



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**EVALUACION DE LOS POLVOS DE MEZCLA  
ASFALTICA COMO ADYUVANTES DEL  
PROCESO DE FLOCULACION DE AGUAS**

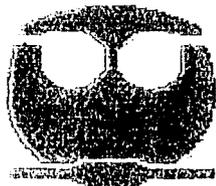
**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERA QUIMICA**

**P R E S E N T A:**

**FABIOLA EUGENIA NEGRETE MARTINEZ**



MEXICO, D.F.



2002

**EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Prof. Rodolfo Torres Barrera  
**Vocal:** Prof. José Sabino Sámano Castilla  
**Secretario:** Profa. Rosa María Ramírez Zamora  
**1er. Suplente:** Prof. Gabriel Baldomero Pérez  
**2do. Suplente:** Prof. Alfonso Durán Moreno

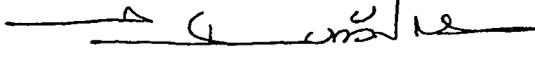
**Sitio donde se desarrolló el tema:**

**Coordinación de Ingeniería Ambiental, Instituto de Ingeniería, UNAM.**

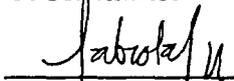
**Asesor del tema:**

  
Dra. Rosa María Ramírez Zamora

**Supervisor Técnico:**

  
Dr. Alfonso Durán Moreno

**Sustentante:**

  
Fabiola Eugenia Negrete Martínez



**DEDICATORIAS Y  
AGRADECIMIENTOS**

## **AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS**

**A mi madre, I.B.Q. Ma. Eugenia Martínez Salgado**, este logro esta dedicado especialmente a ti en agradecimiento por toda la paciencia, cariño, comprensión, libertad, confianza y alegría que genera tu presencia. Gracias a ti tengo la oportunidad de ser quien soy. Todo mi cariño, respeto y admiración son para ti. Te quiero.

**A mi hermana, Laura Patricia Negrete Martínez**, gracias compartir conmigo tu sentido crítico y humanístico, fuera de prejuicios. Por todos las risas, sarcasmos y pláticas. Tienes el éxito en las manos.

**A mi mami, Sra. Guadalupe Salgado Pastrana (q.e.p.d.)**, a quien le hubiera gustado ver este trabajo culminado. Te agradezco por ser una mujer tan revolucionada a tu época y todas las enseñanzas que esto conllevan. Siempre estas en mi mente y en mi corazón. Te extraño.

**A mi padre, Lic. Eduardo Negrete López.**

**A la familia Martínez Salgado**, por su apoyo, enseñanzas y buenos deseos.

**A mis super amigas, Paola Espinosa, Fernanda Ruano y Ma. Elena Sánchez**, han pasado demasiados años desde la infancia, demasiados momentos, experiencias, alegrías y tristezas. Seguramente no recuerdo todos; sin embargo, gracias por todos ellos y por simplemente estar ahí.

**A mis amigos, Alejandro Paladino, Carlos Juárez, Daniel Padrós, Erika Pólito, Gonzalo Fernández, José Antonio Padrós, Rafael Lajud y Rafael Garduño**, gracias por encontrar en ustedes amistad incondicional a cada momento, por su apoyo y comprensión, por compartir conmigo los momentos más "tristes" de mi vida, los quiero muchísimo.

**A mis amigos Bar-Da, Alejandro Arroyo, Bárbara Schulz, Brenda Galicia, Francisco Cruz, Gabriel Jaramillo, Jhonatan Pallares, Joel Escalante, Juvenal Arias, Nair García, Nayeli Terán, Oswaldo Celedón, Quetzalcoatl Hernández, Raúl Quintana, Sandra Atondo, Valter Barrera, Yebel Ferrer y Zaida Larqué**, la universidad no hubiera sido lo mismo sin su presencia, gracias por su amistad, por hacerme parte de sus vidas y las experiencias (buenas y malas) que hemos vivido juntos. Es un orgullo ser Bar-Da!

**A mis amigos, Christian Halbinger, Josman Espinosa, Mariano Pérez Camacho, Norma González, Ernesto González, Verónica Tenorio, Ulises López, Jesús Ramírez.**

**A los profesores Cetina (q.e.p.d), Celestino Montiel, Rosa María Ramírez Zamora y León Coronado**; por todos sus consejos y conocimientos.

**A Viviana de Quevedo y Melissa Jiménez**, esperando que el tiempo devuelva la amistad que un día tuvimos.

**A la UNAM, en especial a la Facultad de Química**, por la educación critica que generas en tus aulas. Es un orgullo y un privilegio ser Universitario.

**A Luis Alberto Aranda Hernández**, gracias por todo el amor y cariño, la comprensión, por ser la persona que eres, por cada momento que hemos vivido, por arriesgar tu vida al salvar la mía en Can-Cún. Es el mejor "regalo" que una persona puede recibir. Te amo!, eres de lo mejor que ha pasado en mi vida.



**INDICE**

# ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
PROBLEMÁTICA.....	2
OBJETIVO.....	2
ALCANCES.....	3

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN.....	4
1.1.1 PRINCIPIOS DE LA COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN.....	4
1.1.2 PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS REMOVIDOS POR EL PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN.....	4
1.2 COAGULACIÓN.....	6
1.2.1 MECANISMOS DE LA COAGULACIÓN.....	6
1.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA COAGULACIÓN.....	7
1.2.3 TIPOS DE COAGULANTES.....	8
1.2.4 ELECCIÓN DE COAGULANTE.....	10
1.2.5 INTRODUCCIÓN DEL COAGULANTE.....	11
1.3 FLOCULACIÓN.....	12
1.3.1 MECANISMOS DE LA FLOCULACIÓN.....	13
1.3.2 TIPOS DE FLOCULANTE.....	13
1.3.2.1 FLOCULANTES MINERALES.....	14
1.3.2.2 FLOCULANTES ORGÁNICOS.....	14
1.3.3 PRÁCTICA DE LA FLOCULACIÓN.....	17
1.4 SÍLICE ACTIVADA.....	20
1.4.1 PREPARACIÓN DE LA SÍLICE ACTIVADA.....	20
1.4.2 SÍLICE ACTIVADA COMO PRINCIPAL COADYUDANTE DE LA FLOCULACIÓN.....	21
1.4.3 MECANISMOS DE ACCIÓN DE LA SÍLICE ACTIVADA.....	23
1.5 ASFALTO.....	24
1.5.1 PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	24
1.5.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ASFALTO DE ESTUDIO.....	25
1.5.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA PLANTA A.....	25
1.5.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA PLANTA B.....	27
1.5.2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA PLANTA C.....	28

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE RESIDUO ASFÁLTICO.....	32
2.1.1 C.R.E.T.I.B.....	32
2.1.2 ANÁLISIS FISCOQUÍMICO.....	32
2.1.2.1 GRANULOMETRÍA.....	32
2.1.2.2 DENSIDAD APARENTE.....	33
2.1.2.3 OBSERVACIONES AL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO.....	33
2.1.3 ANÁLISIS QUÍMICO.....	33
2.1.3.1 ANÁLISIS ELEMENTAL.....	33
2.1.3.2 CONTENIDO DE ÓXIDOS.....	32
2.2 TÉCNICAS Y SISTEMAS EXPERIMENTALES.....	34
2.2.1 PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN.....	34
2.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DEL INFLUENTE Y EFLUENTE.....	35

2.3.1 PARÁMETROS CONVENCIONALES.....	36
2.3.2 PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS NO CONVENCIONALES.....	36
2.3.2.1 DISTRIBUCIÓN EN PARTÍCULA EN SUSPENSIÓN.....	35
2.4 ANÁLISIS FISCOQUÍMICOS DE LODOS.....	36
2.4.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE ZONA.....	36
2.4.2 RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN.....	37
2.4.3 HUMEDAD.....	39
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>	
3.1 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE POLVOS.....	40
3.1.1 ANÁLISIS C.R.E.T.I.B. ....	40
3.1.2 ANÁLISIS FISCO.....	41
3.1.2.1 GRANULOMETRÍA.....	41
3.1.2.2 DENSIDAD APARENTE.....	41
3.1.2.3 OBSERVACIONES AL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.....	42
3.1.3 ANÁLISIS QUÍMICO.....	42
3.1.3.1 ANÁLISIS ELEMENTAL.....	41
3.1.3.2 ANÁLISIS DE ÓXIDOS CONTENIDOS EN LAS MUESTRAS DE POLVO Y LODOS.....	44
3.2 RESULTADOS DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA AGUA NATURAL Y RESIDUAL.....	45
3.2.1 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO CON SULFATO DE ALUMINIO DE AGUA RESIDUAL EXTRAIDA DE LA PLANTA DE BOMBEO DE GRAN CANAL.....	45
3.2.2 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO CON SULFATO DE ALUMINIO, UN POLÍMERO COMERCIAL vs. POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA, EN AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE GRAN CANAL.....	50
3.2.3 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO CON SULFATO DE ALUMINIO Y CAL EN AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE GRAN CANAL.....	52
3.2.4 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE AGUA NATURAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS" CON SULFATO DE ALUMINIO.....	60
<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	68
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	70
<b>ANEXO I. METODOLOGÍA</b> .....	71
<b>ANEXO II. ANÁLISIS C.R.E.T.I.B.</b> .....	81
<b>ANEXO III. AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON <math>Al_2(SO_4)_3</math> Y CAL</b> .....	83
<b>ANEXO IV. RESULTADOS DEL AGUA NATURAL TRATADA DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS"</b> .....	96
<b>ANEXO V. AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON UNA DOSIS DE 150 mg/L DE <math>Al_2(SO_4)_3</math></b> .....	107

## FIGURAS

FIGURA 1.1 COLOIDE PROTEGIDO.....	5
FIGURA 1.2 CÁMARA DE MEZCLA CON AGITADOR RÁPIDO.....	12
FIGURA 1.3 FLOCULADOR HORIZONTAL.....	19
FIGURA 1.4 FLOCULADOR VERTICAL.....	19
FIGURA 1.5 FLUJO DE PROCESO EN LA PLANTA A.....	29
FIGURA 1.6 FLUJO DE PROCESO EN LA PLANTA B.....	30
FIGURA 1.7 FLUJO DE PROCESO EN LA PLANTA C.....	31
FIGURA 2.1 EQUIPO CLASICO DE PRUEBA DE JARRAS.....	34
FIGURA 2.2 DISPOSITIVO PARA DETERMINAR LA R.E.F.....	38
FIGURA 3.1 PARTÍCULAS DE POLVO PRODUCIDAS EN LA PLANTA No. 5 (X450).....	42
FIGURA 3.2 ESPECTROS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN MUESTRAS DE POLVOS: (A) PLANTA 5; (B) PLANTA 6; (C) PLANTA 7.....	42
FIGURA 3.3 DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULA PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 150 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3/L$ Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	47
FIGURA 3.4 PERFILES DE SEDIMENTACIÓN PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 150 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3/L$ Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	48
FIGURA 3.5 RESISTENCIA A LA FILTRACIÓN (REF) Y RELACIÓN TIEMPO DE FILTRACIÓN/SÓLIDOS TOTALES (tg/ST) PARA LODOS OBTENIDOS DE LA CLARIFICACIÓN DE AGUA RESIDUAL CON SULFATO DE ALUMINIO (150 mg/L) Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	49
FIGURA 3.6 VOLUMEN DE LODOS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE SEDIMENTACIÓN DE AGUA RESIDUAL TRATADA CON SULFATO DE ALUMINIO Y/O POLVOS DE LA PLANTA DE ASFÁLTO.....	50
FIGURA 3.7 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EFLUENTES TRATADOS CON UNA DOSIS DE 110 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3/L$ , 71 mg/L DE CAL Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	54
FIGURA 3.8 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EFLUENTES TRATADOS CON UNA DOSIS DE 150 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3/L$ , 97 mg/L DE CAL Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	55
FIGURA 3.9 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN ( $T_2$ ) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON $Al_2(SO_4)_3$ , CAL Y POLVOS.....	56
FIGURA 3.10 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA RETARDADA ( $T_3$ ) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON $Al_2(SO_4)_3$ , CAL Y POLVOS.....	56
FIGURA 3.11 PERFILES DE SEDIMENTACIÓN PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 110 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3$ Y 71 mg/L DE CAL.....	57
FIGURA 3.12 PERFILES DE SEDIMENTACIÓN PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 150 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3$ Y 97 mg/L DE CAL.....	58
FIGURA 3.13 REF Y RELACIÓ (t/ST DE LODOS PRODUCIDOS POR CLARIFICACIÓN CON SULFATO DE ALUMINIO A) 110 mg/L Y CAL 71 mg/L Y B) 150 mg/L Y CAL 97 mg/L, CON DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	62
FIGURA 3.14 EVOLUCIÓN DE LAS ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN $T_2$ EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA UNA DOSIS DE 10 mg/l DE $Al_2(SO_4)_3$ EN DIFERENTES CONCENTRACIONES DE POLVOS AASFÁLTICOS.....	63
FIGURA 3.15 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN ( $T_2$ ).....	63
FIGURA 3.16 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN ( $T_2$ ).....	64
FIGURA 3.17 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA RETARDADA ( $T_3$ ).....	65

## FOTOGRAFÍAS

FOTO 3.1 FLÓCULO PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CRUDA DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS" CON 10 mg/L DE SULFATO DE ALUMINIO, $Al_2(SO_4)_3$ (X20).....	66
FOTO 3.2 FLÓCULO PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CRUDA DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS" CON 10 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3$ Y 10 mg/L DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA (X20).....	66
FOTO 3.3 FLÓCULO PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CRUDA DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS" CON 10 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3$ Y 25 mg/L DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA (X20).....	67

## TABLAS

TABLA 1.1 CARACTERÍSTICAS DE COAGULANTES.....	8
TABLA 1.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS FLOCULANTES ORGÁNICOS.....	16
TABLA 1.3 CONSTANTES DE ACIDEZ DEL ÁCIDO SILÍCICO.....	21
TABLA 1.4 PROPIEDADES DE DIFERENTES CLASES DE SILICATOS REPORTADOS.....	21
TABLA 2.1 PARÁMETROS CONVENCIONALES DE INFLUENTE E INFLUENTE.....	34
TABLA 3.1 ANÁLISIS C.R.E.T.I.B. DE RESIDUO EN POLVO Y LODO DE LAS PLANTAS 5, 6 Y 7 DE LA P.A.D.F. ....	40
TABLA 3.2 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS MUESTRAS EN POLVO.....	41
TABLA 3.3 CONTENIDO DE ÓXIDOS EN LAS MUESTRAS DE RESIDUO DEL ASFÁLTO.....	44
TABLA 3.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE $Al_2(SO_4)_3$ EN AGUA PROVENIENTE DE GRAN CANAL.....	45
TABLA 3.5 CARÁCTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS PARA AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON 150 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3$ .....	46
TABLA 3.6 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON 150 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3$ Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	47
TABLA 3.7 SÓLIDOS EVALUADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE GRAN CANAL.....	49
TABLA 3.8 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS EFLUENTES DE AGUA RESIDUAL TRATADA CON SULFATO DE ALUMINIO (90 mg/L $Al_2(SO_4)_3$ , UN FLOCULANTE COMERCIAL (PROSIFLOC, DOSIS DE 0.1 Y 0.6 mg/l) Y POLVOS ASFÁLTICOS (4 Y 60 mg/l).....	51
TABLA 3.9 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS PARA AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON $Al_2(SO_4)_3$ Y CAL.....	58
TABLA 3.10 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS PARA AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON $Al_2(SO_4)_3$ (110 Y 150 mg/L) Y CAL(71 Y 97 mg/L).....	60
TABLA 3.11 SÓLIDOS EVALUADOS DE LOS EFLUENTES OBTENIDOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE RESIDUALES CON $Al_2(SO_4)_3$ Y CAL.....	56
TABLA 3.12 CONTENIDO DE HUMEDAD PARA LOS LODOS EN DIFERENTES CONCENTRACIONES DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	57
TABLA 3.13 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS EFLUENTES OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FLOCULACIÓN CON DIFERENTES DOSIS DE $Al_2(SO_4)_3$ .....	61
TABLA 3.14 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS EFLUENTES DE AGUA NATURAL TRATADA CON SULFATO DE ALUMINIO (10 Y 25 mg/L) Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	61

## RESUMEN

Este estudio evalúa la factibilidad de aplicar los polvos de mezcla asfáltica como coadyuvantes del proceso de floculación de aguas. La evaluación se realizó en dos etapas principales: a) caracterización fisicoquímica de los polvos de mezcla asfáltica y b) pruebas de tratabilidad por el proceso de coagulación-floculación de aguas de tipo natural y residual, empleando los polvos de mezcla asfáltica.

El presente trabajo se constituye de cuatro capítulos. En el primer capítulo se presenta una revisión bibliográfica de los principios básicos, de los productos más importantes empleados y de los factores que afectan el proceso de coagulación-floculación. Esta información bibliográfica permitió determinar de manera preliminar la viabilidad de utilizar los polvos de mezcla asfáltica como coadyuvantes del proceso de floculación y para definir la metodología experimental del estudio.

El Capítulo Segundo, plantea la metodología experimental empleada para caracterizar los polvos de mezcla asfáltica y para realizar las pruebas de tratabilidad de aguas por el proceso de floculación utilizando estos residuos como adyuvantes. En este capítulo se describen los materiales, sistemas y técnicas experimentales y analíticas utilizadas en el estudio. La caracterización de los polvos se realizó mediante la determinación de los principales parámetros fisicoquímicos (tamaño de partícula, densidad, contenido de óxidos, análisis químico y observaciones al microscopio electrónico de barrido MEB). El proceso de coagulación-floculación de aguas con los polvos se realizó en laboratorio por la técnica de prueba de jarras (jar test). Los criterios retenidos para la evaluación de la eficiencia de los polvos para la floculación de aguas se dividen en dos grupos: a) calidad del efluente (color, turbiedad, DQO, sólidos, tamaño de partícula de los sólidos suspendidos) y 2) calidad de los lodos o flóculos (velocidad de sedimentación, resistencia específica a la filtración (REF), características físicas de tipo cualitativo del flóculo, como densidad y tamaño).

El Capítulo Tercero, presenta los resultados obtenidos en las dos etapas experimentales de la evaluación de los polvos de mezcla asfáltica. Paralelamente, se realizan un análisis y una discusión de los valores determinados en las diferentes pruebas de caracterización y de tratabilidad por el proceso de coagulación-floculación. Las características fisicoquímicas determinadas de los polvos de mezcla asfáltica son comparables a las reportadas para la sílice activada (Degreemont, 1979). La aplicación de los polvos permite mejorar de manera significativa la calidad del efluente y reducir la dosis aplicada de coagulante. En el caso de agua natural la dosis disminuye de 25 a 10 mg/L y para agua residual de 150 a 110 mg/L, al añadir polvos de mezcla asfáltica. Los resultados anteriores permiten determinar una



factibilidad alta para la utilización de los polvos de mezcla asfáltica como coadyuvantes del proceso de floculación.

Finalmente, el Capítulo Cuarto presenta las conclusiones y recomendaciones que se desprenden de este estudio.

## INTRODUCCIÓN

La Planta de Asfalto del Gobierno del Distrito Federal produce aproximadamente 70% del asfalto que se consume en la Ciudad de México. Esta mezcla asfáltica se fabrica en tres módulos de producción conocidos como Plantas 5, 6 y 7. Durante la etapa de secado del material triturado del proceso de producción de asfalto, se genera un polvo muy fino (malla 200). Este material, en las Plantas 5 y 7, se colecta mediante un método vía seca a través de un ciclón y de un colector de bolsas. La Planta 6 utiliza una cámara lavadora de gases, en lugar de estos dos equipos, por lo que el polvo es evacuado vía húmeda lo que origina un lodo.

Debido a la homogeneidad, características fisicoquímicas e inocuidad de estos materiales, se considera *a priori* que pueden encontrarse varias opciones de valoración de los polvos secos y en forma de lodo. Dentro de las alternativas más viables, se puede mencionar su aplicación como coadyuvante de la floculación si se considera su composición química que es comparable a uno de los floculantes más eficientes como lo es la sílice activada.

## PROBLEMÁTICA

La Planta de Asfalto del Distrito Federal (PADF) produce diariamente entre 36 y 48 ton/día de polvo seco y entre 18 y 24 ton/día de lodo (base húmeda). Estos materiales son mezclados y transportados en forma de lodo a la ciudad de Parres, Chih. Esta actividad genera costos y requiere de esfuerzos que se desean suprimir. Para lo anterior, se deben encontrar aplicaciones de estos materiales que autofinancien su evacuación de la PADF y que, en el mejor de los casos, generen un beneficio económico. En la PADF no se tiene contemplado a corto plazo sustituir ninguna de las Plantas por otras en las que no se obtengan los subproductos anteriormente mencionados.



## **OBJETIVO**

Determinar la factibilidad de utilizar los polvos, que se generan como subproductos de la producción de asfalto, como coadyuvantes del proceso de floculación de aguas mediante pruebas de laboratorio.

## **ALCANCES**

- Desarrollar las pruebas experimentales necesarias para caracterizar ampliamente los polvos y lodos de la Planta de Asfalto del DF.
- Determinar las dosis óptimas de polvos de mezcla asfáltica para la floculación de aguas naturales y residuales mediante las eficiencias de remoción de color, turbiedad, DQO y Sólidos Suspendidos de estas corrientes.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas de los lodos generados en el proceso de coagulación-floculación de aguas naturales y residuales para determinar la influencia de los polvos de mezcla asfáltica sobre las características de estos residuos.





# **CAPÍTULO UNO**

## **MARCO TEÓRICO**

# I. MARCO TEÓRICO

## 1.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

### 1.1.1 PRINCIPIOS DE LA COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN

En el pasado los términos "coagular" y "flocular" se usaban indistintamente, pero actualmente se designa al primero como agregación de iones simples y al segundo como agregación de polímeros (Cohen *et al*, 1971). La coagulación se produce como un resultado de la adición de reactivos químicos en las dispersiones acuosas, a fin de formar, a partir de partículas finas, agregados más grandes. Este proceso afecta a partículas de tamaño coloidal (5-200 nm) presentes en el agua en suspensión estable, dicha estabilidad se debe a que estas partículas tienen cargas eléctricas del mismo signo, que por repulsión impiden la formación de agregados que pueden precipitar. La desestabilización se logra al contrarrestar la carga neta negativa de los coloides con los productos de hidrólisis (cargados positivamente) del coagulante, llevando a cabo la precipitación de los compuestos insolubles formados.

Cuando el potencial zeta es reducido por la acción de un coagulante se le llama punto isoeléctrico e indica que el promedio de las cargas de la partícula es cero o tiende a cero, pero no debe olvidarse que cierta proporción tiene carga positiva o negativa. En la medida en que se acerque a cero el valor del potencial zeta se observará una mayor remoción de coloides (Hernández, 1990; Cohen *et al*, 1971).

La floculación consiste en favorecer el crecimiento de floculos macroscópicos, con o sin la utilización de aditivos como pueden ser los adyuvantes de floculación. Aunque la floculación es una consecuencia natural de la coagulación, los dos procesos pertenecen a tecnologías específicas que deben ser instaladas con base en reglas específicas de concepción, es decir, ambos procesos deben ser diseñados e instalados de manera separada.

### 1.1.2 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS REMOVIDOS POR EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

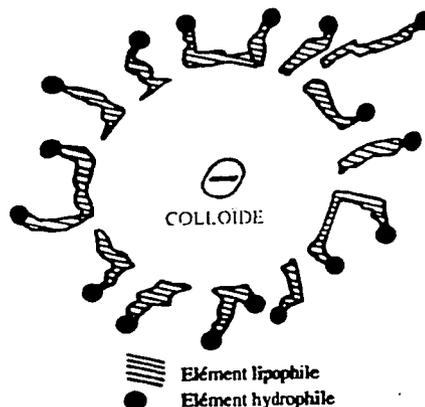
Las partículas coloidales que pueden conferir al agua propiedades indeseables se pueden clasificar en los siguientes grupos (Masschelein, 1997):

1. La turbiedad que es causada comúnmente por minerales de origen argiloso sobre los cuales las sustancias pueden eventualmente ser adsorbidas. La mayor parte de las partículas que provocan la turbiedad son hidrófobas o no miscibles con el agua. Esas partículas son de gran



provocan la turbiedad son hidrófobas o no miscibles con el agua. Esas partículas son de gran tamaño coloidal, comprendido entre 0.2 y 10  $\mu\text{m}$ , las cuales pueden sedimentar por la fuerza de gravedad después de un tiempo suficiente.

2. El color de aguas naturales, excepto el debido a los hidróxidos coloidales metálicos (por ejemplo del hierro), es generalmente producido por las sustancias orgánicas (es decir los ácidos fúlvicos y húmicos de peso molecular comprendido entre 800 y 50 000 unidades (intervalo de tamaños de 3 y 10 nm). Las partículas responsables del color son hidrofílicas.
3. Los compuestos orgánicos complejos incorporados al agua como consecuencia de derrames de aguas industriales, las cuales pueden ser consideradas por sus características como coloidales. Un ejemplo típico son los colorantes.
4. Las bacterias pueden ser consideradas como coloides, de la misma manera que los virus y las microalgas. Compuestos de moléculas orgánicas polares son hidratadas y consideradas como hidrófilas. Aunque su eliminación por el proceso de coagulación es posible, se recomienda de eliminar esas materias vivas durante una primera fase de la coagulación a fin de convertirlas en partículas similares a la materia en suspensión. Cuando los microorganismos se eliminan solamente por coagulación, sin desinfección, los lodos producidos permanecen infectados por la presencia de agentes patógenos vivos.
5. Los detergentes, debido a sus propiedades emulsificantes, se adhieren a las partículas hidrofóbicas, transformándolas de esta manera en hidrofílicas, y en consecuencia más difíciles de eliminar. Este tipo de coloide se denomina "coloide protegido" y aparece como se ilustra en la siguiente figura:



**FIGURA 1.1 COLOIDE PROTEGIDO (MASSCHELEIN, 1997)**



Los coloides protegidos presentan una importancia creciente debido a que las aguas usadas domésticas contienen esencialmente contaminantes hidrofílicos como los detergentes, las proteínas, los polifosfatos y los complejos fosfatados, que favorecen la formación de coloides protegidos. Para facilitar su eliminación, la coagulación debe estar precedida o acompañada de un proceso de oxidación.

## 1.2 COAGULACIÓN

### 1.2.1 MECANISMOS DE LA COAGULACIÓN

Durante la coagulación intervienen diferentes mecanismos como la coagulación electrostática, la reacción química con grupos funcionales del coloide y la adsorción-agregación. Durante este estudio sólo se abordaran los primeros dos mecanismos.

- a. Coagulación electrostática.** En ella los iones actúan como elementos individuales en el seno de la doble capa. No existe ninguna relación estequiométrica y no habrá reestabilización del sistema después de la adición de un exceso de coagulante.

En la mayoría de aguas naturales, y sólo por mencionar un electrolito divalente, las concentraciones de calcio por metro cúbico no exceden más de una mol aquellas de los "valores de coagulación". Debido a lo anterior, los coloides existen en aguas de ese tipo y es por esta razón que la coagulación electrostática no es más un mecanismo secundario en el proceso de la coagulación de aguas naturales.

Únicamente este mecanismo de coagulación tiene relación con el potencial Z, el cuál depende de la fuerza iónica de la solución y de la repulsión electrostática de las partículas coloidales. Este último parámetro decrece a medida que la doble capa se comprime. Debido a lo anterior, la función de potencial depende de la fuerza iónica de la solución. Esta influencia es la base de la coagulación electrostática. El número de iones necesarios para la coagulación electrostática es generalmente considerado como dependiente del inverso de la sexta potencia de la carga de iones:  $n_i = (1/q_i)^6$ . Esta relación se conoce por el nombre de ley de Schulze-Hardy.

- b. Coagulación por vía de reacción química.** En ella se tratan de formar productos insolubles o débilmente solubles, haciendo reaccionar a los coloides y a los coagulantes al mismo tiempo. Lo anterior, puede ser el caso de la eliminación de colorantes. Este efecto sigue la regla de Schulze-Hardy y, es debido a esta regla, que la introducción de cargas opuestas puede provocar una



neutralización de la carga del coloide y, por consiguiente, una disminución consecutiva del potencial zeta (eventualmente hasta cero). En medio débilmente concentrado, el fenómeno anterior provoca la coagulación del sistema coloidal. La reacción de coagulación depende del pH, la formación y la precipitación de humatos de hierro o de aluminio son óptimos a un pH comprendido entre 3.7 y 4.2 para el hierro y entre 5 y 5.5 para aluminio. En ese caso, existe una relación estequiométrica entre la adición del coagulante y la tasa de eliminación (Maschelein, 1977).

Debido a la densidad de carga de los diferentes iones, la caída de potencial de superficie depende de la valencia de iones presentes en la capa difusa, lo que tiene una influencia en la capacidad de compresión de la capa rígida. La relación observada entre las influencias de iones mono-, di-, y trivalentes vale aproximadamente 1:8:600.

### 1.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA COAGULACIÓN

- ⊗ **Tipo de coagulante:** Dado que las características del agua a tratar cambian de un caso a otro, no existe un coagulante universal, es decir, la eficiencia de un coagulante variará en función de las características del agua.
- ⊗ **Dosis de coagulante:** Dicha dosis se determina mediante ensayos de prueba de jarras y evidentemente es función de las características del agua.
- ⊗ **Características del agua:** Principalmente el pH del medio, ya que cada coagulante tiene un intervalo óptimo de acción y se debe trabajar en él, de lo contrario se da un desperdicio de producto químico y un descenso del rendimiento del tratamiento. Presencia de sales, ya que ciertos iones pueden alterar el pH óptimo de coagulación, dosis de coagulante, el coagulante residual en el efluente. Alguno de estos efectos se explica sobre la base de que ciertos iones inorgánicos pueden ser sustituidos por iones hidroxilos produciéndose un compuesto con diferente solubilidad.
- ⊗ **Tiempo de mezclado para el proceso de floculación:** Es el periodo transcurrido entre la adición del coagulante y el final de la agitación, los valores normales se encuentran en el intervalo entre 10 y 30 min.
- ⊗ **Temperatura del agua:** Cuanto menor sea la temperatura la viscosidad del agua aumenta, incrementando la dosis de coagulante, así como el tiempo para la formación de buenos flóculos.



- ☒ **Efectos de mezclado:** Para dispersar homogéneamente el coagulante una mezcla rápida es esencial. La velocidad adecuada está entre 80 a 100 rpm durante 30-60 segundos. La agitación lenta debe promover el movimiento de los flóculos sin romperlos, de 20 a 30 rpm durante 30 a 60 minutos con una sedimentación de 30 minutos.
- ☒ **Tamaño de partícula:** La dosis que produce remoción óptima de turbidez incrementa directamente con el área superficial del sistema, pero es inversamente proporcional al tamaño de partículas suspendidas (Bratby, 1981, Degremont, 1979).

### 1.2.3 TIPOS DE COAGULANTES

Un coagulante es una sal metálica (generalmente de iones de valencia superior a uno) que reacciona con la alcalinidad el agua, desestabilizando los coloides en la solución, haciéndolos fácilmente sedimentables. La actividad de un coagulante crece con la valencia del ion, un ion trivalente es de 600 a 1 000 veces más efectivo. Se distinguen dos grupos de coagulantes las sales de aluminio y las de hierro, aunque últimamente hay un desarrollo y un empleo cada vez más importante de coagulantes orgánicos.

La Tabla 1.1 resume los criterios de operación recomendados para algunos coagulantes.

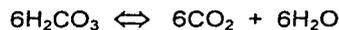
**TABLA 1.1 CARACTERÍSTICAS DE COAGULANTES (Hernández, 1990).**

PRODUCTO QUÍMICO	pH		Dosis (g /L)	Recomendaciones
	Intervalo	Óptimo		
cloruro férrico	5 -11	5.5	0.06	oxidar SH <sub>2</sub> a pH alto.
sulfato ferroso	8.5 -11	9	0.06 - 0.13	
sulfato férrico	5 -11	8-8.5	0.06	evitar sobre dosificación.
sulfato de alúmina	5.5 - 8	6-8.5	0.13 - 0.16	normalmente se usa cal.
cloruro de aluminio	5.32		0.13	

1. **Sales de aluminio:** Como el sulfato de aluminio, el aluminato de sodio, la alúmina, el cloruro de aluminio y los polímeros de aluminio, ya sea estado líquido o sólido. A continuación se darán características específicas de algunos de ellos.



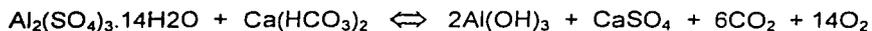
☒ **Sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).** Es el coagulante más popular en el tratamiento de aguas. Elimina color, turbidez, bacterias, virus y microorganismos en general mediante el englobamiento de los flóculos formados. Las dosis empleadas varían de 15 a 200 g/m<sup>3</sup>. Su límite máximo de coagulación oscila en un pH de 5 y 7.5. Al ser un reactivo corrosivo y ácido es conveniente evitar derrames y el contacto con la piel. Las reacciones complejas que tienen lugar después de su adición son:



El Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> se presenta en forma sólida de pequeños cristales amorfos de color blanco y en forma líquida, la cual es la más fácil de manejar en el tratamiento de aguas.

Cuando las sales de aluminio se adicionan al agua ocurren muchas reacciones por hidrólisis, también pueden producirse moléculas neutras o cargadas negativamente.

Es necesario considerar que las sales de sulfato de aluminio reaccionan con compuestos que comúnmente están en el agua y cuyas reacciones se describen a continuación:



☒ **Los policloruros.** Los cuales poseen un fuerte poder de coagulación y floculación, su rango de pH óptimo es muy amplio, de 5 a 10. Son indicados para aplicarse en aguas de baja conductividad y turbiedad, han de usarse preferentemente sin diluir, en dosis máxima de 100 g/m<sup>3</sup> como producto al 100 %. No necesitan coadyuvante.

☒ **Los policlorosulfatos.** Estos poseen una elevada velocidad de decantación y el intervalo de pH de óptimo de trabajo va de 6 a 9, por lo que no necesitan coadyuvante (Company, 1989).



**2. Sales de hierro.** Como el cloruro férrico, el sulfato ferroso y el sulfato férrico.

☒ **Cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ).** Los productos más utilizados son los de hierro, ya sea trivalente o divalente (es mejor el trivalente, debido a la mayor solubilidad del segundo), se encuentra como cristales hidratados cafés o amarillos, cristales anhidros verde oscuro o en solución al 35 - 45 %. El rango de pH óptimo es entre 4 - 11, formando coágulos pesados de mayor velocidad de sedimentación. A pesar de ser más económico que el alumbre, este puede provocar manchas en las máquinas lavadoras a excepción de que su precipitación sea completa.

☒ **Sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ).** El sulfato férrico es un líquido amarillo que se encuentra en forma anhidra o en forma hidratada. El rango de pH empleado es de 3.5 a 11 y con una dosis de 5 a 160 g/m<sup>3</sup> de reactivo comercial.

☒ **Sulfato ferroso.** El sulfato ferroso es un sólido verdoso, soluble en agua, sumamente económico. Se usa hidratado, sin embargo es necesario aplicar alcalinidad adicional para obtener un producto de solubilidad más conveniente (Marín, 1989).

#### 1.2.4 ELECCIÓN DEL COAGULANTE

La elección del coagulante se efectuará después de un estudio del agua en laboratorio, mediante la técnica de ensayos de floculación. En esta elección deben tenerse en cuenta diversos factores:

- ☒ naturaleza y calidad del agua bruta,
- ☒ variación de la calidad del agua bruta (variaciones diarias o según las estaciones, en especial, influencia de la temperatura),
- ☒ criterios de calidad y destino del agua tratada,
- ☒ tratamiento previsto después de la coagulación (coagulación sobre filtro, decantación),
- ☒ grado de pureza del reactivo, especialmente en el caso de aguas para abastecimiento público. Para este uso se excluyen los productos de recuperación, subproductos de fabricación, etc...



### 1.2.5 INTRODUCCIÓN DEL COAGULANTE

Teniendo en cuenta que la neutralización de los coloides es el principal objetivo que se pretende en el momento de la introducción del coagulante, es conveniente que el reactivo utilizado se difunda con la mayor rapidez posible.

En efecto, el tiempo de coagulación es extraordinariamente breve (inferior al segundo) y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización de los coloides sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar (por ejemplo, en forma de hidróxido metálico).

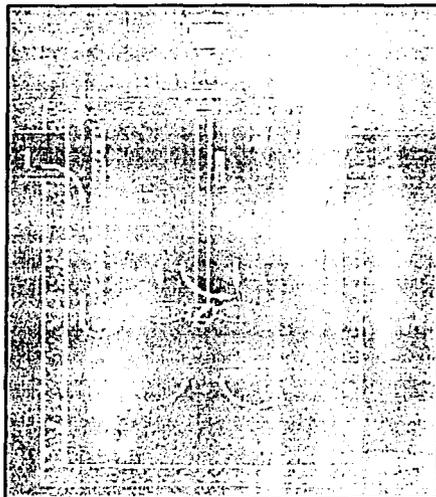
Para la mezcla de los reactivos, se utiliza a veces únicamente la turbulencia creada por un vertedero, pero conviene disponer de un sistema que permita esta mezcla rápida, sistema denominado mezclador rápido o coagulador, y que sea capaz de crear un gradiente de velocidad comprendido entre 100 y 1000  $s^{-1}$ .

Cuando se utiliza un decantador por contacto de lodos, los mezcladores rápidos no son indispensables. Mientras que en el caso de floculación difusa si lo son.

Se distinguen varios tipos de mezcladores:

- ⊗ Mezcladores estáticos. Se trata de dispositivos colocados en el interior de una tubería (sistema helicoidal, diafragma, cono...) que crean una turbulencia suficiente para permitir la difusión instantánea del coagulante. Estos mezcladores producen una pérdida de carga a veces importante. Son muy eficaces al caudal nominal, pero su eficacia decrece cuando disminuye el caudal que pasa por la tubería.
  
- ⊗ Mezcladores hidráulicos. Pueden ser de tipo de hélice o de palas (turbina), colocadas en una cámara de mezcla especial (Figura 1.2).





1. ENTRADA DE AGUA
2. SALIDA DE AGUA
3. REACTIVO
4. VACIADO

**FIGURA 1.2 CÁMARA DE MEZCLA CON AGITADOR RÁPIDO**

### **1.3 FLOCULACIÓN**

La floculación es el proceso posterior a la coagulación, en el que se produce la formación de agregados más grandes y densos. El resultado neto de la floculación es el agregado de partículas en grandes grupos o flóculos. La floculación está determinada por el contacto entre las partículas que conduce al crecimiento en tamaño y a la disminución en número de las partículas en solución. La finalidad de la floculación es causar una rápida separación de la fase líquida de los sólidos suspendidos, así como minimizar los sólidos remanentes de la parte líquida.

El coagulante introducido da lugar a la formación del flóculo, pero es necesario aumentar su volumen su peso y sobretodo su cohesión. El engrosamiento del flóculo se verá favorecido por medio de:

- ☒ una coagulación previa tan perfecta como sea posible,
- ☒ un aumento de la cantidad del flóculo en el agua; conviene poner el agua en contacto con los precipitados ya formados por el tratamiento anterior (recirculación de lodos lecho de lodos), tratando de conseguir la mayor concentración posible,



- ☒ una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula de flóculo,
- ☒ el empleo de ciertos productos llamados floculantes.

### 1.3.1 MECANISMOS DE LA FLOCULACIÓN

Generalmente se reconocen tres mecanismos principales de floculación: 1) floculación pericinética, 2) floculación ortocinética y 3) floculación macroscópica.

1. **Floculación pericinética.** Se considerada como la primera fase del proceso de floculación. En esta etapa el movimiento browniano favorece la agregación de partículas debido al movimiento aleatorio natural que proporciona la agitación térmica o bien el gradiente de temperaturas en el fluido. Este mecanismo sólo es significativo para partículas de tamaño menor a 1-2  $\mu\text{m}$ .
2. **Floculación ortocinética.** En este tipo de floculación, el contacto entre partículas es promovido o inducido por gradientes de velocidad que ocurren en el seno del líquido. Este segundo mecanismo es el más importante del proceso de floculación. En el seno de un fluido, el crecimiento de las partículas individuales se manifiesta visible y rápidamente, entre 10 s y 1 min, es decir, al final de la fase coagulante.
3. **Floculación macroscópica.** Al final de la floculación ortocinética, se observa la de tipo macroscópico, que según Hudson (1965), se puede describir como un sistema compuesto por flóculos más voluminosos.

### 1.3.2 TIPOS DE FLOCULANTES

Los floculantes, llamados también ayudantes de coagulación, ayudantes de floculación e incluso ayudantes de filtración, son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones. La acción puede ejercerse a nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o a nivel de la calidad del flóculo (más pesado, más voluminoso y más coherente).



Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico). A continuación se presentan ejemplos de diferentes productos empleados como floculantes.

### 1.3.2.1 FLOCULANTES MINERALES

La sílice activada fue el primer floculante que se empleó, y sigue siendo, en la actualidad, el que mejores resultados puede dar, principalmente si se utiliza juntamente con sulfato de alúmina.

Se introduce generalmente después del coagulante, y se prepara neutralizando parcialmente la alcalinidad de una solución de silicato sódico.

A veces se utilizan ciertos productos para cargar un agua bruta que no contiene suficiente materia en suspensión. Entre ellos, pueden citarse:

- ☒ algunas arcillas,
- ☒ blanco de Meudon o carbonato cálcico precipitado,
- ☒ carbón activo en polvo (cuando se impone este tratamiento),
- ☒ arena fina, kieselguhr (diatomeas).

### 1.3.2.2 FLOCULANTES ORGÁNICOS

El progreso de la Química Orgánica ha permitido el desarrollo de otros floculantes más activos.

#### ☒ Por su origen:

- ✓ Algunos se fabrican a partir de productos naturales: alginatos (extractos de algas), almidones (extractos de granos vegetales), derivados de la celulosa, ciertas gomas. Los alginatos se utilizan especialmente como ayudantes de floculación de las sales férricas, aunque a veces, también dan buenos resultados con sales de aluminio. Se obtienen a partir del ácido alginico, el cual, a su vez, se extrae de algas marinas (en especial, del género Laminaria). Su empleo en el tratamiento de aguas de abastecimiento público, está autorizado en todos los países.



- ✓ Otros floculantes son totalmente sintéticos. Se distinguen, por una parte, las poliacrilamidas, de larga cadena y gran masa molar ( $2 \text{ a } 4 \cdot 10^6 \text{ g/mol}$ ), y, por otra, las poliaminas, que tienen, generalmente, cadenas más cortas y menores masas molares ( $1 \cdot 10^6 \text{ g/mol}$ ).

Las poliacrilamidas se utilizan en el tratamiento de clarificación de aguas y en la deshidratación de fangos, mientras que las poliaminas se emplean sobre todo en clarificación.

### ☞ Empleo:

Los floculantes orgánicos se descomponen en dos clases según su presentación: productos sólidos y productos líquidos.

Existe gran cantidad de floculantes orgánicos, entre los cuales pueden citarse los siguientes: Praestol, Superfloc, Magnafloc, alginatos, Prosédim, Purifloc.

No hay ninguna regla que permita deducir a priori cuál de los floculantes dará mejores resultados, por lo que siempre deberán efectuarse ensayos de laboratorio. Asimismo, se determinará el tiempo que debe transcurrir entre la introducción del coagulante y la del floculante, factor éste que tiene gran importancia, por ejemplo, en el caso de la sílice activada.

En el caso de una clarificación, la elección debe hacerse entre un floculante no iónico, o ligeramente aniónico, y un floculante catiónico. Si el pH está próximo al de equilibrio, y en presencia de gran cantidad de materia orgánica, se ensayará, en primer lugar, un floculante catiónico.

remoción satisfactoria de coloides, se utilizan los llamados coadyuvantes, es decir, ayudantes de floculación, son en general macromoléculas de cadena larga. La ventaja radica en que cuando las partículas no pueden aproximarse por las fuerzas de repulsión, la gran longitud de la cadena poliméricas permite unir coloides entre sí mediante puentes, en condiciones en las cuales no hubiera habido normalmente coagulación. Esta reacción es rápida el 85 % del polímero se adsorbe en aproximadamente 10 segundos. La cantidad de polímero utilizado es de 0.1 a 1 mg/L lo cual compensa su precio alto.

En el caso de decarbonatación con cal, la elección debe orientarse hacia un floculante no iónico o aniónico.



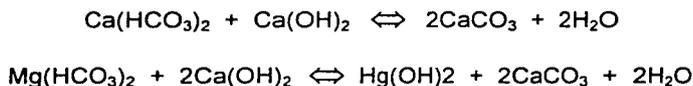
**TABLA 1.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS FLOCULANTES ORGÁNICOS**

<b>PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS FLOCULANTES ORGÁNICOS</b>					
Origen del producto		Almidón, alginatos	Acrílicos sólidos	Acrílicos líquidos	Poliamidas
Almacenamiento, embalaje		Sacos	Sacos o barriles	Bidones o cisterna	Bidones
Empleo	Preparación de una solución madre	Difusor útil o necesario	Difusor indispensable. Concentración de la solución madre: 0.3 a 0.5%; excepcionalmente 1%	Miscible en agua con agitador lento	
	Dosificación	Por bomba dosificadora	Por bomba dosificadora	Bombeo tal cual o en solución al 10% (bomba dosificadora lenta, a causa de la viscosidad de la solución)	
	Preparación de la solución de empleo	Dilución después de la dosificación	Dilución después de la dosificación	Dilución después de la dosificación	
	Concentración de la inyección	falta	Falta	Falta	
	Tiempo de reacción	30 a 300 seg. según el producto	20 a 120 seg. según el producto	20 a 120 seg. según el producto	
<b>OBSERVACIONES:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede utilizarse un sistema de dilución en continuo (por ejemplo, hidroeyector) para transportar el reactivo hasta el punto de destino.</li> <li>- Después de la inyección no se debe bombear ni efectuar una agitación violenta.</li> </ul>					

Ayudan a la floculación de distintas maneras, ya sea modificando el pH del agua (hidróxido de sodio), transformando los coloides hidrofílicos en hidrofóbicos (ej. cloro), neutralizando cargas eléctricas de los coloides (ej. sulfato de magnesio) o sirviendo de material de soporte y medio adsorbente (arcillas, sílice activada). Los polielectrolitos no iónicos como poliacrilamidas cuyo peso molecular está entre 1 y 30 millones, los aniónicos, que son una coexistencia de grupos que permiten la adsorción provocando la extensión del polímero y los catiónicos, en los cuales la carga eléctrica neta es positiva (Hernández, 1990).



Un ejemplo de ellos es la cal viva. Su eficiencia radica en la reacción con los bicarbonatos presentes para precipitar el carbonato de calcio o con los ortofosfatos para precipitar hidroapatita cálcica. La cal elimina la dureza temporal del agua de acuerdo a las siguientes reacciones:



También elimina la dureza permanente:



### 1.3.3 PRÁCTICA DE LA FLOCULACIÓN

La floculación será tanto mejor cuanto más eficaz sea la coagulación previa. El coagulador, en el que tiene lugar la agitación rápida, va seguido de un floculador, en el que se mantiene una agitación lenta durante 15 min (agua residual muy cargada), o durante un tiempo mucho mayor en tratamiento de agua de abastecimiento público. Esta agitación lenta puede tener lugar en un floculador separado, o bien en el interior del decantador propiamente dicho. En este caso, pueden utilizarse turbinas de recirculación, o la acción del propio lecho de lodos.

La floculación se efectúa en este caso en depósitos provistos de sistemas de agitación que giran con relativa lentitud para no romper los flóculos ya formados, pero con la velocidad suficiente para conseguir el engrosamiento progresivo del flóculo e impedir que se formen sedimentos sobre el fondo del depósito.

El volumen de la cuba de floculación debe ser el necesario para que se consiga el tiempo de floculación determinado mediante ensayos de laboratorio.

Los sistemas de agitación utilizados pueden estar constituidos por hélices especialmente estudiadas con este fin, o por un conjunto de palas fijadas sobre un eje giratorio, vertical u horizontal. Es conveniente obtener en el floculador un gradiente de velocidad comprendido entre 20 y 50 s<sup>-1</sup>. También conviene prever, en la transmisión del sistema de agitación, un conjunto motor-reductor-variador, para que pueda regularse mejor la velocidad de agitación en función de la calidad de la floculación.



Si es grande el volumen necesario para la floculación, es preferible utilizar varios depósitos de pequeñas dimensiones, colocados en serie. En este caso, cada uno de los depósitos va provisto de un sistema de agitación independiente, cuya velocidad, regulable, puede adaptarse mejor a la calidad de la floculación.

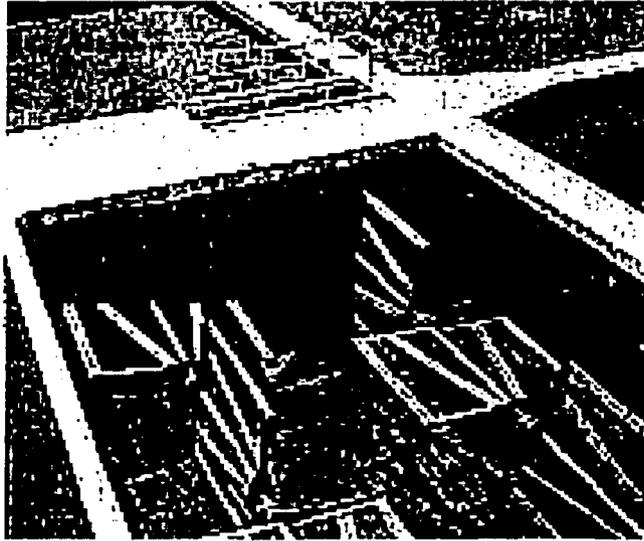
Por último, es importante que no se rompa el flóculo al pasar del floculador a la zona de decantación. Según la calidad del agua tratada, las velocidades de paso deberán limitarse a los siguientes valores:

- flóculo de hidróxido metálico frágil:  $v = 0,20$  m/s
- flóculo de hidróxido metálico resistente:  $v = 0,50$  m/s
- flóculo de aguas residuales:  $v = 1$  m/s.
- El coagulante introducido da lugar a la formación del flóculo, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y sobre todo su cohesión.
- el empleo de ciertos productos llamados floculantes.

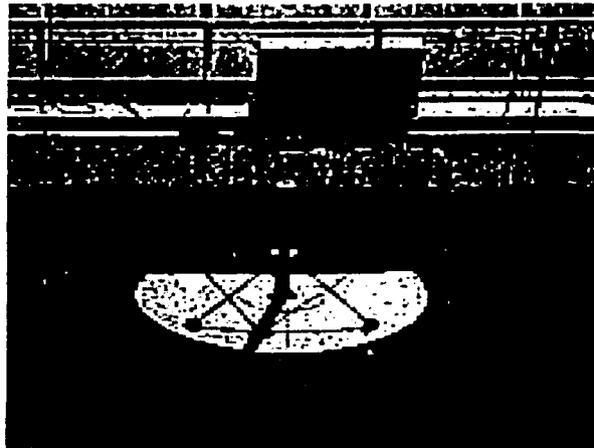
La floculación será tanto mejor cuanto más eficaz sea la coagulación previa. El coagulador, en el que tiene lugar la agitación rápida, va seguido de un floculador, en el que se mantiene una agitación lenta durante 5 min (agua residual muy cargada), o durante un tiempo mucho mayor en tratamiento de agua de abastecimiento público (30 min).

La elección del tipo de mezclador y del tipo de floculador está en estrecha relación con la elección del procedimiento de separación utilizado en la continuación del tratamiento. Debe estudiarse cuidadosamente esta elección, cuando la floculación es del tipo difuso y va seguida de una decantación estática, o de una flotación.





**FIGURA 1.3. FLOCULADOR HORIZONTAL**



**FIGURA 1.4 FLOCULADOR VERTICAL**



## 1.4 SÍLICE ACTIVADA

### 1.4.2 PREPARACIÓN DE LA SÍLICE ACTIVADA

En la práctica, la sílice activada se prepara a partir del silicato de sodio y de un activante. Los silicatos de sodio se fabrican fundiendo juntos arena y carbonato de sodio (sosa Solvay). El producto que se obtiene es una masa vítrea que se disuelve enseguida en agua.

Se representan los silicatos de la manera la más sencilla,  $\text{SiO}_2 \cdot x\text{Na}_2\text{O}$ , donde  $x$  puede tener valores comprendidos entre 1.65 y 4.0. Para los compuestos alcalinos, en los que  $x > 3.4$ , pueden aparecer partículas en suspensión. Cuando  $x > 3.65$ , las soluciones se transforman en poco estables. Los silicatos de sodio comerciales se clasifican en dos categorías: 1) de calidad alcalina en los que la relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  es de 1/1 y 2) de calidad neutra donde esa proporción es de (3.2-3.3)/1. En la realidad, las dos clases actúan como alcalinas.

La sílice activada puede ser preparada a partir de cualquier silicato de sodio ordinario, pero en la práctica, solamente los de calidad neutra se seleccionan. En la práctica actual, las calidades utilizadas para la preparación son productos de densidad comprendida entre 1.39 y 1.42. La viscosidad importante de la especie de densidad de 1.42 hace su manipulación menos fácil, particularmente en lo relativo a su conservación durante el invierno. Debido a lo anterior, el material de densidad de 1.39 es normalmente preferido. Esas soluciones de silicatos neutros contienen mezclas de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ . La Tabla 1.4 resume algunas características de diferentes silicatos conocidos.

El proceso de activación generalmente inicia cuando se presenta la aparición fugaz de especies monoméricas, normalmente el ácido meta silícico ( $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ). Este ácido se transforma por una reacción de hidrólisis en ácido ortosilícico ( $\text{H}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$ ).

Soluciones del monómero de ácido metasilícico se pueden preparar según el método propuesto por Alexander (1953). En este método se transforman en su forma hidratada las soluciones de metasilicatos  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , mediante su percolación sobre una resina intercambiador de cationes (Dowex 50 W-X8). La concentración es de preferencia mantenida por debajo de  $2 \times 10^{-3}$  mol/L (solubilidad de la  $\text{SiO}_2$  amorfa) a fin de evitar la polimerización.



**TABLA 1.4. PROPIEDADES DE DIFERENTES CLASES DE SILICATOS REPORTADOS (Masschekin, 1997)**

<b>PROPIEDADES DE SILICATOS</b>			
<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>37/40</b>	<b>40/42</b>	<b>40/44</b>
SiO <sub>2</sub> (%ponderal)	29.0 - 29.8	26.6 - 27.0	29.6 - 29.8
	8.8	9.4	8.6 - 9.0
Na <sub>2</sub> O (% ponderal)	3.3	3.2	3.3 - 3.4
SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O (% ponderal)	1.395	1.42	1.39 - 1.405
Densidad			
Viscosidad(mPa.s a 20°C)	50 - 100	600- 1 200	400 - 600

Dentro de los agentes químicos que se utilizan para la activación se encuentran: el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico, el bicarbonato de sodio, el sulfato de amonio, el cloro, el sulfato de aluminio y el dióxido de carbono.

#### **1.4.2 SÍLICE ACTIVADA COMO PRINCIPAL COADYUDANTE DE LA FLOCULACIÓN**

La sílice activada es un producto vítreo que se logró aislar por la primera vez en 1884 por Graham. Este científico adicionó, durante el proceso de aislamiento, silicato de sodio en ácido clorhídrico diluido para formar un suelo de sílice. En el área de tratamiento de agua, el término *silice activada* significa una suspensión de partículas coloidales cargadas negativamente. Esta suspensión se obtiene por reacción de una solución diluida de silicato de sodio (0.5 a 5% en peso de SiO<sub>2</sub>) con un agente activante, normalmente un ácido.

La sílice activada es un polímero de cadena corta que sirve para unir partículas de aluminio hidratado. En dosis elevadas inhibe la formación del flóculo debido a sus propiedades electro atractoras.

Las dosis comunes son de 5 a 10 mg/L. Tiene un peso molecular del orden de 10<sup>4</sup> y está cargada negativamente.

Algunos componentes inorgánicos pueden ser polimerizados en agua para formar polímeros floculantes inorgánicos. La sílice activada (identificada como SiO<sub>2</sub>) es un ejemplo. Cuando el silicato de sodio contienen álcalis, se diluye de 1.5 a 2.0%, este neutraliza parcialmente (casi siempre con cloruros o bicarbonatos de sodio). Es entonces cuando la sílica se vuelve coloide y comienza a polimerizar lentamente. Después de 15 a 20 minutos, la solución diluida de s.5 a 1% de SiO<sub>2</sub> disminuyendo la



polimerización al producirse la sílice activada. Sin embargo, este procedimiento de preparación es complicado, este floculante es muy efectivo en conjunción con un tratamiento con aluminio para remover el color de la materia orgánica.

Estudios realizados en microscopía electrónica revelan la ausencia de formas cristalinas en las partículas de sílice activada, la solución coloidal está compuesta de partículas esféricas primarias de un diámetro de 5 nm. El material seco presenta una superficie específica de  $250 \text{ m}^2/\text{g}$ , determinada con base en el método de adsorción de nitrógeno (BET, Brunauer, Emmet y Teller). La movilidad electroforética (EM), que se sitúa alrededor de  $10^{-8} \text{ m/V s}$ , es función del potencial zeta (PZ) de las partículas y del pH y difiere entre la sílice amorfa y la sílice cristalina.

La aplicación de la sílice activada en el tratamiento de aguas fue introducida por Baylis (1937). Este investigador descubrió que la sílice contenida en aguas naturales facilitaba su coagulación con sulfato de aluminio, y en menor grado, con sales férricas. La sílice en solución en aguas naturales proviene principalmente de la descomposición de los aluminosilicatos minerales como es el caso del feldespato (Schenk y Weber, 1968).



Como lo indican estas ecuaciones, el ácido silícico es un producto de la reacción. Este compuesto corresponde a las especies mono nucleares solubles, los cuales presentan una solubilidad independiente del pH. Un diagrama simplificado de las solubilidades permite determinar el intervalo de estabilidad de las especies mono nucleares y de los polímeros, solubles e insolubles.

En la mayor parte de las plantas de tratamiento, la sílice activada se adiciona al final del proceso de coagulación o al inicio de la floculación, es decir, en el momento de la formación de los flóculos con tamaño de "cabeza de alfiler" (pinpoint flocs). En ese caso, la sílice activada actúa como adyuvante de floculación y contribuye a aumentar la eficiencia de los procesos posteriores, sedimentación y filtración.



**TABLA 1.3 CONSTANTES DE ACIDEZ DEL ÁCIDO SILÍCICO**

Reacción	pK a 25°C
$\text{SiO}_2 \text{ (cuarzo)} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Si(OH)}_4$	3.70
$\text{SiO}_2 \text{ (amorfo)} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Si(OH)}_4$	2.70
$\text{Si(OH)}_4 \leftrightarrow \text{SiO(OH)}_3^- + \text{H}^+$	9.46
$\text{SiO(OH)}_3^- \leftrightarrow \text{SiO}_2\text{(OH)}_2^{2-} + \text{H}^+$	12.56
$4 \text{Si(OH)}_4 \leftrightarrow \text{Si}_4\text{O}_6\text{(OH)}_6^{2-} + 2\text{H}^+ + 4\text{H}_2\text{O}$	12.57

Las principales ventajas del uso de la sílice activada, aplicada como coadyuvante de la floculación, se resumen a continuación:

1. En el proceso de coagulación-floculación se producen flóculos densos y bien formados para los que el riesgo de disgregación es muy bajo.
2. Los intervalos de eficiencia de pH y temperatura favorables para la floculación son más amplios.
3. La sedimentación es más eficiente por lo que las dimensiones de las instalaciones se puede disminuir para un mismo gasto dando como resultado una inversión de capital más baja. Una reducción de la dosis de coagulante puede presentarse si se adiciona sílice activada como adyuvante, pero no de manera automática. Gracias a la utilización de sulfato de aluminio y sílice activada, el riesgo de post-precipitación se elimina, en particular en aguas naturales de alcalinidad baja ( $< \text{meq HCO}_3^-/\text{L}$ ).
4. En ciertos silicatos, los iones sodio se pueden remplazar por otros cationes, en particular por el magnesio. Dichos minerales, conocidos como zeolitas artificiales, se utilizan por su capacidad de intercambio iónico.

### 1.4.3 MECANISMO DE ACCIÓN DE LA SÍLICE ACTIVADA

El conocimiento de las reacciones de la sílice activada en el proceso de floculación es demasiado restringido. Aunque el coagulante más importante es de naturaleza férrica, la propiedad de la sílice activada como auxiliar de tratamiento de este coagulante es reducida a nada o casi nada. Por otra parte, es conocido que a pH ácido, el ácido silícico libre reacciona con algunas sales férricas:



Generalmente, la sílice cataliza la oxidación del hierro ferroso en hierro férrico y, al mismo tiempo, desacelera la hidrólisis del  $\text{Fe}^{3+}$ . La inmovilización de metales pesados de la sílice gelificada, que resulta de su precipitación en presencia de un exceso de ácido, es un método de concentración y de estabilización de residuos antes de su desecho. La sílice activada es un suelo de carga negativa que es capaz de intercambiar cationes.

En sus intercambios iónicos, la sílice activada desarrolla un mecanismo de formación de puentes con los polímeros de una suspensión, en particular de coagulantes aluminicos. El momento más adecuado para la adición de la sílice activada en el tren de tratamiento de una planta se sitúa normalmente después de la adición del coagulante y después de que los flóculos presentan un tamaño semejante al de la cabeza de alfiler (pin point flocs). La incorporación directa de la sílice activada al agua bruta ha sido propuesta en ciertos estudios, sin embargo, los resultados no han sido satisfactorios, a menos que el agua esté muy poco cargada en sólidos en suspensión. El procedimiento más adecuado debe ser determinado experimentalmente. Las técnicas experimentales más apropiadas son las pruebas de jarras (jar test) para determinar la dosis más adecuada para la remoción de color y turbiedad y la medición de la velocidad de sedimentación de los flóculos.

En la práctica, la densidad de los flóculos y su resistencia a las fuerzas cortantes, así como la estabilidad de la capa de lodos, son siempre mejoradas en una sedimentación en flujo ascendente. La agregación de los flóculos por el aluminio es mejor con sílice activada, sobretudo en aguas frías. La post-precipitación del hidróxido de aluminio se evita, particularmente en aguas que presentan alcalinidad baja ( $< 1 \text{ eq HCO}_3^-/\text{m}^3$ ).

## 1.5 ASFALTO

### 1.5.1 PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

Los pavimentos asfálticos son combinaciones de agregados minerales y material asfáltico, de varios espesores y tipos. La carga para las que un pavimento se proyecta, determina el espesor o el tipo de construcción que debe emplearse (Luna, Jesús; 2001).

Independientemente del espesor o tipo de pavimento asfáltico, la carga se transmite a través de los áridos, y el asfalto sirve únicamente como agente cementante que fija los áridos en las porciones adecuadas para transmitir las cargas aplicadas a las capas inferiores, donde se disipan finalmente. Los



áridos son por lo general piedra partida, grava, escorias y arena que se usan ya combinados unos con otros (Wallace, 1983).

Los materiales asfálticos de construcción son una parte del crudo del petróleo extraído de pozos. La cantidad de asfalto que puede contener un crudo de petróleo es muy variable y depende de la densidad API (American Petroleum Institute) del mismo. Cuando más baja es la densidad del crudo, mayor es el contenido del asfalto; por ejemplo un crudo con una densidad API 15 produce aproximadamente 60% de asfalto y 40% de destilados de petróleo más ligeros, tales como gasolina, keroseno, aceites lubricantes, etc. Por otro lado, un crudo de densidad API 35 puede producir solo 10% de asfalto y alrededor de 90% de fracciones más ligeras.

## **1.5.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ASFALTO DE ESTUDIO**

La planta de asfalto considerada en este estudio de la cual se obtuvieron los residuos consta de tres plantas de producción designadas como Plantas A, B y C. Cada una de ellas tiene un proceso distinto para la generación de asfalto, los cuales se describen a continuación.

### **1.5.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA PLANTA A**

En la figura 5.6 se muestra el diagrama de flujo de proceso de la planta A, ésta tiene una capacidad de diseño de 272 ton/h pero opera a una capacidad de 150 ton/h. La mezcla asfáltica consiste en una mezcla de material triturado y asfalto en una proporción de 94% y 6% respectivamente. El proceso comienza al suministrarse el material triturado a tolvas (1), de allí, por medio de bandas transportadoras (2), pasa a un secador rotatorio (3). Es muy importante que el material se encuentre perfectamente seco ya que esto permitirá que al mezclarse con el asfalto haya una perfecta adherencia entre éste y el material cribado.

La piedra o material triturado, llega con una humedad de 2% a 3% en condiciones normales de operación, debido a esto, se generan alrededor de 475 kg/h promedio de vapor de agua. Esta humedad se elimina calentando el material triturado a temperaturas que van de los 120 °C a los 140°C con calor proveniente de los gases de combustión de un quemador (4) cuyo combustible es diesel desulfurado. Los gases de combustión fluyen a contracorriente del flujo de material triturado. En esta operación se consumen alrededor de 6 litros de diesel por tonelada que se produce de la mezcla asfáltica.

Una vez seco el material triturado, cae a un elevador de cangilones (5) que a su vez lo deposita en una criba (6). En la criba se realiza la selección de este material y se deposita en cinco tolvas diferentes (7);



posteriormente, se procede a pesar tanto el material cribado como el asfalto en una caja pesadora (8) con la proporción de cribado/asfalto previamente establecida;. Acto seguido se deja caer el cribado y el asfalto en una mezcladora de paletas (9) y se mezclan durante un minuto (tiempo entre lote y lote) es en este momento que se produce la mezcla asfáltica ( producto final) y finalmente se descarga al camión transportador (10) o es removido a sitios de almacenamiento (11) por medio de un transportador de cadenas (12) para su uso posterior.

La mezcla asfáltica que se suministra al mezclador de paletas, lleva un calentamiento previo que la lleva a temperaturas entre 120 y 140 °C utilizando para esto un aceite térmico que remueve la energía térmica de un calentador pequeño (13) y se hace fluir por un serpentín que se encuentra dentro del depósito que contiene asfalto. (14). Este asfalto caliente se bombea a un compartimiento (15) donde se pesa para su posterior adición a la mezcladora.

Además de proceso de producción de mezcla asfáltica en sí, la Planta A cuenta con un sistema de control ambiental el cual consiste en un recolector de bolsas.

El proceso funciona de la siguiente manera: Al alimentar el material triturado al secador rotatorio (3), ocurre un desprendimiento de polvo el cual se extrae (al igual que los gases de combustión y el vapor de agua) por medio del extractor del equipo de control y después se colecta en un ciclón primario (17). Este polvo se lleva por medio de un transportador sinfin (19) al elevador de cangilones (5), donde se combina con el material triturado. Los polvos no colectados por el equipo de control pasan a una batería de ciclones pequeños (18).

Los polvos no retenidos en los sistemas de control pasan a un recolector de bolsas (20) que contiene 11 módulos de 50 bolsas cada uno. Los polvos no retenidos en el colector, son liberados a la atmósfera por la chimenea.

La capacidad de diseño del extractor (16) es de 110,000 m<sup>3</sup>/h y se acciona por medio de dos motores de 150 HP (21). La velocidad de los gases a la salida de la chimenea es de aproximadamente de 15 m/s. El sistema de limpieza del colector de bolsas es por medio del suministro de aire comprimido a contracorriente proveniente de un compresor (22), a una presión de 100 lb/in<sup>2</sup>. Esta operación se realiza automáticamente y puede observarse en la Figura 1.5.



### 1.5.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA PLANTA B

Esta planta tiene una capacidad nominal de 300 ton/h pero trabaja normalmente a una capacidad de 250 ton/h. El consumo de combustible diesel es de 4 L/tonelada producida.

El proceso de producción comienza al llevar el material triturado de las tolvas de alimentación (1) a un transportador de bandas (2) que a su vez lo lleva a una banda transportadora-pesadora (3) y esta a un secador rotatorio (4). El calor del horno (5) empleado para eliminar la humedad del material triturado es generado por la combustión de diesel. Los gases de combustión se introducen en flujo paralelo con el material triturado al secador rotatorio. El material se calienta hasta llegar a los 120 o 140°C con el propósito de eliminar la humedad presente y de esta forma lograr una mezcla homogénea de éste con el asfalto.

De igual forma, el asfalto se calienta hasta llegar al intervalo de la temperatura mencionado, por medio de un aceite térmico que se calienta con un pequeño calentador (6) y se hace fluir por un serpentín que se encuentra dentro del depósito que contiene el asfalto (7). El asfalto precalentado se dosifica por medio de una bomba reguladora de flujo (8) y se rocía al material triturado en el secador rotatorio. Este es un sistema de fabricación continua de mezcla asfáltica, y debido a esto se eliminan parte de los polvos desprendidos en el proceso de secado.

A diferencia del proceso que se realiza en la Planta A, en la Planta B no se requiere de una unidad mezcladora ya que la mezcla asfáltica ocurre en el secador rotatorio. Una vez que se tiene una mezcla asfáltica, un transportador de rastras (9) la lleva a tres silos de almacenamiento (10) para, finalmente, ser descargada a los camiones transportadores (11).

El sistema de control ambiental de esta planta consiste en un lavador de gases que funciona de la siguiente manera. Los polvos y gases desprendidos durante el proceso de secado del material triturado con succionados por un extractor (12) con capacidad nominal de 100,000 m<sup>3</sup>/h, el cual es accionado por dos motores de 100 HP (13); después se hacen pasar por un lavador de gases tipo húmedo (14). En este equipo se rocía agua por medio de tres tubos (cada tubo tiene 10 espesas). Los polvos, lodos y gases entran a un compartimiento donde son separados por medio de un sistema de paletas fijas (15). El vapor de agua formado, así como los polvos y gases que no fueron retenidos en el colector húmedo, se llevan a la chimenea (16) y se liberan a la atmósfera. La mezcla de lodos obtenida se conduce a una pileta de asentamiento (17) donde parte de los polvos se sedimentan (18) en el cual se asientan. El agua tratada de esta forma, se bombea a un depósito (19) para su uso posterior en el colector húmedo (Figura 1.6).



### 1.5.2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA PLANTA C

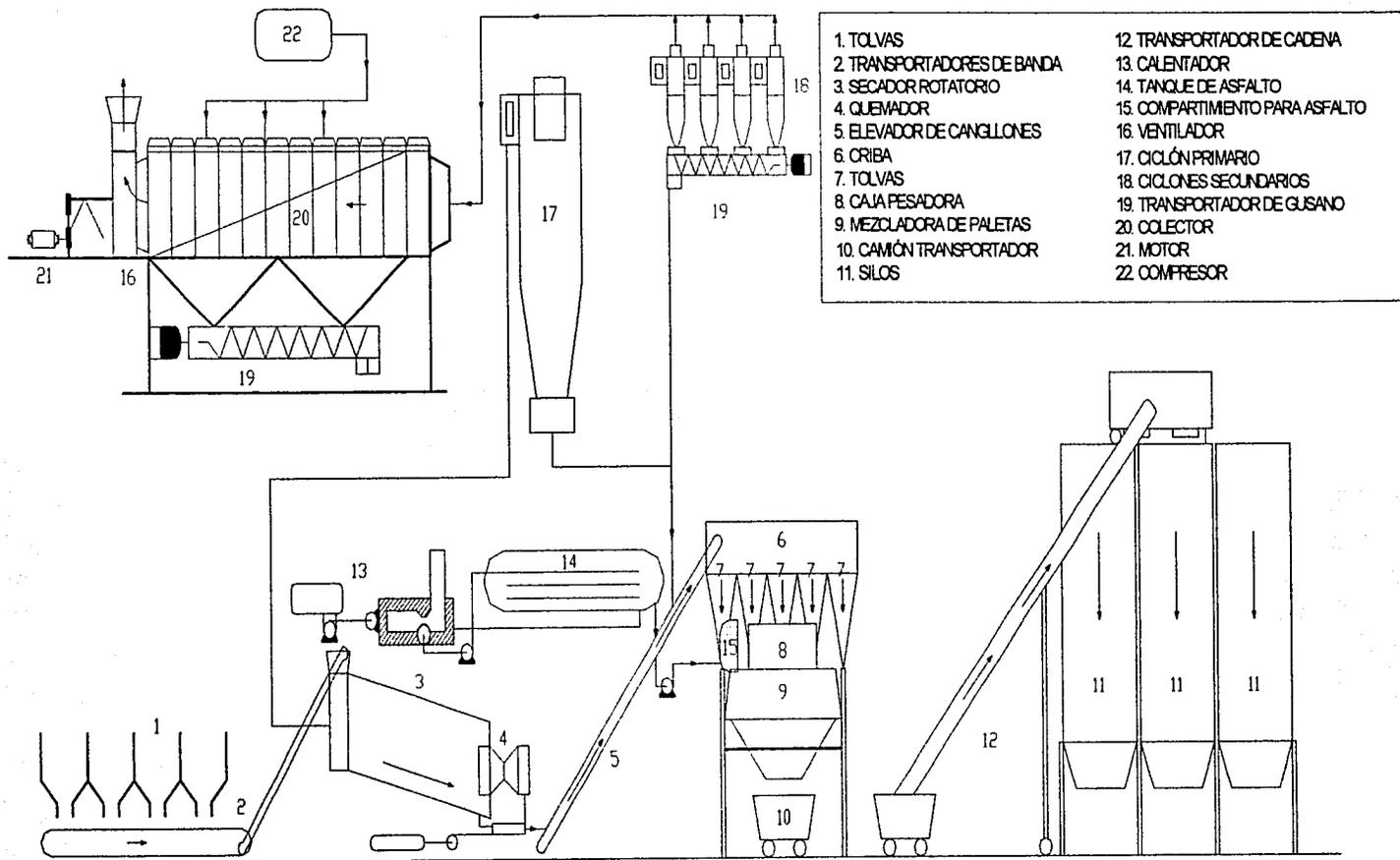
Esta planta (Figura 1.7) cuenta con una capacidad de diseño de 400 ton/h pero regularmente se opera a una capacidad de 300 ton/h. El material triturado se alimenta por medio de tolvas (1) a un transportador de bandas (2) el cual lo lleva a una banda transportadora (3), la cual lo conduce al secador rotatorio (4). En el secador, el flujo de materia y de gases de combustión es en paralelo. Los gases de combustión provienen de un quemador (5) que utiliza como combustible diesel desulfurado el cual, en condiciones normales de operación, consume alrededor de 5 L/ton de mezcla asfáltica generada.

Para mezclar el triturado con el asfalto, primero se precalienta éste último hasta temperaturas de 120 a 140°C por medio de un aceite térmico que remueve la energía térmica de un calentador (6) y se hace fluir a través de un serpentín que está dentro del contenedor de asfalto (7). Una vez caliente el asfalto, se suministra por medio de una bomba medidora de flujo (8) al secador rotatorio donde se encuentra el material triturado y los polvos que provienen del colector de bolsas; de esta forma se lleva a cabo la mezcla asfáltica continuamente. Esta mezcla se transporta por medio de un elevador de cangilones (9) a tres silos de almacenamiento (10) donde, finalmente, se descarga a los camiones.

El sistema de control ambiental de la planta C consta de un colector de bolsas al igual que el de la planta A. Los gases, polvos y vapores emitidos durante el proceso son succionados por un extractor de baja presión (12) con capacidad nominal de 110,000 m<sup>3</sup>/h, el cual se acciona por un motor de 200 HP (13). El extractor hace pasar los gases y los polvos a través de un colector de bolsas (14) que contiene 900 bolsas (con una distribución de 100 bolsas por módulo). En este sistema de control se logra retener una gran capacidad de polvo. El polvo no colectado es liberado a la atmósfera.

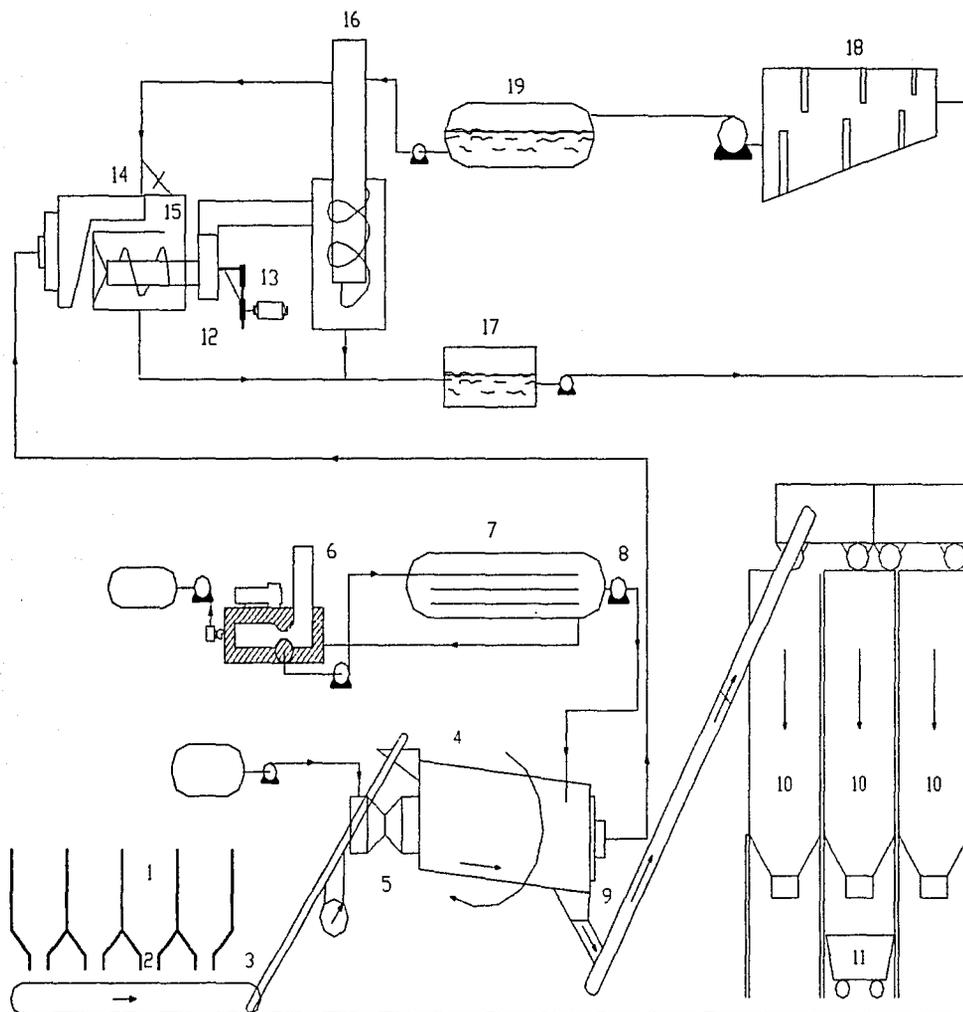
Parte de los polvos refinados en el colector de bolsas, se llevan por medio de un transportador sinfín (15) a un compartimiento de donde se toma una parte y se recircula al secador rotatorio; lo demás se desecha en un camión de volteo (adaptado como cisterna) en el que se mezcla con agua y se descarga para su posterior envío a la ciudad de Parres. El sistema de limpieza del colector de bolsas consta de un compresor (16) que funciona automáticamente.





**FIGURA 1.5 FLUJO DE PROCESO EN LA PLANTA A**





1. TOLVAS
2. TRANSPORTADORES DE BANDAS
3. TRANSPORTADORES DE BANDAS "PESADORAS"
4. SECADOR ROTATORIO
5. QUEMADOR
6. CALENTADOR
7. TANQUE DE ASFALTO
8. BOMBA DOSIFICADORA DE ASFALTO
9. TRANSPORTADOR DE CADENA
10. SILOS
11. CAMIÓN TRANSPORTADOR
12. EXTRACTOR
13. MOTORES
14. LAVADOR DE GASES
15. SISTEMA DE SEPARACIÓN DE GASES
16. CHIMENEA
17. PILETA DE LODOS
18. PILETA DE SEDIMENTACIÓN
19. TANQUE DE AGUA

**FIGURA 1.6 FLUJO DE PROCESO EN LA PLANTA B**







# **CAPÍTULO DOS**

## **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

# 1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la metodología aplicada para evaluar los polvos de mezcla asfáltica como coadyuvantes del proceso de floculación de aguas naturales y residuales. La evaluación se realizó en una primera etapa mediante la caracterización fisicoquímica (CRETIB, análisis químico, tamaño de partícula, observaciones en MEB, etc.) de los polvos de mezcla asfáltica, para determinar si estos materiales presentan las propiedades adecuadas para aplicarlos como coadyuvantes de floculación.

En una segunda etapa, se realizaron pruebas de coagulación-floculación en laboratorio utilizando dos tipos de aguas (natural y residual) y sulfato de aluminio como coagulante para determinar el efecto de los polvos sobre el proceso de floculación de estas corrientes. Los parámetros seleccionados como indicadores del efecto de los polvos fueron: color, turbiedad, DQO, Sólidos Suspendidos, el potencial zeta y el tamaño de partícula de los sólidos en suspensión en el efluente.

En esta etapa también se determinó la dosis óptima de polvos que permitió obtener los mejores resultados de calidad del efluente y de los lodos producidos en la floculación de aguas (velocidad de sedimentación y características del flóculo), la cual simultáneamente permitiera disminuir la dosis de coagulante empleado. En el caso de aguas residuales, debido a la diversidad y concentración importantes de contaminantes se evaluó la necesidad de combinar el sulfato de aluminio y los polvos con otro floculante comercial (PROSILFOC) y con otro coagulante (cal) para obtener las mejores características de efluente y lodos del proceso.

## 2.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE RESIDUO ASFÁLTICO

### 2.1.1 CRETIB

Los resultados obtenidos en un estudio previo realizado por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, los polvos y lodos producidos en la PADF se analizaron para determinar si los polvos presentaban algunas de las características CRETIB consideradas para residuos peligrosos. Ver Anexo II.

### 2.1.2 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

#### 2.1.2.1 GRANULOMETRÍA

Para realizar esta prueba, se pesan muestras de 100 g de los polvos, tanto de las plantas 5 y 7, como de los lodos de la planta 6. Los cuales fueron previamente deshidratados en una mufla a 110 °C durante 24 horas. La técnica utilizada fue la de superposición de tamices de malla ascendente colocados en un



equipo de vaivén y golpeteo. El tiempo de residencia en el equipo es de 15 min. En primer lugar, se limpian y pesan cada una de las mallas del tamiz, enseguida se coloca la muestra y se acciona el equipo. Una vez transcurrido el tiempo de operación, se desmontan las mallas y se pesan junto con el material retenido en cada una de ellas. Con estos datos y el peso de cada una de las mallas se obtiene por diferencia la masa de polvo y dividiendo estas cantidades entre la masa de polvo colocada inicialmente en el tamiz se obtiene el por ciento retenido en cada malla.

Con los datos de porcentaje de polvo retenido por malla se construye el perfil granulométrico de los materiales y, al mismo tiempo, se puede determinar la distribución del diámetro de partícula y así como el diámetro medio de la muestra (promedio ponderado a la masa retenida, análisis diferencial, análisis acumulativo, etc.).

#### **2.1.2.2 DENSIDAD APARENTE**

Para medir la densidad aparente del material, se utilizó una probeta con capacidad para 100 mL, la cual se pesó estando vacía, posteriormente, se agregó el polvo poco a poco y ejerciendo presión para compactarlo. Finalmente se pesó la probeta junto con el polvo comprimido y por diferencia se calculó la masa del material. La densidad aparente corresponde a la razón de la masa del polvo y el volumen del mismo (g/mL).

#### **2.1.2.3 OBSERVACIONES AL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEB)**

Con el objeto de estudiar la morfología y tamaños de partícula de las muestras de polvo de las tres plantas, se realizaron observaciones en un microscopio electrónico de barrido (MEB), marca JEOL modelo JSM-5900LV. Estas evaluaciones fueron realizadas en la Facultad de Química.

#### **2.1.3 ANÁLISIS QUÍMICO**

##### **2.1.3.1 ANÁLISIS ELEMENTAL**

El microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-5900LV utilizado en este estudio, tiene acoplado un equipo de difracción de rayos X el cual permite realizar un análisis elemental de los materiales observados. Esta técnica fue aplicada para determinar el análisis elemental de los polvos de mezcla asfáltica.



### 2.1.3.1 CONTENIDO DE ÓXIDOS

Para determinar el contenido de óxidos de cada muestra de las diferentes plantas se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X. Este estudio fue realizado en el Instituto de Geología.

El análisis fue realizado en base seca utilizando el programa RUIZF1.QAN. La pérdida por calcinación (PXC) se obtuvo calcinando la muestra a 950 °C durante una hora. El principio de esta técnica de análisis es fundir las muestras a 1200 °C dentro de una mufla, obteniéndose entonces un cristal de forma definida según el molde de fundición. Este cristal es posteriormente analizado en el equipo de fluorescencia de rayos X.

## 2.2 TÉCNICAS Y SISTEMAS EXPERIMENTALES

### 2.2.1 PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

El proceso de coagulación-floculación se realizó a nivel laboratorio en un equipo de prueba de jarras marca PHIPPS & BIRD, el cual se muestra en la Figura 2.1.

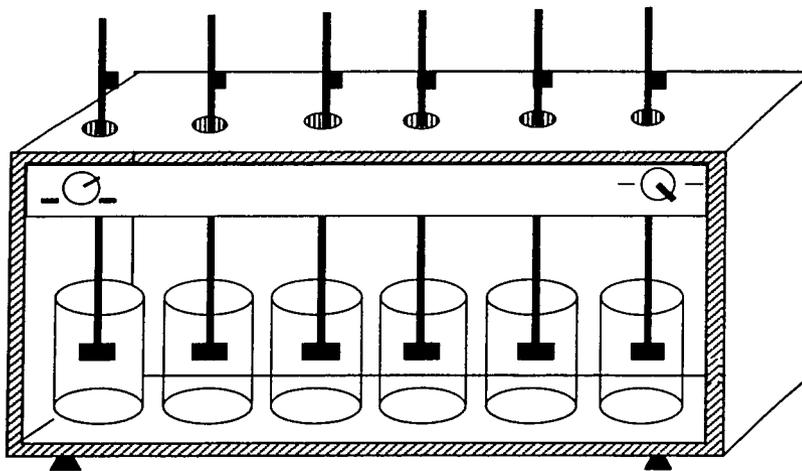


FIGURA 2.1 EQUIPO CLÁSICO DE PRUEBA DE JARRAS

La técnica aplicada es la clásica de "Prueba de Jarras", en la que para un volumen de 1 litro, se buscó la dosis de coagulante adecuada para tratar un tipo agua.



La técnica aplicada es la siguiente: se acondiciona el pH del agua a tratar a un valor de 6, siempre y cuando nuestro tren de tratamiento lo permita. Posteriormente, se coloca un litro de esta agua en un vaso de precipitado (seis veces se repite esta operación). Los seis vasos de precipitado se ponen en agitación en el equipo de prueba de jarras a una velocidad de 80-100 rpm y rápidamente se adicionan dosis crecientes de coagulante (sulfato de aluminio). La agitación rápida se realiza durante 30-60 segundos y luego se disminuye a 30 rpm en un lapso de 30 minutos. Al término de ese tiempo, se suspende la agitación y se dejan sedimentar los flóculos para separar las dos fases. El sobrenadante se analiza para determinar la calidad del efluente (pH, color, turbiedad, DQO...) con base en las técnicas recomendadas por las normas mexicanas correspondientes y por el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998).

Con base en los resultados se seleccionan dos dosis de coagulante, en este estudio se aplicaron los siguientes criterios de selección: 1) dosis mínima que permita una calidad media del efluente para observar el efecto de los polvos sobre la calidad del efluente y de los lodos, para disminuir la dosis de coagulante, y 2) dosis máxima para obtener las mejores características fisicoquímicas del efluente para determinar el efecto de los polvos solamente sobre los lodos.

Aplicando la técnica descrita párrafos arriba, para una misma dosis de coagulante, se adicionan dosis crecientes de polvos.

## 2.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL INFLUENTE Y EFLUENTE

Las características fisicoquímicas determinadas al influente y al efluente del proceso de coagulación-floculación fueron:

- ☒ **parámetros convencionales:** pH, color, turbiedad, sólidos suspendidos y totales, demanda química de oxígeno (DQO).
- ☒ **parámetros no convencionales:** Tamaño de partículas en suspensión.

Los parámetros medidos son, en su mayoría, parámetros indicadores de la eficiencia del proceso de coagulación-floculación.



### 2.3.1 PARÁMETROS CONVENCIONALES

La Tabla 2.1 muestra los parámetros convencionales para determinar las propiedades fisicoquímicas del influente y del efluente.

**TABLA 2.1. PARÁMETROS CONVENCIONALES DE INFLUENTE Y EFLUENTE.**

PARÁMETRO	MÉTODO	EQUIPO
pH		
COLOR	ESPECTROFOTOMÉTRICO	HACH modelo DR/2010
TURBIEDAD	NEFELOMÉTRICO	HANNA modelo LP 2000
DQO		HACH modelo DR/2010

Los métodos para la determinación de parámetros convencionales se encuentran explicados detalladamente en el Anexo I.

### 2.2.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS NO CONVENCIONALES

#### 2.3.2.1 DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULA EN SUSPENSIÓN

La distribución de las partículas en suspensión se midió con base en la técnica basada en la dispersión de rayos láser. Este parámetro se determinó en el equipo COULTER COUNTER modelo L5230.

## 2.4 ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS DE LODOS

Los parámetros seleccionados para la caracterización de lodos son la velocidad de sedimentación, la resistencia específica a la filtración y la humedad. Además se realizó un estudio en microscopio para comparar la morfología y tamaños de los flóculos obtenidos con y sin polvos. Este estudio se llevó a cabo en la Facultad de Química.

### 2.4.1 TASA DE SEDIMENTACIÓN DE ZONA

**Definición.** A concentraciones elevadas de sólidos en suspensión, las suspensiones sedimentan según un modelo de sedimentación de zona. Este tipo de sedimentación tiene lugar en condiciones de reposo y se caracteriza por la interfase neta entre el líquido sobrenadante y la zona de lodo. La altura de dicha interfase del lodo se mide en función del tiempo. Los datos de sedimentación zonal para suspensiones



que se han sometido a este tipo de sedimentación pueden utilizarse en el diseño, operatividad y evaluación de cubetas de sedimentación.

- a. Instrumental. Se utiliza un cronómetro, un termómetro y un cilindro transparente de 1 m de altura y 10 cm de diámetro como mínimo. Fije una cinta milimétrica calibrada en la parte exterior del cilindro, que deberá equiparse con un sistema agitador. Agite la suspensión cerca de la pared en toda su profundidad, a una velocidad periférica no mayor a 1 cm/s.
- b. Procedimiento. Extraiga mezcla del reservorio y active el mecanismo de agitación. Introduzca la mezcla en el vaso de sedimentación a una altura fija a un ritmo constante para mantener una concentración uniforme de sólidos en suspensión en todo el vaso. Registre la altura de la interfase sólidos-líquidos a intervalos de un minuto aproximadamente hasta que estos datos garanticen que la suspensión exhibe una velocidad constante de sedimentación de zona y que ha pasado el período de floculación inicial, caracterizado por una velocidad acelerada de sedimentación interfase.

La tasa de sedimentación de zona es una función de la concentración de sólidos en suspensión y de la altura de la muestra, así como de los artefactos de laboratorio.

- c. Cálculos. Grafique la altura de la interfase en centímetros frente a tiempo en minutos. Trace una recta a través de los puntos ignorando el codo inicial o período de refloculación, y el codo de compresión. Calcule la tasa de sedimentación interfase como desviación de la línea en centímetros por minuto.

#### 2.4.2 RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN (REF)

La REF es la resistencia que opone a la filtración una cantidad definida de lodo depositada en una superficie filtrante. Esta prueba tiene gran utilidad para comparar las diferentes características de filtración de diferentes lodos obtenidos en diferentes condiciones y, para determinar las necesidades de tratamiento para producir una torta que ofrezca mínima resistencia y optimizar el proceso de deshidratación del lodo.

En laboratorio, la prueba consiste en la filtración de un volumen dado de lodo (V) bajo una presión de vacío de 400-500 mm Hg hasta que la torta es formada y no se puede filtrar más, posteriormente se quiebra como resultado de una caída de presión ( $\Delta P$ ). La REF tiene ventajas sobre otras pruebas como es la independencia de la concentración de los sólidos en el lodo y también la facilidad de aplicación a cualquier tipo de lodo.



El equipo empleado en la prueba consta de una probeta graduada de 250 mL con un adaptador para un filtro Büchner de 9 cm de diámetro y una salida conectada a una bomba de vacío. El sistema completo se esquematiza en la siguiente figura:

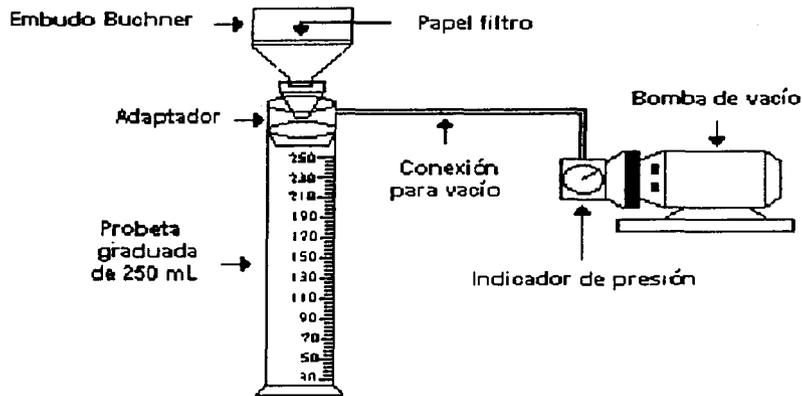


FIGURA 2.2 DISPOSITIVO PARA DETERMINAR REF

El procedimiento empleado para la determinación de la REF es el siguiente:

- 1) Determinar los sólidos totales (ST) de la muestra inicial de lodo.
- 2) Determinar el por ciento de humedad del lodo ( $c_i$ ) a partir de la siguiente ecuación:
 
$$\% \text{ humedad } (c_i) = [(1000 - ST)/1000] * 100$$
- 3) Pesar el papel filtro WHATMAN 1 que se utilizará en cada prueba REF.
- 4) Colocar este papel filtro dentro del embudo Büchner y humedecerlo.
- 5) Ajustar la presión de vacío de la bomba entre 400 y 500 mm Hg.
- 6) Medir un volumen dado de lodo (generalmente 100 mL) y vaciarlo cuidadosamente al embudo Büchner, simultáneamente, iniciar el registro del tiempo de filtración utilizando un cronómetro.
- 7) Registrar el tiempo transcurrido para obtener volumen de filtrado prefijados y la presión aplicada hasta que la torta empiece a agrietarse.



- 8) Realizar un gráfico con los resultados obtenidos de la relación tiempo/volumen de filtrado ( $t/V$ ) en función del volumen filtrado y calcular la pendiente de la línea resultante.
- 9) Determinar los sólidos totales en la torta seca.
- 10) Determinar el porcentaje de humedad ( $c_f$ ) de los sólidos retenidos (torta) en el papel filtro mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad } (c_f) = [(STH - STS)/STH] \cdot 100$$

Donde:

STH = Sólidos en la torta húmeda

STS = Sólidos en la torta seca

- 11) Calcular el parámetro  $c$  mediante la siguiente ecuación:

$$c = \frac{1}{\frac{c_i}{100 - c_i} - \frac{c_f}{100 - c_f}}$$

- 12) Calcular la REF ( $r$ ) aplicando la siguiente ecuación:

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu c}$$

Donde:

$r$  = Resistencia específica a la filtración (cm/g)

$P$  = Presión de vacío aplicada (dinas/cm<sup>2</sup> = g/cm s<sup>2</sup>)

$A$  = Área del papel filtro (cm<sup>2</sup>)

$m$  = Pendiente de la línea ( $t/V$ ) vs  $V$  (s/cm<sup>6</sup>)

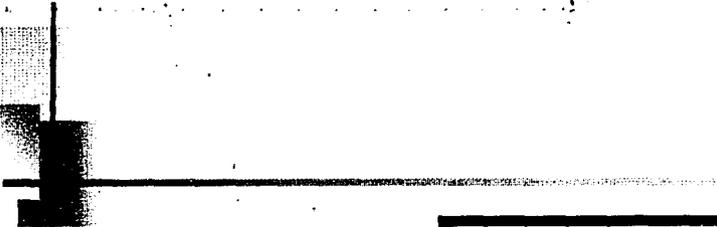
$\mu$  = Viscosidad del filtrado (poise = g/cm s)

$c$  = Concentración de sólidos totales por volumen de filtrado (g/cm<sup>3</sup>)

### 2.4.3 HUMEDAD

Los análisis de humedad de lodos se realizaron en la USAI de la Facultad de Química mediante el método termogravimétrico, en un equipo METTLER TOLEDO STAR.





# **CAPÍTULO TRES**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE POLVOS

##### 3.1.1 ANÁLISIS CRETIB

De acuerdo con el estudio previo realizado por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, los polvos y lodos producidos en la PADF no presentan riesgo en ninguna de las características CRETIB (Anexo II) y, por lo tanto, no son considerados como residuos peligrosos. Dado que, las características de las materias primas y la de los procesos utilizados para la producción de la mezcla asfáltica, no han cambiado sustancialmente, se consideró adecuado emplear estos análisis para la clasificación de los polvos de mezcla asfáltica. En la Tabla 3.1 se presenta un resumen del estudio de referencia.

TABLA 3.1 ANÁLISIS C.R.E.T.I.B. DE RESIDUO EN POLVO Y LODO DE LAS PLANTAS 5, 6 Y 7 DE LA P.A.D.F.

	PROPIEDADES	PLANTA 5	PLANTA 6	PLANTA 7
C	pH	6.57	6.33	6.45
	Corrosión del acero al carbón SAE1020 a 55°C mm/año	0.002	0.001	0.002
R	Se polimeriza o combina violentamente a 25°C	No	No	No
	Reacciona con agua en relaciones 5:1, 5:3, 5:5	No	No	No
	Reacciona con HCl en relaciones 5:1, 5:3, 5:5	No	No	No
	Reacciona con NaOH en relaciones 5:1, 5:3, 5:5	No	No	No
	Produce radicales libres	No	No	No
	Constante de explosividad >= a la de Nitrobenzeno	No	No	No
E	Produce reacción explosiva a 25°C y 1.03 kg/cm <sup>2</sup>	No	No	No
T	Contiene compuestos orgánicos	No	No	No
	Cr (VI) (ppm)	0.25	0.15	0.25
	Ni (ppm)	0.85	0.95	0.9
	Ba (ppm)	n.d.	n.d.	n.d.
	As (ppm)	n.d.	n.d.	n.d.
	Cd (ppm)	0.05	0.05	0.05
	Hg (ppm)	n.d.	n.d.	n.d.
	Ag (ppm)	n.d.	n.d.	n.d.
	Pb (ppm)	0.3	0.35	0.3
	Se (ppm)	n.d.	n.d.	n.d.
I	Es inflamable a temperatura ambiente	No	No	No
	Es inflamable a 60 °C	No	No	No
B	Causa efectos negativos sobre organismos	No	No	No
	Contiene organismos tóxicos	No	No	No

n.d.: No detectado



### 3.1.2 ANÁLISIS FÍSICO

#### 3.1.2.1 GRANULOMETRÍA

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados promedio de tres experimentos para cada uno de los polvos.

TABLA 3.2. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS MUESTRAS EN POLVO

Mallas	Diámetro de apertura (mm)	PLANTA 5 % masa retenida	PLANTA 6 % masa retenida	PLANTA 7 % masa retenida
80	0.1778	3.2	25.775	7.2361
120	0.11684	39.65	57.093	78.131
150	0.10414	16.2	16.627	11.498
180	0.08128	7.48	0.5038	1.063
200	0.07366	18.78	0	1.487
250	0.0635	8.37	0	0.583
325	0.04318	4.44	0	0
Colector	-	1.85	0	0
<b>Total</b>		<b>99.979</b>	<b>99.999</b>	<b>99.998</b>
<b>Diámetro promedio (mm)</b>		<b>0.096</b>	<b>0.130</b>	<b>0.118</b>

Las pruebas realizadas en este trabajo indican que los polvos de las tres plantas son retenidos mayoritariamente en la malla 120.

#### 3.1.2.2 DENSIDAD APARENTE

El resultado obtenido para este parámetro fue de **1.3 g/mL**.

#### 3.1.2.3 OBSERVACIONES AL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

Para estudiar la morfología y tamaños de partícula de las muestras de polvo de las tres plantas se realizaron observaciones en un microscopio electrónico de barrido (MEB), marca JEOL modelo JSM-5900LV dentro de la Facultad de Química. Por medio de este equipo se observó que las partículas de polvo producido en las tres plantas son amorfas y completamente heterogéneas. No tienen una forma definida ni tampoco presentan estructura porosa. Los tamaños de partícula son variables, van desde 2  $\mu\text{m}$  hasta 70  $\mu\text{m}$ . Las partículas de menor tamaño se observaron en el polvo generado en la Planta No. 5 y las de mayor tamaño se encontraron en los polvos de la Planta 7. La Figura 3.1 muestra una fotografía tomadas a las partículas de la Planta 5.



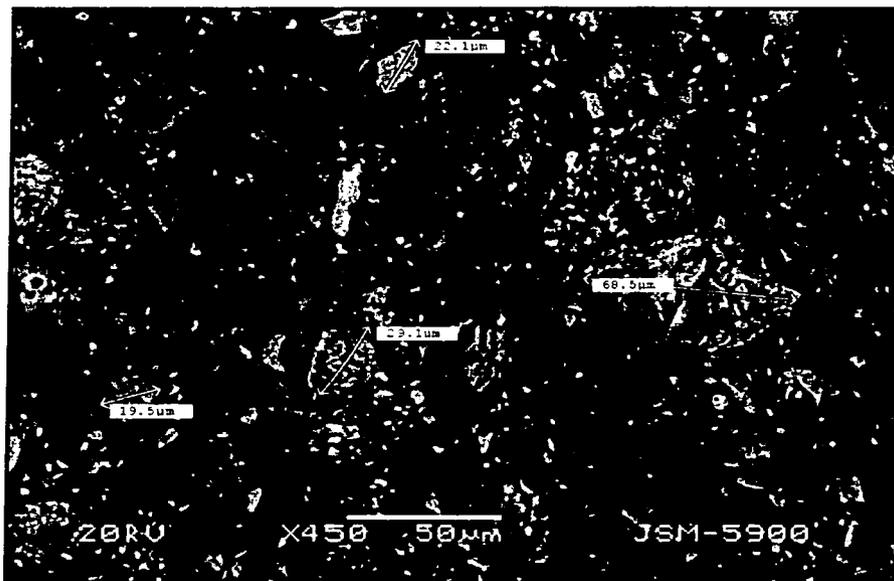


FIGURA 3.1. PARTÍCULAS DE POLVO PRODUCIDAS EN LA PLANTA NO. 5 (X450)

### 3.1.3 ANÁLISIS QUÍMICO

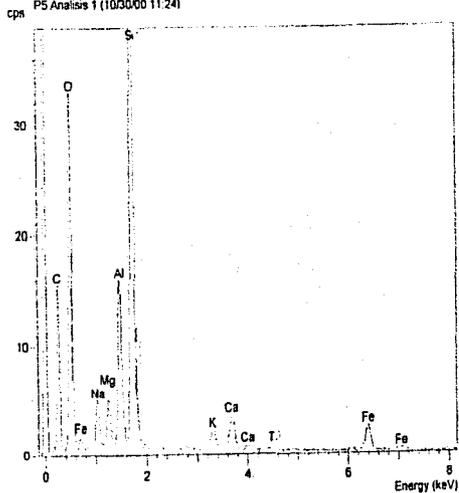
#### 3.1.3.1 ANÁLISIS ELEMENTAL

En la Figura 3.2, se presentan algunos ejemplos de los espectros obtenidos durante el análisis por difracción de rayos X de muestras de los tres polvos. Estos espectros permiten contar una composición aproximada de las muestras observadas. Estos resultados deben interpretarse cautelosamente dado que el equipo reporta un análisis de una sola partícula observada. El análisis de varias partículas que se encuentren en un mismo campo de observación pueden aportar resultados completamente distintos entre sí.

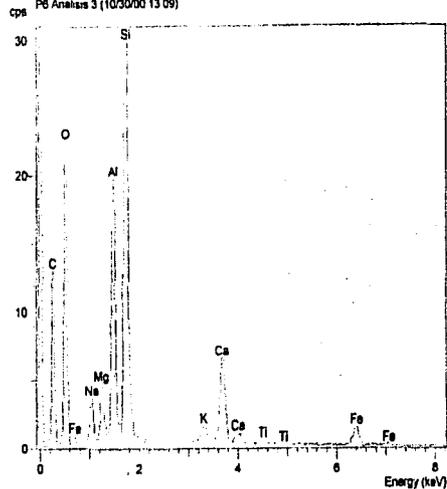
Los espectros presentados en la Figura 3.2 indican la presencia mayoritaria de oxígeno, silicio, hierro, aluminio y magnesio. También se observan pequeñas concentraciones de titanio, calcio, sodio, y potasio. De la misma manera, se aprecian la presencia de carbono, este resultado puede deberse a una presencia minoritaria de carbonatos o de partículas de carbono orgánico presentes al inicio en el material triturado o a impurezas adquiridas durante el secado en el horno rotatorio.



Operator : IVAN PUENTE LEE  
Client : Dr. Alfonso Duran  
Job : Polvos de Asfalto  
P5 Analisis 1 (10/30/00 11:24)



Operator : IVAN PUENTE LEE  
Client : Dr. Alfonso Duran  
Job : Polvos de Asfalto  
P6 Analisis 3 (10/30/00 13:09)



Operator : IVAN PUENTE LEE  
Client : Dr. Alfonso Duran  
Job : Polvos de Asfalto  
P7 Analisis 1 (10/30/00 12:13)

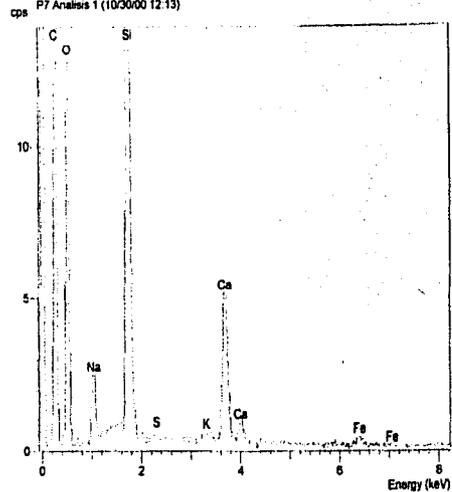


FIGURA 3.2 ESPECTROS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN MUESTRAS DE POLVOS: (A) PLANTA 5; (B) PLANTA 6; (C) PLANTA 7



Evaluación de los Polvos de Mezcla Asfáltica como  
Adyuvantes del Proceso de Floculación de Aguas



Un análisis cuantitativo más confiable fue realizado con la técnica clásica de fluorescencia de rayos X previa fundición del material analizado. Los resultados de esta técnica de análisis se presentan a continuación.

### 3.1.3.2 ANÁLISIS DE ÓXIDOS CONTENIDOS EN LAS MUESTRAS DE POLVOS Y LODO

Los resultados obtenidos del análisis realizado por fluorescencia de rayos X se resumen en la Tabla 3.3.

**TABLA 3.3 CONTENIDO DE ÓXIDOS EN LAS MUESTRAS DE RESIDUO DEL ASFÁLTO**

Muestra	SiO <sub>2</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	PXC %	Suma %
Planta 5	57.195	0.883	17.372	6.470	0.107	4.679	6.950	3.619	1.264	0.290	0.81	99.64
Planta 6	54.744	0.796	17.677	6.185	0.112	5.037	7.399	3.377	1.090	0.321	2.99	99.73
Planta 7	58.025	1.051	16.882	5.885	0.100	3.188	5.292	3.816	1.450	0.353	2.82	98.86
<b>Promedio</b>	<b>56.655</b>	<b>0.910</b>	<b>17.310</b>	<b>6.180</b>	<b>0.106</b>	<b>4.301</b>	<b>6.55</b>	<b>3.60</b>	<b>1.27</b>	<b>0.32</b>	<b>2.21</b>	<b>99.41</b>

Del análisis presentado en la tabla anterior se concluye que los polvos de la planta de asfalto están constituidos principalmente de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) y de trióxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Este contenido de óxido de silicio es comparable al que se reporta para sílice activada. Otros óxidos están presentes en composiciones porcentuales inferiores a 8 %. La materia volátil contenida en la muestra de los polvos de la planta 5 es inferior a 1 %. Para las otras dos muestras, la fracción volátil es inferior a 3%. Este último resultado se atribuye al hecho de que en las Plantas 6 y 7 la mezcla asfáltica se realiza en el interior del horno rotatorio y, que por lo tanto, las partículas de lodo y polvo pueden contaminarse ligeramente con el asfalto, lo que no sucede en la Planta 5 por lo que el polvo de esta planta no contiene materia orgánica volátil.

Con base en el origen de la piedra a partir de la cual se producen los polvos y de la composición porcentual anteriormente presentada, los polvos pueden clasificarse genéricamente como un material producto de rocas ígneas presumiblemente basálticas (los materiales basálticos se caracterizan por tener un contenido de silicio cercano a 50% y son ricos en hierro y magnesio; estas rocas funden a una temperatura entre 900 y 1200 °C).



## 3.2 RESULTADOS DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA AGUA NATURAL Y RESIDUAL

### 3.2.1 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO CON SULFATO DE ALUMINIO DE AGUA RESIDUAL EXTRAIDA DE LA PLANTA DE BOMBEO DE GRAN CANAL

En el caso de aguas residuales se evaluó en una primera etapa el efecto de los polvos sobre la calidad del efluente y de los lodos para determinar si la simple adición de este material con un coagulante comercial permitía obtener resultados satisfactorios de remoción.

El sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) se seleccionó como coagulante en el tratamiento de agua residual proveniente de Gran Canal. La fase inicial de este estudio consistió en encontrar la dosis óptima de este reactivo, tomando como criterio únicamente la remoción de parámetros fisicoquímicos convencionales del efluente como: pH, color, turbiedad y DQO.

La Tabla 3.4 contiene los resultados obtenidos de estas caracterizaciones, en un intervalo de  $Al_2(SO_4)_3$  entre 20 y 150 mg/L. La primera columna corresponde al influente a tratar, el cual es un agua sumamente cargada de materia orgánica y sólidos suspendidos.

TABLA 3.4 DETERMINACION DE LA DOSIS DE  $Al_2(SO_4)_3$  PARA LA COAGULACIÓN DEL AGUA PROVENIENTE DE GRAN CANAL

PARÁMETRO FISICOQUÍMICO	CONCENTRACIÓN DE $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)						
	0	20	30	60	90	120	150
pH	7.39	6.78	6.41	6.22	6.16	6.06	5.86
Turbiedad (UTN)	271	87	84	76	13.44	5.7	2.64
Color (U Pt-Co)	1043	728	696	293	142	60	45
DQO total (mg $O_2$ /L)	333	232	236	235	122	99	78

En esta tabla se puede observar que a una dosis mínima de 90 mg/L se comienza a obtener una remoción significativa de los tres parámetros fisicoquímicos evaluados y, para una dosis máxima de 150 mg/L, las remociones son cercanas al 100%.



Cabe mencionar que para la realización de todas las pruebas de jarra, el agua a tratar se acondicionó a un pH ácido de 5.5 con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), a una temperatura ambiente de 21°C.

En base a la dosis máxima (150 mg/L), se determinó la influencia de los polvos de mezcla asfáltica sobre la calidad de los lodos producidos, aplicando concentraciones entre 5 – 60 mg/L de polvos. Los valores promedio de la caracterización fisicoquímica de los efluentes se encuentran condensados en la Tabla 3.5.

**TABLA 3.5 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS PARA AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON 150 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$**

DOSIS DE SULFATO DE ALUMINIO 150mg/L						
PARÁMETRO	DOSIS DE POLVO (mg/L)					
	0	5	10	20	40	60
pH	5.99	6.03	6.00	6.002	6.03	6.25
TURBIEDAD (UTN)	3.41	3.24	3.82	3.88	3.89	4.27
COLOR (U Pt-Co)	44	40.12	41.75	42.43	42.29	40.33
DQO (mg $O_2$ /L)	63.33	65	70	70	63.33	73
SST (g/L)	12.54	10.22	11.09	10.97	11.51	12.79

Estos valores muestran que los polvos de mezcla asfáltica no contribuyen a mejorar de manera significativa la calidad del efluente para cualquiera de las dosis de polvo evaluadas. Lo anterior concuerda de manera adecuada con los resultados obtenidos de la distribución de tamaño de partícula.

La Figura 3.3 muestra la distribución de partícula obtenida para los efluentes producidos con 150 mg/L de sulfato de aluminio y diferentes dosificaciones de polvos de mezcla asfáltica (0-20 mg/L).

En estas curvas se observa un ligero efecto benéfico de los polvos de mezcla asfáltica en la calidad del efluente debido a que la distribución acumulada de tamaño de partícula disminuye de manera proporcional con respecto al incremento de la dosis de estos residuos.

Sin embargo, estos desechos si permiten mejorar, de manera muy significativa, la calidad de los lodos producidos, lo cual se observará de manera clara en los resultados de velocidad de sedimentación, retención específica a la filtración y humedad.



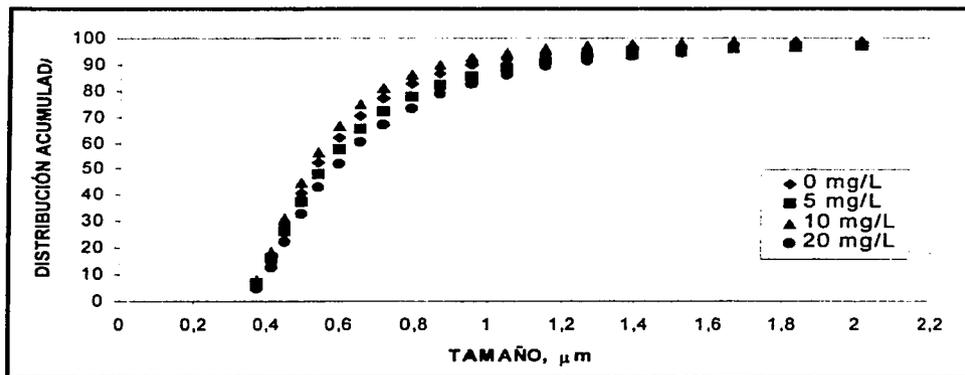


FIGURA 3.3 DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULA PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 150 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$  Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA

La Tabla 3.6 presenta los valores de sedimentación, tanto para la zona discreta ( $T_2$ ) como para la zona por floculación, para agua proveniente de Gran Canal tratada con 150 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$  y diferentes dosis de polvos de mezcla asfáltica.

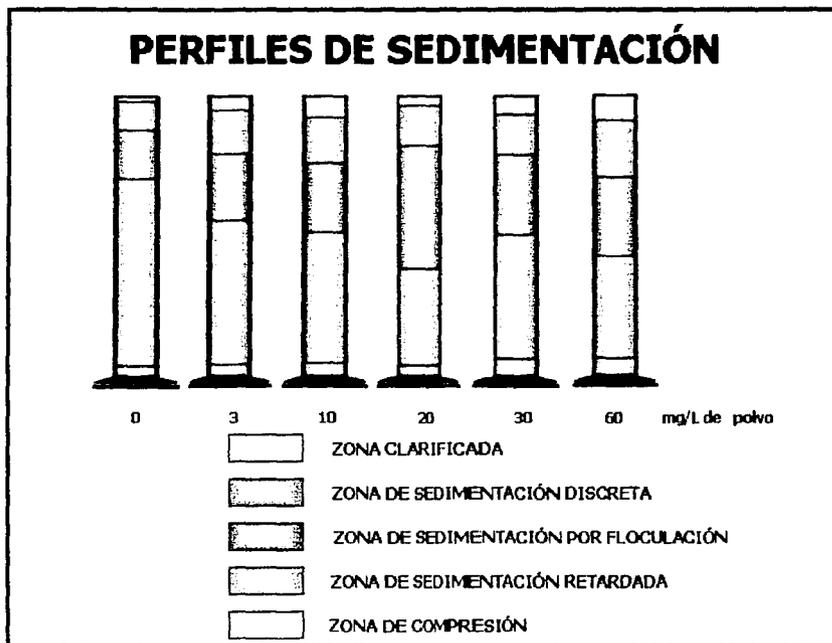
El aumento en la concentración de los polvos de mezcla asfáltica provoca un incremento regular de la velocidad de sedimentación la cual se incrementa en porcentajes entre 100% y 300%. Esto influye de manera directa en el tamaño y costo de equipos subsecuentes al proceso de coagulación – floculación.

TABLA 3.6 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON 150 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$  Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA

VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN (cm/min)		
mg DE POLVO/L	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EN LA ZONA DISCRETA ( $T_2$ )	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EN LA ZONA POR FLOCULACIÓN ( $T_3$ )
0	0.86	0.95
5	1.92	0.98
10	1.89	0.90
20	1.73	0.99
40	2.18	0.98
60	2.69	0.98



La Figura 3.4 muestra los perfiles de sedimentación generados después de 30 minutos. Los datos completos se reportan en el ANEXO II.

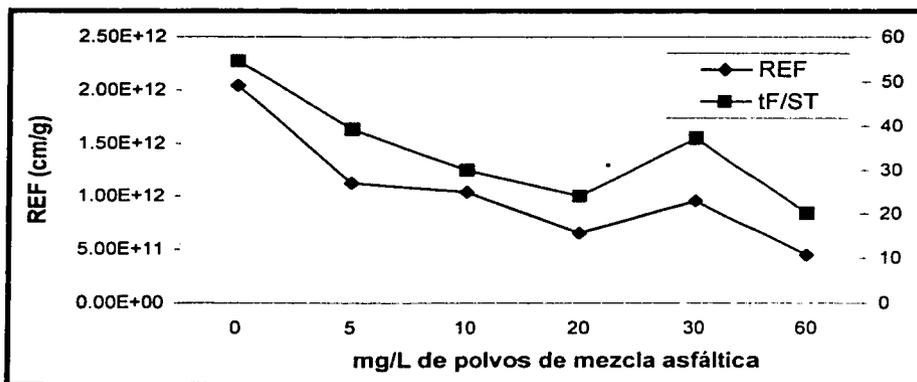


**FIGURA 3.4 PERFILES DE SEDIMENTACIÓN PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 150 mg/L  $AL_2(SO_4)_3$  Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA**

Al verse favorecida la velocidad de sedimentación, en la Figura 3.3 se puede observar como la zona de compresión incrementa su volumen proporcionalmente al aumento de concentración de mezcla asfáltica. Esto se debe a que los polvos permiten generar flocúlos de mayor volumen y masa, lo que de manera adecuada concuerda con la disminución de la REF y de la relación  $t_F/ST$  la cual se presenta en la Figura 3.5.

El conjunto de los resultados obtenidos para la velocidad de sedimentación, la REF y la relación  $(T_F/ST)$  muestran que los polvos de mezcla asfáltica presentan propiedades floculantes, que permiten mejorar de manera significativa la calidad de los lodos producidos por clarificación de aguas residuales con sulfato de aluminio con una dosis máxima de este coagulante de 150 mg/L.





**FIGURA 3.5 RESISTENCIA A LA FILTRACIÓN (REF) Y RELACIÓN TIEMPO DE FILTRACIÓN/SÓLIDOS TOTALES (tF/ST) PARA LODOS OBTENIDOS DE LA CLARIFICACIÓN DE AGUA RESIDUAL CON SULFATO DE ALUMINIO (150mg/L) Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA**

La Tabla 3.7 muestra los valores promedio de sólidos evaluados que se utilizan en el cálculo de la REF.

**TABLA 3.7 SÓLIDOS EVALUADOS PARA EL TRATAMIENTO CON  $Al_2(SO_4)_3$  DE AGUA DE GRAN CANAL**

mg DE POLVO/L	TIPO DE SÓLIDO (g/L)					
	SST	STF	STV	SST	SSF	SSV
0	15.61	4.45	8.09	12.54	5.57	10.40
5	13.53	3.11	7.11	10.22	4.84	8.69
10	12.05	5.18	5.91	11.09	4.90	7.15
20	11.22	5.01	5.97	10.97	4.15	7.07
40	12.45	4.45	6.07	11.51	3.70	8.75
60	13.45	6.23	6.56	12.79	5.76	7.89

Con el fin de obtener buenas características de lodos y disminuir la dosis de sulfato de aluminio se procedió a evaluar otra alternativa: combinar el sulfato de aluminio con otro coagulante económico (como la cal) y con los polvos.



### 3.2.2 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO CON SULFATO DE ALUMINIO, UN POLÍMERO COMERCIAL vs POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA, EN AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE GRAN CANAL

Los experimentos realizados combinando los polvos de mezcla asfáltica con un floculante comercial (PROSIFLOC), tuvieron como objetivo principal disminuir la dosis de estos dos productos comerciales y mejorar la calidad tanto del efluente como de los lodos de coagulación-floculación.

Con el fin de disminuir el número de ensayos, estas pruebas se realizaron con base a un diseño experimental tipo exponencial, de dos niveles y dos variables  $2^k$  ( $k$  = número de variables):

Experimento	$X_1$	$X_2$
1	0.6	60
2	0.6	4
3	0.1	60
4	0.1	4
B1	0.1	0
B2	0.6	0

Donde:

$X_1$ =dosis de floculante comercial PROSIFLOC (mg/L)	$B_1$ = blanco dosis PROSIFLOC 0.1 mg/L
$X_2$ = dosis de polvos (mg/L)	$B_2$ = blanco dosis PROSIFLOC 0.6 mg/L

Los resultados de esta parte del estudio se ilustran de manera comparativa con respecto a los mejores valores obtenidos para la muestra tratada solamente con polvos (60 mg/L) y 90 mg/L de sulfato de aluminio (Tabla 3.8).

Los datos de la tabla 3.8 muestran que la dosis de polvos de 60 mg/L permite obtener un efluente clarificado con características mejores que las de las muestras tratadas con un floculante comercial (PROSIFLOC), para las dos dosis evaluadas de este producto (0.1 y 1 mg/L). Sin embargo, estas propiedades fisicoquímicas del efluente y el volumen de lodos que se observó en función del tiempo de sedimentación (Figura 8) son mejores para el agua residual tratada con 0.1 mg/L de PROSIFLOC combinado con 4 mg/L de polvos (Experimento 4) o 06 mg/L de PROSIFLOC combinado con 2 mg/L de polvos (Experimento 2). Lo anterior permite concluir que los polvos

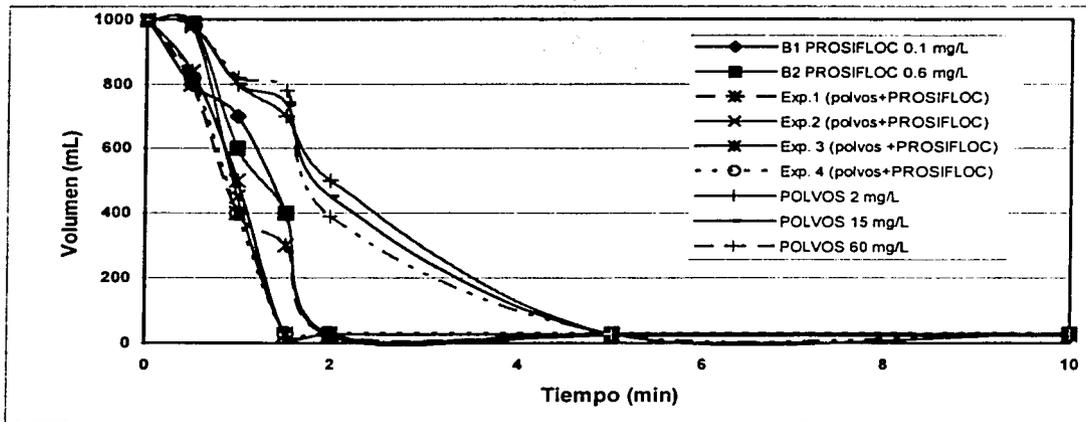


además de disminuir la dosis de coagulante de 120-150 a 90 mg/L también permiten disminuir la dosis de floculante comercial PROSIFLOC de 0.6 a 0.1 mg/L.

**TABLA 3.8 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS EFLUENTES DE AGUA RESIDUAL TRATADA CON SULFATO DE ALUMINIO (90 mg/L  $AL_2(SO_4)_3$ ), UN FLOCULANTE COMERCIAL (PROSIFLOC, DOSIS 0.1 Y 0.6 mg/L) Y POLVOS ASFÁLTICOS (4 Y 60 mg/L).**

PARÁMETRO	60 mg/L polvos	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	Experim. 1	Experim. 2	Experim. 3	Experim. 4
Turbiedad (UTN)	8.1	9.83	9.11	8.12	9.7	9.34	4.06
	5.9	6.21	8.77	7.45	6.51	8.8	4.34
<b>Promedio</b>	<b>7.0</b>	<b>8.02</b>	<b>8.94</b>	<b>7.785</b>	<b>8.10</b>	<b>9.07</b>	<b>4.2</b>
Color (U Pt-Co)	66	61	86	63	50	88	41
	67	64	88	73	67	92	50
<b>Promedio</b>	<b>66.5</b>	<b>62.5</b>	<b>87</b>	<b>68</b>	<b>58.5</b>	<b>90</b>	<b>45.5</b>
DQO total (mg O <sub>2</sub> /L)	166	122	158	148	142	140	141
	146	136	133	125	150	130	115
<b>Promedio</b>	<b>156</b>	<b>129</b>	<b>145.5</b>	<b>136.5</b>	<b>146</b>	<b>135</b>	<b>128</b>
pH	6.55	6.11	6.03	6.05	6.17	6.13	6.1
	6.16	6.13	6.04	6.03	6.1	6.1	6.1
<b>Promedio</b>	<b>6.35</b>	<b>6.12</b>	<b>6.03</b>	<b>6.04</b>	<b>6.13</b>	<b>6.11</b>	<b>6.1</b>
SST (mg/L)	20	20	20	10	10	10	10
	20	20	20	10	10	10	10
<b>Promedio</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
Producción de lodos kg ST/m <sup>3</sup> AR		0.158	0.158	0.178	0.1782	0.1778	0.1777





**FIGURA 3.6 VOLUMEN DE LODOS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE SEDIMENTACIÓN DE AGUA RESIDUAL TRATADA CON SULFATO DE ALUMINIO, PROSIFLOC Y/O POLVOS DE LA PLANTA DE ASFALTO**

En el caso del volumen de lodos, particularmente en el intervalo de 0 - 5 minutos, los polvos de la planta de asfalto combinados con el floculante comercial PROSIFLOC permiten disminuir de manera significativa el volumen de lodos, como una función del tiempo de sedimentación, en el proceso de coagulación-floculación.

### 3.2.3 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO CON SULFATO DE ALUMINIO Y CAL EN AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE GRAN CANAL

Como se había mencionado, la siguiente etapa de este estudio fue la evaluación de la eficiencia de tratamiento de los polvos de mezcla asfáltica combinados con el coagulante inicialmente evaluado (sulfato de aluminio) y con cal.

La Tabla 3.9 muestra las características fisicoquímicas del efluente obtenido en el tratamiento de agua proveniente de Gran Canal, empleando diferentes dosis de los coagulantes antes citados. Cabe recordar que la dosis recomendada es de 3:1 en relación molar entre el sulfato de aluminio y la cal.



**TABLA 3.9 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS PARA AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON  $Al_2(SO_4)_3$  Y CAL**

PARÁMETRO	DOSIS DE REACTIVOS (mg/L)											
	0	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
mg de sulfato/L	0	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
mg cal/L	0	45	52	58	65	71	77	84	90	97	103	110
pH	7.99	6.14	6.28	6.27	6.16	6.17	6.13	6.09	6.27	6.08	6.07	6.06
Turbiedad (UTN)	159	34.6	18.3	16.3	16.1	13.9	12.6	7.09	6.87	3.83	3.72	3.56
Color (U Pt-Co)	904	273	224	218	191	183	93	84	73	62	54	48
DQO total (mg $O_2$ /L)	436	247	215	225	213	209	203	198	194	192	189	186

A partir de los datos de la Tabla 3.9, se seleccionaron dos dosis una de eficiencia mínima significativa de remoción de parámetros fisicoquímicos (110 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$ ) y una máxima donde las remociones fueran cercanas al 100% (150 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$ ).

La Tabla 3.10 muestra los resultados promedio de las propiedades fisicoquímicas evaluadas con la dosis mínima (110 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$ , 71 mg/L de cal) y con la dosis máxima (150 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$ , 97 mg/L de cal) y dosificaciones de polvos de mezcla asfáltica comprendidas en el intervalo de 0 a 60 mg/L.

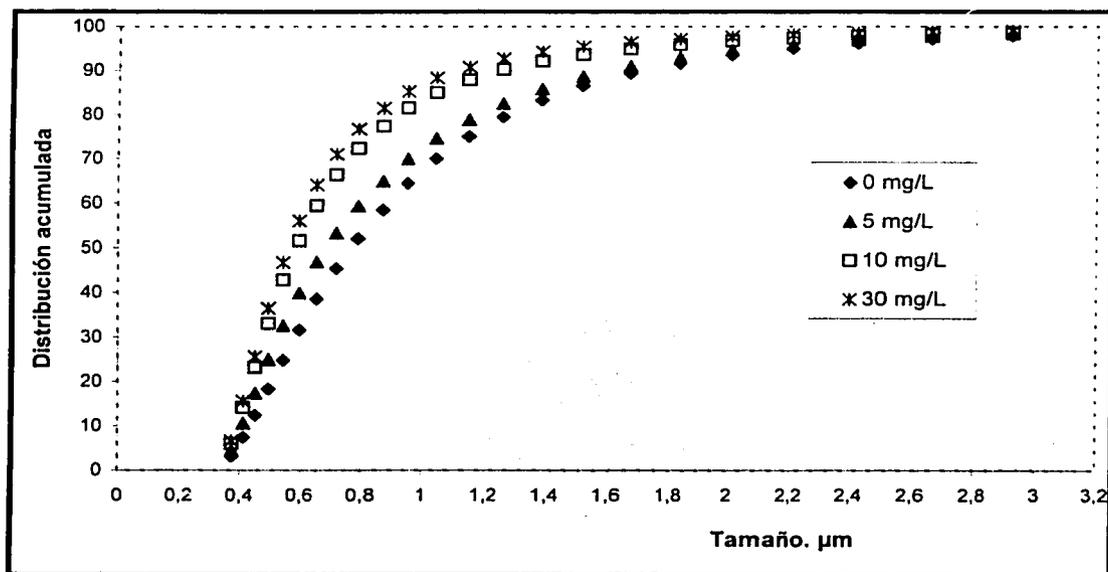
**TABLA 3.10 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON  $Al_2(SO_4)_3$  (110 y 150 mg/L) Y CAL (71 y 97 mg/L RESPECTIVAMENTE)**

PARÁMETRO	DOSIS DE SULFATO DE ALUMINIO	DOSIS DE POLVO (mg/L)					
		0	3	10	20	30	60
pH	110 mg/L	6.25	6.21	6.30	6.22	6.25	6.20
	150 mg/L	6.31	6.30	6.26	6.20	6.23	6.22
TURBIEDAD (UTN)	110 mg/L	11.08	8.46	7.55	6.89		
	150 mg/L	6.08	3.27	4.47	4.20	4.50	5.27
COLOR (U Pt-Co)	110 mg/L	100.5	89.5	77.5	69.5		
	150 mg/L	70.50	43	38	46.5	43	48.5
DQO (mg $O_2$ /L)	110 mg/L	187.5	184	181	177.5		
	150 mg/L	85	62	75.5	66	67.5	76
SST (g/L)	110 mg/L	18.17	13.59	16.65	18.96	18.49	18.83
	150 mg/L	16.36	17.58	16.33	16.53	13.79	13.00



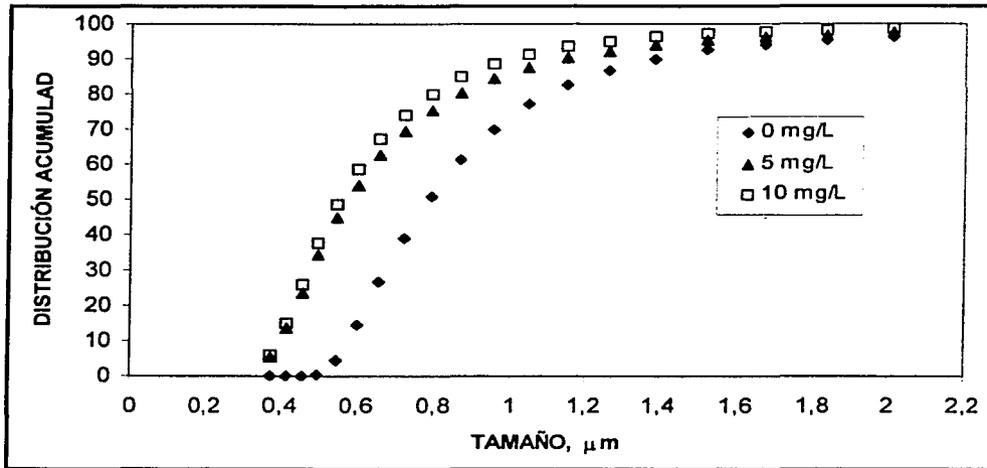
Como se puede observar en la Tabla 3.10, los polvos de mezcla asfáltica generan una remoción efectiva de color y turbiedad permitiendo disminuir la dosis de 150 a 110 mg/L de sulfato de aluminio. En contraste, la DQO soluble no disminuye de manera similar, a pesar de que ésta presenta una tendencia decreciente hasta llegar a un mínimo, conforme la dosis de polvo de mezcla asfáltica aumenta.

Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran la distribución del tamaño de partícula para las dosis de 110 y 150 mg/L respectivamente. En estas curvas también confirman el efecto favorable de la adición de polvos de mezcla asfáltica sobre la remoción de materia particulada o en suspensión. Para una dosis de 110 mg/L, la cantidad de polvos que permite un efecto benéfico significativo es 10 mg/L. En contraste, para la dosis de 150 mg/L de sulfato de aluminio, este efecto se observa de manera más significativa con una dosis de polvos dos veces más pequeña (5 mg/L). Los resultados obtenidos para la distribución de partícula concuerdan perfectamente con lo observado para las características fisicoquímicas de los efluentes.



**FIGURA 3.7 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EFLUENTES TRATADOS CON UNA DOSIS DE 110 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$ , 71 mg/L DE CAL Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA**





**FIGURA 3.8 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EFLUENTES TRATADOS CON UNA DOSIS DE 150 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$ , 97 mg/L DE CAL Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA**

En este caso de estudio, no sólo las características fisicoquímicas del efluente se ven favorecidas, también lo son las propiedades de los lodos (velocidades de sedimentación de los flóculos, REF,  $t_f$ /ST). Las Figuras 3.9 y 3.10 muestran las velocidades de sedimentación tanto para la zona de sedimentación por floculación como para la zona de sedimentación retardada.

Como se puede observar en la Figuras 3.9 y 3.10 la velocidad de sedimentación para las zonas de floculación y sedimentación retardada respectivamente, se ve ampliamente favorecida especialmente en el intervalo de dosis de polvo de 3-10 mg/L, en particular para la dosis de sulfato de aluminio de 150 mg/L. En ambas figuras se puede observar que la adición de los polvos de mezcla asfáltica provoca un incremento en la velocidad de sedimentación, llegando a un máximo el cual eventualmente decrece. Esto puede atribuirse a la adición de cargas en el sistema que provoca la ruptura de flóculos cuando los polvos de mezcla asfáltica son agregados en cantidades grandes que pueden llegar a eliminar la acción de los mismos e incluso, tal vez, la del mismo coagulante.



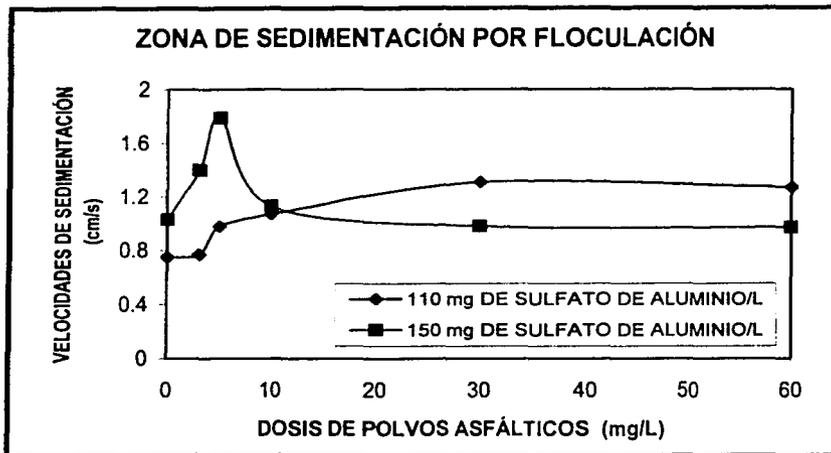


FIGURA 3.9 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN (T<sub>2</sub>) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON  $Al_2(SO_4)_3$ , CAL Y POLVOS

Por otra parte, para una concentración de 10 mg/L de polvos de mezcla asfáltica y las velocidades de sedimentación para la dosis mínima (110 mg/L) y máxima (150 mg/L) de coagulantes en la zona de floculación son muy semejantes. Lo mismo ocurre para la zona de sedimentación retardada donde a una concentración de 5 mg/L de polvos de mezcla asfáltica las velocidades se igualan.

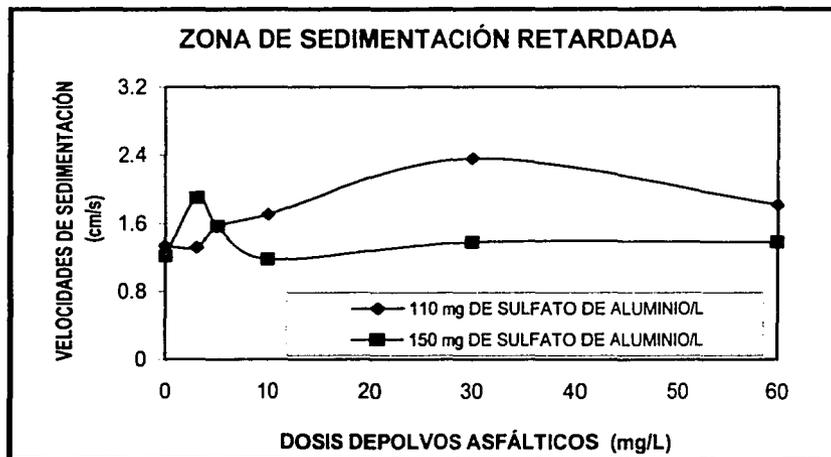
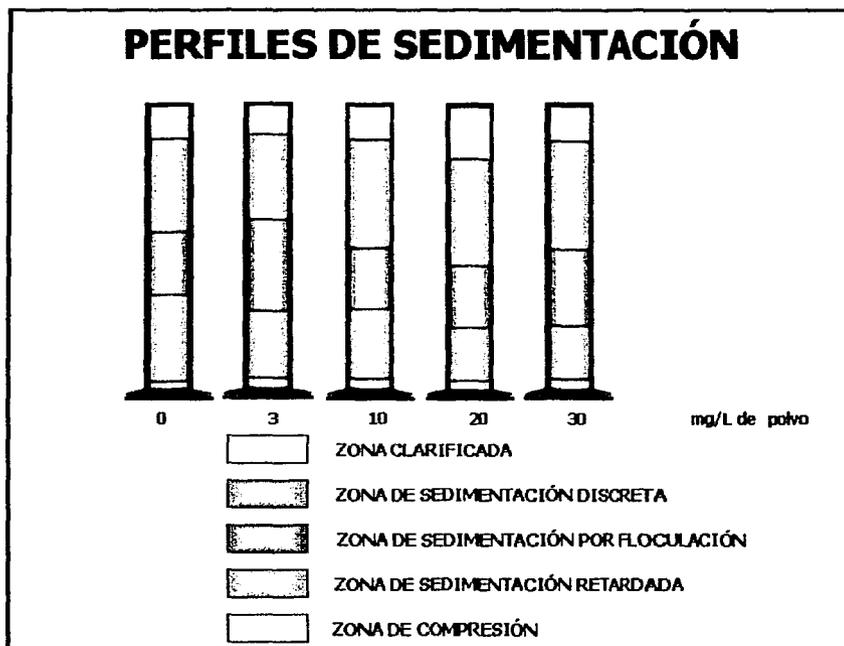


FIGURA 3.10 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE RETARDADA (T<sub>3</sub>) PARA EL TRATAMIENTO CON  $Al_2(SO_4)_3$  Y CAL

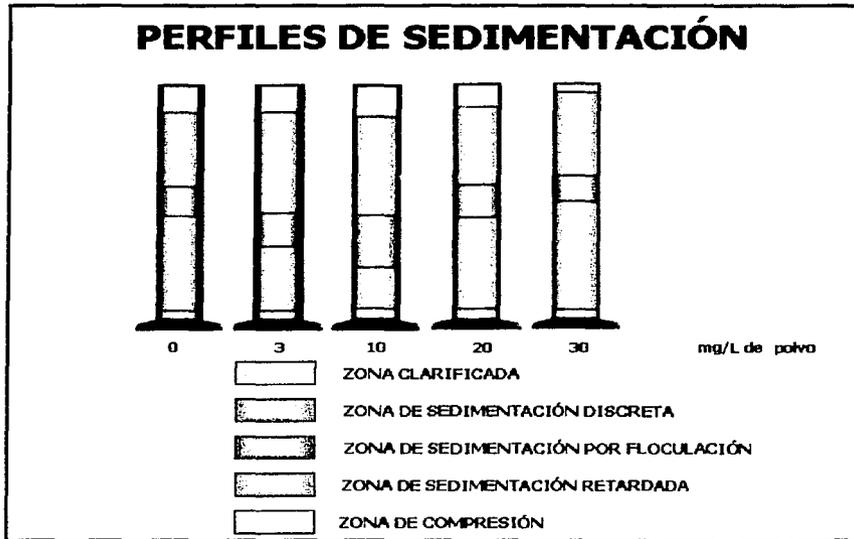


Las Figuras 3.11 y 3.12 muestran los perfiles de sedimentación después de un tiempo de 30 minutos para las concentraciones de 110 mg/L y 150 mg/L de sulfato de aluminio y sus concentraciones estipuladas de cal para diferentes dosis de polvos de mezcla asfáltica. En ellas se puede confirmar que dosis mayores a 30 mg/L de polvos para este caso de estudio pueden llegar a desfavorecer el proceso de sedimentación.



**FIGURA 3.11 PERFILES DE SEDIMENTACIÓN PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 110 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$  Y 71 mg/L DE CAL**





**FIGURA 3.12 PERFILES DE SEDIMENTACIÓN PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 150 mg/L  $Al_2(SO_4)_3$  Y 97 mg/L DE CAL**

Siendo una concentración de 20 mg/L de polvos de mezcla asfáltica, tomando en consideración las características fisicoquímicas y de sedimentación es la más favorable.

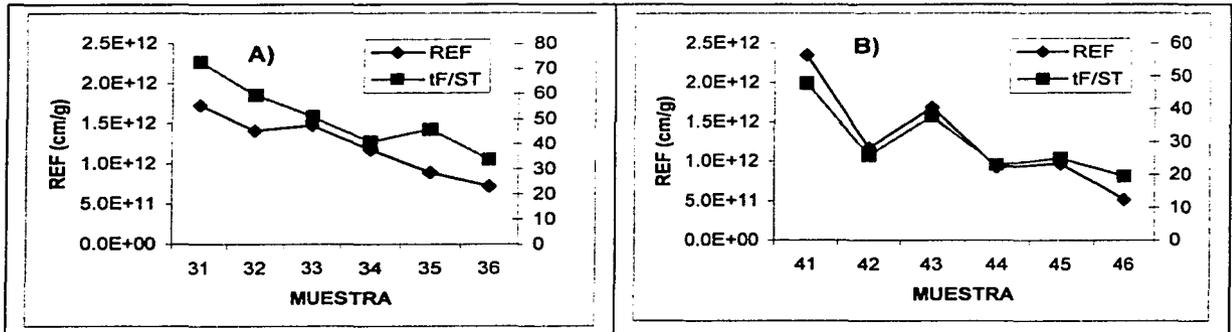
La Tabla 3.9 muestra los valores promedio de sólidos empleados en el cálculo de la REF para la dosis máxima y mínima determinada de coagulantes.

**TABLA 3.9 SÓLIDOS DE LOS EFLUENTES OBTENIDOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON  $Al_2(SO_4)_3$  Y CAL**

CONCENTRACIÓN DE $Al_2(SO_4)_3$ Y CAL	mg DE POLVO/L	TIPO DE SÓLIDO (g/L)					
		STT	STF	STV	SST	SSF	SSV
110 mg/L	0	19.03	8.39	10.64	18.17	7.30	10.87
	3	15.56	6.88	8.88	13.59	5.20	8.39
	5	20.36	8.84	11.52	18.65	7.39	11.26
	10	19.63	7.94	11.69	18.96	7.53	11.43
	30	20.50	9.07	11.44	18.49	7.67	10.82
	60	20.49	9.67	10.81	18.83	9.78	9.03
150 mg/L	0	14.18	6.09	8.09	16.36	6.28	10.09
	3	14.80	6.38	8.42	17.58	7.66	9.92
	5	14.49	6.23	8.21	16.33	7.33	9.00
	10	15.50	6.87	8.63	16.53	7.03	9.50
	30	18.91	6.68	12.23	13.79	5.89	7.90
	60	19.77	8.55	11.22	13.00	5.71	7.29



Las Figuras 3.13a y 3.13b ilustran los resultados obtenidos de la REF y de la relación (tF/ST) de los lodos generados respectivamente con 110 mg/L y 150 mg/L de sulfato de aluminio, cal 71 y 104 mg/L respectivamente y diferentes dosis de polvos de mezcla asfáltica.



**FIGURA 3.13 REF Y RELACIÓN (TF/ST) DE LODOS PRODUCIDOS POR CLARIFICACIÓN CON SULFATO DE ALUMINIO A) 110 mg/L Y CAL 71 mg/L Y B) 150 mg/L Y CAL 97 mg/L, CON DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA.**

Los valores de REF y (t<sub>F</sub>/ST) son similares entre los lodos obtenidos con sulfato de aluminio con 110 mg/L y 150 mg/L combinado con cal y con los producidos con 150 mg/L de sulfato de aluminio solo. Lo anterior, permite concluir de manera parcial, que los polvos de mezcla asfáltica permiten disminuir la dosis de sulfato de aluminio solo o combinado con cal en aproximadamente un 30% de la dosis que se aplica de este coagulante solo, para obtener efluentes y lodos con calidades similares entre ambos casos.

Finalmente, la Tabla 3.10 muestra el análisis termogravimétrico o humedad de los lodos obtenidos en el tratamiento de aguas residuales con ambas dosis de coagulantes y diferentes dosis de polvos. Estos valores no son significativamente diferentes entre sí, concluyendo que los polvos de mezcla asfáltica no presentan un efecto significativo sobre el contenido de agua de los lodos producidos.



**TABLA 3.10 CONTENIDO DE HUMEDAD PARA LOS LODOS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE MEZCLA ASFÁLTICA**

mg/L DE $Al_2(SO_4)_3$	mg/L DE MEZCLA ASFÁLTICA	HUMEDAD (%)
110 mg/L	0	97.48
	3	98.79
	5	98.91
	10	-
	30	96.25
	60	96.26
150 mg/L	0	96.25
	3	97.13
	5	97.71
	10	-
	30	98.94
	60	97.84

### 3.2.4 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE AGUA NATURAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS" CON $Al_2(SO_4)_3$

Para este tipo de agua, poco cargada de contaminantes, se decidió trabajar únicamente con un coagulante: sulfato de aluminio y diferentes dosis de polvos de mezcla asfáltica. Como en el caso de agua proveniente de Gran Canal, esta parte del estudio se inició con un barrido de propiedades fisicoquímicas para diferentes dosis del coagulante citado.

La Tabla 3.11 muestra los valores promedio de las características fisicoquímicas del agua natural colectada en el tanque de aguas crudas de la planta potabilizadora "Los Berros" a diferentes dosis de sulfato de aluminio. La primera columna representa las propiedades del agua cruda a tratar.

A partir de los resultados de este barrido, se seleccionaron dos dosis: una mínima de 10 mg/L y otra máxima de 25 mg/L de sulfato de aluminio. Con estas dosis de coagulante se realizaron pruebas de jarras para diferentes concentraciones de polvos.



**TABLA 3.13 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LOS EFLUENTES OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FLOCULACIÓN CON DIFERENTES DOSIS DE  $Al_2(SO_4)_3$**

PARÁMETRO FISICOQUÍMICO	DOSIS DE $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)					
	0	5	10	15	25	35
pH	7.86	7.4	7.14	-	7.05	7.01
Turbiedad (UTN)	13.79	5.63	0.58	0.21	0	0
Color (U Pt-Co)	48	25	0.58	10	7	3
DQO total (mg $O_2/L$ )	31	-	-	-	-	-

La Tabla 3.12 muestra los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados del agua natural a tratar con las concentraciones definidas de coagulante y diferentes dosis de residuos asfálticos que oscilan de 0 a 60 mg/L. Estos valores representan el promedio de diferentes corridas, realizadas para tener valores estadísticos más confiables.

**TABLA 3.14 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LOS EFLUENTES DE AGUA NATURAL TRATADA CON SULFATO DE ALUMINIO (10 Y 25 mg/L) Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA**

PARÁMETRO	DOSIS DE $Al_2(SO_4)_3$	DOSIS DE POLVO (mg/L)					
		0	3	5	10	30	60
pH	10 mg/L	7.40	7.49	7.52	7.52	7.51	7.54
	25 mg/L	7.34	7.4	7.43	7.51	7.45	7.53
TURBIEDAD (UTN)	10 mg/L	1.44	0.49	0.22	0.48	0.67	0.39
	25 mg/L	0.96	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0
COLOR (U Pt-Co)	10 mg/L	9.38	3.22	2.75	2.38	3.25	3.75
	25 mg/L	2.38	1.50	0.38	0.13	1.38	1.25
DQO (mg $O_2/L$ )	10 mg/L	3.86	2.14	2.28	2.86	3.71	3.29
	25 mg/L	2.50	2.00	1.38	1.38	0.63	0.75

El efecto benéfico de los polvos de la planta de asfalto en la calidad del efluente tratado es significativo.



Aunque en ninguno de los casos las propiedades fisicoquímicas de los efluentes tratados con una dosis de sulfato de aluminio de 10 mg/L superan las de 25 mg/L para una misma dosis de polvo, podemos comprobar que estos desechos tienen un efecto benéfico debido a que, para una dosificación entre 5 y 10 mg/L de polvos y 10 mg de  $Al_2(SO_4)_3/L$  se observa una remoción más eficiente que la obtenida a una dosis de 25 mg/L de coagulante y sin polvos. Lo anterior nos permite un ahorro del 40% de sulfato de aluminio. La calidad de los lodos producidos para una dosis de coagulante de 10 mg/L se también ve favorecida mediante la adición de los polvos de mezcla asfáltica. La Figura 3.13 muestra los perfiles de las alturas de los lodos producidos en función de los tiempos sedimentación de los flóculos, para la zona de sedimentación por floculación ( $T_2$ ), con una dosis de 10 mg/L de sulfato de aluminio y diferentes dosificaciones de polvos.

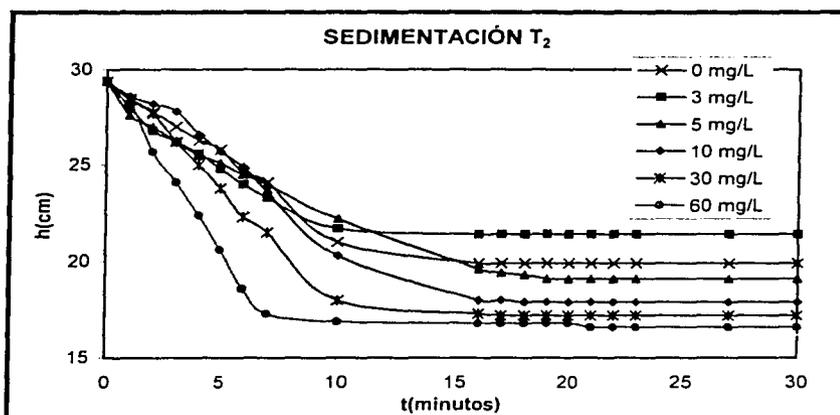


FIGURA 3.13 EVOLUCIÓN DE LAS ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN  $T_2$  EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA UNA DOSIS DE 10 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3/L$  EN DIFERENTES CONCENTRACIONES DE POLVOS ASFÁLTICOS



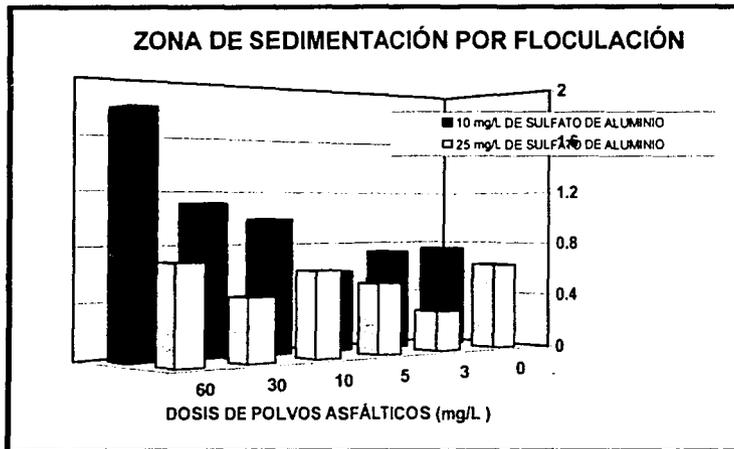


FIGURA 3.14 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA POR FLOCULACIÓN (T<sub>2</sub>)

En las Figuras 3.14 y 3.15 se muestran los resultados obtenidos de las velocidades de sedimentación, respectivamente para las zonas de floculación (T<sub>2</sub>) y sedimentación retardada (T<sub>3</sub>). El Anexo IV contiene estas gráficas junto con sus correlaciones para estas dos zonas de sedimentación (T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>). Esta prueba tiene la finalidad de generar datos que influirán en el diseño del tamaño y tipo de sedimentador que se instala posterior al proceso de coagulación - floculación.

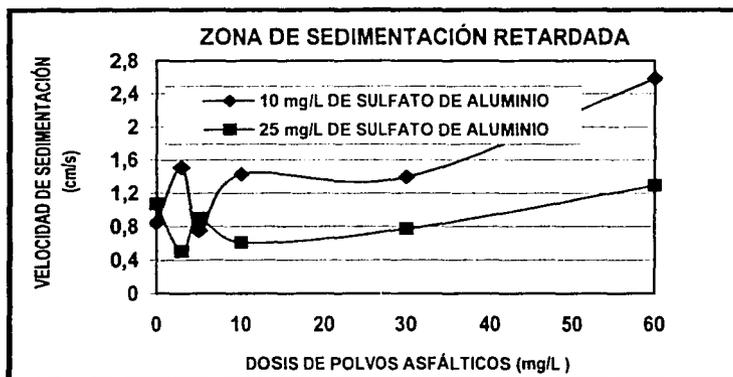
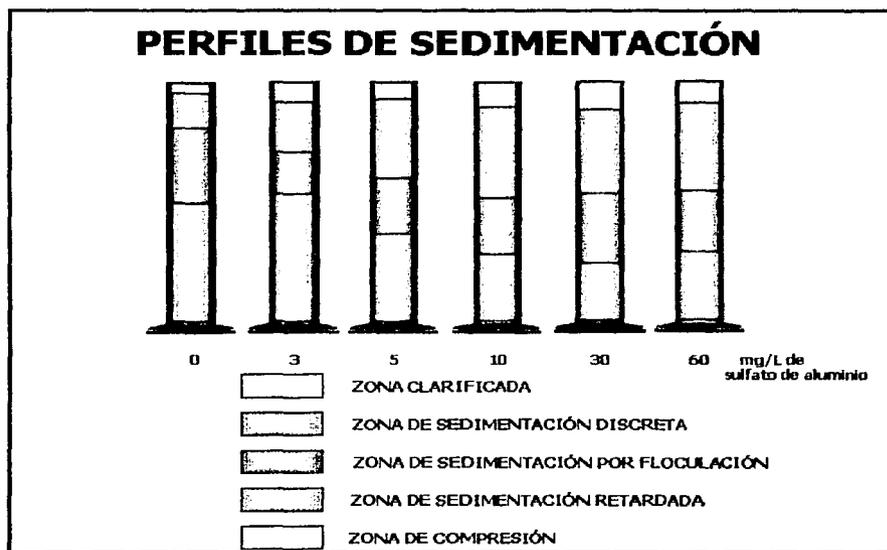


FIGURA 3.15 VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA RETARDADA (T<sub>3</sub>)



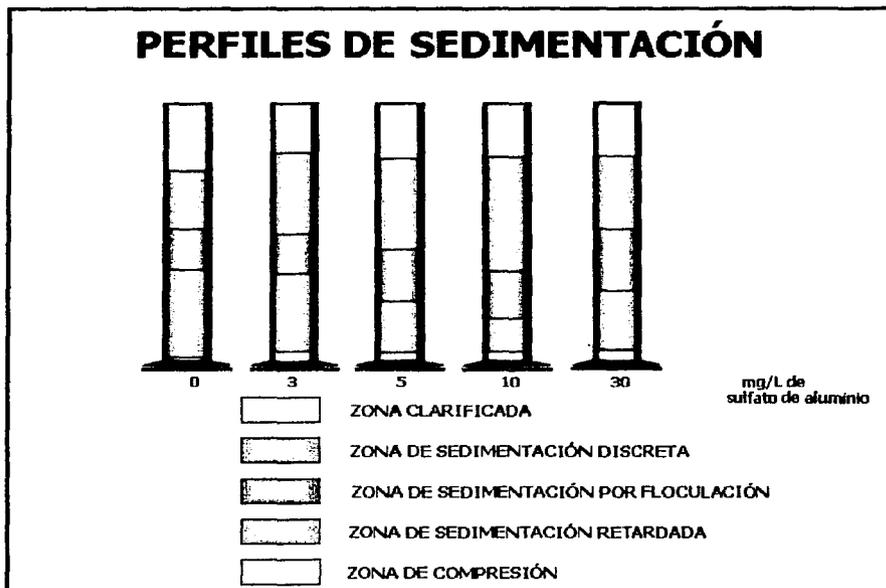
Como se puede observar, las velocidades de sedimentación se ven favorecidas con la adición de polvos de mezcla asfáltica. Es decir, de acuerdo a estos resultados, el floculo formado deberá ser más denso y su tamaño aumentará conforme la concentración de polvos aumente, provocando el diseño de sedimentadores más pequeños y menos costosos en el diseño de una planta potabilizadora. Esta hipótesis se puede verificar al analizar los resultados de perfiles de sedimentación y del estudio de microscopio de los floculos producidos. Las Figuras 3.16 y 3.17 muestran el efecto benéfico de los polvos de mezcla asfáltica sobre los perfiles de sedimentación conforme la dosis de polvos aumenta.

La excelente sedimentación de los lodos, después de añadir los polvos, se debe a que los floculos de las muestras tratadas con estos residuos presentaron un mayor tamaño y densidad. Esto se puede observar de manera más clara en las siguientes fotos tomadas a los floculos de las muestras tratadas con y sin polvos. Las Fotos 3.1, 3.2 y 3.3 muestran las fotos obtenidas en microscopio de los floculos, cuyo tamaño aumenta conforme aumenta la dosis de polvos de mezcla asfáltica.



**FIGURA 3.16 PERFILES DE SEDIMENTACIÓN PARA UNA DOSIS DE 10 mg/L DE SULFATO DE ALUMINIO**





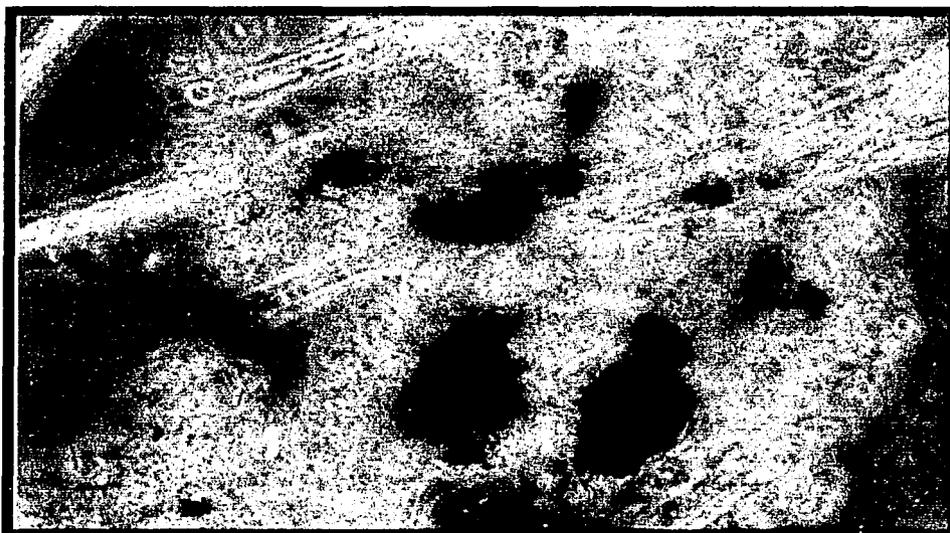
**FIGURA 3.17 PERFILES DE SEDIMENTACIÓN PARA UNA DOSIS DE 25 mg/L DE SULFATO DE ALUMINIO**

En la Foto 3.1 se observa un floculo producido en el proceso de coagulación-floculación del agua cruda de la planta potabilizadora "Los Berros" con 10 mg/L de sulfato de aluminio. Este floculo presenta una densidad de masa menos importante que los floculos obtenidos para esta agua con sulfato de aluminio y polvos de mezcla asfáltica (Fotos 3.2 y 3.3), en los que se puede apreciar una gran aglomeración de partículas que producen zonas muy oscuras y de algas que son englobadas dentro de los floculos. Este último fenómeno es muy importante ya que la presencia de este microorganismo influye de manera negativa el proceso de coagulación-floculación, aumentando como una consecuencia la dosis de coagulante, por lo que es necesario en estos casos adicionar un floculante.



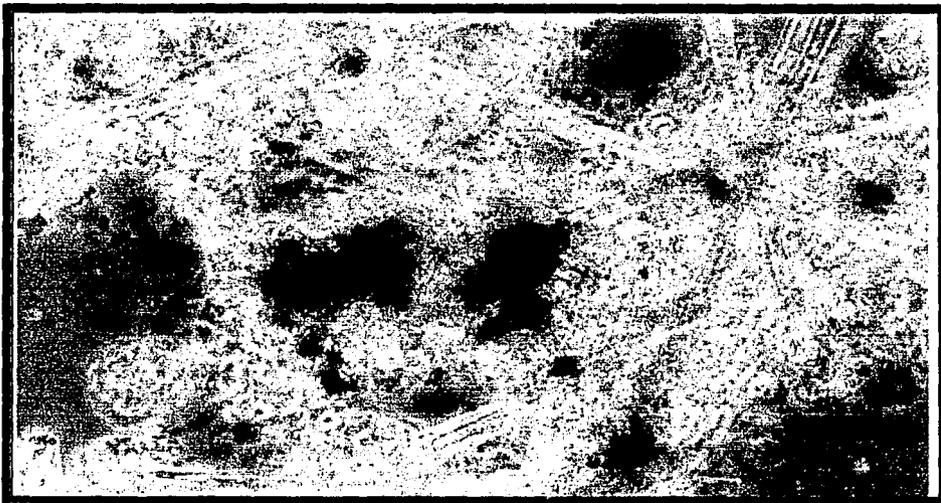


**FOTO 3.1 FLÓCULO PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CRUDA DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS" CON 10 mg/L DE SULFATO DE ALUMINIO,  $Al_2(SO_4)_3$  (X20)**



**FOTO 3.2 FLÓCULO PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CRUDA DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS" CON 10 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$  Y 10 mg/L DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA (X20)**





**FOTO 3.3 FLOCULO PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA CRUDA DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS" CON 10 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$  Y 25 mg/L DE POLVOS DE MEZCLA ASFÁLTICA (X20)**

Para el tratamiento de agua natural no se efectuaron pruebas de sólidos, resistencia específica a la filtración y distribución de partícula debido a que la cantidad de lodos para este tipo de agua es muy pequeña.





# **CAPÍTULO CUATRO**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los polvos de la Planta de Asfalto son materiales provenientes de rocas ígneas de naturaleza basáltica. Estos polvos contienen trazas de compuestos orgánicos. Un estudio previo realizado por la UNAM (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología) demostró que estos materiales no son considerados residuos peligrosos por lo que no representan un riesgo para la salud durante su manejo (salvo por las partículas de diámetro inferior a  $10\ \mu\text{m}$  que pueden alojarse en el aparato respiratorio; el riesgo se elimina completamente con la utilización de mascarillas adecuadas). Los polvos y lodos estudiados están constituidos en más de 50 % por  $\text{SiO}_2$  y contienen cantidades importantes de óxidos de hierro, aluminio y magnesio. La densidad presenta un valor de  $1.3\ \text{g/cm}^3$ .

Con el fin de valorizar estos polvos y debido a que sus características son comparables a la sílice activada (principal floculante de aguas) se evaluó la opción de aplicarlos como productos para el tratamiento de aguas mediante el proceso de coagulación – floculación. Los resultados obtenidos son bastante prometedores.

Los experimentos realizados para evaluar la factibilidad de utilización de los polvos como un producto "ayuda" o coadyuvante en el proceso de coagulación – floculación de aguas ofrecieron excelentes resultados en la remoción de color y turbidez de aguas destinadas para la producción de agua potable y de aguas residuales tratadas. Los experimentos con agua destinada a potabilización se realizaron con agua proveniente de la planta "Los Berros" del sistema Cutzamala. Los experimentos con aguas residuales se realizaron con agua proveniente del Gran Canal de la Ciudad de México.

- La aplicación de polvos de mezcla asfáltica (Unidad 5 de la Planta de Asfalto) como floculantes en el tratamiento de aguas presentan una factibilidad técnica elevada.
- La factibilidad es más importante para la depuración con sulfato de aluminio solo como coagulante de aguas naturales superficiales utilizadas como fuentes de producción de agua potable (Planta potabilizadora "Los Berros", Sistema Cutzamala) en comparación a aguas residuales.
- Las dosis elevadas (3-60 mg/L) de polvos de mezcla asfáltica permiten disminuir de manera significativa la cantidad aplicada de coagulante (sulfato de aluminio) por volumen de agua, obteniendo un efluente y lodos de características fisicoquímicas aceptables. En el caso de



aguas residuales la dosis se reduce de 120-150 a 90-110 mg/L y, para aguas naturales, la dosis disminuye de 25 a 10 mg/L.

- Los lodos producidos en el proceso de coagulación-floculación de aguas, con la aplicación de los polvos de mezcla asfáltica, presentan excelentes características de sedimentación, lo que permitiría disminuir las dimensiones de los equipos de sedimentación a instalar o la eficiencia de los sedimentadores instalados.
- Las propiedades de floculante que presentan los polvos de mezcla asfáltica se deben probablemente al importante contenido de óxido de sílice, lo cual los hace comparables a la sílice activada (floculante).

➤ **Recomendaciones para utilizar los polvos como Co-adyuvante del proceso de coagulación-floculación**

1. Identificar fabricantes y distribuidores de productos químicos para el tratamiento de aguas
2. Elaborar una propuesta de pruebas de tratabilidad por coagulación – floculación de aguas previamente seleccionadas por las empresas interesadas
3. Comparar los resultados de las pruebas realizadas por un laboratorio representante de la PADF con los de un laboratorio acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) seleccionado para realizar las funciones de tercería
4. Evaluar las ventajas y posibles inconvenientes de la utilización de los polvos de la PADF
5. Establecer contratos para la comercialización de los polvos como un producto de aplicación en el tratamiento de agua potable y de aguas residuales





# **BIBLIOGRAFIA**

## BIBLIOGRAFÍA

**APHA, AWWA Y WPCF (1998).** Standard Methods for Water and Wastewater Examination, 20<sup>th</sup> edn. American Public Health Association, Washington, D.C.:, USA.

**Bratby J. R. (1981).** "Optimizing coagulants and flocculants aids for settling". AWWA, junio, p.p. 312-318.

**Cohen J M., Hannah S. (1971).** "Coagulation and flocculation". AWWA, Mc Graw Hill, pp 21-66, 173-327

**Company A. (1989).** "Tratamientos fisicoquímicos de depuración de aguas residuales". Ing. Quím., enero, pp 134-142.

**Degremont (1979).** "Water treatment handbook". John Wiley and sons, pp 135-145.

**Hernández M. A. (1990).** "Depuración de aguas residuales". Colección Seinor, p.p. 369-385.

**Lo S.L., Tsao Y.C. (1997)** Economic analysis of waste minimization for electroplating plants, *Wat. Sci. Tech.*, 36 (2-3):383-390

**Luna M. (2001).** "Plantamiento y evaluación experimental de opciones para la valoración de los polvos de desecho de una planta productora de asfalto". Ing. Quím. Instituto de ingeniería, U.N.A.M.

**Marín G. (1989).** "Coagulación-floculación de aguas: una visión de los coagulantes más utilizados". Ing. Quím., enero, pp 115-120.

**NOM-052-ECOL/1993**

**NOM-053-ECOL/1993**





**ANEXOS**

## ANEXO I. METODOLOGÍA

### III.A PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS CONVENCIONALES PARA LA DETERMINACIÓN DEL INFLUENTE Y EFLUENTE

Las técnicas utilizadas para la determinación de los parámetros físicoquímicos convencionales son las recomendadas por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998).

#### ☒ POTENCIAL DE HIDRÓGENO

La medida de pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico de agua. Prácticamente todas las fases del tratamiento de agua para suministro y residual, como la neutralización ácido-base, suavizado, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión, dependen del pH. El pH se utiliza en las determinaciones de alcalinidad y dióxido de carbono y en muchos otros equilibrios ácido-base. A una temperatura determinada, la intensidad del carácter ácido o básico de una solución viene dada por la actividad del ion hidrógeno o pH. La alcalinidad y acidez son las capacidades neutralizantes de ácidos y bases de un agua, y normalmente se expresan como miligramos de  $\text{CaCO}_3$  por litro. La capacidad tampón es la cantidad de ácido o base fuerte, normalmente expresada en moles por litro, necesaria para cambiar el valor de pH de 1 L de muestra en 1 unidad. El pH queda definido como:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+].$$

Debido a las interacciones en todas las soluciones, excepto en las muy diluidas, es necesario utilizar la actividad de un ion y no su concentración molar. El uso del término pH supone que se está considerando la actividad del ion hidrógeno.

El valor del pH de una solución muy diluida es aproximadamente el mismo que el logaritmo común negativo de la concentración del ión hidrógeno. Las aguas naturales tienen generalmente valores de pH en la zona de 4 a 9, y la mayoría son ligeramente básicas debido a la presencia de bicarbonatos y carbonatos de los metales alcalinos y alcalinotérreos.

El potenciómetro usado fue ORION modelo 410A.

#### ☒ COLOR

El color del agua puede estar condicionado por la presencia de iones metálicos naturales (hierro y manganeso), de humus y turbas, de plancton, de restos vegetales y de residuos industriales. Tal coloración se elimina para adaptar un agua a sus usos generales e industriales.



**Definición.** El término color se asocia aquí al concepto de color puro, esto es, el color de agua cuya turbidez ha sido eliminada. El término color aparente engloba no sólo el color debido a las sustancias, sino también a las materias en suspensión. El color aparente se determina en la muestra original sin filtrado ni centrifugado. En algunas aguas residuales industriales muy coloreadas, el color se debe principalmente a materiales coloidales o en suspensión. En estos casos deben determinarse ambos colores, el aparente y el real.

**Método.** Espectrofotométrico.

- a. Principio. El color de una muestra filtrada se expresa en términos que describen la sensación percibida al observarla. La tonalidad (rojo, amarillo, verde, etc) se define como "longitud de onda dominante", el grado de brillantez como "luminiscencia" y la saturación (pálido, pastel, etc.) como "pureza". Como mejor se detectan estos valores es a partir de las características de transmisión de la luz de una muestra filtrada, mediante espectrofotometría.
- b. Aplicación. Este método es aplicable en aguas potables y de superficie, y en aguas residuales, tanto domésticas como industriales.
- c. Interferencia. Interfiere la turbidez.
- d. Instrumental. Un espectómetro HACH modelo DR/2010, un sistema adecuado de filtración conformado por matraz de filtrado, soporte de crisol Walter, crisol de filtro micrometálico y sistema de vacío.
- e. Procedimiento.
  1. Tome dos muestras de 50 mL a temperatura ambiente. Utilice una a pH original y ajuste el pH de la otra a 7.6 con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e hidróxido sódico (NaOH), a concentraciones adecuadas para que el cambio de volumen no exceda el 3%. Es necesario un pH estándar debido a la variación de color con el mismo. Elimínesese por centrifugado el exceso de materia en suspensión.
  2. Limpie meticulosamente las celdas de absorción de 1 cm con detergente y enjuague con agua destilada. Aclare dos veces por muestra filtrada y limpie las superficies externas con papel para envolver vidrios ópticos y a continuación llene la celda con la muestra filtrada.
  3. El espectómetro HACH modelo DR/2010 da la medida de color en unidades Pt-Co automáticamente. Es oportuno mencionar que el espectrofotómetro tiene como principio la ley de Lambert – Beer, que relaciona la cantidad de luz transmitida por una solución con la concentración de un constituyente que absorbe luz.

$$\log \frac{I_0}{I} = A = abC$$



Donde:

$I$  = Intensidad de luz monocromática transmitida a través de la solución acuosa de prueba,

$I_0$  = Intensidad de luz transmitida a través de la solución de referencia del blanco,

$A$  = Absorbancia (adimensional),

$b$  = Longitud de la trayectoria luminosa (cm),

$C$  = concentración de soluto, g/L.

Por lo que para una determinada solución la absorbancia es directamente proporcional a la longitud de la trayectoria luminosa y a la concentración de la sustancia absorbente.

## ☞ TURBIDEZ

**Definición.** La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disperse o absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra. Esta es producida por materia en suspensión, como arcilla, cieno o materias orgánicas e inorgánicas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros microorganismos.

La correlación de la turbidez con la concentración en peso de la materia en suspensión es difícil de establecer, ya que en la dispersión luminosa también intervienen el tamaño, la forma y el índice de refracción de las partículas. Partículas como las de carbono activado, pueden absorber luz y aumentar significativamente las cifras de turbidez. Los resultados de las medidas nefelométricas se expresan en unidades nefelométricas de turbidez (UNT).

**Método.** Nefelométrico.

- a. Principio. Éste método se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas y la dispersada por una solución patrón de referencia en idénticas condiciones. Cuanto mayor es la intensidad de la luz dispersada, más intensa es la turbidez. Como suspensión patrón se utiliza la formacina. La turbidez de una concentración especificada de suspensión de formacina se define como el equivalente a 40 unidades nefelométricas.
- b. Interferencia. La turbidez puede determinarse en cualquier muestra de agua libre de residuos y privada de sedimentos gruesos. La suciedad del vidrio, la presencia de burbujas de aire y los efectos de las vibraciones que alteran la visibilidad superficial de la muestra, conducirán a resultados falsos.



c. Instrumental. Se emplea un turbidímetro HANNA modelo LP 2000 que es un nefelómetro con una fuente de luz para iluminar la muestra, y uno o más detectores fotoeléctricos con un dispositivo de lectura exterior para indicar la intensidad de la luz dispersada a  $90^\circ$  de la vía de la luz incidente.

d. Procedimiento.

1. El turbidímetro debe ser calibrado de acuerdo a las instrucciones del fabricante.
2. Agite cuidadosamente la mezcla. Espere a que desaparezcan las burbujas de aire y vierta la muestra en el tubo del turbidímetro. Si la medida registrada excede las 40 UNT, diluya la muestra y el resultado obtenido se multiplicara por el factor de dilución.

## ☒ DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

**Definición.** La demanda química de oxígeno (DQO) es la medida del equivalente de oxígeno contenido de materia orgánica de una muestra susceptible de oxidación por un oxidante químico fuerte. Se prefiere el método de reflujo de bicromato a los procedimientos que utilizan otros oxidantes debido a su mayor capacidad oxidante, a su aplicabilidad, a una mayor variedad de muestras y a su fácil manipulación.

- a. Interferencias. Este método presenta interferencias de los compuestos alifáticos de cadena lineal volátiles no se oxidan de forma apreciable. Esto ocurre en parte porque los compuestos orgánicos volátiles están presentes en forma de vapor y no entran en contacto con el líquido oxidante. Los compuestos alifáticos de cadena lineal se oxidan con mayor eficiencia cuando se añade sulfato de plata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) como catalizador. Sin embargo, el  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  reacciona con el cloro, el bromo y el yodo para poder producir precipitados oxidados sólo parcialmente. Las dificultades causadas por la presencia de haluros pueden ser superadas mediante la formación de un complejo con el sulfato de mercurio ( $\text{HgSO}_4$ ) antes del procedimiento de reflujo. Si bien se ha especificado 1 g de  $\text{HgSO}_4$  para 50 mL de muestra, es posible utilizar una cantidad menor cuando se sabe que la concentración de cloruro de la muestra es inferior a 2.000 mg/L, siempre que se mantenga una porción 10:1 de  $\text{HgSO}_4$ :Cl<sup>-</sup>. No utilizar la prueba para muestras que contengan más de 2.000 mg Cl<sup>-</sup>/L.

El nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) ejerce una DQO de 1.1 mg  $\text{O}_2$ /mg de  $\text{NO}_2$ -N. Ya que las concentraciones de  $\text{NO}_2^-$  en el agua raramente exceden de 1 o 2 mg de  $\text{NO}_2$ -N/L, la interferencia se considera no significativa y suele ser ignorada. Para eliminar una interferencia significativa debida al  $\text{NO}_2^-$ , añada 10 mg de ácido sulfámico por cada mg de  $\text{NO}_2$ -N presente en el volumen de muestra utilizado; añadiendo la misma cantidad al vaso de reflujo que contenga el blanco de agua destilada.

Las especies inorgánicas reducidas, tales como el manganeso manganoso, hierro ferroso, el sulfuro, etc. Resultan oxidadas cuantitativamente bajo las condiciones de prueba. Para muestras



que contengan niveles significativos de estas especies, puede suponerse una oxidación estequiométrica a partir de la concentración inicial conocida de las especies que interfieren, y se pueden hacer las correcciones para el valor de DQO obtenido.

- b. Toma de muestra y almacenamiento. Preferentemente, recoja las muestras en frascos de cristal. Realizando la prueba sin demora. Si es inevitable el retraso
- c. Principio. La mayor parte de la materia orgánica resulta oxidada por una mezcla a ebullición de los ácidos crómico y sulfúrico. Se somete a reflujo una muestra en una solución ácida fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ). Después de la digestión, el  $K_2Cr_2O_7$  no reducido que quede, se determina con sulfato de amonio ferroso para determinar la cantidad de  $K_2Cr_2O_7$  consumido y calcular la materia orgánica oxidable en términos de equivalente de oxígeno. Mantenga constante las proporciones de pesos de reactivos, de volúmenes y de concentraciones cuando se utilicen volúmenes de muestra distintos de 50 mL. El tiempo estándar de reflujo de dos horas puede reducirse si se ha demostrado que un período más corto produce los mismos resultados.
- a. Instrumental. Consiste en vasos de digestión (ampollas de borosilicato de capacidad de 10 mL de 19 a 20 mm de diámetro, Bloque de calentamiento de aluminio fundido, 45 a 50 mm de profundidad, con agujeros ajustados al tamaño de las ampollas, horno o calentador de bloque que funcione a  $150 \pm 2^\circ C$ , selladores de ampolla únicamente con sellador mecánico para asegurar un cierre fuerte y consistente. Y espectrofotómetro para usar a 600 nm con adaptador de apertura de acceso para ampollas o tubos de 16, 20 o 25 mm.

b. Reactivos.

1. Solución de digestión. Añada a 500 mL de agua destilada 10.216 g de  $K_2Cr_2O_7$ , de calidad para reactivos estándar primaria, previamente secado a  $103^\circ C$  durante dos horas, 167 mL de  $H_2SO_4$  concentrado y 33.3 g de  $H_2SO_4$ . Disuelva, enfríe a temperatura ambiente y diluya hasta 1000 mL.
2. Reactivo de ácido sulfúrico: Añada  $Ag_2SO_4$ , de la calidad para reactivos o técnica, en cristales o polvo, a  $H_2SO_4$  concentrado en proporción de 5.5 g de  $Ag_2SO_4$ /Kg de  $H_2SO_4$ . Deje reposar de 1 a 2 días para disolver  $Ag_2SO_4$ .
3. Ácido sulfámico: Sólo si se desea la eliminación de los nitritos.
4. Ftalato de hidrógeno de potasio (FHP) patrón. Triture ligeramente y seque el ftalato de hidrógeno de potasio ( $HOCC_6H_4COOK$ ) a peso constante de  $120^\circ C$ . Disuelva 425 mg en agua destilada y diluya hasta 1000 mL. El FHP tiene un DQO teórico de 1.176 mg  $O_2$ /mg y un DQO teórico de  $500 \mu g O_2$ /mL. Es estable cuando se congela en ausencia de crecimiento biológico visible.

c. Procedimiento.



1. Lave los tubos de cultivo y los tapones con  $H_2SO_4$  al 20 % antes de usarlos por primera vez para evitar contaminación. Tratamiento de las muestras: Mida el volumen apropiado de muestra y reactivos sen un tubo o en una ampolla como se indica en la siguiente tabla.

Vaso de digestión	Muestra mL	Solución de digestión mL	Reactivo ácido sulfúrico mL	Volumen total final mL
Tubos de cultivo:				
16 * 100 mm	2.5	1.5	3.5	7.5
20 * 150 mm	5.0	3.0	7.0	15.0
25 * 150 mm	10.0	6.0	14.0	30.0

Coloque la muestra en el tubo de cultivo y añada la solución de digestión. Vierta con cuidado el ácido sulfúrico en el vaso, formando una capa de ácido debajo de la capa de la solución de digestión. Apriete el tapón de los tubos e invierta varias veces cada uno de ello para mezclar completamente. **PRECAUCIÓN:** Utilice mascarilla en la cara y protéjase las manos del calor producido al mezclar el contenido en el vaso. Mezcle por completo antes de aplicar calor para evitar el calentamiento local del fondo del vaso y una posible reacción explosiva.

Coloque los tubos en un digestor de bloque precalentado a 150°C y someta a reflujo a 150°C durante 2 horas. Enfríe a temperatura ambiente y coloque los vasos en la rejilla de tubos de ensayo.

Determinación de la reducción de dicromato: Invierta las muestras enfriadas, el blanco y los patrones varias veces y deje que los sólidos se depositen antes de medir la absorbancia. Inserte el tubo cerrado a través de la puerta de acceso en la trayectoria de la luz del espectrofotómetro ajustado a 600 nm. Lea la absorbancia y compare con la curva de calibración. Deseche el material de vidrio rayado o manchado.

Para esta prueba se utilizó un espectrofotómetro HACH modelo DR/2010 el cual te da una medida instantánea.



## ii. EVALUACIÓN DE LODOS

### ☞ SÓLIDOS

**Definición.** Sólidos son los materiales suspendidos o disueltos en aguas limpias o residuales. Estos pueden afectar negativamente la calidad del agua o a su suministro de varias maneras. Para el agua potable es deseable un límite de 500 mg/L de sólidos disueltos.

Los "sólidos totales" son los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de la muestra. Y su consecutivo secado en estufa a temperatura definida. Los sólidos totales incluyen a los "sólidos totales suspendidos", o porción de sólidos totales retenidos por un filtro, y los "sólidos disueltos totales" o porción que atraviesa un filtro.

"Sólidos fijos" es la expresión aplicada al residuo de sólidos totales, suspendidos o disueltos después de someterse a la ignición durante un tiempo determinado y a una temperatura especificada. La pérdida por ignición se debe a los "sólidos volátiles". La pérdida de peso por ignición se debe a los "sólidos volátiles". Las determinaciones de sólidos fijos y volátiles no distinguen exactamente entre materias orgánica e inorgánica porque la pérdida de peso por ignición no se limita al material orgánico, sino que incluye también pérdida por descomposición o volatilización de algunas sales minerales.

La temperatura a la que se seca el residuo incide en gran medida en los resultados, debido a que las pérdidas de peso derivadas de la volatilización de materia orgánica, el agua ocluida, el agua de cristalización y los gases a partir de la descomposición inducida por el calor, así como las ganancias producidas por la oxidación, dependen de la temperatura y tiempo de calentamiento.

Los residuos secados a 103 - 105°C pueden retener no solamente agua de cristalización, sino también algo de agua ocluida. Como resultado de la conversión del bicarbonato en carbonato, habrá una pérdida de CO<sub>2</sub>. La pérdida de material orgánico por volatilización será por lo general muy ligera. Dado que la eliminación de agua ocluida es marginal a esta temperatura, la obtención de peso constante puede ser muy baja.

### ❖ SÓLIDOS TOTALES

- a. Principio. Se evapora una muestra correctamente mezclada en una placa pesada y secada a peso constante en un horno a 103-105°C. El aumento de peso sobre el de la placa vacía representa los sólidos totales.



- b. Interferencias. El agua fuertemente mineralizada con una concentración significativa de calcio, magnesio, cloruro y/o sulfato puede ser higroscópico y requerir un secado prolongado, una desecación adecuada y un pesado rápido. Elimine las partículas gruesas flotables o los aglomerados sumergidos de materiales no homogéneos si se decide que su inclusión no es deseable en el resultado final.
- c. Instrumental. Se requerirán placas de evaporación, horno de mufla para operar a  $550 \pm 50$  °C, baño de vapor, desecador, horno de secado para operaciones a  $103-105$ °C y balanza analítica.
- d. Procedimiento. Si se van a medir sólidos volátiles, incínese una placa de evaporación limpia a  $550 \pm 50$ °C durante una hora en un horno de mufla. Para sólidos totales caliente la placa limpia a  $103-105$ °C durante una hora. Conserve la placa en el desecador hasta que se necesite. Pesar inmediatamente antes de usar.
- Elija un volumen de muestra que proporcione un residuo entre 2.5 y 200 mg. Transfiera el volumen medido y bien mezclado a la placa pesada previamente y evapórese hasta que se seque en el horno de secado. Secar la muestra evaporada al menos durante una hora en horno a  $103-105$ °C, enfriar la placa en el desecador para equilibrar la temperatura y pesar. Repita el ciclo de secado, enfriado, desecación y pesado hasta obtener un peso constante.
- e. Cálculos.

$$\text{mg de sólidos totales/L} = \frac{(A - B) * 1000}{\text{vol. de muestra, mL}}$$

Donde:

A = peso de residuo seco + placa, mg

B = peso de la placa, mg

#### ❖ SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN SECADOS A $103-105$ °C

- a. Principio. Se filtra una muestra bien mezclada por un filtro estándar de fibra de vidrio, y el residuo retenido en el mismo se seca a un peso constante a  $103-105$ °C. El aumento de peso del filtro representa los sólidos totales en suspensión. Si este material obtura el filtro y prolonga la operación de filtrado, la diferencia entre el total de sólidos y el total de sólidos disueltos puede proporcionar un cálculo aproximado de los sólidos totales en suspensión.
- b. Interferencia. Elimine las partículas gruesas flotables o los aglomerados sumergidos en la muestra. Si los tiempos de filtración son prolongados, consecuencia de la obstrucción del filtro, pueden originar resultados altos debidos a una cantidad excesiva de sólidos capturados en el filtro obturado.



- c. Instrumental. Además de los instrumentos descritos en el procedimiento anterior, se requiere de plancheta, acero inoxidable o aluminio de 65 mm de diámetro.
- d. Procedimiento. Inserte el disco de filtrado con la cara rugosa hacia arriba en el aparato de filtrado. Hágase el vacío y lávese el disco con tres volúmenes de 20 mL de agua destilada. Traslade el filtro del aparato de filtrado a una plancheta de aluminio o acero inoxidable. Seque en el horno a 103 -105°C durante una hora. Si se van a medir sólidos volátiles, incínere a 550 ± 50°C en la mufla, enfríe en el desecador para equilibrar la temperatura y proceda a pesar. Repita este ciclo hasta obtener un peso constante y conserve el papel filtro en el desecador hasta que se necesite. Pesar inmediatamente antes de usar. El papel filtro empleado fue WHATMAN No. 40. Se monta el aparato de filtrado y el filtro y se inicia la succión. Filtre un volumen medido de muestra bien mezclada por el filtro de fibra de vidrio. Lave con tres volúmenes sucesivos de agua destilada, permitiendo el drenaje completo del filtro entre los lavados, y continúe la succión 3 minutos después de terminado el filtrado. Separe cuidadosamente el filtro del aparato y traslade a una plancha de aluminio o acero inoxidable. Seque en el horno a 103-105°C durante una hora al menos, enfríe en un desecador para equilibrar la temperatura y pese. Repita el ciclo hasta obtener un peso constante.

e. Cálculo.

$$\text{mg de sólidos totales en suspensión/L} = \frac{(A - B) * 1000}{\text{Vol. de muestra, mL}}$$

donde:

A = peso del filtro + residuo seco, mg

B = peso del filtro, mg

❖ **SÓLIDOS FIJOS Y VOLÁTILES INCINERADOS A 550°C**

- a. Principio. El residuo obtenido con los métodos explicados en el anexo 3.4.3.1 y 3.4.3.2 se incineran a peso constante a una temperatura de 550 ± 50°C. Los sólidos remanentes representan los sólidos totales fijos, disueltos o en suspensión, mientras que la pérdida de peso por ignición representa los sólidos volátiles. La determinación es útil para el control de las operaciones en plantas de tratamiento de aguas residuales, porque ofrece un cálculo aproximado de la cantidad de materia orgánica presente en la fracción sólida del agua residual, lodos activados y residuos industriales.
- b. Interferencias. Durante el proceso de secado pueden producirse errores negativos en los sólidos volátiles por pérdida de materia evaporable. La determinación de bajas concentraciones de sólidos volátiles por pérdidas de materia evaporable. La determinación de bajas concentraciones



de sólidos volátiles y presencia de concentraciones elevadas de sólidos fijos tales como cenizas y otros compuestos.

2. INCINERACIÓN. Se pesará e hizo el peso de las secciones anteriores.
3. PROCEDIMIENTO. Ponerse a resaca el producto con los medios indicados en el punto 1. La resaca será constante en un horno de mufla a temperatura de  $550 \pm 50^\circ\text{C}$ . Se deberá esperar a tanto en esta temperatura antes de introducir la muestra. La incineración se realizará durante de 15 minutos. Entre a placa o el peso de filtro a ser hasta que se haya consumido el 90% y transferir a un desecador para proceder a su enfriamiento final en una atmósfera seca. Pese la placa en un horno de resaca enfriado para equilibrar a temperatura. Pese de 100 hasta obtener un peso constante.
4. CÁLCULO

$$\text{mg de sólidos volátiles/L} = \frac{(A - B) * 1000}{\text{Vol. de muestra, mL}}$$

$$\text{mg de sólidos fijos/L} = \frac{(A - B) * 1000}{\text{Vol. de muestra, mL}}$$

Donde:

A = peso de residuo + placa antes de incineración, mg.

B = peso de residuo + placa o filtro después de la incineración, mg

C = peso de la placa o filtro, mg



## ANEXO II. ANÁLISIS CRETIB

Con el objetivo de cumplir reglamento de la L.G.E.E.P.A. en materia de residuos peligrosos, así como las normas oficiales mexicanas NOM-052-ECOL/1993 Y NOM-052-ECOL/1993 se realizó un estudio C.R.E.T.I.B., el cual genera si un material o residuo es peligroso o no. Estas características se encuentran en el siguiente listado de manera concisa:

- ☒ **Corrosividad.**- Un residuo se considera peligroso por corrosividad cuando:
- En estado líquido en solución acuosa presenta un pH menor ó igual a 2.0 o mayor ó igual a 12.5.
  - En estado líquido o en solución acuosa y a una temperatura de 55 °C, es capaz de corroer el acero al carbón (SAE 10 20), a una velocidad de 6.35 mm o más por año.
- ☒ **Reactividad.**- Un residuo es peligroso por su reactividad cuando:
- Bajo condiciones normales (25 °C y 1 atm), se combina o polimeriza violentamente sin detonación.
  - En condiciones normales (25 °C y 1 atm), cuando se pone en contacto con agua en relación residuos- agua de 5:1, 5:3, 5:5, reacciona violentamente formando gases, vapores o humos.
  - Bajo condiciones normales, cuando se pone en contacto con soluciones de pH; ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N), en relación (residuo - solución), de 5:1, 5:3, 5:5, reacciona violentamente formando gases, vapores o humos.
  - Posee en su constitución cianuros o sulfuros que cuando se exponen a condiciones de p H entre 2.0 y 12.5, pueden generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a 250 mg de HCl/kg de residuo ó 500 mg de H<sub>2</sub>S/kg de residuo.
  - Es capaz de producir radicales libres.
- ☒ **Explosividad.**- Un residuo puede ser considerado peligroso por su explosividad cuando:
- Tiene una constante de explosividad igual o mayor a la del dinitrobenzeno.
  - Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva, a 25 °C y 1.03 kg/cm<sup>2</sup> de presión.
- ☒ **Toxicidad al ambiente.**- Un residuo se considera peligroso por su toxicidad al ambiente, cuando después de aplicar la prueba de extracción para toxicidad, el lixiviado de la muestra representativa obtenido contenga cualquiera de los constituyentes listados en las Tablas 5, 6 y 7 (anexo 5), en concentraciones mayores a las señaladas en dichas tablas.



⌘ **Inflamabilidad.-** Un residuo se considera peligroso por su inflamabilidad, cuando:

- En solución acuosa, contiene más del 24 % de alcohol en volumen.
- Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60 ° C.
- No es líquido pero es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos ( a 25 °C y 1.03 kg/cm<sup>2</sup>).
- Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión.

⌘ **Características biológico infecciosas.-** Un residuo con características biológico infecciosas se considera peligroso por lo siguiente:

- Contiene bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección.
- Contiene toxinas producidas por microorganismos que causen efectos nocivos a seres vivos.

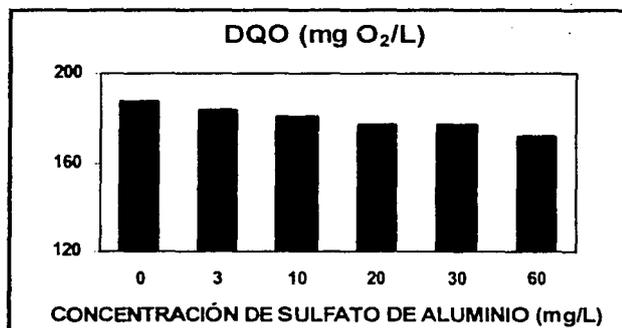
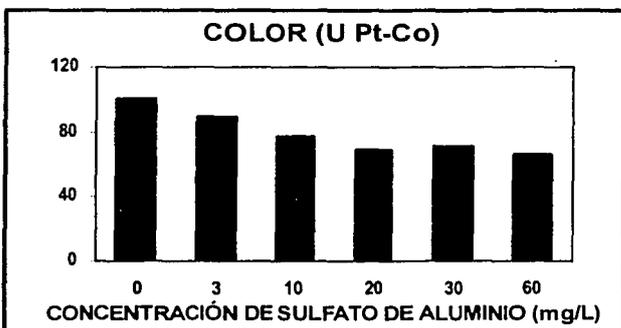
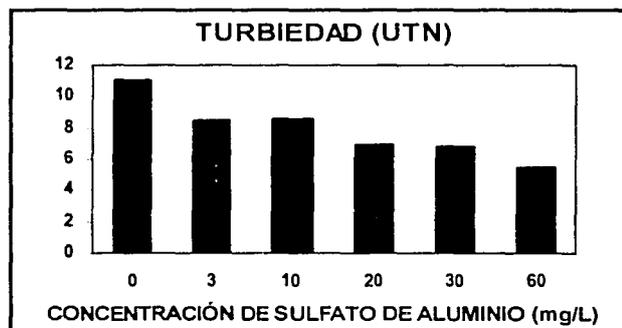
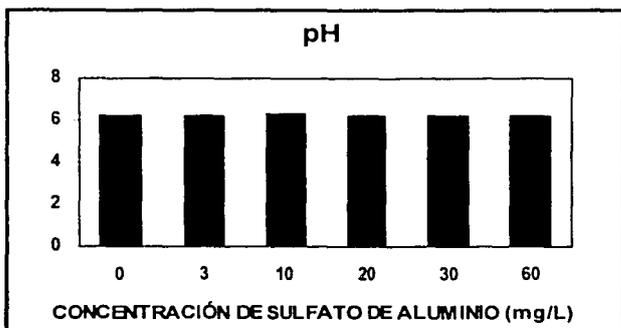


## ANEXO III. AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ Y CAL

### I. DOSIS DE 110 mg/L DE $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ Y CAL

#### > PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

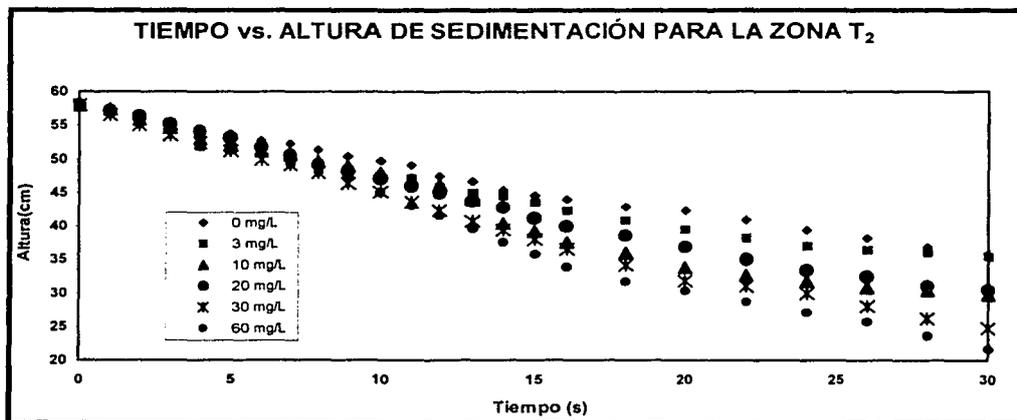
		DOSIS DE POLVO (mg/L)					
		0	3	10	20	30	60
pH	1	6.19	6.25	6.4	6.2	6.35	6.34
	2	6.3	6.16	6.2	6.23	6.15	6.05
	PROMEDIO	6.245	6.205	6.3	6.215	6.25	6.195
TURBIEDAD (UTN)	1	10.22	11.15	11.85	9.6	9.02	7.6
	2	11.93	5.77	5.24	4.17	4.59	3.31
	PROMEDIO	11.075	8.46	8.545	6.885	6.805	5.455
COLOR (U Pt-Co)	1	114	110	103	101	100	100
	2	87	69	52	38	43	34
	PROMEDIO	100.5	89.5	77.5	69.5	71.5	67
DQO (mg $\text{O}_2$ /L)	1	184	183	180	179	179	175
	2	191	185	182	176	175	169
	PROMEDIO	187.5	184	181	177.5	177	172



➤ VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

❖ ZONA DE SEDIMENTACIÓN POR FLOCULACIÓN (T<sub>2</sub>)

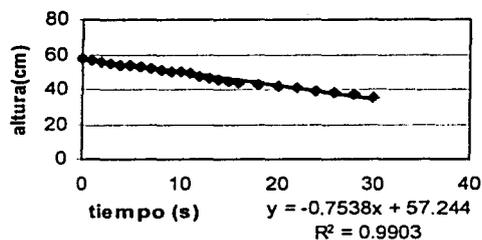
ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm)						
TIEMPO (minutos)	mg de polvos/L					
	0	3	10	20	30	60
0	58	58	58	58	58	58
1	57	57.4	57.4	57.2	56.6	57.2
2	56.2	56.2	55.8	56.4	55	56.2
3	55.3	55.2	54.6	55.2	53.6	54.6
4	54.3	51.9	53	54.2	52.4	53.5
5	53.7	51.5	52	53.2	51.2	52.1
6	52.8	50.9	51.2	51.8	50	50.7
7	52.3	50.5	50.6	50.6	49.2	49.3
8	51.4	49.3	49.8	49.2	48	48.1
9	50.4	48.5	49	48.2	46.4	47.5
10	49.8	47.5	48	47.2	45.2	45.1
11	49.1	47.1	47	46	43.6	43.1
12	47.5	46.9	46.2	45	42.4	41.6
13	46.7	46.7	45.8	43.8	40.8	39.6
14	45.4	44.5	40.4	42.8	39.4	37.6
15	44.6	43.5	39.2	41.2	38	35.8
16	44	42.3	37.6	40	36.6	33.9
18	42.9	40.8	36	38.6	34.2	31.7
20	42.3	39.4	33.8	36.8	31.8	30.3
22	40.9	38.2	32.6	35	31	28.7
24	39.4	37	31.8	33.4	30	27.1
26	38.2	36.4	30.8	32.4	28	25.7
28	36.8	36	30.4	31	26.2	23.7
30	35.7	35.4	29.8	30.4	24.8	21.6



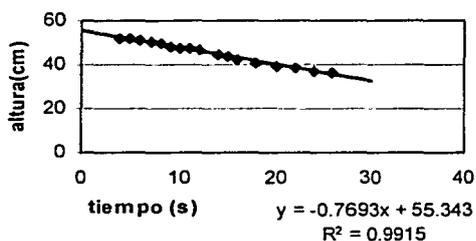
### VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN (T<sub>2</sub>)

mg polvo/L	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm/min)	CORRELACIÓN
0	0.7538	0.9903
3	0.7693	0.9915
10	0.9893	0.9918
20	1.0753	0.9963
30	1.3120	0.9984
60	1.2732	0.9940

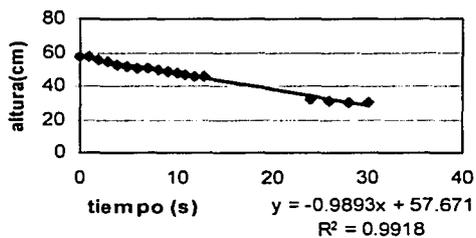
0 mg de polvos/L



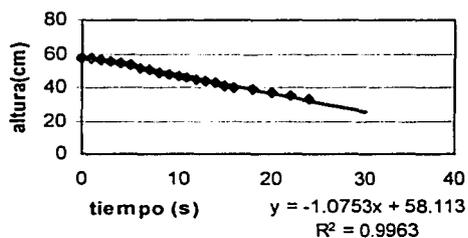
3 mg de polvos/L



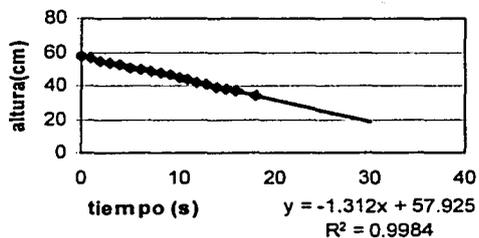
10 mg de polvos/L



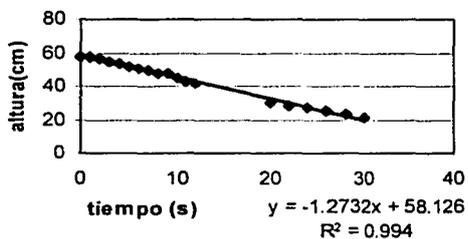
20 mg de polvos/L



30 mg de polvos/L

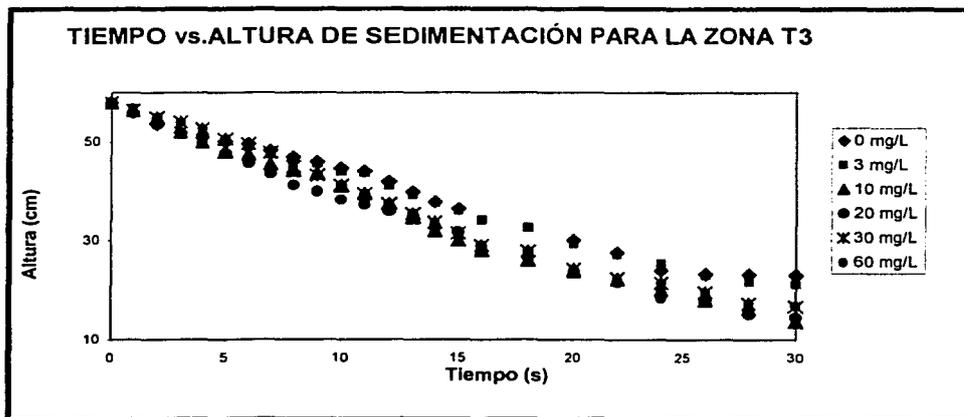


0.06 g de polvo/L



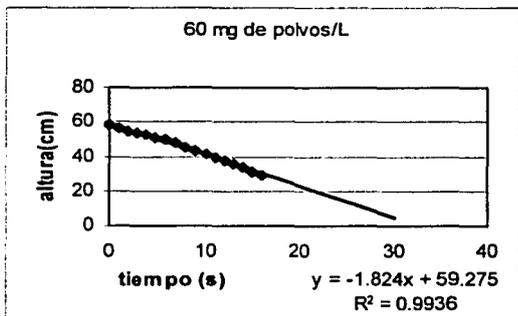
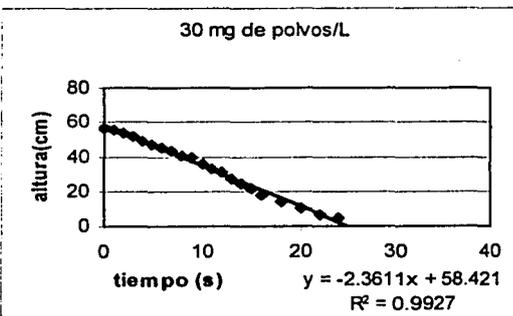
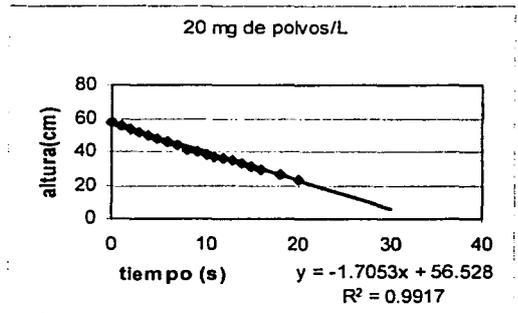
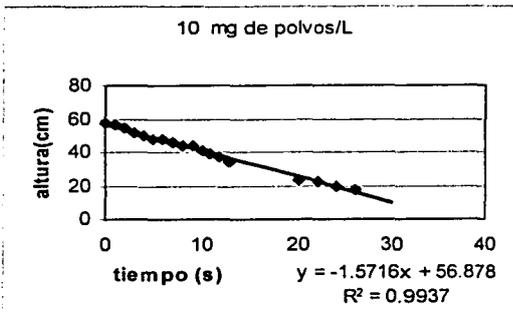
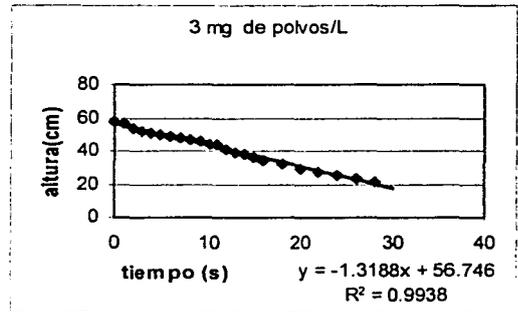
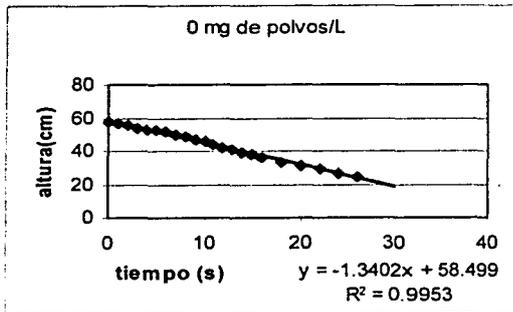
❖ ZONA DE SEDIMENTACIÓN RETARDADA

ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN T <sub>3</sub> (cm)						
TIEMPO (minutos)	mg de polvos/L					
	0	3	10	20	30	60
0	58	58	58	58	58	58
1	56.4	56.8	56.4	56	56.6	56.4
2	55.5	53.6	54.8	53.6	55.2	55
3	54.1	52	52	51.9	53.4	54
4	53.1	50.6	50	49.9	51.3	52.6
5	52.4	50	48	47.7	49.1	50.6
6	51.4	48.8	47.4	45.7	47.1	49.6
7	50.2	47.4	45.4	43.5	44.9	47.8
8	48.7	46.4	44.2	41.2	43.1	45
9	46.9	45.4	43.6	40	40.8	43.2
10	45.4	44	41	38.2	39.2	41.2
11	44.2	43.6	39.4	37.2	35.6	39.4
12	42.3	41	37.4	35.9	33.4	37.4
13	41.3	39.2	34.6	34.8	31.3	35.4
14	39	37.6	32	32.7	27.7	33.6
15	37.6	36	30	31.7	24.7	31.4
16	35.7	34.2	28	28.9	21.6	29
18	33.3	32.6	26	26.7	17.6	27.8
20	31.6	29.4	23.8	23.7	13.7	24.2
22	28.9	27.2	22.2	21.6	9.9	22.4
24	26.7	25.4	20	18.4	6.9	21.4
26	24.6	23	18	17.8	4.3	19.6
28	24.3	21.6	16.2	15.2	4.3	17.4
30	24.2	21.2	13.6	14.6	4.3	16.8



**VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN (T<sub>3</sub>)**

mg polvo/L	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN T <sub>3</sub> (cm/min)	CORRELACIÓN
0	1.3402	0.9953
3	1.3188	0.9938
10	1.5716	0.9937
20	1.7053	0.9917
30	2.3611	0.9927
60	1.8240	0.9936



➤ SÓLIDOS

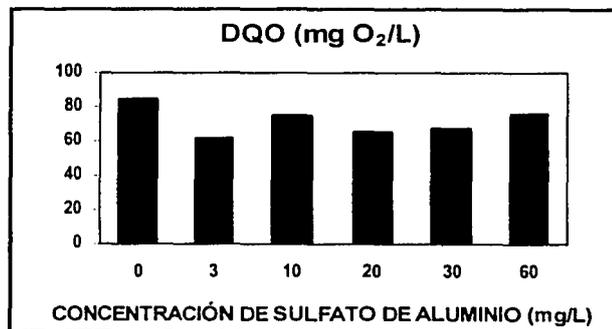
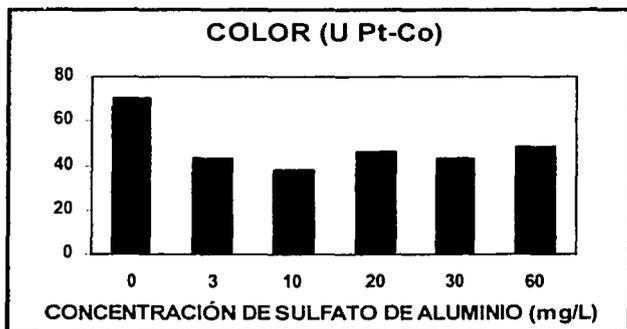
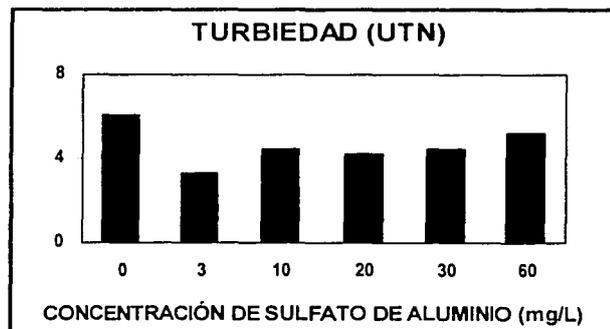
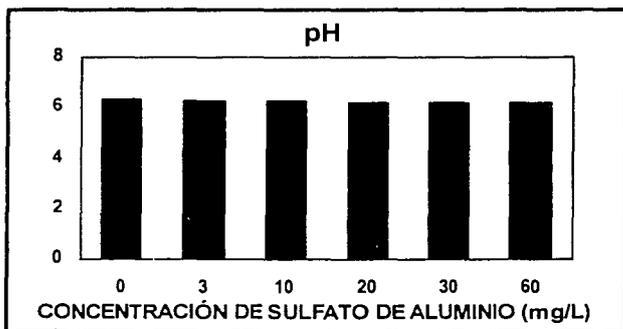
TIPO DE SÓLIDO	mg/L DE POLVO	EXPERIMENTO I	EXPERIMENTO II	PROMEDIO
STT (g/L)	0	17.37	20.69	19.03
	3	17.53	13.58	15.555
	10	19.31	21.4	20.355
	20	17.93	21.33	19.63
	30	16.59	24.41	20.5
	60	17.58	23.4	20.49
STF (g/L)	0	8.16	8.62	8.39
	3	7.92	5.83	6.88
	10	8.51	9.16	8.84
	20	6.24	9.64	7.94
	30	7.05	11.08	9.07
	60	8.4	10.97	9.67
STV (g/L)	0	9.21	12.07	10.64
	3	9.61	7.75	8.68
	10	10.8	12.24	11.52
	20	11.69	11.69	11.69
	30	9.54	13.33	11.435
	60	9.18	12.43	10.805
SST (g/L)	0	17.02	19.32	18.17
	3	16.12	11.06	13.59
	10	17.96	19.34	18.65
	20	16.8	21.12	18.96
	30	15.24	21.74	18.49
	60	16.675	20.98	18.8275
SSF (g/L)	0	7.22	7.38	7.3
	3	6.32	4.08	5.2
	10	7.08	7.7	7.39
	20	6.48	8.58	7.53
	30	5.92	9.42	7.67
	60	9.96	9.6	9.78
SSV (g/L)	0	9.8	11.94	10.87
	3	9.8	6.98	8.39
	10	10.88	11.64	11.26
	20	10.32	12.54	11.43
	30	9.32	12.32	10.82
	60	6.68	11.38	9.03



DOSIS DE 150 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$  Y CAL

➤ PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

PARÁMETRO	EXPERIMENTO	DOSIS DE POLVO (mg/L)					
		0	3	10	20	30	60
pH	1	6.2	6.22	6.26	6.21	6.27	6.32
	2	6.41	6.37	6.25	6.19	6.19	6.12
	Promedio	6.305	6.295	6.255	6.2	6.23	6.22
TURBIEDAD (UTN)	1	8.72	4.04	3.01	3.66	3.82	3.4
	2	3.43	2.5	5.92	4.73	5.17	7.13
	Promedio	6.075	3.27	4.465	4.195	4.495	5.265
COLOR (U Pt-Co)	1	84	67	60	67	66	60
	2	57	19	16	26	20	37
	Promedio	70.5	43	38	46.5	43	48.5
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	1	84	63	76	62	68	75
	2	86	61	75	70	67	77
	Promedio	85	62	75.5	66	67.5	76

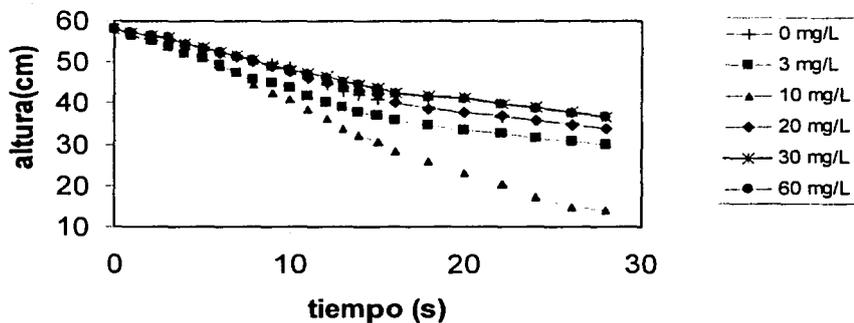


Y VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN

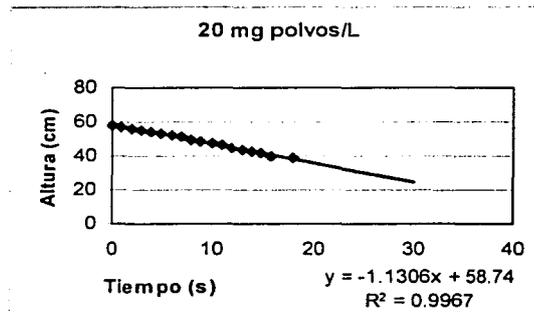
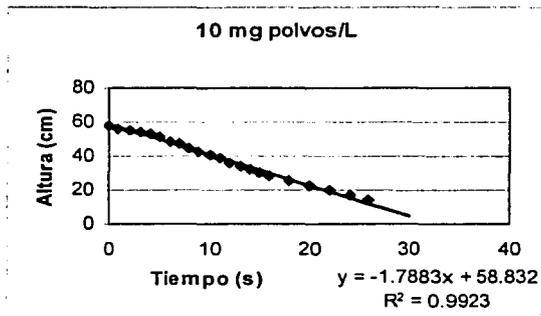
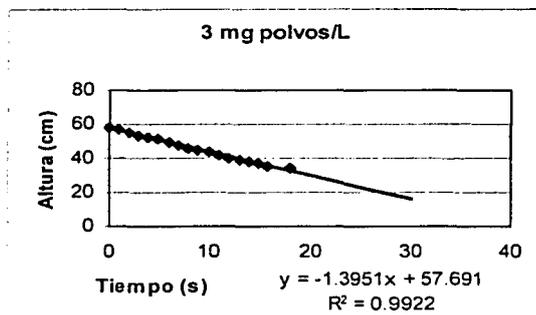
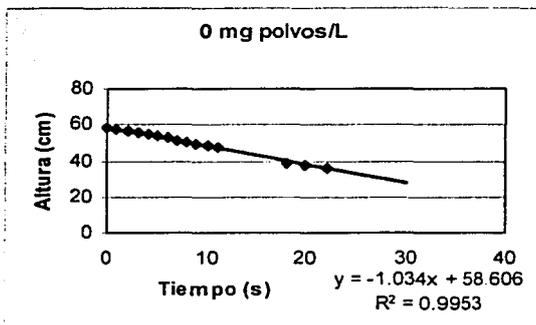
❖ ZONA DE SEDIMENTACIÓN POR FLOCULACIÓN (T<sub>2</sub>)

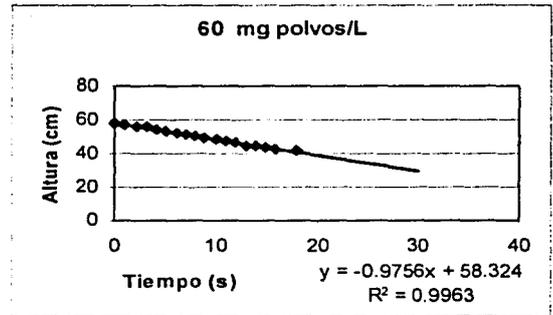
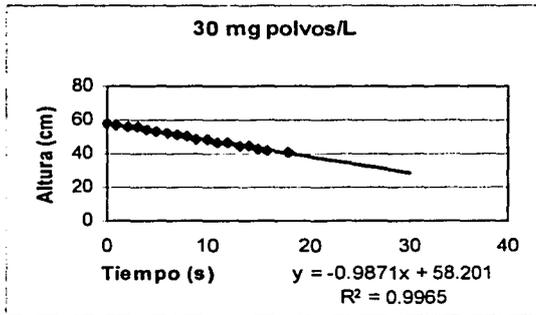
ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm)						
TIEMPO (minutos)	mg de polvos/L					
	0	3	10	20	30	60
0	58	58	58	58	58	58
1	57.2	56.8	56.4	57.2	57.4	57.3
2	56.2	55.4	55.4	56.4	56.6	56.3
3	55.6	53.8	54.6	55.6	56	55.9
4	54.6	52.2	53.6	54.6	54.4	54.2
5	53.8	51	51.2	53.4	53.6	53.4
6	52.6	49.4	49	52.2	52.4	52.3
7	51.6	47.2	47.6	51.2	51.6	51.3
8	50.6	45.8	44.6	50	50.6	50.3
9	49.8	44.8	42.6	48.8	49.2	49
10	48.8	43.6	40.8	47.6	48.2	48.1
11	47.2	41.8	38.6	46.2	47.2	47
12	44.6	40.2	36.2	44.8	46.6	46.2
13	43	38.8	34	43.8	45.2	45
14	42	37.8	32.2	42.8	44.6	44.4
15	40.8	36.8	30.6	42	43.6	43.3
16	40	35.6	28.4	40	42.6	42.3
18	38.8	34.6	25.8	38.6	41.6	41.3
20	37.6	33.6	23	37.8	41.2	41
22	36.4	32.6	20.2	36.8	39.8	39.6
24	35.6	31.4	17	35.8	38.8	38.6
26	35	30.6	14.6	34.6	37.6	37.4
28	34	29.8	13.8	33.8	36.6	36.6

Velocidades de sedimentación T<sub>2</sub> (cm/s)



VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN (T <sub>2</sub> )		
mg polvo/L	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm/min)	CORRELACIÓN
0	1.0340	0.9953
3	1.3951	0.9922
10	1.7883	0.9923
20	1.1306	0.9967
30	0.9871	0.9965
60	0.9756	0.9963





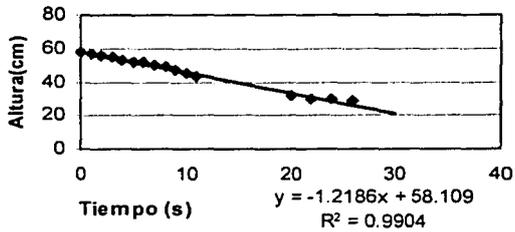
❖ ZONA DE SEDIMENTACIÓN RETARDADA (T<sub>3</sub>)

ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN T <sub>3</sub> (cm)						
TIEMPO (minutos)	mg de polvos/L					
	0	3	10	20	30	60
0	58	58	58	57.2	58	58
1	56.8	55.8	56.6	56.6	57	56.7
2	55.6	53.8	55.2	55.6	56	55.8
3	54.8	52	53.6	54.6	55.3	55.1
4	53.4	50.2	52.6	53.6	53.8	53.5
5	52.4	48.2	50.2	52	51.8	51.4
6	51.6	46.6	48.8	51.8	49.6	49.3
7	50.6	44.8	47.2	49.4	48.2	47.9
8	49	42.4	45.6	48	46.6	46.5
9	46.8	40.2	44	46.6	45.2	45.2
10	45	39	42.6	45.2	44	43.8
11	43	36.8	40.6	44	42.8	42.5
12	41	34.2	38.6	42.6	41.6	41.3
13	38.8	32.2	37.2	41.2	40.4	40.2
14	37	30.6	35.6	40.6	39.2	39
15	35.4	29.6	34.6	38.2	38.2	37.8
16	34.2	28.6	33.6	36.4	37	36.8
18	33.2	27.2	30.6	34.4	36	35.7
20	32	25.6	29.8	32.4	34.8	34.5
22	30.2	25.4	28.6	30.2	33.4	33
24	29.4	23.4	27.8	28	32.6	32.4
26	28.6	23.6	26.6	26.2	31.6	31.4

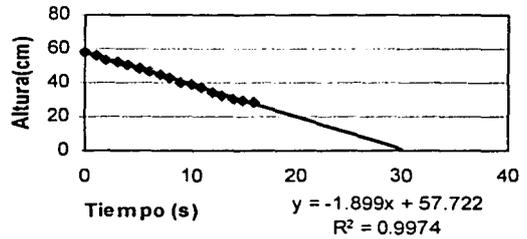


VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN (T <sub>2</sub> )		
mg polvo/L	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm/min)	CORRELACIÓN
0	1.2186	0.9904
3	1.8990	0.9974
10	1.5734	0.9979
20	1.1786	0.9943
30	1.3846	0.9932
60	1.3882	0.9940

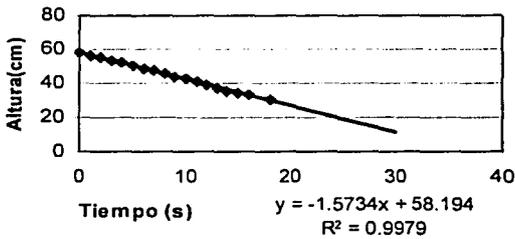
0 mg polvos/L



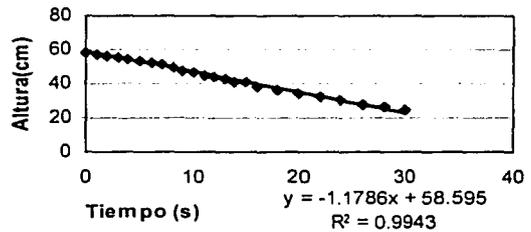
3 mg polvos/L



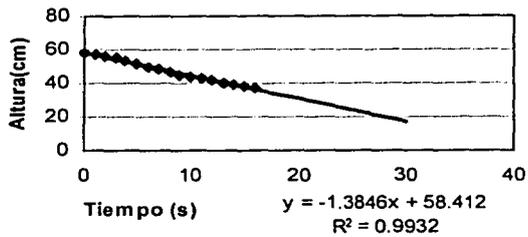
10 mg polvos/L



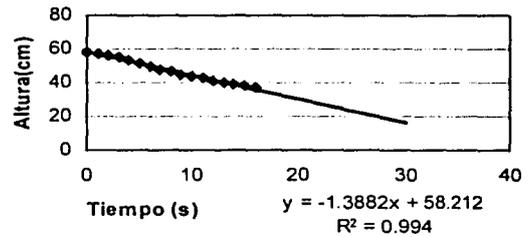
20 mg polvos/L



30 mg polvos/L



60 mg polvos/L



▷ SÓLIDOS

TIPO DE SÓLIDO	mg/L DE POLVO	EXPERIMENTO I	EXPERIMENTO II	PROMEDIO
STT (g/L)	0	16	12.35	14.175
	3	17.24	12.36	14.8
	10	16.87	12.1	14.485
	20	17.37	13.63	15.5
	30	18.58	19.23	18.905
	60	19.48	20.06	19.77
STF (g/L)	0	6.97	5.21	6.09
	3	7.33	5.43	6.38
	10	7.34	5.21	6.23
	20	7.74	6	6.87
	30	8.47	4.88	6.68
	60	8.99	8.11	8.55
STV (g/L)	0	9.03	7.14	8.085
	3	9.91	6.93	8.42
	10	9.53	6.89	8.21
	20	9.63	7.63	8.63
	30	10.11	14.35	12.23
	60	10.49	11.95	11.22
SST (g/L)	0	18.52	14.2	16.36
	3	18.6	16.56	17.58
	10	18.16	14.5	16.33
	20	17.48	15.58	16.53
	30	15.22	12.36	13.79
	60	11.54	14.46	13
SSF (g/L)	0	5.97	6.58	6.275
	3	8.18	7.14	7.66
	10	8.22	6.44	7.33
	20	7.34	6.72	7.03
	30	6.5	5.28	5.89
	60	5.1	6.32	5.71
SSV (g/L)	0	12.55	7.62	10.09
	3	10.42	9.42	9.92
	10	9.94	8.06	9
	20	10.14	8.86	9.5
	30	8.72	7.08	7.9
	60	6.44	8.14	7.29



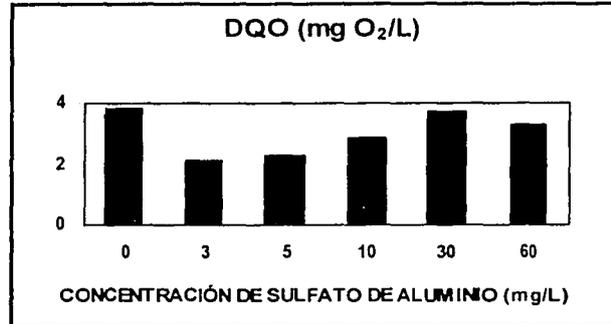
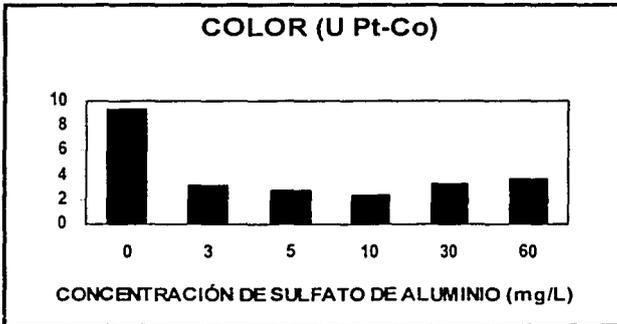
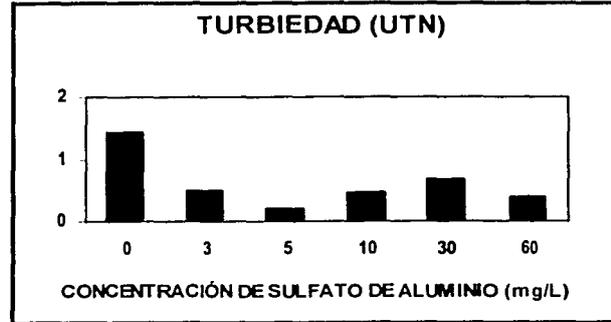
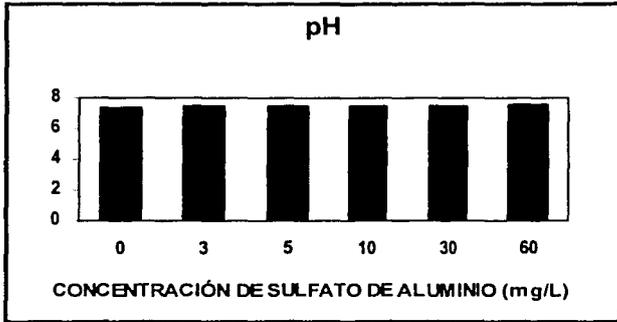
## ANEXO IV. RESULTADOS DEL AGUA NATURAL TRATADA DE LA PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS"

### I. DOSIS DE 10 mg/L DE $Al_2(SO_4)_3$

#### > PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

DOSIS DE 10 mg/L DE SULFATO DE ALUMINIO							
PARÁMETRO	EXPERIMENTO	DOSIS DE POLVO (mg/L)					
		0	3	5	10	30	60
pH	1	7.52	7.56	7.74	7.76	7.73	7.79
	2	7.32	7.23	7.16	7.23	7.22	7.42
	3	6.89	7.49	7.65	7.61	7.61	7.62
	4	7.45	7.49	7.5	7.56	7.52	7.5
	5	7.58	7.59	7.63	7.63	7.61	7.64
	6	7.59	7.57	7.54	7.52	7.66	7.51
	7	7.64	7.63	7.62	7.46	7.44	7.48
	8	7.24	7.38	7.31	7.35	7.29	7.36
	Promedio	7.40	7.49	7.52	7.52	7.51	7.54
TURBIEDAD (UTN)	1	0.21	0.08	0	0	0	0
	2	3.25	0.82	0.05	1.77	1.57	0.55
	3	3.39	0.52	0.2	1.46	1.62	0.35
	4	1.16	1.71	0.91	0.41	1.25	0.28
	5	1.49	0.65	0.38	0.23	0.66	0.69
	6	1.5	0.11	0.23	0	0.26	0.91
	7	0.33	0	0	0	0	0
	8	0.21	0	0	0	0	0.31
	Promedio	1.44	0.49	0.22	0.48	0.67	0.39
COLOR (U Pt-Co)	1	11	4	2	1	1	1
	2	7	2	4	3	3	5
	3	8	3	3	4	5	6
	4	12	3	2	0	3	1
	5	8	4	3	5	5	5
	6	11	2	5	5	6	9
	7	15	4	1	0	1	1
	8	3	3	2	1	2	2
	Promedio	9.38	3.22	2.75	2.38	3.25	3.75
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	1	3	0	0	1	0	0
	2	1	0	0	1	0	1
	3	1	0	0	0	4	0
	4	6	0	0	0	0	0
	5	1	0	0	0	0	0
	6	2	0	0	0	0	1
	7	2	1	0	0	0	0
	8	4	1	0	0	1	2
	Promedio	3.86	2.14	2.28	2.86	3.71	3.29





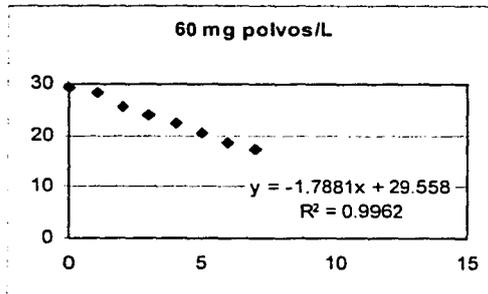
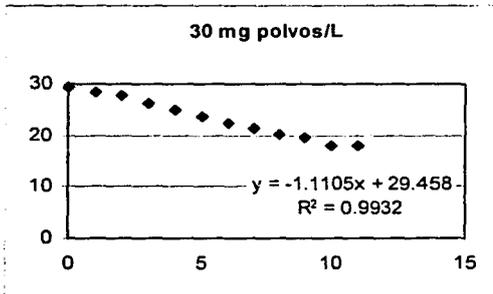
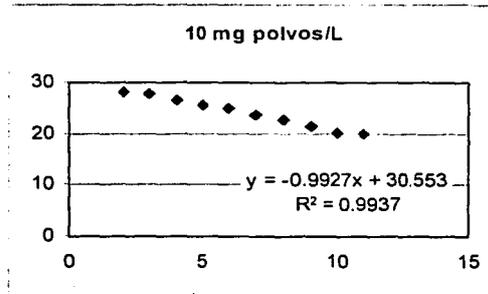
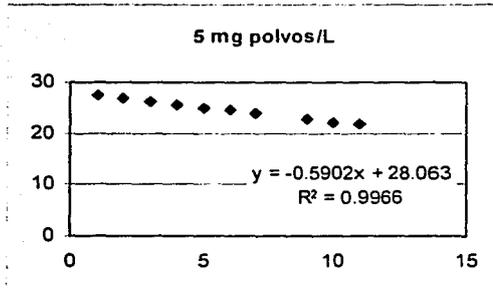
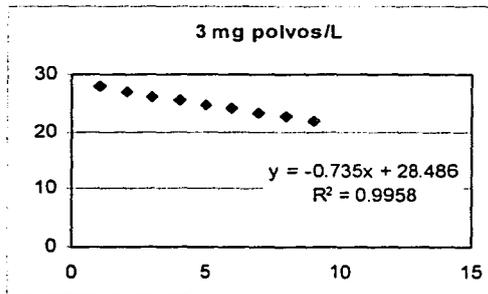
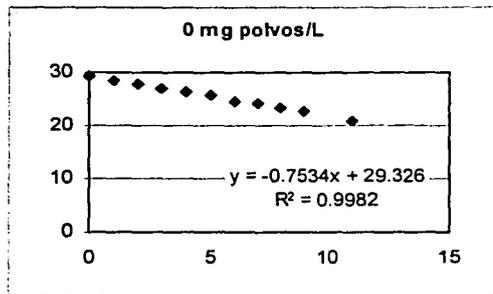
➤ VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN

❖ ZONA DE SEDIMENTACIÓN POR FLOCULACIÓN ( $T_2$ )

ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN $T_2$ (cm)						
TIEMPO (minutos)	mg de polvos/L					
	0	3	5	10	30	60
0	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
1	28.5	28	27.6	28.6	28.4	28.3
2	27.8	26.8	27	28.2	27.7	25.7
3	27	26.2	26.2	27.8	26.2	24.1
4	26.3	25.6	25.5	26.6	25	22.4
5	25.8	24.8	25.1	25.7	23.8	20.6
6	24.6	24	24.5	24.9	22.3	18.6
7	24.1	23.3	24	23.6	21.5	17.3
8	23.3	22.7	23.9	22.6	20.3	17.1
9	22.6	21.9	22.6	21.4	19.7	16.9
10	21	21.7	22.2	20.3	18	16.9
11	21	21.6	21.7	19.9	17.9	16.9
12	21	21.6	21.5	19.7	17.8	16.8
13	19.9	21.5	21.3	19.1	17.6	16.8
14	19.9	21.4	21.2	18.6	17.4	16.8
15	19.9	21.4	19.9	18.1	17.3	16.8
16	19.9	21.4	19.6	18	17.3	16.8
17	19.9	21.4	19.4	18	17.2	16.8
18	19.9	21.4	19.3	17.9	17.2	16.8
19	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.8
20	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.8
21	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6
22	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6
23	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6
24	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6
25	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6
26	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6
27	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6
28	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6
29	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6
30	19.9	21.4	19.1	17.9	17.2	16.6

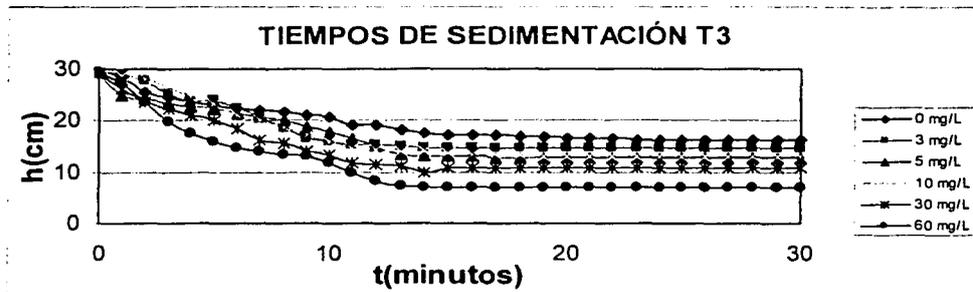


VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN (T <sub>2</sub> )		
mg polvo/L	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm/min)	CORRELACIÓN
0	0.7534	0.9982
3	0.7350	0.9958
10	0.5902	0.9966
20	0.9927	0.9937
30	1.1105	0.9932
60	1.7881	0.9962



❖ ZONA DE SEDIMENTACIÓN RETARDADA ( $T_3$ )

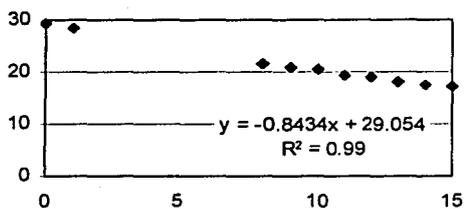
ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN $T_3$ (cm)						
TIEMPO (minutos)	mg de polvos/L					
	0	3	10	20	30	60
0	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
1	28.5	29	25	28.7	26.2	27.3
2	25.5	27.7	24.2	28.1	23.7	23.6
3	24.6	25.2	23.4	26.4	22.5	19.8
4	23.6	23.5	22.7	24.5	21.2	17.6
5	22.9	23.9	22.4	23.2	20	16
6	22.4	22.4	21.4	21	18.4	14.8
7	22	20.8	20.7	20.1	16.4	14.1
8	21.6	18.6	20.2	18.7	15.7	13.5
9	21	16.6	18.8	17.2	14	13.1
10	20.6	15.8	17.9	16	13.3	11.7
11	19.3	15.3	16.6	14.7	11.7	9.8
12	19	15.2	15.1	14.3	11.4	8.3
13	18.1	14.9	13.4	14	11.2	7.5
14	17.5	14.8	13.1	13.9	10	7.1
15	17.1	14.7	13.1	13.7	10.8	7.1
16	17.3	14.7	13.1	13.5	10.8	7.1
17	17.1	14.6	12.9	13.3	10.8	7.1
18	17	14.6	12.9	13.3	10.8	7.1
19	16.9	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
20	16.7	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
21	16.5	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
22	16.5	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
23	16.4	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
24	16.4	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
25	16.4	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
26	16.4	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
27	16.4	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
28	16.4	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
29	16.4	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1
30	16.4	14.6	12.9	13.2	10.8	7.1



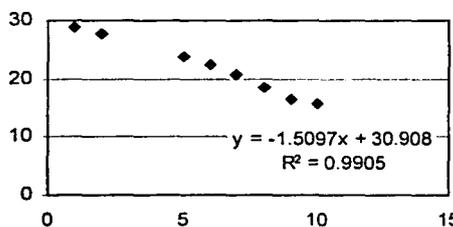
**VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN (T<sub>3</sub>)**

mg polvo/L	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm/min)	CORRELACIÓN
0	0.8434	0.9905
3	1.5097	0.9905
5	0.7534	0.9906
10	1.43	0.9916
30	1.3951	0.9953
60	2.8443	0.9824

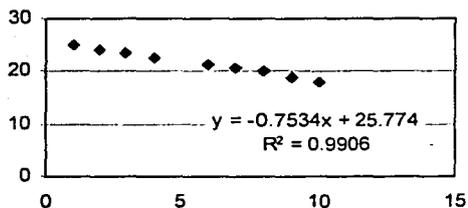
0 mg polvos/L



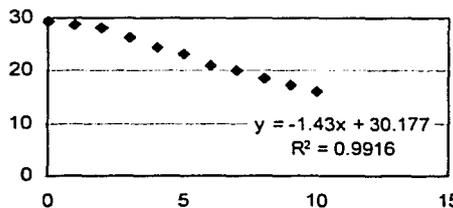
3 mg polvos/L



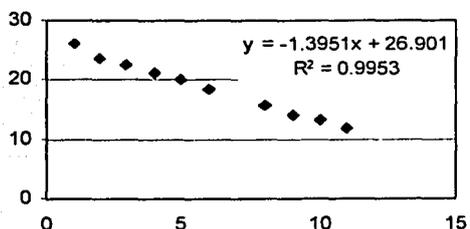
5 mg polvos/L



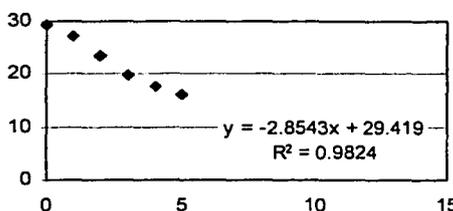
10 mg polvos/L



10 mg polvos/L



60 mg polvos/L

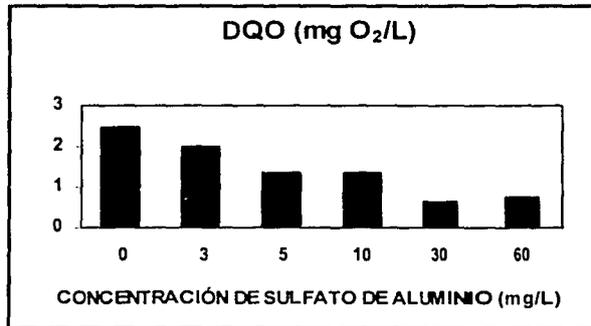
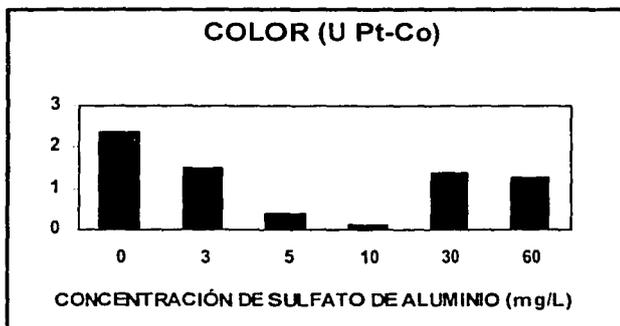
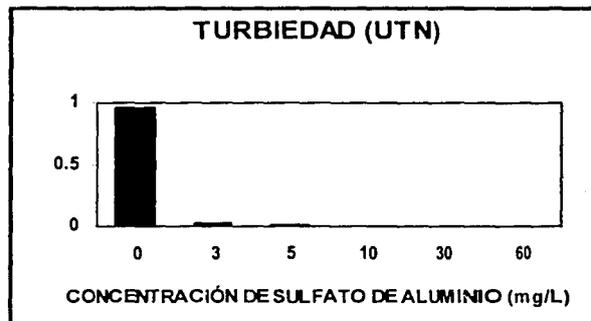
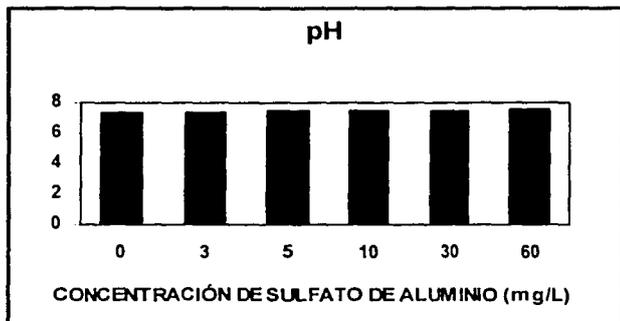


## II. DOSIS DE 25 mg/L DE SULFATO DE ALUMINIO

### ❖ PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

DOSIS DE 25 mg/L DE SULFATO DE ALUMINIO							
PARÁMETRO	EXPERIMENTO	DOSIS DE POLVO (mg/L)					
		0	3	5	10	30	60
pH	1	7.14	7.18	7.21	7.22	7.13	7.12
	2	7.35	7.68	7.63	7.74	7.73	7.75
	3	7.59	7.57	7.55	7.52	7.28	7.51
	4	7.56	7.63	7.46	7.59	7.51	7.61
	5	7.23	7.21	7.25	7.33	7.34	7.35
	6	7.49	7.52	7.58	7.63	7.68	7.71
	7	7.18	7.23	7.36	7.49	7.48	7.51
	8	7.21	7.21	7.4	7.52	7.6	7.64
	Promedio	7.34	7.4	7.43	7.51	7.45	7.53
TURBIEDAD (UTN)	1	0.55	0	0	0	0	0
	2	1.44	0.14	0.03	0.02	0.02	0
	3	1.03	0	0.02	0	0	0
	4	1.16	0	0	0	0	0.01
	5	1.19	0	0	0	0	0
	6	1.1	0.04	0	0	0	0
	7	0.1	0	0	0	0	0
	8	1.14	0.06	0	0	0	0
	Promedio	0.96	0.03	0.01	0.0	0.0	0.0
COLOR (U Pt-Co)	1	5	1	1	0	2	3
	2	0	3	0	0	1	1
	3	3	1	1	0	2	0
	4	2	2	0	0	1	1
	5	2	1	0	0	2	1
	6	3	2	0	1	0	1
	7	2	1	0	0	1	1
	8	2	1	1	0	2	2
	Promedio	2.38	1.50	0.38	0.13	1.38	1.25
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	1	2	0	2	2	0	0
	2	2	2	1	1	1	1
	3	4	2	2	2	0	0
	4	2	2	1	2	1	1
	5	2	2	1	1	1	0
	6	6	3	3	2	0	0
	7	0	3	0	1	1	3
	8	2	2	1	0	1	1
	Promedio	2.50	2.00	1.38	1.38	0.63	0.75



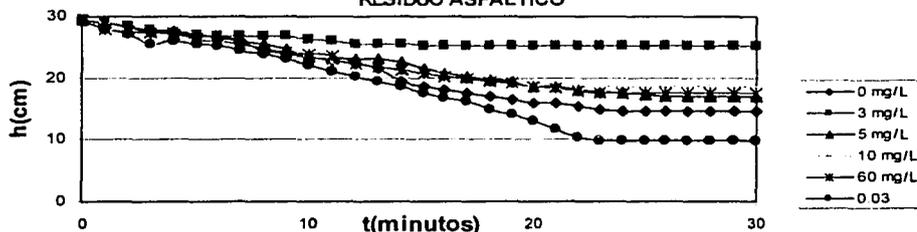


➤ VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN

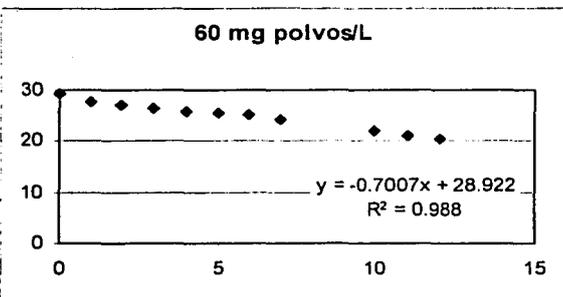
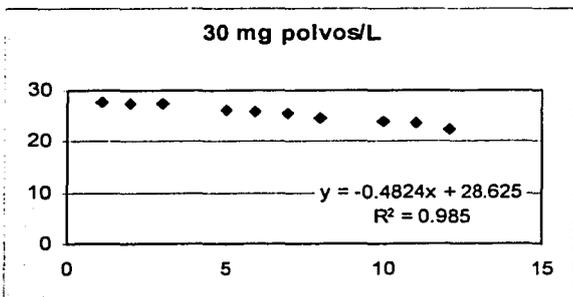
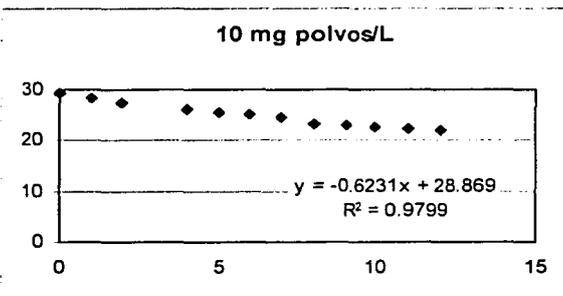
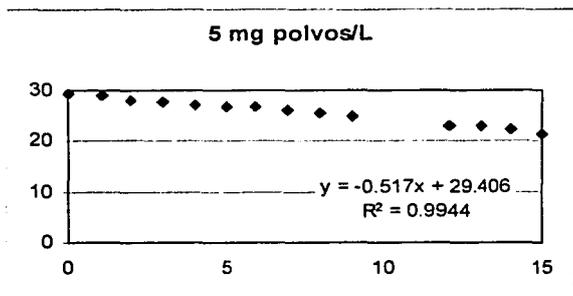
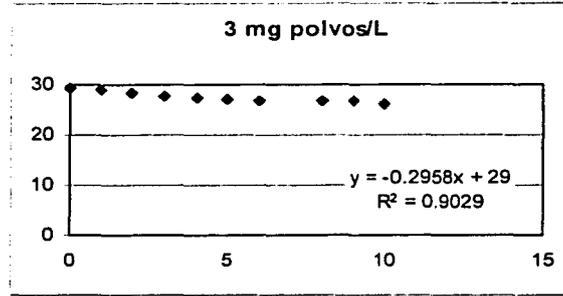
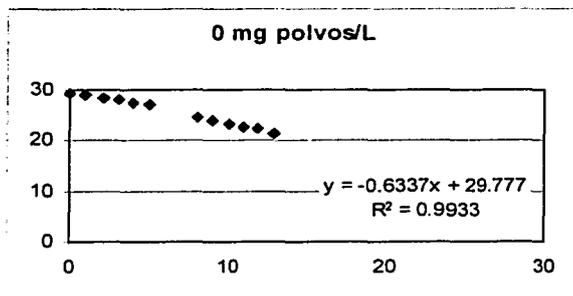
❖ ZONA DE SEDIMENTACIÓN POR FLOCULACIÓN ( $T_2$ )

ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN $T_2$ (cm)						
TIEMPO (minutos)	mg de polvos/L					
	0	3	5	10	30	60
0	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
1	29	29	28.9	28.5	27.9	27.9
2	28.5	28.5	28.2	27.3	27.5	27.1
3	28	27.8	27.7	26.4	27.4	25.6
4	27.6	27.4	27.2	26.1	27.2	26
5	27.1	27.1	26.8	25.6	26.2	25.5
6	26.6	26.9	26.7	25.2	25.9	25.1
7	25.9	26.8	26.1	24.5	25.5	24.4
8	24.5	26.8	25.6	23.3	24.7	23.9
9	24	26.7	24.8	22.9	24.1	23
10	23.4	26.2	23.4	22.7	23.9	22.1
11	22.7	25.9	23.2	22.5	23.5	21
12	22.2	25.5	23	22.1	22.4	20.3
13	21.5	25.4	23	21.7	21.9	19.4
14	19.3	25.4	22.5	21	21.3	18.6
15	18.5	25.3	21.5	20.3	20.7	17.5
16	18.1	25.3	20.7	20	20.3	16.7
17	17.6	25.3	20.2	19.8	19.8	16.2
18	17.1	25.3	19.7	19.5	19.5	14.9
19	16.5	25.3	19.3	19.4	19.1	14
20	16	25.3	18.7	19.3	18.7	12.9
21	15.8	25.3	18.5	18.9	18.3	11.8
22	15.3	25.3	18.1	18.7	17.9	10.4
23	14.9	25.3	17.9	18.6	17.6	9.9
24	14.7	25.3	17.6	18.6	17.6	9.8
25	14.7	25.3	17.3	18.5	17.5	9.8
26	14.7	25.3	17.1	18.5	17.4	9.7
27	14.7	25.3	17	18.5	17.4	9.7
28	14.7	25.3	17	18.5	17.4	9.7
29	14.7	25.3	17	18.5	17.4	9.7
30	14.7	25.3	17	18.5	17.4	9.7

VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN  $T_2$  A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE RESIDUO ASFÁLTICO

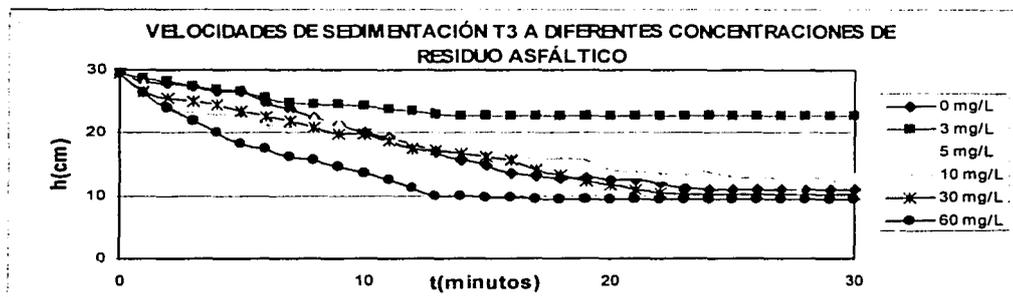


VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN (T <sub>2</sub> )		
mg polvo/L	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm/min)	CORRELACIÓN
0	0.6337	0.9933
3	0.2958	0.9029
10	0.5170	0.9940
20	0.6231	0.9799
30	0.4824	0.9850
60	0.7007	0.9880



❖ ZONA DE SEDIMENTACIÓN RETARDADA

ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN $T_3$ (cm)						
TIEMPO (minutos)	mg de polvos/L					
	0	3	5	10	30	60
0	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
1	28.3	28.6	27.7	26.4	26.7	26.4
2	28	28.1	24.8	24	25.6	23.9
3	27.4	27.5	25.7	23.2	25.1	21.8
4	26.7	26.9	25	23	24.6	20.1
5	26.6	26.5	24.7	22.7	23.6	18.3
6	24.8	25.6	23.4	21.5	22.7	17.4
7	23.7	24.9	22.6	20.8	21.8	16.3
8	22.4	24.4	22.1	20.3	21	15.6
9	21.3	24.4	21.3	19.7	19.9	14.5
10	20.2	24.3	19.4	19.1	19.7	13.6
11	19.4	23.8	19.1	18.7	18.9	12.4
12	18.2	23.4	18.9	17.8	17.5	11.2
13	17	23	18.5	17.4	17.1	9.9
14	15.6	22.8	18.2	16.8	16.8	9.8
15	14.9	22.7	16.4	16.4	16.2	9.6
16	13.5	22.6	15.9	15.9	15.6	9.6
17	13	22.6	15.5	15.8	14.2	9.5
18	12.8	22.6	15.2	15.8	13.4	9.5
19	12.8	22.6	14.6	15.6	12.2	9.4
20	12.6	22.6	14.1	14	11.7	9.4
21	12.5	22.6	13.6	13.9	10.9	9.4
22	11.9	22.6	13.1	13.5	10.5	9.4
23	11.3	22.6	12.9	13.3	10.2	9.4
24	10.9	22.6	12.7	13.9	10.2	9.4
25	10.9	22.6	12.7	12.7	10.2	9.4
26	10.9	22.6	12.7	12.7	10.2	9.4
27	10.9	22.6	12.7	12.7	10.2	9.4
28	10.9	22.6	12.7	12.7	10.2	9.4
29	10.9	22.6	12.7	12.7	10.2	9.4
30	10.9	22.6	12.7	12.7	10.2	9.4

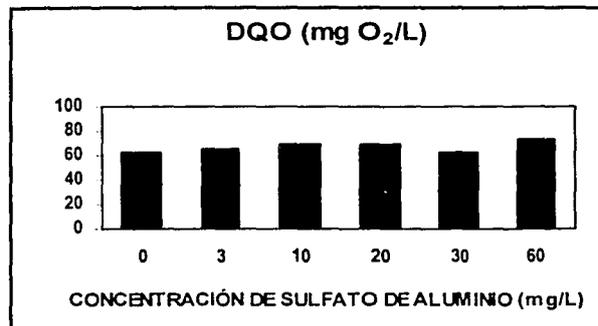
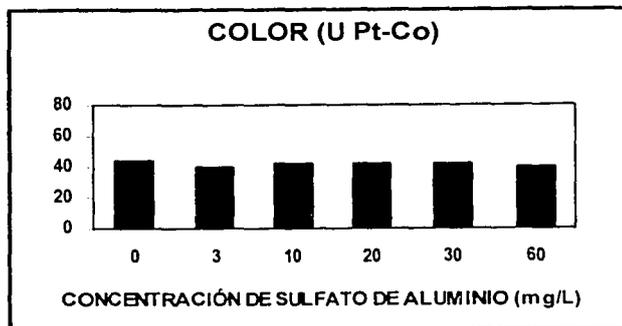
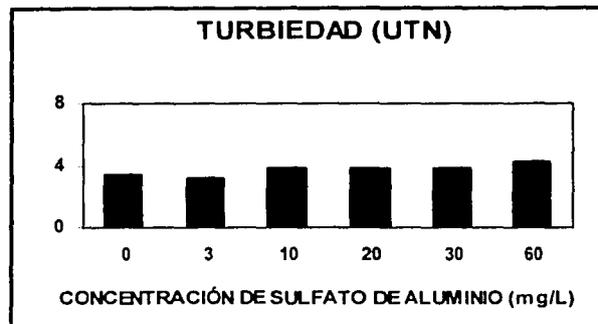
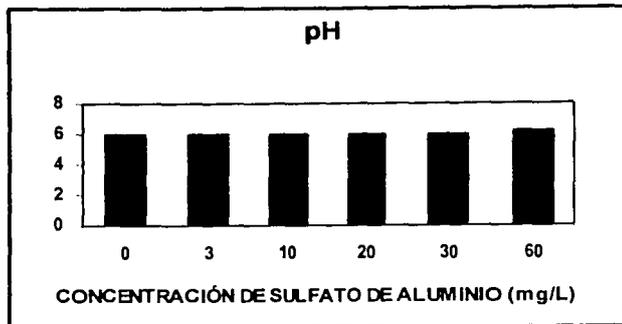


ANEXO V. AGUA DE GRAN CANAL TRATADA CON UNA DOSIS DE 150 mg/L DE  $Al_2(SO_4)_3$

> PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

DOSIS DE 150 mg/l DE SULFATO DE ALUMINIO							
PARÁMETRO	EXPERIMENTO	DOSIS DE POLVO (mg/L)					
		0	5	10	20	40	60
pH	1	5.76	5.79	5.79	5.8	5.82	
	2	5.82	5.85	5.78	5.91	5.87	5.95
	3	6.41	6.37	6.5	6.19	6.19	6.12
	4	5.81	5.79	5.83			5.7
	5						
	6	6.03	6.06	6.07	6.09	6.07	6.6
	7	6.09	6.10	6.12	6.12	6.09	6.61
	8	6.03	6.04	6.08	6.08	6.1	6.54
	PROMEDIO	5.99	6.03	6.00	6.02	6.03	6.25
TURBIEDAD (UTN)	1	1.39	1.6	1.91	1.35	1.17	0.95
	2	2.18	2.64	1.83			
	3	2.43	2.50	5.92	4.73	5.17	7.13
	4	8.88	7.83	8.65	8.29	8.05	9.63
	5	1.59	1.34	1.32	1.31	1.17	1.48
	6	3.55	3.49	3.61	3.72	3.33	2.22
	7	3.46	3.32	3.81	3.8	4.01	3.8
	8	3.81		3.48	3.95	4.18	4.71
	PROMEDIO	3.41	3.24	3.82	3.88	3.893	4.27
COLOR (U Pt-Co)	1	33	27	27	28	26	30
	2	29	24	29			
	3	23	19	16	26	20	37
	4	58	58	70	64	65	
	5	35	32	35	35	34	37
	6	43	51	48	48	48	40
	7	66	52	55	49	52	49
	8	65	58	54	47	51	49
	PROMEDIO	44	40.12	41.75	42.43	42.29	40.33
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	1	75	74	82	85	69	78
	2	80	89	93	90	87	104
	3						
	4	35	32	35	35	34	37
	5						
	6	391	289	265	240	254	253
	7	276	275	248	237	243	243
	8	268	244	253	244	253	236
	PROMEDIO	63.33	65	70	70	63.33	73



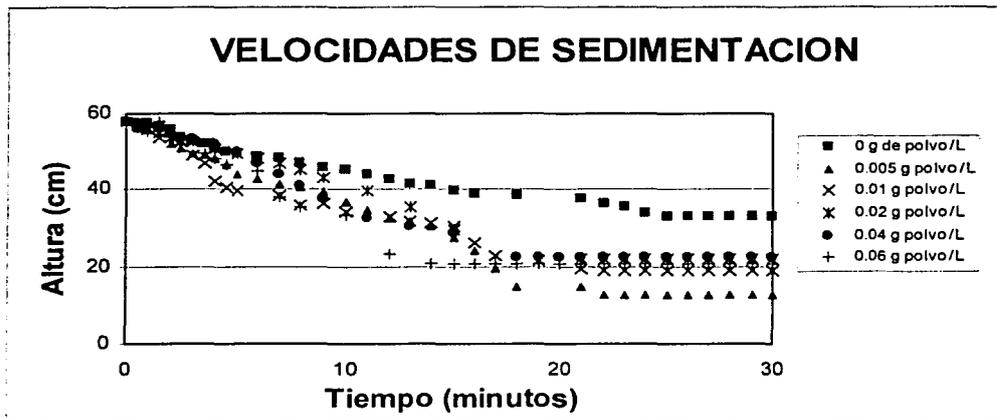


➤ VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN

❖ ZONA DE SEDIMENTACIÓN POR FLOCULACIÓN (T<sub>2</sub>)

ALTURAS DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm)						
TIEMPO (minutos)	mg de polvos/L					
	0	5	10	20	40	60
0	58	58	58	58	58	58
0.5	57.5	56.4	57.4	57.1	57.3	56.2
1	57.3	55.6	56	55.8	57	55.4
1.5	56.3		53.7	54.8	56.2	57.9
2	55.6	51.9		53.8	54.5	52.8
2.5	53.7	50.8	52.6	52.7		
3	52.8	49.4	48.9	52.2	53.2	52.2
3.5	51.9	49.2	47.1			49.3
4	50.9	48.1	42.3	50.6	51.8	48.1
4.5	50	46.4	40.4			46.4
5	49.3	43.9	39.7	49.4	49.9	
6	48.6	42.5		48.3	46.8	44.6
7	48.1	41.4	38.3	47	43.8	37.9
8	46.9	40.4	36	45.4	40.8	35.7
9	45.8	39.4	36.3	43.1	37.5	
10	45.3	36.7	34.3			33.3
11	44.1	34.7		39.7	32.6	
12	42.5	32.7	33.1			23.18
13	41.3	31.9	31.7	35.3	30.4	
14	40.8	30.6	31.1			20.8
15	39.9	27.5	30.3	29.6	28.8	20.8
16	39	24.2	26.3			20.8
17		19.4	22.9			20.8
18	38.6	15			22.5	20.8
19			21.7		22.5	20.8
20					22.5	20.8
21	37.8	15	19.4	21.8	22.5	20.8
22	36.4	12.5	19.14	21.8	22.5	20.8
23	35.4	12.5	19.14	21.8	22.5	20.8
24	34	12.5	19.14	21.8	22.5	20.8
25	32.9	12.5	19.14	21.8	22.5	20.8
26	32.9	12.5	19.14	21.8	22.5	20.8
27	32.9	12.5	19.14	21.8	22.5	20.8
28	32.9	12.5	19.14	21.8	22.5	20.8
29	32.9	12.5	19.14	21.8	22.5	20.8
30	32.9	12.5	19.14	21.8	22.5	20.8





VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA LA ZONA DE FLOCULACIÓN (T <sub>2</sub> )		
mg polvo/L	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN T <sub>2</sub> (cm/min)	CORRELACIÓN
0	0.8533	0.9538
5	1.9174	0.9840
10	1.8925	0.9040
20	1.7327	0.9869
40	2.1748	0.9834
60	2.6948	0.9828

