



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL
ESTADO DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE EFICIENCIA
DE COLISIÓN DE LA FLOCULACIÓN
DE POLÍMEROS EN LA DESHIDRATACIÓN
DE LODOS RESIDUALES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

MIRIAM VIOLETA LARA DOMÍNGUEZ

DIRECTOR DE TESIS INTERNO
M. EN I. CARLOS BARRERA DÍAZ

DIRECTOR EXTERNO DE TESIS
DR. JAIME GARFIAS SOLIZ



TOLUCA, MÉXICO

JULIO, 2001



Universidad Autónoma del Estado de México
UAEM FACULTAD DE QUIMICA

DEPENDENCIA: CONTROL ESCOLAR.
 3o. (EV. PROFESIONAL.)
 OFICIO No. 337/2001

TOLUCA, MEXICO
 05 DE JULIO DEL 2001

P. I.Q. MIRIAM VIOLETA LARA DOMINGUEZ
 FACULTAD DE QUIMICA, U.A.E.M.
 P R E S E N T E:

La Dirección de la Facultad de Química de la U.A.E.M., comunica a Usted que el Jurado de su Evaluación Profesional estará formado por:

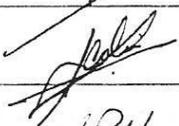
QUIM. JAIME FLORES ESTRADA.
 PRESIDENTE.



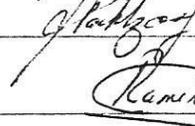
M. EN I. THELMA BEATRIZ PAVON SILVA.
 SECRETARIO.



M. EN I. CARLOS EDUARDO BARRERA DIAZ.
 PRIMER VOCAL.



DR. EN C. FERNANDO UREÑA NUREZ.
 SEGUNDO VOCAL.



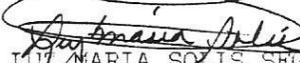
M. EN E. ARTURO COLIN CRUZ.
 TERCER VOCAL.

M. EN I. VICTOR FRANCISCO PACHECO SALAZAR.
 SUPLENTE.

I.Q. ARMANDO RAMIREZ SERRANO.
 SUPLENTE.



A T E N T A M E N T E
 PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO.
 " 2001, AÑO DE LA UNIVERSIDAD PÚBLICA MEXICANA "


 M. EN ED. LUZ MARÍA SOLÍS SEGURA. DIRECCION
 DIRECTORA.



U. A. E. M.
 FACULTAD DE QUIMICA

c.c.p. Depto. de Control Escolar.- Fac. de Química, UAEM.

La reducción del volumen de los lodos residuales se basa en la separación de la fase sólida de la fase líquida; con el objetivo de facilitar esta deshidratación se ha propuesto el uso de diferentes agentes floculantes, dentro de los que sobresalen los polielectrolitos; estos, al ser adicionados a los lodos promueven la coagulación y floculación de la materia sólida dispersa, permitiendo de esta manera una fácil separación sólido-líquido.

El uso de estos agentes floculantes en las plantas de tratamiento representa grandes costos, por lo que las dosis empleadas deben ser bien controladas. Las bases sobre las que se determinan las cantidades de polímero a utilizar son, hasta el momento, principalmente empíricas, lo cual provoca que se presenten, en algunos casos, deficiencias en la carga agregada, aunque con mayor frecuencia, se presentan sobredosis, lo que aumenta los costos además de generar otros problemas como incrementos notables en la viscosidad de las soluciones.

Con el fin de poder definir de manera más certera las cantidades de polímero que deben emplearse en distintos procesos de floculación, han sido desarrolladas teorías que permiten estimar los denominados “factores de eficiencia de colisión”, que son de cierta manera, un reflejo de los niveles de floculación alcanzados. Estas teorías han sido desarrolladas principalmente, con matrices más sencillas que los lodos residuales y se han obtenido resultados satisfactorios.

La estimación de los factores de eficiencia de colisión implicados en la floculación de lodos residuales ha sido poco investigada, debido a la complejidad de los mismos y a la variabilidad que estos presentan; pero debido a que en la floculación de matrices más sencillas y en las pocas investigaciones realizadas con lodos residuales se han obtenido buenos resultados, se propone la aplicación de este factor como una base teórica útil para eficientar los procesos de floculación de lodos residuales, al permitir realizar cálculos más exactos de las cantidades de polímero requeridas para alcanzar niveles de floculación adecuados.

AGRADECIMIENTOS

- ☞ Al Sistema Ecológico de Regeneración de Aguas Residuales Industriales S.A. de C.V. (RECICLAGUA), por todas las facilidades y el apoyo brindado en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

- ☞ Al Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) por todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de la parte experimental del presente trabajo.

- ☞ A todo el personal de la Facultad de Química de la UAEM quienes contribuyeron a que el presente trabajo llegara a buen término.

- ☞ Al Dr. Jaime Gárfias Soliz y al M. en I. Carlos Barrera Díaz por su valiosa ayuda al haber compartido conmigo sus conocimientos y experiencia.

DEDICATORIAS

- ☞ **A Dios:** gracias Señor por darme la oportunidad de vivir, y en la vida gracias por permitirme realizar mis sueños, pero sobretodo gracias porque sé que has estado conmigo en todo momento.

- ☞ **A mis Padres** gracias por todos los esfuerzos que han realizado, los cuales me han permitido llegar hasta este punto y seguir planteándome metas para el futuro, pero sobretodo gracias por su amistad y por el magnifico ejemplo que representan para nuestra familia. Dios los bendiga.

- ☞ **A mis hermanos** quienes me han enseñado a disfrutar cada instante de la vida y quienes con su gran apoyo me han animado siempre a seguir hacia delante.

- ☞ **A mis amigos** gracias por cada instante que han compartido conmigo y por el ánimo que me han infundido para seguir adelante.

- ☞ **A mis profesores** gracias por su apoyo, sus conocimientos y su paciencia a lo largo de toda una vida de estudio.

- ☞ **A toda mi Familia y a la Familia Marista** gracias.

RESUMEN

En los procesos de acondicionamiento de lodos residuales que tienen por objeto facilitar la separación sólido-líquido mediante el empleo de agentes floculantes, las dosis que se emplean de éstos se determinan principalmente mediante análisis de prueba y error. En el presente trabajo se presenta una propuesta para emplear los factores de eficiencia de colisión como bases teóricas para realizar las determinaciones de las dosis óptimas para la floculación de lodos residuales con el empleo de polielectrolitos. Esta propuesta ha sido desarrollada anteriormente con matrices mucho más sencillas que los lodos residuales, principalmente en la extracción de minerales, por lo que para el cálculo de los factores de eficiencia de colisión en este caso, dada la complejidad de los lodos residuales, se emplearon las teorías desarrolladas por La Mer (1982) y por Hogg (1984). Con base en resultados obtenidos y de los análisis correspondientes se pudo concluir que la teoría más adecuada para el caso de la presente investigación es la propuesta por La Mer, ya que permitió hacer una definición de la dosis óptima con mayor precisión que la teoría propuesta por Hogg, con la que se obtienen rangos muy amplios de dosis indicadas como óptimas. A partir del desarrollo de la parte experimental se pudo observar que los métodos de determinación de polímero residual se ven fuertemente afectados por los diferentes componentes de los lodos residuales, por lo que se debe hacer una selección cuidadosa que permita elegir un método que proporcione resultados confiables.

ÍNDICE

| CONTENIDO | PÁGINA |
|---|---------------|
| Resumen | I |
| Índice de cuadros | VI |
| Índice de figuras | IX |
| Nomenclatura | XI |
| | |
| CAPÍTULO I Introducción | 1 |
| | |
| CAPÍTULO II Plantas de tratamiento de Aguas residuales | |
| II.1 El agua residual | 6 |
| II.1.1 Principales contaminantes | 7 |
| II.2 Clasificación de los sistemas de tratamiento | 7 |
| II.3 Estructura de los sistemas de tratamiento | 8 |
| II.3.1 Operaciones físicas | 8 |
| II.3.1.1 Desbaste | 9 |
| II.3.1.2 Dilaceración | 9 |
| II.3.1.3 Homogenización de caudales | 10 |
| II.3.1.4 Mezclado | 10 |
| II.3.1.5 Floculación | 11 |
| II.3.1.6 Sedimentación | 12 |
| II.3.1.7 Flotación | 13 |
| II.3.1.8 Filtración | 13 |
| II.3.2 Procesos químicos | 14 |
| II.3.2.1 Precipitación química | 14 |
| II.3.2.2 Transferencia de gases | 18 |
| II.3.2.3 Adsorción | 18 |

| | |
|------------------------------|----|
| II.3.2.4 Desinfección | 19 |
| II.3.3 Procesos biológicos | 20 |
| II.3.3.1 Procesos aeróbios | 20 |
| II.3.3.2 Procesos anaerobios | 20 |
| II.3.3.3 Procesos anóxicos | 20 |

CAPÍTULO III Lodos residuales

| | |
|---|----|
| III.1 Introducción | 27 |
| III.2 Clasificación de Lodos residuales | 28 |
| III.3 El agua presente en los lodos residuales | 29 |
| III.3.1 Clasificación del agua presente en los lodos residuales | 31 |
| III.4 Tratamiento de lodos residuales | 33 |
| III.4.1 Estabilización de lodos residuales | 34 |
| III.4.1.1 Digestión anaerobia | 35 |
| III.4.1.2 Digestión aerobia | 35 |
| III.4.2 Espesamiento de lodos residuales | 36 |
| III.4.2.1 Espesamiento por gravedad | 36 |
| III.4.2.2 Espesamiento por flotación | 38 |
| III.4.2.3 Espesamiento por centrifugación | 38 |
| III.4.3 Deshidratación de lodos residuales | 39 |
| III.4.3.1 Cámaras de arena o secado | 39 |
| III.4.3.2 Filtración al vacío | 40 |
| III.4.3.3 Filtración con presión o prensado | 41 |
| III.4.3.4 Centrifugación | 42 |
| III.4.3.5 Deshidratación por congelamiento | 42 |
| III.4.3.6 Deshidratación con empleo de vegetación | 43 |
| III.4.4 Métodos de disposición final | 43 |
| III.4.4.1 Aplicación al terreno | 44 |

| | |
|---|----|
| III.4.4.2 Lagunaje | 44 |
| III.4.4.3 Disposición como relleno | 44 |
| III.4.4.4 Vertedero controlado | 45 |
| III.4.5 Acondicionamiento de lodos residuales | 45 |

CAPÍTULO IV Polielectrolitos como agentes acondicionantes de lodos residuales

| | |
|--|----|
| IV.1 Acondicionamiento de lodos residuales | 47 |
| IV.2 Floculación y coagulación | 49 |
| IV. 3 Polielectrolitos | 50 |
| IV.4 Floculación | 51 |
| IV.5 Factores que afectan la floculación | 55 |
| IV.6 Elección del polielectrolito | 58 |
| IV.7 Factores de eficiencia de colisión | 60 |

Capítulo V Desarrollo experimental

| | |
|---|----|
| V.1 Introducción | 65 |
| V.2 Muestreo | 65 |
| V.3 Metodología | 66 |
| V.3.1 Caracterización de lodos | 66 |
| V.3.2 Caracterización de polímeros | 70 |
| V.3.3 Estimación de factores de eficiencia de colisión. | 71 |
| V.3.3.1 Viscosimetría | 73 |
| V.4 Resultados | 77 |
| V.4.1 Lodos residuales | 77 |
| V.4.2 Polímeros | 81 |
| V.4.3 Factores de eficiencia de colisión | 82 |

| | |
|--|-----|
| V.5 Cálculo de factores de eficiencia de colisión | 94 |
| CAPÍTULO VI Análisis de resultados | 111 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | |
| Conclusiones | 129 |
| Recomendaciones | 131 |
| BIBLIOGRAFÍA. | 128 |
| ANEXOS | |
| Anexo 1. Resultados del proceso de caracterización de lodos residuales | 140 |

ÍNDICE DE CUADROS

| CUADRO | PÁGINA |
|--|--------|
| IV.1 Efecto del tamaño de partículas en la sedimentación. | 47 |
| IV.2 Características de flóculos para aplicaciones específicas. | 48 |
| V.1 Diámetros de partículas de lodos secundarios determinados por difracción láser. | 79 |
| V.2 Diámetros de partículas de lodos crudos mixtos determinados por difracción láser. | 79 |
| V.3 Área superficial de los lodos secundarios por adsorción de nitrógeno. | 80 |
| V.4 Área superficial de los lodos crudos mixtos por adsorción de nitrógeno. | 80 |
| V.5 Características de los polímeros seleccionados. | 81 |
| V.6 Datos de la curva de calibración para el Percol 755. | 82 |
| V.7 Datos de la curva de calibración para el Percol 757. | 84 |
| V.8 Viscosidades medidas a la fase líquida obtenida de la floculación de lodos secundarios con Percol 755. | 86 |
| V.9 Viscosidades medidas a la fase líquida obtenida de la floculación de lodos secundarios con Percol 757. | 87 |
| V.10 Viscosidades medidas a la fase líquida obtenida de la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 755. | 88 |
| V.11 Viscosidades medidas a la fase líquida obtenida de la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 757. | 89 |
| V.12 Concentración residual y cantidad de polielectrolito (Percol 755) adsorbida por las partículas dispersas en el lodo secundario. | 90 |
| V.13 Concentración residual y cantidad de polielectrolito (Percol 757) adsorbida por las partículas dispersas en el lodo secundario. | 91 |

| | | |
|------|--|-----|
| V.14 | Concentración residual y cantidad de polielectrolito (Percol 755) adsorbida por las partículas dispersas en el lodo crudo mixto. | 92 |
| V.15 | Concentración residual y cantidad de polielectrolito (Percol 757) adsorbida por las partículas dispersas en el lodo crudo mixto. | 93 |
| V.16 | Fracciones de área cubierta en la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 755. | 99 |
| V.17 | Fracciones de área cubierta en la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 757. | 100 |
| V.18 | Fracciones de área cubierta en la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 755. | 101 |
| V.19 | Fracciones de área cubierta en la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 757. | 102 |
| V.20 | Factores de eficiencia de colisión de la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 755. | 103 |
| V.21 | Factores de eficiencia de colisión de la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 757. | 104 |
| V.22 | Factores de eficiencia de colisión de la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 755. | 105 |
| V.23 | Factores de eficiencia de colisión de la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 757. | 106 |
| V.24 | Nivel de la interfase sólido-líquido alcanzada con la floculación de lodos secundarios con Percol 755 a diferentes tiempos y características de los flóculos formados. | 107 |
| V.25 | Nivel de la interfase sólido-líquido alcanzada con la floculación de lodos secundarios con Percol 757 a diferentes tiempos y características de los flóculos formados. | 108 |
| V.26 | Nivel de la interfase sólido-líquido alcanzada con la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 755 a diferentes tiempos y características de los flóculos formados. | 109 |
| V.27 | Nivel de la interfase sólido-líquido alcanzada con la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 757 a diferentes tiempos y características de los flóculos formados. | 110 |

| | | |
|------|--|-----|
| VI.1 | Concentraciones empleadas para la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 755 y eficiencias de colisión alcanzadas. | 116 |
| VI.2 | Concentraciones empleadas para la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 757 y eficiencias de colisión alcanzadas. | 117 |
| VI.3 | Concentraciones empleadas para la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 755 y eficiencias de colisión alcanzadas. | 118 |
| VI.4 | Concentraciones empleadas para la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 757 y eficiencias de colisión alcanzadas. | 119 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| FIGURA | PÁGINA | |
|--------|--|-----|
| II.1 | Modelo de Stern de la doble capa eléctrica. | 17 |
| II.2 | Esquema de un sistema de tratamiento de aguas residuales. | 23 |
| II.3 | Diagrama de la planta de tratamiento de aguas residuales RECICLAGUA. | 24 |
| III.1 | Decremento del volumen de lodos al incrementar el contenido de sólidos. | 30 |
| III.2 | Distribución del agua en una partícula de lodo. | 32 |
| III.3 | Principios básicos empleados en las separaciones sólido-líquido. | 34 |
| IV.1 | Mecanismo de formación de puentes en el proceso de separación sólido-líquido. | 53 |
| IV.2 | Mecanismo de neutralización de cargas en el proceso de separación sólido-líquido. | 53 |
| IV.3 | Mecanismo de floculación por formación de red en el proceso de separación sólido-líquido. | 54 |
| V.1 | Curva de calibración Percol 755. | 83 |
| V.2 | Curva de calibración Percol 757. | 85 |
| VI.1 | Cantidad de polímero adsorbida, respecto a la cantidad inicial adicionada al proceso de floculación de lodos secundarios y lodos crudos mixtos con Percol 755. | 113 |
| VI.2 | Cantidad de polímero adsorbida, respecto a la cantidad inicial adicionada al proceso de floculación de lodos secundarios y lodos crudos mixtos con Percol 757. | 114 |
| VI.3 | Relación de cantidad de polímero empleada y eficiencias de colisión logradas (de acuerdo a la teoría de La Mer), en la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 755 y 757. | 120 |

| | | |
|------|---|-----|
| VI.4 | Relación de cantidad de polímero empleada y eficiencias de colisión logradas (de acuerdo a la teoría de La Mer), en la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 755 y 757. | 121 |
| VI.5 | Relación de cantidades de polímero empleadas y cantidad de flóculos sedimentados producto de la floculación de lodos residuales secundarios. | 122 |
| VI.6 | Comparación de los factores de eficiencia de colisión calculados para la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 755, empleando la teoría de La Mer (1982) y de Hogg (1984). | 124 |
| VI.7 | Comparación de los factores de eficiencia de colisión calculados para la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 755, empleando la teoría de La Mer (1982) y de Hogg (1984). | 125 |

NOMENCLATURA

A° = angstrom.

A_p = área ocupada por el polímero adsorbido.

A_v = número de Avogadro.

E = factor de eficiencia de colisión.

F = velocidad de floculación.

g = gramo.

hr = hora.

K = constante de velocidad de floculación.

kg = kilogramo.

l = litro.

m = metro.

M = peso molecular del polímero.

M_{ads} = masa de polímero adsorbida por las partículas.

mg = miligramo.

mm = milímetro.

M_o = peso molecular del monómero.

n_i, n_j = número de especies que interactúan por unidad de volumen

nm = nanómetro.

pH = potencial de Hidrógeno.

ppm = partes por millón.

R_G = radio de giro de una molécula de polímero.

rpm = revoluciones por minuto.

S° = área ocupada por una molécula de polímero.

seg = segundo.

SSF = sólidos suspendidos fijos.

SST = sólidos suspendidos totales.

SSV = sólidos suspendidos volátiles.

$X_{0.5}$ = diámetro promedio de partículas en volumen.

X_S = diámetro medio de partículas considerando su área superficial.

α = factor de expansión.

β = longitud efectiva de la cadena principal del polímero.

μm = micrómetro.

θ = fracción del sólido cubierta por polímero adsorbido.

ψ_0 = potencial en de Stern.

ψ_0 = potencial en la superficie de la partícula.

ζ = potencial zeta.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo, el hombre ha alcanzado un gran desarrollo en distintos aspectos, sin embargo, además de los beneficios que este desarrollo proporciona, han surgido también algunos problemas, dentro de los que sobresale el daño al ambiente.

Entre los recursos que más afectados se han visto, se encuentra el agua. Este líquido, cuya participación es fundamental en un sinnúmero de procesos tanto biológicos, como industriales, se ha visto gravemente alterado tanto en su calidad como en su cantidad. Debido a esta situación, surge la necesidad de contar con sistemas que permitan su regeneración y posterior reuso.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se han desarrollado hasta el momento, consisten de diferentes etapas, las cuales son descritas en la primera parte del presente trabajo de investigación. Todas estas etapas tienen como objetivo común el eliminar materiales contaminantes presentes en el agua, empleando diferentes principios tanto físicos como químicos.

La separación de los materiales contaminantes, hace que mientras se tratan las aguas residuales se genere también otro producto denominado *lodos residuales*. Los lodos residuales se forman, de manera general, de los contaminantes generados en el tratamiento del agua y de una gran cantidad de este líquido que es arrastrado por los mismos.

El manejo y disposición de los lodos residuales son considerados procesos difíciles y costosos dentro de las plantas de tratamiento, debido a que son generados en grandes volúmenes, presentan una consistencia acuosa, además de ser fácilmente putrescibles. Para reducir tales problemas, se han diseñado sistemas de tratamiento para lodos residuales, cuyo objetivo es, principalmente, reducir su volumen y propiciar su estabilización. Estos sistemas son descritos en el capítulo III.

La reducción del volumen de los lodos residuales se basa en la separación de la fase sólida de la fase líquida; con el objetivo de facilitar esta deshidratación se ha propuesto el uso de diferentes agentes floculantes, dentro de los que sobresalen los polielectrolitos; estos, al ser adicionados a los lodos promueven la coagulación y floculación de la materia sólida dispersa, permitiendo de esta manera una fácil separación sólido-líquido.

El uso de estos agentes floculantes en las plantas de tratamiento representa grandes costos, por lo que las dosis empleadas deben ser bien controladas. Las bases sobre las que se determinan las cantidades de polímero a utilizar son, hasta el momento, principalmente empíricas, lo cual provoca que se presenten, en algunos casos, deficiencias en la carga agregada, aunque con mayor frecuencia, se presentan sobredosis, lo que aumenta los costos además de generar otros problemas como incrementos notables en la viscosidad de las soluciones.

Con el fin de poder definir de manera más certera las cantidades de polímero que deben emplearse en distintos procesos de floculación, han sido desarrolladas teorías que permiten estimar los denominados “factores de eficiencia de colisión”, que son de cierta manera, un reflejo de los niveles de floculación alcanzados. Estas teorías han sido desarrolladas principalmente, con matrices más sencillas que los lodos residuales y se han obtenido resultados satisfactorios.

La estimación de los factores de eficiencia de colisión implicados en la floculación de lodos residuales ha sido poco investigada, debido a la complejidad de los mismos y a la variabilidad que estos presentan; pero debido a que en la floculación de matrices más sencillas y en las pocas investigaciones realizadas con lodos residuales se han obtenido buenos resultados, se propone la aplicación de este factor como una base teórica útil para eficientar los procesos de floculación de lodos residuales, al permitir realizar cálculos más exactos de las cantidades de polímero requeridas para alcanzar niveles de floculación adecuados.

Con el fin de verificar la aplicabilidad de dicha propuesta, se desarrollaron pruebas de floculación y se realizaron los cálculos de los factores de eficiencia de colisión correspondientes, empleando lodos residuales de tipo industrial. Los resultados de estas pruebas, permitieron definir las concentraciones ideales que debieran aplicarse en el proceso de floculación de lodos residuales industriales, provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales RECICLAGUA localizada en el municipio de Lerma, Estado de México.

CAPÍTULO II

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

II.1 EL AGUA RESIDUAL

El agua interviene en un sinnúmero de procesos muy importantes para la vida del hombre, a través de los cuales se ve alterada en sus características, de aquí que haya surgido el concepto de agua residual. Las aguas residuales surgen de una gran diversidad de procesos que van desde las tareas más comunes que se realizan en los hogares como lavar los trastes, la ropa, la higiene personal, etc., hasta los procesos industriales en los que el agua se emplea como solvente, reactivo, medio de enfriamiento, entre otros.

De acuerdo a su origen, el agua residual puede ser clasificada de manera general en dos grandes grupos: agua residual municipal, que corresponde a la generada en las residencias, instituciones públicas, centros comerciales y otros servicios propios de las urbes, y en agua residual industrial, que como su nombre lo indica, es la proveniente de los centros industriales. Ambos tipos de agua residual presentan características diferentes, especialmente en cuanto al tipo de contaminantes que contienen y por ende tienen necesidades de tratamiento también distintas⁽²⁶⁾.

El agua residual representa un grave problema; principalmente en lo que a salud pública se refiere, pues con frecuencia contiene numerosos microorganismos patógenos que habitan en el aparato intestinal humano o que pueden estar presentes en ciertos residuos industriales; también suele contener nutrientes que estimulan el crecimiento de plantas acuáticas además de que puede incluir compuestos tóxicos, que decremantan la calidad del medio ambiente. Es por lo anterior que se hace patente la necesidad de contar con tratamientos efectivos que permitan restaurar sus propiedades naturales.

Como respuesta a tal necesidad, surgen las plantas con sistemas de tratamiento de aguas residuales, que se presentan como una alternativa de solución al permitir la restitución, en cierta medida, de las características originales de este vital líquido que por lo general se encuentra sumamente alterado tanto física como químicamente, lo que impide su reuso en tales condiciones.

II.1.1 PRINCIPALES CONTAMINANTES

Los contaminantes que se tratan de eliminar mediante los sistemas de tratamiento de aguas residuales son principalmente⁽²⁶⁾:

- ☞ Sólidos en suspensión; responsables del depósito de fangos cuando son vertidos al entorno acuático sin ser tratados.
- ☞ Materia orgánica biodegradable; dentro de esta se consideran las proteínas, carbohidratos y grasas animales, que puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
- ☞ Agentes patógenos; causantes de la transmisión de enfermedades contagiosas al estar presentes en el agua residual.
- ☞ Nutrientes; son responsables del crecimiento de una vida acuática no deseada, además de ser causantes, en algunas ocasiones, de la contaminación del agua subterránea.
- ☞ Materia orgánica refractaria como agentes termoactivos, fenoles y pesticidas, que tienden a revestir los métodos convencionales de tratamiento.
- ☞ Metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos como calcio y sodio.

II.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Con el fin de eliminar los contaminantes antes mencionados, han sido estructurados diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales compuestos por distintas operaciones unitarias. En la actualidad las operaciones físicas y procesos químicos empleados se han organizado de tal manera, que han dado origen a lo que se conoce como tratamientos primarios, secundarios y terciarios o avanzados⁽⁹⁾.

El tratamiento primario aplica únicamente operaciones físicas y tiene como objetivo eliminar los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual; en el

tratamiento secundario se amplía el sistema haciendo uso también de procesos químicos y biológicos mediante los cuales se elimina la materia orgánica; mientras que el tratamiento terciario es una combinación de los métodos empleados en los dos tipos anteriores, esto con objeto de eliminar otros contaminantes (como el nitrógeno y el fósforo) que continúan en el agua, aún después de haber atravesado los dos primeros niveles de tratamiento.

La elección del tipo de tratamiento para el acondicionamiento del agua residual se hace basándose en los contaminantes presentes y en las características del entorno. Actualmente la mayor parte de las plantas de tratamiento de agua cuenta solo con el tratamiento secundario, pero conforme avanza el tiempo y el conocimiento en este campo se incrementa, los sistemas van aumentando su capacidad, alcance y eficiencia⁽²⁸⁾.

II.3 ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

A continuación, se hará una breve descripción de las diferentes secciones que componen un sistema de tratamiento de aguas residuales, iniciando por lo correspondiente a las operaciones físicas y tratando, posteriormente, lo que corresponde a los procesos químicos. Cabe mencionar que para la eliminación de cada uno de los contaminantes mencionados anteriormente existen diversas opciones de operaciones y/o procesos que cumplen con objetivos similares en el sistema de tratamiento y que para cada uno de ellos existen diversas opciones de equipo que pudieran ser aplicables. Esto implica que no siempre se hará mención de todos ellos ya que este no es el objetivo principal del presente trabajo.

II.3.1 OPERACIONES FÍSICAS

Son utilizadas para la separación de sólidos suspendidos y flotantes de tamaño grande, grasas, así como para el bombeo del lodo.

II.3.1.1 DESBASTE

Corresponde a la primera operación unitaria en las plantas de tratamiento. Tiene como objetivo eliminar los materiales sólidos gruesos y sedimentables denominados “basuras”, mediante una intercepción de los mismos. Para tal función se emplean dispositivos como: rejillas, telas metálicas, placas perforadas, alambres, varillas o barras. Sus aberturas generalmente son de 25 mm o más. Según el método de limpieza que se utilice en estos dispositivos, pueden ser designadas como: de limpieza mecánica o de limpieza manual⁽²⁶⁾.

El desbaste también se emplea en ocasiones para eliminar sólidos en suspensión procedentes de los procesos de tratamiento biológico. Para tales casos se emplean los denominados tamices, que corresponden a mallas metálicas o placas perforadas cuyas aberturas no son superiores a 6 mm. Existen diversos tipos de tamices, dentro de los que se pueden mencionar los siguientes: inclinado fijo, tambor giratorio, deslizante y centrífugo⁽²⁶⁾.

II.3.1.2 DILACELERACIÓN

Esta operación, también conocida como trituración, tiene como finalidad romper o cortar los sólidos hasta lograr un tamaño menor y más uniforme, con el fin de evitar problemas causados por obstrucción de bombas o tuberías o por presentarse sólidos de diversos tamaños. A menudo, se utilizan dilaceleradores para triturar los sólidos retenidos en los tamices, de tal modo que puedan ser devueltos a la corriente para su eliminación en operaciones y procesos de tratamiento posteriores, aunque hay quien afirma que una vez que los sólidos han sido separados del agua residual, no deben ser retornados a la misma, sin importar la forma que estos presenten. Respecto a este punto, cada caso debe ser estudiado con el fin de determinar las ventajas y desventajas que ofrecería cada una de las opciones⁽⁹⁾.

II.3.1.3 HOMOGENIZACIÓN DE CAUDALES

Consiste, simplemente, en la laminación de las variaciones del caudal, para mantenerlo constante o casi constante. Se realiza con el objetivo de evitar deterioros en la eficiencia del tratamiento respecto al valor óptimo que podría obtenerse si existiese un caudal constante. Se aplica principalmente en la homogenización de caudales en tiempo seco, de caudales procedentes de redes de alcantarillado en tiempo de lluvia y de caudales mixtos de aguas pluviales y residuales sanitarias. Para lograr este objetivo, se emplea un tanque de homogenización por el que pasa todo el caudal, el cual tiene un efecto de taponamiento o bien, en ocasiones al tanque de homogenización solo llega el caudal que excede el valor medio diario de flujo⁽²⁶⁾.

Dentro de las principales ventajas que se obtienen al aplicar la homogenización de caudales se encuentran: mejoramiento del tratamiento biológico, debido a la disminución o eliminación de los efectos causados por las variaciones, que provocan la dilución de sustancias inhibitoras y desestabilización del pH; mejoramiento en la calidad del efluente y del rendimiento de los tanques de sedimentación secundaria al trabajar a cargas de sólidos constantes. Y en el tratamiento químico mejora el control de la dosificación de reactivos y la fiabilidad del proceso⁽²⁶⁾.

Las instalaciones de homogenización generalmente se localizan antes del tratamiento primario, aunque en ocasiones, es conveniente colocarlas también después de éste y antes del tratamiento biológico, ya que ello reduce los problemas con los lodos y las espumas⁽²⁶⁾.

II.3.1.4 MEZCLADO

Esta operación es importante en todas las fases del tratamiento en las que una sustancia tenga que ser totalmente entremezclada con otra. Algunos casos son: los

productos químicos que deben mezclarse con el agua residual; el tanque de digestión en el que se debe asegurar un contacto íntimo entre el sustrato y los microorganismos; el tanque de proceso biológico en el que el aire debe mezclarse con el lodo activado a fin de proporcionar a los organismos el oxígeno requerido, entre otros.

Para realizar el mezclado, se cuenta con diversas opciones dentro de las que se pueden mencionar: resaltos hidráulicos en canales, tubos tipo Venturi, conducciones, bombas y recipientes con ayuda de medios mecánicos, entre otros. Todos estos mecanismos se sirven de la turbulencia para lograr el mezclado; en los cuatro primeros ésta es generada por el régimen de circulación y en el último es inducida mediante el uso de impulsores giratorios como turbinas, paletas, hélices, gases y bombas de chorro de aire y agua⁽²⁸⁾.

IL3.1.5 FLOCULACIÓN

Esta operación tiene por objeto provocar la agregación de pequeñas partículas, aumentando el tamaño de las mismas, promoviendo, de esta manera, su eliminación mediante sedimentación por gravedad. Es una parte esencial de cualquier sistema de precipitación química o químicamente asistida⁽²⁶⁾.

Para eficientar esta operación suelen emplearse tanques equipados con aletas auxiliares fijas o paletas estáticas situadas entre las paletas móviles, que sirven para aumentar la posibilidad de contacto entre partículas tras la adición de los productos químicos y para interrumpir la rotación de masa del líquido y activar el mezclado⁽²⁸⁾.

Cabe mencionar que para esta operación, la agitación es una parte muy importante, por lo que debe ser controlada con sumo cuidado; ya que si es demasiado fuerte, los esfuerzos cortantes que se producen romperán el floculo en partículas más pequeñas, mientras que si no es suficiente, impedirá que las partículas colisionen y puedan formar

flóculos de mayor tamaño, por lo que se deberá adecuar la agitación de manera que permita la formación de flóculos de tamaño adecuado que se depositen rápidamente⁽²⁶⁾.

II.3.1.6 SEDIMENTACIÓN

Corresponde a la separación de las partículas suspendidas más pesadas que el agua mediante la acción de la gravedad. Se emplea en la eliminación de arena, materia particulada en el tanque de decantación primaria, de los flóculos cuando es empleada la coagulación química y para la concentración de sólidos en los espesadores de lodos. Tiene como objetivo producir un efluente clarificado y/o aumentar la concentración de sólidos en los lodos residuales⁽²⁸⁾.

En base a la concentración y tendencia a la interacción de las partículas pueden darse cuatro tipos generales de sedimentación, que son⁽²⁶⁾:

- ☞ De partículas discretas: se presenta en suspensiones con baja concentración de sólidos; en las que las partículas sedimentan como entidades individuales y no hay interacción sustancial con las partículas vecinas
- ☞ Floculante: se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se juntan, o floculan, durante la operación de sedimentación.
- ☞ Retardada o zonal: se refiere a suspensiones de concentración intermedia, en las cuales las fuerzas interpartículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas y la masa de partículas sedimenta como una unidad.
- ☞ Compresión: corresponde a la sedimentación en la cual las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura y solamente puede darse la

sedimentación por compresión de la estructura, provocada por la adición constante de partículas.

II.3.1.7 FLOTACIÓN

Operación empleada en la separación de partículas líquidas o sólidas de una fase líquida⁽²⁸⁾. La separación se consigue introduciendo burbujas finas de gas (generalmente aire) en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza ascendente del conjunto partícula-burbujas de gas, es tal que hace que la partícula ascienda a la superficie. De esta manera pueden hacerse ascender partículas de mayor densidad que el líquido. La elevación de las partículas con densidad menor que el líquido puede verse facilitada de igual manera⁽²⁶⁾.

En el tratamiento de aguas residuales, la flotación es empleada para eliminar la materia suspendida y para concentrar los lodos biológicos. La ventaja de esta operación sobre la sedimentación es que las partículas muy pequeñas o ligeras que se depositan lentamente pueden eliminarse mejor y en menor tiempo. Una vez que las partículas están en la superficie, pueden recogerse mediante el empleo de rastras⁽⁹⁾.

II.3.1.8 FILTRACIÓN

Esta operación tiene una aplicación más o menos reciente, pero se ha vuelto importante, ya que ha permitido facilitar la eliminación de los sólidos en suspensión presentes en el efluente de agua residual procedente de procesos de tratamiento biológicos y químicos, así mismo es empleada en la eliminación del fósforo precipitado por vía química⁽²⁸⁾.

La filtración se lleva a cabo haciendo pasar el agua residual a través de un lecho filtrante granular, con o sin la adición de productos químicos. Dentro del lecho filtrante, la

eliminación de los sólidos en suspensión, contenidos en el agua residual, se realiza por medio de un complejo proceso que incluye uno o más mecanismos, tales como tamizado, interceptación, impacto, sedimentación y adsorción⁽²⁶⁾.

El final del ciclo de filtrado se alcanza cuando empieza a aumentar el contenido de sólidos en suspensión en el efluente por encima de un nivel aceptable o cuando se produce una pérdida de carga prefijada a través del lecho filtrante, aunque idealmente ambas circunstancias deberían ocurrir simultáneamente. Una vez alcanzada alguna de estas dos condiciones se lava el filtro para eliminar los materiales sólidos que se han recogido; el efluente obtenido del lavado es entonces enviado a las instalaciones de sedimentación primaria o bien al proceso de tratamiento biológico⁽²³⁾.

II.3.2 PROCESOS QUÍMICOS

Se emplean con el objetivo de eliminar los sólidos suspendidos y coloidales mediante precipitación, para lograr la desinfección del agua residual y el control de olores.

II.3.2.1 PRECIPITACIÓN QUÍMICA

Consiste en la adición de productos químicos con el fin de modificar el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión, facilitando de esta manera su eliminación por sedimentación. En ocasiones, la alteración es ligera y los sólidos se eliminan al quedar atrapados en un precipitado de gran volumen formado, principalmente, por el propio coagulante⁽²⁸⁾.

Esta operación se emplea con la finalidad de incrementar la eliminación de compuestos orgánicos y nutrientes presentes en el agua residual como el nitrógeno y el fósforo, en otras situaciones forma parte del tratamiento biológico, proporcionando de esta manera un tratamiento más completo al agua residual⁽²⁶⁾. También es comúnmente

empleada como una parte del acondicionamiento de lodos residuales, cuyo objetivo es facilitar la separación sólido-líquido⁽³⁶⁾.

Como Se ve: Al^{3+}

Al emplear la precipitación química, se puede llegar a eliminar del 80 al 90% de la materia total suspendida, del 40 al 70% de la DBO₅ y del 80 al 90% de las bacterias. Estas cifras pueden ser comparadas con las de la sedimentación normal, con la que solo se elimina del 50 al 70% de la materia suspendida y del 30 al 40% de la materia orgánica⁽²⁶⁾.

Los niveles de eliminación logrados con la precipitación química, dependerán de las características y las cantidades de productos químicos utilizados y del control que se tenga sobre el proceso. Los productos químicos que se emplean con mayor frecuencia en el tratamiento de aguas residuales son: sulfato de alúmina, sulfato de hierro (caparrosa), cal, cloruro férrico y sulfato férrico⁽⁹⁾.

La precipitación química se fundamenta en el hecho de que las partículas sólidas muestran cierta estabilidad que les permite estar dispersas en el medio; esta estabilidad es atribuida a la carga superficial que depende de la composición del agua residual en que se encuentren. La destrucción de dicha estabilidad provoca que las partículas tiendan a agregarse (flocular) en partículas de mayor tamaño y con masa suficiente para sedimentar⁽²⁶⁾.

La carga superficial es desarrollada mediante la adsorción preferente, ionización y sustitución isomorfa; por ejemplo, las gotas de aceite, burbujas de gas y otras sustancias químicamente inertes presentan una carga negativa al adquirir preferentemente aniones (sobre todo iones hidroxilo). En cuanto a otras sustancias como las proteínas y microorganismos, la carga superficial es lograda mediante la ionización de los grupos amino y carboxilo, esto se representa como $R_{NH_2}^{COO^-}$ a elevado pH, $R_{NH_3^+}^{COOH}$ a bajo pH y $R_{NH_3^+}^{COO^-}$ en el punto isoelectrico, donde R representa el cuerpo de la molécula. El desarrollo de la

carga por sustitución isomorfa tiene lugar en la arcilla y otras partículas del suelo en las que los iones en la estructura reticular son sustituidos por iones de la solución (por ejemplo, la sustitución de Si por Al)⁽²⁶⁾.

Al presentarse la carga superficial en las partículas, son adheridas a la superficie de estas algunos iones de carga contraria (o contraiones) y se mantienen ahí mediante fuerzas electrostáticas de Van der Waals, las cuales resisten la agitación térmica. Si una partícula con cierta carga superficial es colocada en una solución de un electrolito a través de la cual se hace pasar una corriente eléctrica, la partícula será atraída, de acuerdo a su carga superficial, hacia uno u otro de los electrodos arrastrando consigo una nube de iones⁽⁹⁾.

El potencial en la superficie de la nube (llamada superficie de cizalladura) se mide en ocasiones en las operaciones de tratamiento de agua residual y se denomina potencial zeta, aunque teóricamente debería corresponder al potencial medido en la superficie que encierra la capa compacta de iones adherida a la partícula como se muestra en la Figura II.1 generalmente no corresponde a este valor, debido a la naturaleza variable de los componentes de la solución⁽²⁶⁾.

Con el fin de alterar la estabilidad de las partículas atribuida a su carga superficial y permitir de esta manera la agregación de las mismas, es necesario tomar ciertas precauciones ya sea para reducir la carga, o bien para reducir el efecto de la misma; esto puede lograrse mediante la adición de diversas sustancias, dentro de las que se pueden mencionar:

1. Iones que alteren el potencial, los cuales al ser adsorbidos disminuyen la carga superficial y las fuerzas repulsivas entre partículas.
2. Polímeros que permiten la eliminación de partículas mediante la adsorción y la formación de puentes entre ellas.

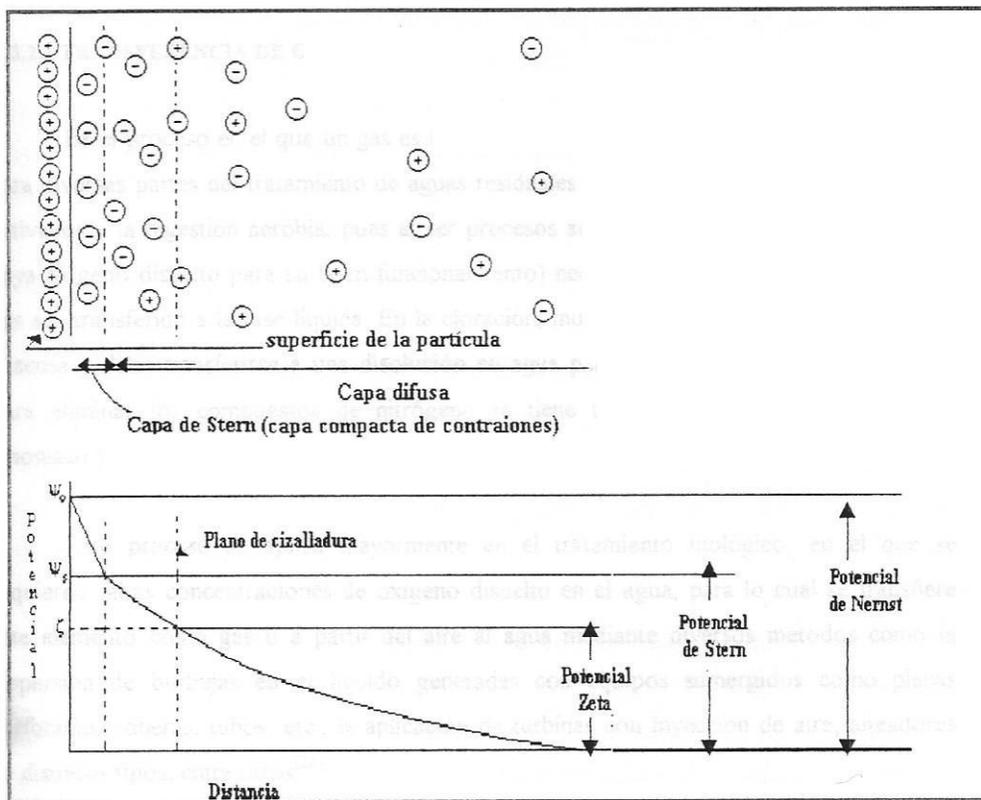


Figura II.1. Modelo de Stern de la doble capa eléctrica. (Metcalf, 1994)

ψ_0 = potencial en la superficie de la partícula.

ψ_s = potencial de Stern.

ζ = potencial zeta.

3. Productos químicos que formen iones metálicos hidrolizados, como en el caso del sulfato de alúmina o el sulfato férrico, a partir de los cuales se obtienen los productos de hidrólisis de Fe^{3+} y Al^{3+} promotores de la agregación de partículas.

II.3.2.2 TRANSFERENCIA DE GASES

Es el proceso en el que un gas es transferido de una fase a otra. Es muy importante para diversas partes del tratamiento de aguas residuales como: la filtración biológica, lodos activados y la digestión aerobia, pues al ser procesos aeróbios (es decir que requieren que haya oxígeno disuelto para su buen funcionamiento) necesitan que el oxígeno en forma de gas sea transferido a la fase líquida. En la cloración, muchas veces se tiene el cloro en fase gaseosa y debe transferirse a una disolución en agua para lograr la desinfección deseada. Para eliminar los compuestos de nitrógeno se tiene un proceso que lo convierte en amoníaco y transfiere este gas del agua al aire⁽²⁶⁾.

Este proceso se aplica mayormente en el tratamiento biológico, en el que se requieren altas concentraciones de oxígeno disuelto en el agua, para lo cual se transfiere este elemento como gas o a partir del aire al agua mediante diversos métodos como la dispersión de burbujas en el líquido generadas con equipos sumergidos como placas perforadas, toberas, tubos, etc.; la aplicación de turbinas con inyección de aire; aireadores de distintos tipos, entre otros⁽²⁸⁾.

II.3.2.3 ADSORCIÓN

Es el proceso mediante el cual se eliminan sustancias solubles presentes en el agua residual al quedar estas retenidas en otra fase conveniente mediante enlaces físicos y químicos. La interfase puede ser entre el líquido y un gas, un sólido u otro líquido. Los procesos de adsorción aplicados al tratamiento de aguas residuales se presentan más comúnmente en la flotación donde se involucra una interfase gas-líquido y en el tratamiento

con carbón activado que se realiza empleando una interfase sólido-líquido, mediante el cual se elimina materia orgánica disuelta⁽²⁸⁾.

La adsorción es un proceso en el que se ven involucrados un gran número de factores de los que depende su eficiencia como: composición del agua residual, temperatura, área de contacto interfacial disponible, costo del adsorbente, entre otros; por lo que los requerimientos del proceso y el equipo necesario deben definirse para cada caso en particular⁽²⁶⁾.

II.3.2.4 DESINFECCIÓN

Es el proceso de destrucción selectiva de organismos patógenos aplicando además de agentes químicos, agentes físicos como la luz y el calor, medios mecánicos como tamices y desarenadores y hasta radiación. Los primeros métodos presentan una amplia ventaja sobre el resto de las opciones tanto en el aspecto económico, como en la eficiencia que se logra con su empleo.

Para la desinfección son usados varios agentes químicos como: cloro y sus compuestos, bromo, yodo, ozono, fenol, compuestos fenólicos, alcoholes, metales pesados, colorantes, jabones y detergentes sintéticos, agua oxigenada, compuestos amoniacales cuaternarios y diversos álcalis y ácidos. Para definir que tan bueno es un agente químico en la desinfección del agua residual son tomados en cuenta diversos aspectos, de estos los más importantes son: su toxicidad para los microorganismos en cierto rango de temperaturas, su solubilidad, estabilidad, toxicidad para formas más elevadas de vida, homogeneidad, interacción con materias extrañas, penetración, corrosividad, poder colorante, capacidad deodorizante y disponibilidad⁽²⁸⁾.

Con base en las características antes mencionadas, se ha difundido en mayor grado el uso de cloro, ozono y agua alcalina o muy ácida como desinfectantes en el tratamiento de

aguas residuales. Todos estos agentes tienen su efecto mediante mecanismos de daños a la pared celular, alteración de la permeabilidad de las células, alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma o inhibición de la actividad enzimática⁽²⁸⁾.

II.3.3 PROCESOS BIOLÓGICOS

Adicional a los procesos químicos y operaciones físicas antes descritas, en algunos tratamientos son empleados también los procesos biológicos cuyos objetivos son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. Mediante estos procesos se pretende reducir o eliminar los nutrientes tales como nitrógeno y fósforo, que promueven el crecimiento de plantas acuáticas y eliminar o reducir la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos tóxicos a los microorganismos⁽²⁶⁾.

Algunos de los principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento del agua residual son:

II.3.3.1 PROCESOS AERÓBIOS.- dentro de estos, algunos procesos son: lodos activados, lagunas aireadas, digestión aerobia, filtros percoladores, biodiscos, entre otros⁽²⁶⁾.

II.3.3.2 PROCESOS ANAEROBIOS.- como: digestión anaerobia, filtros anaerobios, lagunas anaerobias (estanques), estanques anaerobios-facultativos, entre otros⁽²⁶⁾.

II.3.3.3 PROCESOS ANÓXICOS.- dentro de este tipo de procesos, el más usado es la desnitrificación con cultivo en suspensión o fijo⁽²⁶⁾.

Todos los procesos y operaciones antes descritos son empleados en los sistemas de tratamiento de aguas residuales muchas veces en más de una ocasión, esto dependiendo del esquema de tratamiento diseñado para cada caso. Los sistemas de tratamiento son

estructurados de acuerdo a los niveles de contaminación que presenta el agua residual por tratar y a las características que se deseen obtener en el efluente, por lo que no es posible afirmar que haya un esquema universal que describa los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Teniendo en consideración el planteamiento anterior, se presenta en la Figura II.2 el esquema de un sistema de tratamiento que incluye la gran mayoría de las partes que hasta el momento constituyen las plantas de tratamiento de aguas residuales.

En el caso de la presente investigación, se tuvo relación directa con la planta de tratamiento de aguas residuales RECICLAGUA (del Sistema Ecológico de Regeneración de Aguas Residuales Industriales, S.A. de C.V.) localizada en el municipio de Lerma, Estado de México; de la cual se presenta un diagrama en la Figura II.3.

Esta planta tiene una capacidad de tratamiento de 34 mil 500 metros cúbicos diarios de aguas residuales y presta servicio a aproximadamente 132 usuarios, localizados en la zona industrial de Toluca y en el Parque industrial Lerma. Debido a la diversidad de industrias que descargas sus aguas para ser tratadas en esta planta, las características del afluente presentan grandes variaciones, lo que origina muchas veces problemas al tren de tratamiento debido a la presencia de diferentes contaminantes⁽¹⁶⁾.

Como puede observarse en la Figura II.2, del proceso de tratamiento de aguas residuales se obtienen dos productos; el primero es el efluente de agua tratada que puede ser devuelta a algún cuerpo de agua o puede utilizarse nuevamente en algún proceso dependiendo de las condiciones y objetivos de cada sistema; el segundo producto que se obtiene está constituido por los lodos residuales que representan todo el material sólido extraído del agua en las distintas etapas del tratamiento y una cantidad considerable de agua que es “arrastrada” junto con los sólidos.

Este segundo producto debe atravesar por un sistema de tratamiento adicional, con el fin de reducir al mínimo sus características de putrescibilidad y el volumen que representan para facilitar su manejo⁽⁹⁾. Dado que los lodos residuales representan un grave problema para las plantas de tratamiento, una descripción más amplia de este producto, de la problemática que implica y de los sistemas que se han desarrollado para su tratamiento se presenta en el capítulo III.

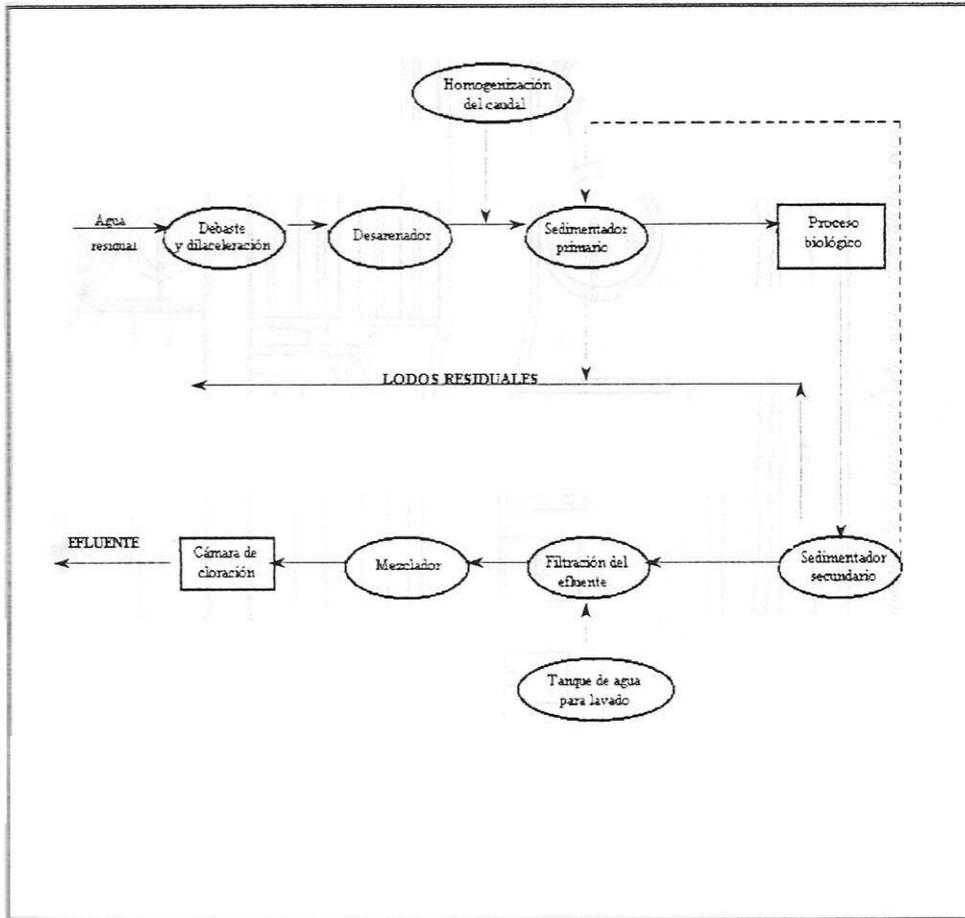


Figura II.2. Esquema de un sistema de tratamiento de aguas residuales (Metcalf, 1994)

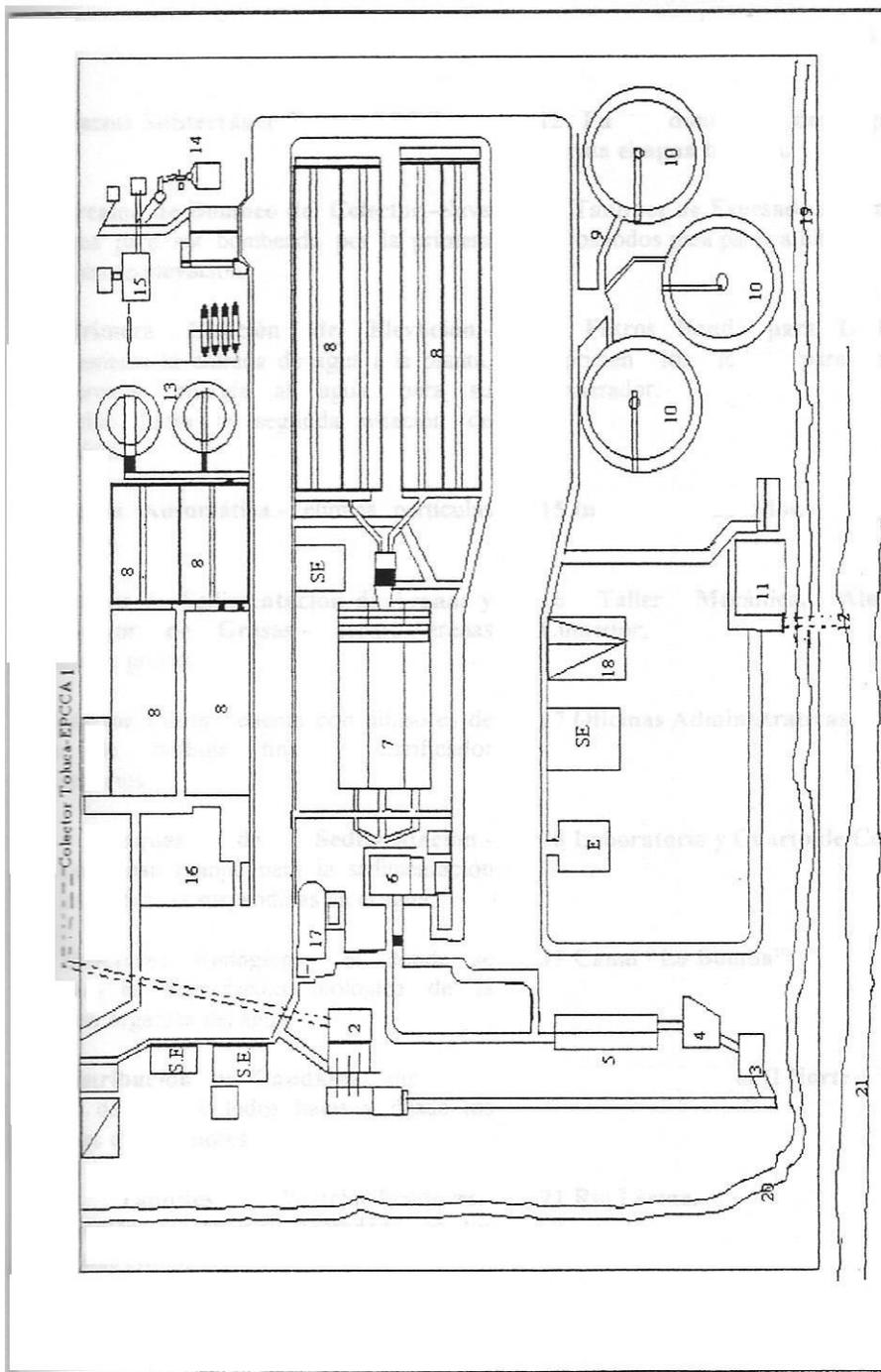


Figura II.3. Diagrama de la planta de tratamiento de aguas residuales RECTA-AGUA

DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA RECICLAGUA SEGÚN LA FIGURA II.3.

- **Colector Subterráneo Toluca-EPCCA** **12 Punto donde se descarga al río Lerma el agua tratada.**

- **Cárcamo de Bombeo del Colector.-** eleva agua para ser bombeada por la primera estación de elevación. **13 Tanques de Espesado** se elimina agua de los lodos para pasar a filtros.

- **Primera Estación de Elevación.-** propiamente la entrada de agua a la planta, proporciona energía al agua, para su recorrido hasta la segunda estación de elevación. **14 Filtros Banda para Lodos.-** se exprimen los lodos para enviar al incinerador.

- **Rejilla Automática.-** elimina partículas dispersas. **15 Incinerador de lodos.**

- **Tanque de Sedimentación de Arenas y Separador de Grasas.-** separa arenas gruesas y grasas. **16 Taller Mecánico, Almacén y Comedor.**

- **Reactor Piloto.-** cuenta con difusores de aire de burbuja fina y clarificador secundarios. **17 Oficinas Administrativas.**

- **Tanques de Sedimentación.-** proporcionan tiempo para la sedimentación de las partículas suspendidas en el agua. **18 Laboratorio y Cuarto de Control.**

- **Reactores Biológicos.-** es donde se efectúa la degradación biológica de la materia orgánica del agua. **19 Canal "La Bomba"**

- **Distribución de Caudales.-** dirige los flujos de agua y lodos hacia y desde los tanques clarificadores. **20 Canal Industrial II Norte**

- **Tanques Postclarificadores.-** sedimentan el material degradado en los reactores biológicos. **21 Río Lerma.**

- **Cámara de Cloro.-** sirve para desinfectar el agua enviada al río.

CAPÍTULO III

LODOS RESIDUALES

INTRODUCCIÓN

De las plantas de tratamiento de aguas residuales se obtienen dos productos: el efluente de agua tratada y los lodos producto de la separación de los contaminantes que esta presenta, la cual se realiza en las distintas etapas del sistema. Este segundo producto es tratado en el presente capítulo.

Los lodos residuales, deben considerarse con suma atención desde las etapas de diseño de las plantas, pues está demostrado que dado que representan entre un 5 y un 15%⁽⁶⁾ del volumen total del agua tratada, su manejo corresponde a entre el 30 y 40% del costo de capital en las plantas y a cerca del 50% de los costos de operación, además de que alrededor del 90% de los problemas de los sistemas de tratamiento de aguas residuales son generados por estos⁽³¹⁾.

Los volúmenes de lodos residuales producidos son cada vez mayores, debido al aumento en la producción de agua residuales y a las mayores exigencias de la legislación ambiental. Al aumentar las cantidades de lodos producidos, aumentan también los problemas producidos por estos.

Los problemas que los lodos generan son causados principalmente por los siguientes factores: su composición, pues se forman principalmente por las sustancias responsables del carácter desagradable del agua residual y el alto contenido de materia orgánica que puede presentar, la cual al descomponerse se vuelve igualmente desagradable; la variabilidad de su composición, pues esta cambia de planta a planta dependiendo del tipo de aguas residuales que sean tratadas, así como dentro de la misma planta al cambiar el tiempo; el gran volumen que se produce de éstos y su consistencia acuosa que afecta en gran medida su manejo y transportación⁽³³⁾.

Como ejemplo de los grandes volúmenes de lodos producidos se tiene la siguiente información: en el tratamiento de aguas residuales municipales se producen de 2,500 a 5,000 galones de lodos por millón de galones de agua residual tratada; si el tratamiento abarca también a los denominados lodos activados, esta cantidad aumenta a 15,000 ó hasta 20,000 galones y si además se emplean sustancias químicas para remover fósforo se pueden adicionar hasta 10,000 galones más por millón de galones de agua residual, llegando esto a representar aproximadamente un 3.3% del caudal de entrada⁽²⁶⁾.

III.2 CLASIFICACIÓN

Al generarse los lodos residuales en las distintas etapas de tratamiento del agua, estos adquieren diversas características, según el proceso u operación que los genere, por lo que se han clasificado en los siguiente tipos⁽²⁶⁾:

- ☞ Residuos del desbaste.- incluye todo tipo de materiales orgánicos e inorgánicos de tamaño suficientemente grande para ser eliminados por rejillas de barras. El contenido de materia orgánica varía dependiendo de la naturaleza del sistema y la estación del año.
- ☞ Arenas.- se forman generalmente por los sólidos inorgánicos más pesados que sedimentan a velocidades relativamente altas, aunque también puede contener material orgánico, específicamente grasas.
- ☞ Espumas.- incluye grasas, aceites minerales y vegetales, grasas animales, ceras, jabones, residuos alimenticios, cabellos, papel, algodón y materiales similares que flotan y son recogidos en los tanques de sedimentación.
- ☞ Lodos primarios.- son producidos en la etapa de sedimentación del tratamiento primario; son generalmente grises y producen un olor extremadamente molesto, pueden digerirse fácilmente si se adaptan las condiciones adecuadas de funcionamiento.

- ☞ Lodos de precipitación química.- provienen de los tanques de precipitación química, son por lo general de color oscuro, su olor puede ser ligeramente molesto, presentan una consistencia gelatinosa y producen grandes cantidades de gas al darse su descomposición.
- ☞ Lodos activados.- tienen generalmente una apariencia floculenta de color marrón. Contienen partículas muy finas y gran cantidad de materia orgánica, su densidad es cercana a la del agua y son sumamente difíciles de deshidratar. Se digieren fácilmente solos o mezclados con los lodos primarios.
- ☞ Lodos digeridos (aerobios).- son de color marrón oscuro y tienen apariencia floculenta, su olor no es molesto y se deshidratan fácilmente; los sólidos secos resultantes son inodoros.
- ☞ Lodos digeridos (anaeróbios).- son de color marrón oscuro-negro y contienen una cantidad excepcionalmente grande de gas. Cuando están totalmente digeridos su olor es relativamente ligero, parecido al del alquitrán caliente, goma quemada o lacre.
- ☞ Residuos de fosas sépticas.- son negros, a menos que estén bien digeridos como consecuencia de un largo tiempo de almacenamiento, son molestos a causa del sulfuro de hidrógeno y otros gases que desprenden.

III.3 EL AGUA PRESENTE EN LOS LODOS RESIDUALES

Como se mencionó anteriormente, uno de los principales problemas que se generan a causa de los lodos residuales son los altos costos que representa su manejo y almacenamiento, debido a los grandes volúmenes en que son producidos. Esto se debe principalmente a que sin importar el tipo de lodos que se trate, todos presentan un alto

contenido de agua, por ejemplo, un lodo activado tiene por lo general entre 0.75 y 5% de sólidos, lo que indica que más del 95% de estos es agua⁽³⁴⁾.

De aquí que los procesos que permiten la reducción del volumen de los lodos residuales mediante la eliminación del agua, deban ser considerados como una parte de gran importancia dentro de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que al reducir su volumen se facilita enormemente su manejo y almacenamiento, lo cual disminuye los costos de transportación y tratamiento en procesos posteriores.

La reducción de volumen como consecuencia de una eliminación de agua puede entenderse con el siguiente ejemplo: si un lodo es deshidratado de una concentración de 2% de sólidos a un 20%, el volumen es reducido en un 90%. Estas reducciones de volumen mediante la eliminación de humedad pueden entenderse de mejor manera en la Figura III. 1.

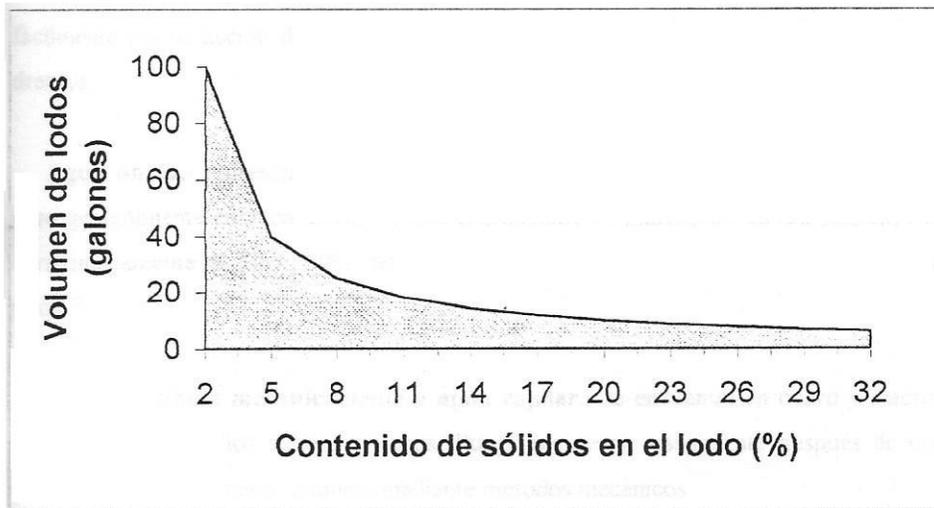


Figura III.1. Decremento del volumen de lodos al incrementar el contenido de sólidos. (Outwater, 1994)

III.3.1 CLASIFICACIÓN DEL AGUA PRESENTE EN LOS LODOS RESIDUALES.

Como se mencionó anteriormente, dentro de los procesos más importantes en el tratamiento de los lodos residuales se encuentran aquellos que permiten una reducción del volumen de los mismos mediante la eliminación del agua que contienen, pero es conveniente saber que no toda el agua contenida puede ser eliminada de la misma forma, pues está unida a la materia sólida presente en los lodos de distintas maneras⁽³⁾.

El agua que se encuentra unida a la materia sólida en los lodos provenientes de las aguas residuales ha sido clasificada de distintas maneras de acuerdo a la energía que requiere para ser removida, pero la clasificación más usada es la que divide el agua en las siguientes categorías⁽⁶⁾:

- ☞ **Agua libre.-** representa la mayor parte del lodo (entre 80 y 90% del agua total)⁽⁶⁾. Termodinámicamente se comporta como agua pura. Es el agua que puede removerse fácilmente por la acción de la fuerza de gravedad cuando existen condiciones para el drenaje.
- ☞ **Agua unida.-** representa una pequeña porción del agua total contenida en el lodo, pero generalmente en masa es mayor que el contenido de materia sólida (corresponde a aproximadamente el 10 o 20% del agua total)⁽⁶⁾. Dentro de esta se distinguen tres tipos⁽⁶⁾:
 - **Agua unida mecánicamente o agua capilar.-** se encuentra en micro y macro capilares de los sólidos porosos. Puede removerse usualmente después de un acondicionamiento químico mediante métodos mecánicos.
 - **Agua unida físicamente o agua coloidal.-** se puede eliminar mediante secado térmico o mediante métodos mecánicos como centrifugación, filtros prensa o al

vacío, entre otros después de un acondicionamiento químico y está unida a las partículas por adsorción o absorción.

- **Agua unida químicamente.**- está unida a los sólidos mediante puentes fuertes y puede eliminarse únicamente mediante la ruptura de la estructura celular con tratamiento térmico con temperaturas superiores a los 105°C.

Cabe mencionar que el agua unida es mucho mayor para aquellos lodos con mayor contenido de materia orgánica que para los lodos inorgánicos, esto se debe a la existencia de polímeros aniónicos en la superficie de los lodos biológicos. Estos biopolímeros conocidos también como material extracelular presentan una gran afinidad hacia el agua lo que hace más notable el problema de la deshidratación. La Figura III.2 muestra la distribución del agua en una partícula de lodo.

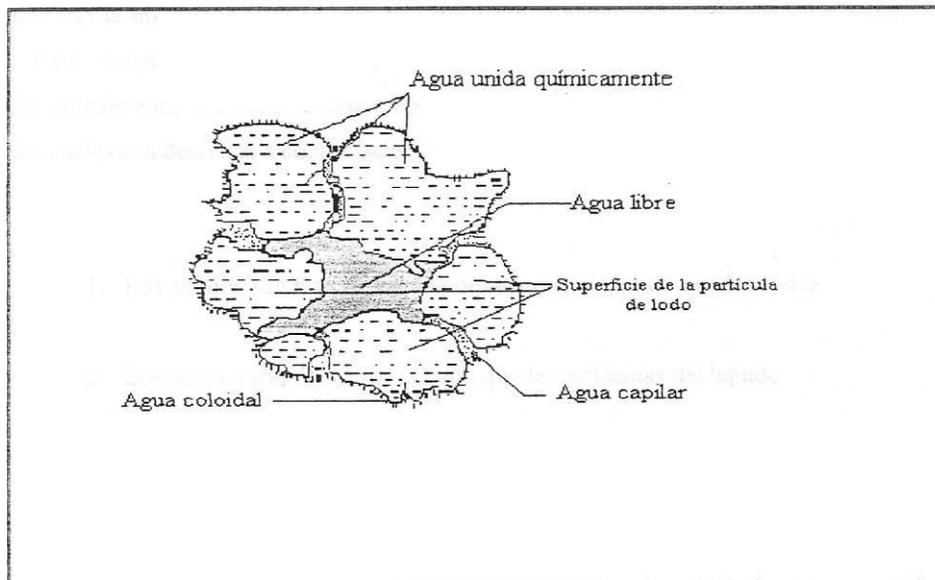


Figura III.2. Distribución del agua en una partícula de lodo. (Outwater, 1994)

III.4 TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES

Con objeto de tener un mejor control de los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales se han desarrollado sistemas de tratamiento para los mismos, los cuales se estructuran de acuerdo a las propiedades que presente cada lodo y a las características que se deban cumplir de acuerdo al método de disposición final que se haya planeado emplear, además de considerar otros parámetros como: flexibilidad (para no sufrir graves alteraciones al variar el caudal), confiabilidad, restricciones ambientales, eficiencia, tecnología a la que se tenga acceso, requerimientos económicos y energéticos, relación costo-beneficio, efectos sobre la salud pública y seguridad⁽³⁴⁾.

Los procesos aplicados al tratamiento de lodos residuales tienen por objeto tanto la eliminación de las características indeseables de los lodos (como los malos olores y su tendencia a la descomposición), mediante la eliminación de la materia orgánica contenida en estos, así como la disminución de su volumen mediante la eliminación del agua que llevan consigo. Para cumplir este segundo objetivo cabe hacer mención que las técnicas de separación actualmente disponibles usan uno o una combinación de solo tres principios básicos los cuales son descritos a continuación⁽³⁾:

1. Los sólidos son más (o menos) densos que el líquido que los rodea.
2. Los sólidos son de mayor tamaño que las moléculas del líquido.
3. Los sólidos no se volatilizarán cuando el líquido sea evaporado.

En la figura III.3 se muestran estos tres principios básicos.

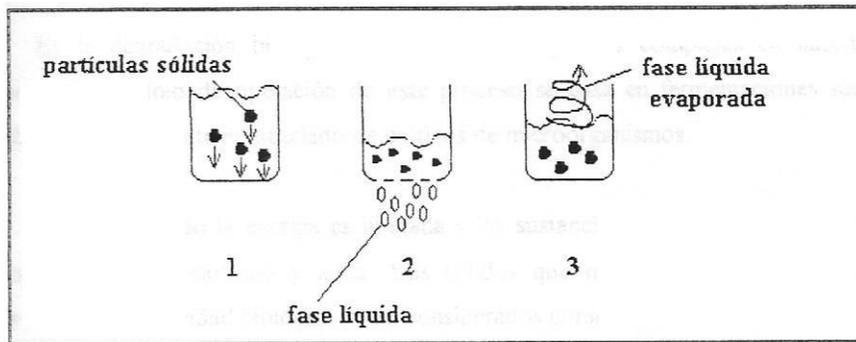


Figura III.3. Principios básicos empleados en las separaciones sólido-líquido. (Cheremisinoff, 1994)

Los procesos de tratamiento de lodos residuales se componen generalmente de las siguientes etapas: estabilización, espesamiento, deshidratación y disposición, en algunos casos se emplea también el acondicionamiento químico. A continuación se hará una breve descripción de estas etapas⁽¹⁰⁾.

III.4.1 ESTABILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES

Está diseñada para reducir los molestos olores de los lodos, reducir su contenido de organismos patógenos y para reducir el volumen de los lodos que requieran un tratamiento adicional. La estabilización se puede realizar mediante dos procesos: la digestión aerobia y la digestión anaerobia⁽³⁴⁾.

III.4.1.1 DIGESTIÓN ANAERÓBIA

Es la degradación biológica de sustancias orgánicas complejas en ausencia de oxígeno. El principio de operación de este proceso se basa en fermentaciones sucesivas llevadas a cabo mediante el mezclado de cultivos de microorganismos.

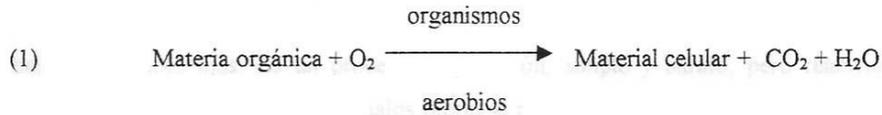
En este proceso la energía es liberada y las sustancias orgánicas son convertidas a metano, dióxido de carbono y agua. Los sólidos que no son eliminados permanecen relativamente sin actividad biológica y son considerados como estables⁽³⁴⁾.

El metano obtenido de los digestores puede ser empleado para calentar y mezclar el lodo en el proceso de digestión, mientras que el excedente de gas producido puede emplearse para calentar instalaciones o para hacer trabajar algunos motores⁽¹¹⁾.

El proceso de digestión reduce el total de sólidos que necesitarán algún método de disposición o de tratamiento posterior al convertir la materia orgánica en alguno de los productos ya mencionados. Generalmente entre un 25 y un 54% de la corriente original de sólidos son destruidos durante la digestión anaeróbica⁽³⁴⁾. Esta reducción resulta sumamente benéfica al disminuir los costos de manejo y disposición de los lodos después de la digestión.

III.4.1.2 DIGESTIÓN AERÓBIA

Es la estabilización bioquímica oxidativa de los lodos residuales realizada en tanques, ya sea abiertos o cerrados, los cuales están separados del resto del sistema de procesamiento del líquido. La reacción básica que ocurre en la estabilización aeróbica de los lodos es⁽³⁸⁾:



Es importante mencionar que en varios procesos de tratamiento de lodos residuales que existen actualmente no se tiene contemplado el proceso de estabilización, solo en aquellos que lo requieren de manera rigurosa dadas las características que presenta la corriente de entrada de lodos, aunque la recomendación es que debiera ser instalado en todos los sistemas de tratamiento, con el fin de evitar problemas que pudieran presentarse en los procesos de tratamiento subsecuentes⁽³⁸⁾.

III.4.2 ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES

Es un proceso intermedio empleado en los casos en que se requiere incrementar la concentración de sólidos con el fin de aumentar la eficiencia de tratamientos posteriores. Es económicamente atractivo, pues logra una reducción de volumen considerable con solo un modesto incremento en la concentración de sólidos. Esta reducción puede significar ahorros en el costo de la deshidratación, digestión y otras operaciones posteriores⁽³⁴⁾. Su colocación es importante y dependerá de los procesos que se planeen realizar posteriormente. A continuación se presentarán los tres métodos de espesamiento más usados.

III.4.2.1 ESPESAMIENTO POR GRAVEDAD

El principio en el que se basa es que la mayoría de los lodos residuales contienen partículas sólidas que son más densas que el líquido que las rodea, las cuales se asentarán

bajo condiciones fijas. Es un proceso muy común, simple y barato, pero relativamente lento. Puede causar problemas de malos olores al retenerse los lodos por periodos largos de tiempo o si el flujo es muy lento⁽²⁴⁾.

Generalmente se realiza en tanques de espesamiento, los cuales se dividen en cuatro zonas:

1. Una zona de clarificación, en la parte superior, la cual contendrá un líquido sobrenadante relativamente claro.
2. Una zona de asentamiento, caracterizada por una velocidad constante de asentamiento de sólidos.
3. Una zona de compresión, caracterizada por una velocidad decreciente de asentamiento de sólidos.
4. Una zona de compactación donde la velocidad de asentamiento es muy baja, casi nula.

El grado de espesamiento de los lodos que se puede lograr depende de muchos factores, dentro de los que resaltan: el tipo de lodo manejado y la concentración de sólidos volátiles que presente.

Algunas de las ventajas del proceso de espesamiento por gravedad son: permite una mayor capacidad de almacenamiento de lodos, no requiere que el personal de operación tenga grandes habilidades, representa bajos costos de operación y mantenimiento. Dentro de las desventajas de este proceso se encuentran: que requiere grandes áreas para su operación, produce malos olores debido al tiempo que permanecen los lodos en el espesador, además de que la separación sólido-líquido que se alcanza es irregular⁽³⁸⁾.

III.4.2.2 ESPESAMIENTO POR FLOTACIÓN

Los lodos residuales algunas veces tienden a ser muy ligeros, por lo que se asientan muy poco por efecto de la fuerza de gravedad. Por ejemplo, los flóculos de los lodos activados tienen densidades menores a 1.08 (mientras que la densidad del agua es = 1.0). De acuerdo a esto, es algunas veces más fácil lograr la separación de los sólidos del líquido promoviendo su flotación⁽³⁾.

Para lograr el espesamiento de los lodos mediante la flotación se disuelve aire bajo presión y se mezcla con el lodo, de esta manera las burbujas de aire se unen a las partículas sólidas, lo que favorece su ascenso a la superficie donde serán removidas. En algunos casos, los lodos contienen partículas extremadamente pequeñas que aunque son ligeras, requieren largos tiempos para ascender y son difícilmente removidas; para estos casos se aplica un acondicionamiento químico de los lodos con el fin de promover la aglomeración de estas partículas y facilitar así su eliminación⁽²⁷⁾.

El espesamiento por flotación se emplea comúnmente para tratar desechos provenientes de refineries, plantas automotrices y terminales férreas, los cuales presentan altos contenidos de aceites. Mediante este proceso los lodos activados pueden llevarse a una concentración de entre 3 y 5% de sólidos sin empleo de acondicionamiento químico y de entre 4 y 6% con el uso de este⁽³⁸⁾.

III.4.2.2 ESPESAMIENTO POR CENTRIFUGACIÓN

Este proceso se basa en la diferencia de densidades, es semejante al espesamiento por gravedad, pero en este caso se multiplica la fuerza de gravedad miles de veces. Su uso no está muy difundido dados los altos costos que implica, se emplea principalmente cuando se presentan problemas por falta de espacio o cuando otros métodos no son muy adecuados por ejemplo por el elevado nivel de malos olores generados por los lodos⁽³⁸⁾.

Al aplicarse el espesamiento por centrifugación se llegan a alcanzar concentraciones de sólidos de un 5 hasta un 8%⁽³⁸⁾.

III.4.3 DESHIDRATACIÓN DE LODOS RESIDUALES

Se define como el proceso mediante el que se promueve la separación de la fase líquida del lodo residual mediante distintos métodos, de tal manera que le permita comportarse como un sólido; se distingue del espesamiento en que la deshidratación logra la remoción de agua en cantidades mayores que este⁽²⁸⁾.

Es la última operación de separación sólido-líquido a la que se somete una corriente antes de disponer por separado la fase sólida y la fase líquida. Es de suma importancia, pues el destino final de los lodos a menudo depende de que se haya removido una cantidad suficiente de agua tal que permita que estos sean manejados como sólidos⁽³⁴⁾. Para la deshidratación se cuenta con diversas opciones, algunas de estas son presentadas a continuación.

III.4.3.1 CAMAS DE ARENA O DE SECADO

Consisten en represas poco profundas con bases de arena y desagües a las que se bombean los lodos y se dejan ahí por periodos que van desde algunas semanas, hasta varios meses, dependiendo de diversas condiciones. Permiten la deshidratación mediante el drenado del agua a través de la arena así como por evaporación de la misma⁽³⁴⁾.

Son útiles para plantas pequeñas, no consumen grandes cantidades de energía ni sustancias químicas, no se ven afectadas por variaciones en las características de los lodos residuales y no requieren personal con habilidades especiales para operarlas. Algunas de sus desventajas son: la producción de olores que difícilmente se controlan, la posible contaminación de cuerpos de agua cercanos y la generación de fauna nociva, entre otros⁽³⁸⁾.

Las camas de arena o de secado son en la actualidad uno de los métodos de deshidratación más usados en las plantas de tratamiento. Además de ser empleadas en plantas pequeñas, son usadas también en varias instalaciones grandes localizadas en zonas donde los terrenos tiene bajos costos y las condiciones climáticas son favorables⁽²⁷⁾.

Para determinar la aplicabilidad de estos sistemas deberán considerarse principalmente los factores climáticos (como niveles de precipitación, número de días soleados, humedad relativa y velocidad del viento) y los requisitos de espacio de acuerdo a los volúmenes de lodo producido⁽³⁾.

Actualmente además de las camas de arena, se cuenta con equipos que trabajan bajo el mismo principio, los cuales están contruidos de “enrejados” de acero y/o poliuretano que presentan mayores ventajas, pues el secado de lodos es más rápido y se requieren áreas hasta 16 veces menores que para las camas de arena. Mediante la deshidratación empleando la fuerza de gravedad, el contenido de agua puede reducirse entre un 25 y un 90% dependiendo del contenido inicial que presenten los lodos⁽³⁸⁾.

III.4.3.2 FILTRACIÓN AL VACÍO

Es un proceso mediante el cual se separan los sólidos del líquido, haciendo pasar al líquido a través de un medio poroso en el que los sólidos quedan atrapados formando una torta. En estos equipos se aplica vacío con el objeto de favorecer la formación de la torta de sólidos y promover una deshidratación más rápida de la misma⁽³⁴⁾.

La velocidad de deshidratación en este proceso es afectada por muchos factores como: el grosor de la torta formada, la viscosidad del lodo, la resistencia específica de la torta, la concentración de sólidos, la temperatura del lodo, su composición química y la naturaleza de los sólidos del lodo, incluyendo el contenido de sólidos volátiles, tamaño, forma, carga eléctrica de las partículas, entre otros⁽³⁴⁾.

El equipo de filtración al vacío consiste básicamente de un tambor cilíndrico que gira parcialmente sumergido en un tanque que contiene el lodo. El tambor se cubre con un material permeable y se genera vacío dentro del tambor, de esta manera el agua es succionada a través del medio filtrante, mientras que los sólidos quedan atrapados en la superficie del tambor formando la torta que después es removida de esta mediante un raspado. La secuencia de operación de estos equipos es la siguiente: formación de la torta, extracción del líquido, remoción de la torta y limpieza del medio filtrante⁽³⁸⁾.

Actualmente estos equipos no son muy usados ya que dada la composición de los lodos, estos suelen ser muy compresibles, lo que dificulta su deshidratación, además, los equipos presentan la gran desventaja de tener que ser parados con relativa frecuencia a fin de poder ser limpiados y mantener de esta manera cierto nivel de filtración⁽³⁴⁾.

Cabe hacer mención que el proceso de filtración al vacío no presenta un buen funcionamiento para los lodos cuyas partículas sólidas son ligeras, como los lodos activados, aún después de que estos hayan sido acondicionados⁽²⁶⁾.

III.4.3.3 FILTRACIÓN CON PRESIÓN O PRENSADO

Se diferencia de la filtración al vacío en que en este caso el líquido es forzado a través del medio filtrante usando una presión positiva en lugar de vacío. El equipo consta de bandas, hechas de un material permeable, a través de las cuales se hace pasar el lodo; estas bandas ejercen presión y permiten la separación sólido-líquido⁽³⁴⁾.

El proceso consta en sí de tres etapas: el acondicionamiento, el drenado por gravedad y el deslizamiento-compresión. El acondicionamiento del lodo es el primer paso y puede hacerse en un tanque separado equipado con equipo de mezclado o con tuberías con secciones especiales. El lodo floculado se bombea a la banda porosa donde el agua "libre" creada durante el acondicionamiento se drena por gravedad y queda solo la masa de los

sólidos del lodo floculado que sigue siendo agitada para remover la mayor cantidad de agua que sea posible. Posteriormente los lodos son comprimidos entre dos bandas haciendo uso de rodillos giratorios que incrementan la presión a lo largo del proceso. Al final de las bandas la torta de lodos deshidratados es removida de la superficie de las bandas y se deposita en un contenedor u otro equipo para el espesamiento posterior o disposición final⁽³⁴⁾.

Una desventaja notable que presenta este proceso es que su eficiencia decrece gradualmente, pues las bandas se van saturando de sólidos hasta llegar a un punto en el que su acumulación de sólidos no permite el flujo de agua a través de las mismas⁽³⁸⁾.

III.4.3.4 CENTRIFUGACIÓN

Este proceso, descrito anteriormente, es empleado también en la etapa correspondiente a la deshidratación; según el tipo de lodos que se trate la concentración de sólidos en la torta obtenida variará del 10 al 40%; aunque las reducciones por debajo del 25% no son, por lo general, económicamente factibles⁽³⁴⁾.

Algunas de las características más notables que diferencian a este proceso de la deshidratación con filtros prensa son: que las centrifugas no requieren lavados continuos a diferencia de los filtros prensa, por lo que se ahorra agua de lavado; las centrifugas sufren mayor desgaste por la presencia de arenas en los lodos que los filtros prensa; generan gran vibración que afecta a las instalaciones y en ocasiones se generan gran cantidad de olores desagradables⁽¹⁰⁾.

III.4.3.5 DESHIDRATACIÓN POR CONGELAMIENTO

Permite cambiar la estructura de la mezcla, pues la materia sólida tiende a agruparse en grandes conglomerados rodeados de agua congelada, cuando inicia la fusión el agua se

drena rápidamente a través de los poros grandes y los canales creados por el agua congelada, con este método se pueden alcanzar concentraciones de entre 21 y 70% de sólidos dependiendo del tiempo y de las temperaturas empleadas⁽³⁴⁾.

Este proceso es aplicable en zonas cuyo clima por largos periodos de tiempo es muy frío o bien puede realizarse empleando equipo de refrigeración, aunque esto eleva notablemente los costos implicados en la deshidratación de los lodos residuales⁽²⁴⁾.

III.4.3.5 DESHIDRATACIÓN CON EMPLEO DE VEGETACIÓN

Los sistemas de plantas acuáticas son considerados tecnologías innovadoras de efectividad demostrada. Estos sistemas mejoran las camas de arena al plantarse sobre estas carrizos, los cuales tienen la función primaria de crear una microflora en las raíces, la cual se alimentará de la materia orgánica de los lodos. Los carrizos han demostrado ser resistentes a los contaminantes presentes en el lodo⁽³⁴⁾.

Sus raíces proveerán canales a través de los cuales el agua podrá ser drenada, además de que el agua del lodo es también absorbida y transpirada por las plantas. Después de un largo periodo de tiempo el lodo es reducido a un 97% de sólidos y sus concentraciones de contaminantes estarán dentro de los límites permisibles⁽³⁴⁾.

III.4.4 MÉTODOS DE DISPOSICIÓN FINAL

Existen diversas opciones para disponer finalmente de los lodos residuales. Para elegir el mejor método aplicable a cada caso se deben tomar en cuenta dos factores fundamentales que son: los costos implicados (considerando dentro de estos también los generados del transporte que puede hacerse por tuberías, camión, barcasas o ferrocarril) y el impacto ambiental⁽⁴¹⁾. Algunas opciones de disposición son:

III.4.4.1 APLICACIÓN AL TERRENO

El lodo deshidratado puede evacuarse extendiéndolo sobre tierras de cultivo seguido de la rotura del terreno una vez que haya secado. El lodo deshidratado húmedo puede aplicarse directamente al suelo por inyección. El humus del lodo acondiciona el suelo y mejora su capacidad de retención de humedad. Actualmente se están desarrollando aún muchas investigaciones respecto a este sistema de disposición⁽²⁶⁾.

III.4.4.2 LAGUNAJE

Es un método de eliminación muy extendido dado que es simple y económico si la planta se localiza en un lugar alejado. Una laguna es un estanque de tierra en el que se deposita el lodo ya sea crudo o digerido. Las lagunas de lodos crudos estabilizan los sólidos orgánicos por descomposición aerobia y anaeróbica, lo que puede originar olores desagradables. Los sólidos estabilizados se sedimentan en el fondo de la laguna donde se acumulan; el líquido sobrante, si es que hubiera, puede devolverse a la planta para su tratamiento. Las lagunas deben estar situadas lejos de las carreteras y viviendas para minimizar en lo posible las molestias que pudieran originarse y se deberá limitar el acceso solo permitiendo el paso al personal autorizado⁽²⁶⁾.

III.4.4.3 DISPOSICIÓN COMO RELLENO

El relleno, por ejemplo de una mina abandonada, constituye un método de evacuación adecuado sólo para lodos y sólidos que hayan sido estabilizados de modo tal que no se produzcan condiciones de descomposición u otras molestias. El lodo digerido, la arena limpia y los residuos de incineración pueden evacuarse mediante este método en condiciones de seguridad⁽⁹⁾.

III.4.4.4 VERTEDERO CONTROLADO

Si existe un lugar adecuado, puede emplearse un vertedero controlado para eliminar los lodos, grasas y arenas ya sea que estén estabilizados o no. En la selección de la zona de ubicación del vertedero deben considerarse las molestias y los riesgos para la salud que pudieran causarse⁽⁹⁾.

III.5 ACONDICIONAMIENTO DE LODOS RESIDUALES

En cada uno de los procesos descritos relativos al tratamiento de los lodos residuales se logran ciertos niveles de eliminación de agua, los cuales en muchas ocasiones no son satisfactorios, por lo que se han desarrollado métodos de acondicionamiento de los mismos cuyo objetivo es facilitar la separación de los sólidos del lodo del agua; en este paso una sustancia química orgánica o inorgánica se adiciona al lodo líquido para que los sólidos se agrupen o flocculen⁽³⁵⁾.

Los floculantes inorgánicos comúnmente usados son la cal y el cloruro férrico los cuales son empleados en grandes cantidades por lo que aumentan en gran medida la cantidad de torta de lodos de la que deberá disponerse posteriormente, a veces hasta en un 50%⁽³¹⁾. Los floculantes orgánicos como los polímeros son efectivos en cantidades mucho menores, por lo que no incrementan significativamente la cantidad final de sólidos obtenidos del tratamiento de lodos⁽³⁵⁾.

El proceso por el que actúan estos agentes es similar al descrito como precipitación química en el capítulo II, dado que este es sumamente importante para la presente investigación, será tratado con mayor detalle en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO IV

POLIELECTROLITOS COMO AGENTES ACONDICIONANTES DE LODOS RESIDUALES

IV.1 ACONDICIONAMIENTO DE LODOS RESIDUALES

La cantidad de lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales se incrementa continuamente al variar los volúmenes de aguas residuales a tratar y al volverse más estrictas las leyes ambientales, por lo que la deshidratación de éstos mediante medios mecánicos se hace necesaria, aunque no siempre es suficiente.

Además de la deshidratación se ha vuelto también importante el poder contar adicionalmente en la planta, con procesos de acondicionamiento físico-químico que mejoren las características de deshidratación de los lodos transformando una parte del agua mecánicamente unida en agua unida físicamente además de que hace posible la eliminación de una gran cantidad de partículas pequeñas que generalmente se encuentran presentes y cuya sedimentación es sumamente lenta como se puede observar en el cuadro IV.1.

Cuadro IV.1. *Efecto del tamaño de partículas en la sedimentación (Samuel, 1998).*

| Diámetro de partícula (mm) | Orden de tamaño | Área Superficial total ^a | Tiempo requerido para sedimentación ^b |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--|
| 10 | Grava | 0.487 in. ² | 0.3 s |
| 1 | Arena gruesa | 4.87 in. ² | 3s |
| 0.1 | Arena fina | 48.7 in. ² | 38s |
| 0.01 | Sedimentos | 3.38 ft ² | 33 min. |
| 0.001 | Bacterias | 33.8 ft ² | 55 hr. |
| 0.0001 | Partículas coloidales | 3.8 yd ² | 230 días |
| 0.00001 | Partículas coloidales | 0.7 ac | 6.3 años |
| 0.000001 | Partículas coloidales | 7.0 ac | 63 años (mínimo) |

^a Área para partículas del tamaño indicado producidas a partir de una partícula de 10 mm de diámetro con una gravedad específica de 2.65.

^b Cálculos basados en una esfera con gravedad específica de 2.65 para sedimentar 1 pie.

El acondicionamiento físico-químico de los lodos permite que las partículas suspendidas en el agua formen agregados de mayor tamaño y peso mediante el ajuste de las condiciones de la suspensión, de manera que se reduzca la carga de las partículas, se libere el agua retenida y se formen los flóculos, acelerando de esta manera su velocidad de sedimentación y facilitando la separación sólido-líquido⁽³⁵⁾.

Un gran problema al que se enfrentan los encargados de las plantas de tratamiento que realizan el acondicionamiento mediante la adición de productos químicos, es la elección de un agente acondicionante que resulte adecuado al tipo de lodos manejados, pues se cuenta con diversas opciones⁽³⁶⁾.

Cada tipo de acondicionante presenta diferentes características que los hacen adecuados a los diferentes tipos de lodos y producirán flóculos con distintas características, que deberán corresponder a las requeridas según el método de deshidratación que vaya a ser empleado después, algunas de estas necesidades se mencionan en el cuadro IV.2⁽³²⁾.

La elección del agente floculante adecuado debe considerar también los costos implicados en el uso de cada tipo de estos, pues ha sido demostrado que entre el 30 y el 50% del costo total del tratamiento de lodos corresponde al consumo del agente floculante⁽³²⁾.

Cuadro IV.2. *Características de flóculos para aplicaciones específicas (Moudgil, 1994).*

| Método de separación | Propiedades deseables del flóculo |
|-----------------------|--|
| Filtración | Flóculos porosos, fuertes, permeables |
| Sedimentación | Densos, fuertes, grandes, de forma regular |
| Centrifugación | Flóculos fuertes, densos, grandes |
| Flotación de flóculos | Baja densidad, fuertes, distribución de tamaño limitada. |

Dentro de las opciones que se tienen se encuentran los floculantes inorgánicos como: sulfato de aluminio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$, sulfato férrico $[\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3]$, cloruro férrico (FeCl_3) , entre otros. Respecto a estos acondicionantes se mencionó en el capítulo III que además de su efecto floculante son causantes, también, de incrementos considerables en la cantidad de material seco obtenido al final del tratamiento.

Otra opción de agentes acondicionantes con que se cuenta la representan los floculantes orgánicos, dentro de los que se encuentran los polielectrolitos. Estos son polímeros en los cuales las unidades monoméricas de las macromoléculas formadas poseen grupos que son ionizados al disolverse en agua.

IV.2 FLOCULACIÓN Y COAGULACIÓN

Antes de continuar con la descripción del efecto de los polielectrolitos en el acondicionamiento de lodos, cabe hacer mención de dos términos que se relacionan grandemente con este tema: coagulación y floculación.

No se ha establecido de manera generalizada alguna diferencia al emplear estos términos, algunos autores lo hacen en base a las concentraciones de polímero adicionado a la suspensión⁽³⁷⁾; una diferencia más notable la establecieron La Mer y Healy (1982) quienes los definen como:

- Coagulación.- del latín *coagulare* que significa poner juntas. Es el proceso cinético general por el que se unen las partículas; se realiza inicialmente por una reducción del potencial de repulsión de la doble capa eléctrica⁽¹⁶⁾; comprende el proceso de adición del polímero y la etapa de agitación rápida, donde se produce la desestabilización de las partículas dispersas.

☞ Floculación.- del latín *flocculus* que indica la formación de una estructura fibrosa no compacta. Se relaciona con materiales de alto peso molecular que actúan como polímeros inertes dispersos en una estructura tridimensional porosa⁽¹⁶⁾. Corresponde al proceso de agitación lenta, en el que se permite que las partículas colisionen, se unan y sedimenten.

IV.3 POLIELECTROLITOS.

Los polielectrolitos son compuestos orgánicos sintéticos solubles en agua, de alto peso molecular, formados por largas cadenas de monómeros que pueden ser lineales o ramificados. Estos se emplean comúnmente en la floculación de lodos residuales, ya que permiten alcanzar buenos niveles de floculación, sin incrementar de manera notable el volumen de materia sólida debido a su presencia, lo cual si ocurre cuando se emplean agentes floculantes inorgánicos.

Los polielectrolitos se denominan así por que los monómeros que los conforman contienen grupos ionizables como los grupos carboxil, amino o sulfónico. Al ser solubilizados en agua, estos se clasifican en aniónicos, catiónicos (los que presentan una carga positiva en la porción orgánica de la molécula ionizada) o anfóteros (es decir sin carga), lo cual depende de la naturaleza del grupo funcional⁽³⁷⁾.

Estos agentes acondicionantes actualmente presentan un alto nivel de uso dados los beneficios que han reportado a las plantas de tratamiento, dentro de los que sobresalen los siguientes⁽¹⁰⁾:

- Con el uso de polielectrolitos altamente catiónicos se ve favorecida la filtración por gravedad ya que se producen flóculos densos y pesados.
- Se aumenta el nivel y la velocidad de sedimentación a bajas temperaturas.

- Las características de los floculos formados pueden ser manipuladas al emplear distintos tipos de polielectrolitos en el proceso.
- Las sustancias presentes en los lodos no causan tantas interferencias por reacciones con el agente floculante como lo hacen con los acondicionantes inorgánicos.
- Permiten eficientar los tratamientos con requisitos adicionales de expansión de la planta mínimos.

Algunos polímeros aniónicos comunes son: el ácido poliacrílico, poliacrilamida hidrolizada y el sulfato de poliestireno, entre otros⁽⁷⁾.

Estos materiales han sido ampliamente estudiados en lo correspondiente a sus características y posibles aplicaciones, pero a pesar de esto no se han podido establecer relaciones específicas que permitan la elección certera de un determinado polímero para el tratamiento de los distintos tipos de lodos residuales dado lo cambiante de las características de estos últimos, por lo que actualmente se siguen haciendo elecciones mediante el método de prueba y error para determinar el polielectrolito que resulte más eficiente y la dosis adecuada según el tipo de lodo⁽³²⁾.

Con el objeto de facilitar la elección del polímero adecuado, se debe conocer el proceso mediante el cual el agente acondicionante, polielectrolito en este caso, actúa sobre el lodo para lograr su mejor deshidratación. Dicho proceso será descrito en el siguiente apartado.

IV.4 FLOCULACIÓN

Prácticamente todas las partículas en suspensión acuosa tienen una carga superficial que puede darse por diversas razones como la ionización de grupos superficiales o por la adsorción específica de iones; los polielectrolitos actúan como agentes desestabilizantes del equilibrio logrado gracias a estas cargas⁽²⁶⁾.

Para explicar la neutralización de cargas se emplea el modelo de la doble capa que consiste en los siguientes puntos⁽³⁶⁾:

- La mayoría de las partículas dispersas en el agua presentan una carga negativa.
- Estas partículas cargadas atraen una capa de iones cargados positivamente que rodean y encierran la partícula y forman lo que se denomina capa de Stern.
- Fuera de esta capa existe una capa de iones positivos y negativos dispersos y móviles.

Al adicionar un electrolito se causa una interacción no especificada entre algunos grupos funcionales de este y la partícula, estos contraiones entran a la doble capa. La carga de la partícula permanece constante, pero disminuye el espesor de la doble capa además del potencial de Nernst y el potencial zeta. El resto de la cadena del polímero queda extendido en la solución, por lo que si una segunda partícula con algunos sitios libres entra en contacto con el polímero, puede ocurrir la unión y formación de floculos de mayor tamaño⁽³⁶⁾.

La floculación de lodos residuales con el uso de polielectrolitos se presenta de acuerdo a alguno de los siguientes mecanismos⁽³²⁾:

• Formación de puentes: se asocia con polímeros de alto peso molecular que pueden formar ligas entre partículas. En este mecanismo, la repulsión por cargas electrostáticas entre partículas es vencida, ya que las cadenas poliméricas pueden extenderse sobre la doble capa eléctrica de partículas cercanas. El peso molecular tiene el mayor efecto en el proceso de floculación, pues mientras más grande sea, mayor será la eficiencia. Este mecanismo se ilustra en la Figura IV.1.

• Neutralización de cargas: los floculos formados son similares a los formados con coagulantes inorgánicos. Los polímeros de bajo y moderado peso molecular actúan

con este mecanismo. Los polímeros son mucho menores que el área de la partícula, por lo que se adhieren y neutralizan las cargas además de inducir una carga opuesta debido a su alta densidad de carga. Las partículas colisionan y la interacción entre partículas con cargas opuestas hace que se formen los flocúlos. (Figura IV.2)

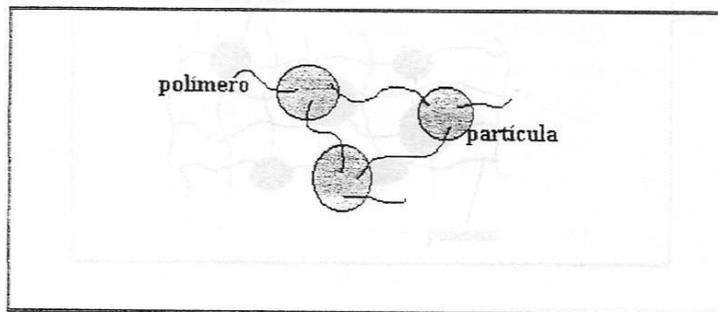


Figura IV.1. Mecanismo de formación de puentes en el proceso de separación sólido-líquido (Moudgil, 1994)

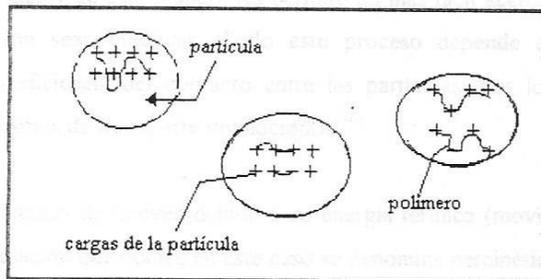


Figura IV.2. Mecanismo de neutralización de cargas en el proceso de separación sólido-líquido (Moudgil, 1994)

- ✎ Modelo de red: ciertos polímeros, en específico el óxido de polietileno forman una red de cadenas de polímero cruzadas. El material disperso se une a la red formada; el producto son flóculos no muy fuertes (Figura IV.3).

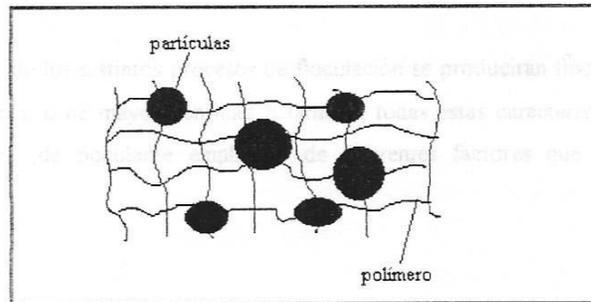


Figura IV.3. *Mecanismo de floculación por formación de red en el proceso de separación sólido-líquido (Moudgil, 1994).*

Como se puede observar el polímero sirve inicialmente para reducir la densidad de carga de las partículas y de esta manera les permite un más fácil acercamiento para que las fuerzas de atracción sean efectivas. Todo este proceso depende de la frecuencia de colisiones y de la eficiencia del contacto entre las partículas, por lo que es importante conocer los mecanismos de transporte involucrados⁽³⁶⁾:

1. Las partículas se mueven debido a su energía térmica (movimiento Browniano), la coagulación que ocurre en este caso se denomina percinética.
2. Cuando las partículas son suficientemente grandes o cuando el esfuerzo cortante del fluido es suficientemente alto, el movimiento relativo de los gradientes de

velocidad (agitación) excede al efecto térmico y se produce la floculación ortocinética.

3. En la sedimentación, partículas con diferentes velocidades de sedimentación por el efecto de la gravedad chocan y forman agregados.

A partir de los distintos procesos de floculación se producirán flóculos algunos más frágiles que otros, o de mayor densidad o tamaño, todas estas características dependerán, además del tipo de floculante empleado, de diferentes factores que se mencionan a continuación.

IV.5 FACTORES QUE AFECTAN LA FLOCULACIÓN

La naturaleza de los flóculos obtenidos depende de variables relacionadas con: la naturaleza del sólido, el líquido, el floculante, las características de la suspensión y las condiciones del proceso⁽¹⁹⁾.

- ☞ Respecto a la naturaleza del sólido estas son: la química superficial, energía superficial, tamaño, distribución de tamaños, forma y densidad.
- ☞ Respecto al líquido: viscosidad y constante dieléctrica.
- ☞ Respecto a la suspensión: concentración de sólidos, pH, potencial zeta, oxígeno disuelto, contenido de materia orgánica, bioactividad y temperatura.
- ☞ Respecto al floculante: naturaleza química, peso molecular, distribución de peso molecular y densidad de carga.

Del proceso: la forma de adición del polímero, dosis del polímero, tiempo y gradiente de velocidad en la agitación rápida y lenta.

A continuación se describirá la influencia de algunos de estos factores:

De la suspensión:

- **Concentración de sólidos.-** a mayor concentración, habrá mayor número de colisiones, lo que favorecerá la floculación⁽²⁾.
- **Contenido de materia orgánica.-** ha sido demostrado que mientras mayor sea el contenido de materia orgánica, mayor será la dosis de polímero requerida, pues este tipo de material es altamente hidrofílico⁽¹⁵⁾.
- **Temperatura.-** una baja temperatura implica disminuciones en la eficiencia de la separación sólido-líquido, dado que aumenta la viscosidad de la suspensión⁽³⁶⁾.
- **pH.-** afecta el nivel de adsorción que se logra, el equilibrio de ionización de las partículas dispersas y el acondicionamiento. Si se hace una floculación empleando el mecanismo de formación de puentes esta se verá favorecida si se reducen las cargas aniónicas de las partículas disminuyendo el pH pues se incrementa la absorción de polímeros floculantes y disminuye la cantidad requerida de los mismos⁽¹⁵⁾.
- **Oxígeno disuelto.-** afecta la carga y la solubilidad de los lodos y de los agentes acondicionantes⁽²⁾.
- **Potencial zeta.-** como ya se indicó, este corresponde a la diferencia de potencial eléctrico entre el plano que rodea a la partícula de lodo y la solución. Se ha visto, que mientras más cerca del cero se encuentre este factor, mejor será la coagulación⁽²²⁾.
- **Bioactividad.-** afecta cambiando la composición tanto en el peso molecular como en el grado de carga de las partículas, lo que altera la absorción y solubilidad y consecuentemente afecta la deshidratación⁽¹⁶⁾.

Del sólido:

- **Distribución del tamaño de partículas.-** se ha visto que las soluciones presentan una mejor capacidad de floculación cuando se tiene una distribución de tamaño que incluya tanto partículas coloidales como partículas gruesas⁽³⁹⁾.
- **Tamaño de partículas.-** generalmente se cree que la floculación es mejor para partículas finas típicamente menores a 50µm. Partículas con tamaños supracoloidales (1-10050µm) causan una baja deshidratabilidad debido a que forman puentes entre la torta y el medio filtrante⁽³⁹⁾.

Del floculante:

- **Peso molecular del floculante.-** este factor es determinante en la floculación de partículas grandes, pues está asociado con la capacidad de formar puentes y de mantener unidos los flóculos neutralizados⁽¹⁹⁾.
- **Densidad de carga del floculante.-** de esta dependerá la capacidad de neutralizar la carga eléctrica producida por la doble capa que rodea la superficie de las partículas sólidas⁽¹⁹⁾.

Del proceso:

- **La dosis.-** de esta dependerá el grado de floculación alcanzado, pues deberá ser adecuada al área superficial de las partículas, pues tanto una dosis inferior como una sobredosis originarán problemas en las operaciones siguientes⁽⁴⁾.
- **Tiempos y velocidades de agitación.-** de estos dependerá que se logre una adecuada dispersión del agente floculante durante la etapa de agitación rápida y que se formen flóculos consistentes durante la etapa de agitación lenta⁽²¹⁾.

A partir de la combinación de todos estos factores se producen flóculos con distintas características, por lo que será importante definir ciertos parámetros de acuerdo a los resultados que se deseen obtener; uno de estos parámetros importantes de definir es la dosis

teniendo en consideración que la dosis óptima será la que produce rápidamente flóculos grandes que resistan una agitación fuerte.

Para evaluar la eficiencia y dosis óptima del floculante se cuenta con las siguientes pruebas que permiten analizar el producto obtenido de la floculación de los lodos con distintos agentes floculantes: turbiedad, cantidad de masa floculada, velocidad de sedimentación, volumen sedimentado, velocidad de filtración, tamaños de flóculos y distribución de tamaños⁽⁴⁾.

IV.6 ELECCIÓN DEL POLIELECTROLITO

Para la floculación de cada tipo de lodo residual se cuenta con varias opciones de pruebas que pueden clasificarse de acuerdo a la escala que correspondan, de esta manera pueden ser: pruebas de laboratorio, en planta piloto o a escala real. De estas tres la primera es la que generalmente se usa, pues representa bajos costos en relación con las otras dos, además de que las pruebas a este nivel se pueden realizar con cierta facilidad⁽¹⁾.

En el laboratorio generalmente se aplica la prueba de jarras, pues permite semejar condiciones de agitación que se tendrían en reactores de escala mayor, lo que la convierte en una técnica sumamente útil para la determinación de algunos parámetros operacionales como: selección del coagulante y su dosis, pH óptimo, control y adición de alcalinidad, tiempo de floculación, optimización de la energía de mezclado y tiempos de mezclado lento y rápido, entre otros, y de técnicas de control de calidad como: tiempo requerido para la aparición del primer flóculo, evaluación visual del tamaño del flóculo, velocidad de sedimentación, medida visual de la claridad del sobrenadante y determinación analítica del coagulante residual en el sobrenadante⁽¹⁾.

Para realizar las pruebas de laboratorio, deberá primero realizarse una caracterización tanto física como química de los lodos con los que se estará trabajando, ésta podrá

considerarse bien hecha solo si las muestras analizadas son representativas y están conservadas de manera tal que sus características no cambien durante su almacenamiento y manejo, para esto es recomendable usar los lodos inmediatamente; de no ser posible se deberán mantener en refrigeración a 4°C y usarlos en las 24 hrs. siguientes⁽³⁷⁾.

Dentro de los parámetros que deberán considerarse para la caracterización se encuentran: pH, textura de los sólidos, sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles, sólidos fijos, potencial zeta, acidez, alcalinidad, % de materia que se sedimenta en periodos de 1hr y 24 hrs., carbón orgánico total, conductividad específica y turbidez⁽¹⁵⁾

Posterior a la caracterización deberá hacerse un ajuste de pH, pues se recomienda usar rangos de 6 a 8 para lodos que empleen polielectrolitos catiónicos⁽¹¹⁾. Para tal efecto se emplean principalmente cal, hidróxido de potasio o aluminio y carbonato de sodio.

El siguiente paso será la elección del floculante, esta se hace en términos de efectividad de costos. Para este proceso se emplea la prueba de jarras, colocando polímeros con distintas características en un volumen determinado de lodos para analizar el que arroje los mejores resultados. Finalmente deberá determinarse la dosis óptima del polímero previamente seleccionado, esto se hará mediante la técnica de prueba y error empleando distintas concentraciones con el lodo residual⁽¹⁰⁾.

La determinación de la dosis óptima, que corresponderá a una zona más que a un punto, es sumamente importante, pues se ha visto que en los casos en que se tienen sobredosis, además de estar realizando gastos innecesarios, se disminuye también la capacidad de deshidratación, pues en muchas ocasiones la sobredosis ocasiona una reestabilización de la suspensión, además de que aumenta en gran medida la viscosidad, lo que dificulta la filtración posterior⁽⁴⁾.

IV.7 FACTORES DE EFICIENCIA DE COLISIÓN

Para definir la dosis de polímero que será adecuada a cierto tipo de lodos residuales se realiza la evaluación de distintos factores mencionados ya anteriormente, como velocidad de sedimentación, evaluación visual del tamaño del floculo, medida visual de la claridad del sobrenadante, entre otros. Como puede observarse no existen bases teóricas que permitan hacer esta determinación⁽²³⁾.

La Mer et al. (1982); Hogg (1984) y Moudgil (1989); han realizado pruebas de separaciones sólido-líquido con objeto de poder definir la cantidad óptima de polímero que debe emplearse para determinadas soluciones teniendo en cuenta bases teóricas⁽²⁷⁾. Todos ellos han trabajado con matrices sencillas compuestas únicamente por soluciones de un mineral o dos las más complejas.

Estos autores asumen como generalidad que para la mayoría de los sistemas, los polímeros actúan por adsorción de una molécula simple en la superficie de una partícula y mediante la formación de "puentes" de polímero entre partículas. El proceso de floculación, es entonces descrito como un proceso de dos etapas⁽¹⁷⁾:

- ☞ Adsorción del polímero sobre la superficie de las partículas sólidas.
- ☞ Colisiones partícula-partícula permitiendo la formación de puentes moleculares.

Para que se forme un puente entre dos partículas colindantes, se necesita que una molécula adsorbida sobre una partícula entre en contacto con la superficie libre de otra partícula, la floculación no se realizará si se encuentran dos superficies libres o dos superficies ocupadas⁽³⁶⁾.

La Mer (1982), entonces desarrolló una teoría cuantitativa que intenta correlacionar la floculación y la cantidad de polímero adsorbida, esta correlación está dada por la

velocidad de floculación F , que debe ser proporcional al producto de la frecuencia de colisiones y la fracción de colisiones que permitirán la formación de puentes entre partículas⁽¹⁷⁾.

$$F = Kn_i n_j E \quad (1)$$

donde:

K = constante de velocidad de floculación

n_i, n_j = número de especies que interactúan por unidad de volumen.

E = factor de eficiencia de colisión

El factor de eficiencia de colisión es definido por La Mer (1982), como:

$$E = \theta(1 - \theta) \quad (2)$$

donde:

θ = fracción del sólido cubierta por polímero adsorbido

Ha sido observado que este modelo no es teóricamente correcto, la ecuación establece inadecuadamente la probabilidad de adhesión con $\theta(1 - \theta)$, porque considera una correcta orientación de las partículas con el polímero adsorbido y la partícula libre de polímero; no considera que si se encuentran dos partes libre o dos partes con polímero adsorbido, estas puedan reorientarse para unirse⁽¹⁷⁾.

Por lo anterior se continuaron las investigaciones y Hogg (1984), propuso un nuevo modelo que supone que las partículas que interactúan tienen completa libertad para reorientarse y adquirir configuraciones favorables a la adhesión. Las siguientes son las suposiciones hechas para el desarrollo de este modelo⁽¹⁷⁾:

- I. Cada molécula de polímero adsorbido forma una superficie discreta o aislada sobre la superficie sólida.
- II. Las moléculas adsorbidas se distribuyen aleatoriamente sobre la superficie sólida para dar una fracción cubierta " θ ".
- III. Una partícula de tamaño x_i tiene un número dado n_i de sitios superficiales en los cuales se pueden localizar moléculas de polímero adsorbido (sitio corresponde al área entera ocupada por una sola molécula, no el área ocupada por un segmento del polímero adsorbido).
- IV. Las partículas en suspensión tienen una orientación aleatoria y son libres de girar respondiendo a fuerzas hidrodinámicas o a la interacción con otras partículas.

Además también fue establecido que la colisión entre dos partículas no permitirá adhesión si⁽¹⁴⁾:

- I. Ambas partículas están completamente cubiertas por polímero adsorbido.
- II. Ambas partículas tienen su superficie completamente libre.

Se realizó el desarrollo matemático correspondiente⁽¹⁷⁾ y finalmente se obtuvo la siguiente ecuación que define el factor de eficiencia de colisión como:

$$E_{ij} = 1 - \theta^{n_i + n_j} - (1 - \theta)^{n_i - n_j} \quad (3)$$

De esta ecuación se puede observar que si n , es decir la razón del área superficial de la partícula y el área ocupada por una molécula es igual a uno tanto para i como para j , el factor de eficiencia de colisión adquirirá la siguiente forma⁽¹⁷⁾:

$$E = 2\theta(1 - \theta) \quad (4)$$

Este modelo también presenta algunas desventajas, pues mientras que el modelo de La Mer subestima el coeficiente de eficiencia de colisión al no permitir la reorientación, el modelo de Hogg sobreestima a este mismo cuando se presentan muy bajas o muy altas fracciones de superficie cubierta, aunque este segundo modelo es una estimación más realista⁽³⁰⁾.

Otros modelos han sido desarrollados agregando factores como la existencia de sitios activos y no activos sobre la superficie de las partículas, la posibilidad de que existan colisiones entre partículas completamente descubiertas o entre partículas completamente ocupadas por el polímero⁽²⁹⁾, todos estos modelos manejan principios básicos de los dos modelos antes presentados, pero conforme aumenta el número de factores que toman en consideración aumenta también su complejidad⁽³⁵⁾.

Dado que la matriz de lodos residuales resulta ser muy compleja debido a la gran cantidad de componentes que contiene y a la variabilidad que presenta en sus características, se ha considerado adecuado emplear los dos modelos aquí descritos, con el objeto de poder establecer de manera relativamente sencilla relaciones que permitan definir la dosis óptima de polielectrolito en base a cálculos de factores de eficiencia de colisión.

Para el desarrollo de las pruebas correspondientes se emplearán lodos residuales de tipo industrial, provenientes de la planta de tratamiento de agua residuales RECICLAGUA.

V.1 INTRODUCCION

A lo largo de este capítulo se describen todas las partes relacionadas con la parte experimental de la investigación, se presenta la forma y tiempos en que se llevó a cabo el muestreo, la metodología utilizada y finalmente los resultados obtenidos de cada una de las pruebas realizadas.

V.2 MUESTRAS

Para el desarrollo de la parte experimental de la presente investigación se tomaron muestras de tres puntos diferentes de la planta de tratamiento de aguas residuales RECOMI S.A.S., en puntos de muestreo se seleccionaron de manera tal que permitieran obtener lodos de diversas características, estos fueron lodos primarios, lodos secundarios, lodos activados y un tipo de lodo denominado lodos crudos.

Los lodos primarios se tomaron de una zona donde se almacenan los lodos provenientes de los procesos de sedimentación del tratamiento primario indicados con el número 1 en la figura 5.1, los lodos secundarios se obtuvieron del punto de muestreo indicado en la figura 5.2, los lodos terciarios con el número 3 y los lodos crudos de la zona de almacenamiento de lodos, antes del tiempo de salida del sistema de tratamiento de agua residual, para después pasar a los filtros donde se almacenan los lodos.

CAPÍTULO V

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El presente capítulo se divide en tres partes, la primera describe el desarrollo experimental de las pruebas de laboratorio, la segunda describe el desarrollo de las pruebas de campo y la tercera describe el desarrollo de las pruebas de campo de laboratorio. Las muestras fueron utilizadas en el momento de su recolección y para los casos en que no fue posible, se almacenaron en bolsas de plástico, evitando de almacenarlas almacenadas en refrigeración a una temperatura de 4°C, con el fin de evitar que sufrieran cambios por la actividad biológica.

V.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo se describirán todas las partes relacionadas con la parte experimental de la investigación, se presenta la forma y tiempos en que se llevó a cabo el muestreo, la metodología empleada y finalmente los resultados obtenidos de cada una de las pruebas realizadas

V.2 MUESTREO

Para el desarrollo de la parte experimental de la presente investigación se tomaron muestras de tres puntos diferentes de la planta de tratamiento de aguas residuales RECICLAGUA; los puntos de muestreo se seleccionaron de manera tal que permitieran obtener lodos de distintas características, estos fueron: lodos primarios, lodos secundarios (o activados) y una mezcla de ambos denominada lodos mixtos crudos.

Los lodos primarios se tomaron de una fosa donde se almacenan los lodos provenientes de los tanque de sedimentación del tratamiento primario indicados con el número 7 en la figura II.3; los lodos secundarios se obtuvieron del punto de muestreo localizado en los tanques clarificadores identificados con el número 9 y los lodos mixtos crudos fueron obtenidos de las tomas instaladas para realizar muestreos, antes del tanque donde son mezclados con la solución de polielectrolito, para después pasar a los filtros banda donde son deshidratados.

Se tomaron muestras de 5 litros para la parte correspondiente a la caracterización por un periodo de 2 meses y posteriormente se tomaron muestras de 20 litros para realizar las pruebas de floculación en el quipo de pruebas de jarras. Las muestras fueron utilizadas el mismo día en que se realizó el muestreo y para los casos en que no fue posible, se emplearon dentro de las 24 horas siguientes, cuidando de mantenerlas almacenadas en refrigeración a una temperatura de 4°C con el fin de evitar que sufrieran cambios por la acción bacteriana.

V.3 METODOLOGÍA

Para realizar las determinaciones de los factores de eficiencia de colisión, que corresponde al objetivo principal del presente trabajo de investigación, se realizó inicialmente un proceso de determinación y/o recolección de información relativa a las características tanto de los lodos residuales, como de los polímeros con los que se estaría trabajando más adelante.

Posterior al proceso de caracterización, se desarrollaron las pruebas de coagulación-floculación, a partir de las cuales se obtuvieron los datos necesarios para realizar los cálculos de los factores de eficiencia de colisión en la floculación de los lodos. A continuación se describen más a detalle las actividades realizadas durante la parte experimental.

V.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LODOS

La caracterización de los lodos residuales incluyó los siguientes parámetros:

- ☞ Potencial de hidrógeno (pH)
- ☞ Concentración de sólidos suspendidos totales (SST)
- ☞ Concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV)
- ☞ Concentración de sólidos suspendidos fijos (SSF)
- ☞ Temperatura
- ☞ Distribución de tamaño de partículas
- ☞ Área superficial de las partículas dispersas
- ☞ Potencial zeta

El *potencial de Hidrógeno* (pH) indica la intensidad ácida o alcalina de una solución. Para el caso de la coagulación es importante, pues afecta el nivel de adsorción que se puede lograr mediante la desestabilización del equilibrio iónico existente en la

solución⁽⁷⁾. Las determinaciones de este parámetro se realizaron empleando un potenciómetro de acuerdo a lo establecido en la norma oficial mexicana NMX-AA-008.

Las determinaciones correspondientes a *SST*, *SSV* y *SSF* se realizaron de acuerdo a los procedimientos establecidos en la norma correspondiente de la legislación ambiental mexicana (NMX-AA-004). Los procesos empleados se basan principalmente en la evaporación de la parte líquida de los lodos y en determinaciones por diferencias de pesos del recipiente que los contiene antes y después de la evaporación y del secado.

La concentración de sólidos totales permite tener una idea respecto a los niveles de floculación que podrán alcanzarse, pues mientras mayores concentraciones se tengan, habrá mayor posibilidad de que las partículas colisionen y formen flóculos de mayor tamaño.

Las determinaciones de *SSV* y *SSF* se realizaron con el objeto de contar con un panorama general previo al trabajo con polímeros, respecto a los requerimientos de polielectrolito que tendría cada lodo, pues ha sido señalado que la concentración de sólidos suspendidos volátiles de un lodo, está directamente relacionada con la cantidad de materia orgánica que esté presente. La materia orgánica es altamente hidrofílica, por lo que mientras mayor concentración de ésta tenga un lodo, mayores serán las cantidades de polielectrolito necesarias para alcanzar niveles óptimos de floculación⁽²⁶⁾.

La *temperatura* de los lodos residuales estudiados fue medida con un termómetro de mercurio de acuerdo a lo establecido en la norma oficial mexicana NMX-AA-007.

En lo referente a la determinación de la *distribución de tamaño de las partículas* contenidas en los lodos, se utilizó la técnica de difracción láser. A partir de la aplicación de esta técnica se pueden calcular varios tipos de diámetros; para esta investigación se han elegido solo los dos siguientes⁽³⁶⁾:

- $X_{0.5}$ representando el promedio en volumen
- X_S representando el promedio $(\sum X_i^3) / (\sum X_i^2)$, es decir el diámetro medio de las partículas considerando el área superficial de las mismas.

Cabe hacer notar que si se tienen valores de X_S menores que $X_{0.5}$, significa que el área superficial real de las partículas corresponde al área de las partículas pequeñas, es decir el área superficial real será mayor al área geométrica calculada a partir del promedio $X_{0.5}$, además, al tener X_S menor a $X_{0.5}$, se entiende así mismo, que las partículas analizadas presentan gran porosidad.

Para la determinación del *área superficial* de los lodos, que es una medida importante para poder realizar los cálculos correspondientes a los factores de eficiencia de colisión, fueron consideradas dos opciones presentadas a continuación:

La primera corresponde al área geométrica. Ésta resulta del cálculo de la superficie de las partículas considerándolas como esferas. En este caso, si existe porosidad, el área superficial interna no será tomada en cuenta, por lo que este resultado será menor a la realidad. Este valor se calcula durante el análisis de distribución de tamaño de partículas por difracción láser.

La segunda opción es el área superficial real, la cual toma en cuenta el área interna de las partículas. El método empleado para hacer estas determinaciones se basa en la adsorción de moléculas de tamaño conocido sobre la superficie de las partículas de lodo.

En la presente investigación, se empleó la adsorción de nitrógeno, cuya molécula de gas ocupa un área de 0.162 nm^2 ; se eligió esta sustancia por ser inerte a los distintos grupos funcionales presentes en el lodo y porque dado su tamaño puede ingresar a los poros más pequeños.

Las determinaciones se realizaron en el equipo de adsorción de nitrógeno del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, con desgacificación previa durante 17 horas. Debido a que las mediciones deben hacerse en medio seco, fue necesario secar los lodos a una temperatura que no afectara su área superficial por destrucción de microorganismos. Se eligió 38°C, por ser una temperatura a la cual la población microbiana es muy activa⁽¹¹⁾.

Al secar los lodos, los sólidos tienden a aglomerarse, por lo que se tienen que disgregar evitando romper las partículas. En este caso la separación se realizó mediante la caída por gravedad de un pedazo de madera sobre los agregados, tamizando luego el producto a dimensiones de 150 y 75µm lo que conservó el tamaño supracoloidal de los lodos determinado en las pruebas de distribución del tamaño de partículas.

El proceso de adsorción de nitrógeno se adecua en gran medida al modelo de Langmuir y al modelo de B.E.T. (Brunauer-Emmet-Teller)⁽²⁵⁾, lo que indica que la adsorción continúa en varias capas; los resultados de la aplicación de estos modelos, se muestran en los cuadros V.3 y V.4. Después de analizar los resultados presentados en los cuadros indicados, se eligieron los que corresponderían al área superficial considerada para los cálculos necesarios en esta investigación.

Se recopilaron datos correspondientes al *potencial zeta* de las partículas del lodo. Los datos fueron obtenidos de la realización de pruebas con el equipo "zetameter system 3.0", utilizando el método de seguimiento al microscopio, del movimiento de la partícula en un campo eléctrico⁽¹¹⁾.

La información respecto al potencial zeta, fue recopilada con el fin de contar con información necesaria para seleccionar los polielectrolitos a estudiar, los cuales deben ser de carga opuesta a la de las partículas dispersas para facilitar la floculación.

V.3.2 CARACTERIZACIÓN DE POLÍMEROS

En cuanto al trabajo desarrollado con los polímeros, se realizó inicialmente una selección de entre los distintos agentes floculantes proporcionados para la investigación por las empresas Química Sumex y Allied Colloids. Estos agentes floculante fueron:

- De Química Sumex: floculantes tipo arcillas.
 - Sudflock P61
 - Sudflock P63
 - Bioflock A-01, aniónico
 - Sudflock EX-948

- De Allied Colloids: floculantes tipo polimeros sintéticos orgánicos.
 - Percol 368, catiónico
 - Percol 755, catiónico
 - Percol 757, catiónico
 - Percol 789, catiónico
 - Percol 919, aniónico

La selección de los agentes floculantes susceptibles de ser empleados se realizó tomando en cuenta pruebas realizadas en el equipo de jarras para determinar su eficiencia en la floculación de los lodos y considerando también la información proporcionada por los proveedores respecto a las características de los mismos.

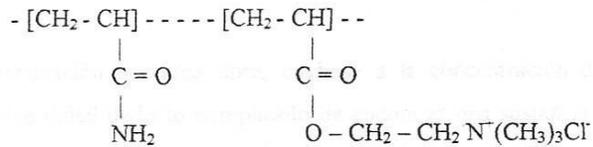
Para la realización de las pruebas en el equipo de jarras se eligió un amplio rango de dosis de polímero, para adicionar a los lodos, en base a datos encontrados en la literatura⁽¹⁾. Los floculantes fueron adicionados a los lodos de acuerdo a las dosis seleccionadas, se agitaron y se eligieron aquellos que produjeron mayores niveles de floculación, esto

determinado mediante un análisis visual de los niveles y velocidades de sedimentación de cada uno.

De los varios polímeros con los que se contaba, se seleccionaron los dos que produjeron los mayores niveles de floculación; estos fueron similares tanto en carga eléctrica como en estructura, de tal manera que solo el peso molecular fue variable. Los polímeros seleccionados fueron los siguientes:

- Percol 755
- Percol 757

Estos son polielectrolitos catiónicos de tipo DMAEA (dimetilaminoetilacrilamida), con un sustituto de cloruro de metil sobre la amina cuaternaria. Su fórmula química es la siguiente:



La información respecto a las características de los polielectrolitos seleccionados, fue proporcionada por la empresa Allied Colloids y se presenta en el cuadro V.5.

V.3.3 ESTIMACIÓN DE FACTORES DE EFICIENCIA DE COLISIÓN

Una vez conocidas las características principales de los lodos y de los polímeros, se continuó con la etapa que arrojaría los datos necesarios, para la estimación de los factores de eficiencia de colisión del proceso de floculación. Para el cálculo de este factor se

requiere conocer la fracción de la superficie de las partículas cubierta por el polímero, denominada " θ ".

Los cálculos de " θ " se realizan a partir del conocimiento del área superficial de los lodos y de la cantidad de polímero adsorbida sobre ésta. Para medir el área ocupada por el polímero adsorbido podrían emplearse métodos directos de medición del área, ya sea el área ocupada por el polímero o el área libre. La dificultad de emplear estos métodos es que, para el caso del área ocupada por el polímero, no se tiene acceso directo a ésta debido a la conformación que adquiere el floculante (de acuerdo a la fuerza iónica y al pH) y a sus mecanismos de transporte.

La determinación del área libre de las partículas podría realizarse a partir de mediciones de la concentración de una sustancia, como el nitrógeno o algún colorante como el rojo de rutenio, adsorbida sobre la superficie de las partículas del lodo. Esta sustancia debía adsorberse en los mismos sitios que el polímero, pero solo en los sitios libres, es decir sin desplazarlo y sin superponerse a éste sobre un sitio de adsorción.

El método de determinación del área libre, en base a la concentración de una sustancia adsorbida, se vuelve difícil dado lo complicado de encontrar una sustancia cuyas moléculas ocupen un área equivalente al área ocupada por las moléculas del polímero y que reaccionen de manera semejante a los diversos sitios sobre la superficie del lodo, sin desplazar o interaccionar con el polímero, debido a las dificultades comentadas se descartó el uso de métodos de medición directos y se recurrió a los métodos de medición indirectos para calcular " θ "⁽⁴⁰⁾.

Dado que la cuantificación del polímero adsorbido es difícil e incierta, se recurre a la cuantificación del polímero residual. De esta manera, se puede conocer, por diferencia, la cantidad de polímero adsorbido y el área ocupada por este.

Para medir la cantidad de polímero residual fueron tomados en consideración y revisados varios métodos como: titulación colorimétrica, resonancia magnética nuclear, carbono orgánico total y viscosimetría. De entre éstos métodos se eligió la viscosimetría, pues el resto presentó grandes inconvenientes, algunos de los cuales se mencionan a continuación:

La titulación colorimétrica consiste en titular la fase líquida con sulfato de polivinilo y sal de potasio (PVSK) para cancelar las cargas del polímero. El número de equivalentes obtenidos para la neutralización corresponde a las cargas de polímero; sin embargo se pueden presentar interferencias con la materia orgánica del lodo no atrapada en los flóculos, por lo que este método no permitiría obtener resultados confiables⁽⁴³⁾.

La resonancia magnética nuclear es un método que permite conocer, con alta precisión y sin interferencias mediante una calibración previa, la concentración del polímero presente en el medio. Sin embargo, la preparación de las muestras obliga a secar y redissolver el polímero residual en agua deuterada, la pérdida de materia durante esta etapa es muy probable dadas las bajas concentraciones de polímero residual a detectar, por lo que el error producido puede ser importante.

En cuanto a las determinaciones de carbono orgánico total, para el caso de los lodos es imposible saber si el carbón detectado proviene del polímero o de la materia orgánica no eliminada del lodo, esto crea grandes interferencias, además de gran incertidumbre en los resultados.

V.3.3.1 VISCOSIMETRÍA

El polímero presente en la fase líquida de los lodos floculados causa cambios en la viscosidad de ésta, por lo que su concentración puede determinarse mediante mediciones de viscosidad, contando con una calibración previa; teniendo cuidado que la conformación de

la macromolécula sea la misma en la muestra y en los estándares para la calibración⁽⁸⁾. La conformación de las moléculas de polímero depende, en el caso de los lodos, principalmente del pH.

Para medir viscosidades se tienen diferentes métodos, de éstos, los más adecuados para la presente investigación son: el viscosímetro tipo Brookfield (o viscosímetro de aguja) y el viscosímetro capilar⁽³⁰⁾.

Inicialmente se seleccionó el viscosímetro capilar por la gran exactitud que representaba y la facilidad para detectar viscosidades bajas. Se desarrollaron pruebas con este equipo empleando al mismo tiempo un termostato, lo cual permitió tener un estricto control de la temperatura, evitando así variaciones de viscosidad por causa de ésta.

Primero se obtuvieron las curvas de calibración midiendo la viscosidad de soluciones de polímero de distintas concentraciones y posteriormente se realizaron las mediciones de viscosidad de las soluciones obtenidas a partir del proceso de coagulación-floculación de los lodos residuales con los distintos agentes floculantes seleccionados.

Las soluciones de polímero empleadas para obtener las curvas de calibración, fueron preparadas a partir de una solución madre de concentración 500ppm del polielectrolito en agua desionizada, con una concentración 0.03N de cloruro de sodio, esto para permitir que las moléculas de polímero tuvieran conformaciones semejantes a las que presentarían en los lodos. Se hicieron las diluciones necesarias para obtener volúmenes de 400 ml de solución con concentraciones de 0, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 ppm, se eligieron estas concentraciones para asegurar la presencia de polímero residual no adsorbido⁽¹⁾.

El proceso de floculación realizado se inició con la colocación de un volumen de 500 ml de lodo en los vasos de precipitado, empleados en el equipo de prueba de jarras, a estos se les adicionó un volumen de 200 ml de solución de polielectrolito, a diferentes

concentraciones. Se permitió una agitación inicial rápida de 1 minuto a 200 rpm inmediatamente después de la adición del agente floculante, y posteriormente se tuvo un periodo de agitación lenta de 30 minutos a una velocidad de 20 rpm.

De las pruebas realizadas se separaron la fase líquida y la fase sólida mediante una decantación. La fase líquida separada se sometió a una centrifugación para eliminar las partículas sólidas suspendidas y posteriormente se hicieron las determinaciones de viscosidad necesarias.

Los resultados obtenidos de las mediciones de viscosidad con el viscosímetro capilar para estos procesos de floculación, mostraron un comportamiento diferente a lo esperado, ya que realizando las determinaciones correspondientes, los resultados de concentraciones de polímero residual resultaban ser mayores a las concentraciones adicionadas en un inicio.

Con el fin de descartar como posible interferencia la presencia de partículas pequeñas que no hubieran sido eliminadas mediante la centrifugación, se decidió realizar las pruebas de floculación a partir del uso de lodos "creados"; es decir soluciones de lodos preparadas a partir del material obtenido de un proceso de secado a 38°C de los lodos obtenidos de la planta de tratamiento.

Los lodos secos se tamizaron a dimensiones de entre 150 y 75µm. Con estos se hicieron soluciones a una concentración de 24 g/l para lodos primarios, 8 g/l para lodos secundarios y de 20 g/l para lodos crudos o mixtos empleando agua destilada. Se siguió el mismo proceso de coagulación-floculación, que fue usado para los lodos obtenidos de la planta y se hicieron las mediciones de viscosidad correspondientes empleando el viscosímetro capilar.

Debido a que los resultados obtenidos con el viscosímetro capilar no resultaron satisfactorios, a pesar de los ajustes realizados; se resolvió realizar las mediciones de viscosidad con el empleo de un viscosímetro tipo Brookfield el cual fue proporcionado, inicialmente, por el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas residuales RECICLAGUA y posteriormente por la facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), esto permitiría corroborar los resultados obtenidos con el primer método o definir su no-aplicabilidad en el caso de esta investigación.

Para realizar los cálculos de polímero residual con el segundo método de viscosimetría, se obtuvieron nuevamente las curvas de calibración para cada uno de los agentes floculantes. Posteriormente se realizaron los procesos de coagulación-floculación con los lodos obtenidos de la planta de tratamiento, adicionándoles soluciones de polielectrolito a distintas concentraciones y agitándolos empleando el equipo de pruebas de jarras de acuerdo a los tiempos y velocidades empleadas desde la primera parte de la investigación (1 minuto a 200 rpm después de la adición del agente floculante y 30 minutos a una velocidad de 20 rpm.)

Se midió la viscosidad a la fase líquida de cada una de las pruebas realizadas y a partir de los datos obtenidos se determinó la concentración de polímero residual. Los datos de viscosidad obtenidos con el viscosímetro tipo Brookfield presentaron un comportamiento acorde a lo esperado.

A partir del conocimiento de la concentración de polímero residual se hicieron las determinaciones correspondientes de la cantidad de polímero adsorbido sobre la superficie de las partículas del lodo por diferencia de la concentración inicial y la concentración residual. A partir de este dato se determinó la fracción del área de las partículas de lodo cubierta por las moléculas de polímero adsorbido, que corresponde a " θ ".

Una vez calculado el valor de "θ" se realizaron las estimaciones correspondientes de los factores de eficiencia de colisión de acuerdo a las teorías planteadas por La Mer (1982) y Hogg (1984).

V.4 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de cada una de las etapas desarrolladas con el fin de poder obtener los datos requeridos para las estimaciones de los factores de eficiencia de colisión de la floculación de los lodos residuales.

V.4.1 LODOS RESIDUALES

Enseguida se presentan los promedios de los datos obtenidos del proceso de caracterización de lodos residuales desarrollado en el laboratorio de RECICLAGUA por un periodo de dos meses, correspondientes a diez muestras (el total de los resultados se presenta en el Anexo 1).

☞ Lodos primarios:

| | |
|-------------------------------|----------------|
| pH | 7.07 ± 0.22 |
| Sólidos suspendidos totales | 24.105 g/l |
| Sólidos suspendidos volátiles | 69.90% de SST |
| Sólidos suspendidos fijos | 30.10% de SST |
| Temperatura | 20.75°C |
| Potencial zeta | No determinado |

☞ Lodos secundarios:

| | |
|-------------------------------|-----------------|
| pH | 7.76 ± 0.13 |
| Sólidos suspendidos totales | 8.366 g/l |
| Sólidos suspendidos volátiles | 79.09% de SST |
| Sólidos suspendidos fijos | 20.91% de SST |
| Temperatura | 20.5°C |
| Potencial zeta | - 24.00 mV |

☞ Lodos crudos mixtos:

| | |
|-------------------------------|-----------------------|
| pH | 7.22 ± 0.14 |
| Sólidos suspendidos totales | 20.315 g/l |
| Sólidos suspendidos volátiles | 70.99% de SST |
| Sólidos suspendidos fijos | 29.01% de SST |
| Temperatura | 19.5°C |
| Potencial zeta | $- 20.04 \pm 2.52$ mV |

De las pruebas realizadas, para determinar la *distribución de tamaño de los sólidos* contenidos en los lodos, empleando la técnica de difracción láser se obtuvieron los diámetros de las partículas presentados en los cuadros V.1 y V.2.

Cuadro V.1 Diámetros de partículas de lodos secundarios, determinados por difracción láser. $X_{0.5}$: Tamaño promedio de los sólidos dispersos en los lodos
 $X_S = (\sum X_i^3) / (\sum X_i^2)$: Promedio en volumen. Para lodos secundarios

| | $X_{0.5}(\mu\text{m})$ | $X_S (\mu\text{m})$ |
|-----------------|------------------------|---------------------|
| Lodo secundario | 27.09 | 10.50 |
| | 25.27 | 9.29 |
| | 24.52 | 9.31 |
| Promedio | 25.63 | 9.70 |

Cuadro V.2 Diámetros de partículas de lodos crudos mixtos, determinados por difracción láser. $X_{0.5}$: Tamaño promedio de los sólidos dispersos en los lodos $X_S = (\sum X_i^3) / (\sum X_i^2)$: Promedio en volumen. (lodos crudos mixtos).

| | $X_{0.5}(\mu\text{m})$ | $X_S (\mu\text{m})$ |
|------------------|------------------------|---------------------|
| Lodo crudo mixto | 28.41 | 12.11 |
| | 29.78 | 14.18 |
| | 25.90 | 18.65 |
| | 28.48 | 14.84 |
| | 25.45 | 18.35 |
| Promedio | 27.60 | 15.63 |

Los datos obtenidos de las pruebas de adsorción de nitrógeno para determinar el *área superficial* de las partículas de los lodos se presentan en los cuadros V.3 y V.4.

Cuadro V.3. Área superficial de los lodos secundarios por adsorción de nitrógeno (en m²/g de sólidos totales)

| | Modelo de Langmuir | | Modelo de B.E.T. | |
|-----------------------------|--------------------|----------|------------------|----------|
| | < 75 µm | < 150 µm | < 75 µm | < 150 µm |
| Adsorción de N ₂ | 1.46 | 1.74 | 0.92 | 1.04 |
| | 1.83 | 0.65 | 1.16 | 0.37 |
| | 2.11 | 0.59 | 1.17 | 0.36 |
| | 2.14 | 1.25 | 1.11 | 0.55 |
| | 1.70 | | 0.91 | |
| Promedio | 1.85 | 1.06 | 1.05 | 0.58 |

Cuadro V.4. Área superficial de los lodos crudos mixtos por adsorción de nitrógeno (en m²/g de sólidos totales)

| | Modelo de Langmuir | | Modelo de B.E.T. | |
|-----------------------------|--------------------|----------|------------------|----------|
| | < 75 µm | < 150 µm | < 75 µm | < 150 µm |
| Adsorción de N ₂ | 3.65 | 3.44 | 2.37 | 2.12 |
| | 3.38 | 2.86 | 1.90 | 1.35 |
| Promedio | 3.51 | 3.15 | 2.14 | 1.74 |

De los datos obtenidos se observa que la proporción entre las áreas superficiales obtenidas a partir de los modelos de Langmuir y de B.E.T. es casi constante, pues al considerar los datos de los cuadros V.3 y V.4 se tiene:

$$\frac{\text{Área superficial por Langmuir}}{\text{Área superficial por B.E.T.}} = 1.6 \text{ y } 1.8 \text{ respectivamente}$$

De esta manera se demuestra la validez del modelo de B.E.T. el cual fue seleccionado para determinar los valores del área superficial que serían utilizados en el resto de la investigación.

Después del análisis de los resultados presentados en las tablas 5 y 6, las áreas superficiales que se consideraron son de **1.05 m²/g para lodos secundario** y de **2.14 m²/g para lodos crudos mixtos**

V.4.2 POLÍMEROS

De la selección de agentes floculantes realizada se eligieron solo dos polímeros orgánicos sintéticos que fueron los que produjeron mejores resultados en las operaciones de floculación-coagulación en que fueron probados; sus características se presentan en el cuadro V.5 de acuerdo a los datos proporcionados por el proveedor (Allied Colloids):

Cuadro V.5. Características de los polímeros seleccionados

| | Viscosidad intrínseca (dl/g) | Peso molecular (PM) | Carga iónica (CI) (meq/g) |
|------------|---------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Percol 755 | 10.78 | 1.3X10 ⁶ | 1.37 |
| Percol 757 | 7.67 | 0.936X10 ⁶ | 1.37 |

V.4.3 FACTORES DE EFICIENCIA DE COLISIÓN

Las curvas de calibración para cada polímero obtenidas todas a 20°C con el viscosímetro Brookfield se presentan en las figuras V.1 y V.2 junto con los cuadros V.6 y V.7 que corresponden a las viscosidades medidas para cada una de las concentraciones empleadas.

Curva de calibración para percol 755
 $y = 0.1432x + 6.8543$ $r = 0.9876$

Cuadro V.6. Datos de la curva de calibración para el Percol 755

| Concentración (ppm) | Viscosidad (cPoise) |
|------------------------|------------------------|
| 0 | 7.5 |
| 50 | 15.34 |
| 100 | 22.83 |
| 150 | 26.1 |
| 200 | 34.51 |
| 250 | 44.81 |
| 300 | 53.61 |

Figura V.1. Curva de calibración para el Percol 755

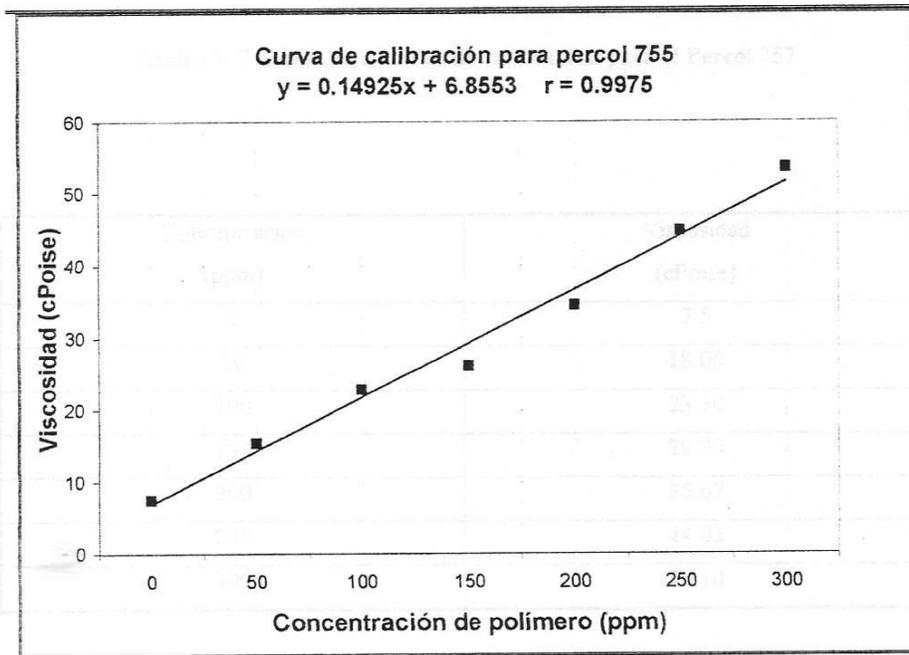


Figura V.1. Curva de calibración Percol 755

Cuadro V.7. Datos de la curva de calibración para el Percol 757

| Concentración (ppm) | Viscosidad (cPoise) |
|------------------------|------------------------|
| 0 | 7.5 |
| 50 | 18.00 |
| 100 | 23.30 |
| 150 | 29.30 |
| 200 | 35.67 |
| 250 | 44.02 |
| 300 | 50.10 |

Una vez realizados los procesos de concentración-floculación de los lodos terciarios resultantes de la etapa de los polímeros, se procedió con el uso de soluciones de polifenoles de acuerdo a los métodos y frecuencias de agitación mencionados en el apartado de metodología, se dio inicio a la separación de los sólidos para permitir la sedimentación de los flocos resultantes a separación de la fase líquida mediante decantación.

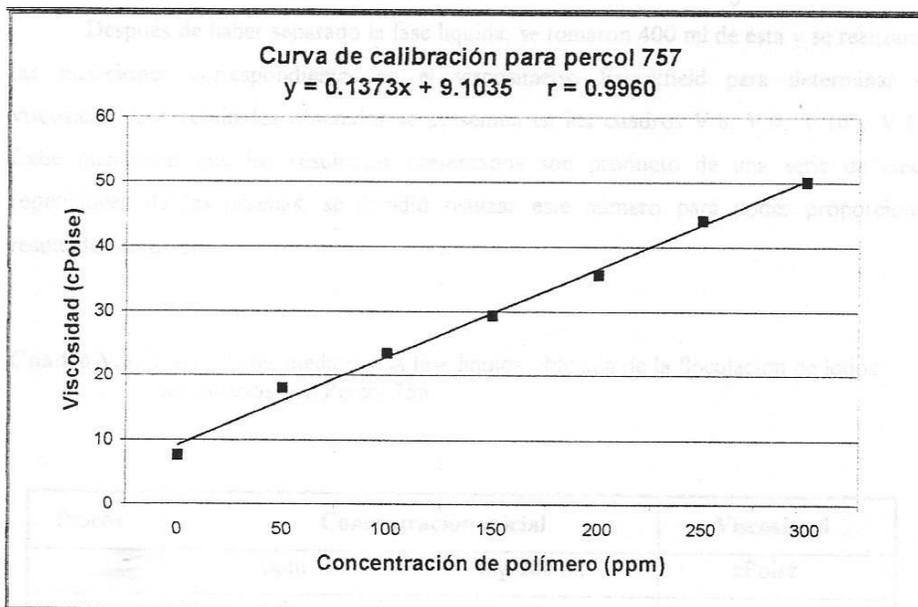


Figura V.2. Curva de calibración Percol 757

Una vez realizados los procesos de coagulación-floculación de los lodos residuales tanto secundarios, como de los lodos crudos mixtos con el uso de soluciones de polielectrolito, de acuerdo a los tiempos y velocidades de agitación mencionados en el apartado de metodología, se dejaron reposar las soluciones para permitir la sedimentación de los flóculos y facilitar la separación de la fase líquida mediante decantación.

Después de haber separado la fase líquida, se tomaron 400 ml de ésta y se realizaron las mediciones correspondientes en el viscosímetro Brookfield para determinar su viscosidad. Los resultados obtenidos se presentan en los cuadros V.8, V.9, V.10 y V.11. Cabe mencionar que los resultados presentados son producto de una serie de cinco repeticiones de las pruebas, se decidió realizar este número para poder proporcionar resultados confiables.

Cuadro V.8. Viscosidades medidas a la fase líquida obtenida de la floculación de lodos secundarios con Percol 755.

| Prueba | Concentración inicial | | Viscosidad |
|--------|-----------------------|-----------|------------|
| | ppm | mg/200 ml | |
| 1.a | 0 | 0 | 8 |
| 2.a | 50 | 10 | 8.1 |
| 3.a | 100 | 20 | 8.5 |
| 4.a | 150 | 30 | 8.6 |
| 5.a | 200 | 40 | 8.9 |
| 6.a | 250 | 50 | 9.4 |
| 7.a | 300 | 60 | 9.5 |
| 8.a | 350 | 70 | 10.3 |
| 9.a | 400 | 80 | 12.2 |

Cuadro V.9. Viscosidades medidas a la fase líquida obtenida de la floculación de lodos secundarios con Percol 757.

| Prueba | Concentración inicial | | Viscosidad cPoise |
|--------|-----------------------|-----------|----------------------|
| | ppm | mg/200 ml | |
| 1.b | 0 | 0 | 8 |
| 2.b | 50 | 10 | 10 |
| 3.b | 100 | 20 | 10.2 |
| 4.b | 150 | 30 | 10.6 |
| 5.b | 200 | 40 | 10.8 |
| 6.b | 250 | 50 | 11 |
| 7.b | 300 | 60 | 11.3 |
| 8.b | 350 | 70 | 11.6 |
| 9.b | 400 | 80 | 13.4 |

Cuadro V.10. Viscosidades medidas a la fase líquida obtenida de la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 755.

| Prueba | Concentración inicial | | Viscosidad cPoise |
|--------|-----------------------|-----------|----------------------|
| | ppm | mg/200 ml | |
| 1.c | 0 | 0 | 7.8 |
| 2.c | 50 | 10 | 8.2 |
| 3.c | 100 | 20 | 9 |
| 4.c | 150 | 30 | 9.4 |
| 5.c | 200 | 40 | 9.5 |
| 6.c | 250 | 50 | 9.8 |
| 7.c | 300 | 60 | 10.2 |
| 8.c | 350 | 70 | 13.2 |
| 9.c | 400 | 80 | 14.3 |

Cuadro V.11. Viscosidades medidas a la fase líquida obtenida de la floculación de lodos crudos mixtos con percol 757.

| Prueba | Concentración inicial | | Viscosidad cPoise |
|--------|-----------------------|-----------|----------------------|
| | ppm | mg/200 ml | |
| 1.d | 0 | 0 | 7.8 |
| 2.d | 50 | 10 | 10.2 |
| 3.d | 100 | 20 | 10.8 |
| 4.d | 150 | 30 | 11 |
| 5.d | 200 | 40 | 11.2 |
| 6.d | 250 | 50 | 11.7 |
| 7.d | 300 | 60 | 12 |
| 8.d | 350 | 70 | 12.4 |
| 9.d | 400 | 80 | 14 |

Una vez medidas las viscosidades de las soluciones, se determinó la cantidad de polímero residual presente en la fase líquida, empleando para esto, las curvas de calibración y las ecuaciones obtenidas de éstas. A partir de estos datos se determinaron las cantidades de polímero adsorbidas por las partículas dispersas para formar los flocúlos en cada una de las pruebas; los resultados se presentan en los cuadros V.12, V.13, V.14 y V.15.

Cuadro V.12. Concentración residual y cantidad de polielectrolito (Percol 755) adsorbida por las partículas dispersas en el lodo secundario

| Prueba | Concentración residual | | Cantidad adsorbida |
|--------|------------------------|------------|--------------------|
| | ppm | mg | mg |
| 1.a | 0 | 0 | 0 |
| 2.a | 8.33969849 | 5.83778894 | 4.16221106 |
| 3.a | 11.0197655 | 7.71383585 | 12.2861642 |
| 4.a | 11.6897822 | 8.18284757 | 21.8171524 |
| 5.a | 13.6998325 | 9.58988275 | 30.4101173 |
| 6.a | 17.0499162 | 11.9349414 | 38.0650586 |
| 7.a | 17.719933 | 12.4039531 | 47.5960469 |
| 8.a | 23.080067 | 16.1560469 | 53.8439531 |
| 9.a | 35.8103853 | 25.0672697 | 54.9327303 |

Cuadro V.13. Concentración residual y cantidad de polielectrolito (Percol 757) adsorbida por las partículas dispersas en el lodo secundario.

| Prueba | Concentración residual | | Cantidad adsorbida |
|--------|------------------------|------------|--------------------|
| | ppm | mg | mg |
| 1.b | 0 | 0 | 0 |
| 2.b | 6.52949745 | 4.57064822 | 5.42935178 |
| 3.b | 7.98616169 | 5.59031318 | 14.4096868 |
| 4.b | 10.8994902 | 7.62964312 | 22.3703569 |
| 5.b | 12.3561544 | 8.64930808 | 31.3506919 |
| 6.b | 13.8128186 | 9.66897305 | 40.3310269 |
| 7.b | 15.997815 | 11.1984705 | 48.8015295 |
| 8.b | 18.1828114 | 12.727968 | 57.272032 |
| 9.b | 31.2927895 | 21.9049527 | 58.0950473 |

Cuadro V.14. Concentración residual y cantidad de polielectrolito (Percol 755) adsorbida por las partículas dispersas en el lodo crudo mixto.

| Prueba | Concentración residual | | Cantidad adsorbida |
|--------|------------------------|------------|--------------------|
| | ppm | mg | mg |
| 1.c | 0 | 0 | 0 |
| 2.c | 9.00971524 | 6.30680067 | 3.69319933 |
| 3.c | 14.3698492 | 10.0588945 | 9.94110553 |
| 4.c | 17.0499162 | 11.9349414 | 18.0650586 |
| 5.c | 17.719933 | 12.4039531 | 27.5960469 |
| 6.c | 19.7299832 | 13.8109883 | 36.1890117 |
| 7.c | 22.4100503 | 15.6870352 | 44.3129648 |
| 8.c | 42.5105528 | 29.7573869 | 40.2426131 |
| 9.c | 49.880737 | 34.9165159 | 45.0834841 |

Cuadro V.15. Concentración residual y cantidad de polielectrolito (Percol 757) adsorbida por las partículas dispersas en el lodo crudo mixto.

| Prueba | Concentración residual | | Cantidad adsorbida |
|--------|------------------------|------------|--------------------|
| | ppm | mg | mg |
| 1.d | 0 | 0 | 0 |
| 2.d | 7.98616169 | 5.59031318 | 4.40968682 |
| 3.d | 12.3561544 | 8.64930808 | 11.3506919 |
| 4.d | 13.8128186 | 9.66897305 | 20.3310269 |
| 5.d | 15.2694829 | 10.688638 | 29.311362 |
| 6.d | 18.9111435 | 13.2378004 | 36.7621996 |
| 7.d | 21.0961398 | 14.7672979 | 45.2327021 |
| 8.d | 24.0094683 | 16.8066278 | 53.1933722 |
| 9.d | 35.6627822 | 24.9639476 | 55.0360524 |

Una vez conocida la cantidad de polielectrolito adsorbida por las partículas dispersas en cada prueba, se realizaron los cálculos requeridos para hacer las estimaciones correspondientes a los factores de eficiencia de colisión.

V.5. CÁLCULO DE FACTORES DE EFICIENCIA DE COLISIÓN

Como se mencionó en el capítulo IV, han sido desarrolladas diversas teorías referentes a los factores de eficiencia de colisión para los procesos de floculación. De estas teorías se tomarán en consideración solo dos para el caso de esta investigación, ya que dada la complejidad, en cuanto a composición y variabilidad que presentan los lodos residuales, se decidió elegir solo las teorías más sencillas para permitir un mejor entendimiento de éstas.

Primero será considerada la teoría de La Mer (1982) cuya ecuación corresponde a la ecuación 2 y posteriormente se tomará en consideración la ecuación propuesta por Hogg (1984), presentada como ecuación 3.

$$E = \theta(1 - \theta) \quad (2)$$

$$E_{ij} = 1 - \theta^{n_i - n_j} - (1 - \theta)^{n_i - n_j} \quad (3)$$

Para calcular los factores de eficiencia de colisión de cualquiera de las dos teorías, es necesario primero, realizar los cálculos correspondientes a la fracción de la superficie ocupada por las moléculas de polímero, que corresponde en las ecuaciones al valor de “ θ ”.

$$\theta = \frac{\text{Área de las partículas cubierta por polímero}}{\text{Área total de las partículas}}$$

El área total de las partículas es calculada a partir de los datos del área superficial de las partículas y de la concentración de sólidos suspendidos totales obtenidos en el proceso de caracterización de los lodos residuales.

Los datos de área superficial y de concentración de SST se presentan a continuación; con ellos se calculó la información correspondiente al área disponible de la siguiente manera:

☞ Lodos primarios: SST = 24.105 g/l Área = no medida

☞ Lodos Secundarios: SST = 8.366 g/l Área = 1.05 m²/g

$$\text{Área superficial en un litro de lodo} = (8.366 \text{ g/l})(1.05 \text{ m}^2/\text{g}) = 8.7843 \text{ m}^2 / \text{l}$$

Dado que para todas las pruebas de floculación se ocuparon 500 ml de lodos residuales, entonces el área total disponible será:

$$(8.7843 \text{ m}^2/\text{l})(0.5\text{l}) = 4.39215 \text{ m}^2$$

☞ Lodos Crudos mixtos: SST = 20.315 g/l Área = 2.14 m²/g

$$\text{Área superficial en un litro de lodo} = (20.315 \text{ g/l})(2.14 \text{ m}^2/\text{g}) = 43.4741 \text{ m}^2 / \text{l}$$

Para los 500 ml de lodos residuales ocupados en las pruebas de floculación, entonces el área total disponible será:

$$(43.4741 \text{ m}^2/\text{l})(0.5\text{l}) = 21.73705 \text{ m}^2$$

Los cálculos del área ocupada por las moléculas de polímero para cada prueba se realizaron en base a las siguientes ecuaciones:

$$S^e = \left[\frac{(0.67)^2 \pi}{5.97} \right] (R_G)^2 \quad (5)$$

donde:

S^e = área ocupada por una molécula de polímero

R_G = radio de giro de una molécula de polímero

El radio de giro se calcula a partir de la siguiente ecuación⁽¹⁸⁾:

$$R_G^2 = \frac{\alpha^2 \beta^2}{6} \left(\frac{M}{M_0} \right) \quad (6)$$

donde:

α = factor de expansión

β = longitud efectiva de la cadena principal del polímero

M = peso molecular del polímero

M_0 = peso molecular del monómero

Del estudio de varios polímeros en solventes se ha podido definir el factor de expansión de la siguiente manera⁽¹⁸⁾:

$$\alpha = 0.5 M^{0.09} \quad (7)$$

De las ecuaciones 5, 6 y 7 se obtiene entonces:

$$S^e = \left[\frac{(0.67)^2 \pi}{5.97} \right] \left[\frac{(0.5M^{0.09})^2 \beta^2}{6} \left(\frac{M}{M_0} \right) \right] \quad (8)$$

Para el caso particular de los polímeros empleados en esta investigación se tuvieron los siguientes valores:

☞ Para el Percol 755:

$$M = 1.3 \times 10^6$$

$$\beta = 12.24 \text{ \AA}^0$$

$$M_0 = 264.5$$

De la sustitución de estos valores se obtuvo que:

$$S^e = 913.49 \text{ nm}^2/\text{molécula} = 9.13 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{molécula}$$

☞ Para el Percol 757:

$$M = 0.936 \times 10^6$$

$$\beta = 12.24 \text{ \AA}^0$$

$$M_0 = 264.5$$

De la sustitución de estos valores se obtuvo que:

$$S^e = 619.950 \text{ nm}^2/\text{molécula} = 6.1995 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{molécula}$$

Una vez conocidas las áreas ocupadas, por las moléculas de cada uno de los polímeros y las concentraciones de polímero residual y de polímero adsorbido en cada una de las pruebas, se puede calcular la fracción de superficie cubierta en cada caso que corresponderá al valor de “ θ ” en la ecuación para el cálculo de factores de eficiencia de colisión.

Los cálculos realizados se basan en las siguientes ecuaciones:

$$A_p = (M_{ads.})(1/M)(Av)(S^{\circ}) \quad (9)$$

donde:

A_p = área ocupada por el polímero adsorbido (m^2)

$M_{ads.}$ = masa de polímero adsorbida por las partículas (g)

Av = número de Avogadro = 6.023×10^{23} moléculas / mol

Para lodos secundarios entonces se tendrá:

$$\theta = \frac{A_p}{4.39215} \quad (10)$$

Para lodos crudos mixtos:

$$\theta = \frac{A_p}{21.73705} \quad (11)$$

Empleando las ecuaciones anteriores, se obtuvieron los resultados presentados en los cuadros V.16 al V.19

Cuadro V.16 Fracciones de área cubierta en la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 755.

| Prueba | Cantidad adsorbida g | Área cubierta (\hat{A}_p) m^2 | Fracción de área cubierta (θ) |
|--------|-------------------------|---|--|
| 1.a | 0 | 0 | 0 |
| 2.a | 0.0036932 | 1.56222303 | 0.35568526 |
| 3.a | 0.0099411 | 4.20508687 | 0.95740967 |
| 4.a | 0.0180651 | 7.6415184 | 1.73981271 |
| 5.a | 0.027596 | 11.6731257 | 2.65772474 |
| 6.a | 0.036189 | 15.3079492 | 3.48529744 |
| 7.a | 0.044313 | 18.7443807 | 4.26770049 |
| 8.a | 0.0402426 | 17.0226222 | 3.87569237 |
| 9.a | 0.0450835 | 19.0703103 | 4.34190779 |

Cuadro V.17. Fracciones de área cubierta en la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 757.

| Prueba | Cantidad adsorbida g | Área cubierta (A_p) m^2 | Fracción de área cubierta (θ) |
|--------|-------------------------|-------------------------------------|--|
| 1.b | 0 | 0 | 0 |
| 2.b | 0.0054294 | 2.16591625 | 0.49313349 |
| 3.b | 0.0144097 | 5.74841641 | 1.30879328 |
| 4.b | 0.0223704 | 8.92414446 | 2.03183964 |
| 5.b | 0.0313507 | 12.5066446 | 2.84749943 |
| 6.b | 0.040331 | 16.0891447 | 3.66315921 |
| 7.b | 0.0488015 | 19.4682589 | 4.43251229 |
| 8.b | 0.057272 | 22.8473729 | 5.20186536 |
| 9.b | 0.058095 | 23.1756962 | 5.27661764 |

Cuadro V.18. Fracciones de área cubierta en la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 755.

| Prueba | Cantidad adsorbida g | Área cubierta (A_p) m^2 | Fracción de área cubierta (θ) |
|--------|-------------------------|-------------------------------------|--|
| 1.c | 0 | 0 | 0 |
| 2.c | 0.0041622 | 1.76061496 | 0.08099604 |
| 3.c | 0.0122862 | 5.19704651 | 0.23908702 |
| 4.c | 0.0218172 | 9.22865379 | 0.4245587 |
| 5.c | 0.0304101 | 12.8634773 | 0.59177659 |
| 6.c | 0.0380651 | 16.1015169 | 0.74074066 |
| 7.c | 0.047596 | 20.1331242 | 0.92621235 |
| 8.c | 0.053844 | 22.775988 | 1.04779572 |
| 9.c | 0.0549327 | 23.2365407 | 1.06898317 |

Cuadro V.19. Fracciones de área cubierta en la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 757.

| Prueba | Cantidad adsorbida g | Área cubierta (\bar{A}_p) m ² | Fracción de área cubierta (θ) |
|--------|-------------------------|--|--|
| 1.d | 0 | 0 | 0 |
| 2.d | 0.0044097 | 1.75914414 | 0.08092838 |
| 3.d | 0.0113507 | 4.52810005 | 0.20831254 |
| 4.d | 0.020331 | 8.11060019 | 0.37312332 |
| 5.d | 0.0293114 | 11.6931004 | 0.5379341 |
| 6.d | 0.0367622 | 14.6654424 | 0.67467492 |
| 7.d | 0.0452327 | 18.0445564 | 0.83012904 |
| 8.d | 0.0531934 | 21.2202845 | 0.97622651 |
| 9.d | 0.0550361 | 21.9553798 | 1.01004413 |

Una vez conocida la fracción de superficie cubierta por las moléculas de polímero adsorbidas, se realizaron los cálculos correspondientes de los factores de eficiencia de colisión de acuerdo a la teoría de La Mer (1982) y a la teoría de Hogg (1984), considerando para ésta última que $n_i = n_j$ teniendo valores elevados, pues las partículas dispersas son supracoloidales, para poder realizar los cálculos se consideró $n_i = n_j = 48$. Los resultados obtenidos son presentados en los cuadros V.20 al V.23:

Cuadros V.20. Factores de eficiencia de colisión de la floculación de lodos secundarios con Percol 755.

| Prueba | Fracción de área cubierta (θ) | Teoría de La Mer $E = \theta(1-\theta)$ | Teoría de Hogg $E_{ij} = 1 - \theta^{n_i - n_j} - (1 - \theta)^{n_i - n_j}$ |
|--------|--|--|--|
| 1.a | 0 | 0 | 0 |
| 2.a | 0.35568526 | 0.22917326 | 1 |
| 3.a | 0.95740967 | 0.04077639 | 0.98467538 |
| 4.a | 1.73981271 | -1.28713556 | -1.22529E+23 |
| 5.a | 2.65772474 | -4.40577605 | -5.66187E+40 |
| 6.a | 3.48529744 | -8.66200081 | -1.13508E+52 |
| 7.a | 4.26770049 | -13.945567 | -3.15223E+60 |
| 8.a | 3.87569237 | -11.145299 | -3.03063E+56 |
| 9.a | 4.34190779 | -14.5102555 | -1.64944E+61 |

Cuadros V.21 Factores de eficiencia de colisión de la floculación de lodos secundarios con Percol 757.

| Prueba | Fración de área cubierta (θ) | Teoría de La Mer $E = \theta(1-\theta)$ | Teoría de Hogg $E_{ij} = 1 - \theta^{n_i+n_j} - (1-\theta)^{n_i+n_j}$ |
|--------|--|---|---|
| 1.b | 0 | 0 | 0 |
| 2.b | 0.49313349 | 0.24995285 | 1 |
| 3.b | 1.30879328 | -0.40414657 | -1.65814E+11 |
| 4.b | 2.03183964 | -2.09653268 | -3.60899E+29 |
| 5.b | 2.84749943 | -5.26075357 | -4.25118E+43 |
| 6.b | 3.66315921 | -9.75557619 | -1.34945E+54 |
| 7.b | 4.43251229 | -15.2146529 | -1.19783E+62 |
| 8.b | 5.20186536 | -21.8575379 | -5.63994E+68 |
| 9.b | 5.27661764 | -22.5660761 | -2.21891E+69 |

Cuadros V.22. Factores de eficiencia de colisión de la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 755.

| Prueba | Fracción de área cubierta (θ) | Teoría de La Mer $E = \theta(1-\theta)$ | Teoría de Hogg $E_{ij} = 1 - \theta^{n_i - n_j} - (1-\theta)^{n_i - n_j}$ |
|--------|---|---|---|
| 1.c | 0 | 0 | 0 |
| 2.c | 0.08099604 | 0.07443568 | 0.999699068 |
| 3.c | 0.23908702 | 0.18192442 | 1 |
| 4.c | 0.4245587 | 0.24430861 | 1 |
| 5.c | 0.59177659 | 0.24157706 | 1 |
| 6.c | 0.74074066 | 0.19204393 | 1 |
| 7.c | 0.92621235 | 0.06834303 | 0.99936289 |
| 8.c | 1.04779572 | -0.05008015 | -87.42102233 |
| 9.c | 1.06898317 | -0.07374185 | -603.2314201 |

Cuadros V.23. Factores de eficiencia de colisión de la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 757.

| Prueba | Fracción de área cubierta (θ) | Teoría de La Mer $E = \theta(1-\theta)$ | Teoría de Hogg $E_{ij} = 1 - \theta^{n_i - n_j} - (1 - \theta)^{n_i - n_j}$ |
|--------|--|--|--|
| 1.d | 0 | 0 | 0 |
| 2.d | 0.08092838 | 0.07437898 | 0.999696933 |
| 3.d | 0.20831254 | 0.16491843 | 1 |
| 4.d | 0.37312332 | 0.23390231 | 1 |
| 5.d | 0.5379341 | 0.248561 | 1 |
| 6.d | 0.67467492 | 0.21948867 | 1 |
| 7.d | 0.83012904 | 0.14101482 | 0.999999983 |
| 8.d | 0.97622651 | 0.02320831 | 0.900721019 |
| 9.d | 1.01004413 | -0.01014501 | -1.610198325 |

Los resultados tanto de fracciones de área cubierta, como de factores de eficiencia de colisión (mostrados en los cuadros V.20 al V.23), en especial los correspondientes a lodos secundarios, muestran valores que implicarían cubrir varias veces (hasta más de cinco) la superficie de las partículas dispersas. Si este recubrimiento fuera cierto, de acuerdo a lo encontrado en otras investigaciones⁽⁴⁾ los lodos se tornarían sumamente viscosos e inestables, debido a la gran cantidad de cargas que estarían involucradas.

Para poder corroborar que las cantidades mostradas tanto en los valores de superficie cubierta, como en los factores de eficiencia de colisión, mostradas en las tablas indicadas, fueran reales, se realizaron observaciones de las soluciones de lodos floculados con los polielectrolitos a diferentes concentraciones; los resultados obtenidos se muestran en los cuadros V.24 al V.27.

Cuadros V.24 Nivel de la interfase sólido-líquido alcanzada con la floculación de lodos secundarios con Percol 755 a diferentes tiempos y características de los flóculos formados.

| Prueba | Nivel de interfase (mm) a diferentes tiempos | | | | Características de los flóculos |
|--------|---|---------|---------|---------|---------------------------------|
| | 0 min. | 20 min. | 40 min. | 60 min. | |
| 1.a | 0 | 3 | 5 | 7 | Pequeños |
| 2.a | 0 | 4 | 6 | 8 | Pequeños |
| 3.a | 0 | 8 | 10 | 11 | Medianos |
| 4.a | 0 | 9 | 10 | 12 | Medianos |
| 5.a | 0 | 10 | 12 | 14 | Medianos con buena separación |
| 6.a | 0 | 14 | 16 | 18 | Medianos con buena separación |
| 7.a | 0 | 20 | 23 | 24 | Grandes |
| 8.a | 0 | 24 | 26 | 28 | Grandes y compactos |
| 9.a | 0 | 25 | 27 | 29 | Grandes, viscosos y frágiles |

Cuadros V.25. Nivel de la interfase sólido-líquido alcanzada con la floculación de lodos secundarios con Percol 757 a diferentes tiempos y características de los flóculos formados.

| Prueba | Nivel de interfase (mm) a diferentes tiempos | | | | Características de los flóculos |
|--------|---|---------|---------|---------|---------------------------------|
| | 0 min. | 20 min. | 40 min. | 60 min. | |
| 1.b | 0 | 2 | 7 | 8 | Pequeños |
| 2.b | 0 | 6 | 8 | 8.5 | Pequeños |
| 3.b | 0 | 7 | 8 | 8.5 | Medianos |
| 4.b | 0 | 8 | 9 | 9 | Medianos |
| 5.b | 0 | 8 | 9 | 10 | Medianos |
| 6.b | 0 | 10 | 19 | 20 | Medianos con buena separación |
| 7.b | 0 | 12 | 20 | 20 | Medianos con buena separación |
| 8.b | 0 | 20 | 25 | 25 | Grandes y compactos |
| 9.b | 0 | 22 | 26 | 28 | Grandes, viscosos y frágiles |

Cuadros V.26. Nivel de la interfase sólido-líquido alcanzada con la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 755 a diferentes tiempos y características de los flóculos formados.

| Prueba | Nivel de interfase (mm) a diferentes tiempos | | | | Características de los flóculos |
|--------|---|---------|---------|---------|---------------------------------|
| | 0 min. | 20 min. | 40 min. | 60 min. | |
| 1.c | 0 | 3 | 5 | 8 | Muy pequeños |
| 2.c | 0 | 10 | 15 | 19 | Medianos |
| 3.c | 0 | 22 | 24 | 25 | Medianos con buena separación |
| 4.c | 0 | 31 | 35 | 35 | Grandes |
| 5.c | 0 | 34 | 35 | 37 | Grandes y compactos |
| 6.c | 0 | 37 | 37 | 37 | Grandes y compactos |
| 7.c | 0 | 40 | 40 | 40 | Grandes, viscosos y frágiles |
| 8.c | 0 | 40 | 42 | 42 | Grandes, viscosos y frágiles |
| 9.c | 0 | 41 | 42 | 42 | Medianos y viscosos |

Cuadros V.27. Nivel de la interfase sólido-líquido alcanzada con la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 757 a diferentes tiempos y características de los flóculos formados.

| Prueba | Nivel de interfase (mm) a diferentes tiempos | | | | Características de los flóculos |
|--------|---|---------|---------|---------|---------------------------------|
| | 0 min. | 20 min. | 40 min. | 60 min. | |
| 1.d | 0 | 4 | 5 | 7 | Pequeños |
| 2.d | 0 | 10 | 12 | 16 | Medianos |
| 3.d | 0 | 18 | 20 | 20 | Medianos |
| 4.d | 0 | 19 | 22 | 22 | Medianos con buena separación |
| 5.d | 0 | 23 | 25 | 25 | Grandes |
| 6.d | 0 | 25 | 28 | 32 | Grandes y compactos |
| 7.d | 0 | 30 | 34 | 36 | Grandes, viscosos y frágiles |
| 8.d | 0 | 35 | 37 | 40 | Grandes, viscosos y frágiles |
| 9.d | 0 | 36 | 37 | 40 | Medianos y viscosos |

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

VI.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos obtenidos del proceso de caracterización de cada uno de los tipos de lodos residuales estudiados, muestran que éstos se encuentran dentro del rango de pH recomendado para lograr óptimos niveles de floculación, que es de entre 6 y 8⁽¹¹⁾; por lo que no se consideró necesario realizar algún ajuste de éste parámetro previo al proceso de floculación.

La información relativa a la cantidad de materia orgánica presente en los lodos residuales, permite afirmar que el mayor contenido de ésta lo muestran los lodos secundarios, pues representa un 79.09% de la cantidad de sólidos suspendidos totales, mientras que en los lodos crudos mixtos corresponde únicamente al 70.99%.

El contenido de materia orgánica está directamente relacionado con la demanda de polímero que presentarán los lodos residuales, por lo que dado que los lodos secundarios presentan mayor contenido de ésta, también presenta mayor demanda de polielectrolito para su floculación; este comportamiento puede observarse en las figuras VI.1 y VI.2, donde se muestra la cantidad de polímero adsorbida en relación con la cantidad de polímero adicionada al inicio del proceso de floculación.

Cabe hacer notar que las pruebas de floculación se realizaron únicamente con los lodos secundarios y con los lodos crudos mixtos, esto por no contar con la información completa de la caracterización de los lodos residuales primarios. Esto no afecta el objetivo principal de la investigación, pues los lodos de mayor interés son los lodos crudos mixtos, por ser estos los que reciben el tratamiento de deshidratación en la planta de tratamiento.

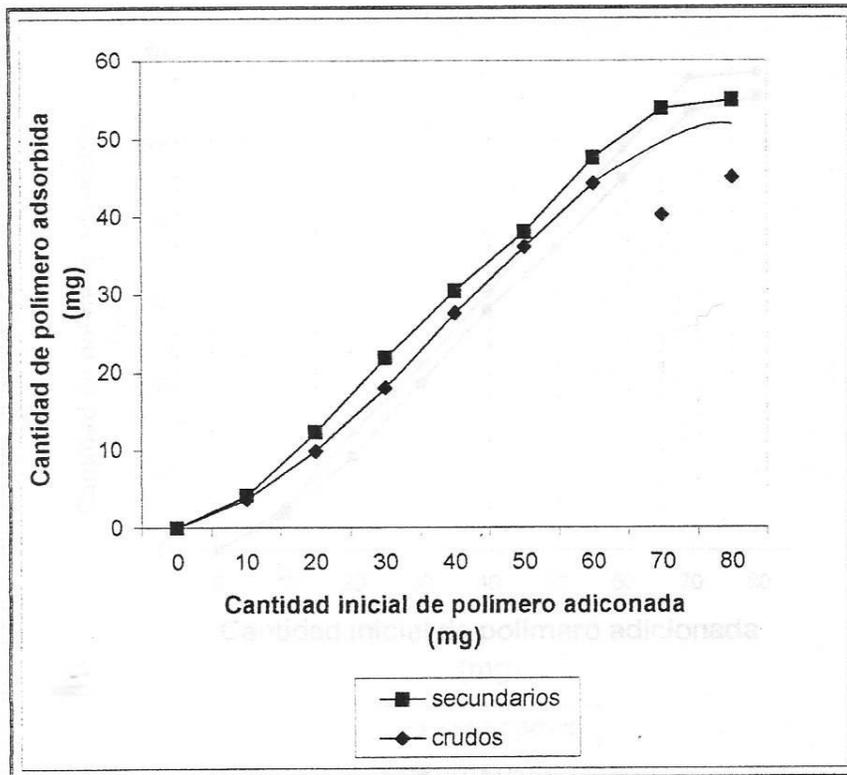


Figura VI.1. Cantidad de polímero adsorbida, respecto a la cantidad inicial adicionada al proceso de floculación de lodos secundarios y lodos crudos mixtos con Percol 755.

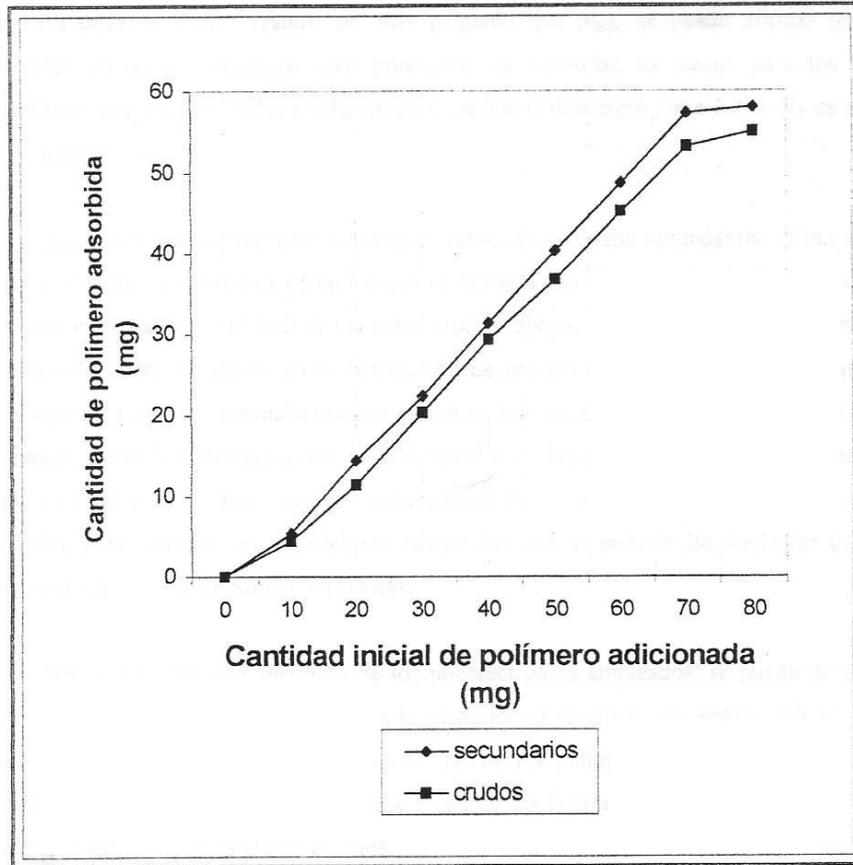


Figura VI.2. Cantidad de polímero adsorbida, respecto a la cantidad inicial adicionada al proceso de floculación de lodos secundarios y lodos crudos mixtos con Percol 757.

Los análisis correspondientes a la distribución del tamaño de partículas, permitieron definir el carácter supracoloidal de los lodos tanto secundarios, como crudos mixtos, ya que las partículas presentaron diámetros promedio de 25.63 y 27.60 μm respectivamente. Dado que para cada caso X_S resultó ser más pequeño que $X_{0.5}$, se puede afirmar que las partículas analizadas presentan gran porosidad; la porosidad es mayor para los lodos secundarios que para los lodos crudos mixtos, ya que la diferencia entre $X_{0.5}$ y X_S es mayor para los primeros.

La determinación del área superficial, tanto de los lodos secundarios, como de los lodos crudos mixtos arrojó datos en los que se muestra que el área de los lodos secundarios es menor que el área superficial de los lodos crudos mixtos; considerando que los diámetros determinados para los lodos, en la distribución de tamaño de partículas, muestran que las partículas de los lodos secundarios son menores que los de los lodos crudos mixtos, se esperaban resultados contrarios, entonces la relación de los resultados obtenidos se atribuye a que no haya existido una completa disgregación de los sólidos después de haber secado los lodos para permitir las condiciones requeridas por el método de medición de área superficial elegido (adsorción de nitrógeno).

Respecto a las características de los polielectrolitos empleados, se puede notar que el valor del parámetro correspondiente a la carga iónica es igual para ambos, por lo que el único parámetro variable fue el peso molecular de los polímeros. La diferencia de pesos moleculares de los polielectrolitos permitió observar las diferencias en cuanto a la eficiencia de colisión lograda con cada uno de ellos.

Con los resultados obtenidos, se pudo corroborar la información encontrada en investigaciones anteriores^(27,30,3237), que indica que los polímeros de mayor peso molecular permiten alcanzar mayores niveles de floculación con concentraciones menores, debido a que se facilita el mecanismo de formación de puentes entre las partículas dispersas. Este

comportamiento se muestra en los cuadros VI.1, VI.2, VI.3 y VI.4 y en las figuras VI.3 y VI.4.

Cuadro VI.1. Concentraciones empleadas para la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 755 y eficiencias de colisión alcanzadas.

| Prueba | Cantidad de polimero empleada por gramo de materia sólida. | Factor de eficiencia de colisión |
|--------|--|----------------------------------|
| | mg polimero/ g SST | (Teoría de La Mer) |
| 1a | 0 | 0 |
| 2a | 0.99503014 | 0.22917326 |
| 3a | 2.93716572 | 0.04077639 |
| 4a | 5.21567115 | -1.28713556 |
| 5a | 7.26993003 | -4.40577605 |
| 6a | 9.09994229 | -8.66200081 |
| 7a | 11.3784477 | -13.945567 |
| 8a | 12.8720902 | -11.145299 |
| 9a | 13.1323764 | -14.5102555 |

Cuadro VI.2. Concentraciones empleadas para la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 757 y eficiencias de colisión alcanzadas.

| Prueba | Cantidad de polímero empleada por gramo de materia sólida. | Factor de eficiencia de colisión |
|--------|--|----------------------------------|
| | mg polímero/ g SST | (Teoría de La Mer) |
| 1b | 0 | 0 |
| 2b | 1.29795644 | 0.24995285 |
| 3b | 3.44482113 | -0.40414657 |
| 4b | 5.3479218 | -2.09653268 |
| 5b | 7.49478649 | -5.26075357 |
| 6b | 9.64165118 | -9.75557619 |
| 7b | 11.6666339 | -15.2146529 |
| 8b | 13.6916165 | -21.8575379 |
| 9b | 13.8883689 | -22.5660761 |

Cuadro VI.3. Concentraciones empleadas para la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 755 y eficiencias de colisión alcanzadas.

| Prueba | Cantidad de polímero empleada por gramo de materia sólida. | Factor de eficiencia de colisión |
|--------|--|----------------------------------|
| | mg polímero/ g SST | (Teoría de La Mer) |
| 1c | 0 | 0 |
| 2c | 0.36359334 | 0.07443568 |
| 3c | 0.97869609 | 0.18192442 |
| 4c | 1.77849457 | 0.24430861 |
| 5c | 2.71681486 | 0.24157706 |
| 6c | 3.56278727 | 0.19204393 |
| 7c | 4.36258575 | 0.06834303 |
| 8c | 3.96186198 | -0.05008015 |
| 9c | 4.43844293 | -0.07374185 |

Cuadro VI.4. Concentraciones empleadas para la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 757 y eficiencias de colisión alcanzadas.

| Prueba | Cantidad de polímero empleada por gramo de materia sólida. | Factor de eficiencia de colisión |
|--------|--|----------------------------------|
| | mg polímero/ g SST | (Teoría de La Mer) |
| 1d | 0 | 0 |
| 2d | 0.43413112 | 0.07437898 |
| 3d | 1.11746905 | 0.16491843 |
| 4d | 2.00157784 | 0.23390231 |
| 5d | 2.88568664 | 0.248561 |
| 6d | 3.61921729 | 0.21948867 |
| 7d | 4.45313336 | 0.14101482 |
| 8d | 5.23685673 | 0.02320831 |
| 9d | 5.41826753 | -0.01014501 |

Los resultados obtenidos muestran valores de eficiencias de colisión negativos, especialmente para los lodos residuales secundarios, estos se presentan cuando el valor de la fracción del área superficial de las partículas cubierta por el polímero es mayor a uno ($\theta > 1$). Los valores de $\theta > 1$ indican que las partículas han sido totalmente cubiertas por el polímero, por lo que para estos casos se deberá considerar al factor de eficiencia de colisión igual a cero, pues al estar las partículas totalmente cubiertas por polímero, no permitirán que al colisionar las partículas se formen puentes que las unan, pues no existirán espacios “libres” donde la cadena de polímero pueda actuar. En las figuras VI.3 y VI.4 se muestran entonces solo los valores de eficiencias de colisión para los que $\theta < 1$.

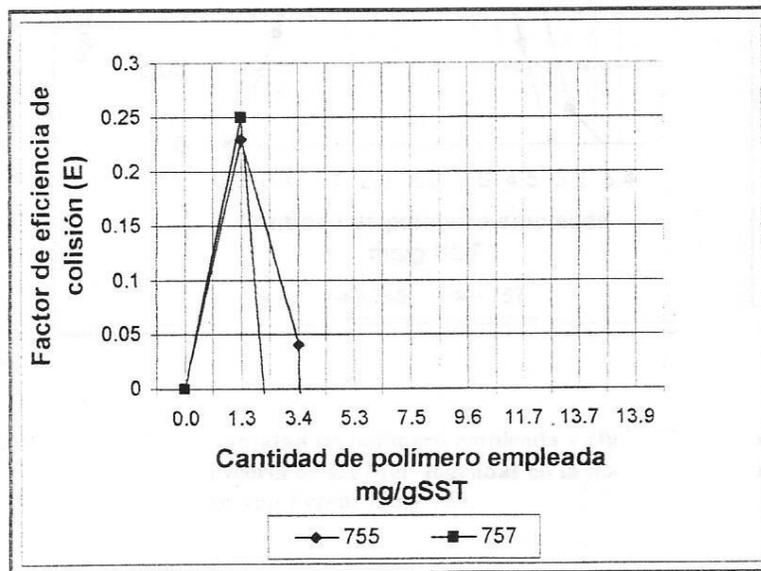


Figura VI.3. Relación de cantidad de polímero empleada y eficiencias de colisión (de acuerdo a la teoría de La Mer) logradas en la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 755 y 757.

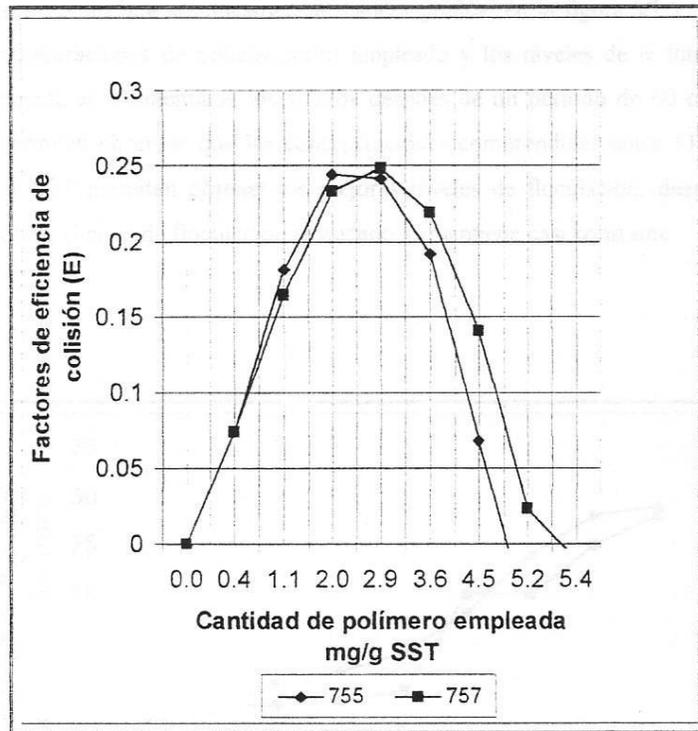


Figura VI.4. Relación de cantidad de polímero empleada y eficiencias de colisión (de acuerdo a la teoría de La Mer) logradas en la floculación de lodos crudos mixtos con Percol 755 y 757.

Los resultados correspondientes a los factores de eficiencia de colisión obtenidos para los lodos secundarios, no reflejan fielmente los resultados obtenidos en cada proceso de floculación, por lo que se muestran de manera gráfica, en la figura VI.5, las relaciones entre las concentraciones de polielectrolito empleado y los niveles de la interfase sólido-líquido producida al sedimentarse los sólidos después de un periodo de 60 minutos; estos resultados permiten observar que las concentraciones comprendidas entre 11.7 y 13.7 mg polímero / g SST permiten obtener los mejores niveles de floculación, después de estas concentraciones, el nivel de floculación alcanzado se mantiene casi constante.

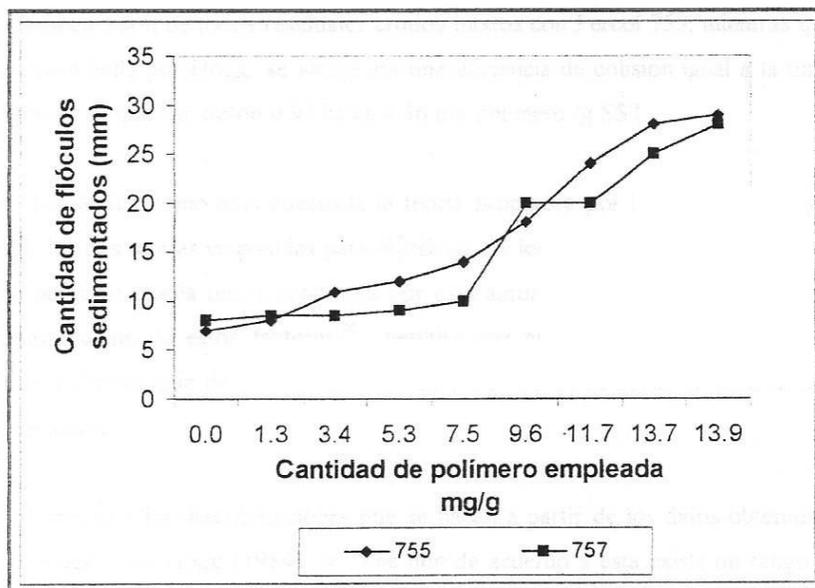


Figura VI.5. Relación de cantidades de polímero empleadas y cantidad de floculos sedimentados producto de la floculación de lodos residuales secundarios.

Respecto a las dos teorías empleadas para calcular los factores de eficiencia de colisión, se pudo observar, en base a los resultados obtenidos (presentados en los cuadros V.20, V.21, V.22 y V.23) que la teoría de Hogg representa efectivamente una sobreestimación de la eficiencia de colisión, pues al tener n_i y n_j valores elevados, la eficiencia de colisión es igual a uno para un amplio rango de fracciones de superficie cubiertas por polímero (θ). Mientras que para el caso de la teoría propuesta por La Mer, los factores de eficiencia de colisión encontrados tiene como máximo valor posible 0.25, lo que indica la subestimación de la eficiencia de colisión generada por esta teoría.

De acuerdo a la teoría de La Mer, se obtienen valores de eficiencia de colisión de entre 0.24 y 0.19 para concentraciones de 1.77 y 3.62 mg polímero / g SST cuando se realiza la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 755, mientras que según la teoría planteada por Hogg, se alcanzaría una eficiencia de colisión igual a la unidad con concentraciones que van desde 0.97 hasta 4.36 mg polímero /g SST.

Fue elegida como más adecuada la teoría propuesta por La Mer (1982), ya que al comparar las dos teorías empleadas para el cálculo de los factores de eficiencia de colisión, se pudo observar que la teoría propuesta por este autor, a pesar de ser considerada como una subestimación de estos factores⁽³⁰⁾, permite una estimación más precisa de la dosis óptima de polímero que debe emplearse en los procesos de coagulación-floculación de los lodos residuales.

Respecto a las determinaciones que se hacen a partir de los datos obtenidos con la teoría propuesta por Hogg (1984), se tiene que de acuerdo a ésta existe un rango bastante amplio de concentraciones dentro del cual la eficiencia de colisión es igual a uno, pero no permite hacer distinciones de mayor o menor eficiencia entre estos valores. La comparación de ambas teorías es mostrada de manera gráfica en las figuras VI.6 y VI.7.

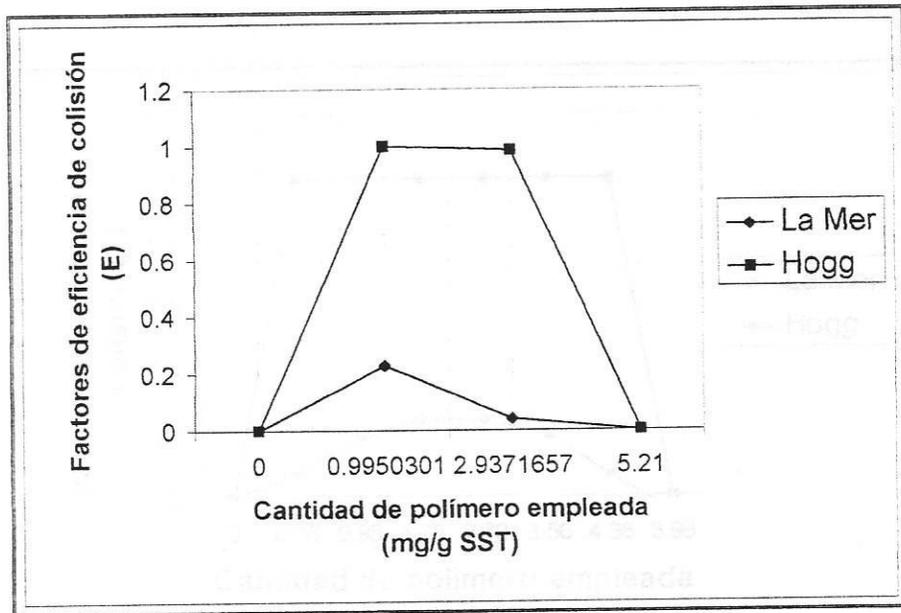


Figura VI.6 Comparación de los factores de eficiencia de colisión calculados para la floculación de lodos residuales secundarios con Percol 755, empleando la teoría de La Mer (1982) y de Hogg (1984).

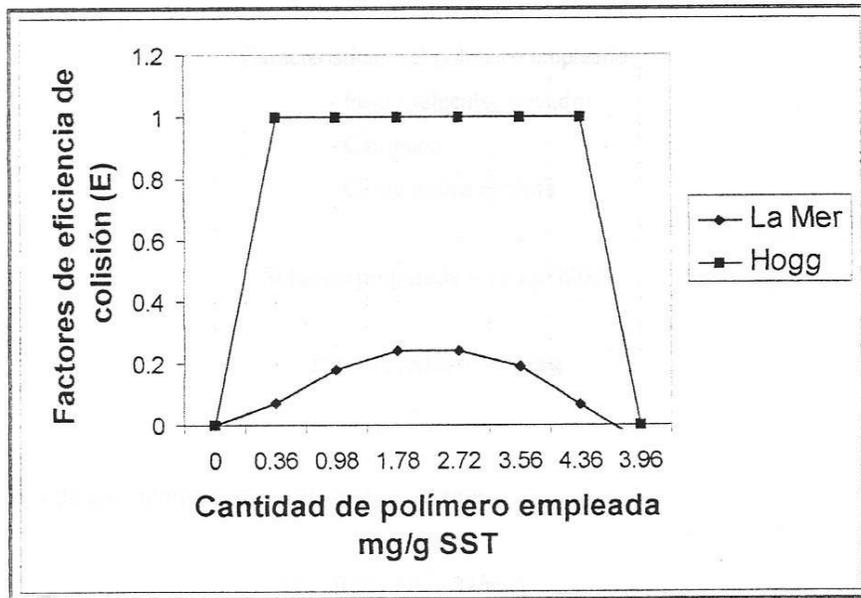


Figura VI.7 Comparación de los factores de eficiencia de colisión calculados para la floculación de lodos residuales crudos mixtos con Percol 755, empleando la teoría de La Mer (1982) y de Hogg (1984).

En lo que se refiere a la cantidad de polielectrolito empleada en la planta de tratamiento de aguas residuales RECICLAGUA, los datos proporcionados por esta empresa fueron:

Cantidad de polímero empleada = 83.6 kg/día

Características del polímero empleado:

- Peso molecular elevado
- Cationico
- Carga iónica elevada

Solución preparada = 11 kg/4200 l

Flujo de lodos = 9 l/seg.

A partir de esta información se calculó lo siguiente:

$$\text{Flujo} = \frac{9l}{\text{seg}} \left(\frac{3600 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right) \left(\frac{24 \text{ hrs}}{1 \text{ dia}} \right) = 777600l / \text{dia}$$

Dado que la concentración de sólidos suspendidos totales para lodos crudos mixtos es de

$$\text{SST} = 20.315 \text{ g/l}$$

Entonces se tendrá un flujo de sólidos de $15.796944 \times 10^6 \text{ g/día}$

La concentración de polímero empleada es entonces:

$$\frac{83.6 \text{ Kg} / \text{ día}}{15.7969 \times 10^6 \text{ g} / \text{ día}} = 5.29 \times 10^{-6} \text{ kg} / \text{ gSST} = 5.292168 \text{ mg polímero} / \text{ g SST}$$

De los resultados de eficiencias de colisión calculados para los lodos crudos mixtos en base a la teoría de La Mer, se puede observar que la mejor floculación, correspondiente a un factor de eficiencia de colisión igual a 0.24 se obtuvo con una concentración de 1.77 mg polímero / g SST para el Percol 755 y de 2.88 mg polímero / g SST para el Percol 757. De estos valores, la menor concentración corresponde a solo el 33.5% de la cantidad empleada actualmente en la planta de tratamiento de aguas residuales RECICLAGUA.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Al desarrollar la presente investigación, se conocieron características que distinguen a los lodos residuales y que los hacen ser un problema notable que debe controlarse, como el gran volumen de agua que contienen, la gran cantidad de materia orgánica que los conforma y el carácter putrescible de los mismos; estas propiedades, pudieron ser corroboradas durante el proceso de caracterización desarrollado.

Para reducir el problema relacionado con el gran volumen en que son producidos los lodos residuales, se adicionan a estos algunos agentes floculantes como los polielectrolitos. Con el fin de poder contar con bases teóricas para determinar las cantidades óptimas que deben emplearse se hace uso del factor de eficiencia de colisión, que permite determinar la cantidad de colisiones (o choques) entre partículas que permitirán que estas se unan para formar flóculos de mayor tamaño y con mayores velocidades de sedimentación.

Del desarrollo de las pruebas correspondientes y del análisis de resultados presentado en el apartado anterior, se concluye que:

- Un factor de gran influencia sobre la cantidad de polímero requerida para flocular cierto tipo de lodo, es el contenido de materia orgánica suspendida que esté presente, pues dada su afinidad al agua, mientras mayor contenido de materia orgánica presente un lodo, mayor cantidad de polímero se requerirá para que este alcance buenos niveles de floculación. Esto se demuestra con los resultados obtenidos en los diferentes procesos de coagulación-floculación; como ejemplo se tienen los datos de los cuadros VI.1 y VI.3, donde se puede ver que las cantidades de polímero empleadas para los lodos crudos mixtos corresponden en promedio a solo el 35% de las cantidades empleadas para los lodos secundarios.

- En lo que respecta al tipo de polímero que resulta adecuado para la floculación de lodos residuales, se encontró que los polímeros con mayor peso molecular producen mejores resultados de floculación con menores concentraciones, esto se vio reflejado en los resultados que muestran mejores niveles de floculación alcanzados con menores concentraciones de Percol 755, que las concentraciones de Percol 757 empleadas.
- Las mediciones de viscosidad de la fase líquida, obtenida de los lodos residuales floculados con algún polímero, resultaron ser un método adecuado para determinar la cantidad de polímero residual y a partir de esta poder determinar la fracción del área superficial cubierta. En la elección del método de viscosimetría a emplear, debe considerarse que para algunos de estos lodos, dada su complejidad, sobre todo respecto a su concentración, pueden presentar ciertas interferencias que impidan obtener resultados reales, por lo que debe buscarse un método que sea adecuado en cuanto a los resultados que se obtengan y a la exactitud de los mismos. Para este caso el método más adecuado resultó ser el equipo de viscosimetría Brookfield.
- La dosis óptima de polímero para la floculación de los lodos residuales se puede definir basándose en los factores de eficiencia de colisión calculados para cada caso; la mejor floculación se encontrará dentro de un rango de concentraciones de polímero empleadas, más que en un valor en puntual. Para el caso investigado el rango de concentraciones óptimas fue de 0.99 a 2.9 mg polímero / g SST para la floculación de lodos secundarios con Percol 755 y de 1.77 a 3.56 para la floculación de los lodos crudos mixtos con el mismo polímero.
- De las teorías empleadas para calcular los factores de eficiencia de colisión resultó más adecuada para la presente investigación la teoría propuesta por La Mer(1982), ya que permitió definir con mayor precisión las concentraciones que adicionadas a los lodos residuales producirían mayores niveles de floculación, mientras que la teoría propuesta

por Hogg (1984), aporta resultados muy burdos que no permiten una elección “fina” de las dosis óptimas para la floculación.

- La cantidad de polímero empleada actualmente en la planta de tratamiento de aguas residuales RECICLAGUA (5.3 mg polímero / g SST), es mayor a la cantidad que sería óptima para el proceso de floculación de los lodos crudos mixtos de acuerdo a los resultados encontrados en la presente investigación (1.77 mg Percol 755 / g SST); emplear las concentraciones aquí definidas como óptimas reduciría en más del 60% la cantidad de polímero empleado y permitiría obtener flóculos de características apropiadas para el proceso de deshidratación que se realiza posteriormente dentro de la misma planta, por lo que puede considerarse que la estimación de factores de eficiencia de colisión para la deshidratación de lodos residuales, es un método adecuado para definir las dosis óptimas requeridas en los procesos de floculación; el siguiente paso a considerar corresponde a la aplicación de las concentraciones encontradas en pruebas a nivel planta.

RECOMENDACIONES

El estudio de los factores de eficiencia colisión, en relación con los lodos residuales, es muy complejo, por lo que deberán seguirse desarrollando investigaciones al respecto.

Con el fin de mejorar el conocimiento en este campo, se considera necesario ampliar el estudio respecto a la aplicabilidad de diferentes métodos de viscosimetría en estas investigaciones, para identificar los factores que pudieran interferir, y de esta manera eliminarlos o bien controlarlos, pudiendo así aplicar métodos que permitan obtener mayores exactitud en los resultados obtenidos.

Así mismo es recomendable emplear otras teorías propuestas para el cálculo de los factores de eficiencia de colisión, como la desarrollada por Moudgil, 1991⁽³⁰⁾, en las que a partir de la determinación de sitios activos y no activos sobre la superficie de las partículas dispersas, puedan realizarse las estimaciones de factores de eficiencia de colisión correspondientes.

En lo que corresponde a la aplicabilidad de las concentraciones definidas como óptimas a partir de los cálculos de factores de eficiencia de colisión aquí desarrollados, deberán desarrollarse pruebas en la planta con concentraciones menores a las aplicadas actualmente (cuidando que las características de los polímeros empleados sean iguales que las de los polímeros aquí estudiados).

Con el fin de lograr un mejor entendimiento de los procesos de floculación de lodos residuales, alcanzar mejores niveles de eficiencia de colisión y facilitar la determinación de las dosis óptimas para los mismos, se considera adecuado incluir en estudios posteriores datos referentes a otros parámetros como la conductividad de los lodos y el efecto de variaciones en el pH de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Behl, Sanjay., Moudgil, B. Moudgil and T. S. Prakash. (1993) Control of Active Sites in Selective Flocculation. Selective Flocculation I, Academic Press, Inc. p.p. 414 – 421.
2. Bruus J.H. Nielsen P.H., Kieding K. (1992) On the Stability of Activated Sludge Flocs with Implications to Dewatering. Wat. Res. Vol. 26, No. 12, pp. 1597 – 1604.
3. Cheremisinoff Paul N. (1994) Sludge: Management and Disposal. Prentice Hall water and wastewater treatment guidebooks. Ed Prentice Hall. pp. 39 – 93.
4. Christensen, J.R., P.B. Sorensen, G.L. Christensen and J.A. Hansen. (1993) Mecahnisms for Overdosing in Sludge Conditioning. Journal of Environmental Engineering. Vol. 119, No. 1, pp. 159 – 171.
5. Coker C.S., Walden R.L., Shea T.G. and Brinker M.J. (1993) Dewatering Municipal Wastewater Sludge for Incineration. Water Environmental & Technology Vol. 28 No. 1 pp. 95 - 103
6. Colin F., Gazbar S. (1995) Distribution of Water in Sludges in Relation to their Mechanical Dewatering. Wat. Res., Vol. 29 No. 8, pp. 2000 – 2005.
7. Crawford, P. M. (1989) Optimizing Polymer Consumption in Sludge Dewatering Applications. International Symposium Solid/ Liquid separations. Ed. H.S. Muralidhara Batelle Press pp. 32 – 40.
8. Dentel S.K. and M.M. Abu-orf. (1993) Application of the Streaming Current Detector in Sludge Conditioner Selection and Control. Wat Sci. Tech. Vol. 28, No. 1 pp. 169 – 179.

9. Department of Health, New York State. (1994) Manual de Tratamiento de Aguas Negras. Ed. Limusa pp. 15 – 100.
10. Eriksson L. (1987) Conditioning of Biological Sludges with Cationic Polyelectrolites. Wat. Sci. Tech. Vol. 19, pp. 859 – 868.
11. Friedrich E., Friedrich H., Heinze W., Jobst K., Richter H.J. and W. Hermel. (1993) Progress in Characterization of Sludge Particles. Wat. Sci. Tech., Vol. 28, No. 1, pp. 145-148.
12. Groff Kimberly A. McLaughlin Lisa A. (1994) Sludge Management. Water Environment Research. Vol 66. No. 4 pp. 368-372.
13. Gutiérrez Domínguez Víctor Manuel. (1998) Encabeza RECICLAGUA Bonanza Ecológica a favor del Río Lerma parte II. Revista Pulso. Noviembre. pp. 9 –11.
14. Gutiérrez Domínguez Víctor Manuel. (1998) Sanear al Río Lerma, Titánica Labor de RECICLAGUA. Revista Pulso. Octubre. pp. 13 – 15.
15. Hashimoto M., M. Hiraoka. (1990) Characteristics of Sewage Sludge Affecting Dewatering by Belt Press Filter. Wat. Sci. Tech. Vol. 22 No. 12 pp. 143-152.
16. Healy, T.W. and La Mer, V.K. (1982) J. Phys. Chem., Vol. 66 pp. 589 – 603.
17. Hogg R. (1984) Collision Efficiency Factors for Polymer Flocculation. Journal of Colloid and Surface Science. Vol. 102, No. 1, pp. 232 – 236.

18. Hogg R. (1999) The Role of Polymer Adsorption Kinetics in Flocculation. *Colloids and Surfaces. A: Physicochem. Eng. Aspects* 146. pp. 253 – 263.
19. Kim, Yong H. (1989) Importance of Flocculant Preparation for use in Solid/Liquid Separation. *International Symposium Solid/ Liquid separations*. Ed. H.S. Muralidhara Batelle Press pp. 289 – 304
20. Kimberly A. Groff, Lisa A. McLaughlin. (1994) Sludge Management. *Water Environment Research*. Vol. 66. No. 4 pp. 368 – 372.
21. Langer S.J., Klute R. (1993) Rapid Mixing in Sludge Conditioning with Polymers. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 28. No. 1, pp. 233 – 242.
22. Lee, Shun Yin and Gregory, J. (1991) The Effect of Charge Density and Molecular Mass of Cationic Polymers on Flocculation Kinetics in Aqueous Solution. *Water Supply* Vol. 9, pp. 11 – 17.
23. Luther H. Hendrix. (1976) Softening Water With Polymers Reduces Costs And Sludge. *Water and Sewage works*. February pp. 65 – 67.
24. Marklund S. (1998) Dewatering of Sludge by Natural Methods. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 22 No. 3/4 pp. 239-246.
25. Maron Samuel H., Prulton Carl F. (1996) *Fundamentos de fisicoquímica*. Limusa Noriega Editores pp. 823 – 834.
26. Metcaf & Eddy. (1994) *Ingeniería Sanitaria, Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Agua Residuales*. Ed. Labor S.A. 2a. ed. pp. 629 – 761.

-
27. Molski A. (1989) On the Collision Efficiency Approach to Flocculation. *Colloid and Polymer Science*. Vol. 267, No. 4, pp. 371 – 375.
 28. Montgomery J.M. Consulting Eng., Inc. (1985) *Water Treatment Principles & Design* Ed. Wiley Interscience. pp. 129 – 132.
 29. Moudgil B.E. Springgate and T.V. Vasudevan. (1989) Characterization of flocs for Solid/Liquid Separation processes. *International Symposium: Solid/Liquid separation. Waste Management and productivity Enhancement*, Ed. H.S. Muralidhara. pp. 245 – 253.
 30. Moudgil B.M., S. Behl. (1991) A model of the selective flocculation process. *Journal of colloid and interface science*. Vol. 146, No. 1 pp. 1 – 8.
 31. Moudgil, B.M., B.D. Shah and H.S. Soto. (1987) Collision Efficiency Factors in Polymer Flocculation of Fine Particles. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 119, No. 2, pp. 466 – 473.
 32. Moudgil, Brij M. and Behl, Sanjay. (1995) Flocculation in solid-liquid separation process. *Flotation Science and Engineering*. Ed. Marcel Dekker, Inc. pp. 415 – 439.
 33. Obón Ejarque Ramón. (1996) Deshidratación de fangos. *Enero*, Num.147. pp. 54 – 59.
 34. Outwater A.B. (1994) *Sludge: Management and Disposal, Reuse of Sludge and Minor Wastewater Residuals*. Crc Press Inc. pp. 61 – 99.
 35. Ping-Jyh, Der-Po Lin. (1992) On the collision efficiency in polymer flocculation of colloidal particles, *Colloid Polymer Science*. Vol. 270, No. 1, pp. 48 – 52.

36. Samuel Faust D., Osman M. Aly. (1998) Chemistry of Water Treatment. 2nd ed. Ed. Ann Arbor Press. pp. 217 – 266.
37. Schowoyer, William L.K. (1981) Polyelectrolites for water and wastewater treatment. CRC. Press. Inc. United States. pp. 160-209.
38. Sludge Stabilization, Thickening and Dewatering. (1999) Technical Data. Nalco Chemical Company. Section 1.3.5 – 1.3.7. pp. 1 – 31.
39. Smollen M. (1990) Evaluation of municipal sludge drying and dewatering with respect to sludge volume reduction. Wat. Sci. Tech. Vol. 22, No. 12, pp. 153-161.
40. Sorensen, B.L. and R.J. Wakeman. (1996) Filtration Characterization and Specific Surface Area Measurement of Activated Sludge by Rhodamine B Adsorption. Wat. Res., Vol 30. No. 1, pp. 115 – 121.
41. Stone and Webster. (1992) Sludge Management: one City's long term plan. W.W.I. Vol. 25. No. 1, pp. 78 – 90.
42. Vesilind P. Aarne. (1994) The Role of Water in Sludge Dewatering. Water Environment Research. Vol. 66 No. 1. pp. 4 – 11.
43. Water Environment Research Foundation. (1995) Polymer Characterization and Control in Biosolids Management. Project 91-ISP-5. pp. 98 – 103.

ANEXOS

ANEXO 1
RESULTADOS DEL PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DE
LODOS RESIDUALES

Pruebas desarrolladas en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas residuales RECICLAGUA.

Fecha: 18/01/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|----------------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 6.8 | 16 | 31380 | 10080 | 21300 |
| Lodos secundarios | 7.54 | 19 | 8960 | 2020 | 6940 |
| Lodos mixtos crudos | 7.28 | 17 | 22780 | 6860 | 15920 |

Fecha: 21/01/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|----------------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 7.17 | 24 | 25020 | 7080 | 17940 |
| Lodos secundarios | 7.93 | 24 | 105080 | 2000 | 8580 |
| Lodos mixtos crudos | 7.12 | 22 | 24540 | 6980 | 17560 |

Fecha: 25/01/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|---------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 7.34 | 20 | 19940 | 5940 | 14000 |
| Lodos secundarios | 7.65 | 20 | 9440 | 1980 | 7460 |
| Lodos mixtos crudos | 7.32 | 17 | 17720 | 4660 | 13060 |

Fecha: 28/01/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|---------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 6.07 | 19 | 23105 | 6955 | 16150 |
| Lodos secundarios | 6.76 | 19 | 8266 | 1729 | 6537 |
| Lodos mixtos crudos | 6.22 | 18 | 19315 | 5604 | 13711 |

Fecha: 01/02/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|---------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 7.35 | 20 | 24545 | 7180 | 17365 |
| Lodos secundarios | 7.92 | 24 | 6160 | 1400 | 4760 |
| Lodos mixtos crudos | 7.12 | 22 | 16220 | 5080 | 11140 |

Fecha: 04/02/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|---------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 6.97 | 19 | 24545 | 7180 | 17365 |
| Lodos secundarios | 7.70 | 19 | 9340 | 2000 | 7340 |
| Lodos mixtos crudos | 7.35 | 18 | 33120 | 13760 | 19360 |

Fecha: 08/02/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|---------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 7.16 | 21 | 19640 | 6000 | 13640 |
| Lodos secundarios | 7.77 | 17 | 7820 | 1860 | 5960 |
| Lodos mixtos crudos | 7.21 | 20 | 29810 | 10365 | 19445 |

Fecha: 11/02/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|---------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 8.07 | 21 | 25105 | 7557 | 17548 |
| Lodos secundarios | 7.72 | 20 | 7240 | 1240 | 6000 |
| Lodos mixtos crudos | 8.22 | 20 | 21315 | 6183 | 15132 |

Fecha: 15/02/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|---------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 6.74 | 22 | 33100 | 10020 | 23080 |
| Lodos secundarios | 7.78 | 22 | 2200 | 560 | 1640 |
| Lodos mixtos crudos | 6.99 | 21 | 41700 | 15360 | 26340 |

Fecha: 18/02/00

| | pH | Temperatura °C | SST mg/L | SSF mg/L | SSV mg/L |
|---------------------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Lodos primarios | 7.04 | 24 | 20460 | 6710 | 13750 |
| Lodos secundarios | 7.88 | 20 | 8620 | 1720 | 6900 |
| Lodos mixtos crudos | 7.40 | 18 | 24320 | 7640 | 16680 |