



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
PROVENIENTES DEL LAVADO DE SUELO
CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS DEL
PETRÓLEO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

CLAUDIA BELLOC SUÁREZ



México, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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. Víctor Manuel Luna Pabello
Secretario	Prof. Luís G. Torres Bustillos
1er. Suplente	Prof. Alfonso Durán Moreno
2º. Suplente	Prof. José Agustín García Reynoso

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Instituto de Ingeniería, UNAM.
Laboratorio de Bioprocesos e Ingeniería Ambiental

Asesor del Tema: Dr. Luís G. Torres Bustillos

Sustentante: Claudia Belloc Suárez

AGRADECIMIENTOS

A mi Mamá (q.e.p.d.), por que me enseñaste a ser lo que soy y por que todo tu amor y cariño me siguen ayudando a ser una mejor persona y a estar donde estoy.

A mi Papá, no hay palabras para expresar el enorme cariño que te tengo, gracias por todo tu apoyo y por la educación que junto con mi Mamá me siguen ayudando en mi vida. Soy lo que soy por ustedes.

A mi hermana, Sandra, la mejor del mundo, siempre estas ahí en las buenas y en las malas, incondicional aunque a veces yo no me de cuenta, gracias por todo tu amor y paciencia.

A mi hermano, Carlos, un gran ejemplo, gracias por que se que siempre tienes un consejo para mi cuando más lo necesito, eres padre de la niña más hermosa, Sofía, y yo se que siempre estas ahí para mi.

A Cristian, gracias por todo tu apoyo, por el cariño y paciencia que me tienes. Siempre estas ahí, sin objeción, solo con mucho amor. Gracias por todas esas cosas que compartimos juntos y por todas aquellas que todavía nos falta compartir.

A mi cuñada Angele, a Joshua y a Sofía, por que a pesar de las distancias, son parte fundamental de mi vida.

A mis amigos, Laura, Haru, Rocío, Francisco, Hiro, Fer, Gaby, Gallegos, Ana y Lore. Que más que mis compañeros de la facultad son como mis hermanos. Gracias por hacer de mis años de estudiante, los mejores recuerdos de mi vida.

A mi familia, mis tíos y tías, a mis primos, a Rosa Martha y Arturo, gracias por su apoyo y amor.

A Luis Torres, gracias por el apoyo para la realización de la tesis, que junto con Alejandrina se hicieron más que mis profesores, mis amigos.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL LAVADO DE SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS DEL PETRÓLEO

Resumen	1
Introducción	2
CAPITULO UNO:	
MARCO DE REFERENCIA	
1. Contaminación de suelos	4
1.1. Técnicas de tratamiento para suelos contaminados	4
1.1.1. Tecnologías In situ	4
1.1.2. Tecnologías Ex situ	5
2. Contaminación del Agua	6
2.1. Cantidad y calidad del agua	6
2.2. Clasificación de los compuestos presentes en el agua	6
2.3. Evaluación de la contaminación	8
2.3.1 Composición física	8
2.3.2 Composición química	13
2.3.3 Parámetros indicativos de contaminación orgánica y biológica	12
2.4. Procesos de depuración	15
2.4.1 Criterios de selección	18
2.4.2 Clasificación de los procesos empleados	19
2.4.3. Coagulación y floculación	20
2.4.3.1 Sistemas dispersos	21

2.4.3.2 Teorías sobre el mecanismo de coagulación	21
2.4.3.3 Mecanismo de floculación	22
2.4.3.4 Agentes coagulantes	23
2.4.3.5. Sistema para la elaboración de la coagulación- floculación:	
Prueba de jarras	24
2.4.3.6. Factores que afecten el proceso de coagulación- floculación	25

CAPITULO DOS:

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

1. Objetivo general	28
1.1. Objetivos específicos	28
2. Hipótesis	28

CAPITULO TRES:

MÉTODOS EXPERIMENTALES

1. Materiales y equipos	29
1.1. Materiales	29
1.2. Equipos	29
1.3. Sustancias	30
2. Metodología Experimental	30
2.1. Caracterización del agua residual	30
2.1.1 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)	31
2.1.2 Determinación del color aparente	32
2.1.3. Determinación de la turbiedad	33

2.1.4. Determinación de la conductividad	33
2.1.5. Determinación del pH	34
2.2. Coagulación- Floculación: Prueba de jarras	35
2.2.1. Selección del coagulante	36
2.2.1.2 Selección de la dosis óptima del coagulante	36
2.2.2. Selección del floculante	37
2.2.2.2 Selección de la dosis óptima del floculante	38
2.2.3. Efecto del pH en el tratamiento de coagulación- floculación	38
2.2. Interacción entre la dosis del coagulante, dosis del floculante y el pH	
Método ANOVA	39
2.2.1. Aplicación del programa estadístico ANOVA	40

CAPITULO CUATRO:

ANÁLISIS Y RESULTADOS

1. Caracterización del agua residual	43
1.1. Características del agua diluida al 50%	44
2.- Selección del coagulante	44
2.1 Determinación de la dosis óptima del coagulante	46
3. Selección del floculante	47
3.1 Determinación de la dosis óptima del floculante	49
4. Efecto del pH en la remoción de contaminantes	50
5. Interacción entre la dosis del coagulante– floculante y del pH	51
6. Aplicación del modelo estadístico ANOVA	54
6.1 Resultados de la regresión lineal de la remoción del DQO	54

6.2 Resultados de la regresión lineal de la remoción del color	55
6.3 Resultados de la regresión lineal de la remoción de la turbiedad	57
6.4 Resultados de la regresión lineal de la remoción de la conductividad	58
7. Resultados comparativos de los valores experimentales contra los valores calculados con el modelo matemático	60
8.- Caracterización final del agua y de los lodos obtenidos. Comparación con la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002)	66

CAPITULO CINCO:

CONCLUSIONES	70
---------------------	----

APÉNDICE I:

TABLAS COMPLEMENTARIAS

1. Tablas de selección del coagulante	74
1.2. Tablas de los resultados de la dosis óptima del sulfato de aluminio	75
2. Tablas de selección del floculante	75
2.1 Determinación de la dosis óptima del floculante	76
3. Efecto del pH en la remoción de contaminantes.	76
4. Interacción entre la dosis del coagulante– floculante y del pH	76

APÉNDICE II:

MÉTODOS EXPERIMENTALES COMPLEMENTARIOS

1. Procedimientos para utilizar el espectrofotómetro HACH	78
2. Calibración del conductímetro	79
3. Calibración del potenciómetro	80

APÉNDICE III:

PROGRAMA SPSS BASE 11.0

1. Procedimiento para elaborar la base de datos	81
2. Procedimiento para elaborar la regresión lineal	83

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
-----------------------------------	----

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de los principales parámetros para caracterizar el agua	8
Tabla 1.2. Operaciones y procesos unitarios que se emplean para el tratamiento del agua	16
Tabla 1.3. Niveles de tratamiento	17
Tabla 3.1. Materiales utilizados en la experimentación	29
Tabla 3.2. Sustancias utilizadas en la experimentación	29
Tabla 3.3. Equipos y aparatos utilizados en la experimentación	30
Tabla 3.4. Arreglos de variables con rangos y niveles para el método ANOVA	40
Tabla 3.5. Arreglos experimentales	41
Tabla 4.1 Caracterización del agua contaminada	43
Tabla 4.2. Resultados de la caracterización a nivel laboratorio	44
Tabla 4.3. Por ciento de remoción de los coagulantes al 2%	45
Tabla 4.4. Porcentaje de remoción del coagulante sulfato de aluminio para diferentes dosis	46
Tabla 4.5. Porcentaje de remoción de diferentes floculantes a una concentración de	48

1.5 mg/L

Tabla 4.6. Porcentaje de remoción para el floculante Tecnifloc 998 a diferentes dosis.	49
Tabla 4.7. Porcentaje de remoción de la mezcla coagulante- floculante a diferentes valores de	50
Tabla 4.8. Rangos experimentales y niveles de las variables independientes	52
Tabla 4.9. Condiciones de cada experimento	52
Tabla 4.10. Porcentaje de remoción de cada experimento	53
Tabla 4.11. Datos estadísticos obtenidos de la remoción de DQO	54
Tabla 4.12. Resumen del modelo la remoción de DQO	54
Tabla 4.13. Datos estadísticos obtenidos de la remoción del color	56
Tabla 4.14. Resumen del modelo la remoción del color	56
Tabla 4.15 Datos estadísticos obtenidos de la remoción de la turbiedad	57
Tabla 4.16. Resumen del modelo la remoción de la turbiedad	58
Tabla 4.17. Datos estadísticos obtenidos de la remoción de la conductividad	59
Tabla 4.18. Resumen del modelo la remoción de la conductividad	59
Tabla 4.19. Comparación entre los valores de remoción de DQO experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático	61
Tabla 4.20. Comparación entre los valores de remoción del color experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático	62
Tabla 4.21. Comparación entre los valores de remoción de la turbiedad experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático	63
Tabla 4.22. Comparación entre los valores de remoción de la conductividad experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.	65
Tabla 4.23. Condiciones para el tratamiento final del agua contaminada	66

4.24. Tabla de la caracterización final del agua tratada comparada con los resultados de la caracterización inicial del agua contaminada.	67
Tabla 6.1. Valores del color y turbiedad obtenidos para la selección del coagulante	74
Tabla 6.2. Valores de DQO y conductividad obtenidos para la selección del coagulante	74
Tabla 6.3. Valores de color y turbiedad para la dosis óptima del sulfato de aluminio	75
Tabla 6.4. Valores del color y turbiedad obtenidos para la selección del floculante	75
Tabla 6.5. Valores de color y turbiedad para la dosis óptima del Tecnifloc 998	76
Tabla 6.6. Valores de color y turbiedad para el efecto del pH	76
Tabla 6.7. Valores de color y turbiedad para la interacción entre las variables	76
Tabla 6.7. Continuación. Valores de color y turbiedad para la interacción entre las variables	77

INDICE DE DIAGRAMAS

Fig 1.1. Ejemplo de una planta convencional de agua residual doméstica	18
Fig 1.2. Sistema de prueba de jarras que ayuda a elaborar procedimientos de coagulación- floculación	24
Gráfica 4.1. Remoción porcentual de contaminantes para cada coagulante	45
Gráfica 4.2. Remoción porcentual del sulfato de aluminio a diferentes dosis.	47
Gráfica 4.3. Remoción porcentual de los floculantes	48
Gráfica 4.4. Remoción porcentual de los contaminantes a diferentes dosis del Tecnifloc 998	49
Gráfica 4.5. Gráfica del efecto del pH en la remoción de contaminantes.	51
Gráfica 4.6. Gráfica comparativa entre los valores de remoción de DQO experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.	61
Gráfica 4.7. Gráfica comparativa entre los valores de remoción del color experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.	62

Gráfica 4.8. Gráfica comparativa entre los valores de remoción de la turbiedad
experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático. 64

Gráfica 4.9. Gráfica comparativa entre los valores de remoción de la conductividad
experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático. 65

Fig. 8.1 Ejemplo del editor de datos del programa SPSS 82

Fig. 8.2 Ejemplo del editor de datos- vista de variables- del programa SPSS 82

Fig. 8.3 Ejemplo de la ventana para elaborar una regresión lineal 83

Fig. 8.4 Ejemplo de la ventana para elaborar una regresión lineal 83

RESUMEN

El tratamiento de coagulación-floculación es un proceso muy eficiente para la remoción de hidrocarburos del petróleo en el agua. Esta remoción se mide con los parámetros de contaminación de color, turbiedad, conductividad y DQO, los cuales pueden ser removidos hasta un 95%, 95%, 35% y 98% del agua sucesivamente. Esta remoción se obtiene utilizando al sulfato de aluminio como coagulante a una concentración de 4000 mg/L y al Technifloc 998 como floculante, a una concentración de 15 mg/L. Otro parámetro fundamental para la experimentación es el pH, el cual se debe mantener en 4 para que se obtenga la máxima remoción de contaminantes.

El tratamiento de coagulación-floculación se realiza mediante la prueba de jarras, la cual consiste en 6 agitadores mecánicos, que permiten que el coagulante y el floculante se dispersen correctamente en el agua contaminada y así lograr la formación de los flóculos para que posteriormente se dejen sedimentar y así lograr separarlos del agua y remover los contaminantes.

Se utilizó un modelo estadístico, ANOVA, que permite reducir el número de experimentos y así encontrar las condiciones óptimas de concentración del coagulante como del floculante, así como su interacción con el pH. Al desarrollarse 20 experimentos se pudo encontrar, por medio de una regresión lineal realizada en el programa de estadística SPSS, una ecuación que describe el comportamiento del sistema y que además nos proporciona las condiciones óptimas par poder obtener la máxima remoción del DQO, del color, de la turbiedad y de la conductividad.

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera en México es muy importante para nuestro país, PEMEX es la empresa encargada de la exploración, extracción, transformación, distribución y venta del petróleo y sus derivados. En dichos procedimientos de manejo del petróleo existe un problema muy serio de contaminación ambiental. Es por eso que actualmente, ha aumentado la preocupación por minimizar tal impacto ambiental producido por la explotación y transformación del petróleo. Principalmente los esfuerzos se han enfocado en la limpieza de suelos y agua contaminados con hidrocarburos, con lo que se permite una mejor condición de suelos. Existen actualmente muchas metodologías de remediación de suelos: sistemas de extracción de vapor, estabilización y solidificación de suelos, tratamientos térmicos, sistemas electrocinéticos, métodos biológicos y lavado de suelos.

Uno de los tratamientos más utilizados es el lavado de suelos, el cual es una tecnología *ex-situ*, en la cual el suelo es excavado y trasladado para llevar a cabo el tratamiento y se utiliza un surfactante para llevar a cabo la restauración. Este método se utiliza cuando se requiere una remediación rápida o cuando la contaminación es muy alta y no se puede utilizar un método biológico (con microorganismos). Sin embargo, este procedimiento produce una gran cantidad de aguas de lavado contaminadas con hidrocarburos, surfactante y otra cantidad de contaminantes presentes en el suelo; el cual sigue siendo un problema de contaminación importante.

Es por tal motivo que se desarrolló en este trabajo un tratamiento físico– químico que ayude a disminuir la cantidad de contaminantes presentes en ésta agua. Este tratamiento de coagulación–floculación sirve para eliminar partículas coloidales, las cuales son sedimentadas y separadas de agua.

Para realizar el tratamiento de coagulación- floculación se utiliza la prueba de jarras, la cual es un sistema que cuenta con seis agitadores mecánicos, los cuales permiten remover a los contaminantes mediante tres etapas: la coagulación, la floculación y por último la sedimentación. Esta eliminación se mide por la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), del color, la turbiedad y la conductividad.

Como existe una gran cantidad de coagulantes y floculantes es necesario hacer una selección con los que se obtengan mejores resultados, pero para disminuir la cantidad de experimentos y poder hacer una mejor predicción de los efectos del tratamiento se desarrolló un modelo estadístico de tipo ANOVA, con el programa SPSS 11.0, el cual permite conocer las condiciones adecuadas de trabajo para una mejor remoción de contaminantes, interactuando las dosis del coagulante y del floculante, así como una tercera variable, el pH del agua.

CAPITULO UNO

MARCO DE REFERENCIA

1. Contaminación de suelos

1.1. Técnicas de tratamiento para suelos contaminados

Existen dos grandes grupos de tecnología para el tratamiento de suelos contaminados: las tecnologías *in-situ* y las *ex-situ*.

1.1.1. Tecnologías In situ:

Este proceso de limpieza se realiza en el mismo lugar donde se encuentra el suelo contaminado.

Para esta tecnología existen diferentes técnicas de tratamiento de suelo:

- Extracción de vapores: Se extraen los contaminantes del suelo en forma de vapor
- Enjuague de suelo: Se inyecta agua con un aditivo como ácidos, gases o agentes tensoactivos.
- Estabilización y solidificación: Mezcla con aditivos (cemento, silicatos, polímeros orgánicos). Se persigue modificar las características físicas de la masa contaminada.
- Tratamientos biológicos: Basado en la degradación de sustancias contaminadas mediante la utilización de microorganismos como bacterias, hongos y levaduras. Aplicación de nutrientes para obtener una mejor actividad microbiana, adición de oxígeno y el establecimiento de plantas tolerantes al contaminante.

1.1.2. Tecnologías Ex situ:

En este caso es necesario extraer el suelo de su lugar de origen y transportarlo a otro lugar, por lo general en este lugar es más sencillo llevar a cabo la limpieza.

Para esta tecnología existen diferentes técnicas de tratamiento de suelo:

- Lavado de suelo: Combina el empleo de agua con aditivos químicos y en ocasiones un sistema mecánico de decantación.
- Extracción con solventes: Separa y concentra los contaminantes, posteriormente se tratan con otra técnica.
- Tratamientos biológicos: El suelo se extrae por excavación, el tratamiento es en fase lechada, en fase sólida o en biopilas. Se utilizan microorganismos como bacterias, hongos y levaduras, se aplican nutrientes para mejorar la actividad microbiana, adición de oxígeno o el establecimiento de plantas tolerantes al contaminante.

Aunque actualmente se conocen más técnicas de remediación de suelos, es necesario conocer en cada caso cuál o cuáles pueden ser más efectivas y adecuadas según las características del suelo y tipo de contaminantes que se quieran eliminar (Iturbe et al, 1998).

Lavado de suelos

Es una técnica ex- situ de remediación que consiste en poner en contacto el sustrato con una solución de lavado y lograr una remediación de contaminantes mediante la agitación.

Este proceso puede remover los contaminantes ya sea disolviéndolos en la solución de lavado o concentrándolos en un volumen menor de suelo al llevarse a cabo una separación de los tamaños de partícula pequeños de los grandes.

Para realizar un lavado de suelo es necesario ejecutar diferentes etapas en las que se encuentran, (Kuhlman et al, 1999):

- Preparación del suelo
- Lavado de suelo
- Tratamiento de agua
- Manejo de residuos
- Control de emisiones volátiles
- Manejo y almacenamiento del agua de lavado.

De esta última etapa se obtiene una gran cantidad de agua de lavado contaminada, es por eso que es necesario desarrollar un sistema adecuado de tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos.

2. Contaminación del Agua

2.1. Cantidad y calidad del agua

La disponibilidad del agua depende no sólo de la cantidad, sino de su calidad. Aunque haya agua, si está contaminada y se encuentra en una condición tal que sea no acorde con el uso que se le quiere dar, su empleo se limita. En la antigüedad, la calidad del agua se calificaba sólo por su aspecto, sabor, color y olor. Actualmente, los avances científicos y tecnológicos han repercutido en el desarrollo de técnicas analíticas y procesos capaces de identificar y de remover una amplia lista de compuestos, a tal grado que es posible hacer agua potable mediante la depuración del agua residual.

2.2. Clasificación de los compuestos presentes en el agua

La barrera entre que es contaminante y qué es un compuesto benéfico, muchas veces es cuestión de la cantidad en la cual se encuentra una sustancia, valor que no es universal para los seres vivos o usos del agua.

De acuerdo a su naturaleza

- Químicos. Los compuestos químicos provienen de los drenados de minas, desechos solubilizados de la agricultura, derrames de petróleo, pesticidas, aguas residuales municipales, desechos líquidos industriales y compuestos radiactivos. Producen efectos diversos y pueden ser de origen natural o sintético. Algunos son desechados directamente, otros se forman por la reacción entre diferentes compuestos en el agua y, por último, una pequeña fracción se forma durante el procesamiento del agua. Entre estos últimos se encuentran los organoclorados (tetracloruro de carbono y cloroformo principalmente) que se forman durante la desinfección del agua con cloro.
- Biológicos. Son seres vivos que provocan enfermedades en el hombre u otras especies. Las más comunes en el hombre son la tifoidea, la salmonelosis, disentería, cólera y helmintiasis. Los agentes que la causan entran al agua a través de las heces fecales de humanos o animales. Se estima que el 80% de todas las enfermedades y más de 1/3 de los fallecimientos en países en vías de desarrollo, se debe al consumo de agua contaminada. *(Jiménez, 2001)*
- Físicos. Son alteraciones de las propiedades físicas del agua, tales como la temperatura, color, etc. Su origen y efectos son diversos.

De acuerdo con el tamaño

Según la medida del contaminante, existe:

- Materia suspendida. Corresponde a moléculas en fase dispersa con diámetro equivalente entre 1 y 100 μ m.
- Materia coloidal. Es materia suspendida con características similares a la materia disuelta. Tiene diámetro equivalente entre 10^{-3} y 1 μ m y se caracteriza por ser de sedimentación muy lenta.
- Materia disuelta. Son moléculas o iones disueltos con diámetro equivalente entre 10^{-5} y 10^{-3} μ m.

2.3. Evaluación de la contaminación

En la tabla 1.1 se muestran los parámetros empleados para medir los contaminantes convencionales, que fueron los primeros en ser atendidos por la ingeniería ambiental.

Tabla 1.1. Clasificación de los principales parámetros para caracterizar el agua

Propiedad	Parámetro	
Físicos	Color	
	Olor	
	Turbiedad	
	Sólidos	
	Conductividad	
Químicos	pH	
	Materia orgánica	DBO DQO SAAM
Biológicos	Bacteriológicos	
	Parasitológicos	
	Viroológicos	

2.3.1 Composición física

Entre las propiedades físicas se encuentra el color, olor, sabor, temperatura, turbiedad, contenido de sólidos y conductividad.

Color

El color es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. No se puede atribuir a ningún constituyente en exclusiva, aunque ciertos colores en aguas naturales con indicativos de la presencia de ciertos contaminantes.

El color es muy importante en el agua potable, ya que puede dar una indicación rápida de la calidad; además, junto con el olor, determina la aceptación por parte del consumidor. El color afecta la efectividad del proceso de desinfección con cloro e incrementa el mal olor y sabor si están presentes los fenoles. El color en el agua de abastecimiento puede ser originado por la presencia de iones metálicos como el fierro y manganeso, sustancias húmicas, plancton o algas. Es un constituyente común de las aguas superficiales.

Las medidas de color se hacen normalmente en laboratorio, por comparación con un estándar arbitrario a base de cloruro de cobalto, Cl_2Co , y cloroplatino de potasio Cl_6PtK_2 , y se expresa en una escala de unidades de Pt- Co (unidades Hazen) o simplemente Pt. Las aguas subterráneas no suelen sobrepasar valores de 5 ppm de Pt, pero las superficiales alcanzan varios centenares de ppm.

Según el origen del color los principales tratamientos de eliminación pueden ser la coagulación y filtración, la cloración o la adsorción en carbón activo.

Olor

Es un parámetro que proporciona información sobre el estado del agua y puede provocar rechazo por parte del consumidor. El agua potable desinfectada debe oler y saber ligeramente a cloro. Algunos olores indican el aumento de la actividad biológica; otros, pueden originarse por la contaminación industrial. En lo que concierne a las aguas residuales, éstas tienen un olor muy diferente en cuanto se trate de agua fresca, esta en estado de descomposición o estabilizada.

Un olor se describe mediante las siguientes características:

- **Carácter:** con lo que se asocia un sujeto.
- **Detectabilidad:** a que dilución con aire puro ya no es perceptible.
- **Apeatabilidad:** que tan desagradable es.
- **Intensidad:** que tan fuerte es.

El olor es evaluado por personas y no con aparatos, por lo tanto, los resultados son subjetivos, ya que es posible que el sentido del olfato se adapte después de una exposición prolongada. Además, es muy difícil coleccionar y preservar muestras.

Turbiedad

La turbidez es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos que se presentan principalmente en aguas superficiales. Son difíciles de decantar y filtrar, y pueden dar lugar a la formación de depósitos en las conducciones de agua, y equipos de proceso.

La turbiedad ocasionada por materia coloidal puede ser resultado de la presencia de detergentes en el agua, jabones o emulsificadores. El impacto que genera es estético, además de que forma un área de adsorción. Las partículas coloidales asociados con la turbiedad producen sabor, olor y posible daño a la salud. Por ejemplo, en agua natural, la turbiedad da color, dificulta la penetración de la luz a través de la columna de agua y, por tanto, interfiere en la fotosíntesis. La turbiedad propicia la acumulación de sedimentos que afectan la flora y la fauna acuática.

Una manera de medir la turbidez es con un nefelómetro, el cual mide la intensidad de la luz difractada al incidir un rayo luminoso en un ángulo de 90° sobre las partículas en suspensión y recogida sobre una celda fotoeléctrica.

La turbidez se elimina mediante procesos de coagulación, decantación y filtración.

Sólidos

Se entiende por sólido a todo residuo que queda después de la evaporación (a 130° C).

La prueba de sólidos evalúa compuestos muy variados, por lo cual es considerada una prueba global. En efecto, los sólidos incluyen tanto las sales inorgánicas (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos de sodio, potasio, calcio, magnesio y fierro), como la materia orgánica.

De este modo, cuando se miden sólidos se mide a los responsables de la dureza, a los tóxicos, a los compuestos necesarios para el desarrollo de la vida. A medida que disminuye el tamaño de un compuesto en el agua, será más compleja la técnica de separación. De ahí, la importancia de conocer cómo se encuentra la distribución del tamaño de los contaminantes. La determinación de los sólidos se emplea también para el seguimiento de procesos biológicos y fisicoquímicos y, frecuentemente, es un parámetro contenido en la reglamentación de descargas.

En el laboratorio, esta distribución se determina midiendo los sólidos sedimentables, los suspendidos y disueltos.

- Sólidos sedimentables. Corresponden al volumen retenido en el fondo de un cono (Imhoff) después de 45 minutos de decantación y representa la fracción sólida de los contaminantes que serán fácilmente removidos por desarenación o sedimentación primaria; sus unidades son los mL/L.
- Sólidos suspendidos totales (SST). Son los sólidos retenidos al pasar agua a través de un filtro con apertura de poro de 0.45 μ m. representa la fracción contaminante susceptible de ser eliminada por sedimentación, floculación o filtración. Lo constituyen las partículas inorgánicas (arcillas, arenas, suelos) y orgánicas (fibras de plantas, células de algas, bacterias, microorganismos, etcétera).
- Sólidos disueltos (filtrables). Son los sólidos que atraviesan un filtro con poro de 0.45 μ m. Se componen de sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal consiste de partículas con diámetro de 10^{-3} a 1 μ m. los disueltos son moléculas y iones; que se encuentran diluidos en el agua. La concentración de sólidos disueltos e el agua se debe a la presencia de

minerales, gases, productos de la descomposición de materia orgánica, metales y compuestos químicos orgánicos que dan color, olor, sabor y, eventualmente, toxicidad al agua que los contiene.

Conductividad

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad de una solución para conducir electricidad. Es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua. El agua pura contribuye mínimamente a la conductividad, y en su casi totalidad es el resultado del movimiento de los iones de las impurezas presentes.

Lo que frecuentemente se mide en el laboratorio no es la conductividad sino la resistencia al paso de la corriente en ohmios (ohm). La resistencia de un conductor es inversamente proporcional al área transversal y, directamente, a la longitud. En consecuencia, la resistencia depende de las características de la celda empleada para medirla, por lo que los aparatos efectúan este ajuste. Los valores se reportan a 25° C. el recíproco de la resistencia es la conductancia y se mide en ohm^{-1} o mhos. De hecho, para el agua usualmente son μ mhos. Cuando este valor se ajusta por la superficie de la celda, se denomina conductividad específica y se expresa en $\mu \text{ s/cm}$.

La conductividad del agua residual depende de la fuente de abastecimiento, y sólo algunos procesos industriales la modifican significativamente. Este parámetro se adapta fácilmente a monitores continuos y es indicador rápido de contaminación de cuerpos de agua. Se puede evaluar con ella el contenido de sólidos disueltos en forma rápida. La conductividad es excelente auxiliar para determinar la calidad de agua destilada de un laboratorio.

2.3.2 Composición química

pH

Se determina mediante un electrodo de vidrio que proporciona, en forma directa, el valor del pH del agua. El valor de pH es el cologaritmo de la concentración de los iones hidronio.

La escala de pH varía entre 0 y 14, siendo 7 la neutralidad. La evaluación del pH se emplea para caracterizar un agua, dar seguimiento a un proceso (neutralización, biológico anaerobio, corrosión), o bien, para controlar las condiciones de operación (precipitación, floculación, sistemas biológico anaerobios, desinfección) ya que la velocidad de las reacciones depende de él. El pH de los cuerpos de agua y el agua residual doméstica, en general, es ligeramente alcalino, por la presencia de bicarbonatos, carbonatos y metales alcalinos. En las descargas industriales es posible encontrar pH ácido o básico, debido al uso de reactivos químicos.

El pH aceptable, para agua potable, varía entre 6.5 a 8.5 como valor guía; en sistemas rurales, el intervalo aceptable de pH es mayor. El pH del agua residual doméstica es ligeramente alcalino (pH= 7.2).

2.3.3 Parámetros indicativos de contaminación orgánica y biológica

Tanto la actividad natural como la humana contribuyen a la contaminación orgánica de las aguas naturales. La descomposición de la materia animal y vegetal da lugar a ácidos húmicos y fúlvicos y a material colorantes. Los residuos domésticos contienen materias orgánicas en descomposición, detergentes y microorganismos. Los vertidos industriales contienen múltiples compuestos orgánicos, tales como aceites y disolventes. De la actividad agrícola resultan residuos de herbicidas y pesticidas.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua, mediante procesos biológicos aerobios. En general se refiere al oxígeno consumido en cinco días (DBO_5) y se mide en partes por millón de O_2 , las aguas subterráneas suelen contener menos de una ppm. Un contenido superior es un indicativo de contaminación. Su eliminación se realiza por procesos fisicoquímicos y biológicos aerobios o anaerobios.

Demanda química de oxígeno (DQO)

Mide la capacidad de consumo de un oxidante químico, dicromato o permanganato, por las materias oxidables contenidas en el agua, y también se expresa en partes por millón de O_2 . Indica el contenido en materias orgánicas oxidables y otras sustancias reductoras, tales como Fe^{2+} , NH_4^+ .

Las aguas no contaminadas tienen valores del DQO de 1 a 5 ppm, o algo superiores. Las aguas residuales domésticas suelen contener entre 250 y 600 ppm.

La relación entre DBO y DQO es un indicativo de la biodegradabilidad de la materia contaminada. En aguas residuales un valor de la relación DBO / DQO menor de 0.2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y si es mayor a 0.6 como orgánico.

Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)

Los principales problemas que provocan estos compuestos, en concentraciones muy bajas, son la producción de espuma y la impartición de sabor. Por ello, el estándar de 0.5 mg/L representa un factor de seguridad de 15,000 veces en relación con su toxicidad. Este método mide en forma global los detergentes aniónicos (alquil benceno sulfonato lineal, ABS) y los catiónicos.

Como su nombre lo indica, las sustancias son determinadas por su reacción con el azul de metileno mediante una técnica colorimétrica. La prueba de SAAM mide los compuestos de sulfato de alquilo. Este análisis reemplazó a la técnica de la determinación del ABS.

En general, la detección de los detergentes es compleja, principalmente por los problemas que representa el muestreo de un contaminante no repartido homogéneamente. Durante la toma de muestras deben evitarse sitios con espuma; si no es posible, debe deshacerse la espuma y mezclarse con líquido. Este método no sirve para detectar jabones, que son sales alcalinas de las grasas. Los jabones son solubles en agua, pero en presencia de los constituyentes de la dureza se transforman en sales cálcicas y magnésicas de ácidos grasos, también conocidos como jabones minerales, que son insolubles y precipitan.

2.4. Procesos de depuración

Un sistema de depuración se compone de la combinación de procesos y operaciones unitarias que tienen por objeto reducir determinados compuestos hasta un nivel predeterminado. Las operaciones son sistemas en donde intervienen, básicamente, fuerzas físicas de separación, en tanto que los procesos involucran cambios de estado de la materia por medios químicos o biológicos. Las combinaciones son múltiples y se agrupan, usualmente, por el tipo de contaminante que remueven.

Los procesos descritos en la *tabla 1.2* son los más comunes para el tipo de contaminante indicado, pero existen otras posibilidades cuya aplicación depende del factor económico. De igual forma, aunque un proceso tenga una aplicación principal, en realidad remueve un amplio grupo de compuestos, no necesariamente todos contaminantes.

Tabla 1.2. Operaciones y procesos unitarios que se emplean para el tratamiento del agua

Contaminante	Proceso/ operación/ sistema
Sólidos suspendidos	Sedimentación Desarenación Filtración Flotación Coagulación- Floculación
Compuestos orgánicos biodegradables	Lodos activados Filtro sumergido
Patógenos	Cloración Ozonación UV Filtración lenta
Compuestos orgánicos refractarios	Carbón activado Ozonación
Metales pesados	Precipitación Intercambio iónico

La evolución histórica ha hecho que se distingan diferentes etapas de tratamiento que corresponden el nivel pretratamiento, primario, secundario o biológico y terciario o avanzado (tabla 1.3). Actualmente, es posible encontrar esquemas donde no se distinguen en forma clara las etapas, debido al desarrollo de sistemas compactos de menor costo, pero la costumbre hace que se continúen clasificando los sistemas bajo este patrón, particularmente en el caso de las aguas residuales. Adicionales, existen los procesos complementarios que sirven para apoyar el proceso principal de eliminación y que se aplican en cualquier nivel de tratamiento.

Tabla 1.3. Niveles de tratamiento

Etapa	Proceso
Pretratamiento	Cribado Flotación Desarenación
Primario	Sedimentación Reoxigenación
Secundario	Procesos biológicos Coagulación- floculación
Terciario/ avanzado	Filtración Remoción de N y P Remoción de detergentes
Complementario	Desinfección

Como ejemplo, en la figura 1.1, se presenta la secuencia de operaciones y procesos unitarios en una planta convencional de tratamiento de agua residual doméstica.

En cuanto a los costos de los distintos tratamientos, estos van variando dependiendo de la etapa en la que este el proceso, es decir, entre más específico y más eficiente sea el tratamiento este va aumentando en cuanto a su costo. Otro factor importante es el tipo de contaminante que se va a remover. Por ejemplo, si se quiere remover DBO por un tratamiento primario este puede costar aproximadamente 30 DLS, pero si además del tratamiento primario se quiere elaborar y tratamiento biológico y una desnitrificación este puede aumentar hasta 97 DLS por m³.

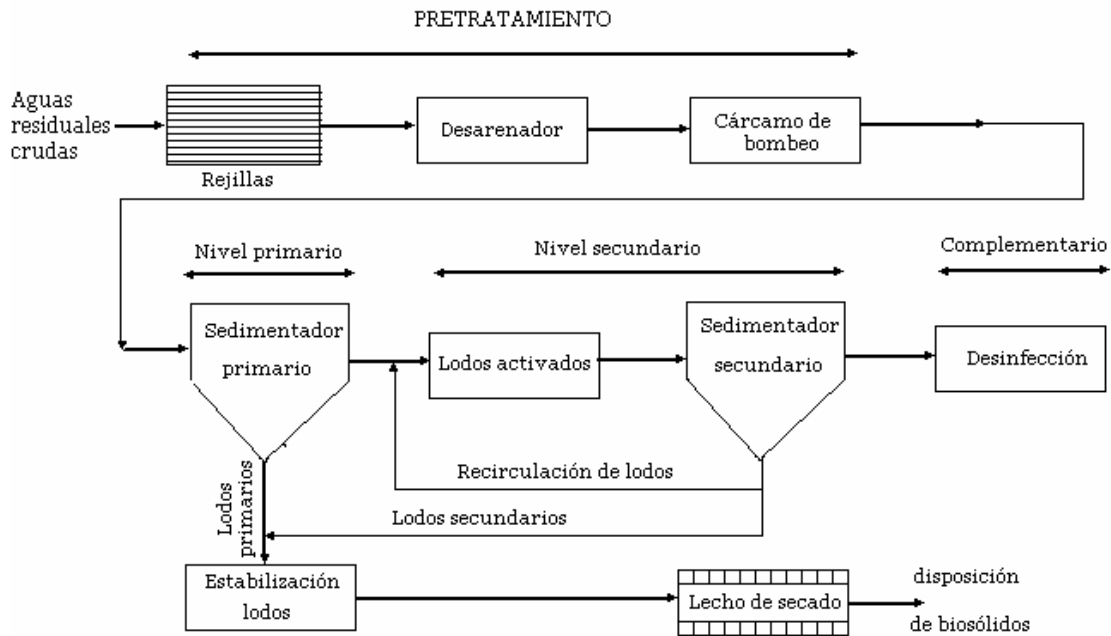


Fig 1.1. Ejemplo de una planta convencional de agua residual doméstica

2.4.1 Criterios de selección

La selección de los procesos y operaciones que conforman un sistema de tratamiento depende de:

- La composición del agua residual.
- El caudal
- El uso del efluente tratado o del requerimiento legislativo (determina la calidad de salida y la eficiencia de la remoción)
- La compatibilidad entre los diferentes procesos y operaciones.
- La disponibilidad de tecnología y del terreno.
- La factibilidad económica de las diferentes combinaciones (construcción, operación y mantenimiento).

De lo anterior, se desprende que existe un gran número de posibilidades para tratar el agua. Pero, además, para tener un proceso realmente eficiente e integral (que no dañe el ecosistema) es necesario tomar en cuenta el tratamiento y la disposición de los subproductos generados (lodos).

2.4.2 Clasificación de los procesos empleados

Como se mencionó, la eliminación de contaminantes se realiza mediante procesos que se clasifican en dos grandes grupos: los físico- químicos (fenómenos abióticos) y los biológicos (fenómenos bióticos), estos son:

Tratamientos físicos y químicos:

- Coagulación- floculación
- Sedimentación
- Filtración
- Desecación
- Adsorción
- Destilación
- Evaporación
- Neutralización
- Intercambio iónico
- Desinfección

Tratamientos biológicos:

- Lodos activados
- Filtro percolados
- Filtro sumergido
- Lecho fluidificado
- Reactor anaerobio de flujo ascendente

2.4.3. Coagulación y floculación

La turbidez y el color con dos características indeseables en las aguas. Ambas suelen estar causados por partículas coloidales. Mientras las partículas en el orden de magnitud de una micra, se pueden considerar en suspensión, y las de una milésima de micra entran en el dominio de moléculas en solución, los tamaños intermedios corresponden al tamaño coloidal. En estos tamaños de partícula las propiedades superficiales y las cargas eléctricas tienen efectos más importantes que el peso relativo de la partícula en el agua e impiden su sedimentación.

Las partículas coloidales presentan cargas superficiales electroestáticas, que hacen que existan fuerzas de repulsión entre ellas y les impida aglomerarse para sedimentar. Estas cargas son en general negativas, aunque los hidróxidos precipitados con cal las suelen tener positivas.

La coagulación consiste en la neutralización de las cargas superficiales mediante la adición de electrolitos. La precipitación de un coloide se provoca mediante la adición de un electrolito de carga opuesta a la de las partículas coloidales, y además el efecto aumenta marcadamente con el número de cargas que lleva el electrolito.

Cuando por ejemplo se añade Al^{3+} como coagulante en forma de sulfato, aparte de los iones trivalentes se dirigen a la neutralización de las cargas negativas del coloide, mientras que la mayor parte reaccione con agua formando hidróxido. Por un mecanismo independiente, el hidróxido insoluble formado atrapa los coloides neutralizados y facilita su decantación.

Las partículas formadas en la coagulación, pueden ser aún pequeñas y de baja densidad. El tamaño de las partículas se puede aumentar con la adición de floculantes (polielectrolitos), polímeros de moléculas de alto peso molecular y solubles en agua que por disociación electrolítica en el agua, dan formas iónicas múltiples, capaces de actuar de puentes de unión entre las partículas coaguladas.

Hasta ahora no se han podido encontrar los mecanismos exactos que ocurren durante estos procesos, pero existen muchas teorías que hablan de ellos.

2.4.3.1 Sistemas dispersos

En teoría, toda clase de materia que esté finamente dividida puede estar en estado coloidal. Los coloides quedan en dispersión en el medio que los rodea. Los coloides forman la *fase dispersa* y el medio toma el nombre de *medio dispersante*.

Los sistemas coloidales se pueden clasificar en función de los estados de la fase dispersa y del medio dispersante. Además se pueden definir los sistemas dispersos por un intervalo de tamaño de partícula.

2.4.3.2. Teorías sobre el mecanismo de coagulación

Teoría química

Esta teoría supone que los coloides son agregados de estructuras químicas definidas, cuya carga primaria de partículas coloidales proviene de la ionización de grupos inorgánicos complejos presentes en la superficie de las partículas dispersadas, y que la desestabilización de coloides es debida a la interacción química, la cual es la formación de complejos y transferencia de protones.

Teoría física

La teoría física enfatiza el concepto de la doble capa eléctrica y la importancia de los factores físicos predominantes, tales como la adsorción de iones de carga contraria, reducción del potencial zeta y formación par ión en la desestabilización de coloides.

Es decir, los iones ajenos son absorbidos en la superficie de la partícula dispersada, las partículas dispersas son cargadas eléctricamente. Estor iones ajenos pueden darse por la adición de electrolitos, la coagulación se asume a la adsorción del contra-ión y compactación de la parte difusa de la doble capa, y el proceso puede ser visualizado asumiendo que las cargas son neutralizadas.

2.4.3.3. Mecanismo de floculación

Se han discutido previamente las reacciones y mecanismos que desestabilizan los componentes que se desean eliminar en los procesos de tratamiento de agua (coagulación). El proceso de floculación se da en diferentes pasos, iniciado por la colisión aleatoria de partículas debido al movimiento browniano, dando como resultado la formación de flóculos. Este proceso se denomina floculación pericinéctica y se completa dentro de pocos segundos debido al limitado tamaño del flóculo sobre el efecto del movimiento browniano. Este mecanismo ocurre en lo que se conoce como la etapa de mezclado rápido del proceso, la cual es necesaria para un contacto eficiente y completo del coagulante con los contaminantes, también sea quizás la más importante operación en el tratamiento de agua por coagulación- floculación.

El tiempo para que se complete el mecanismo de desestabilización está determinado por la duración de la reacción de los diferentes pasos que están involucrados.

La siguiente etapa de la floculación es conocida como floculación ortocinéctica. En este caso, el mayor contacto de partículas es ejercido por una inducción de gradientes de velocidad ya sea por obstrucciones físicas en el flujo o por agitación mecánica o hidráulica. Las diferentes velocidades de las partículas así crean la oportunidad de la colisión y posterior aglomeración. El tiempo y gradiente de velocidad determinan la tasa y extensión de la agregación de partículas. Obviamente un gradiente de velocidad alto inducirá una rápida agregación pero limitará el tamaño de la partícula o del flóculo. Esto produce para cualquier gradiente de velocidad dado un tiempo de floculación limitado fuera del cual el tamaño del flóculo no se incrementará.

2.4.3.4 Agentes coagulantes

En la actualidad existen muchos tipos de agentes coagulantes, que se clasifican en dos grandes grupos: orgánicos e inorgánicos.

Los compuestos coagulantes orgánicos son principalmente polímeros cuya composición consiste en moléculas de grandes cadenas de unidades químicas repetidas con una estructura definida para

proveer propiedades fisicoquímicas distintivas en el polímero. Las unidades químicas usualmente tienen una naturaleza que imparte una carga eléctrica a la cadena del polímero. Estos polímeros presentan buena aplicación en el tratamiento de aguas, pero debido a su alto costo es poco factible su uso.

Los agentes coagulantes inorgánicos son normalmente sales o polielectrolitos. Los más usados son ciertas sales de Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} y Ca^{2+} , por su efectividad y bajo costo.

Para poder comprender la coagulación y floculación se comenzó a observar que tanto la teoría química como la teoría física, tenían que ser aplicadas conjuntamente.

Se cree que la adsorción es uno de los pasos más importantes en la desestabilización de partículas coloidales. Se propuso un mecanismo denominado adsorción- desestabilización. Se propone que los cationes metálicos tales como el Al^{3+} y el Fe^{3+} , son hidratados en agua y son rápidamente absorbidos en la interfase de las partículas dispersas, mientras que los iones acuometálicos simples no son adsorbidos. A causa de la adsorción de especies con cargas opuestas, las partículas dispersas se desestabilizan permitiendo que la coagulación- floculación ocurra.

La coagulación- floculación es un proceso que depende del tiempo y se cree que intervienen ciertos pasos en la reacción, tales como:

- Hidrólisis de iones metálicos multivalentes y la subsecuente polimerización a especies de la hidrólisis multinuclear.
- Adsorción de especies de la hidrólisis en la interfase sólido- líquido para acompañar la desestabilización de los coloides.
- Agregación de partículas desestabilizadas por el enlace involucrando
- Agregación de partículas desestabilizadas por el transporte de partículas y fuerzas de van der Waals.
- Precipitación de hidróxidos metálicos.

2.4.3.5. Sistema para la elaboración de la coagulación- floculación:

Prueba de jarras

La prueba de jarras sirve para determinar si un efluente puede ser tratado de manera rentable y con la eficiencia deseada mediante tratamiento de floculación- coagulación. El ensayo consiste en colocar agua residual en vasos de precipitado y añadir, progresivamente, diferentes cantidades de coagulante. Se somete el juego de vasos a una agitación rápida para homogeneizar el medio y, posteriormente, a una lenta para favorecer la formación del flóculo. Pasado cierto tiempo, se dejan los vasos en reposo y se analizan tanto el sobrenadante como los lodos producidos.

Mediante estos ensayos es posible determinar el coagulante o floculante óptimo, mezclado necesario, pH óptimo, dosis óptima y rendimiento máximo alcanzable.

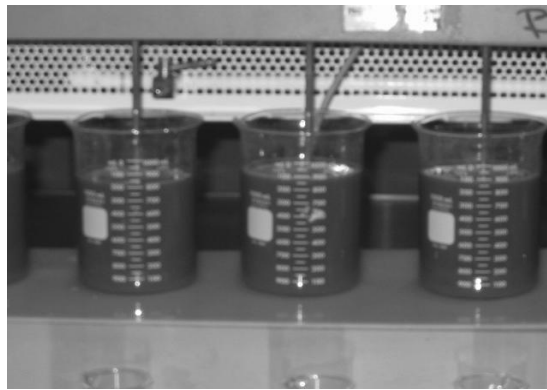


Fig 1.2. Sistema de prueba de jarras que ayuda a elaborar procedimientos de coagulación- floculación

Para realizar el tratamiento de coagulación- floculación mediante la prueba de jarras es necesario desarrollar las siguientes etapas:

- Caracterización del agua: Determinación de los contaminantes presentes en el agua para conocer las dosis de los coagulantes y floculantes que se van a utilizar.
- Coagulación: Mediante una agitación rápida en la prueba de jarras se cambia la carga de las partículas coloidales, haciendo que se aglomeren formando los flóculos.
- Floculación: Mediante un floculante y una agitación lenta en la prueba de jarras, se logra el aumento y aglomeración de los flóculos para obtener mayor peso.

- Sedimentación: Etapa en la que se logra la separación, mediante la sedimentación, de los flocúlos (fondo del vaso) y del agua tratada.
- Disposición de los lodos: Eliminación de los lodos separados del agua según la Normatividad.

2.4.3.6 Factores que afectan el proceso de coagulación-floculación

Se ha determinado que existen otros factores que son importantes durante la coagulación, como son, dosis aplicada de agente coagulante, agitación y temperatura.

Efectos causados por el pH.

Se ha encontrado en la literatura reportes sobre los efectos del pH en ciertos coagulantes inorgánicos. Estos dicen que para obtener un mejor resultado de remoción de contaminantes es necesario utilizar el pH entre 3 y 5 con la dosis óptima del coagulante. Si originalmente el agua a tratar tiene un pH ácido la remoción puede ser de hasta un 95%, pero cuando se ajusta el pH a valores más altos que 5, el por ciento de remoción puede ser muy pobre.

Efectos causados por la temperatura.

- En condiciones de temperatura extremadamente baja la eficiencia de remoción de la turbiedad por medio de agentes coagulantes con un ión metálico disminuye. Esto puede ser debido a cambios fundamentales en las características de los flocúlos, ya que a estas condiciones resultan ser más pequeños que los formados a temperatura controlada.
- La temperatura tiene gran impacto en el proceso de coagulación cuando se usa el sulfato de aluminio, debido a que la velocidad de reacción de la hidrólisis es dependiente de la temperatura y aumenta conforme se incrementa esta misma.
- Condiciones de baja temperatura pueden inhibir la velocidad de precipitación de hidróxido da aluminio.

Efectos causados por la agitación

El objetivo principal de la agitación es facilitar el contacto entre los iones metálicos y las partículas coloidales que se encuentran en solución en un menor tiempo. Anteriormente, se recomendaba aplicar una agitación rápida durante aproximadamente 5 minutos y una agitación lenta de una hora.

Posteriormente, se redujeron estos tiempos. Esto es por que se menciona que el mezclado rápido sólo tiene importancia en uno de los mecanismos que intervienen en la coagulación- floculación,

adsorción- desestabilización, y que debido a que este mecanismo se realiza de manera muy rápida, los productos de hidrólisis que se forman en microsegundos y los productos poliméricos pueden formarse en un segundo. La agitación rápida no puede durar mucho tiempo ya que si esto pasa, los flóculos pueden ser dañados y las partículas coloidales se reestabilizarán.

El propósito fundamental del mezclado lento es promover colisiones entre partículas para que se formen. Esta colisión de partículas se da por movimiento Browniano, movimiento del fluido y sedimentación diferencial.

Las colisiones entre dos partículas pequeñas se da primeramente por movimiento Browniano. Las colisiones entre partículas pequeñas y grandes son en su mayoría generadas por sedimentación diferencial, por ejemplo, colisiones que ocurren entre partículas con diferentes velocidades de sedimentación. Ninguno de estos procesos se ven afectados por la intensidad de mezclado.

Las colisiones por movimiento del fluido se dan entre partículas de todos tamaños y ocurre principalmente en las regiones de tamaño donde no son influenciadas de forma significativa por el movimiento Browniano y la sedimentación diferencial.

CAPITULO DOS

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es encontrar un coagulante y un floculante que nos permitan remover de una manera más eficiente, los contaminantes en un agua obtenida del lavado de suelo por medio de la prueba de jarras.

1.1. Objetivos específicos

- Evaluar la eficiencia de diferentes coagulantes y floculantes para seleccionar al más adecuado y así determinar las dosis óptimas con las que se obtienen una mayor remoción de contaminantes.
- Evaluar el efecto que tiene el pH en el tratamiento de coagulación- floculación.
- Aplicar un método estadístico haciendo un interacción entre las variables: dosis del coagulante, dosis del floculante y pH, que permita predecir el comportamiento del sistema y así conocer el efecto que tiene cada una de las variables con respecto a la eficiencia final del tratamiento.

2. Hipótesis

La correcta aplicación del proceso de coagulación- floculación y sedimentación a las aguas residuales provenientes del lavado de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo, resultará en una importante disminución en su carga orgánica (DQO), color, turbiedad y aún del contenido de sales (medido por conductividad eléctrica).

CAPITULO TRES

MÉTODOS EXPERIMENTALES

1. Materiales y equipos

1.1. Materiales

Los materiales empleados en este trabajo se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Materiales utilizados en la experimentación

<u>Materiales</u>	<u>Capacidad</u>	<u>Marca</u>
Vaso de precipitado	1L	Pyrex
Vaso de precipitado	50 mL	Pyrex
Pipeta graduada	10 mL	Pyrex
Perillas para pipeta		
Tubos de ensaye		Pyrex
Espátula		

1.2. Equipos

Los equipos utilizados en este trabajo se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Equipos y aparatos utilizados en la experimentación

<u>Equipos</u>	<u>Marca</u>
Digestor de DQO (COD Reactor)	HACH
Espectofotómetro	HACH
Potenciómetro	
Conductímetro	
Balanza analítica	OHAUS
Estufa	FISHER

1.3. Sustancias

Las sustancias usadas en este trabajo se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Sustancias utilizadas en la experimentación

<u>Sustancias</u>		
• Agua proveniente del lavado de suelo		
• Coagulantes	<u>Sintéticos</u>	<u>Naturales</u>
	Ferrix	Alginato de Sodio
	FeCl ₃	Algarrobo
	Sulfato de Aluminio	Tanfloc
	Policloruro de Aluminio	Goma de Guar
	Cal	
• Floculantes	Tecnifloc	Quimifloc 4800
	Tecnifloc 1693	Quimifloc 511
	Tecnifloc 5520	Bufloc 5368
	Tecnifloc plus	Bufloc 5366
	Tecnifloc 777	Bubond 60
	Tecnifloc 998	BL 5086
	Tecnifloc 4800	
• Solución de HCl 1M		
• Solución de NaOH 1M		
• Agua destilada		

2. Metodología Experimental

2.1. Caracterización del agua residual

El agua que se trató durante esta experimentación fue obtenida por el lavado de suelo un contaminado con hidrocarburos (Climent M, 2007). Este suelo se obtuvo del complejo cinco Presidentes, Tabasco y el lavado se llevó a cabo con un surfactante (SDS al 5%).

Se obtuvieron aproximadamente 25 L de agua residual y se mandó a caracterizar a un laboratorio especializado de la Universidad Autónoma Metropolitana, para conocer su grado y valores de contaminación en diversos parámetros.

Una vez realizada la caracterización, se realiza una dilución al 50% ya que se considera que en el proceso de lavado se da una dilución similar con las aguas de enjuague.

Aunque se realizó una caracterización de agua obtenida del lavado de suelo en un laboratorio especializado, esta se debe caracterizar nuevamente durante cada uno de los experimentos de coagulación- floculación, con el fin de poder comparar los resultados experimentales finales del tratamiento con los resultados experimentales iniciales del agua, esto para que se empleen en las mismas condiciones de trabajo, esta caracterización sólo abarcó la demanda química de oxígeno (DQO), el color, la turbiedad, la conductividad y el pH.

2.1.1 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El método se basa en una oxidación enérgica de la materia orgánica y de la inorgánica oxidable que se encuentra en el agua. Para realizar esta prueba se utiliza la técnica de la compañía HACH, la cual utiliza una solución oxidable (Digester Solution for CDO) con un rango de 0 a 1500 ppm para determinación de DQO para oxidar las muestras de agua. Esta solución oxidable es obtenida de la misma compañía y se proporciona en tubos HACH, con la cantidad necesaria de esta solución (5 mL).

Procedimiento

- Se utilizan 2 tubos HATCH con la solución oxidable. Uno de ellos servirá como *blanco* y el otro servirá para la muestra de agua contaminada.
- En el que va a servir de *blanco*, se le deben agregar 2 mL de agua destilada. Para agregarla el tubo debe estar inclinado a 45° y el procedimiento debe ser lento.
- En el otro tubo, agregar 2 mL del agua contaminada. De la misma manera, este debe estar inclinado a 45° y el procedimiento debe ser lento.
- Ya que se tienen los 2 tubos estos deben cerrarse muy bien y agitarse lentamente, volteando los tubos hasta que la solución quede uniforme.
- Los 2 tubos se introducen en el digestor HACH de DQO, el cual debe estar precalentado a 150 °C. Estas soluciones deben permanecer 2 horas en el digestor.
- Transcurridas las 2 horas, las muestras se deben dejar enfriar durante 20 minutos.
- Para realizar la lectura de DQO, es necesario utilizar el espectrofotómetro HACH (ver técnica completa en el Apéndice II), donde primero se introduce el blanco para calibrar y después se lee el valor del DQO de la muestra de agua contaminada. Esta lectura se obtiene en mg/ L de oxígeno.

2.1.2 Determinación del color aparente

Para determinar el color, es necesario realizar diluciones del agua contaminada, ya que este método se realiza en el espectrofotómetro HACH, el cual está calibrado en un rango de 0 a 500 Pt- Co, por lo tanto si el agua no tiene la dilución correcta esta lectura no se puede realizar. Las unidades Pt- Co, también llamadas Hazen, equivalen a 1 mg/ L de platino como ión cloro-platinado que es una unidad de color.

Procedimiento

- Realizar una dilución de 1/ 50 de la muestra de agua contaminada, y agregar 25 mL de esta en una celda especial para el espectrofotómetro HACH.
- Agregar 25 mL de agua destilada en otra celda, esta servirá como *blanco*.
- Limpiar las celdas con un paño tomándolas por la parte superior
- Calibrar el espectrofotómetro con el *blanco* y después realizar la lectura de la muestra de agua contaminada (ver técnica completa en el Apéndice II).

2.1.3. Determinación de la turbiedad

La determinación de la turbiedad se realiza de la misma manera que el color, solo que las unidades en las que se lee los resultados el aparato HACH son FTU (formazin turbidity unit) la cual es equivalente a una unidad nefelométrica.

Procedimiento

- Realizar una dilución de 1/ 60 de la muestra de agua contaminada, en este caso la dilución es mayor, por que el rango del espectrofotómetro es de 0 a 100 FTU. Agregar 25 mL de esta en una celda especial para el espectrofotómetro HACH.
- Agregar 25 mL de agua destilada en otra celda, esta servirá como *blanco*.
- Limpiar las celdas con un paño tomándolas por la parte superior.
- Calibrar el espectrofotómetro con el *blanco* y después realizar la lectura de la muestra de agua contaminada (ver técnica completa en el Apéndice II).

2.1.4. Determinación de la conductividad

Para determinar la conductividad se utiliza un conductímetro. Este debe ser calibrado con una solución de KCl (ver calibración y la preparación de la solución de KCl en el Apéndice II).

Procedimiento

- Una vez calibrado el conductímetro, este se debe introducir en agua destilada para limpiarlo.
- Después se debe introducir en la muestra de agua contaminada, y la lectura aparecerá cuando se estabilice la numeración, esta se mostrará en μS (micro Siemens) o mS (mili Siemens), dependiendo de la muestra de agua.
- Si la numeración no se estabiliza o aparece E3 (error) significa que la conductividad del agua no pertenece al rango que se tiene en el conductímetro; en este caso se deben realizar diluciones del 50% de las muestras hasta que se permita determinar la conductividad.
- Entre cada lectura se debe enjuagar el electrodo con agua destilada y posteriormente deberá secarse.

2.1.5. Determinación del pH.

Para determinar el pH se utiliza un potenciómetro. Para su calibración se utilizan dos soluciones buffer, una con un pH de 4 y la otra con un pH de 10; estas soluciones fueron proporcionadas por el mismo fabricante del potenciómetro (ver calibración en el Apéndice II).

Procedimiento

- Una vez calibrado el potenciómetro, este se debe de introducir directamente en la muestra de agua contaminada. El pH se lee directamente del potenciómetro una vez que la numeración se estabilice.
- Entre cada lectura de pH, el electrodo debe ser enjuagado con agua destilada y posteriormente debe secarse.
- Si aparece *error* en la pantalla, significa que el potenciómetro debe calibrarse de nuevo.

- La calibración se debe realizar después de la tercera lectura de las muestras, esto es para disminuir el rango de error.

2.2. Coagulación- Floculación: Prueba de jarras

Para realizar estas experimentaciones se utiliza un equipo de prueba de jarras, el cual cuenta con flechas y paletas de agitación, donde pueden colocarse seis vasos de precipitados de 1L que contienen las muestras de agua contaminada para el tratamiento. El equipo puede controlar de manera muy precisa las velocidades y tiempos de agitación.

Procedimiento

- Agregar 800 mL del agua contaminada en los vasos de precipitados de 1L especiales para la prueba.
- Poner los vasos debajo de cada uno de los agitadores del aparato y prenderlos hasta obtener una velocidad de 100 rpm.
- Se agrega el coagulante, esta dosis depende de la parte experimental que se lleve a cabo, y dejar agitar por 3 minutos.
- Después disminuir la velocidad a 20 rpm y se agrega el floculante, esta dosis depende de la parte experimental que se esté realizando, y se deja agitar por 15 minutos.
- Por último se apagan los agitadores y se dejan sedimentar las muestras por 20 minutos.
- Tomar una muestra, con las pipetas graduadas, del agua después del tratamiento. Es importante que esta muestra se tome en la parte superior del vaso, ya que en la parte inferior se encuentran los flocúlos sedimentados.
- Determinar los parámetros de contaminación: DQO, color, turbiedad, conductividad y pH, según las técnicas anteriormente especificadas.

2.2.1. Selección del coagulante

En la tabla 3.2 se muestran los coagulantes que se van a utilizar en la experimentación. Para realizar las pruebas se deben preparar soluciones de los 9 coagulantes. Estas soluciones son al 2% p/v para los coagulantes sintéticos y 1% p/v para los coagulantes naturales, esto es por que los coagulantes naturales espesan mucho el agua y es muy difícil de utilizar, por lo que la solución debe ser más diluida.

Procedimiento

- En etapa de la coagulación la dosis agregada debe ser de 1000 mg/L de cada uno de los coagulantes.
- Posteriormente en la etapa de la floculación no se agrega ningún floculante, ya que en esta parte de la experimentación solo se está seleccionando al coagulante más eficiente; sin embargo, la velocidad de agitación y el tiempo transcurrido normalmente en esta etapa, debe ser respetado para que se tengan las mismas condiciones de trabajo en todos los experimentos.
- Las muestras de agua tomadas después de la sedimentación y la determinación de los contaminantes se realiza de la misma manera en todos los casos.
- Una vez determinados los parámetros de contaminación, realizar una comparación con los resultados de estos antes y después del tratamiento de coagulación- floculación, para cada uno de los coagulantes. Esto con el fin de seleccionar al coagulante con el que se obtuvo una mejor remoción de estos.

2.2.1.2 Selección de la dosis óptima del coagulante

Una vez seleccionado al coagulante con el que se obtuvieron mejores resultados, se determina la concentración con la que este coagulante será más eficiente y se logre una mejor remoción de los contaminantes.

Las concentraciones utilizadas para realizar estas pruebas son: 1000, 2000, 4000 y 6000 mg/L.

Procedimiento

- Las pruebas se realizan en la prueba de jarras con las mismas condiciones de trabajo, solamente que en este caso se utiliza el mismo coagulante variando sus concentraciones por las anteriores.
- En la etapa de floculación no se agrega ningún reactivo, pero si se siguen las mismas condiciones de trabajo.
- Para esta parte del trabajo solo se determina el color y la turbiedad de las muestras de agua antes y después del tratamiento.
- Comparar los resultados obtenidos para determinar la concentración más eficiente del coagulante seleccionado.

2.2.2. Selección del floculante

En la tabla 3.2 se muestran los floculantes utilizados para esta prueba. Para poder utilizarlos es necesario preparar soluciones al 1% p/v de concentración.

Procedimiento

- Estas pruebas se realizan de la misma manera en la prueba de jarras, con las mismas condiciones de agitación y tiempos.
- Para la etapa de la coagulación se utiliza el coagulante y su concentración óptima determinados en puntos anteriores.
- En la etapa de la floculación, se agregan las soluciones de los floculantes a una concentración de 1.5 mg/L (Mijaylova, et al 1996).
- Para seleccionar al floculante más eficiente se realizan pruebas de color y turbiedad, antes y después del tratamiento para compararlos y poder hacer una correcta selección.

2.2.2.2 Selección de la dosis óptima del floculante

Una vez realizada la selección del floculante más eficiente, se utiliza la prueba de jarras nuevamente, para determinar la dosis del floculante con la que se obtiene una mejor remoción de los contaminantes.

Las concentraciones probadas fueron 0, 0.25, 0.5, 1, 1.5, y 2 mg/L y se aplican para el mismo floculante:

Procedimiento

- Las condiciones para la realización de los experimentos en la prueba de jarras son las mismas que las anteriores.
- En la etapa de coagulación, se sigue utilizando al mismo coagulante anterior así como su dosis óptima.
- En la etapa de floculación se utiliza al mismo floculante, pero ahora las dosis utilizadas van a variar como se mencionó anteriormente.
- Se realizan las pruebas de color y turbiedad para poder hacer una comparación, y así seleccionar la dosis con la que se obtienen mejores resultados.

2.2.3. Efecto del pH en el tratamiento de coagulación-floculación

Estas pruebas se realizaron para conocer el efecto del pH sobre la remoción total de los contaminantes. Primero se determinó cual era el pH inicial de las muestras y de ahí se seleccionaron tanto valores más ácidos, como valores más básicos de este, para conocer en que condiciones se obtenían mejores resultados.

Los valores de pH que se utilizan son: 3.5, 4, 4.5, 5 y 5.5.

Procedimiento

- Antes de iniciar la prueba se debe de modificar el pH, por los valores anteriormente mencionados, utilizando HCL 1M y/o NaOH 1M para poder modificar el pH, según sea el caso. Para esto se utiliza la técnica de de pH (método 2.1.5) utilizando un potenciómetro.
- En este caso se utiliza un agitador magnético y una parrilla de agitación para lograr homogeneizar los 800 mL de agua que se utiliza en cada prueba y así lograr el pH correcto en toda la muestra de agua.

- Una vez logrado el pH indicado, se utiliza la prueba de jarras, en las mismas condiciones que antes, y en el caso de la etapa de coagulación se utiliza el coagulante seleccionado a su dosis óptima; y en la etapa del floculante se utiliza al floculante seleccionado con su dosis óptima.
- Se realizan pruebas de color y turbiedad antes y después del tratamiento para poder conocer el efecto del pH con respecto a la remoción de los contaminantes y así determinar las mejores condiciones de trabajo.

2.2. Interacción entre la dosis del coagulante, dosis del floculante y el pH.

Método ANOVA.

Una vez seleccionado las dosis óptimas del coagulante y del floculante y el pH adecuado, se quiere conocer el efecto que tiene la interacción entre estas tres variables y modificarlas hasta encontrar las condiciones óptimas de trabajo, ya que sus dosis óptimas por separado no significa que sean las mejores condiciones de trabajo.

Como no es posible realizar un número muy grande de experimentos, se utiliza un método estadístico llamado ANOVA, el cual nos da las bases para realizar un número más reducido de experimentos. Este método se realiza en el programa de estadística SPSS Base 11.8 de Windows.

Este método utiliza 3 variables, la dosis del coagulante, la dosis del floculante y el pH, y utiliza 5 rangos y niveles, los cuales tienen el siguiente arreglo:

Tabla 3.7. Arreglos de variables con rangos y niveles para el método ANOVA.

Variables	Rangos y niveles				
	-2	-1	0	1	2
A, dosis del coagulante (mg/L)					
B, dosis del floculante (mg/L)					
C, pH					

Los valores centrales (nivel cero) van a ser determinados por el diseño experimental donde se determinaron las dosis óptimas. Los otros valores son determinados arbitrariamente tomando en cuenta los valores del nivel cero (dos valores arriba y dos valores abajo).

Una vez establecidos los rangos y niveles de las tres variables se realizan las pruebas experimentales utilizando cada uno de estos parámetros. Como se había mencionado anteriormente no es posible realizar todos los experimentos que permiten las interacciones, es por eso que se hizo una selección de estos experimentos, tomando en cuenta los más importantes y los que mayor influencia tenían en el método (Ahmad, et al **2005**).

Los arreglos experimentales se van a construir de acuerdo al la tabla 3.8:

2.2.1. Aplicación del programa estadístico ANOVA

En esta parte se utilizará el programa estadístico SPSS 11.0. Este programa cuenta con un editor de datos, al cual se le introducirán los valores, de porcentaje de remoción de los contaminantes, obtenidos en el arreglo experimental de la tabla 3.8.

En la primera parte llamada *vista de datos*, se agregarán los valores del porcentaje de remoción del DQO, color, turbiedad y conductividad, así como los valores de las dosis del coagulante, floculante y el pH que se utilizaron para cada arreglo experimental.

Tabla 3.8. Arreglos experimentales (Ahmad, et al **2005**).

<i>Corrida</i> No.	(A) Dosis del coagulante	(B) Dosis del floculante	(C) pH	<i>Corrida</i> No.	(A) Dosis del coagulante	(B) Dosis del floculante	(C) pH
1	-1	1	-1	11	1	-1	-1
2	1	-1	1	12	0	0	0
3	0	0	0	13	2	0	0
4	-1	1	1	14	0	0	2
5	-1	-1	1	15	0	0	0
6	0	0	0	16	0	0	0
7	-1	-1	-1	17	0	-2	0

8	1	1	-1	18	0	0	-2
9	0	0	0	19	0	2	0
10	1	1	1	20	-2	0	0

En la segunda parte *vista de variables*, se introducirán las características de cada columna de datos de la primera parte.

Para realizar la regresión lineal la variable dependiente, en primer lugar será el porcentaje de remoción del DQO, y las variables independientes, las cuales serán la dosis del coagulante, la dosis del floculante y el pH.

Este procedimiento se realizará de la misma manera para la remoción del color, la turbiedad y la conductividad, tomándolas como las variables dependientes. Las variables independientes seguirán siendo las mismas para cada caso.

Cuando se obtienen los resultados lo valores que más nos interesan son los valores de los coeficientes estandarizados, ya que estos nos ayudarán a establecer una ecuación que pueda describir el comportamiento de la remoción del DQO, del color, de la turbiedad y la conductividad, con respecto a las variables de dosis del coagulante, floculante y el pH.

La ecuación que se establecerá en cada uno de los coeficientes estandarizados obtenidos para cada caso de remoción de los contaminantes, tendrá la siguiente forma:

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = A + [\text{coagulante}] * B + [\text{floculante}] * C + [\text{pH}] * D$$

Donde;

A = coeficiente independiente

B = coeficiente del coagulante

C = coeficiente del floculante

D = coeficiente del pH

Una vez obtenidas las ecuaciones para cada uno de los contaminantes se realizará una tabla comparativa con los resultados experimentales y los resultados obtenidos de las ecuaciones para comprobar si el modelo es correcto y si describe correctamente el comportamiento del experimento.

Estos valores también nos indica si el experimento es más o menos dependiente a alguna de las tres variables establecidas (coagulante, floculante y pH), dependiendo del la magnitud que tenga este con respecto a las demás variables.

CAPITULO CUATRO

RESULTADOS Y ANÁLISIS

1. Caracterización del agua residual

Los resultados de la caracterización realizada en el laboratorio especializado de la Universidad Autónoma Metropolitana son:

Tabla 4.1 Caracterización del agua contaminada

Parámetros	Unidades	Resultado
pH	unidades	5.21
Conductividad	μS/cm	1353
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	20153
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	8410.75
Sólidos Totales	mg/L	14919
Dureza como CaCO ₃	mg/L	337.31
SAAM	mg/L	3637.9
Grasas y aceites	mg/L	94.5
Aluminio	mg/L	429.03
Cromo	mg/L	1.254
Fierro	mg/L	289.64
Plomo	mg/L	1.114

Es importante señalar que una caracterización tan completa de las aguas residuales provenientes de un lavado de suelos no ha sido reportada en la literatura.

1.1. Características del agua diluida al 50%

Primero se volvió a determinar el pH, la conductividad, el DQO, el color y la turbiedad del agua ya diluida al 50%, esto con el fin de poder comparara los resultados obtenidos después de la coagulación- floculación en las mismas condiciones y así determinar los mejores resultados.

Los resultados de estas pruebas fueron:

Tabla 4.2. Resultados de la caracterización a nivel laboratorio

Parámetros	Unidades	Resultado
pH	unidades	5.3
Conductividad	μS/cm	12.8
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	10170
Color	Pt-Co	25500
Turbiedad	FTU	4900

En el caso del pH y de la conductividad. Los resultados fueron muy similares a los obtenidos en la caracterización, las variaciones pueden ser por el tiempo que ya tiene el agua y a la variación de los procedimientos experimentales realizados para dichas pruebas.

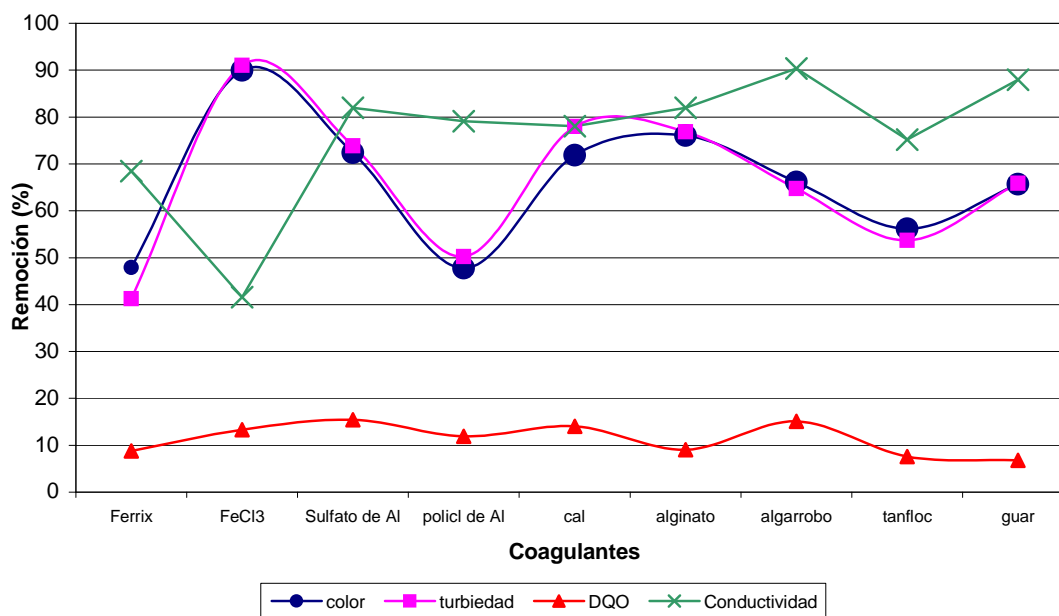
2.- Selección del coagulante

Para selecciones al coagulante se calcularon los porcentajes de remoción de todos los parámetros contra las condiciones iniciales del agua y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Por ciento de remoción de los coagulantes al 2%

	Remoción (%)				pH final
	DQO	Conductividad	Color	Turbiedad	
Ferrix	8.8	68.4	47.9	41.2	3.12
FeCl ₃	13.3	41.6	90.0	91.0	2.92
Sulfato de Aluminio	15.4	82.0	72.4	73.9	4.25
Policloruro de Aluminio	11.9	79.1	47.8	50.2	5.21
Cal	14.1	78.0	71.8	78.0	9.84
Alginato de Sodio	9.0	82.0	76.1	76.9	6.03
Algarrobo	15.1	90.3	66.1	64.7	5.41
Tanfloc	7.6	75.2	56.2	53.7	4.31
Guar	6.8	88.0	65.7	65.8	5.09

También se realizó una gráfica para entender mejor el comportamiento que tenía cada uno de los coagulantes, esta se muestra a continuación:



Gráfica 4.1. Remoción porcentual de contaminantes para cada coagulante.

Como se puede analizar en la gráfica 1, el coagulante que obtuvo una mayor remoción de color y turbiedad fue el cloruro férrico (FeCl_3), sin embargo este no nos conviene ya que en cuanto a la salinidad del agua o conductividad esta disminuye muy poco, lo que sería un problema ya que el agua empezaría a acumular una gran cantidad de sales que no es conveniente regresar al proceso de lavado.

Otro inconveniente que tiene el FeCl_3 es que disminuye el pH del agua a 2.92, lo que es muy ácido como para poder utilizarlo posteriormente, además de que la neutralización de esta agua llevaría a un costo adicional que de preferencia se debería de evitar. Es por eso que se buscó un coagulante que además de que tuviera buenos porcentajes de remoción no variara mucho el pH para que fuera un procedimiento más económico.

El coagulante que abarca todas las características anteriores es el sulfato de aluminio, ya que con este se obtienen buenos porcentajes de remoción, además de que al pH del agua casi no se modifica, incluso con la remoción del DQO, tiene uno de los porcentajes más altos, lo que nos indica que si cambiamos la dosis del coagulante este valor puede aumentar.

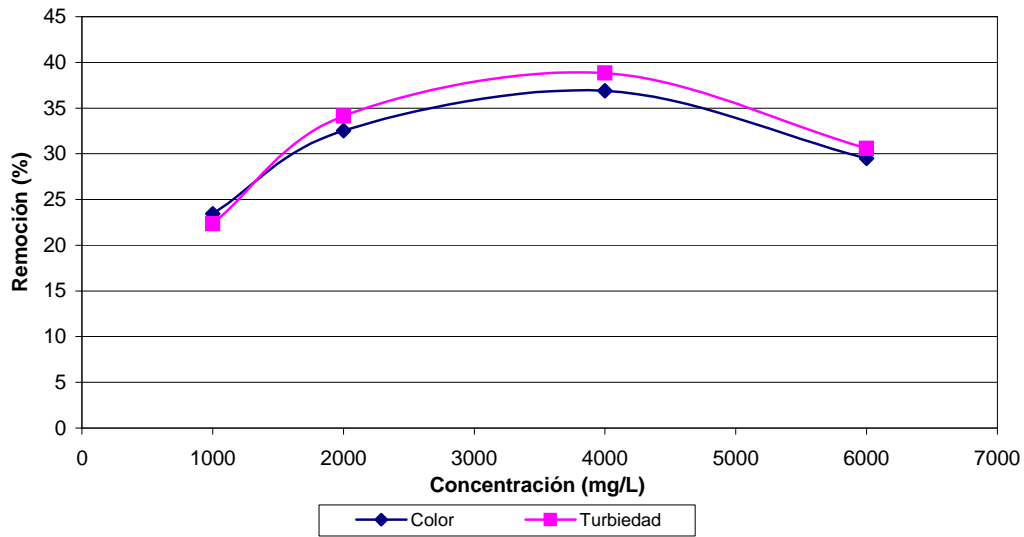
2.1 Determinación de la dosis óptima del coagulante

Una vez seleccionado al sulfato de aluminio como el mejor coagulante, se determinó su dosis óptima, los resultados de remoción de los contaminantes se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Porcentaje de remoción del coagulante sulfato de aluminio para diferentes dosis.

Concentración del sulfato de aluminio	Remoción (%)	
	Color	Turbiedad
1000 mg/L	23.4	22.3
2000 mg/L	32.5	34.1
4000 mg/L	36.9	38.8
6000 mg/L	29.5	30.6

Para poder entender mejor el efecto de la concentración con respecto a la remoción de contaminantes se elaboró la gráfica 4.2.



Gráfica 4.2. Remoción porcentual del sulfato de aluminio a diferentes dosis.

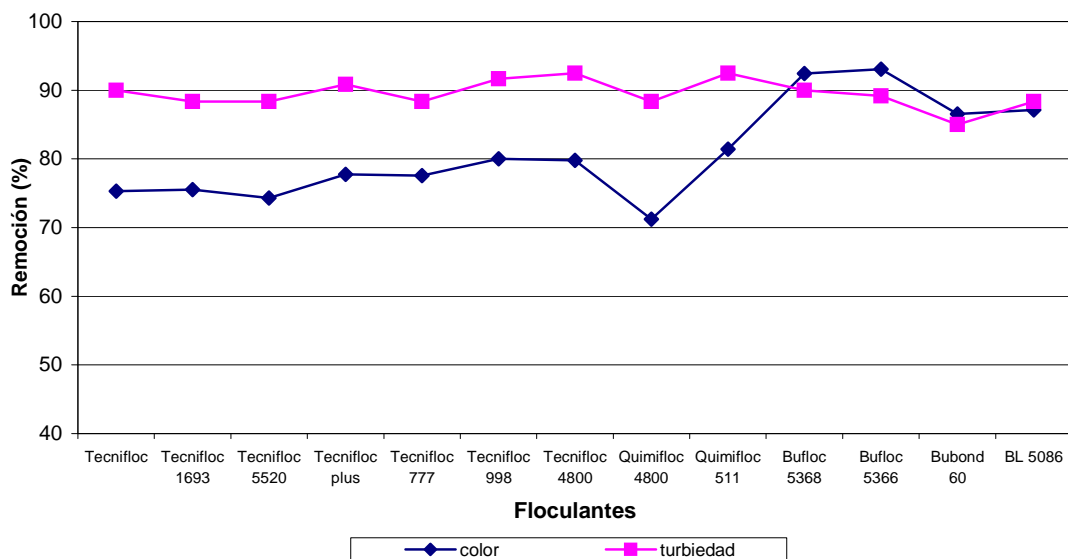
Como se puede observar en la gráfica 4.2, hay un valor máximo en 4000 mg/L lo que nos indica que efectivamente hay una concentración a la que el coagulante es mucho más efectivo y del la cual se obtiene una mayor remoción de color y turbiedad, esta concentración es de 4000 mg/L. Este valor nos servirá más adelante para realizar las pruebas del diseño experimental.

3. Selección del floculante

Al igual que la prueba anterior de coagulación se obtuvieron los resultados de remoción de color y turbiedad para cada uno de los 13 floculantes utilizados, mostrados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Porcentaje de remoción de diferentes floculantes a una concentración de 1.5 mg/L

No.	Floculante (Nombre comercial)	Remoción (%)	
		color	turbiedad
1	Tecnifloc	75.3	90.0
2	Tecnifloc 1693	75.5	88.3
3	Tecnifloc 5520	74.3	88.3
4	Tecnifloc plus	77.8	90.8
5	Tecnifloc 777	77.6	88.3
6	Tecnifloc 998	80.0	91.7
7	Tecnifloc 4800	79.8	92.5
8	Quimifloc 4800	71.2	88.3
9	Quimifloc 511	81.4	92.5
10	Bufloc 5368	92.4	90.0
11	Bufloc 5366	93.1	89.2
12	Bubond 60	86.5	85.0
13	BL 5086	87.1	88.3



Gráfica 4.3. Remoción porcentual de los floculantes

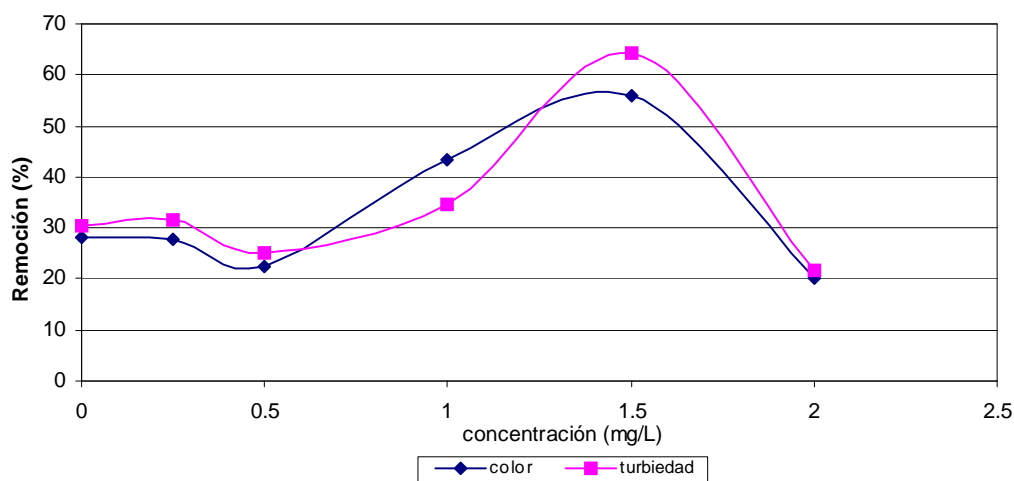
Como se puede observar casi todos tienen el mismo comportamiento pero si tomamos en cuenta la remoción de los contaminantes y además el tipo de floculante y facilidad de manipulación, se puede decir que el Technifloc 998 es el que cuenta con estas características, lo que nos hizo seleccionarlo como el mejor floculante.

3.1 Determinación de la dosis óptima del floculante

Una vez seleccionado al Technifloc 998 como el mejor floculante se realizaron las mismas pruebas, pero cambiando las concentraciones de este, los resultados se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Porcentaje de remoción para el floculante Technifloc 998 a diferentes dosis.

Concentración	Color	Turbiedad
0 mg/L	28.3	30.4
0.25 mg/L	27.7	31.5
0.5 mg/L	22.3	25.0
1 mg/L	43.4	34.8
1.5 mg/L	56.0	64.1
2 mg/L	20.2	21.7



Gráfica 4.4. Remoción porcentual de los contaminantes a diferentes dosis del Technifloc 998

Como se puede observar en la gráfica 4.4, la concentración que nos permite una mejor remoción del color y la turbiedad es la de 1.5 mg/L. Esta concentración es la que se va a utilizar para el diseño

experimental y así determinar las mejores condiciones de trabajo en nuestro método. Esta concentración obtenida fue la misma con la que se había estado realizando los experimentos previos, lo que nos indica que desde el principio tuvimos una buena aproximación de las condiciones de trabajo.

4. Efecto del pH en la remoción de contaminantes.

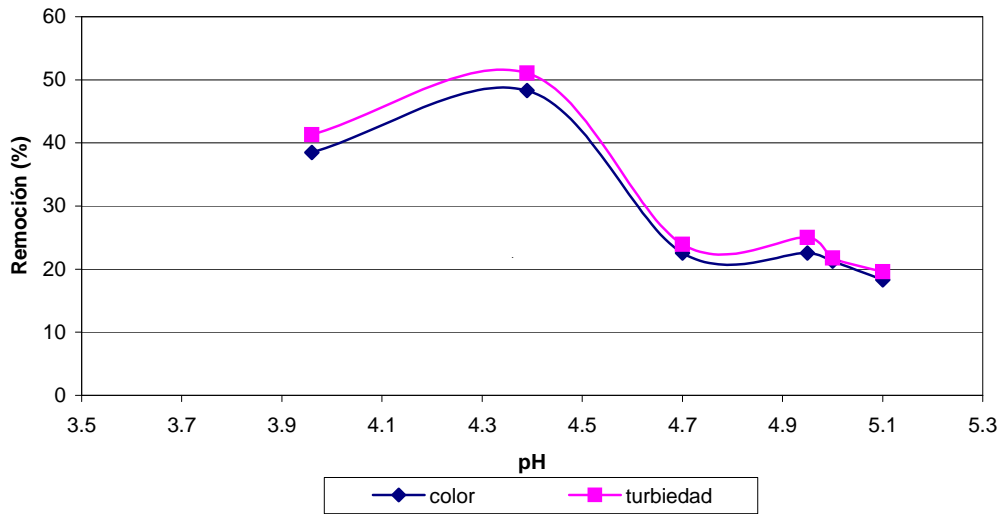
Esta prueba nos indica que condiciones de pH son las adecuadas para nuestra experimentación, esto es conociendo a que pH se obtiene una mejor remoción de color y de turbiedad. Esto nos permitirá saber más adelante el efecto que tiene el pH con la interacción de la dosis del coagulante y la del floculante.

Los resultados de la prueba y la gráfica que nos indica el comportamiento del pH se muestran en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Porcentaje de remoción de la mezcla coagulante- floculante a diferentes valores de pH.

pH inicial	pH final	Color	Turbiedad
3.5	3.96	38.5	41.3
4	4.39	48.3	51.1
4.25*	4.7	22.6	23.9
4.5	4.95	22.6	25.0
5	5	21.3	21.7
5.5	5.1	18.3	19.6

(* valor de pH original del agua sólo con la mezcla de coagulante- floculante)



Gráfica 4.5. Gráfica del efecto del pH en la remoción de contaminantes.

En esta gráfica se puede observar que a un pH más ácido se obtiene una remoción mucho mejor, y en el caso del pH 4.5 o muy cercano al que tiene el agua originalmente se obtiene una remoción mucho más alta, lo que nos indica que el pH que tiene el agua presenta un buen valor y que este no tiene que ser modificado. Sin embargo, para poder realizar el diseño experimental si es necesario incluir este parámetro para poder estudiar el efecto que tiene este con respecto a las concentraciones del coagulante y del floculante.

5. Interacción entre la dosis del coagulante– floculante y del pH

Una vez que se obtuvieron las dosis óptimas del coagulante y del floculante y el pH óptimo para trabajar con las muestras, se determinaron los rangos y niveles para realizar los experimentos del modelo estadístico (ver la tabla 4.8).

Tabla 4.8. Rangos experimentales y niveles de las variables independientes

Variables	Rangos y niveles				
	-2	-1	0	1	2
A, dosis del coagulante (mg/L)	0	1000	2000	4000	6000
B, dosis del floculante (mg/L)	0	1	1.5	2	2.5
C, pH	3.5	4	4.5	5	5.5

Con la ayuda de la tabla 4.8 se diseñaron los experimentos para conocer la interacción entre los diversos parámetros a distintas condiciones. Las dosis y los experimentos se realizaron fueron los que se muestran en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Condiciones de cada experimento

Exp.	Dosis en mg/L		pH	Exp.	Dosis en mg/L		pH
	coagulante	floculante			coagulante	floculante	
1	1000	2	4	11	4000	1	4
2	4000	1	5	12	2000	1.5	4.5
3	2000	1.5	4.5	13	6000	1.5	4.5
4	1000	2	5	14	2000	1.5	5.5
5	1000	1	5	15	2000	1.5	4.5
6	2000	1.5	4.5	16	2000	1.5	4.5
7	1000	1	4	17	2000	0	4.5
8	4000	2	4	18	2000	1.5	3.5
9	2000	1.5	4.5	19	2000	8	4.5
10	4000	2	5	20	0	1.5	4.5

Los resultados que se obtuvieron al realizar las experimentaciones, en condiciones de remoción de DQO, color, turbiedad y conductividad, se muestran en la tabla 4.10.

Tabla 4.10. Porcentaje de remoción de cada experimento

No de experimento	Porcentaje de remoción (%)			
	Color	Turbiedad	DQO	Conductividad
1	73.78	77.45	19.36	41.48
2	99.80	99.35	96.98	36.81
3	97.75	95.59	21.65	49.92
4	78.28	80.39	22.05	61.02
5	68.49	69.61	18.71	61.80
6	97.55	95.10	20.11	50.81
7	82.97	84.31	27.73	61.47
*8	99.80	99.59	97.13	34.93
9	97.65	95.10	19.85	51.58
10	99.69	99.51	96.93	39.48
11	99.64	99.59	96.46	37.48
12	97.75	95.59	21.65	49.92
13	99.88	99.73	95.93	27.93
14	95.40	96.08	40.92	52.47
15	97.55	95.10	20.11	50.81
16	97.65	95.10	19.85	51.58
17	93.44	91.18	23.59	51.47
18	93.54	95.10	70.57	46.47
19	92.86	90.69	23.39	52.14
20	3.13	6.86	1.61	71.90

Como se puede observar en los resultados, la remoción es mucho mayor sólo con la interacción de las variables, esto indica que utilizando las dosis óptimas de cada variable no es precisamente lo más adecuado, si no que hay que utilizar las distintas posibilidades de combinación para observar los resultados más adecuados. Por tal motivo se realiza el modelo estadístico tipo ANOVA, para poder obtener las condiciones ideales de nuestro sistema.

6. Aplicación del modelo estadístico ANOVA

6.1 Resultados de la regresión lineal de la remoción del DQO

Los resultados de la regresión elaborada en el programa estadístico para el porcentaje de remoción del DQO, después de introducir las variables en la base de datos, son mostrados a continuación.

Regresión lineal tipo ANOVA

Los resultados de la regresión lineal se muestran en la tabla 4.11 y los coeficientes se muestran en la tabla 4.12.

Tabla 4.11. Datos estadísticos obtenidos de la remoción de DQO

Modelo		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Significancia
1	Regresión	17588.078	3	5862.693	0.000
	Residual	4901.670	16	306.354	
	Total	22489.748	19		

Tabla 4.12. Resumen del modelo la remoción de DQO

Modelo	Valor
R	0.884
R ²	0.782
R ² corregida	0.741

La ecuación obtenida de este modelo para el DQO es:

$$\text{Porcentaje de remoción del DQO (\%)} = 33.437 + [\text{coagulante}] * 0.021 - [\text{floculante}] * 1.49 - [\text{pH}] * 8.175$$

En este caso se puede observar que la remoción de DQO depende en mayor grado del pH, ya que su magnitud, con respecto a los demás es mayor. En el caso de la constante no la tomamos en cuenta, ya que este resultado es un valor obtenido de la misma regresión, la cual no es dependiente de ninguna variable. Esto depende de que las sales de aluminio interactúan mejor con los floculos que se produjeron en un ambiente alcalino para que la hidrólisis ocurra. (Ahmad, 2005)

Se puede observar que en los parámetros estadísticos que se obtuvieron del modelo matemático que se realizó, que la significancia es de cero, lo que nos indica que hay mas del 95% de posibilidades de que el modelo describa correctamente nuestros resultados experimentales en cuanto a la remoción del DQO, lo que equivale a que la regresión lineal es estadísticamente aceptable.

Con los valores de R y R², podemos obtener un estimado de que la regresión lineal calculada es correcta en cuanto a la descripción del sistema, es este caso se puede observar que se obtienen valores arriba del 0.78, lo que nos indica que en mas del 78% de los casos el modelos describe correctamente nuestro sistema.

6.2 Resultados de la regresión lineal de la remoción del color.

Los resultados de la regresión elaborada en el programa estadístico para el porcentaje de remoción del color se muestran en la tabla 4.13 y los coeficientes en la tabla 4.14.

Regresión lineal tipo ANOVA

Tabla 4.13. Datos estadísticos obtenidos de la remoción del color

Modelo		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Significancia
--------	--	-------------------	--------------------	------------------	---------------

1	Regresión	3379.284	3	1126.428	0.059
	Residual	5913.283	16	369.580	
	Total	9292.567	19		

Tabla 4.14. Resumen del modelo la remoción del color

Modelo	Valor
R	0.603
R ²	0.600
R ² corregida	0.544

La ecuación obtenida de este modelo para el color es:

$$\text{Porcentaje de remoción del color (\%)} = 68.819 + [\text{coagulante}] * 0.0093 + [\text{floculante}] * 0.776 - [\text{pH}] * 0.800$$

En este caso el coeficiente más alto el pH, lo que nos indica que la remoción del color depende en mayor parte de este. Esto es por que se necesita un medio alcalino para que la hidrólisis de los iones metálicos se lleve a cabo correctamente.

Se puede observar que en los parámetros estadísticos que se obtuvieron del modelo matemático que se realizó, que la significancia es de 0.059, lo que nos indica que existe un 94.1% de posibilidades de que el modelo describa correctamente nuestros resultados experimentales en cuanto a la remoción del color, lo que equivale a que la regresión lineal es estadísticamente aceptable.

Los valores de R y R², son mayores al 0.6, lo que nos indica que en 60% de los casos el modelo describe correctamente nuestro sistema. Este puede observarse como un valor bajo para describir al sistema, pero si se toman en cuenta de que los resultados son pruebas de laboratorio y que estas dependen de muchos factores, y que además la determinación del color de las muestras es un proceso muy delicado y que depende de muchas variables, se podría tomar como aceptable la

posibilidad de que en el 60% de los casos, la regresión lineal describe el comportamiento del sistema.

6.3 Resultados de la regresión lineal de la remoción de la turbiedad

Los resultados de la regresión elaborada en el programa estadístico para el porcentaje de remoción de la turbiedad se muestran en la tabla 4.15 y los valores de los coeficientes en la tabla 4.16.

Regresión lineal tipo ANOVA

Tabla 4.15 Datos estadísticos obtenidos de la remoción de la turbiedad

Modelo		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Significancia
1	Regresión	3071.451	3	1023.817	0.053
	Residual	5150.672	16	321.917	
	Total	8222.123	19		

Tabla 4.16. Resumen del modelo la remoción de la turbiedad

Modelo	Valor
R	0.611
R ²	0.605
R ² corregida	0.568

La ecuación obtenida de este modelo para la turbiedad es:

$$\text{Porcentaje de remoción de la turbiedad (\%)} = 72.063 + [\text{coagulante}] * 0.0089 + [\text{floculante}] * 0.617 - [\text{pH}] * 1.26$$

En este caso el coeficiente más alto es para el pH, lo que indica que para la remoción de la turbiedad, es más importante el control del pH con respecto a los demás parámetros. Al igual que

para el DQO, con los coagulantes metálicos, como el aluminio o sales metálicas se requiere alcalinidad en el medio para que la hidrólisis ocurra (*Ahmad, 2005*)

Se puede observar que en los parámetros estadísticos que se obtuvieron del modelo matemático que se realizó, que la significancia es de 0.053, lo que nos indica que existe un 94.7% de posibilidades de que el modelo describa correctamente nuestros resultados experimentales en cuanto a la remoción de la turbiedad, lo que equivale a que la regresión lineal es estadísticamente aceptable.

Los valores de R y R², son muy similares a los obtenidos en la remoción del color, estos son mayores al 0.6, lo que nos indica que en 60% de los casos el modelo describe correctamente nuestro sistema. Al igual que en color, esto puede deberse a diferentes factores al realizar las pruebas, ya que para determinar la turbiedad, la prueba requiere de muchas condiciones que a nivel experimental son difíciles de igualar en la mayoría de los casos, pero este resultado también es un resultado favorable y que si nos puede dar una descripción acertada de nuestro sistema.

6.4 Resultados de la regresión lineal de la remoción de la conductividad

Los resultados de la regresión elaborada en el programa estadístico para el porcentaje de remoción de la conductividad se muestran en la tabla 4.17 y los coeficientes en la tabla 4.18.

Regresión lineal tipo ANOVA

Tabla 4.17. Datos estadísticos obtenidos de la remoción de la conductividad

Modelo		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Significancia
1	Regresión	1781.003	3	593.668	0.000
	Residual	333.478	16	20.842	
	Total	2114.480	19		

Tabla 4.18. Resumen del modelo la remoción de la conductividad

Modelo	Valor
R	0.918
R ²	0.842
R ² corregida	0.813

La ecuación obtenida de este modelo para la conductividad es:

$$\text{Porcentaje de remoción de la conductividad (\%)} = 44.474 - [\text{coagulante}] * 0.0066 - [\text{floculante}] * 0.088 + [\text{pH}] * 4.47$$

En este caso el coeficiente más alto es para el pH, lo que indica que para la disminución de la conductividad el parámetro más importante el control del pH. Esto es, como se comentó anteriormente, los coagulantes metálicos como el aluminio requieren de la alcalinidad para que la hidrólisis ocurra. (Ahmad, 2005)

Se puede observar que la significancia es de 0.000, lo que nos indica que existe más del 95% de posibilidades de que el modelo describa correctamente nuestros resultados experimentales en cuanto a la remoción de la conductividad, lo que equivale a que la regresión lineal es estadísticamente aceptable.

Los valores de R y R², son arriba del 0.84, lo que nos indica que el 84% de la veces nuestra regresión lineal describe correctamente al sistema en cuanto a la remoción de la turbiedad, siendo estos resultados los más estadísticamente aceptables en cuanto a la remoción de los 4 contaminantes (DQO, color, turbiedad y conductividad), esto también se debe a que las sales que se removieron en la experimentación fueron mucho más afines a el coagulante y el floculante que se utilizaron para la elaboración de estas pruebas.

7. Resultados comparativos de los valores experimentales contra los valores calculados con el modelo matemático

Empleando las ecuaciones desarrolladas con el modelo estadístico se pueden recalcular los valores de remoción de DQO, color, turbiedad y pH. A continuación se muestran los resultados en las tablas 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 respectivamente.

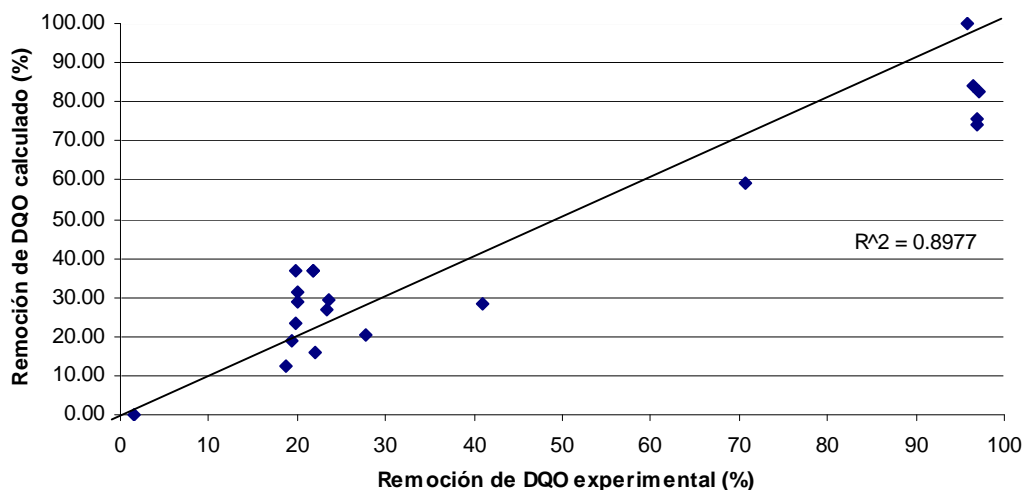
En la tabla 4.19 se muestran las comparaciones en cuanto a remoción de DQO.

En la gráfica 4.6, el modelo matemático describe adecuadamente el comportamiento experimental. Esto también se puede observar en el coeficiente de correlación que es de 0.89, lo que nos hace ver que los resultados que se obtuvieron experimentalmente y los resultados obtenidos con el modelo estadístico son similares en el 89% de los casos, por lo tanto se puede decir que en cuanto a la remoción del DQO, el modelo estadístico describe correctamente al sistema.

Tabla 4.19. Comparación entre los valores de remoción de DQO experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.

Remoción DQO (%)			Remoción DQO (%)		
	Experimental	Calculado		Experimental	Calculado
1	19.4	18.93	11	96.5	83.93
2	97	75.75	12	21.7	36.75
3	21.7	36.75	13	95.9	>100
4	22.1	10.75	14	40.9	28.58
5	18.7	12.24	15	20.1	36.75
6	20.1	36.75	16	19.9	36.75
7	27.7	20.42	17	23.6	38.99
8	97.1	82.44	18	70.6	44.93

9	19.9	36.75	19	23.4	27.07
10	96.9	74.26	20	1.6	0



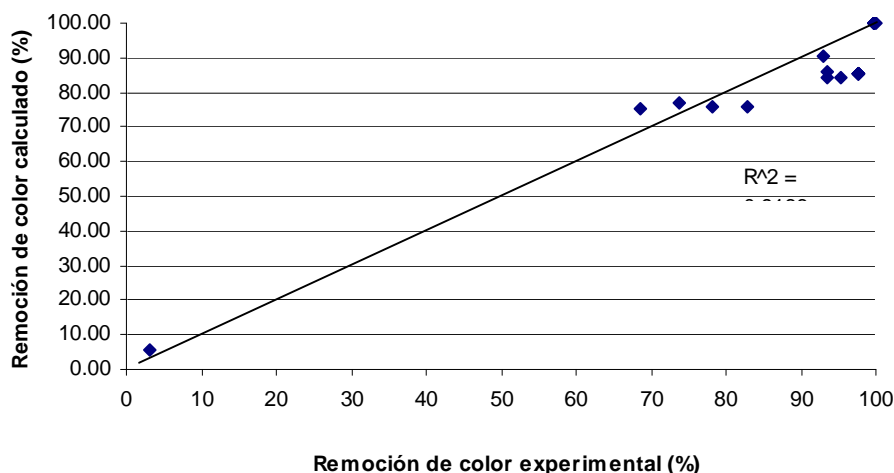
Gráfica 4.6. Gráfica comparativa entre los valores de remoción de DQO experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.

En la tabla 4.20 se muestran las comparaciones en cuanto a remoción de color.

Tabla 4.20. Comparación entre los valores de remoción del color experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.

Remoción de color (%)			Remoción de color (%)		
	Experimental	Calculado		Experimental	Calculado
1	73.78	76.71	11	99.64	>100
2	99.8	>100	12	97.75	85.31
3	97.75	85.31	13	99.88	>100
4	78.28	75.93	14	95.4	84.54
5	68.49	75.13	15	97.55	85.31
6	97.55	85.31	16	97.65	85.31
7	82.97	75.91	17	93.44	84.11
8	99.8	>100	18	93.54	86.09

9	97.65	85.31	19	92.86	90.51
10	99.69	>100	20	3.13	66.53



Gráfica 4.7. Gráfica comparativa entre los valores de remoción del color experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.

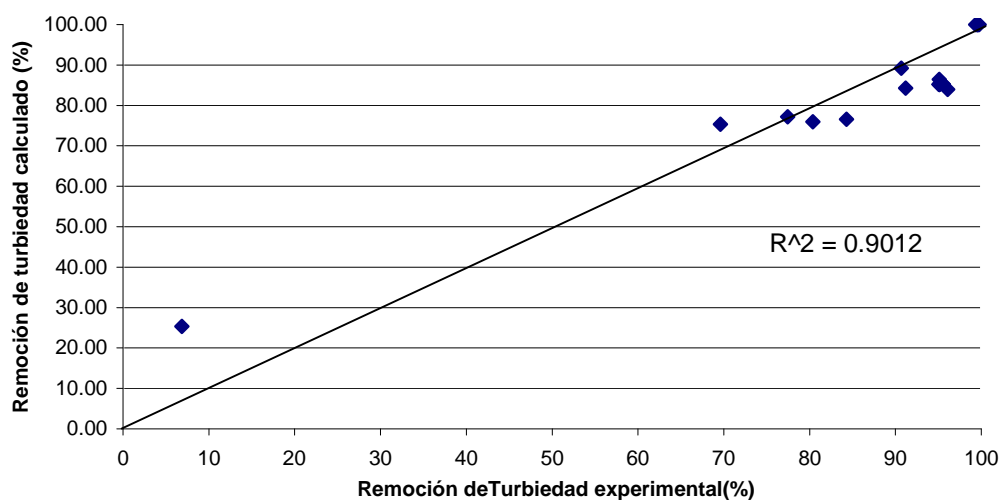
En la gráfica 4.7 se puede observar que el modelo es adecuado, sin embargo se pueden observar algunas diferencias, por ejemplo, en los valores de remoción arriba del 99% se pueden observar valores de 100% o mayores de remoción, los cuales no se pueden tomar como correctos, ya que como el modelo estadístico sólo te calcula un número, este no comprende los límites porcentuales. Sin embargo, se puede observar en la gráfica un coeficiente de correlación arriba de 0.9, lo que nos indica que para el 90% de los casos, el modelos describe acertadamente el comportamiento del sistema, siendo así un modelo muy confiable para la predicción de posibles resultados.

En la tabla 4.21 se muestran las comparaciones en cuanto a remoción de la turbiedad.

Tabla 4.21. Comparación entre los valores de remoción de la turbiedad experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.

Remoción de turbiedad (%)			Remoción de turbiedad (%)		
	Experimental	Calculado		Experimental	Calculado
1	77.45	77.19	11	99.59	>100

2	99.35	>100	12	95.59	85.21
3	95.59	85.21	13	99.73	>100
4	80.39	75.93	14	96.08	83.95
5	69.61	75.31	15	95.1	85.21
6	95.1	85.21	16	95.1	85.21
7	84.31	76.58	17	91.18	84.28
8	99.59	>100	18	95.1	86.48
9	95.1	85.21	19	90.69	89.22
10	99.51	>100	20	6.86	67.30



Gráfica 4.8. Gráfica comparativa entre los valores de remoción de la turbiedad experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.

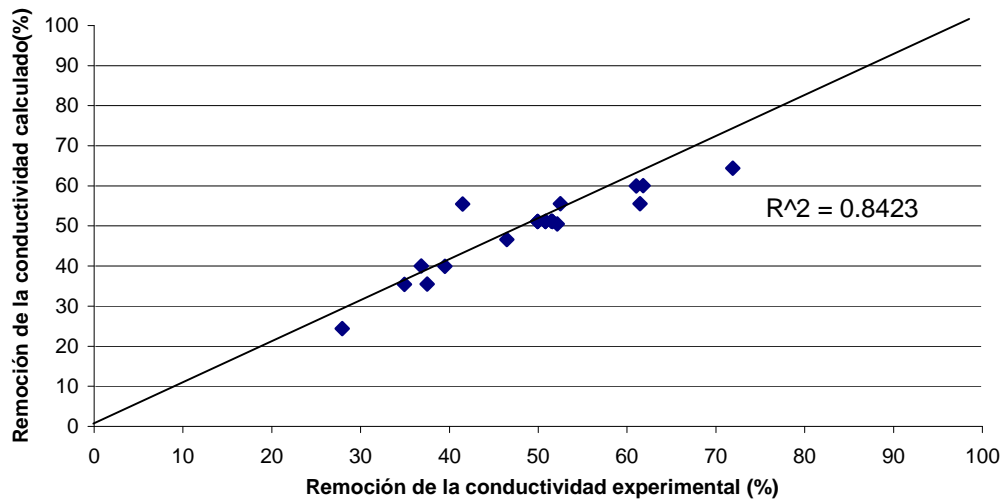
En cuanto a la gráfica 4.8 se puede observar la misma tendencia que para el caso de la remoción de color, esto es por que el color y la turbiedad son dependientes de la cantidad de partículas suspendidas que hay en el agua, por lo tanto si un método remueve muy bien a una de ellas, la otra también será removida con la misma magnitud. Es por eso que el coeficiente de correlación está

arriba de 0.90, lo que también nos indica que en el 90% de los casos, el modelo describe acertadamente el comportamiento del sistema en cuanto a la remoción de la turbiedad.

En la tabla 4.22 y la fig. 4.9 se muestran los resultados en cuanto a comparación de la remoción de la conductividad calculada y experimental.

Tabla 4.22. Comparación entre los valores de remoción de la conductividad experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.

Remoción conductividad (%)			Remoción conductividad (%)		
	Experimental	Calculado		Experimental	Calculado
1	41.48	55.49	11	37.48	35.54
2	36.81	40.01	12	49.92	51.09
3	49.92	51.09	13	27.93	24.37
4	61.02	59.96	14	52.47	55.56
5	61.80	60.05	15	50.81	51.09
6	50.81	51.09	16	51.58	51.09
7	61.47	55.58	17	51.47	51.22
8	34.93	35.45	18	46.47	46.62
9	51.58	51.09	19	52.14	50.52
10	39.48	39.92	20	71.90	64.45



Gráfica 4.9. Gráfica comparativa entre los valores de remoción de la conductividad experimentales, contra los valores calculados con el modelo matemático.

En el caso de la conductividad, se puede observar en la gráfica que el modelo matemático muy preciso al describir la remoción de este, aunque la remoción no fue tan alta como con los demás contaminantes, el modelo los pudo describir correctamente, como se puede observar en el coeficiente de correlación, el cual fue de 0.84, lo que nos indica que en aproximadamente en el 84% de los casos se obtuvo un resultado similar al que se obtuvieron en las pruebas experimentales. En este caso no se observaron casos excepcionales lo que indica que todos tuvieron el mismo comportamiento.

8.- Caracterización final del agua y de los lodos obtenidos. Comparación con la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002)

Una vez realizados los modelos estadísticos para los tres contaminantes se realizó el tratamiento final del agua contaminada con la que aún se contaba, este tratamiento se realizó con las concentraciones y al pH que se observaron tuvieron mejores porcentajes de remoción de los 4 contaminantes, estas condiciones se observan en la tabla 4.23.

Tabla 4.23. Condiciones para el tratamiento final del agua contaminada

Parámetro	Valor
Coagulante	4000
Floculante	2
pH	4

Una vez realizadas las pruebas con el tratamiento final para los 5 L de agua contaminada, se mandó analizar al laboratorio de la Universidad Autónoma Metropolitana. Estos resultados se muestran en la tabla 4.24, al igual que la comparación con la caracterización inicial del agua contaminada, esto con el fin de observar el cambio que hubo en los niveles de contaminación. En la tabla 4.25 se muestran los resultados de la caracterización de los lodos que se obtuvieron después de las pruebas, esto con el fin de hacer una comparación con la NOM-004- SEMARNAT-2002, la cual es equivalente a lodos, está indica las condiciones que debe tener un lodo para su disposición final.

4.24. Tabla de la caracterización final del agua tratada comparada con los resultados de la caracterización inicial del agua contaminada.

Parámetro	Unidades	Resultado Inicial	Resultado Final	Porcentaje Remoción
pH	unidades	5.21	3.33	NA
Conductividad	μS/cm	5410	1805	66.64
DQO	mg/L	20153	680.2	96.62
DBO	mg/L	8410.75	210.44	97.50
Sólidos Totales	mg/L	14919	1560.7	89.54
Dureza	mg/L	337.31	131.495	61.02
SAAM	mg/L	3637.9	69.94	98.08
Grasas y Aceites	mg/L	94.5	12.62	86.65
Aluminio	mg/L	429.03	49.84	88.38
Cromo	mg/L	1.254	0.02	98.41
Fierro	mg/L	289.64	3.826	98.68
Plomo	mg/L	1.114	0.263	76.39

En la tabla 4.24 se muestran las comparaciones de las pruebas de caracterización del agua contaminada y del agua tratada, con el fin de hacer una comparación porcentual de la remoción de los contaminantes principales. Como se puede observar, en términos generales se puede decir que el

tratamiento fue muy bueno ya que logró porcentajes de remoción de contaminantes arriba de un 75% para la mayoría de los casos.

El objetivo inicial de esta tesis fue desarrollar un tratamiento eficiente que nos ayudara principalmente a eliminar los hidrocarburos del petróleo, esto se puede analizar en el caso del DQO, ya que este parámetro nos representa la carga de hidrocarburos que tiene nuestra muestra, por lo tanto al obtener un 96% de remoción de DQO se puede concluir que el tratamiento es muy efectivo para la remoción de hidrocarburos del petróleo; además de que también se obtienen buenos resultados para la remoción de otros parámetros.

Sin embargo, existen inconvenientes, como en el caso del pH, el cual tiene valores muy ácidos para las muestras finales del agua, esto como se explicó anteriormente, se debe a que se necesita un medio ácido para que se pueda llevar a cabo la hidrólisis de las sales y pueda existir una mejor interacción entre los iones que están actuando en la reacción de coagulación- floculación.

Una vez realizadas las pruebas de tratamiento, de estas se obtuvo una cantidad de lodos de desechos de la sedimentación. Con estos lodos se puede realizar una caracterización completa de acuerdo a lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana, NOM-004- SEMARNAT-2002, la cual es referente a Protección ambiental, de lodos y biosólidos, donde se muestran la especificaciones y límites máximos permisibles de contaminación para su aprovechamiento y disposición final.

NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Esta norma establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de los contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desasolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y a la salud humana.

Para que la autoridad correspondiente haga la disposición adecuada de los lodos producidos es necesario:

- Se debe de realizar un proceso de estabilización alcalina, para que las pruebas de caracterización se puedan realizar correctamente.
- Las pruebas deben realizarse en instituciones acreditadas por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Estos resultados deben de mantenerse constantes por lo menos 5 años.
- Se debe de realizar una constancia de no peligrosidad de residuo según la INE-04-007 (SEMARNAT-07-007), donde se dan a conocer todos los trámites y servicios inscritos en el Registro Federal de Trámites y Servicios que aplica la SEMARNAT.
- Si los biosólidos son acreditados con la constancia de no peligrosidad, estos pueden estar almacenados hasta 2 años, en un sitio seguro y que no exista ningún tipo de fuga, para que posteriormente las autoridades correspondientes hagan la disposición adecuada para su disposición.

En el caso de los lodos que se obtuvieron en estas pruebas, se estipula que estos tienen una gran cantidad de contaminantes, lo que nos indica inicialmente que estos no serían acreditados para una disposición, es por eso que se tendría que realizar una incineración de los lodos, esto en un lugar acreditado para dicho fin, el cual no arroje desechos con una menor carga de contaminantes para que estos puedan ser dispuestos correctamente.

Buy Now to Create PDF without Trial Watermark!!

Created by eDocPrinter PDF Pro!!

CAPITULO CINCO

CONCLUSIONES

El método de prueba de jarras ayudó a comprender el comportamiento de un sistema de coagulación- floculación, así como las condiciones en que este debe ser empleado. En el caso de la selección del coagulante, se observó que los coagulantes sintéticos eran mucho más eficientes sobre todo en el caso del color y la turbiedad, y que los naturales, a pesar de que si removían contaminantes, esta eficiencia era mucho menor. Se seleccionó al sulfato de aluminio por que con este se obtuvieron remociones de hasta un 82% en el caso de la conductividad y un 15% en cuanto a DQO. En el caso del cloruro férrico con este se obtuvieron porcentajes de remoción más altos, sin embargo este hacía que el pH del agua fuera muy ácido (2.9), mientras que con el sulfato de aluminio, los porcentajes de remoción eran buenos y el pH final del agua era muy similar al que tenía el agua inicialmente.

Una vez seleccionado al coagulante se observó que la dosis de éste era de suma importancia, ya que había un punto máximo en el que el coagulante trabajaba mejor y removía una gran cantidad de los contaminantes, este era una concentración de 400 mg/L; aunque las pruebas solamente se realizaron para el color y la turbiedad. Con estos parámetros se determinó una concentración en la cual existía un máximo de remoción de contaminantes, la cual fue utilizada para las pruebas de selección del floculante.

Al realizar las pruebas para la selección del floculante, se determinó que el Technifloc 998, era con el que se obtenía una mejor remoción de los contaminantes, hasta un 97% de remoción de turbiedad, con una concentración de 1.5 mg/L. Al igual que para el coagulante, se realizaron pruebas del Technifloc 998 a diferentes dosis, para conocer la concentración con la que este tenía una mejor eficiencia en cuanto a la remoción de contaminantes. Sin embargo, al realizar las pruebas, se observó que la concentración con la que trabajaba mejor era de 1.5 mg/l, la misma concentración con la que se habían tratado los floculantes.

Ya que se habían seleccionado al coagulante y al floculante, se realizaron pruebas para conocer el efecto del pH. Se observó que cuando se utilizaban valores de pH más ácidos que el inicial la remoción de las partículas suspendidas era mucho más alta que con valores más básicos al obtenido inicialmente. Pero al igual que con el coagulante y el floculante había un valor de pH en el cual la remoción era mejor y cuando este se variaba la remoción disminuía notablemente.

En cuanto al efecto que producía el pH ácido, se atribuye a que era mejor trabajar con estas condiciones, ya que así se mejoraba la hidrólisis de los iones de aluminio, para así producir una mejor interacción entre las partículas para mejorar los efectos de coagulación- floculación.

Al obtener las mejores condiciones para cada uno de los parámetros, se planteó una secuencia de experimentos los cuales se introdujeron a un modelo matemático tipo ANOVA (Ahmad, 2005), el cual describe el comportamiento entre la interacción de las tres variables, coagulante, floculante y el pH, ya que aunque se hayan encontrado los valores máximos en los que estos removían mayor cantidad de contaminantes, la interacción entre ellos podría hacer que la remoción fuera mejor sin ser las dosis máximas de las variables, o también se puede obtener una remoción igual utilizando concentraciones mucho más pequeñas.

Este modelo plantea 20 experimentos, en los cuales se hace interactuar a las 3 variables: dosis del coagulante, dosis del floculante y pH, esto utilizando una serie de rangos y niveles, los cuales son definidos a partir de las dosis óptimas de nuestras variables. Una vez elaboradas los 20 experimentos, se introducen los resultados de los porcentajes de remoción en el programa estadístico SPSS 11.0, el cual te ayuda a elaborar una regresión lineal para cada uno de los contaminantes estudiados, DQO, color, turbiedad y conductividad. Estos resultados nos ayudan a describir el comportamiento que tiene el sistema a nivel estadístico, para así poder realizar pruebas similares sin necesidad de realizar tantos experimentos, con la seguridad de obtener resultados favorables de remoción de contaminantes.

Ya que se aplicó el modelo estadístico por medio del programa estadístico SPSS 11.0, se realizó una serie comparativa entre los valores obtenidos experimentalmente y los valores obtenidos con el

modelo estadístico, lo que demostró que el modelo describe muy bien el efecto que se tuvo a nivel experimental, aunque había diferencias entre estos valores, estos ayudaron a comprender el comportamiento que se tiene en un tratamiento de coagulación- floculación.

Otra cosa que se ayudó a comprender de manera más adecuada el efecto de las tres variables: coagulante, floculante y pH, fue con el valor de los coeficientes, en donde se observó que el tratamiento de coagulación- floculación la mayor importancia radica en el valor del pH, ya que en valores de pH más ácidos el tratamiento es mucho más eficiente y actúa de manera más adecuada. Sin embargo, si se quisiera utilizar este tratamiento en un nivel industrial tendría un costo extra el tener que bajar los valores de pH a niveles más ácidos, además de que el afluente de agua obtenido queda un pH mucho más ácido. Pero la ventaja es que con valores un poco más neutros la remoción es muy buena, lo que nos indica que el tratamiento que se estableció en este proyecto es un método muy eficiente a cualquier nivel de aplicación.

Al obtener los resultados esperados, se pudieron determinar las mejores condiciones con las cuales el sistema puede obtener el máximo de remoción de contaminantes con un método de coagulación floculación, estas condiciones fueron: dosis del coagulante, 4000 mg/L; dosis del floculante, 2 mg/L, pH 4. Se realizó el tratamiento de los 5L del agua contaminada. Los resultados de estas pruebas finales de todo el lote de agua fueron muy favorables, ya que se obtuvo más del 75% de remoción de contaminantes de la mayoría de ellos, lo que nos aclara que el tratamiento desarrollado es muy efectivo para la remoción de contaminantes.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de este trabajo fue reducir principalmente los hidrocarburos del petróleo que contenía el agua por obtenerse de un lavado de suelos contaminados con hidrocarburos, este factor se puede comprobar con los resultados de la remoción del DQO, el cual fue mayor al 96%, lo que nos indica que los hidrocarburos que contenía el agua fueron removidos eficientemente.

Otro parámetro importante es el de SAAM (sustancias activas al azul de metileno), el cual nos indica la concentración de surfactante que tiene el agua. El tratamiento también fue eficiente al remover hasta un 98% de SAAM, lo que se puede concluir que el agua puede ser reutilizada en el proceso de lavado de suelos.

Al finalizar las pruebas se obtuvo una cantidad de lodos de desechos de la sedimentación. Con estos lodos se puede realizar una caracterización completa de acuerdo a lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana, NOM-004- SEMARNAT-2002, la cual es referente a Protección ambiental, de lodos y biosólidos.

En el caso de los lodos que se obtuvieron en estas pruebas, se estipula que la carga de contaminantes es muy elevada, lo que nos indica inicialmente que estos no serían acreditados para una disposición, es por eso que se tendría que realizar una incineración de los lodos, esto en un lugar acreditado para dicho fin, el cual no arroje desechos con una menor carga de contaminantes para que estos puedan ser dispuestos correctamente.

APÉNDICE I
TABLAS COMPLEMENTARIAS

1. Tablas de selección del coagulante.

Tabla 6.1. Valores del color y turbiedad obtenidos para la selección del coagulante

	Color (Pt-Co)	Remoción (%)	Turbiedad (FTU)	Remoción (%)
Ferrix	13280	47.9	2880	41.2
FeCl ₃	2560	89.9	440	91.0
*Sulfato de Al	7040	72.4	1280	73.9
policl de Al	13320	47.8	2440	50.2
cal	7182	71.8	1080	77.9
alginato	6102	76.1	1134	76.9
algarrobo	8640	66.1	1728	64.8
tanfloc	11178	56.2	2268	53.7
guar	8748	65.7	1674	65.9

Tabla 6.2. Valores de DQO y conductividad obtenidos para la selección del coagulante

	DQO (mg/L)	Remoción (%)	Conductividad (mS)	Remoción (%)
Ferrix	9280	8.8	4.04	68.4
FeCl ₃	8816	13.4	7.48	41.6
*Sulfato de Al	8600	15.5	2.31	81.9
policl de Al	8960	11.9	2.67	79.1
cal	8739	14.1	2.81	78.0
alginato	9252	9.0	2.31	81.9
algarrobo	8631	15.1	1.238	90.3
tanfloc	9396	7.6	3.18	75.1
guar	9477	6.8	1.538	87.9

1.2. Tablas de los resultados de la dosis óptima del sulfato de aluminio

Tabla 6.3. Valores de color y turbiedad para la dosis óptima del sulfato de aluminio

Concentración del sulfato de aluminio (mg/L)	Color	Remoción (%)	Turbiedad	Remoción (%)
1000	21180	23.43	3960	22.35
2000	18660	32.54	3360	34.12
4000	17460	36.88	3120	38.82
6000	19500	29.50	3540	30.59

2. Tablas de selección del floculante

Tabla 6.4. Valores del color y turbiedad obtenidos para la selección del floculante

Floculante	Color	Remoción (%)	Turbiedad	Remoción (%)
Tecnifloc	6050	75.31	600	90.00
Tecnifloc 1693	6000	75.51	700	88.33
Tecnifloc 5520	6300	74.29	700	88.33
Tecnifloc plus	5450	77.76	550	90.83
Tecnifloc 777	5500	77.55	700	88.33
Tecnifloc 998	4900	80.00	500	91.67
Tecnifloc 4800	4950	79.80	450	92.50
Quimifloc 4800	7050	71.22	700	88.33
Quimifloc 511	4550	81.43	450	92.50
Bufloc 5368	1850	92.45	600	90.00
Bufloc 5366	1700	93.06	650	89.17
Bubond 60	3300	86.53	900	85.00
BL 5086	3150	87.14	700	88.33

2.1 Determinación de la dosis óptima del floculante

Tabla 6.5. Valores de color y turbiedad para la dosis óptima del Tecnifloc 998

Concentración del Tecnifloc 998 (mg/L)	Color	Remoción (%)	Turbiedad	Remoción (%)
0	20220	28.30	3840	30.43
0.25	20400	27.66	3780	31.52
0.5	21900	22.34	4140	25.00
1	15960	43.40	3600	34.78
1.5	12420	55.96	1980	64.13
2	22500	20.21	4320	21.74

3. Efecto del pH en la remoción de contaminantes.

Tabla 6.6. Valores de color y turbiedad para el efecto del pH

pH inicial	pH final	Color	Remoción (%)	Turbiedad	Remoción (%)
3.5	3.96	17340	38.51	3240	41.30
4	4.39	14580	48.30	2700	51.09
4.25	4.7	21840	22.55	4200	23.91
4.5	4.95	21840	22.55	4140	25.00
5	5	22200	21.28	4320	21.74
5.5	5.1	23040	18.30	4440	19.57

4. Interacción entre la dosis del coagulante- floculante y del pH

Tabla 6.7. Valores de color y turbiedad para la interacción entre las variables

Muestra	Color	Remoción (%)	Turbiedad	Remoción (%)
1	13400	65.72	2300	68.77
2	100	99.74	66.7	99.09
3	1150.0	97.75	450.0	95.59
4	11100	71.60	2000	72.84
5	14636.4	62.56	2818.2	61.73
6	1250	97.55	500	95.10
7	7909.1	79.77	1454.5	80.25
8	100	99.74	41.7	99.43
9	1200	97.65	500	95.10
10	158.3	99.59	50	99.32

Tabla 6.7. Continuación. Valores de color y turbiedad para la interacción entre las variables

Muestra	Color	Remoción (%)	Turbiedad	Remoción (%)
11	183.3	99.53	41.7	99.43
12	1150.0	97.75	450.0	95.59
13	63.6	99.88	27.3	99.73
14	2350	93.99	400	94.57
15	1250	97.55	500	95.10
16	1200	97.65	500	95.10
17	3350	93.44	900	91.18
18	3300	91.56	500	93.21
19	3650	92.86	950	90.69
20	49500	3.13	9500	6.86

Tabla 6.8. Valores de DQO y conductividad para la interacción entre las variables

Muestra	DQO	Remoción (%)	Conductividad	Remoción (%)
1	11016	1.64	5.27	41.48
2	412	96.32	5.69	36.81
3	10703	21.65	4.51	49.94
4	10648	4.93	3.51	61.02
5	11104	0.86	3.44	61.80
6	10913	20.11	4.43	50.83
7	9872	11.86	3.47	61.47
8	392	96.50	5.86	34.93
9	10948	19.85	4.36	51.61
10	420	96.25	5.45	39.48
11	484	95.68	5.63	37.48
12	10703	21.65	4.51	49.94
13	556	95.93	6.49	27.97
14	8070	27.95	4.28	52.47
15	10913	20.11	4.43	50.83
16	10948	19.85	4.36	51.61
17	10437	23.59	4.37	51.50
18	4020	64.11	4.82	46.47
19	10465	23.39	4.31	52.16
20	13440	1.61	2.53	71.92

APÉNDICE II
MÉTODOS EXPERIMENTALES COMPLEMENTARIOS

1. Procedimiento para utilizar el espectrofotómetro HACH.

(Determinación del DQO, Color y Turbiedad)

Procedimiento

- Encender el espectrofotómetro HACH y esperar a que inicie su programación.
- Seleccionar el programa que se desea conocer. En la parte superior del equipo se encuentra una lista con las claves y programas que se pueden determinar con el HACH, para esta tesis se utilizaron las siguientes:

<i>Clave</i>	<i>Programa</i>	<i>Significado</i>
430	COD LR	Demanda Química de Oxígeno (Low Range)
450	Color	Determinación del color aparente
750	Turbidity	Determinación de la Turbiedad

- Una vez seleccionado el programa específico para cada contaminante, se limpia la celda que va a servir como *blanco*, esto es para eliminar marcas de grasa o huellas.
- Se introduce el *blanco* en la celda del espectrofotómetro y se presiona el botón que dice *Zero*. En la pantalla aparecerá la concentración de cero con las unidades que pertenecen a cada programa, que son mg/L para el DQO, unidades Pt- Co para el color y unidades FTU para la turbiedad.
- Cuando el tiempo de calibración haya transcurrido, reemplazar la celda del blanco con la celda de la muestra de agua. Esperar a que la lectura se estabilice y registrar los resultados en las unidades correspondientes.

2. Calibración del conductímetro

Preparación de la solución de KCl, para la calibración

- Como reactivo se utiliza cloruro de potasio, con una pureza de $100\% \pm 0.1$. este se debe secar a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 2 horas.
- Guardarlo en el desecador y dejarlo ahí por 24 horas.
- Solución estándar 1: Disolver 0.1440 g de KCl en agua destilada y aforar en 1L. esta solución tiene una conductividad de $1408.8\ \mu\text{S} / \text{cm}$.
- Solución estándar 2: Diluir 100 mL de la solución estándar 1 en 100 mL de agua destilada a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Conductividad $146.9\ \mu\text{S} / \text{cm}$.

Calibración

- Primero se debe encender el conductímetro y se debe esperar hasta que se establezca la numeración.
- Presionar el botón *CAL1* y esperar a que se estabilice la numeración, esta calibración se realiza con el aire y la humedad del ambiente, en lectura debe aparecer *cero*.
- Presionar el botón *CAL2* y se introduce en la solución estándar 1 de KCl, y cuando la numeración se establezca se obtiene el valor de la conductividad, que para esta solución debe ser de $1408.8\ \mu\text{S} / \text{cm}$.
- Si el valor no es el de la conductividad introducir la solución estándar 2 hasta obtener la lectura de la conductividad correspondiente. Si no se debe cambiar el electrodo.
- Una vez calibrado pueden determinar las conductividades de las muestras, simplemente introduciendo el electrodo en la muestra.

3. Calibración del potenciómetro

Procedimiento

- Limpiar el electrodo con agua destilada y secarlo.
- Prender el electrodo e introducirlo en la solución buffer de pH 4, esperar a que se estabilice la lectura. Si esta no es dice pH 4, se debe mover el tornillo que dice *C4* hasta que la lectura indique dicho número. Limpiar el electrodo nuevamente.
- Para la siguiente calibración se utiliza la solución buffer de pH 10, y se realiza de la misma manera que la calibración anterior, solo que en este caso se mueve el tornillo que dice *C10*, hasta obtener la lectura correspondiente.
- Limpiar el electrodo y este ya puede ser utilizado para determinar el pH de las muestras.

APÉNDICE III
PROGRAMA SPSS BASE 11.0

1. Procedimiento para elaborar la base de datos

Procedimiento

- Se abre la ventana que dice *vista de datos* (Fig. 8.1)
- Se introducen los valores del porcentaje de los datos necesarios para realizar el modelo estadístico en cada una de las columnas, solo deben ser números y en cada columna debe de ir un solo tipo de datos como porcentajes de remoción o dosis utilizadas.
- Se abre la ventana que dice *vista de variable* (Fig. 8.2)
- Se introducen las características de cada columna de datos de la primera parte, tales como su nombre, tipo de dato, número de decimales, anchura, etc. Esto con el fin de utilizar estos datos de manera más precisa al realizar el modelo estadístico.

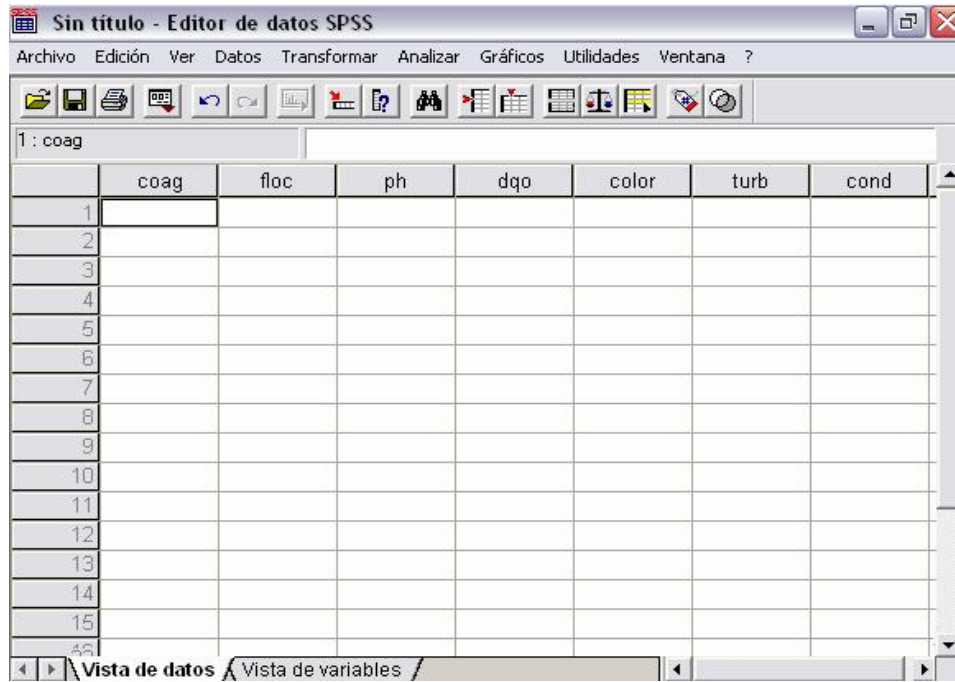


Fig. 8.1 Ejemplo del editor de datos del programa SPSS

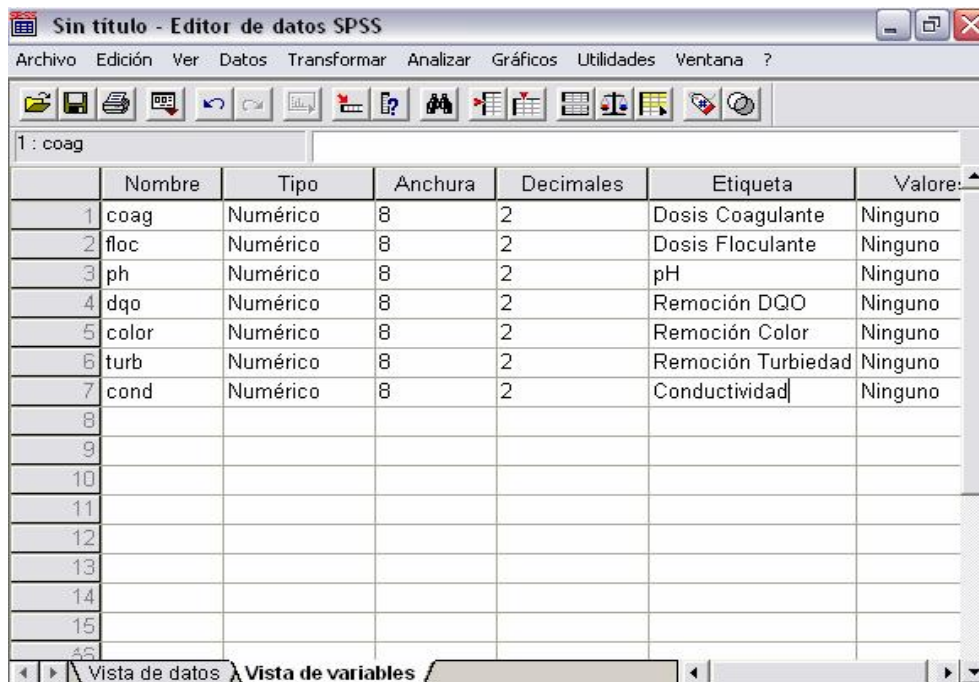


Fig. 8.2 Ejemplo del editor de datos- vista de variables- del programa SPSS

2. Procedimiento para elaborar la regresión lineal.

Procedimiento

- Una vez agregados los valores experimentales se accederá al menú de *analizar*
- En la opción de *regresión* se seleccionara el comando de *regresión lineal*
- Una vez ahí aparecerá un cuadro de dialogo, el cual no pedirá introducir la variable dependiente y las variables independientes (fig. 8.3).
- En esta ventana se mostrarán los nombres que les dimos a las variables cuando se introdujeron los datos y sus características.



Fig. 8.3 Ejemplo de la ventana para elaborar una regresión lineal

- Una vez establecidas estas características se aceptará el modelo y el resultado aparecerá en una pantalla diferente, titulada resultados (Fig. 8.4).

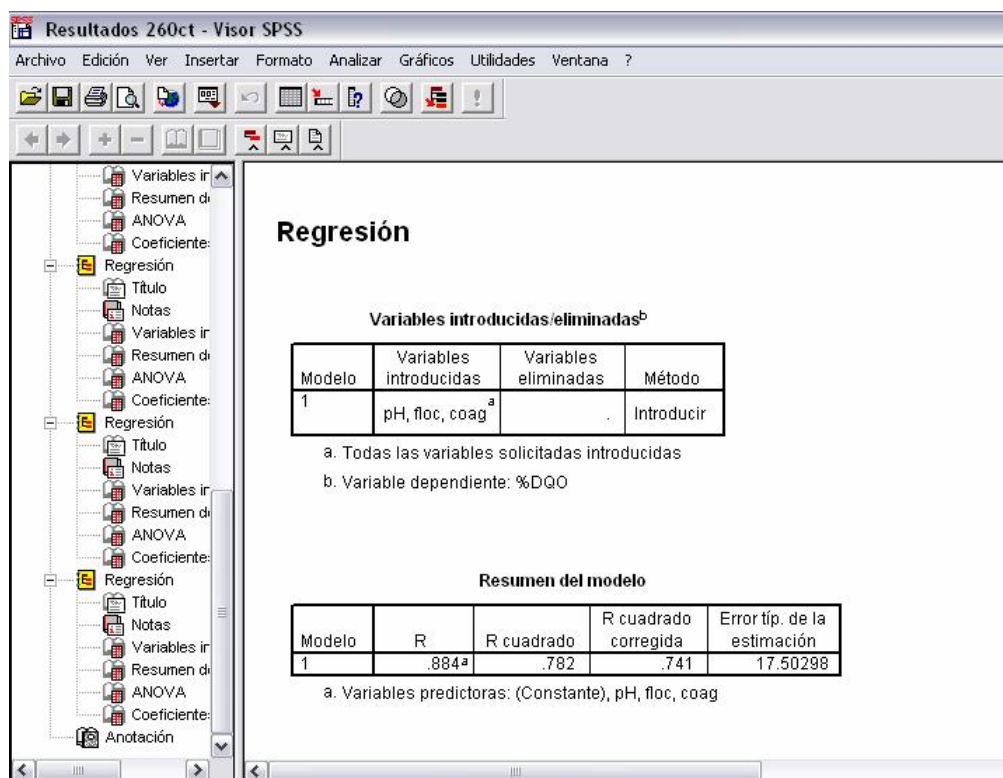


Fig. 8.4 Ejemplo de la ventana para elaborar una regresión lineal

Esta pantalla nos mostrará los resultados del cálculo de modelo matemático de la siguiente manera:

Variables introducidas/ eliminadas

Modelo	Variabes introducidas	Variabes eliminadas	Método
1	pH, floc, coag ^a	.	Introducir

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	.884 ^a	.782	.741	17.50298

ANOVA

Modelo		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
1	Regresión					
	Residual					
	Total					

Coeficientes

Modelo		Coeficientes no estandar.	Error típico	Coeficientes estandar.	t	Significancia
		B		Beta		
1	(Constante)					
	Coagulante					
	Floculante					
	pH					

- De los resultados anteriormente obtenidos, se toman aquellos que nos interesen para analizar nuestras variables.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Aboulhassan M. A.; Souabi S.; Yaacoubi A. and Baudu M. *Removal of surfactant from industrial wastewater by coagulation flocculation process*. Journal science technology. Vol 3 (4). Pp 327-332. **2006**.
- Ahmad A. L.; Imail S.; Bhatia S. *Optimization of coagulation-flocculation process for palm oil mill effluent, using response surface methodology*. Environment Science Technology. Vol 39. Pp 2828- 2834. **2005**.
- Ahmad A. L.; Sumathi S.; Hameed B. *Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC*. Chemical engineering journal. Vol 18. Pp 99- 105. **2006**.
- Baird C. *Química Ambiental*. Editorial Reverté. 1° edición. España. **2001**.
- Barceló D. *Environmental Analysis. Techniques, applications and quality assurance*. Elsevier Science Publisher. 1° edición. Netherlands. **1993**.
- Blanca E. Jiménez Cisneros. *La contaminación ambiental en México. Causas efectos y tecnología apropiada*. Edit Limusa. México. **2001**.
- Climent, M. *Estudios del mezclado en el proceso de lavado de suelos contaminados con hidrocarburos*. Tesis Profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. **2007**.
- Davis M.; Cornwall D. *Introduction to environmental engineering*. Mc Graw-Hill. 2da edición. USA **1995**.

-
- Droste R. *Theory and practice of water and wastewater treatment*. Jhon Wiley & sons. USA. **1997**.
 - Figuerelo J. *Química- física del medio ambiente*. Editorial Reverté. 1° edición. México. **2001**.
 - Hernández A. *Depuración de aguas residuales*. Parafino S. A. España. **1992**.
 - Iturbe A. R.; Castro R. A. y Madrigal M. I. *Técnicas de rehabilitación de suelos y acuíferos. Series del Instituto de Ingeniería*. Vol 612. UNAM. México. **1998**.
 - Iturbe A. R., Flores C., Gaves C., Torres L. *Remediation of contaminated soil using soil washing and biopile methodologies at a field level*. Pp 1-8. **2004**.
 - Jaimes J. *Estudios de mezclado en el proceso de coagulación- floculación para el tratamiento de aguas residuales industriales*. Tesis Profesional. Universidad Nacional Autónoma de Morelos. **1995**.
 - Kuhlman M. I.; Greenfield T. M. *Simplified soil washing processes for a variety of soils*. *Journal of Hazardous Materials*. Vol 66. Pp 31-45. **1999**.
 - Manahan S. *Fundamentals of environmental chemistry*. Lewis Publisher. USA. **1992**.
 - Meza A. *Floculación- coagulación como postratamiento del efluente de un reactor anaerobio que trata vinazas tequileras*. Tesis Profesional. Facultad de Química, UNAM. **1997**.

-
- Mijaylova P., Torres L., Ramírez E., López S., Cardoso L. *Characterization and coagulation- flocculation treatability of Mexico city wastewater applying ferric chloride and polymers*. Water science technology. Vol 34, No 3-4. Pp 235- 247. **1996**.
 - Mijaylova P., Moeller G.; Ramirez E. And Cardoso L. *Characterization and dewaterability of raw and stabilized sludge using different treatment methods*. Water science and technology. Vol 46 No 10. Pp 123-130. **2002**.
 - Mulligan C. N., Yong R. N., Gibas B. F. *Remediation Technologies for metal- contaminated soils and ground water, and evaluation*. Engineering geology. Vol 60. **2001**.
 - Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. *Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
 - Ramírez R.; Durán P.; Domínguez R.; Durán M. *Removal of detergents by activated petroulium coke from a clarified wastewater treated for reuse*. Water science and technology. Vol 50 No 2. Pp. 91-98. **2004**.
 - Semerjian L., Ayoub G. *High pH magnesium coagulation- flocculation in wastewater treatment*. Advanced in Environmental Rersearch. Vol 7. Pp. 389-403. **2003**.
 - Spiro T.; William S. *Química medioambiental*. Editorial Pearson Educación S.A. España.**2003**.
 - Torres L.; Rojas N.; Bautista G.; Iturbe R. *Effect of temperatura, and surfactant 's HLB and dose over the TPH- diesel biodegradation process in aged soils*. Process Biochemistry. Vol 40. Pp 3296-3302. **2005**.