2004, **“Modelo de partículas para el transporte de sedimentos finos”**, Mecánica Computacional Vol. xxiii g. Buscaglia, e. Dari, o. Zamonsky.
  
- Van Der Ham, Fontijn R., Kranenburg C. and J.C. Winterwerp, 2001, **“Turbulent exchange of fine sediments in a tidal channel in the Ems/Dollard estuary. Part I: Turbulence measurements”** journal of Continental Shelf Research 21, 1605–1628.

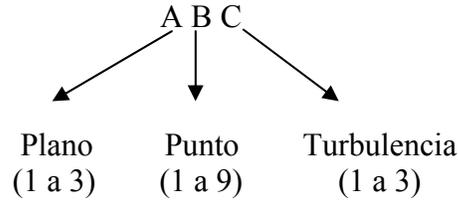
- Van Der Ham R. and J.C. Winterwerp, 2001, “**Turbulent exchange of fine sediments in a tidal channel in the Ems/Dollard estuary. Part II. Analysis with a 1DV numerical model**” journal of Continental Shelf Research 21, 1629–1647.
  
- Van Leddena M., Van Kesteren W.G.M. and J.C. Winterwerp, 2004, “**A conceptual framework for the erosion behaviour of sand–mud mixtures**”, journal of Continental Shelf Research 24, 1–11.
  
- Winterwerp J.C., 2002, “**On the flocculation and settling velocity of estuarine mud**”, journal of Continental Shelf Research 22, 1339–1360.
  
- Winterwerp J.C., 1998, “**A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment**”, Journal of Hydraulic Research, v. 36, n. 3, pp. 309-326.

## **ANEXOS**

## 7. Anexos

### 7.1 Anexo A: Tablas de cálculos con velocidades por plano e intensidad turbulenta.

Notación de Puntos:



Además se define:

$$\langle u'v' \rangle = \overline{u'v'} \quad ; \quad \langle u'w' \rangle = \overline{u'w'} \quad ; \quad \langle v'w' \rangle = \overline{v'w'} \quad ; \quad \langle u \rangle = \bar{u}$$

$$\langle v \rangle = \bar{v} \quad ; \quad \langle w \rangle = \bar{w} \quad ; \quad \langle u'^2 \rangle = \overline{u'^2} \quad ; \quad \langle v'^2 \rangle = \overline{v'^2}$$

$$\langle w'^2 \rangle = \overline{w'^2}$$

TURBULENCIA BAJA (PLANO 1)									
Punto	113	123	133	143	153	163	173	183	193
$\langle u \rangle$ [cm/s]	-2.500	-1.615	0.432	0.974	-0.027	2.782	1.787	3.130	2.105
$\langle v \rangle$ [cm/s]	0.553	-1.868	-0.838	0.312	0.208	1.051	6.358	6.074	3.449
$\langle w \rangle$ [cm/s]	-0.390	-2.032	-4.256	-3.379	-5.427	-5.768	-0.747	-3.895	-3.689
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.818	0.866	0.423	-1.563	1.106	-0.081	0.576	-0.171	-2.791
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-1.833	-0.952	0.079	-1.217	-0.089	-0.068	-0.417	0.376	2.531
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.948	-0.625	-0.038	-0.700	0.109	0.375	1.173	0.057	-0.267
$\langle u'v' \rangle / k$	0.120	0.169	0.120	-0.199	0.269	-0.018	0.102	-0.026	-0.167
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.268	-0.186	0.023	-0.155	-0.022	-0.015	-0.074	0.057	0.151
$\langle v'w' \rangle / k$	-0.139	-0.122	-0.011	-0.089	0.026	0.084	0.208	0.009	-0.016
RMS(u) [cm/s]	2.547	2.160	1.570	2.560	1.924	1.661	1.508	1.664	2.845
RMS(v) [cm/s]	1.824	1.802	1.640	2.128	1.657	2.060	2.130	2.509	3.413
RMS(w) [cm/s]	1.962	1.518	1.373	2.158	1.332	1.392	2.109	2.034	3.706
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	6.487	4.666	2.463	6.553	3.700	2.759	2.274	2.768	8.091
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	3.326	3.248	2.689	4.527	2.745	4.243	4.536	6.294	11.650
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	3.847	2.306	1.884	4.657	1.775	1.937	4.447	4.136	13.734
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	6.830	5.110	3.518	7.868	4.110	4.469	5.629	6.599	16.737

Tabla 7.1: Cálculos Con Velocidades Intensidad Turbulenta Baja Plano 1.

TURBULENCIA BAJA (PLANO 2)									
Punto	213	223	233	243	253	263	273	283	293
$\langle u \rangle$ [cm/s]	-3.931	-3.173	-0.102	-2.374	-1.480	3.020	3.602	4.397	3.774
$\langle v \rangle$ [cm/s]	-0.609	-3.045	-3.172	0.393	-0.199	-1.320	4.287	6.052	0.968
$\langle w \rangle$ [cm/s]	2.449	-0.261	-3.345	1.378	-1.857	-5.659	-0.223	-2.501	-5.803
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.471	0.763	0.750	0.443	0.443	0.918	0.156	-0.060	1.173
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-2.696	-1.777	-0.282	-0.468	-0.609	0.037	-0.573	-0.307	-0.881
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.342	-0.515	-0.610	-0.154	-0.220	-0.243	0.818	-0.009	0.510
$\langle u'v' \rangle / k$	0.046	0.139	0.185	0.101	0.116	0.207	0.033	-0.012	0.163
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.266	-0.324	-0.070	-0.106	-0.160	0.008	-0.122	-0.064	-0.122
$\langle v'w' \rangle / k$	-0.034	-0.094	-0.151	-0.035	-0.058	-0.055	0.174	-0.002	0.071
RMS(u) [cm/s]	2.651	2.343	1.833	2.088	1.632	2.032	1.551	1.599	2.322
RMS(v) [cm/s]	1.986	1.590	1.659	1.655	1.516	1.690	2.121	1.977	2.161
RMS(w) [cm/s]	3.049	1.716	1.408	1.300	1.637	1.367	1.582	1.778	2.078
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	7.030	5.491	3.360	4.358	2.664	4.130	2.407	2.558	5.391
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	3.945	2.527	2.752	2.738	2.297	2.855	4.497	3.907	4.672
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	9.295	2.945	1.983	1.690	2.678	1.867	2.502	3.162	4.318
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	10.135	5.482	4.048	4.393	3.820	4.426	4.703	4.814	7.190

Tabla 7.2: Cálculos Con Velocidades Intensidad Turbulenta Baja Plano 2.

TURBULENCIA BAJA (PLANO 3)									
Punto	313	323	333	343	353	363	373	383	393
$\langle u \rangle$ [cm/s]	-3.382	-4.919	-0.871	-4.621	-1.387	1.692	4.646	5.086	4.680
$\langle v \rangle$ [cm/s]	-1.511	-3.968	-4.571	-1.508	-0.686	-1.091	4.570	5.423	-0.108
$\langle w \rangle$ [cm/s]	2.066	1.283	-2.776	3.709	0.318	-4.021	0.584	-1.849	-5.015
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.369	0.329	0.215	0.539	-0.259	0.392	-0.143	0.059	0.067
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-2.022	-1.498	-0.210	0.392	0.131	-0.272	-0.383	-0.189	-0.644
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.986	-0.198	-0.419	0.092	-0.365	-0.138	1.168	0.102	-0.221
$\langle u'v' \rangle / k$	0.033	0.057	0.053	0.109	-0.077	0.097	-0.034	0.017	0.015
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.181	-0.261	-0.052	0.079	0.039	-0.067	-0.092	-0.053	-0.144
$\langle v'w' \rangle / k$	0.088	-0.035	-0.103	0.019	-0.109	-0.034	0.280	0.029	-0.049
RMS(u) [cm/s]	2.197	1.932	1.783	2.299	1.605	1.934	1.557	1.560	1.899
RMS(v) [cm/s]	2.153	2.019	1.757	1.705	1.708	1.523	1.904	1.560	1.627
RMS(w) [cm/s]	3.589	1.913	1.365	1.301	1.096	1.421	1.519	1.487	1.642
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	4.825	3.731	3.179	5.283	2.575	3.740	2.424	2.433	3.607
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	4.637	4.077	3.088	2.906	2.918	2.320	3.624	2.433	2.646
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	12.882	3.659	1.864	1.693	1.202	2.020	2.307	2.212	2.696
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	11.172	5.733	4.065	4.941	3.348	4.040	4.178	3.539	4.475

Tabla 7.3: Cálculos Con Velocidades Intensidad Turbulenta Baja Plano 3.

TURBULENCIA MEDIA (PLANO 1)									
Punto	112	122	132	142	152	162	172	182	192
$\langle u \rangle$ [cm/s]	-1.426	-2.276	0.239	-0.683	-0.305	3.352	2.853	3.093	1.711
$\langle v \rangle$ [cm/s]	0.826	-2.997	-2.086	0.311	-0.897	1.282	6.283	7.331	-2.391
$\langle w \rangle$ [cm/s]	-0.216	-2.251	-4.670	-4.712	-6.278	-6.437	-2.075	-4.282	-2.702
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.584	1.740	0.655	-0.155	1.540	0.072	0.252	-0.842	1.585
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-2.824	-2.023	-0.423	-1.308	0.091	0.416	0.122	0.476	0.246
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-1.090	-0.816	-0.904	-0.217	0.053	1.176	1.946	0.811	-2.441
$\langle u'v' \rangle / k$	0.057	0.224	0.123	-0.017	0.273	0.011	0.029	-0.102	0.253
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.275	-0.260	-0.080	-0.148	0.016	0.064	0.014	0.058	0.041
$\langle v'w' \rangle / k$	-0.106	-0.105	-0.170	-0.025	0.009	0.182	0.221	0.098	-0.018
RMS(u) [cm/s]	3.341	2.690	1.848	3.013	2.324	2.038	1.851	1.975	9.812
RMS(v) [cm/s]	1.968	2.051	2.083	2.108	2.012	2.510	2.871	2.912	12.888
RMS(w) [cm/s]	2.349	2.030	1.691	2.038	1.360	1.575	2.433	2.022	3.864
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	11.160	7.238	3.417	9.076	5.402	4.152	3.427	3.902	9.088
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	3.873	4.208	4.340	4.443	4.047	6.300	8.241	8.479	8.480
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	5.519	4.123	2.859	4.153	1.850	2.480	5.920	4.087	12.205
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	10.276	7.784	5.308	8.836	5.650	6.466	8.794	8.234	13.387

Tabla 7.4: Cálculos Con Velocidades Intensidad Turbulenta Media Plano 1.

TURBULENCIA MEDIA (PLANO 2)									
Punto	212	222	232	242	252	262	272	282	292
$\langle u \rangle$ [cm/s]	-3.996	-3.840	0.275	-3.065	-0.921	4.344	4.642	5.740	4.749
$\langle v \rangle$ [cm/s]	-0.018	-3.875	-4.076	-0.061	0.200	-1.529	3.640	4.769	0.817
$\langle w \rangle$ [cm/s]	1.621	-0.452	-3.957	1.518	-1.505	-6.695	-0.563	-3.276	-5.937
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.879	1.003	0.834	-0.131	-0.187	1.373	-0.006	0.111	1.385
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-3.647	-2.492	-0.522	-0.658	-0.438	0.294	-0.982	-0.160	0.046
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.938	-1.125	-0.710	-0.119	-0.563	-0.307	0.438	0.117	1.076
$\langle u'v' \rangle / k$	0.067	0.134	0.161	-0.019	-0.035	0.252	-0.001	0.018	0.133
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.278	-0.333	-0.101	-0.093	-0.081	0.054	-0.152	-0.026	0.004
$\langle v'w' \rangle / k$	-0.072	-0.150	-0.137	-0.017	-0.105	-0.056	0.068	0.019	0.104
RMS(u) [cm/s]	3.026	2.698	1.981	2.732	1.930	2.253	2.045	1.946	2.468
RMS(v) [cm/s]	2.105	1.952	1.927	1.909	1.952	2.064	2.076	2.257	2.341
RMS(w) [cm/s]	3.554	1.967	1.655	1.729	1.800	1.253	2.114	1.896	3.034
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	9.158	7.281	3.924	7.466	3.724	5.077	4.182	3.786	6.088
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	4.432	3.810	3.712	3.645	3.810	4.260	4.309	5.095	5.480
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	12.629	3.869	2.740	2.989	3.239	1.571	4.468	3.593	9.205
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	13.109	7.480	5.188	7.050	5.386	5.454	6.480	6.237	10.387

Tabla 7.5: Cálculos Con Velocidades Intensidad Turbulenta Media Plano 2.

<b>TURBULENCIA MEDIA (PLANO 3)</b>									
<b>Punto</b>	312	322	332	342	352	362	372	382	392
$\langle u \rangle$ [cm/s]	-3.897	-5.373	-0.854	-5.724	-2.557	3.170	5.386	6.143	5.717
$\langle v \rangle$ [cm/s]	-1.484	-4.911	-5.145	-1.950	-0.402	-1.837	4.183	5.603	-0.436
$\langle w \rangle$ [cm/s]	0.911	1.582	-3.167	4.276	0.306	-5.181	0.913	-2.088	-5.097
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.232	0.325	0.447	0.415	0.122	0.650	-0.385	0.431	0.101
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-2.911	-2.203	-0.497	0.734	-0.078	-0.802	-0.460	-0.283	-0.407
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	1.802	0.111	-0.411	0.040	-0.410	-0.604	1.014	-0.400	-0.148
$\langle u'v' \rangle / k$	0.017	0.045	0.080	0.053	0.027	0.112	-0.064	0.073	0.018
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.217	-0.303	-0.089	0.094	-0.017	-0.138	-0.077	-0.048	-0.074
$\langle v'w' \rangle / k$	0.134	0.015	-0.074	0.005	-0.091	-0.104	0.170	-0.068	-0.027
RMS(u) [cm/s]	2.753	2.423	2.153	2.983	1.829	2.370	2.227	2.132	1.990
RMS(v) [cm/s]	2.299	2.108	1.969	2.003	1.826	1.769	1.989	2.034	1.658
RMS(w) [cm/s]	3.741	2.055	1.629	1.654	1.523	1.698	1.742	1.773	2.062
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	7.577	5.871	4.636	8.898	3.345	5.618	4.959	4.547	3.961
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	5.287	4.442	3.878	4.010	3.335	3.128	3.958	4.137	2.750
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	13.992	4.223	2.654	2.737	2.319	2.884	3.036	3.145	4.252
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	13.428	7.268	5.584	7.822	4.500	5.815	5.976	5.915	5.481

Tabla 7.6: Cálculos Con Velocidades Intensidad Turbulenta Media Plano 3.

<b>TURBULENCIA ALTA (PLANO 1)</b>									
<b>Punto</b>	111	121	131	141	151	161	171	181	191
$\langle u \rangle$ [cm/s]	-1.825	-1.887	-0.001	-2.219	-0.596	2.676	2.817	4.042	4.423
$\langle v \rangle$ [cm/s]	0.333	-2.736	-1.419	0.042	-0.991	0.537	7.950	5.706	1.351
$\langle w \rangle$ [cm/s]	-0.207	-2.095	-5.434	-4.568	-6.383	-6.810	-2.810	-4.762	-3.705
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.375	1.404	0.579	0.024	1.632	-0.021	0.709	0.039	0.033
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-5.026	-1.702	-0.113	-1.505	-0.386	0.101	0.303	0.419	0.122
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-2.163	-1.141	-0.875	-0.384	-0.132	0.501	2.405	0.896	-0.760
$\langle u'v' \rangle / k$	0.024	0.152	0.102	0.002	0.248	-0.004	0.068	0.005	-0.354
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.322	-0.184	-0.020	-0.147	-0.059	0.020	0.029	0.054	0.003
$\langle v'w' \rangle / k$	-0.139	-0.124	-0.155	-0.038	-0.020	0.099	0.231	0.116	-0.016
RMS(u) [cm/s]	4.162	2.999	1.934	3.164	2.551	1.979	2.100	1.872	5.002
RMS(v) [cm/s]	2.406	2.224	2.105	2.293	2.252	2.068	3.114	2.862	7.129
RMS(w) [cm/s]	2.850	2.128	1.771	2.269	1.256	1.401	2.596	1.947	4.108
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	17.320	8.996	3.739	10.011	6.509	3.917	4.409	3.505	12.609
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	5.789	4.947	4.429	5.257	5.072	4.278	9.697	8.191	11.231
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	8.122	4.527	3.135	5.150	1.579	1.961	6.740	3.791	11.212
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	15.615	9.235	5.652	10.208	6.580	5.078	10.423	7.744	13.526

Tabla 7.7: Cálculos Con Velocidades Intensidad Turbulenta Alta Plano 1.

TURBULENCIA ALTA (PLANO 2)									
Punto	211	221	231	241	251	261	271	281	291
$\langle u \rangle$ [cm/s]	-3.695	-4.357	-0.757	-4.828	-1.718	4.352	5.333	6.670	-1.503
$\langle v \rangle$ [cm/s]	0.203	-4.230	-5.089	0.136	0.025	-1.964	4.087	5.291	0.379
$\langle w \rangle$ [cm/s]	1.813	0.117	-3.576	2.957	-1.321	-6.743	-0.530	-3.220	-2.973
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.992	2.275	1.238	1.339	-0.067	1.520	-0.193	-0.159	0.013
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-6.876	-4.311	-0.337	-0.801	-0.034	0.467	-0.635	-0.156	0.127
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-1.057	-1.608	-0.756	-0.463	-0.553	-0.415	-0.082	-0.090	2.354
$\langle u'v' \rangle / k$	0.056	0.215	0.172	0.135	-0.012	0.270	-0.026	-0.025	0.021
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.385	-0.408	-0.047	-0.081	-0.006	0.083	-0.085	-0.025	-0.181
$\langle v'w' \rangle / k$	-0.059	-0.152	-0.105	-0.047	-0.103	-0.074	-0.011	-0.014	0.014
RMS(u) [cm/s]	3.925	3.249	2.431	3.242	1.922	2.312	2.244	1.987	16.669
RMS(v) [cm/s]	2.336	2.195	2.154	2.266	1.980	2.048	2.287	2.216	5.442
RMS(w) [cm/s]	3.851	2.404	1.967	2.043	1.773	1.313	2.159	1.926	4.951
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	15.407	10.555	5.911	10.513	3.693	5.344	5.036	3.947	6.609
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	5.455	4.819	4.641	5.134	3.920	4.193	5.231	4.911	5.231
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	14.829	5.780	3.869	4.175	3.144	1.723	4.662	3.708	5.212
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	17.846	10.577	7.210	9.911	5.378	5.630	7.465	6.283	7.526

Tabla 7.8: Cálculos Con Velocidades Intensidad Turbulenta Alta Plano 2.

TURBULENCIA ALTA (PLANO 3)									
Punto	311	321	331	341	351	361	371	381	391
$\langle u \rangle$ [cm/s]	-4.778	-6.892	-1.657	-7.049	-3.251	2.641	5.494	6.861	7.538
$\langle v \rangle$ [cm/s]	-1.446	-5.198	-5.697	-1.979	-0.197	-1.726	4.441	5.783	0.542
$\langle w \rangle$ [cm/s]	-1.539	2.495	-3.269	5.155	0.413	-5.701	1.021	-2.285	-5.405
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	2.572	-0.033	0.505	1.179	-0.317	0.398	-0.703	0.051	-0.007
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.953	-2.370	-0.200	1.076	-0.028	-0.348	-0.107	-0.273	0.132
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	3.070	0.113	-0.664	0.162	-0.445	-0.491	0.543	-0.656	-0.186
$\langle u'v' \rangle / k$	0.190	-0.004	0.068	0.135	-0.060	0.058	-0.108	0.008	-0.001
$\langle u'w' \rangle / k$	-0.070	-0.286	-0.027	0.123	-0.005	-0.051	-0.016	-0.045	0.024
$\langle v'w' \rangle / k$	0.227	0.014	-0.089	0.019	-0.084	-0.072	0.084	-0.107	-0.034
RMS(u) [cm/s]	2.929	2.536	2.579	3.269	1.879	2.708	2.382	2.211	2.147
RMS(v) [cm/s]	3.041	2.257	2.182	2.112	2.061	1.930	2.032	1.910	1.797
RMS(w) [cm/s]	3.043	2.249	1.866	1.510	1.663	1.623	1.787	1.918	1.792
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	8.579	6.430	6.651	10.689	3.532	7.335	5.674	4.887	4.609
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	9.247	5.096	4.762	4.459	4.250	3.723	4.127	3.650	3.231
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	9.262	5.057	3.481	2.280	2.767	2.633	3.194	3.679	3.212
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	13.544	8.291	7.447	8.714	5.274	6.846	6.497	6.108	5.526

Tabla 7.9: Cálculos Con Velocidades Intensidad Turbulenta Alta Plano 3.

**7.2 Anexo B: Datos Numéricos del Comportamiento del N° de Partículas, Sumas de Áreas, Área Mín. y Área Máx. en el tiempo por experiencia:**

<b>EXPERIENCIA A</b>					
<b>Tiempo [min]</b>	<b>N° de Partículas Promedio</b>	<b>Suma Area Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Promedio Área Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Mínima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Máxima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>
4	11,656	0,0433	0,0127	0,0057	0,0240
8	6,968	0,0322	0,0119	0,0059	0,0205
12	5,143	0,0253	0,0112	0,0063	0,0166
16	3,950	0,0227	0,0113	0,0071	0,0162
20	3,311	0,0213	0,0116	0,0081	0,0162
24	2,850	0,0179	0,0104	0,0066	0,0138
28	2,529	0,0174	0,0106	0,0078	0,0140

Tabla 7.10: Resultados Cuadros Experiencia A.

<b>EXPERIENCIA B</b>					
<b>Tiempo [min]</b>	<b>N° de Partículas Promedio</b>	<b>Suma Area Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Promedio Área Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Mínima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Máxima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>
4	21,250	0,0601	0,0130	0,0048	0,0271
8	12,781	0,0451	0,0126	0,0050	0,0245
12	10,063	0,0387	0,0123	0,0054	0,0219
16	8,813	0,0352	0,0121	0,0062	0,0202
20	7,766	0,0317	0,0114	0,0057	0,0192
24	6,508	0,0286	0,0112	0,0062	0,0173
28	6,359	0,0286	0,0113	0,0059	0,0187

Tabla 7.11: Resultados Cuadros Experiencia B.

<b>EXPERIENCIA C</b>					
<b>Tiempo [min]</b>	<b>N° de Partículas Promedio</b>	<b>Suma Area Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Promedio Área Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Mínima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Máxima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>
4	26,934	0,0721	0,0139	0,0049	0,0291
8	20,164	0,0609	0,0136	0,0049	0,0269
12	20,033	0,0568	0,0128	0,0050	0,0255
16	18,078	0,0534	0,0126	0,0048	0,0249
20	15,766	0,0483	0,0122	0,0051	0,0234
24	15,281	0,0470	0,0120	0,0049	0,0224
28	13,078	0,0428	0,0119	0,0052	0,0222

Tabla 7.12: Resultados Cuadros Experiencia C.

<b>EXPERIENCIA D</b>					
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Nº de Partículas Promedio</b>	<b>Suma Area Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Promedio Área Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Mínima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Máxima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>
4	17,721	0,0470	0,0113	0,0049	0,0226
8	9,219	0,0323	0,0107	0,0053	0,0185
12	8,625	0,0312	0,0108	0,0055	0,0189
16	7,306	0,0266	0,0100	0,0058	0,0161
20	6,159	0,0249	0,0101	0,0060	0,0153
24	5,203	0,0211	0,0093	0,0063	0,0135
28	4,344	0,0199	0,0098	0,0061	0,0137

Tabla 7.13: Resultados Cuadros Experiencia D.

<b>EXPERIENCIA E</b>					
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Nº de Partículas Promedio</b>	<b>Suma Area Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Promedio Área Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Mínima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Máxima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>
4	35,766	0,0734	0,0124	0,0045	0,0310
8	22,641	0,0556	0,0117	0,0045	0,0254
12	20,797	0,0499	0,0110	0,0048	0,0227
16	13,766	0,0417	0,0113	0,0051	0,0219
20	14,063	0,0401	0,0108	0,0050	0,0208
24	13,969	0,0388	0,0103	0,0050	0,0195
28	11,323	0,0358	0,0106	0,0050	0,0193

Tabla 7.14: Resultados Cuadros Experiencia E.

<b>EXPERIENCIA F</b>					
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Nº de Partículas Promedio</b>	<b>Suma Area Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Promedio Área Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Mínima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Máxima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>
4	44,517	0,0942	0,0142	0,0042	0,0349
8	40,781	0,0870	0,0136	0,0044	0,0338
12	36,921	0,0773	0,0128	0,0045	0,0306
16	32,547	0,0734	0,0129	0,0044	0,0297
20	32,781	0,0717	0,0125	0,0044	0,0287
24	29,031	0,0656	0,0122	0,0045	0,0279
28	28,734	0,0644	0,0121	0,0046	0,0267

Tabla 7.15: Resultados Cuadros Experiencia F.

<b>EXPERIENCIA G</b>					
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Nº de Partículas Promedio</b>	<b>Suma Area Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Promedio Área Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Mínima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Máxima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>
4	22,638	0,0556	0,0117	0,0038	0,0254
8	22,094	0,0460	0,0097	0,0031	0,0219
12	11,516	0,0332	0,0098	0,0039	0,0183
16	7,891	0,0273	0,0096	0,0046	0,0170
20	10,531	0,0308	0,0094	0,0038	0,0183
24	6,594	0,0245	0,0097	0,0051	0,0163
28	7,406	0,0246	0,0095	0,0051	0,0166

Tabla 7.16: Resultados Cuadros Experiencia G.

<b>EXPERIENCIA H</b>					
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Nº de Partículas Promedio</b>	<b>Suma Area Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Promedio Área Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Mínima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Máxima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>
4	24,891	0,0598	0,0120	0,0042	0,0280
8	12,406	0,0426	0,0122	0,0050	0,0235
12	9,141	0,0339	0,0114	0,0051	0,0201
16	6,438	0,0294	0,0114	0,0063	0,0182
20	6,078	0,0258	0,0106	0,0058	0,0170
24	5,313	0,0262	0,0113	0,0064	0,0182
28	5,188	0,0242	0,0106	0,0056	0,0167

Tabla 7.17: Resultados Cuadros Experiencia H.

<b>EXPERIENCIA I</b>					
<b>Tiempo [min]</b>	<b>Nº de Partículas Promedio</b>	<b>Suma Area Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Promedio Área Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Mínima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Area Máxima Partículas [cm<sup>2</sup>]</b>
4	29,313	0,0697	0,0128	0,0044	0,0311
8	20,625	0,0556	0,0122	0,0047	0,0265
12	16,141	0,0493	0,0122	0,0048	0,0260
16	13,094	0,0408	0,0113	0,0048	0,0220
20	11,109	0,0388	0,0117	0,0050	0,0217
24	9,683	0,0345	0,0111	0,0054	0,0200
28	9,097	0,0343	0,0116	0,0055	0,0199

Tabla 7.18: Resultados Cuadros Experiencia I.

### 7.3 Anexo C: Resultados Iteraciones Modelo Propuesto

Exp	Conc.[gr/cm <sup>3</sup> ]	k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	t [min]	D [cm]	ln(D)	Coefi.2	ln(Coef2)	D/Coef2	exp(-α*t)
a	0.0000129	9.23	4	0.01274	-4.363	0.0127	-4.366	1.003	0.967
a	0.0000129	9.23	8	0.01192	-4.430	0.0127	-4.366	0.938	0.936
a	0.0000129	9.23	12	0.01124	-4.489	0.0127	-4.366	0.885	0.906
a	0.0000129	9.23	16	0.01131	-4.482	0.0127	-4.366	0.891	0.876
a	0.0000129	9.23	20	0.01158	-4.459	0.0127	-4.366	0.912	0.848
a	0.0000129	9.23	24	0.01036	-4.569	0.0127	-4.366	0.816	0.820
a	0.0000129	9.23	28	0.01062	-4.545	0.0127	-4.366	0.837	0.793
b	0.0000129	7.61	4	0.01300	-4.343	0.0133	-4.320	0.977	0.973
b	0.0000129	7.61	8	0.01265	-4.370	0.0133	-4.320	0.951	0.947
b	0.0000129	7.61	12	0.01227	-4.401	0.0133	-4.320	0.922	0.921
b	0.0000129	7.61	16	0.01210	-4.414	0.0133	-4.320	0.910	0.897
b	0.0000129	7.61	20	0.01138	-4.476	0.0133	-4.320	0.856	0.873
b	0.0000129	7.61	24	0.01115	-4.496	0.0133	-4.320	0.838	0.849
b	0.0000129	7.61	28	0.01128	-4.485	0.0133	-4.320	0.848	0.826
c	0.0000129	5.66	4	0.01385	-4.279	0.0141	-4.262	0.982	0.980
c	0.0000129	5.66	8	0.01355	-4.301	0.0141	-4.262	0.961	0.960
c	0.0000129	5.66	12	0.01276	-4.361	0.0141	-4.262	0.905	0.941
c	0.0000129	5.66	16	0.01259	-4.375	0.0141	-4.262	0.893	0.922
c	0.0000129	5.66	20	0.01216	-4.410	0.0141	-4.262	0.862	0.904
c	0.0000129	5.66	24	0.01199	-4.424	0.0141	-4.262	0.850	0.885
c	0.0000129	5.66	28	0.01189	-4.432	0.0141	-4.262	0.843	0.868
d	0.0000258	9.23	4	0.01126	-4.486	0.0115	-4.465	0.979	0.970
d	0.0000258	9.23	8	0.01068	-4.540	0.0115	-4.465	0.928	0.940
d	0.0000258	9.23	12	0.01085	-4.524	0.0115	-4.465	0.943	0.912
d	0.0000258	9.23	16	0.01001	-4.604	0.0115	-4.465	0.870	0.884
d	0.0000258	9.23	20	0.01011	-4.595	0.0115	-4.465	0.879	0.857
d	0.0000258	9.23	24	0.00930	-4.677	0.0115	-4.465	0.809	0.831
d	0.0000258	9.23	28	0.00977	-4.629	0.0115	-4.465	0.849	0.806
e	0.0000258	7.61	4	0.01236	-4.393	0.0124	-4.390	0.997	0.975
e	0.0000258	7.61	8	0.01169	-4.449	0.0124	-4.390	0.942	0.950
e	0.0000258	7.61	12	0.01100	-4.510	0.0124	-4.390	0.887	0.927
e	0.0000258	7.61	16	0.01134	-4.480	0.0124	-4.390	0.914	0.903
e	0.0000258	7.61	20	0.01078	-4.530	0.0124	-4.390	0.869	0.881
e	0.0000258	7.61	24	0.01029	-4.577	0.0124	-4.390	0.830	0.859
e	0.0000258	7.61	28	0.01060	-4.547	0.0124	-4.390	0.855	0.837
f	0.0000258	5.66	4	0.01416	-4.257	0.0143	-4.247	0.990	0.981
f	0.0000258	5.66	8	0.01365	-4.294	0.0143	-4.247	0.954	0.963
f	0.0000258	5.66	12	0.01275	-4.362	0.0143	-4.247	0.892	0.945
f	0.0000258	5.66	16	0.01289	-4.351	0.0143	-4.247	0.901	0.927
f	0.0000258	5.66	20	0.01253	-4.380	0.0143	-4.247	0.876	0.910
f	0.0000258	5.66	24	0.01220	-4.406	0.0143	-4.247	0.853	0.893
f	0.0000258	5.66	28	0.01206	-4.418	0.0143	-4.247	0.844	0.876

Exp	Conc.[gr/cm <sup>3</sup> ]	k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	t [min]	D [cm]	ln(D)	Coefi.2	ln(Coef2)	D/Coef2	exp(-α*t)
g	0.0000515	9.23	4	0.01174	-4.445	0.0109	-4.519	1.077	0.973
g	0.0000515	9.23	8	0.00971	-4.635	0.0109	-4.519	0.890	0.947
g	0.0000515	9.23	12	0.00980	-4.626	0.0109	-4.519	0.899	0.922
g	0.0000515	9.23	16	0.00960	-4.646	0.0109	-4.519	0.881	0.897
g	0.0000515	9.23	20	0.00939	-4.668	0.0109	-4.519	0.861	0.873
g	0.0000515	9.23	24	0.00967	-4.639	0.0109	-4.519	0.887	0.850
g	0.0000515	9.23	28	0.00948	-4.659	0.0109	-4.519	0.869	0.827
h	0.0000515	7.61	4	0.01204	-4.420	0.0124	-4.390	0.971	0.978
h	0.0000515	7.61	8	0.01216	-4.410	0.0124	-4.390	0.980	0.956
h	0.0000515	7.61	12	0.01141	-4.473	0.0124	-4.390	0.920	0.935
h	0.0000515	7.61	16	0.01141	-4.473	0.0124	-4.390	0.920	0.914
h	0.0000515	7.61	20	0.01065	-4.542	0.0124	-4.390	0.859	0.894
h	0.0000515	7.61	24	0.01131	-4.482	0.0124	-4.390	0.912	0.874
h	0.0000515	7.61	28	0.01061	-4.546	0.0124	-4.390	0.856	0.855
i	0.0000515	5.66	4	0.01283	-4.356	0.0128	-4.358	1.002	0.983
i	0.0000515	5.66	8	0.01219	-4.407	0.0128	-4.358	0.952	0.967
i	0.0000515	5.66	12	0.01223	-4.404	0.0128	-4.358	0.955	0.951
i	0.0000515	5.66	16	0.01133	-4.480	0.0128	-4.358	0.885	0.936
i	0.0000515	5.66	20	0.01166	-4.451	0.0128	-4.358	0.911	0.920
i	0.0000515	5.66	24	0.01110	-4.501	0.0128	-4.358	0.867	0.905
i	0.0000515	5.66	28	0.01160	-4.457	0.0128	-4.358	0.906	0.890

Tabla 7.19: Resultados iteraciones modelo propuesto.