

31



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA

“EFECTO DEL GRADIENTE Y TIEMPO DE MEZCLADO  
CADA ETAPA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PRIMARIO AVANZADO”

T E S I S

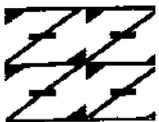
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

JUAN CARLOS SÁNCHEZ JAIMES

U N A N  
F E S  
Z A R A G O Z A



LO HUMANO ES  
DE NUESTRA ESPECIE

NOVIEMBRE 2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## DEDICATORIAS

*La fe, llena de esperanza al ser para alcanzar sus ideales.*

*A Dios por su guía, protección y darme el don de la vida.*

*A mis padres: Ma. De los Angeles Jaimes y Juan Sánchez por su ejemplo constante, cariño y amor incondicional, apoyo en todo momento y la confianza que tuvieron en mí, y la motivación que me dieron día tras día, MIL GRACIAS.*

*A mis hermanos y a las personas que estuvieron en convivencia contante que también de ustedes aprendí Ma. de Jesús, Ma. Guadalupe, Ignacio, Miguel Angel, José Antonio, Rene, Juan, Carmen., Lenin, Tania, Stefanny, Argenis y Carmina.*

*A ti Elizabeth V. A. por permitir estar compartiendo contigo tantas cosas hermosas, por motivarme a seguir adelante, por estar siempre allí en el momento justo y por confiar en mí. TE QUIERO.*

*Si el mundo es pequeño para tus sueños, mira que no sea demasiado grande para tus acciones.*

*Cervantes.*

# AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por mi formación académica.*

*A las personas del jurado que emplearon parte de su tiempo en la revisión de este trabajo para que así fuera más completo.*

*Presidente: Q. Patricia Sánchez García-Figueroa  
Vocal: M. en I. Alma C. Chávez Mejía  
Secretario: I. Q. Arturo Méndez Gutiérrez  
Suplente: I. Q. Balbina Patricia García Aguilar  
Suplente: I. Q. Dominga Ortiz Bautista*

*Al Instituto de Ingeniería por permitirme realizar este trabajo en sus instalaciones.*

*A todos mis familiares por tener momentos tan inolvidables y apoyarme en todo lo que pudieron.*

*A la Familia Araiza Castañeda por brindarme su amistad, su apoyo y confianza, y a ti Fernando por ser mi Amigo y darme tu apoyo cuando lo he necesitado.*

*A la Familia Serrano Liceaga por brindarme su confianza y por ser tan amables y a ti Jessica por ayudarme en todo, comprenderme y por ser mi Amiga.*

*A Ana María Gálvez Ortiz, Irma Mora Perdomo, González Peña Oscar, Alicia León López, Uribe Montiel Angélica, López Guadarrama Xochitlpilli, Carlos Díaz Gómez, Almendra Cárdenas Herrera, Javier Pérez Luna, Chán Vázquez Esther, Luis Humberto Sánchez Rodríguez... y más por tener muy buenos recuerdos y tener una estancia excelente en la FES Zaragoza.*

*A todas las personas que integran el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería, gracias por su apoyo y ayuda.*

*Y a todas esas personas que también me apoyaron tanto en laboratorio y me echaron la mano cuando lo necesite, gracias.*

# CONTENIDO

	página
<b>NOMENCLATURA</b>	I
<b>LISTA DE TABLAS</b>	II
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	III
<b>RESUMEN</b>	IV
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2 OBJETIVO</b>	4
<b>3 METAS</b>	5
<b>4 ANTECEDENTES</b>	
4.1 Procesos de coagulación-floculación	6
4.1.1 Historia de la coagulación	7
4.1.2 Floculación	7
4.1.3 Sedimentación	8
4.2 Factores que influyen en la coagulación	9
4.2.1 Aplicación de la energía cinética al agua	11
4.2.1.1 <i>Efecto de la velocidad y tiempo de mezcla en las diferentes cámaras</i>	11
4.2.1.2 <i>Gradiente y tiempo de mezcla rápida</i>	12
4.2.1.3 <i>Gradiente y tiempo de mezcla lenta</i>	13
4.3 Coagulantes y floculantes más utilizados en los procesos fisicoquímicos	15
4.4 Policloruros de aluminio (PAX)	16
4.5 Sistemas coloidales (clasificación)	18
4.5.1 Forma de los coloides	19
4.5.2 Modelo de la doble capa	20
4.5.3 Balance de repulsión y de atracción	21
4.5.4 Cálculo del potencial zeta	23
4.5.5 El significado del potencial zeta en la coagulación	25
4.6 Tratamiento Primario Avanzado	27

## 5 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.1	Muestreo del agua residual	31
5.2	Comparación entre la eficiencia de remoción para sulfato de aluminio y PAX XL-60	32
5.3	Determinación del efecto de la velocidad y tiempo de contacto en la etapa de coagulación	33
5.3.1	Diseño experimental	33
5.4	Determinación del efecto de la velocidad y tiempo de contacto en la etapa de floculación	35
5.4.1	Diseño experimental	35
5.5	Determinación del efecto del gradiente y la dosis de floculante aplicado(1.0 y 2.5 mg/L) durante la etapa de floculación	36
5.5.1	Diseño experimental	36
5.6	Cálculo del gradiente	38

## 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1	Comparación entre la eficiencia de remoción para sulfato de aluminio y PAX XL-60	41
6.2	Determinación del efecto de la velocidad y tiempo de contacto durante la etapa de coagulación	45
6.2.1	Análisis estadístico	49
6.2.1.1	<i>Comparación de la idoneidad del modelo</i>	49
6.2.1.2	<i>Análisis de variancia (ANOVA)</i>	50
6.2.1.3	<i>Comparaciones múltiples</i>	51
6.2.2	Comparación de 50 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ y 30 mg/L de PAX XL-60 y bajo las mejores condiciones de gradiente y tiempo	51
6.3	Determinación del efecto de la velocidad y tiempo de contacto durante la etapa de floculación	52
6.3.1	Análisis estadístico	55
6.3.1.1	<i>Comprobación de la idoneidad del modelo</i>	55
6.3.1.2	<i>Análisis de variancia</i>	58
6.3.1.3	<i>Comparaciones múltiples</i>	58
6.3.2	Comparación de 50 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ y 30 mg/L de PAX XL-60 y bajo las mejores condiciones de gradiente y tiempo	59
6.4	Evaluación de la dosis para un polímero aniónico y las mejores condiciones de gradiente y tiempo de contacto	60
6.4.1	Análisis de variancia	64
6.5	Caracterización y determinación del lodo producido con las mejores condiciones de operación	71
6.6	Remoción de microorganismos con base en los gradientes utilizados	73

<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN</b>	<b>76</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>GLOSARIO</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>RESULTADOS TOTALES DETERMINADOS DURANTE LA ETAPA DE COAGULACIÓN</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO 2</b>	<b>RESULTADOS TOTALES DETERMINADOS DURANTE LA ETAPA DE FLOCULACIÓN</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO 3</b>	<b>ANÁLISIS DE VARIANCIA</b>	<b>110</b>

# I. NOMENCLATURA

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Sulfato de aluminio
ANOVA	Análisis de variancia
AR	Agua residual
CF	Coliformes fecales
Color (A)	Color aparente
Color (R)	Color real
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
$\text{DQO}_t$	Demanda química de oxígeno total
Efl	Efluente
$\text{FeCl}_3$	Cloruro férrico
$H_0$	Hipótesis nula
$H_1$	Hipótesis alterna
ha	Hectáreas
HH	Huevos de helminto
Inf	Influente
mg/L	Miligramos por litro
min	Minuto
mm	Milímetros
$\eta$	Eficiencia
NMP	Número más probable
P	Fósforo
PAX XL-60	Polícloruro de aluminio
P Redox	Potencial Redox
Prosifloc A-252	Polielectrólito anionico de alto peso molecular
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo
$\text{s}^{-1}$	Gradiente, 1/segundo
SDT	Sólidos disueltos totales

NOMENCLATURA

SST	Sólidos suspendidos totales
STT	Sólidos totales totales
STF	Sólidos totales fijos
STV	Sólidos totales volátiles
TPA	Tratamiento primario avanzado
UNT	Unidades nefelométricas de turbidez

## II. LISTA DE TABLAS

página

<b>Tabla 1</b>	Tiempo de sedimentación de las partículas	8
<b>Tabla 2</b>	Datos técnicos del sulfato de aluminio	16
<b>Tabla 3</b>	Datos técnicos del policloruro de aluminio	17
<b>Tabla 4</b>	Configuración de los tratamientos físicoquímicos	29
<b>Tabla 5</b>	Parámetros determinados en el agua residual tratada, ART	33
<b>Tabla 6</b>	Diseño experimental para la etapa de coagulación	34
<b>Tabla 7</b>	Diseño experimental, etapa de floculación	36
<b>Tabla 8</b>	Determinación de los $s^{-1}$ (temperatura del agua a 20° C)	40
<b>Tabla 9</b>	Comparación de la calidad producida para los dos coagulantes estudiados, bajo la dosis óptima recomendada	45
<b>Tabla 10</b>	Análisis de variancia, etapa de coagulación	50
<b>Tabla 11</b>	Nivel de significancia entre los tratamientos (método al 95% de significancia)	51
<b>Tabla 12</b>	Comparación entre los dos coagulantes empleados y su capacidad de remoción	52
<b>Tabla 13</b>	Análisis de variancia, gradiente-tiempo	58
<b>Tabla 14</b>	Análisis de intervalos múltiples con 95% de significancia	59
<b>Tabla 15</b>	Comparación entre dos coagulantes empleados y su capacidad de remoción en la etapa de floculación	60
<b>Tabla 16</b>	Remoción al incrementar la dosis de polímero orgánico para las mejores condiciones en el tratamiento del agua residual	62
<b>Tabla 17</b>	Calidad del agua residual cruda (ARC) y tratada (AT) con diversas condiciones (gradiente y tiempo) y dosis de polímero de 1.0 y 2.5 mg/L	64
<b>Tabla 18</b>	Análisis de variancia, gradiente-tiempo (1.0 mg/L de polímero)	65
<b>Tabla 19</b>	Análisis de variancia, gradiente-tiempo (2.5 mg/L polímero)	65
<b>Tabla 20</b>	Análisis de intervalos múltiples (1.0 mg/L) con 95% de significancia	66
<b>Tabla 21</b>	Análisis de intervalos múltiples (2.5 mg/L) con 95% de significancia	67
<b>Tabla 22</b>	Cantidad y calidad de volumen producido en un TPA con diversas condiciones de operación	72
<b>Tabla 23</b>	Contenido de lodo de acuerdo a la dosis y tipo de coagulante aplicado	73
<b>Tabla 24</b>	Contenido de microorganismos en el agua tratada con diversas condiciones de operación	74
<b>Tabla 25</b>	Contenido de microorganismos con base en el tipo de coagulante y la dosis aplicada	75

### III. LISTA DE FIGURAS

página

<b>Figura 1</b>	Formas de los coloides en el agua residual	19
<b>Figura 2</b>	Visualización de la doble capa	21
<b>Figura 3</b>	Curva de energía neta de interacción	23
<b>Figura 4</b>	Mecanismos de desestabilización de las partículas y del crecimiento de los flóculos	26
<b>Figura 5</b>	Control del potencial zeta sobre la dosis de sulfato de aluminio	27
<b>Figura 6</b>	Diagrama de flujo de las diversas formas de tratamiento fisicoquímico	30
<b>Figura 7</b>	Emisor central	31
<b>Figura 8</b>	Equipo de prueba de jarras y dimensiones del mismo	38
<b>Figura 9</b>	Curva de calibración de la velocidad del gradiente	40
<b>Figura 10</b>	Concentración de SST alcanzada con diversas dosis de sulfato de aluminio anhidro y PAX XL-60 en siete ensayos	42
<b>Figura 11</b>	Concentración de turbiedad alcanzada con diversas dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y PAX XL-60	43
<b>Figura 12</b>	Concentración de DQO <sub>t</sub> alcanzada con diversas dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y PAX XL-60	43
<b>Figura 13</b>	Remoción de SST aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de coagulación	47
<b>Figura 14</b>	Remoción de DQO <sub>t</sub> aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de coagulación	48
<b>Figura 15</b>	Remoción de turbiedad aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de coagulación	48
<b>Figura 16</b>	Representación de idoneidad en los resultados	50
<b>Figura 17</b>	Remoción de SST aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de floculación	53
<b>Figura 18</b>	Remoción de turbiedad aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de floculación	54
<b>Figura 19</b>	Remoción de DQO <sub>t</sub> aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de floculación	54
<b>Figura 20</b>	Distribución normal de los residuos para la etapa de floculación	56
<b>Figura 21</b>	Homocedasticidad de los residuos para el factor gradiente	56
<b>Figura 22</b>	Homocedasticidad de los residuos para el factor tiempo	57
<b>Figura 23</b>	Independencia de los residuos para el factor gradiente	57
<b>Figura 24</b>	Remoción de contaminantes al aplicar diversas dosis de polímero	61
<b>Figura 25</b>	Promedios con intervalos de la Mínima Diferencia Significativa a partir del gradiente utilizado	67
<b>Figura 26</b>	Promedios con intervalos de la mínima diferencia significativa a partir del tiempo utilizado	68
<b>Figura 27</b>	Distribución normal de los residuos	69
<b>Figura 28</b>	Homocedasticidad de los residuos para el factor gradiente	70
<b>Figura 29</b>	Homocedasticidad de los residuos para el factor tiempo	70
<b>Figura 30</b>	Independencia de los residuos para el factor gradiente	71

## IV. RESUMEN

En el tratamiento del agua y agua residual la eliminación de una gran parte de impurezas se lleva a cabo por sedimentación. Sin embargo, debido a que muchas impurezas son demasiado pequeñas para obtener un proceso de eliminación eficiente por sedimentación basado sólo en la gravedad, es preciso llevar a cabo la agregación de estas partículas en agregados de mayor tamaño y más fácilmente decantables con el fin de obtener una separación satisfactoria por sedimentación (Weber, 1979). En todo proceso fisicoquímico, la coagulación y la floculación son las etapas más importantes del sistema, debido a que un buen manejo de ambas permite la formación de aglomerados, incremento de su tamaño y permite que la sedimentación se lleve a cabo con más rapidez. El tratamiento óptimo del agua residual implica garantizar que cada proceso se desarrolle satisfactoriamente.

En este estudio se determinó el efecto del gradiente tanto en la etapa de coagulación como en la floculación en función del tiempo de contacto para dos tipos de coagulantes (sulfato de aluminio y policloruro de aluminio) en un sistema fisicoquímico utilizado para tratar un agua residual doméstica y con fines de reúso agrícola. El proceso simulado (prueba de jarras) consistió en un Tratamiento Primario Avanzado (TPA). El agua residual utilizada provino de una de las salidas del drenaje de la Ciudad de México (Emisor Central). Para determinar la mínima dosis bajo la cual se obtiene la calidad de agua para riego agrícola sin restricción (NOM 001/ECOL-96). Se estudiaron dosis de 20, 30, 40 y 50 mg/L para ambos coagulantes y se acompañaron de 1.0 mg/L de polímero aniónico. El influente presentó una concentración de sólidos suspendidos totales (SST) de 330 mg/L, una demanda química de oxígeno total ( $DQO_t$ ) de 604 mg/L y turbiedad de 284 UNT. La dosis óptima recomendada para el policloruro de aluminio (PAX XL-60) y el sulfato de aluminio  $[Al_2(SO_4)_3]$  fueron de 30 y 50 mg/L respectivamente. En el primer caso se alcanzó a remover los SST en un 90.4 por ciento, la  $DQO_t$  en 63.8 por ciento y la turbiedad en 90.7 por ciento. Mientras que con el segundo coagulante se produjo una remoción para SST del 88.2 por ciento, la  $DQO_t$  del 58.4 por ciento y la turbiedad del 89.5 por ciento.

Durante el estudio del efecto gradiente y tiempo en la etapa de coagulación se estudiaron gradientes de 183, 336 y 520  $s^{-1}$  con tiempos de contacto de 5, 10, 20, 30, 40 y 60 s. El

análisis estadístico mostró que el tiempo tienen que se aplique durante esta etapa es la que presentó un efecto significativo durante el proceso de tratamiento. El gradiente de  $336 \text{ s}^{-1}$  y 30 s es el tratamiento que presentó una diferencia significativa por lo que se considera la mejor condición para reducir el contenido de SST. En efecto, bajo estas condiciones y aplicando una dosis de 50 mg/L de sulfato de aluminio, se obtuvo una remoción de SST del 83.1 por ciento, turbiedad del 87.4 por ciento y  $\text{DQO}_t$  del 64.2 por ciento. Por otro lado, para estas condiciones pero con 30 mg/L de PAX XL-60 se obtuvo una remoción para los SST de 84 por ciento, la Turbiedad del 86.8 por ciento y la  $\text{DQO}_t$  del 60 por ciento.

Para el estudio del efecto del gradiente y tiempo de contacto durante la etapa de floculación se evaluaron gradientes de 10, 20, 50 y  $55 \text{ s}^{-1}$  con tiempos de contacto de 2, 5, 10 y 20 min. El análisis estadístico mostró que el gradiente aplicado tuvo un efecto significativo durante el tratamiento del AR. Con el gradiente de  $55 \text{ s}^{-1}$  y un tiempo de 5 min se encontraron las mejores condiciones para la disminución de SST. Bajo estas condiciones y aplicando dosis de sulfato de aluminio de 50 mg/L, se obtuvieron remociones de SST del 73.3 por ciento, turbiedad del 82.4 por ciento y  $\text{DQO}_t$  del 53.1 por ciento, bajo las mismas condiciones de gradiente pero con la dosis de 30 mg/L de PAX XL-60 se obtuvo una remoción para los SST de 85.6 por ciento, turbiedad del 84.6 por ciento y  $\text{DQO}_t$  de 51.4 por ciento.

Para el estudio del efecto de la dosis de polímero aniónico de alto peso molecular se evaluaron gradientes de 10, 20, 50 y  $55 \text{ s}^{-1}$  con dosis de 1.0 y 2.5 mg/L. Obteniendo que al aplicar un gradiente de  $10 \text{ s}^{-1}$  se incrementó el tiempo de contacto aumentó la calidad del efluente, pero cuando se incrementó el gradiente a 20, 50 y  $55 \text{ s}^{-1}$  las eficiencias no dependieron del tiempo de contacto sino de la fuerza que se aplicó, observándose el mismo comportamiento cuando se utilizan dosis de polímero de 1.0 y 2.5 mg/L, obteniéndose remociones muy semejantes tanto de SST (73 vs 76 por ciento), turbiedad (83 vs 79 por ciento) y  $\text{DQO}_t$  (52 vs 49 por ciento).

En cuanto a la calidad microbiológica, independientemente de las condiciones de gradiente, tiempo aplicado y tipo de coagulante, el sistema TPA removió los huevos de helminto en un intervalo de 0.4 hasta 2.0 HH/L, mientras que los coliformes fecales y las Salmonellas se reducen a  $10^7$  y  $10^5$  NMP/100 mL respectivamente. Estos valores nos indican que la

concentración de huevos de helminto se encuentra por debajo del límite máximo permisible para las descargas vertidas al suelo (uso en riego agrícola restringido). Por otro lado la concentración de coliformes fecales y salmonella permanece a niveles superiores a los establecidos por la norma, por lo cual deberá usar un sistema de desinfección seguido del tratamiento fisicoquímico para asegurar la calidad microbiológica establecida en dicha norma.

El volumen de lodo producido en el sistema de TPA fue dependiente del tipo y dosis de coagulante aplicado, en todos los casos se alcanzó una concentración de sólidos totales (ST) de 1 a 2 porciento, de los cuales el 65 porciento correspondió a la forma volátil y el 35 porciento a la forma fija.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Uno de los retos más urgentes por resolver hoy en día en nuestro país, es la escasez de agua para usos doméstico e industrial. Considerando que el riego es una de las actividades de mayor demanda del vital líquido, el reúso para este fin es de sumo interés en el 75% de la superficie de zonas áridas y semiáridas. En efecto, la reutilización de las aguas residuales permite la conservación del recurso pero debe realizarse en forma tal que no dañe la salud de la población, ni altere el ambiente. En el caso de la agricultura, el empleo del agua de desecho tiene la ventaja de aportar nutrientes y materia orgánica al suelo incrementando con ello su productividad, pero constituye un medio de diseminación de enfermedades debido principalmente al contenido microbiológico (huevos de helminto) (Cifuentes *et al.*, 1992, Schwartzbrod *et al.*, 1989).

En el Valle de México se producen en promedio 45 m<sup>3</sup>/s de agua residual que es la mezcla de las descargas domésticas, industriales y comerciales. Además el drenaje conduce otros 13 m<sup>3</sup>/s (promedio anual) de agua de lluvia confiriéndole una alta variabilidad a las descargas, tanto en calidad como en cantidad a lo largo del año. El destino final de las descargas es el Valle del Mezquital (ubicado al norte del país) en donde son utilizadas para el riego de 90 000 ha. El incremento de enfermedades gastrointestinales debido al empleo de aguas residuales sin tratamiento para riego agrícola ha promovido el desarrollo de estándares más estrictos para los efluentes destinados a cualquier reúso (Cifuentes *et al.*, 1992).

Las impurezas en el agua residual varían en tamaño en aproximadamente seis ordenes de magnitud, desde unos pocos angstroms para sustancias solubles hasta unos pocos cientos de micrones para materia en suspensión. El tratamiento del agua y agua residual y la eliminación de una proporción de impurezas se lleva a cabo por sedimentación; sin embargo, debido a que muchas impurezas son demasiado pequeñas para obtener un proceso de eliminación eficiente por sedimentación basado sólo por gravedad, es preciso llevar a cabo la agregación de estas partículas en agregados de mayor tamaño y más fácilmente decantables

con el fin de obtener una separación satisfactoria de sólidos en el agua residual (Weber, 1979).

Para tratar las aguas residuales existen tres alternativas de tratamiento: los procesos físicos, que dependen esencialmente de las propiedades físicas de las impurezas, como tamaño de la partícula contaminante, peso específico, viscosidad, etc., (ejemplo: la desarenación, el cribado, la sedimentación y la filtración); los procesos químicos, que dependen de las propiedades químicas de las impurezas (ejemplo: coagulación, precipitación e intercambio iónico) y los procesos biológicos, que utilizan reacciones bioquímicas para la remoción de impurezas solubles o coloidales (normalmente sustancias orgánicas biodegradables; ejemplo: filtros percoladores, lodos activados, discos rotatorios y lagunas de estabilización). Este estudio sólo se enfoca al conocimiento de los procesos fisicoquímicos.

Dentro de los procesos fisicoquímicos se destaca el Tratamiento Primario Avanzado que es una tecnología que permite tratar agua residual a un nivel compatible con las necesidades de riego agrícola a un costo que se supone difícilmente logrado por otros procesos.

Una de las consideraciones más importantes que se deben tomar en cuenta en el proceso de tratamiento fisicoquímico es la rapidez con que se dispersan los coagulantes en el agua por lo cual podemos distinguir como variables importantes: los gradientes de la mezcla rápida, los gradientes de la mezcla lenta y los tiempos de mezclado de ambos.

La importancia de la mezcla rápida es lograr una distribución veloz y homogénea de los reactivos que se agregan al agua para incrementar el número posible de colisiones entre las partículas. Para lo cual se establece que la dosis óptima de reactivos en soluciones acuosas tiende a depender de las condiciones de mezclado. Por su parte el gradiente de energía óptimo para la mezcla rápida, depende de factores tales como la concentración de las partículas, el tipo de reactivos y las características de la unidad de mezcla. Si las condiciones de mezcla del agua no son adecuadas, entonces no se logrará una buena distribución de los reactivos y el consumo será elevado.

La importancia de la mezcla lenta es la aglomeración de las partículas ya desestabilizadas, así como el incremento de su tamaño, lo cual favorece que la sedimentación se lleve a cabo con más rapidez; por tanto, el tratamiento óptimo del agua residual implica que cada una de estas etapas se desarrolle satisfactoriamente.

Por una parte los gradientes no deben ser muy pequeños ya que no favorecen la aglomeración de los sólidos suspendidos y no se observa floculación y por otra parte la aplicación de niveles de energía mayores puede reflejarse en un decremento de la efectividad del proceso (la optimización de las condiciones de operación es la base para conocer cada variable que afecta su operación y diseño).

El presente trabajo está enfocado al estudio de las diversas variables (gradientes, tiempos de contacto tanto en la etapa de coagulación como en la de la floculación, tipo de coagulante y dosis de floculante) que afectan el desempeño del sistema de Tratamiento Primario Avanzado que se emplea para producir una calidad de agua destinada para riego agrícola de acuerdo a los estándares establecidos por la NOM-001 ECOL/1996, ya que con un buen conocimiento de los factores que afectan el sistema, es factible optimizar el proceso (gradiente y tiempo) así como la dosis de coagulante y floculante reduciendo los costos de inversión, operación y mantenimiento en una planta de tratamiento de aguas residuales.

## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVO**

Determinar el efecto del gradiente y tiempo de mezclado en cada una de las etapas que componen un proceso de tipo tratamiento primario avanzado (TPA) que se utiliza para tratar el agua residual con fines de reúso agrícola.

# CAPÍTULO 3

## METAS

- ⇒ Definir el efecto del tipo y dosis de coagulante en un TPA.
- ⇒ Determinar el efecto de aplicación de tres gradientes (183, 336 y 520  $s^{-1}$ ) y seis tiempos de contacto (5, 10, 20, 30, 40 y 60 s) empleados durante la etapa de coagulación de un sistema de TPA.
- ⇒ Determinar el efecto de aplicación de cuatro gradientes (10, 20, 50 y 55  $s^{-1}$ ) y cuatro tiempos de contacto (2, 5, 10 y 20 min) empleados durante la etapa de floculación de un sistema de TPA.
- ⇒ Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes cuando se aplican 1.0 y 2.5 mg/L de polímero y diversos gradientes y tiempos de contacto durante la etapa de floculación.
- ⇒ Evaluar la calidad fisicoquímica del agua residual tratada obtenida con base en las diversas condiciones del tratamiento aplicado.
- ⇒ Determinar la cantidad y calidad del lodo en el sistema.

# CAPÍTULO 4

## ANTECEDENTES

### 4.1. Procesos de coagulación-floculación

La coagulación consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. El proceso comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura únicamente fracciones de segundo (Weber, 1979).

Por otro lado, la floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores (Weber, 1979).

De acuerdo con Arboleda, 1981, se le llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas flóculos. Dicho proceso se usa para:

- a) Remoción de los SST.
- b) Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- c) Remoción de color verdadero y aparente.
- d) Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- e) Destrucción de algas y plancton en general.
- f) Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos en otros.

La coagulación y la floculación intervienen generalmente en el tratamiento de aguas destinadas al abastecimiento público y en la preparación de aguas industriales de fabricación.

En el tratamiento de aguas residuales urbanas, con frecuencia es tal la concentración de materia en suspensión que puede conseguirse una floculación mediante simple agitación, pero con el fin de favorecer este proceso se añaden coagulantes (Degrémont, 1979).

#### **4.1.1. Historia de la coagulación**

La primera patente de coagulación fue otorgada en 1884 a Isaiah Smith Hyatt, quien, siguiendo una sugerencia de H. Gardner, combinó con éxito el uso del percloruro de hierro como coagulante con su sistema de filtración rápida en el tratamiento de aguas con alto contenido de turbiedad. En su patente, Hyatt pretendía el derecho exclusivo al uso no sólo del percloruro de hierro, sino también de "cualquier otro agente capaz de coagular las impurezas del líquido y evitar su paso a través del lecho del filtro". Un año más tarde, Somerville & Raritan, de Nueva Jersey, adoptó el sistema simultáneo de coagulación-filtración de Hyatt, el uso de la coagulación como preparación para la filtración rápida tuvo su principio como método completo de tratamiento en gran escala. En realidad la filtración rápida fue adoptada en Somerville, Estados Unidos, ya en 1881, pero no hay datos sobre el empleo de un coagulante en combinación con la primera antes de esta instalación de 1885, y aún entonces la base científica para su empleo era todavía oscura (AWWA, 1990). A principios del siglo XX, el conocimiento de los factores que rigen la coagulación fue realmente establecido y ampliado gracias al trabajo de muchos investigadores (AWWA, 1990).

#### **4.1.2. Floculación**

Es la segunda fase del proceso de coagulación en el medio acuoso, con el cual se convierten los flóculos subvisuales en flóculos más grandes que se sedimentan más rápidamente. El aumento de tamaño depende de dos factores: la colisión, que a su vez depende de alguna acción física, en especial la agitación del agua, y la adhesión, que se controla por fuerzas químicas o electrónicas. Finalmente, a medida que las partículas de flóculos aumentan de tamaño y de densidad, son más susceptibles a la sedimentación cuando se suspende la agitación (AWWA, 1990).

Si bien es conveniente emplear altas velocidades durante el tiempo relativamente corto dedicado a la mezcla, es claro que deben emplearse velocidades mucho más reducidas para obtener una floculación satisfactoria, puesto que una agitación demasiado fuerte causaría la desintegración en vez de la aglomeración de los flóculos. No es posible fijar velocidades para estas operaciones, puesto que deben considerarse en cada caso el tipo de flóculos y el tiempo de retención.

### 4.1.3. Sedimentación

Las partículas coloidales tienen velocidades de decantación muy pequeñas, una fracción de ellas es medida como material soluble mediante la determinación de sólidos o de DBO por el tipo de membrana empleada. En consecuencia, un coloide tardaría tanto en sedimentar que no es viable utilizar la decantación para remover dichas partículas (Tabla 1). Sin embargo, si los coloides se desestabilizan, entonces se aglomeran en partículas de mayor tamaño fácilmente sedimentables.

**Tabla 1. Tiempo de sedimentación de las partículas (Adaptado de Weber, 1979)**

Descripción	Dimensiones (mm)	Velocidad de Sedimentación (mm/s)	Tiempo de Sedimentación (1m)
Coloidal	$2 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-6}$	4 años
Arcilla fina	$5 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-4} - 7 \times 10^{-4}$	0.5 a 2 meses
Arcilla	$2.7 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	2 días
Limo fino	$5 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-2} - 7 \times 10^{-2}$	4 a 18 horas
Limo grueso	$2.7 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$	0.5 - 1.7	10 a 30 min
Arena fina	0.1	7	2.5 min
Arena media	0.5	50	20 s

## 4.2. Factores que influyen en la coagulación

Muchos factores influyen en la coagulación de aguas turbias y coloreadas entre ellos se pueden citar: el tipo de coagulante, la cantidad de coagulante, las propiedades del agua, la concentración de iones de hidrógenos del agua, el tiempo de mezcla y de floculación, la temperatura del agua y la fuerza de la agitación (AWWA, 1990).

El tipo de coagulante que se emplea es uno de los factores al elegir el mejor coagulante en los sistemas de tratamiento, se puede escoger entre tres grandes grupos: agentes de coagulación, auxiliares de coagulación y coagulantes naturales, es decir: componentes presentes en algunas aguas, que por un tratamiento adecuado producen floculación. En segundo lugar, entre los dos primeros grupos se puede escoger entre varios productos químicos, cada uno de los cuales tiene sus ventajas en condiciones diferentes.

La cantidad de coagulante que se requiere para que se lleve a cabo la coagulación de manera que el agua tratada pueda pasar a través de filtros rápidos de arena y quedar completamente libre de turbiedad, puede variar de 1 hasta más de 100 mg/L. Aunque existe cierta relación entre la turbiedad y los SST del agua cruda y la dosis del coagulante apropiado, la cantidad exacta sólo puede ser determinada mediante ensayos (Prueba de Jarras). Y aún así, la cantidad podrá variar con otros factores, como el tiempo de mezcla, gradiente aplicado y las características propias del agua residual (AWWA, 1990).

De todos los factores que influyen en la coagulación, solo tres: el tipo de coagulante, la cantidad del mismo y el tiempo de mezcla y floculación, pueden someterse a un control de fácil ejecución y exacto. El operador determina el tipo y la cantidad de coagulante y el ingeniero determina el tiempo requerido para la mezcla y la floculación cuando diseña las especificaciones para el tanque de coagulación (AWWA, 1990).

La mezcla es la fase de la coagulación donde el coagulante se esparce rápidamente en el agua, por lo general con violenta agitación, dando como resultado la formación de partículas subvisuales en suspensión. Tres fenómenos ocurren en la reacción química: el primero, es la neutralización de las cargas negativas de las impurezas con el ión coagulante trivalente. El

segundo es la reacción del coagulante con la alcalinidad del agua y la formación de flóculos de óxido hidratado coloidal con carga positiva, los cuales son atraídos por las impurezas coloidales con carga negativa. Y el tercero es la adsorción superficial de impurezas de los flóculos que resultan de cualquiera de los dos primeros fenómenos (AWWA, 1990).

El periodo de coagulación, que generalmente se llama "tiempo de mezcla", denominación menos precisa, incluye el tiempo requerido para la mezcla y el que se necesita para la floculación, y se define como el lapso que transcurre entre la adición del coagulante al agua y el final de la agitación del agua a una velocidad que implica el asentamiento de las materias floculadas (AWWA, 1990).

Con alcalinidad y pH favorable para la formación de buenos flóculos, el factor que más influye en el tiempo requerido para la formación de estos es la cantidad de coagulante que se emplea. En la práctica, la dosificación de coagulante se basa generalmente en la velocidad de sedimentación de los flóculos en el tanque.

Cuando las aguas son muy turbias necesitan la agregación de una cantidad considerable de coagulante y generalmente un tiempo de coagulación un poco más corto que cuando las aguas son menos turbias. La cantidad de coagulante necesaria para llevar el agua a una condición que permita el funcionamiento más eficaz del filtro durante el periodo más largo es la cantidad que se considera mejor para emplearse (AWWA, 1990).

La influencia principal de la temperatura en la coagulación es su efecto en el tiempo requerido para una buena formación de flóculos. Generalmente, cuanto más fría esté el agua más largo será el tiempo requerido para producir buenos flóculos con una cantidad dada de coagulante. Por lo tanto, en las plantas donde se ha de reducir el tiempo de coagulación, se acostumbra agregar más coagulante (para una turbiedad dada) cuando el agua esta fría.

### **4.2.1. Aplicación de la energía cinética al agua**

Podemos distinguir cuatro variables asociadas directamente con la aplicación de la energía cinética al agua: el gradiente de la mezcla rápida, el tiempo de mezclado rápido, el gradiente de la mezcla lenta y el tiempo de mezclado lento. Estas cuatro variables se deben combinar para dar un resultado óptimo en la remoción de materia particulada.

#### ***4.2.1.1. Efecto de la velocidad y tiempo de mezclado en las diferentes cámaras***

Para un tratamiento óptimo de coagulación-floculación, las condiciones que se deben tomar en cuenta son: el tipo y dosis de coagulante y floculante, la composición química del agua, el momento de adición de reactivos, el pH, la temperatura y las condiciones de mezclado (Black *et al.*, 1965; Stumm and O'Melia, 1968; Vázquez *et al.*, 1996 y Shao *et al.*, 1996).

La velocidad con la cual los coagulantes deben dispersarse en toda la masa de agua depende de la velocidad de las reacciones de éstos con la alcalinidad y con el agua misma.

Una de las consideraciones más importantes que se deben tomar en cuenta para el tratamiento fisicoquímico y bacteriológico de las aguas, es la rapidez con que se dispersan los coagulantes en el agua, para todo el proceso de clarificación posterior. Puede considerarse que la dispersión de los coagulantes progresa en tres fases distintas que son conceptuales y prácticamente diferentes (Arboleda, 1981):

- 1ª. Fase: Hidrólisis de los iones de Al (III), Fe (III). Según Hahn y Stumm, esta fase se realiza en un tiempo extremadamente corto, que ha sido estimado entre  $10^{-10}$  y  $10^{-3}$  segundos.
- 2ª. Fase: Polimerización o reacción de los iones hidratados para formar especies diméricas y poliméricas. Se realiza en un tiempo que puede variar entre  $10^{-2}$  y 1 segundos.

3ª. Fase: Difusión de los componentes formados y absorción de ellos en las partículas coloidales, el tiempo necesario para cubrir el coloide y desestabilizarlo puede variar entre  $8.5 \times 10^{-5}$  segundos mínimo y  $2.4 \times 10^{-4}$  segundos máximo.

La aplicación de tratamiento primario avanzado está teniendo gran auge en el tratamiento del agua residual debido al desarrollo de nuevos polielectrólitos de alto peso molecular y carga de alta densidad. Estos nuevos productos reducen el consumo de floculante y la producción de lodo, lo que también disminuye significativamente los costos de operación (Shao *et al.*, 1993, 1996).

#### **4.2.1.2. Gradiente y tiempo de mezcla rápida**

Sólo durante la fase inicial, las partículas y los microfloculos presentes en el agua son todavía similares en tamaño a la materia disuelta, orgánica e inorgánica. Las posibilidades de neutralizar las cargas y de que las partículas adsorban las sustancias mencionadas dependerá del número obtenido de colisiones útiles, que a su vez dependerán de la turbulencia generada, y sobre todo de la calidad y duración de la turbulencia (Desbos *et al.*, 1990).

Además de incrementar el número posible de colisiones entre las partículas, otro objetivo fundamental de la mezcla rápida es lograr una distribución veloz y homogénea de los reactivos que se agreguen al agua. Lee and Gregory (1990), establecen que la dosis óptima de reactivos en soluciones acuosas tiende a depender de las condiciones del mezclado. Por ello es que al inicio se requiere gran intensidad de mezcla durante periodos cortos y en la medida que avanza, la intensidad del mezclado debe ser menor pero durante periodos más prolongados.

Así, si las condiciones de mezcla del agua no son adecuadas, entonces no se logrará una buena distribución de los reactivos y el consumo será elevado. El segundo efecto importante es que se reduce el número de colisiones efectivas. Por otra parte si la cantidad de energía es excesiva entonces los floculos que se forman tienden a ser muy pequeños y la separación no es efectiva (Morrow and Rausch, 1974).

El gradiente de energía óptimo para la mezcla rápida, depende de factores tales como la concentración de las partículas, el tipo de reactivos y las características de la unidad de mezcla.

Con el objeto de incrementar el número de colisiones entre partículas, el valor del gradiente de velocidades aplicado debe ser mayor para aguas con baja turbiedad que para aguas con turbiedad alta (Mhaisalkar *et al.*, 1991).

Morrow y Rausch (1974), encontraron que un gradiente de  $300 \text{ s}^{-1}$  no siempre es efectivo en la desestabilización completa de las partículas. Para gradientes mayores a  $400 \text{ s}^{-1}$ , encontraron que la coagulación óptima ocurría en menos de dos minutos. Si se aplicaban gradientes de  $400$  a  $450 \text{ s}^{-1}$  con periodos mayores a 2 minutos, se obtenían flóculos muy pequeños que no se aglomeraban durante la floculación. Con gradientes entre  $300$  y  $1400 \text{ s}^{-1}$ , observaron que el tiempo necesario para alcanzar la desestabilización decrecía, de tal forma que con un gradiente de  $1000 \text{ s}^{-1}$  sólo se necesitaban unos segundos para alcanzar la desestabilización.

Vrale and Jordan (1971), compararon cinco tipos de unidades de mezcla rápida. De acuerdo con los resultados que obtuvieron, las unidades mecánicas tienen un efecto de agregación inversamente proporcional al gradiente de mezcla rápida aplicado y tiene limitaciones importantes en cuanto al nivel que se puede alcanzar. En el caso de las unidades hidráulicas, se aplicaron gradientes hasta de  $7000 \text{ s}^{-1}$  y, a diferencia de la unidad mecánica, la agregación de las partículas fue directamente proporcional al gradiente de velocidad aplicado.

#### **4.2.1.3. Gradiente y tiempo de mezcla lenta**

Comma *et al.*, (1991), plantearon que el agua residual municipal es una suspensión floculenta con tendencia a aglomerarse formando cadenas. Esta formación se ve favorecida al transmitir la cantidad correcta de energía a la suspensión. Los gradientes no deben ser muy pequeños ya que entre  $0.03$  y  $0.4 \text{ s}^{-1}$  no favorecen la aglomeración de los sólidos suspendidos y no se observa floculación. Así mismo, afirman que el gradiente óptimo para la floculación está entre  $60$  y  $80 \text{ s}^{-1}$ .

Fettig *et al.*, (1990), opinan que de 10 a 87  $s^{-1}$  es el intervalo ideal para llevar a cabo la floculación, mientras que Kawamura (1973), sostiene que éste puede aplicarse hasta 100  $s^{-1}$ . La aplicación de niveles de energía mayores a este valor puede reflejarse en un decremento de la efectividad del proceso. El valor óptimo es cercano a 50  $s^{-1}$ . Por su parte, James y O'Melia (1982) aplicaron gradientes de mezcla lenta entre 20 y 50  $s^{-1}$  para estudiar el comportamiento de algunos polímeros, como el sulfato de aluminio sólo y el sulfato de aluminio con polímeros para el acondicionamiento de lodos.

El intervalo adecuado para la floculación va desde 5 ó 10  $s^{-1}$  hasta 100  $s^{-1}$ . Aunque cuando hay discrepancias en cuanto a los límites donde la floculación es efectiva, todos los autores coinciden en que las condiciones óptimas son cercanas a los 50  $s^{-1}$ .

Heinzmann (1994), llevó a cabo pruebas con agua de alcantarillado pluvial y concluyó que es un tiempo de floculación de 6 min, sin embargo, cuando el contenido de materia orgánica es alto, el tiempo de floculación debe ser mayor a 10 min, por ello, el tiempo mínimo considerado es de 10 min.

Por su parte, Fetting *et al.*, 1990, consideran que tiempos entre 10 y 19 min son suficientes para lograr una buena floculación y una buena remoción de sólidos suspendidos en el agua residual cuando se usan polímeros en el TPA. James and O'Melia (1982), consideraron tiempos de 30 min de floculación para una alta concentración de sólidos suspendidos (lodos de desecho).

La agitación mecánica sostenida por más de 30 min no parece aumentar la efectividad de la floculación y en ocasiones tiene efectos adversos (Griffith y Williams, 1972). Así, el límite máximo recomendado para la floculación es de 30 min.

### **4.3. Coagulantes y floculantes más utilizados en los procesos fisicoquímicos**

El sulfato de aluminio fue el coagulante que dominó y aunque, desde entonces, el conocimiento de la coagulación ha adelantado mucho, pocos coagulantes nuevos han sido introducidos en la práctica (AWWA, 1990). La primera innovación en este campo se hizo en 1898, cuando William B. Bull introdujo, el uso de una combinación de sulfato ferroso y cal preparando su sulfato ferroso por combustión de azufre y reacción del ácido sulfuroso con hierro de desperdicio en un procedimiento inventado por William Jewell. También se registró, en 1902, el primer empleo del sulfato ferroso comercial. Diez años más tarde, E. V. Bull informó el primer uso de la caparrosa clorada, y aunque este material no se probó nuevamente hasta 1928, fue encontrado entonces útil por Hedgepeth y Olsen en la coagulación de aguas muy coloreadas. Esta aplicación sirvió para enfocar la atención sobre las sales férricas, el uso de las cuales aumenta actualmente (AWWA, 1990). En 1937, Olin y Peterson informaron sobre algunos experimentos fructuosos con arcilla bentonítica, y en el mismo año Baylis describió el uso de "sílice activada" como auxiliar para la coagulación. Las aplicaciones de la sílice como auxiliar de la coagulación se publicaron en el mismo año por Graf y Schworm en St. Louis, y en 1944 por Hay. Finalmente, también en 1937, Upton y Buswell presentaron datos de laboratorio sobre las sales de titanio como coagulantes (AWWA, 1990).

Las dos sales comúnmente empleadas son el cloruro férrico y el sulfato de aluminio. A pesar de que el cloruro férrico resulta más atractivo, su aplicación se encuentra limitada al nivel de reducción del agua negra y a su contenido de sulfuros (AWWA, 1990). El sulfato de aluminio es el que se usa con mayor frecuencia en el tratamiento de aguas por su presentación, costo, efectividad, facilidad relativa en su manejo y disponibilidad (Arboleda, 1981; Kawamura, 1991; Powell, 1979). Sin embargo, el sulfato de aluminio tiene algunas desventajas ya que su efectividad depende en gran parte del pH: El floculo es generalmente más débil en la floculación de las aguas frías, el agua tratada puede tener altas concentraciones de aluminio residual, además de que produce cantidades significativas de lodos, lo cual complica su manejo y disposición. La Tabla 2 presenta las especificaciones de este.

**Tabla 2. Datos técnicos del Sulfato de Aluminio**

Especificaciones	Contenido
Contenido (por complexometría) $Al_2(SO_4)_3$	51.0-59.0%
Identidad	Corresponde
Aspectos de la solución	Corresponde
Valor del pH (2% agua)	2.5-4.0
Cloruros (Cl)	$\leq 0.005\%$
Metales pesados (como Pb)	$\leq 0.002\%$
Arsénico (As)	$\leq 0.0003\%$
Hierro (Fe)	$\leq 0.0005\%$
Amonio ( $NH_4$ )	$\leq 0.01\%$
Metales alcalinos y alcalinotérreos	$\leq 0.4\%$
Densidad aparente	820 $kg/m^3$
Solub. En el agua (20°C)	600 g/L

#### 4.4. Policloruros de aluminio (PAX)

Los policloruros de aluminio son productos o coagulantes relativamente nuevos en la aplicación de tratamiento de agua comparado con los otros productos.

El PAX es un coagulante de aluminio prepolimerizado, que no debe confundirse con un polímero. El PAX no puede ser descrito sólo con una fórmula química debido a que él consiste de una serie de químicos con propiedades diferentes, que aseguran un rendimiento óptimo para una variedad de aplicaciones (Muotka, 2000).

El PAX puede ser representado por la fórmula general (Muotka, 2000):



El grado de neutralización o el reemplazo de los iones Cl por los iones OH, puede ser expresado usando la basicidad. La basicidad es el número de radicales oxhidrilo ( $OH^-$ ), a mayor cantidad de  $OH^-$ , mayor será la basicidad, lo que implica mayor carga positiva, que al final puede formar largas cadenas complejas de aluminio, esto puede ser expresado por (Muotka, 2000):

$$\% \text{ Basicidad} = 100 \times (\text{OH}) / 3(\text{Al})$$

Las variedades de PAX que se pueden encontrar comercialmente son:

Contenido de aluminio:	4 a 12.5%
Basicidad:	15 a 83%
Aditivos:	Sulfato, sílice, calcio, polímeros orgánicos, etc.
Diferentes condiciones de operación:	Diferentes grados de polimerización

Todas estas variedades crean diferentes policloruros de aluminio con pequeñas diferencias en las características y rendimientos esperados.

Comparado con los productos comúnmente utilizados, como el alumbre, el uso de los policloruros de aluminio presentan los siguientes beneficios (Muotka, 2000):

- Alta eficiencia de remoción de partículas
- Baja producción de lodos
- Poco aluminio residual
- Trabaja en un amplio intervalo de pH
- Bajo consumo de alcalinidad
- Alto rendimiento en aplicaciones en agua fría
- Aumento en el rendimiento de los filtros

En la Tabla 3 se presentan las especificaciones del policloruro de aluminio.

**Tabla 3. Datos técnicos del policloruro de aluminio (PAX XL-60)**

Especificaciones	Contenido
Aluminio total	14.8 ± 0.3%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28 ± 0.5%
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	29%
Hierro (Fe)	< 0.02%
Insoluble	0.10 ± 0.05%
Densidad	0.9 ± 0.05 ton/m <sup>3</sup>
Basicidad	40 ± 10%
pH solución al 1% (w/w)	4.2 ± 0.5
Humedad	3-4%

#### 4.5. Sistemas coloidales (clasificación)

Los coloides se pueden clasificar en: moleculares y no moleculares (micelares); liofílicos, liofóbicos, diuturnales y caducos; orgánicos e inorgánicos.

Los coloides moleculares están constituidos por sustancias poliméricas, formadas por largas cadenas orgánicas con pesos moleculares muy grandes (15.000 – 100.000) y tamaños entre  $10^2$  y  $5 \times 10^2 \mu\text{m}$  de longitud por 0.2 y  $1 \mu\text{m}$  de grosor. Estos polímeros, como la gelatina, las proteínas, el almidón, etc., están dispersos molecularmente, no constituyen verdaderos solutos, sino coloides. El término coloide, significa originalmente "gelatinoso" y fue dado por Graham a las dispersiones de proteínas, al comprobar que no se comportaban como verdaderas soluciones (Arboleda, 1981).

Los coloides de asociación o micelares pueden formarse por asociación de moléculas más pequeñas de minerales (ejemplo: oro) o compuestos orgánicos (ejemplos: jabones y detergentes), que espontáneamente se aglutinan en presencia de un dispersante en partículas de tamaño coloidal.

Los coloides liofílicos (hidrofílicos cuando se refieren al agua) están constituidos por las dispersiones moleculares de sustancias poliméricas o sustancias aglutinadas en tamaño coloidal, que tiene una fuerte atracción por el solvente, y reaccionan químicamente con el agua en el cual están dispersos (ejemplos: jabones, materia orgánica encontrada en el agua residual). Su estabilidad depende de la capa de hidratación que los rodea en la cual hay moléculas de agua adheridas que actúan como barrera que impide el contacto entre partículas.

Los coloides liofóbicos están, en cambio, formados por sustancias insolubles en el dispersante (ejemplo, arcillas, metales) y por lo mismo son mucho más inestables que los liofílicos. Son el tipo de dispersiones que más interesa en el tratamiento de agua potable.

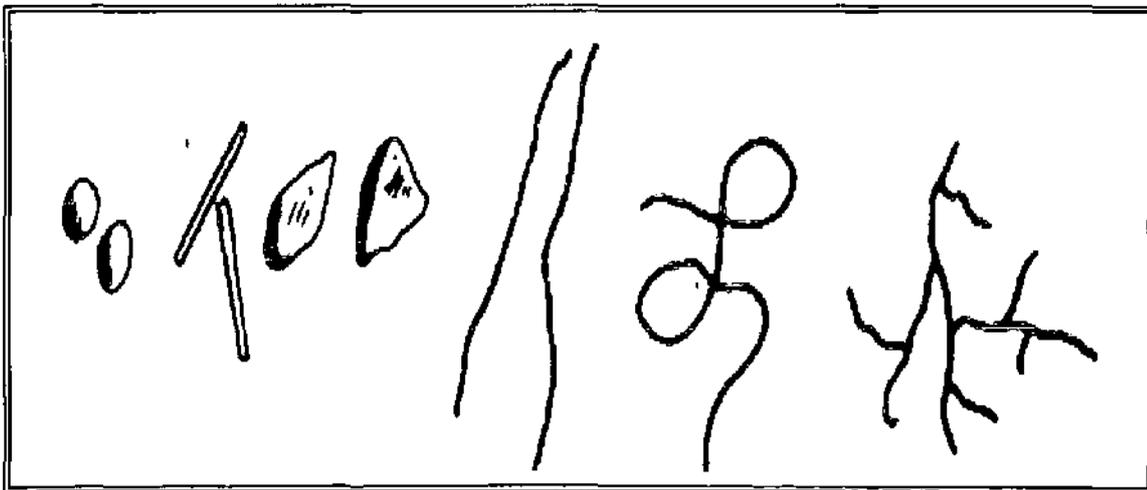
Los coloides diuturnales (término propuesto por Mysels que significa de larga duración) son aquellos que no se modifican durante mucho tiempo comparado con el tiempo de observación.

Los coloides caducos son, al contrario, los transitorios que se aglutinan o cambian rápidamente.

Los coloides, además pueden ser orgánicos como las proteínas o las grasas, o inorgánicos como las arcillas minerales.

#### 4.5.1. Forma de los coloides

La forma de los coloides tiene relación directa con sus propiedades. Sin embargo, no se ha hecho una clasificación adecuada de los coloides. Algunos los clasifican en isométricas y anisométricas. Las primeras son las que tienen una dimensión igual en todas direcciones (esferas, poliedros); las segundas son las que se extienden preferentemente en una o dos dimensiones tales como cilindros, láminas, cintas, etc. (Figura 1, Arboleda, 1981).



**Figura 1. Formas de los coloides en el agua residual**

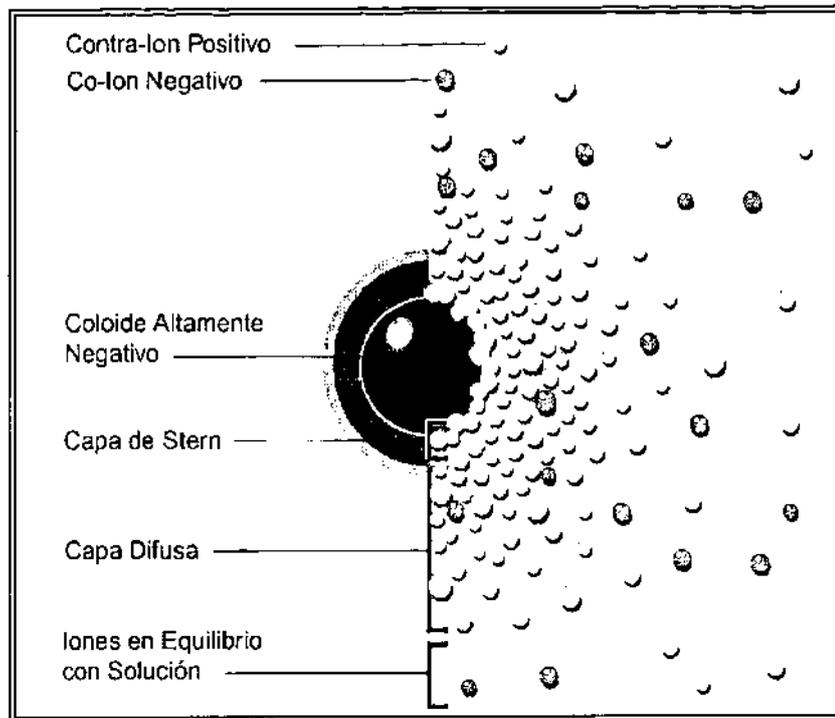
En un líquido turbulento, las formas filamentosas o cilíndricas tienen más oportunidad de contacto que las formas esféricas o poliédricas, lo cual influencia la posibilidad de aglutinación de las partículas y la velocidad de floculación.

#### **4.5.2 Modelo de la doble capa**

Este modelo se usa para visualizar la atmósfera iónica en la proximidad del coloide cargado y para explicar como actúan las fuerzas eléctricas de repulsión y atracción. Inicialmente, la atracción del coloide negativo hace que algunos iones positivos formen una rígida capa adyacente alrededor de la superficie del coloide; esta capa de contra-iones es conocida como la capa de Stern ( Figura 2).

Otros iones positivos adicionales son todavía atraídos por el coloide negativo, pero estos son ahora rechazados por la capa de Stern, así como por otros iones positivos que intentan acercarse al coloide. Este equilibrio dinámico resulta en la formación de la capa difusa de contra-iones. Los contra-iones tienen una alta concentración cerca de la superficie, la cual disminuye gradualmente con la distancia hasta que se logra un equilibrio con la concentración de los contra-iones en el seno de la disolución.

En forma similar, aunque opuesta, en la capa difusa hay un déficit de iones negativos, llamados co-iones pues tienen la misma carga que el coloide. Su concentración se incrementa gradualmente al alejarse del coloide, mientras que las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones positivos, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio.



**Figura 2 Visualización de la doble capa (Sawyer *et al.*, 1990)**

#### 4.5.3. Balance de repulsión y de atracción

La teoría de DLVO (llamada así por Derjaguin, Landau, Verwey Overbeek) es la clásica explicación de los coloides en suspensión. Esta se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo Van der Waals y explica por qué algunos coloides se aglomeran y otros no lo hacen.

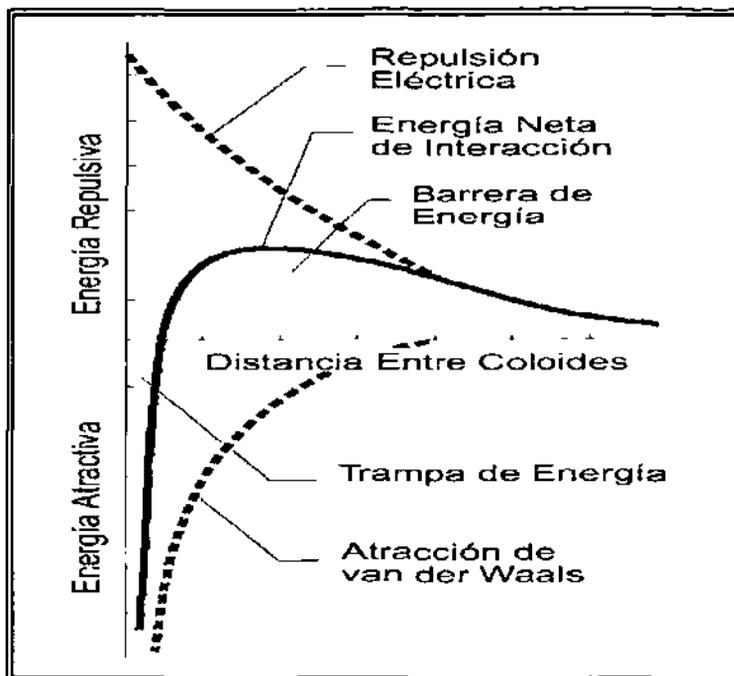
La repulsión electrostática llega a ser importante cuando los coloides se aproximan y la doble capa comienza a interferir. Se requiere energía para sobrepasar esta repulsión y forzar la unión entre las partículas. Esta energía aumenta fuertemente cuando las partículas se acercan. Se usa una curva de repulsión electrostática para indicar la cantidad de energía que hay que vencer para que las partículas puedan ser forzadas a juntarse. Esta energía llega a un valor máximo cuando las partículas están casi juntas y disminuye a cero fuera de la doble capa. Su valor máximo está relacionado con el potencial de la superficie.

La atracción de Van der Waals entre los coloides es ciertamente el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada coloide. El efecto es aditivo; o sea, una molécula del primer coloide experimenta la atracción de Van der Waals de cada molécula del segundo coloide. Esto se repite para cada molécula del primer coloide y la fuerza total corresponde a la suma de todas ellas. Se usa una curva de energía de atracción para indicar la variación en las fuerzas de Van der Waals con la distribución entre las partículas.

La teoría DLVO explica la tendencia de los coloides a aglomerarse o permanecer separados al combinar la atracción de Van der Waals y la curva de repulsión electrostática: la curva combinada es llamada la energía neta de interacción. A cada distancia el pequeño valor se resta del mayor valor para dar la energía neta. El valor neto entonces se representa arriba si es repulsivo o abajo si es atractivo, y así se forma la curva. La curva de interacción neta cambia siempre de atracción a repulsión y nuevamente a atracción. Si existe una zona repulsiva, entonces el punto de máxima energía de repulsión se llama barrera de energía. La altura de esta barrera indica cuan estable es el sistema.

En forma similar, aunque opuesta, en la capa difusa hay un déficit de iones negativos, llamados co-iones pues tienen la misma carga que el coloide. Su concentración se incrementa gradualmente al alejarse del coloide, mientras que las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones positivos, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio. La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide. A cualquier distancia de la superficie, la densidad de carga es igual a la diferencia de concentración entre iones positivos y negativos. La densidad de carga es mucho mayor cerca del coloide y gradualmente disminuye a cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se asemejan (Figura 3).

Los contra-iones de la capa de Stern y de la capa difusa conforman la denominada doble capa. El espesor de esta doble capa depende del tipo y concentración de los iones de la solución.



**Figura 3. Curva de energía neta de interacción**

#### 4.5.4. Cálculo del potencial zeta

De acuerdo con Stern (Benefield, 1982), la distancia de los contraiones más cercanos a un coloide estará limitada por el número de iones presentes. Él propuso que ésta separación entre los contraiones y la carga superficial representa una capa del grosor  $\Omega$  (que es la distancia aproximada igual al radio hidratado de los iones), en la cual no hay cargas eléctricas. Esta capa es conocida como *capa de Stern*; el potencial eléctrico cae linealmente a través de la capa de Stern a partir de un valor  $\phi_0$  (potencial de Nernst) en la superficie de la partícula hasta un valor de  $\phi\Omega$ , el cual es llamado *potencial de Stern*. Más allá de este punto, conocido como *capa difusa (capa de Gouy)*, el potencial eléctrico decrece exponencialmente con el aumento de la distancia de la partícula.

Así como las cargas iguales se repelen, en los coloides con cargas similares ocurre lo mismo, como resultado de éstas cargas. La magnitud de la carga de una partícula coloidal no puede ser medida directamente, no obstante, el valor del potencial de la partícula denominado

como potencial zeta puede calcularse a partir de la medición de la movilidad electroforética de la misma.

El potencial zeta se relaciona con la movilidad electroforética de acuerdo con la ecuación Smoluchowski siguiente:

$$\zeta = \frac{4 \pi \eta U}{\epsilon X_a} \quad (1)$$

donde:

U: Velocidad electroforética

$\eta$ : Viscosidad de la solución

$\epsilon$ : Constante dieléctrica entre la doble capa eléctrica

$X_a$ : Potencial del campo eléctrico (volts/cm)

La ecuación anterior esta expresada en unidades c.g.s., sin embargo se acostumbra medirla en términos internacionales (volts) por medio de la siguiente conversión:

$$\zeta = \frac{4 \pi \eta U}{\epsilon X} \times (300)^2 \quad (2)$$

Sin embargo, para el uso de la ecuación de Smoluchowski se deben tomar en cuenta los siguientes factores que pueden afectar el valor del potencial zeta:

1. Henry, 1931, encontró que para partículas no conductoras que tengan una doble capa eléctrica esféricamente simétrica, la ecuación de Smoluchowski puede tener un cambio gradual, siendo más válida la ecuación propuesta por Hückel, dependiendo del radio de la partícula y la concentración electrolítica.

$$\zeta = \frac{6 \pi \eta U}{\epsilon X_a} \quad (3)$$

La dependencia sobre la concentración es expresada en términos del factor Debye-Hückel, (factor  $K$ ) proveniente del radio de la partícula. Henry derivó una función en una partícula de radio  $a$  determinando que la ecuación de Hückel sólo se aplica cuando  $ka < 1$ , y la ecuación de Smoluchowski, cuando  $ka > 100$ .

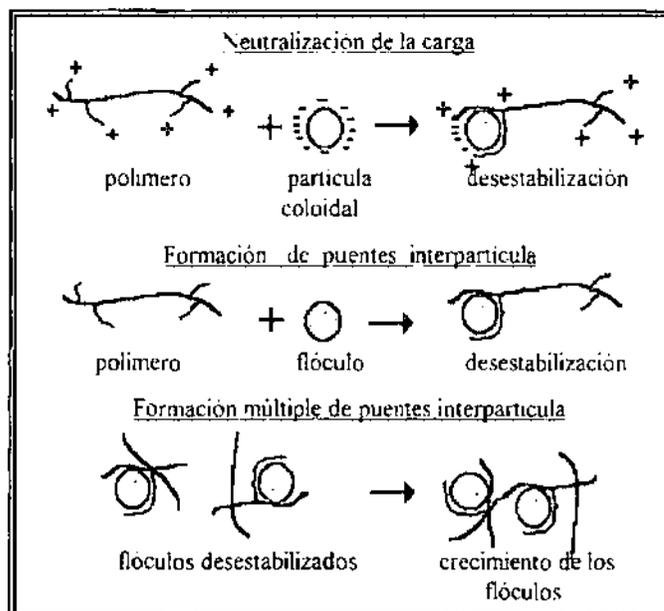
2. Overbeek, 1943, consideró que existe una distorsión en la capa difusa cuando el equilibrio termodinámico es trastornado por un campo eléctrico externo. Esta distorsión surge de una lentitud del movimiento de los contraiones para acomodarse (también llamado tiempo del efecto de relajación). Los cálculos de Overbeek son aproximados, debido al esfuerzo al que han sido sometidas las partículas en el tratamiento, sin embargo, esto mostró que el valor del potencial zeta es menor a 25 mV en una solución electrolítica 1-1; este tiempo de relajación es pequeño. Las correcciones son también muy pequeñas para los valores de  $ka < 1$  y  $ka > 100$ .

3. Algunas veces se considera que el valor de  $\epsilon$  no puede ser tomado como un valor normal por la constante dieléctrica del agua, dado que existe la posibilidad de que halla una saturación dieléctrica en una región de un gradiente con alto potencial sin que exista la doble capa. Sin embargo, la mayoría de autores consideran que el efecto es pequeño comparado con otros problemas teóricos de electrofóresis.

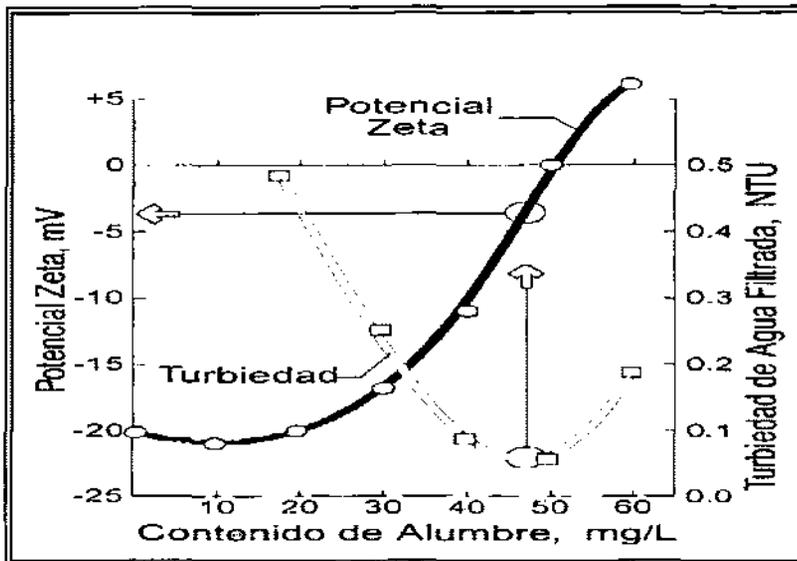
#### **4.5.5. El significado del potencial zeta en la coagulación**

Mediciones del potencial zeta muestran que probablemente al menos dos mecanismos toman lugar en el fenómeno de adsorción, el cual sólo es posible en la superficie de los flóculos (Figura 4). Un mecanismo rápido involucra una atracción entre las cargas positivas de los flóculos y las cargas negativas, por ejemplo de arcillas (precipitación). El segundo mecanismo es lento e involucra una reacción de intercambio consistente en la liberación de un ion hidróxido por las partes iónicas de las sustancias orgánicas (arcillas). Se puede decir que la materia orgánica es adsorbida sobre la superficie de los flóculos de hidróxido metálico, principalmente durante el proceso de coagulación-floculación; y que la neutralización o disminución de la carga coloidal es causada parcialmente por la precipitación de los coloides sobre la superficie microscópica cargada positivamente por el hidróxido metálico.

En los procesos de tratamiento fisico-químicos (por ejemplo, la coagulación-floculación y la filtración), el potencial zeta es una manera adecuada de optimizar la dosis y el tipo de coagulante aplicada en el agua residual. En todos los sistemas, los sólidos suspendidos más difíciles de remover son los coloides, por su diminuto tamaño, ellos escapan fácilmente tanto a la sedimentación como a la filtración. El método para remover el coloide es mediante la disminución del potencial zeta con coagulantes tales como el sulfato de aluminio o cloruro férrico y/o polímeros aniónicos o catiónicos. Una vez reducida o eliminada la carga no existirán fuerzas repulsivas y la ligera agitación del estanque de floculación causará numerosos choques entre los coloides. Esto resulta primero en la formación de microfloculos los cuales crecen hasta llegar a ser sistemas floculados visibles los cuales pueden ser filtrados o sedimentados fácilmente, sin embargo, durante el tratamiento del agua, no hay un solo potencial zeta que pueda garantizar un buen desempeño del sistema. Frecuentemente el potencial zeta se encuentra entre 0 y 10 mV, pero el valor establecido como óptimo se debe hacer en cada una de las pruebas de tratabilidad como lo muestra la Figura 5 en donde el potencial zeta de -3 mV correspondió a la turbiedad más baja de agua filtrada y el potencial determinado es usado como el valor deseado durante el tratamiento.



**Figura 4. Mecanismos de desestabilización de las partículas y del crecimiento de los floculos.**



**Figura 5. Control del potencial zeta sobre la dosis de Sulfato de aluminio**

#### 4.6. Tratamiento primario avanzado

El tratamiento primario avanzado, TPA, se define como un proceso fisicoquímico en el cual se adicionan coagulantes acompañados de floculantes generalmente compuestos aniónicos de alto peso molecular en dosis inferiores a los procesos fisicoquímicos tradicionales (Harleman, 1992 and Shao *et al.*, 1996), es decir, es un proceso en el cual se añaden reactivos químicos al agua para eliminar sólidos suspendidos y materia orgánica evaluada como demanda bioquímica de oxígeno total (Shao *et al.*, 1993).

El tratamiento de la sedimentación avanzada es muy útil al tratar con efluentes sumamente variables en cantidad y calidad (Dégremont, 1979; Shao *et al.*, 1996), además es una opción económica cuando el efluente no tiene que encontrarse entre las normas de 30 mg /L para sólidos suspendidos y demanda bioquímica de oxígeno. El efluente producido por este método es conveniente para propósito de reúso agrícola (Gambrill *et al.*, 1989) y para la disposición en el mar.

El TPA es una versión de los tratamientos físicoquímicos de los cuales existen cuatro configuraciones (Figura 6, Shao *et al.*, 1993).

- a) El tratamiento primario convencional que consiste básicamente en desarenación y sedimentación primaria. Su eficiencia de remoción es de 65 por ciento de sólidos suspendidos totales, SST y 30 por ciento de demanda química de oxígeno, DQO<sub>t</sub>, para aguas residuales domésticas convencionales.
- b) El TPA, utiliza sedimentación con la adición de aproximadamente 10-40 mg/L FeCl<sub>3</sub> o sulfato de aluminio y una cantidad pequeña de polímero aniónico bajo las condiciones de un buen mezclado. Este tipo de tratamiento puede quitar aproximadamente 80 a 85 por ciento SST y 50 a 55 por ciento DBO, y puede implementarse fácilmente en una planta de sedimentación primaria convencional subsistiendo con un mínimo de construcción. El TPA ha estado en uso por más de 100 años (Weber, 1979), pero entró en decadencia en los años treinta (comparado con el proceso de lodos activados) debido a las altas dosis de coagulante (>100 mg/L) usadas y la producción de grandes cantidades de lodo (Metcalf and Eddy, 1991). Con recientes desarrollos en polímeros, es posible usar bajas dosificaciones de coagulante, y lograr excelentes remociones de SST y DBO (Chaudhary *et al.*, 1991) con más niveles manejables de producción de lodos.
- c) El tratamiento químico primario incorpora FeCl<sub>3</sub> o sulfato de aluminio y adición de polímero aniónico a una combinación de floculación y tanques de sedimentación. Este tipo de tratamiento es similar en configuración a la coagulación de tratamiento de agua, floculación y sedimentación. Se ha usado ampliamente en Noruega y Suecia donde el criterio del diseño primario es la remoción del fósforo así como conseguir reducciones aceptables de SST y DBO. Dosis de aproximadamente 150 mg/L FeCl<sub>3</sub> y 0.25 mg/L de polímero aniónico es empleada. Se logra una remoción > 90 por ciento SST, 75 por ciento DBO, y 95 por ciento de fósforo (Harleman 1992 y Odergaard, 1988) del agua residual doméstica.
- d) El tratamiento químico secundario es un proceso en dos fases desarrollado en los 80's en este se agregan químicos en una primera y segunda fase. La fase primaria se combina con tratamiento primario convencional que requiere la precipitación y remoción de SST y DBO.

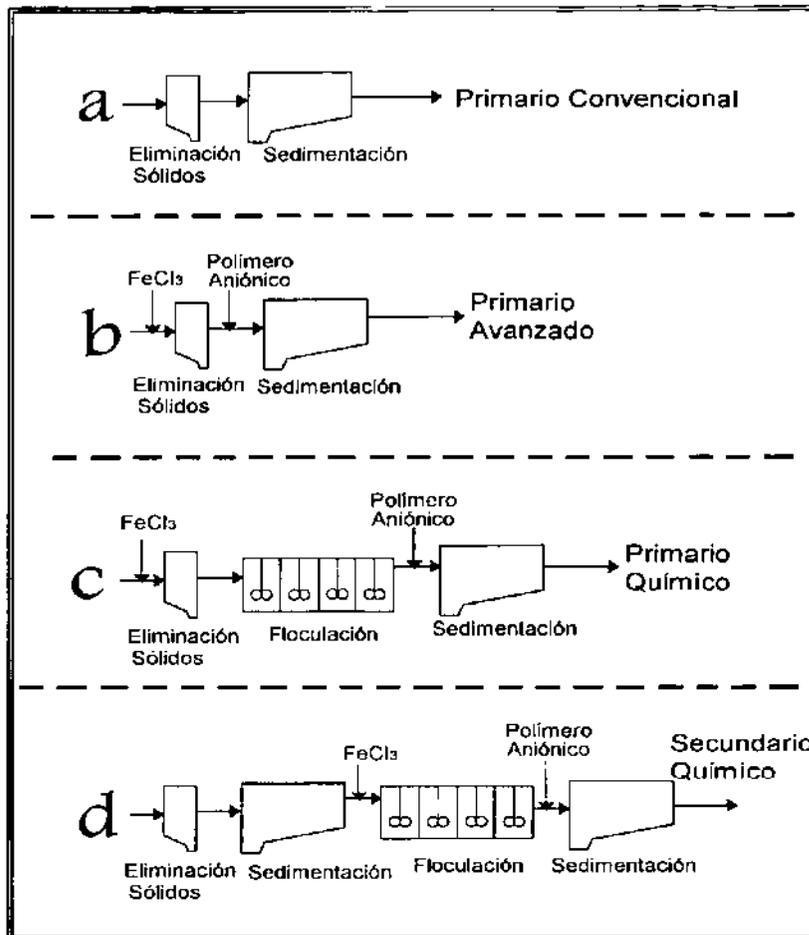
La segunda fase de tratamiento químico requiere dosis de químicos considerablemente más bajas.

La configuración simplificada de cada proceso fisicoquímico y la diferencia de cada uno de ellos se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4. Configuración de los tratamientos fisicoquímicos (Shao *et al.*, 1993)**

PROCESO	CONFIGURACIÓN	Porcentaje de Remoción de SST	Porcentaje de Remoción de DBO	Porcentaje de Remoción de P
PRIMARIO CONVENCIONAL	DA + SP	65	30	11
PRIMARIO AVANZADO	(AC)DA + (AP)SP	80-85	50-55	31
FLOCULACIÓN PRIMARIA	(AC)DA + F + (AP)SP	>90	75	95
FLOCULACIÓN DE DOS ETAPAS	DA +SP + (AC)F +(AP) + SeS	83	52	SD

DA: Desarenación, SP: Sedimentación primaria, AC: Adición de coagulante, AP: Adición de polímero, F: Floculador, SeS: Sedimentación secundaria.



**Figura 6. Diagrama de flujo de las diversas formas de tratamiento fisicoquímico (Shao *et al.*, 1993)**

El tratamiento primario avanzado también tiene la gran ventaja de quitar metales como arsénico, plata, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc (Shao *et al.*, 1993, Heinzmann, 1994).

Durante el desempeño de un sistema de Tratamiento Primario Avanzado y a pesar de los intentos de aplicar la teoría a la práctica (ejemplo O' Melia, 1969, 1970), la coagulación permanece más como un arte que como una ciencia. Las teorías de los campos de la química coloidal y de la mecánica de fluidos no son suficientes para diseñar los procesos, así que se requieren más experimentos al respecto (Weber, 1979).

# CAPÍTULO 5

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 5.1. Muestreo del agua residual

Para todos los estudios que a continuación se describen, el agua residual empleada provino de una de las salidas del drenaje profundo de la Ciudad de México (Figura 7). En todos los casos, se realizó un muestreo sistemático basado en la toma de muestras a intervalos constantes en el tiempo (dos veces por semana, a la misma hora y en un punto fijo de muestreo). Después de la toma de muestra (40 L) el agua residual se homogenizó antes de simular el Tratamiento Primario Avanzado. Durante el estudio, todos los experimentos se realizaron *in situ* a nivel laboratorio (prueba de jarras).

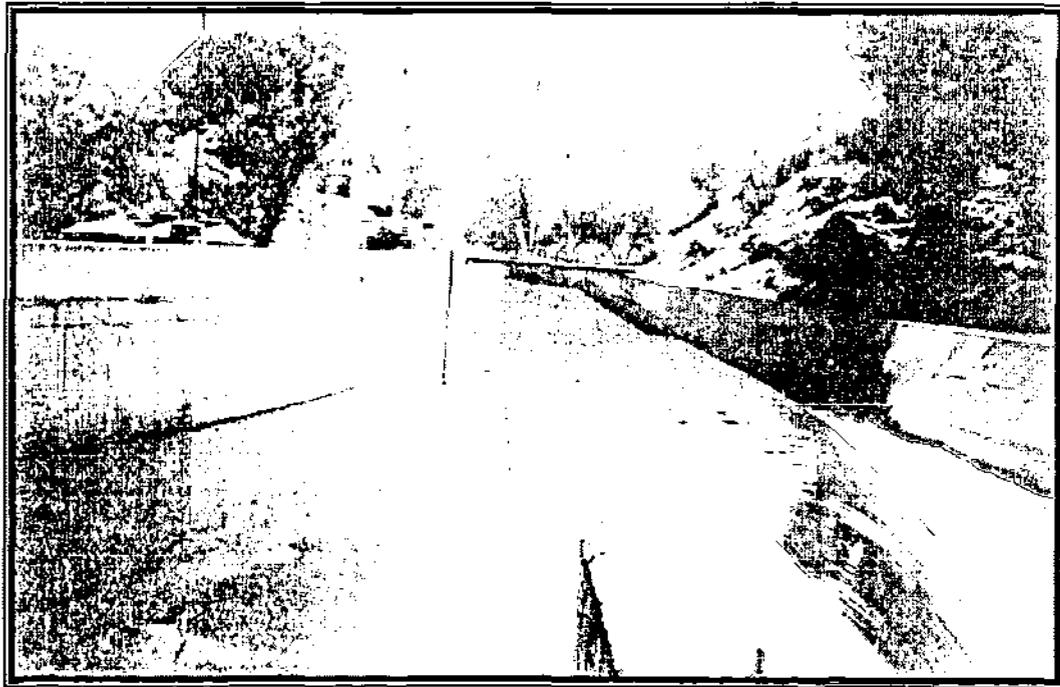


Figura 7. Emisor Central (El Salto, Tepeji del Río, Hgo)

Para cumplir el objetivo planteado, la metodología experimental se dividió en los siguientes estudios:

- Comparación entre la eficiencia de remoción para sulfato de aluminio y PAX XL-60
- Determinación del efecto de la velocidad y tiempo de contacto en la etapa de coagulación
- Determinación del efecto de la velocidad y tiempo de contacto en la etapa de floculación

## **5.2. Comparación entre la eficiencia de remoción para sulfato de aluminio y PAX XL-60**

Antes de iniciar los estudios del efecto de los gradientes y el tiempo de contacto, fue necesario obtener la dosis mínima de coagulante que se tenía que aplicar al agua residual (AR). Con tal fin, se comparó la eficiencia de remoción del sistema de TPA cuando se emplea sulfato de aluminio o PAX XL-60 acompañado de 1.0 mg/L de polielectrólito aniónico de alto peso molecular (prosifloc A-252).

Las experiencias en México para cuatro ciudades (Valle de México, Cancún, Guadalajara y Mazatlán) han descartado el uso del cloruro ferrico debido a la formación de flocúlos muy finos de color negro (Jiménez and Chávez, 1996 y 1997), por este motivo, este coagulante fue descartado del estudio.

Para determinar la dosis de coagulante se realizó un total de siete pruebas de jarras, donde se aplicaron concentraciones de 20, 30, 40, y 50 mg/L para ambos coagulantes y 1.0 mg/L de un polielectrólito aniónico de alto peso molecular (prosifloc A-252). Las condiciones de gradiente bajo las cuales se trabajó fueron  $336 \text{ s}^{-1}$  con 30 s (etapa de coagulación),  $23 \text{ s}^{-1}$  con 5 min (etapa de floculación) y 5 min de sedimentación. En la Tabla 5 se muestran los parámetros evaluados, tanto en el afluente como en el efluente. Cada parámetro se determinó siguiendo la metodología establecida por los Métodos Estandarizados, 1995. En cada una de las pruebas, se utilizó un testigo en el cual sólo se aplicaron los gradientes sin emplear ningún tipo de coagulante ni floculante.

**Tabla 5. Parámetros determinados en el Agua Residual Tratada, ART**

	Parámetros	Técnica
<b>Físicos</b>	SST	2540-D Gravimétrica
	ST	2540-B Gravimétrica
	SDT	2540-C Gravimétrica
	pH	4500-H+ -B Potenciométrica
	Turbiedad	2130-B Nefelométrica
	Temperatura	2550-B
	Potencial Redox	2580-B
	Color real	2120-C
	Color aparente	2120-C
	Conductividad	2510-B
<b>Químicos</b>	% ST*	2540-B Gravimétrica
	% SF*	2540-B Gravimétrica
	% SV*	2540-B Gravimétrica
	DQO <sub>t</sub>	5220-C Titulación
<b>Biológicos</b>	Alcalinidad	2320-B Titulación
	Huevos de Helminto	NMX-AA-113-SCFI-99
	Coliformes fecales	9222-D Filtro de membrana
	Salmonella	9222-D Filtro de membrana

\*parámetros determinados en los lodos producidos

### 5.3. Determinación del efecto de la velocidad y tiempo de contacto en la etapa de coagulación

#### 5.3.1 Diseño experimental

Para determinar el efecto de la velocidad y tiempo de contacto durante la etapa de coagulación se desarrolló un diseño experimental bifactorial con 3 (velocidades de mezcla rápida) y 6 (tiempos de contacto) niveles (Montgomery, 1991) una variable de respuesta (SST) de acuerdo con el interés del estudio (Tabla 6). Durante la etapa de floculación los gradientes y el tiempo se mantuvieron constantes, esto fue, en el primer caso se utilizó una la velocidad de  $23 \text{ s}^{-1}$  con un tiempo de 5 min y en el segundo caso también se utilizaron 5 minutos de sedimentación para cada uno de los tratamientos.

En este estudio se empleo una dosis de 50 mg/L de sulfato de aluminio durante la coagulación y 1.0 mg/L de polímero aniónico (prosisfloc A-252). En paralelo, pero sólo para las

mejores condiciones de gradientes encontradas en el primer caso se comparó el efecto del tipo de cuagulante utilizando en este caso 30 mg/L de PAX XL-60 vs 50 mg/L de sulfato de aluminio anhidro. El estudio se realizó con el mismo tipo de agua residual descrita previamente y bajo las mismas condiciones de muestreo.

**Tabla 6. Diseño experimental, etapa de coagulación**

Factor	Unidades	Niveles
Velocidad de mezcla rápida	s <sup>-1</sup>	183, 336 y 520
Tiempo de mezcla rápida	s	5, 10, 20, 30, 40 y 60

El análisis de variancia (ANOVA) se llevó a cabo con un modelo de efectos fijos.

El modelo estadístico lineal correspondiente fue: con un número de observaciones igual a 108; velocidad x tiempo x réplica (3x6x6)

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

donde:

- i    1,2,3 (para los niveles de velocidad de 183, 336, 520 s<sup>-1</sup>)
- j    1,2,3,4,5,6 (para los niveles de tiempo de 5, 10, 20, 30, 40, 60 s)
- $\mu$     efecto medio general
- $\tau_i$     efecto del i-ésimo nivel de velocidad
- $\beta_j$     efecto del j-ésimo nivel de tiempo
- $(\tau\beta)_{ij}$     efecto de la interacción velocidad-tiempo
- $\epsilon_{ijk}$     error aleatorio

Con las pruebas de hipótesis, se intentó constatar la igualdad de efectos de los factores e interacción, estas se enuncian de la siguiente forma:

Para la Velocidad

Ho:  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$

H<sub>1</sub>: al menos una  $\tau_i \neq 0$

Para el Tiempo

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6$$

$$H_1: \text{al menos una } \beta_j \neq 0$$

Para la interacción Velocidad-Tiempo

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0; \text{ para toda } i, j$$

$$H_1: \text{al menos una } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

Los resultados se obtuvieron con STATGRAFICS versión 6.

## 5.4. Determinación del efecto de la velocidad y tiempo de contacto en la etapa de floculación.

### 5.4.1 Diseño experimental.

Una vez determinado el gradiente y tiempo de contacto en la etapa de coagulación, durante esta etapa se estimó el efecto del gradiente y tiempo de contacto, para este caso se probaron cuatro gradientes con cuatro tiempos de contacto (Tabla 7).

Durante la etapa de coagulación y sedimentación, la velocidad ( $336 \text{ s}^{-1}$ ) y el tiempo (30 s y 50 min respectivamente) se mantuvieron constantes, durante el estudio del efecto de gradientes y tiempo, se empleó 50 mg/L de sulfato de aluminio y 1.0 mg/L de polímero aniónico. Al igual que en el estudio anterior, y con el objeto de comparar la eficiencia de ambos coagulantes con las mejores condiciones de gradiente y tiempo encontradas durante esta etapa se analizó la eficiencia lograda con 30 mg/L de PAX XL-60. En cada una de las pruebas se corrió un testigo que consistió en someter al agua a diversas condiciones de gradiente pero sin aplicación de coagulante y floculante.

**Tabla 7. Diseño experimental, etapa de floculación**

Factor	Régimen en s-1	Tiempo
Coagulación	336	30 s
Floculación	10, 20, 50 y 55	2, 5, 10 y 20 min
Sedimentación	0	5

De la misma manera que en el caso anterior se realizó un diseño de experimentos sin bloqueo para un modelo de dos factores (gradiente y tiempo) de efectos fijos sin interacción, del siguiente tipo:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

donde:

$\mu$  efecto medio general

$\tau_i$  efecto del i-ésimo nivel del factor gradiente: 10, 20, 50 y 55 s<sup>-1</sup> (i = 1, 2, 3 y 4. respectivamente)

$\beta_j$  efecto del j-ésimo nivel del factor tiempo: 2, 5, 10 y 20 min (j = 1, 2, 3 Y 4 respectivamente)

$\varepsilon_{ij}$  es el componente error aleatorio.

## **5.5 Determinación del efecto del gradiente y la dosis de floculante aplicado (1.0 y 2.5 mg/L) durante la etapa de floculación**

### **5.5.1 Diseño experimental, dosis de floculante**

Para determinar estos efecto, también se realizó un diseño de experimentos sin bloqueo bifactorial de efectos fijos sin interacción donde a los diversos gradientes estudiados durante

la etapa de floculación (10, 20, 50 y 55 s<sup>-1</sup>) se les aplicaron 2 dosis de floculante (1 y 2.5 mg/L), quedando la siguiente relación:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$\mu$  efecto medio general;

$\tau_i$  efecto del i-ésimo nivel del factor floculante: 1 y 2.5 mg/L (i = 1 y 2 respectivamente);

$\beta_j$  efecto del j-ésimo nivel del factor gradiente 10, 20, 50 y 55 s<sup>-1</sup> (j = 1, 2, 3 y 4 respectivamente)

$\varepsilon_{ij}$  es el componente error aleatorio.

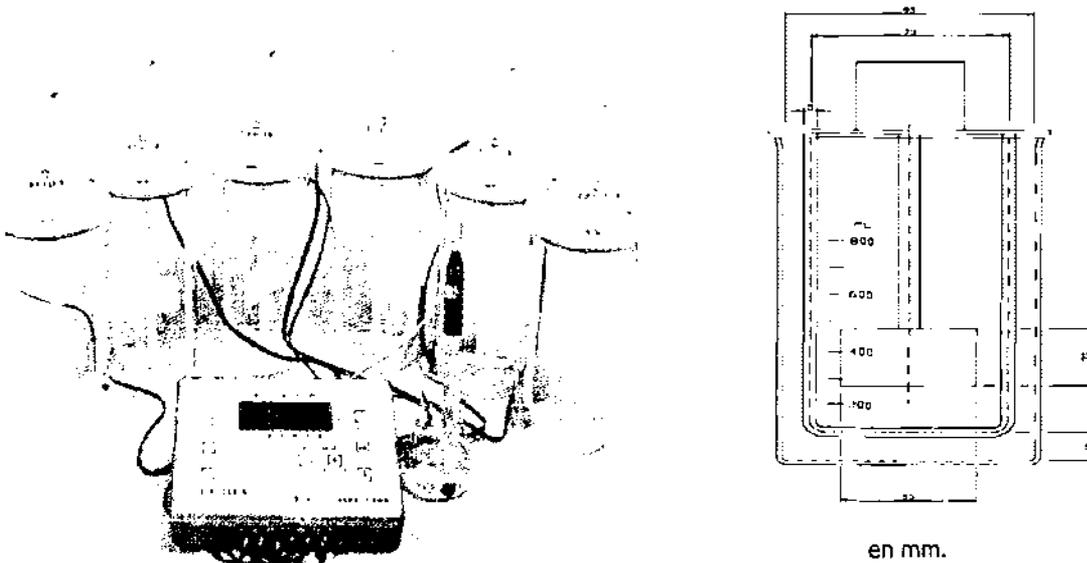
Con los resultados obtenidos, se efectuó un análisis estadístico empleando el paquete STATGRAFICS 6.0, Manugistics, Inc., 1992.

Finalmente, con el objeto de realizar un balance de lodos producidos por el proceso de acuerdo a las diversas condiciones de operación, se midió y se determinó la cantidad de lodo producido de acuerdo al siguiente procedimiento:

Una vez transcurrido el tiempo de sedimentación (30 min) se midió la cantidad de lodo producido y se determinó los siguientes parámetros: sólidos totales, sólidos totales volátiles y sólidos totales fijos. Estos parámetros fueron obtenidos siguiendo la metodología establecida en los Métodos Estandarizados 1995.

### 5.7. Cálculo del gradiente

Antes de llevar a cabo los experimentos, se determinaron los gradientes requeridos para cada una de las velocidades. En la Figura 8, se presenta el equipo de jarras utilizado, se incluye la forma y dimensiones del vaso, así como el tipo de paleta.



**Figura 8. Equipo de prueba de jarras y dimensiones del mismo**

El cálculo de los gradientes se hizo con base a Kawamura (1991).

$$G = \sqrt{\frac{C_D * A * v^3}{2 * \mu * V}}$$

Donde:

$C_D$ : Coeficiente de arrastre, este coeficiente depende de la forma de la paleta y de las condiciones de flujo

A: Área transversal de las paletas

- v: Velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido, esta se localiza entre 0.5-0.75, para este caso se utilizó 0.5
- $\mu$ : Viscosidad cinemática del fluido
- V: Volumen del tanque de sedimentación

Cálculos

$$C_D = 2.0$$

$$A = D \cdot h = 0.05\text{m} \cdot 0.03\text{m} = 1.5 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$V = 800 \text{ ml} = 8 \times 10^{-4} \text{m}^3$$

$$v = 0.5 \cdot \pi \cdot D \cdot n$$

$$n = \text{rpm} / 60 \text{ s.}$$

$$G = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.5 \times 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D \cdot n\right)^3}{2 \cdot \mu \cdot V}}$$

$$G = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.5 \times 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \frac{1}{8} \cdot \pi^3 \cdot (0.05\text{m})^3 \cdot n^3}{2 \cdot 1.003 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 8 \times 10^{-4} \text{m}^3}}$$

$$G = \sqrt{\frac{1.4534 \times 10^{-6} \cdot n^3}{1.605 \times 10^{-9}}}$$

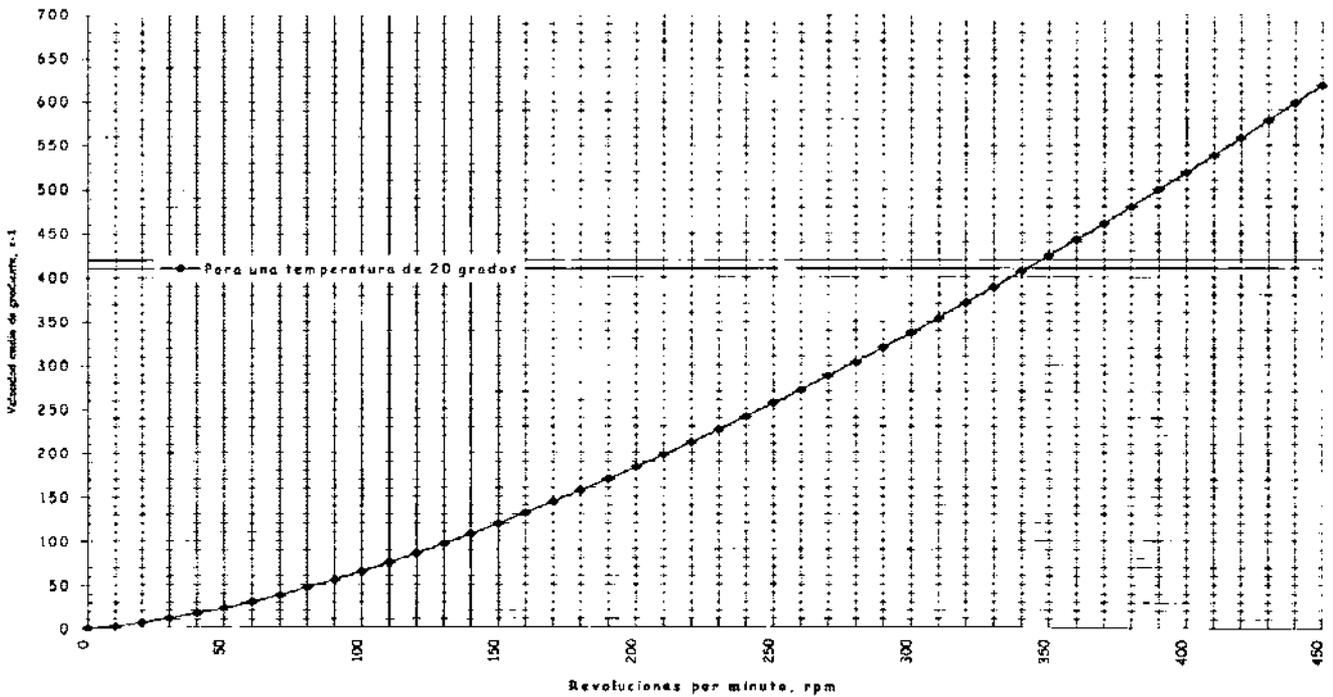
$$G = \sqrt{90555 \cdot n^3}$$

$$G = 30.009 \cdot n^{3/2}$$

De acuerdo con esto, la conversión de rpm a  $\text{s}^{-1}$  para los gradientes al comienzo del estudio se muestran en la Tabla 8 y la Figura 9 presenta la curva de calibración.

**Tabla 8. Determinación de los  $s^{-1}$  (temperatura del agua a 20° C)**

Etapa de tratamiento	N (rpm)	G (1/seg)
Coagulación	200	183
	300	336
	400	520
Floculación	29	10
	46	20
	84	50
	99	55
Sedimentación	0	0



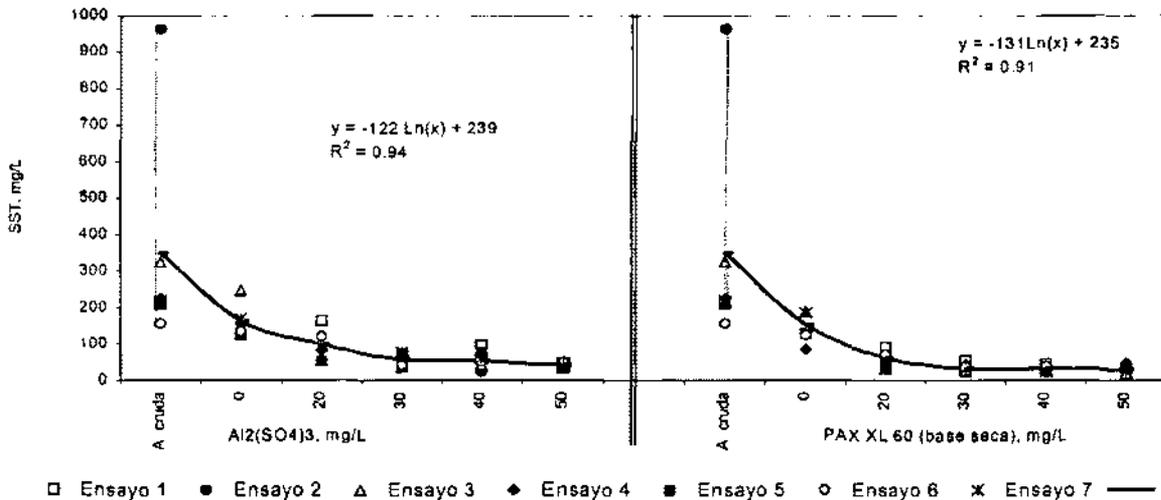
**Figura. 9. Curva de calibración de la velocidad del gradiente**

# **CAPÍTULO 6**

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **6.1 Comparación entre la eficiencia de remoción para sulfato de aluminio y PAX XL 60**

Durante la evaluación de la eficacia de los coagulantes, los SST presentes en el efluente para cada uno de los tratamientos constituyeron uno de los parámetros de mayor importancia. La Figura 10 muestra el efecto del tratamiento de acuerdo al tipo y dosis de coagulante utilizado en siete ensayos. La concentración de SST del agua residual cruda fue en promedio de 330 mg/L y se considera que para que exista un buen desempeño en el proceso, se deben aplicar 50 mg/L de sulfato de aluminio anhidro en el agua residual. En efecto, con esta condición, los SST remanentes fluctuaron entre 28 mg/L hasta 50 mg/L por lo que el sistema alcanzó a remover un 88.2 por ciento de este contaminante. Para alcanzar una remoción de SST similar con el otro coagulante sólo fue necesario aplicar 30 mg/L de PAX XL-60, los SST en el efluente presentaron una variación entre 26 mg/L hasta 36 mg/L con un promedio de 32 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción en el sistema de 90.4 por ciento. Con un aumento en la dosis mayor a las concentraciones determinadas como óptimas, el incremento de la eficiencia del sistema no es significativo (91 cuando se aplican 50 mg/L de PAX XL-60).



**Figura 10. Concentración de SST alcanzada con diversas dosis de sulfato de aluminio anhidro y PAX XL-60 en 7 ensayos**

La turbiedad, es un parámetro que en el caso de pruebas de jarras nos muestra de una forma rápida y visual la eficiencia del proceso. Al igual que con los SST, un incremento en la dosis de coagulante (tanto de sulfato de aluminio como de PAX XL-60) permite un aumento de remoción de este parámetro que describe la contaminación. Con 50 mg/L de sulfato de aluminio, se alcanzó en el efluente una turbiedad de  $30 \pm 7.0$  UNT (Figura 11) mientras que con 30 mg/L de PAX XL-60 la turbiedad fue de  $41 \pm 12$  UNT (Figura 11).

La  $DQO_t$  al igual que los SST y la turbiedad, al incrementar la dosis de coagulante mejoró la remoción de contaminantes alcanzando para 50 mg/L de sulfato de aluminio de  $251 \pm 91$  mg/L (Figura 12), mientras que cuando se aplicó 30 mg/L de PAX XL-60 la  $DQO_t$  fue de  $248 \pm 100$  mg/L (Figura 12). Con lo que se infiere que el agua tratada presentará un contenido de materia orgánica que ayudará a mejorar la estructura de los suelos agrícolas y por consiguiente al mejor rendimiento de los cultivos que se producen.

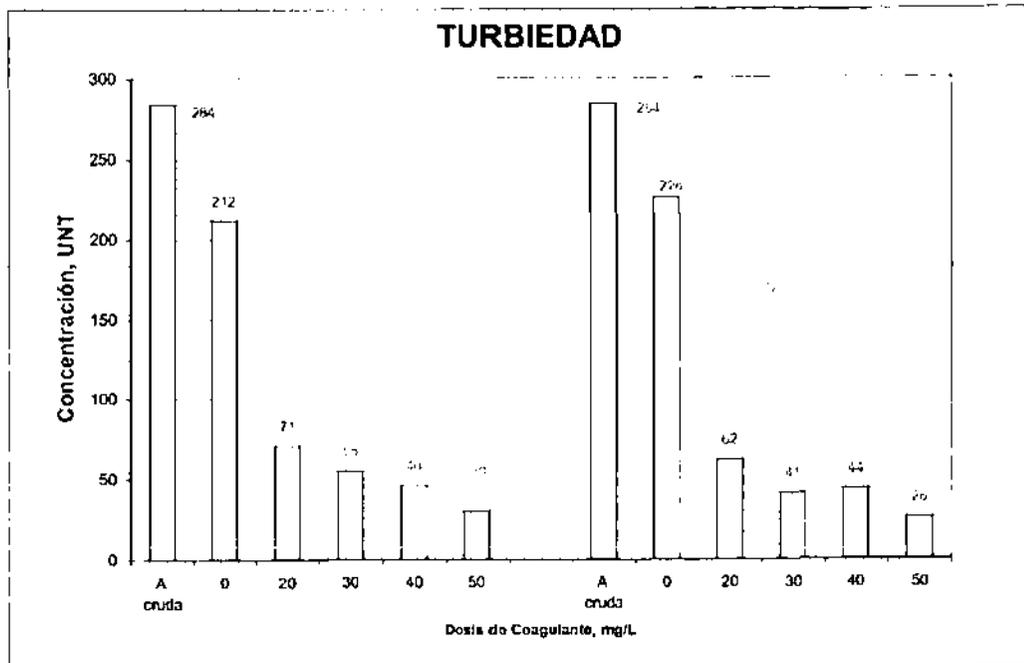


Figura 11. Concentración de turbiedad alcanzada con diversas dosis de  $Al_2(SO_4)_3$  y PAX XL-60.

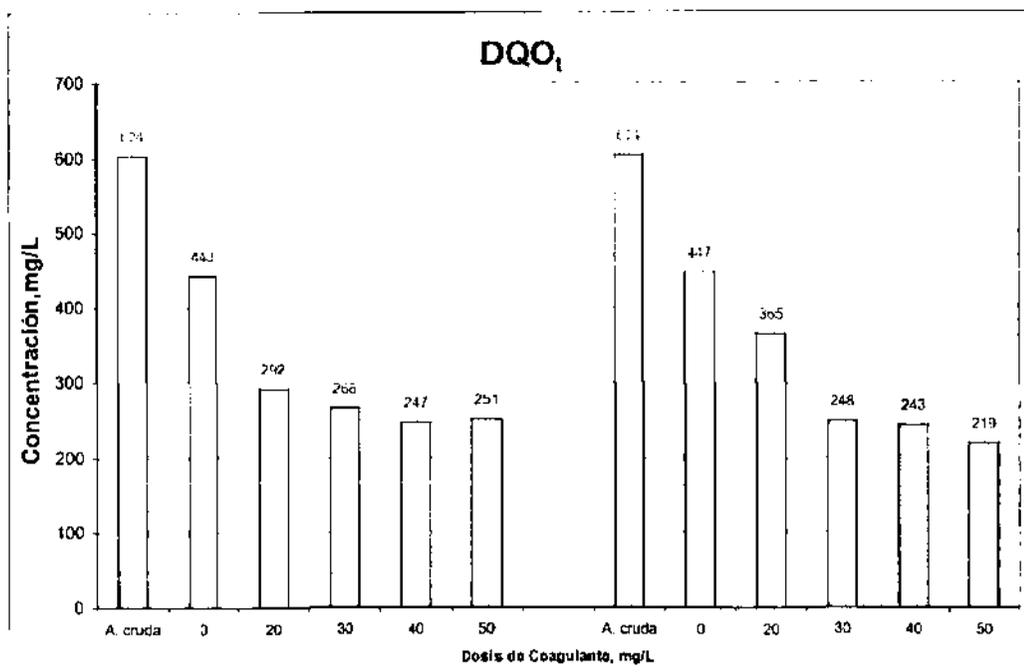


Figura 12. Concentración de DQO<sub>1</sub> alcanzada con diversas dosis de  $Al_2(SO_4)_3$  y PAX XL-60.

En la Tabla 9 se presenta la calidad producida en el efluente en relación con otros indicadores y bajo la dosis óptima recomendada para los dos coagulantes estudiados. En el caso de sulfato de aluminio con 50 mg/L se alcanzó una reducción del 67 por ciento para el color real y 54 por ciento para el color aparente, la remoción de STT fue de 41.4 por ciento, el pH se mantuvo en un promedio de 7.4 mientras que los SDT tan sólo se removieron en un 7.9 por ciento, esta mínima eficiencia de remoción de los SDT se atribuye principalmente a que el agua presenta un gran contenido de otros compuestos disueltos o asociados en el agua entre los que se destaca calcio, magnesio y sodio reflejándose una conductividad alta del agua residual (1306 mS/cm).

Cuando se aplican 30 mg/L de PAX XL-60 (Tabla 9) la eficiencia de remoción del color real fue del 72.2 por ciento y 59.6 por ciento para el color aparente, los STT se removieron en un 40 por ciento mientras que para SDT en 5.6 por ciento. Lo cual muestra que este coagulante proporciona mayor eficiencia que el sulfato de aluminio en cuanto a la remoción de contaminantes (materia suspendida y coloidal) con desviaciones muy pequeñas en cuanto a los valores obtenidos. En efecto, cuando se utilizó PAX XL-60 se obtuvo un 90.4 por ciento vs 88.2 por ciento que se obtuvo con el sulfato de aluminio para los SST, al igual la turbiedad 90.7 vs 89.5 por ciento para el PAX XL-60 y sulfato de aluminio respectivamente y para la DQO<sub>t</sub> se obtuvo el mismo comportamiento 63.8 vs 58.4 por ciento para PAX XL-60 y sulfato de aluminio respectivamente. En términos generales se puede decir que la calidad del agua producida por ambos coagulantes es considerada como de mediana calidad donde la materia orgánica medida como DQO<sub>t</sub> beneficiará la estructura de los suelos agrícolas donde será utilizada, sin embargo deben considerarse el contenido de SDT ya que estos presentan la fracción fija en la cual es muy difícil de eliminar por un sistema de tratamiento convencional y que puede afectar tanto a cultivos como a los suelos.

**Tabla 9. Comparación de la calidad producida para los dos coagulantes estudiados, bajo la dosis óptima recomendada**

Parámetros	No. datos		Promedio				Desviación estándar				η
	Inf	Efl	Inf	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		Inf	PAX XL-60		Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		
				50 mg/L	30 mg/L		50 mg/L	30 mg/L	%	%	
DQO <sub>t</sub> , mg/L	7	7	604	251	248	190	91	100	58.4	63.8	
Turbiedad, UNT	7	7	284	30	41	140	7	12	89.5	90.7	
SST, mg/L	7	7	330	39	32	284	8	5	88.2	90.4	
Color (R), Pt-Co	7	7	550	181	151	0	40	69	67	72.2	
Color (A), Pt-Co	7	7	181	83	73	38	31	37	54	59.6	
STT, mg/L	7	7	1284	752	771	914	221	203	41.4	40.0	
PH	7	7	7.7	7.4	7.4	0.2	0.2	0.2			
Temperatura, °C			21.7	22.2	22	3	1.5	1.5			
P. Redox, mV	7	7	-65.3	-40.3	-45	14	17	15			
Conductividad, mS/cm	7	7	1306	1200	1039	275	0.2	616	6.7	20.4	
SDT, mg/L	4	6	654	602	618	138	218	148	7.9	5.6	
Alcalinidad, CaCO <sub>3</sub> /L	2	2	313	265	283	7	4.2	127	15.3	9.6	

## 6.2 Determinación del efecto de la velocidad y tiempo de contacto durante la etapa de coagulación

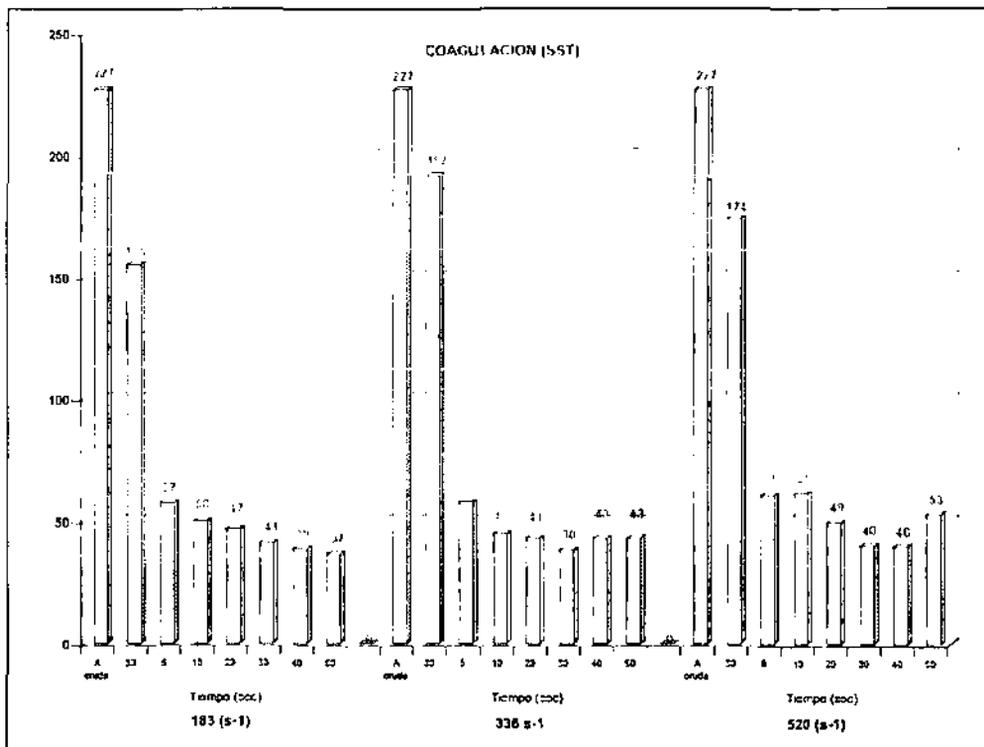
Durante este estudio, el agua cruda presentó una concentración de SST de 227 mg/L, la turbiedad de 224 UNT y una DQO<sub>t</sub> de 582 mg/L, en promedio. Al emplear una energía externa pero sin ningún reactivo (sedimentación primaria) los SST remanentes variaron entre 155 y 192 mg/L (15.5 hasta 31.7 por ciento de remoción), la turbiedad entre 206 y 214 UNT (de 4.4 hasta 8.1 por ciento) y la DQO<sub>t</sub> entre 389 y 432 mg/L (25.8 hasta 33.2 por ciento de remoción), lo que conlleva a decir que en una sedimentación primaria las eficiencias de remoción de los contaminantes solo fueron mínimas, razón por la cual se debe mejorar el sistema.

En un Tratamiento Primario Avanzado las eficiencias de remoción alcanzadas estuvieron en función tanto de los gradientes aplicados como del tiempo empleado. En esta etapa, la

remoción de contaminantes se ve favorecida pero sólo hasta llegar a un tiempo máximo de 30 s donde se observó que para el caso del gradiente de  $183 \text{ s}^{-1}$  la remoción de SST fue del 81.9 por ciento ( $41 \pm 13.3 \text{ mg/L}$ ), para  $\text{DQO}_t$  fue del 63.3 por ciento ( $213 \pm 80 \text{ mg/L}$ ) y la turbiedad fue del 85.5 por ciento ( $32 \pm 7.7 \text{ UNT}$ ); con un gradiente de  $336 \text{ s}^{-1}$  se obtuvo, para SST el 83.1 por ciento ( $38 \pm 11.3 \text{ mg/L}$ ), para  $\text{DQO}_t$  64.2 por ciento ( $208 \pm 92.3 \text{ mg/L}$ ) y turbiedad 87.4 por ciento ( $28 \pm 4.1 \text{ UNT}$ ) y para el caso de un gradiente de  $520 \text{ s}^{-1}$  se alcanzó una remoción de SST del 82.4 por ciento ( $40 \pm 11 \text{ mg/L}$ ), una  $\text{DQO}_t$  del 63.7 por ciento ( $211 \pm 88.4 \text{ mg/L}$ ) y una turbiedad del 88.3 por ciento ( $26 \pm 6 \text{ UNT}$ ) (Figuras 13, 14 y 15 respectivamente). Con un incremento en el tiempo de contacto (mayor a 30 s) se observó un incremento en la remoción de estos contaminantes, sin embargo, dicho incremento no es tan significativo a nivel de comparación de la calidad del agua obtenida para ser considerado, lo que es evidente es que en el caso de aplicar un gradiente mayor ( $520 \text{ s}^{-1}$ ) y un tiempo de contacto de 60 s se observa una resuspensión de las partículas, que conlleva al rompimiento del flóculo previamente formado disminuyendo la calidad del efluente.

Con un gradiente de  $336 \text{ s}^{-1}$  y un tiempo de 30 s durante el proceso de coagulación se pudo obtener flóculos tipo "D" (Harleman *et al.*, 1992) con excelentes características de sedimentación, buena compactación y de difícil rompimiento aún cuando se aplique otra fuerza externa de menor intensidad que la aplicada durante las pruebas. Para este gradiente se obtuvo una concentración de 38 mg/L de SST en promedio con valores que fluctuaron desde 26 hasta 62 mg/L, una turbiedad de 28 UNT en promedio con valores que se encontraron de 23 a 34 UNT. Mientras que con un gradiente menor de  $183 \text{ s}^{-1}$  se obtuvo una menor eficiencia; en efecto, bajo estas condiciones se determinó un promedio de SST de 41 mg/L con valores que fluctuaron de 22 hasta 64 mg/L, una turbiedad de 32 UNT en promedio con intervalos de 25 hasta 45 UNT. En cambio cuando se aplicó un gradiente de  $520 \text{ s}^{-1}$  se obtuvieron concentraciones sin tanta fluctuación tanto para SST y turbiedad (con intervalos de 30 hasta 52 mg/L y de 18 hasta 38 UNT respectivamente). La mayor concentración de la  $\text{DQO}_t$  se tuvo cuando se aplicó un gradiente de  $336 \text{ s}^{-1}$  ( $208 \pm 92.3 \text{ mg/L}$ ) pero con una desviación estándar muy grande comparada con los gradientes de  $183 \text{ s}^{-1}$  y  $520 \text{ s}^{-1}$  los cuales obtuvieron desviaciones de 80 y 88.4 mg/L respectivamente.

Por otro lado, las peores condiciones se determinaron cuando al proceso fisicoquímico se le aplicaron tiempos de 5 s con cualquier gradiente aplicado (183, 336 y 520  $s^{-1}$ ), donde se alcanzaron concentraciones para SST en un intervalo de 57 hasta 61 mg/L, turbiedad de 33 hasta 45 UNT y DQO<sub>t</sub> de 222 hasta 244 mg/L. Al incrementar el tiempo de contacto hasta 60 s se observó un incremento en la calidad del efluente obteniendo concentraciones para SST de 37 hasta 53 mg/L, turbiedad de 27 hasta 64 UNT y DQO<sub>t</sub> de 204 hasta 288 mg/L.



**Figura 13. Remoción de SST aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de coagulación**

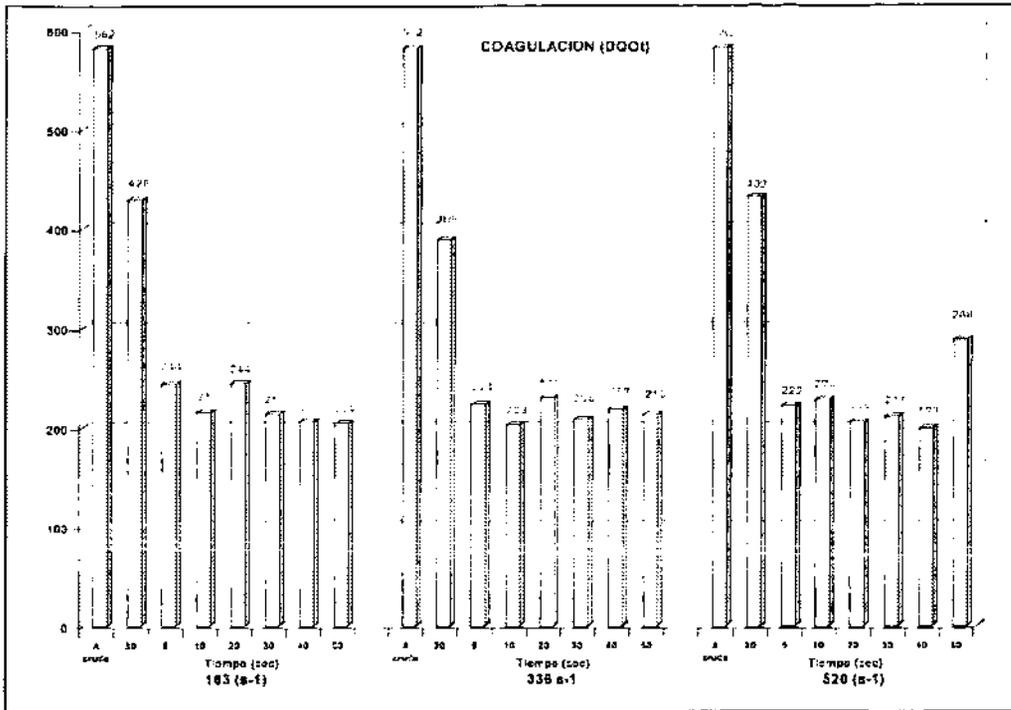


Figura 14. Remoción de  $DQO_t$  aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de coagulación

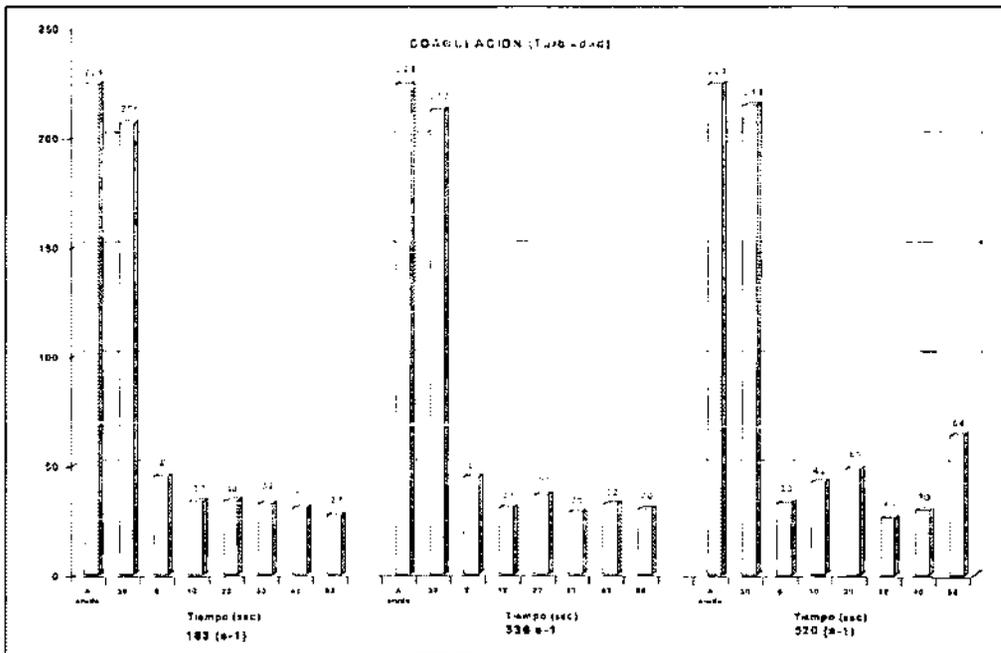


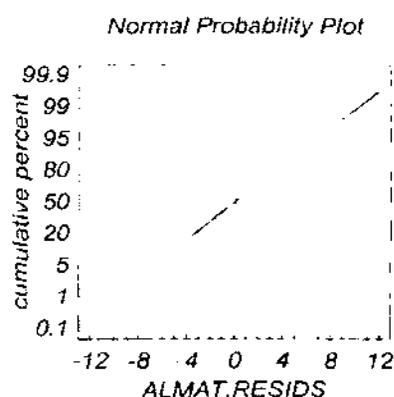
Figura 15. Remoción de turbiedad aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de coagulación

## 6.2.1. Análisis Estadístico

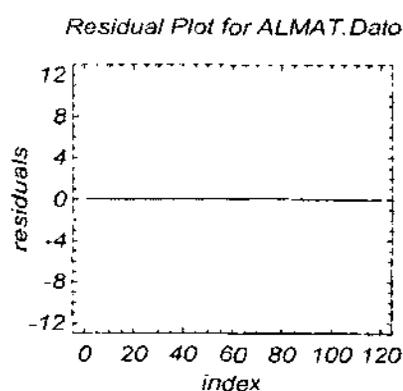
### 6.2.1.1. Comprobación de la idoneidad del modelo

El análisis estadístico cuando se utilizó 50 mg/L de sulfato de aluminio y diversos gradientes y tiempos de contacto durante esta etapa mostró una adecuada distribución **normal** (Figura 16), la gráfica de los residuos contra los valores predecidos muestran que los residuos se ubican tanto con valores positivos como negativos sin una marcada tendencia que ponga en peligro la **independencia** de los valores. Aunque en la gráfica de los residuales contra la velocidad se observa una ligera tendencia de aumento de la variancia, el problema no es tan severo como para poner en riesgo la **homoscedasticidad**, ni tiene un efecto importante en el análisis y sus conclusiones (Figura 16). Esto se refuerza por la variancia sin tendencia respecto al factor tiempo. Los residuales contra la fecha de realización de la prueba no mostraron tendencias, observándose tanto valores positivos como negativos.

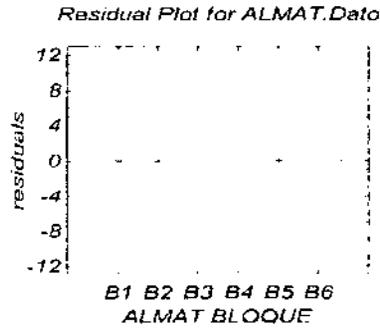
**Normalidad**



**Independencia**



**Homocedasticidad**



**Figura 16. Representación de idoneidad en los resultados**

**6.2.1.2. Análisis de variancia (ANOVA)**

Los resultados del ANOVA mostraron que sólo el tiempo es significativo con un 5 por ciento de significancia para los niveles ensayados lo cual se observa en la Tabla 10. De acuerdo con ésta los promedios para  $183 \text{ s}^{-1}$ ,  $336 \text{ s}^{-1}$  y  $520 \text{ s}^{-1}$  fueron de 45.0, 43.16 y 49.94, respectivamente, variando muy poco respecto a la dispersión de datos. Por otro lado el efecto del tiempo sobre los SST mostró una disminución al aumentarlo de 5 a 30 s y a 40 s y constante a 60 s. En el análisis de variancia el valor de  $F_{\text{calculado}}$  fue mayor al F de Tablas por lo tanto se acepta la  $H_1$  la cual nos dice que al menos un tratamiento fue diferente.

**Tabla 10. Análisis de variancia, en la etapa de coagulación**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	$F_o$	$F_{\text{tablas}}$	Nivel de significancia
Tratamientos	960.3130	17	56.4890	2.363	1.74	0.0051
Bloques	8412.6783	5	1682.5357	70.373	2.32	0.0000
Error	2032.2639	85	23.908988			
Total	11405.255	107				

Ningún valor extraviado ha sido incluido.  
 Los valores de  $F_o$  están basados en el cuadrado medio del error.

**6.2.1.3. Comparaciones múltiples**

Para determinar si existe una diferencia significativa de algunos de los niveles del factor tiempo se realizó una prueba de Mínima Diferencia Significativa (LSD por sus siglas en inglés de Least Significant Difference) para el tiempo observándose que 30 segundos fue significativamente diferente con un 5 por ciento de confianza por lo que este es el mejor nivel para la disminución de SST (Tabla 11).

**Tabla 11. Nivel de significancia entre los tratamientos (método al 95 por ciento de significancia)**

Nivel	Número	LSD media	Grupos homogéneos
520-10	6	78.270000	X
520-5	6	79.528333	X
183-5	6	80.113333	XX
336-5	6	82.775000	XXX
336-10	6	82.825000	XXX
336-20	6	83.270000	XXX
183-20	6	83.306667	XXX
183-10	6	83.608333	XXX
520-60	6	85.231667	XXX
520-20	6	85.430000	XXX
520-20	6	85.430000	XXX
336-40	6	85.786667	XX
520-40	6	85.786667	XX
183-40	6	86.705000	XX
183-60	6	87.431667	XX
336-60	6	87.885000	XX
520-30	6	88.033333	XX
336-30	6	89.431667	X

**6.2.2. Comparación de 50 mg/L de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> y 30 mg/L de PAX XL-60 y bajo las mejores condiciones de gradiente y tiempo**

Utilizando 30 mg/L de PAX XL-60 para las mejores condiciones que se obtuvieron (336 s<sup>-1</sup>, 30 s) y manteniendo constantes la floculación (23 s<sup>-1</sup>, 5 min) y sedimentación (5 min) se obtuvo una remoción para SST de 36.6 ± 9.7 mg/L (84 por ciento de remoción), turbiedad de 38.6 ± 16 UNT (86.8 por ciento de remoción) y una DQO<sub>t</sub> de 233.4 ± 128 mg/L (60 por ciento de remoción). Comparando con 50 mg/L de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (Tabla 12) se obtuvo una calidad semejante en el efluente para SST de 38 ± 11.3 mg/L (83 por ciento de remoción), turbiedad de 28 ± 4 UNT (87.4 por ciento de remoción) y una DQO<sub>t</sub> de 208 ± 92 mg/L (64.2 por ciento

de remoción); lo cual muestra que el PAX XL-60 proporciona una calidad de agua semejante a la producida con el sulfato de aluminio, pero esto reflejado económicamente no aplica debido a que el PAX XL-60 es mucho más costoso que el sulfato de aluminio, por lo que la decisión del uso de cada producto sólo será condición del ajuste beneficio-costos que se deba utilizar en un diseño de planta con procesos fisicoquímicos. Otros parámetros como el pH se mantuvieron en un intervalo de 7.4 a 7.5, conductividad de 1247 hasta 1300 mS/cm, alcalinidad de 237 hasta 256 mg/L, color real de 193 hasta 138 Pt-Co, color aparente de 63 hasta 96 Pt-Co, STT de 720 hasta 764 mg/L y Potencial Redox de -47 hasta -42.8 mV. La concentración de los SDT encontrada en el influente es dependiente directa de la variación del contenido de sales presentes en el canal de conducción de agua residual.

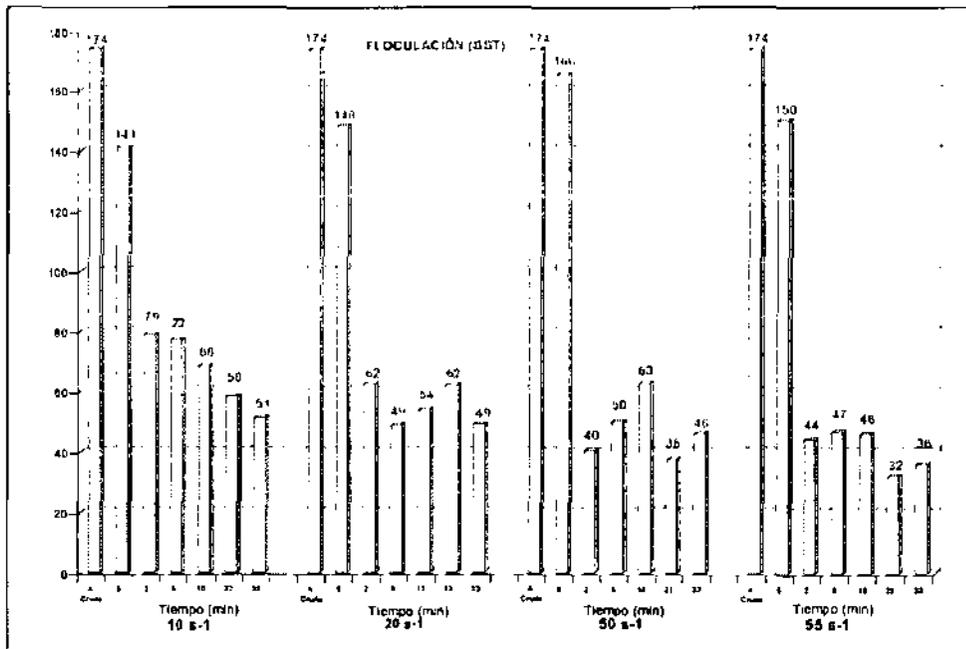
**Tabla 12. Comparación entre los dos coagulantes empleados y su capacidad de remoción**

Parámetros	Influente	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (50 mg/L)		PAX XL-60 (30 mg/L)	
	mg/L	Concentración	Porcentaje de remoción	Concentración	Porcentaje de remoción
SST, mg/L	227	38	83.1	36.6	84
Turbiedad, UNT	224	28	87.4	38.6	86.8
DQO, mg/L	582	208	64.2	233	60
Color (R), Pt-Co	>550	138	74.9	193	65
Color (A), Pt-Co	179	63	65	96	46.2
STT, mg/L	1151	764	33.6	720	45.3
SDT, mg/L	682	625	8.4	631	2.8
PH	7.72	7.40	4.2	7.5	3.1
P. Redox, mV	-64.1	-42.8	33.3	-47	26.9
Cond., mS/cm	1.298	1.247	3.9	1.300	2.8
Alcalinidad, mg/L	318	256	19.5	237	13.2

### 6.3 Determinación del efecto del gradiente y tiempo de contacto durante la etapa de floculación

Durante este estudio el agua cruda presentó una concentración para SST de 174 mg/L, turbiedad de 218 UNT y DQO<sub>t</sub> de 580 mg/L en promedio. Al aplicar únicamente energía externa sin ayuda de ningún reactivo se presentaron para SST entre 141 y 166 mg/L (4.8 hasta 19.1 por ciento de remoción), turbiedad entre 192 y 207 UNT (5.1 hasta 12 por ciento de remoción) y DQO<sub>t</sub> entre 566 y 589 mg/L (1.6 hasta 2.5 por ciento de remoción). Al utilizar

diferentes gradientes (10, 20, 50 y 55  $s^{-1}$ ) con ayuda de reactivos, se observa que la remoción de contaminantes esta relacionada directamente con un tiempo máximo de 5 minutos, al incrementar este tiempo el porcentaje de remoción alcanzado no fue tan significativo y se observó rompimiento de los flocúlos ya formados. Para los 5 minutos en esta etapa de floculación, y con un gradiente de **10  $s^{-1}$**  se obtuvo una remoción para SST de 55.6 por ciento ( $77 \pm 15.4$  mg/L), turbiedad de 62.7 por ciento ( $81 \pm 20.7$  UNT) y  $DQO_t$  de 41.9 por ciento ( $337 \pm 45$  mg/L); cuando se aplicó un gradiente de **20  $s^{-1}$**  se obtuvo para SST el 72.1 por ciento ( $49 \pm 21.7$  mg/L), turbiedad el 77.7 por ciento ( $49 \pm 14.4$  UNT) y  $DQO_t$  el 48.1 por ciento ( $301 \pm 109$  mg/L); para el caso de un gradiente de **50  $s^{-1}$**  se tiene para SST 71.3 por ciento ( $50 \pm 14.3$  mg/L), turbiedad 76.1 por ciento ( $52 \pm 13$  UNT) y  $DQO_t$  50.8 por ciento ( $285 \pm 21.5$  mg/L) y por último para el caso de un gradiente de **55  $s^{-1}$**  se removieron el 73.3 por ciento ( $47 \pm 15.2$  mg/L) de SST, 82.4 por ciento ( $38 \pm 11.7$  UNT) de turbiedad y 53.1 por ciento ( $272 \pm 31$  mg/L) de  $DQO_t$  (Figuras 17, 18 y 19 respectivamente).



**Figura 17. Remoción de SST aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de floculación**

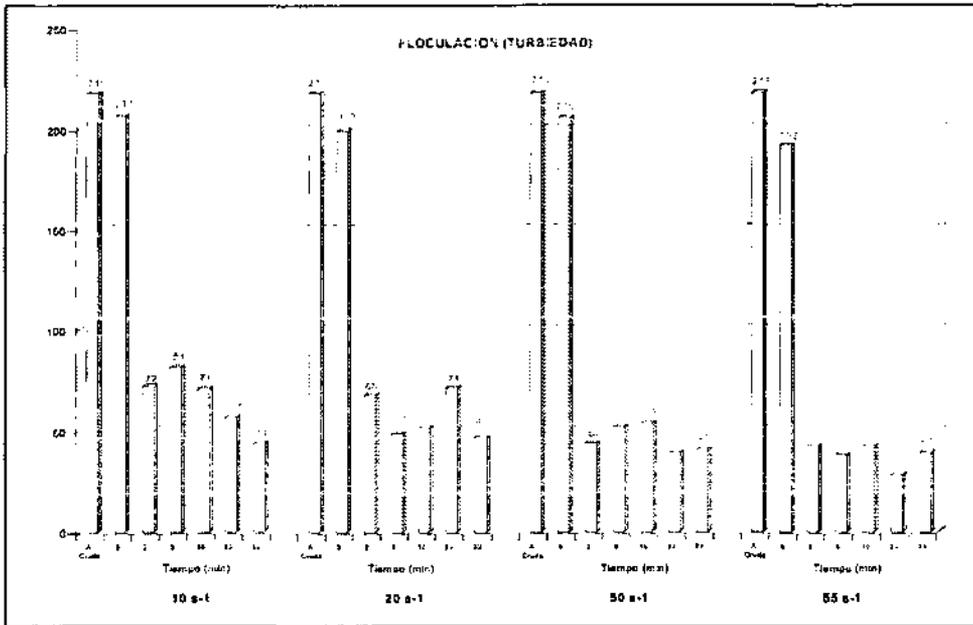


Figura 18. Remoción de turbiedad aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de floculación

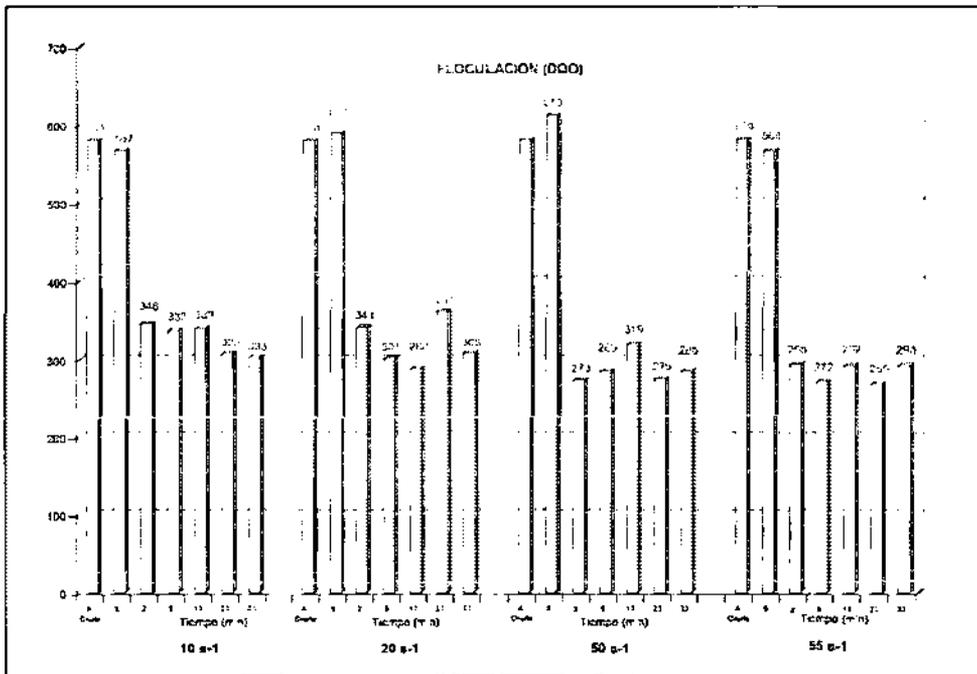


Figura 19. Remoción de DQO<sub>t</sub> aplicando diferentes gradientes y tiempos de contacto en la etapa de floculación

La mejor calidad obtenida en esta etapa fue cuando se aplicó un gradiente de  $55 \text{ s}^{-1}$  donde se registraron valores que se encuentran desde 26 hasta 58 mg/L, una turbiedad con valores que fluctuaron de 28 hasta 55 UNT y  $\text{DQO}_t$  presentó valores que se encuentran de 244 hasta 305 mg/L. Al disminuir el valor del gradiente hasta  $10 \text{ s}^{-1}$  se determinó que este gradiente fue el más deficiente, por lo que se obtuvieron para SST valores que van de 56 hasta 90 mg/L, una turbiedad con un rango de 58 hasta 112 UNT y una  $\text{DQO}_t$  con un rango de 293 hasta 388 mg/L. Para el gradiente de  $50 \text{ s}^{-1}$  se mantuvo una calidad aceptable mientras que con un gradiente de  $20 \text{ s}^{-1}$  se mantuvo por debajo de la calidad obtenida comparada con el gradiente de  $55 \text{ s}^{-1}$ .

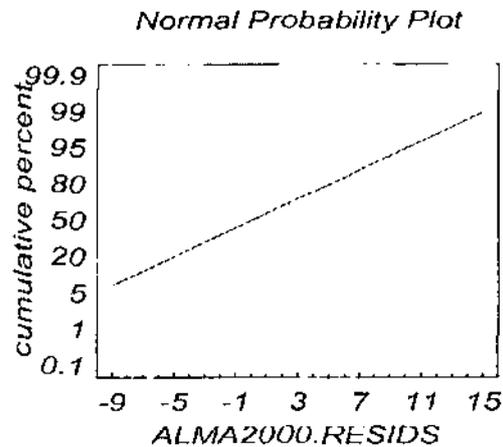
Para la etapa de floculación se observó un decremento para el color real y aparente obteniendo mejores valores para gradientes de 50 y  $55 \text{ s}^{-1}$ . Los intervalos de pH se mantuvieron constantes (7.4 hasta 7.9) al igual que los SDT (734 hasta 754 mg/L) y la conductividad (1462 hasta 1501 mS/cm).

Las peores condiciones para esta etapa se obtuvieron con gradientes de 10 y  $20 \text{ s}^{-1}$  obteniéndose concentraciones para SST de 51 hasta 79 mg/L, turbiedad de 44 hasta 81 UNT y  $\text{DQO}_t$  de 288 hasta 361 mg/L. Para estos gradientes las concentraciones de remoción son menores, independientemente del tiempo aplicado.

### **6.3.1. Análisis estadístico**

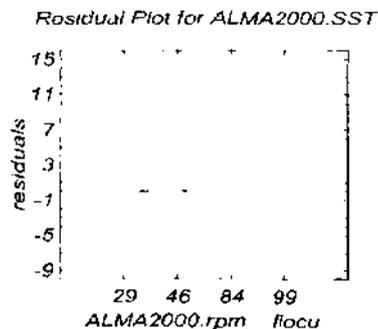
#### ***6.3.1.1. Comprobación de la idoneidad del modelo***

El estudio de la normalidad de los residuos no mostró evidencias de desviaciones mayores, incluso los residuos cercanos se hallaron cerca del cero en los dos casos (Figura 20). Un análisis demostró que el residuo más alejado de la media fue de 1.54, mucho menor de 3 por tanto no existe una inquietud real por la presencia de residuos inusitados.

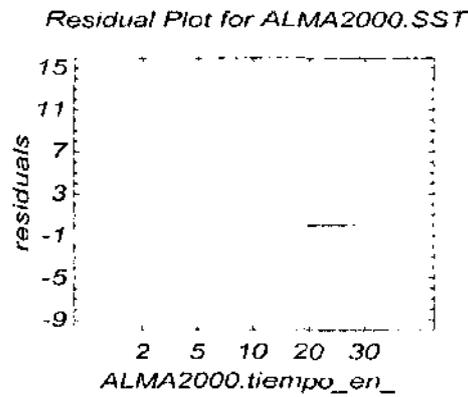


**Figura 20. Distribución normal de los residuos para la etapa de floculación**

En las Figuras 21 y 22, se muestran los datos de residuos con relación a los factores involucrados. De acuerdo con dichas gráficas, no se observó patrón alguno que ponga en riesgo la homocedasticidad. Esto se refuerza por la variancia sin tendencia respecto a los factores gradiente y tiempo.

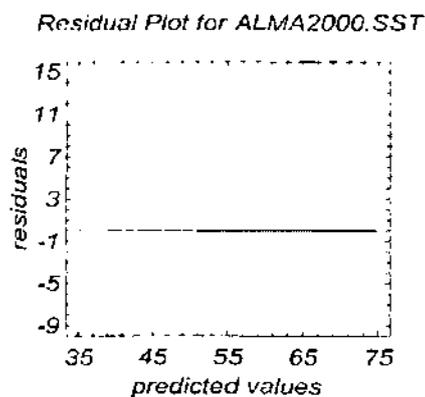


**Figura 21 . Homocedasticidad de los residuos para el factor gradiente**



**Figura 22. Homocedasticidad de los residuos para el factor tiempo**

Con base en la Figura 23, los valores predichos muestran que los residuos se ubicaron con valores tanto positivos como negativos, sin una marcada tendencia que pusiera en peligro la independencia de éstos para los dos casos de polímero.



**Figura 23. Independencia de los residuos para el factor gradiente**

### 6.3.1.2. Análisis de variancia

A partir de los resultados (Tabla 13) se observó que para el factor gradiente, la F calculada fue de 10.7 mayor que la  $F_{0.05, 3, 12} = 3.49$  de Tablas (con un nivel de significancia menor de 0.05), por tanto, se rechaza la hipótesis nula con un 95 por ciento de confianza al tener los gradientes un efecto significativo. Por otro lado, el factor tiempo (Tabla 13) presentó una F calculada de 1.9 menor que la  $F_{0.05, 4, 12} = 3.26$  de Tablas (con un nivel de significancia mayor de 0.05), por tanto, se acepta la hipótesis nula con un 95 por ciento de confianza al tener los tiempos un efecto no significativo.

Además, se observó que ninguna  $F_{calculada}$  fue menor de la unidad, por ello en primera instancia no se sospecha de un modelo inadecuado.

**Tabla 13. Análisis de variancia, gradiente-tiempo**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	$F_{calculada}$	Nivel de significancia
Gradiente $s^{-1}$	1945.1	3	648.4	10.7	0.001
Tiempo, min	470.6	4	117.6	1.9	0.17
Residual	725.4	12	60.4		
Total	3141.7	19			

NOTA: Ningún valor fue excluido, los valores de  $F_0$  están basados en el cuadrado medio del error

### 6.3.1.3. Comparaciones múltiples

Debido al efecto significativo del factor gradiente, se llevó a cabo una prueba de mínima diferencia significativa para determinar el mejor nivel de los gradientes. De acuerdo con la Tabla 14, los gradientes entre 55 y 50  $s^{-1}$  y el 50 y 20  $s^{-1}$  no presentaron diferencias.

**Tabla 14. Análisis de intervalos múltiples con 95 por ciento de significancia**

Nivel	Número	LSD media	Grupos homogéneos	Diferencia +/-	Límites
55	5	42	X		
50	5	44	XX		
20	5	54	X		
10	5	67	X		
Contraste					
10-20				13	10.7*
10-50				22	10.7*
10-55				25	10.7*
20-50				9.7	10.7
20-55				11.9	10.7*
50-55				22.6	10.7

\* Estadísticamente tienen diferencias significativas.

### 6.3.2. Comparación de 50 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ y 30 mg/L de PAX XL-60 y bajo las mejores condiciones de gradiente y tiempo

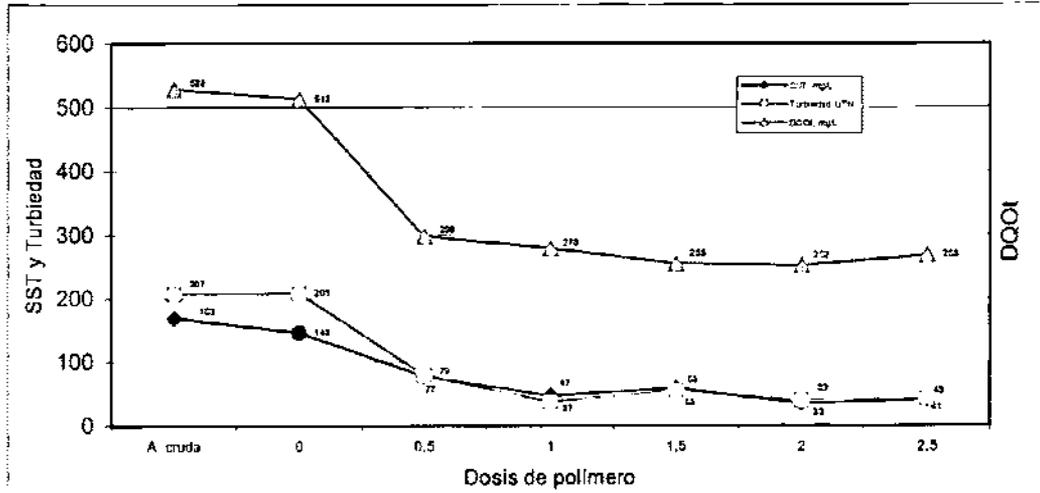
Utilizando 30 mg/L de PAX XL-60 para las mejores condiciones de gradiente y tiempo que se obtuvieron en coagulación, floculación y sedimentación (5 min) se obtuvo una remoción para SST de 85.6 por ciento ( $25 \pm 4.2$  mg/L), turbiedad de 84.6 por ciento ( $33.5 \pm 0.7$  UNT) y  $DQO_t$  de 51.4 por ciento ( $281.5 \pm 21.9$ ). Comparando con 50 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$  (Tabla 15) se obtuvo una calidad semejante en el efluente para SST de  $47 \pm 15.4$  mg/L (73.3 por ciento de remoción), turbiedad de  $38 \pm 20.7$  UNT (82.4 por ciento de remoción) y una  $DQO_t$  de  $272 \pm 45$  mg/L (53.1 por ciento de remoción). El PAX XL-60 resultó más eficiente con 30 mg/L vs 50 mg/L de sulfato de aluminio, lo que se refleja en una mejor calidad en el efluente, pero económicamente el uso del PAX XL-60 resultó ser mucho más costoso que el sulfato de aluminio. Otros parámetros como el pH se mantuvieron en un intervalo de 7.4 a 7.9, SDT de 736 hasta 743 mg/L, conductividad de 1469 hasta 1483 mS/cm, color real de 159 hasta 224 Pt-Co, color aparente de 81 hasta 87 Pt-Co y STT de 934 mg/L, lo cual refleja que estas variaciones no afectaron el proceso. El mayor problema son los SDT y la conductividad ya que a largo plazo pueden afectar a los cultivos y los suelos agrícolas.

**Tabla 15. Comparación entre dos coagulantes empleados y su capacidad de remoción en la etapa de floculación**

Parámetros	Influente	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (50 mg/L)		PAX XL-60 (30 mg/L)	
	mg/L	Concentración	Porcentaje de remoción	Concentración	Porcentaje de remoción
SST, mg/L	174	47	73.3	25	85.6
Turbiedad, UNT	218	38	82.4	34	84.6
DQO <sub>t</sub> , mg/L	580	272	53.1	282	51.4
Color (R), Pt-Co	<654	224	65.8	159	75.7
Color (A), Pt-Co	198	87	56.4	81	59.4
STT, mg/L	1075			934	13.1

#### 6.4 Evaluación de la dosis para un polímero aniónico y las mejores condiciones de gradiente y tiempo de contacto

La Figura 24, indica el comportamiento de la remoción de SST, turbiedad y DQO<sub>t</sub> al aplicar dosis de polímero desde 0.5 hasta 2.5 mg/L con 50 mg/L de sulfato de aluminio en todos los casos. De acuerdo con estos parámetros, durante la etapa de floculación, el incremento de 0.5 hasta 2.5 mg/L permitió mejorar la calidad del efluente tratado: los SST disminuyeron paulatinamente de 169 hasta 36 mg/L, la turbiedad decreció de manera similar y se observó que la eficiencia de remoción de la DQO<sub>t</sub> dependió de las características propias del agua residual y del tipo de coagulante aplicado. Al aplicar una dosis de 0.5 mg/L de polímero y hasta 1.0 mg/L se obtuvo una disminución considerable de contaminantes (SST de 77 y 47 mg/L respectivamente), turbiedad de 79 y 37 UNT respectivamente y DQO<sub>t</sub> de 298 y 279 mg/L respectivamente), lo cual no fue tan considerable cuando se incremento la dosis por encima de 1.0 mg/L.



**Figura 24. Remoción de contaminantes al aplicar diversas dosis de polímero**

La Tabla 16, muestra la relación que existe entre utilizar una dosis de 1 a 2.5 mg/L. Como es evidente un incremento de dosis de polímero no fue significativo en la remoción de los contaminantes observándose que los SST disminuyeron de 174 mg/L hasta 47 mg/L (73 por ciento) cuando se aplicó 1.0 mg/L, mientras que cuando se aplicó 2.5 mg/L de polímero disminuyeron los SST de 169 mg/L hasta 41 mg/L (76 por ciento). La turbiedad se removió de 83 y 79 por ciento cuando se aplicó 1 y 2.5 mg/L de polímero respectivamente con valores promedio en el efluente que se encontraron de 37 y 43 UNT respectivamente. Para la DQO<sub>t</sub> se obtuvieron valores de 279 y 268 mg/L (52 y 49 por ciento en el efluente cuando se aplicó 1.0 y 2.5 mg/L de polímero respectivamente). Por lo cual, en términos generales no se recomienda el uso de más de 1.0 mg/L de polímero ya que de acuerdo al contenido de SST en el agua tratada no existe una evidencia de un incremento en su calidad por lo contrario para el caso de los parámetros de la DQO<sub>t</sub>, la turbiedad, el color real y el color aparente. Se determinaron mejores resultados cuando se aplicó 1.0 mg/L de polímero.

**Tabla 16. Remoción al incrementar la dosis de polímero orgánico para las mejores condiciones en el tratamiento del agua residual**

Parámetros	Influente	1 mg/L de Polímero		Influente	2.5 mg/L de Polímero	
	mg/L	mg/L	Porcentaje de remoción	mg/L	mg/L	Porcentaje de remoción
SST, mg/L	174	47	73	169	41	76
Turbiedad, UNT	218	37	83	207	43	79
DQO <sub>t</sub> , mg/L	580	279	52	528	268	49
Color (R), Pt-Co	>654	224	65.8	>654	240	63.3
Color (A), Pt-Co	198	87	56.4	198	112	43.4

La Tabla 17, muestra la calidad del agua residual cruda (ARC) y tratada (AT) con diversas condiciones (gradientes 10, 20, 50 y 55 s<sup>-1</sup> y tiempos 2, 5, 10 y 20 min), en dos escenarios distintos, es decir, cuando se aplicó al sistema 1.0 y 2.5 mg/L de polímero aniónico en cada uno de los tratamientos. Para determinar la eficiencia del proceso, los parámetros considerados como indicadores los SST, la turbiedad y la DQO<sub>t</sub> evaluados en cada caso.

El efecto que tuvo el gradiente, tiempo y dosis de polímero aplicado durante la etapa de floculación pudo ser medido a través de diversos indicadores de calidad del agua que se evalúen, en el primer caso cuando se aplicó una dosis de (1.0 mg/L) el AR presentó una concentración de SST de 174 mg/L, 218 UNT de turbiedad y 580 mg/L de DQO<sub>t</sub>. Cuando se aplicó el gradiente de 10 s<sup>-1</sup> se observó que, conforme se incrementa el tiempo de contacto, aumenta la calidad del efluente. Así, los SST disminuyen a 79, 77, 68 y 60 mg/L con un tiempo de agitación de 2, 5, 10 y 20 min respectivamente. Cuando se incrementó el gradiente a 20, 50 y 55 s<sup>-1</sup>, las eficiencias alcanzadas no dependieron del tiempo de contacto, sino de la fuerza que se aplicó; sin embargo, en algunas ocasiones se mostró que en largos tiempos de contacto se causó una resuspensión de las partículas o, en su defecto, un rompimiento del flóculo por la acción de choques entre éstas. Con el gradiente de 20 s<sup>-1</sup>, el contenido de SST remanentes fue de 49 y 51 mg/L para un tiempo de contacto de 5 y 10 min respectivamente. Con los gradientes de 50 y 55 s<sup>-1</sup>, se observó el mismo comportamiento; de hecho, los SST remanentes fluctuaron entre 32 y 47 mg/L para un tiempo de contacto de 2, 5 y 20 min. Para este último caso se encontró que existe una resuspensión de las partículas con un tiempo de contacto de 10 min; por tanto éste se

considera un tiempo crítico durante la etapa de floculación. Los porcentajes de remoción de SST determinados con las mejores condiciones de operación (tomando en cuenta la remoción de SST) fluctuaron entre 64 y 82 por ciento. Con respecto a la remoción de la turbiedad y la  $DQO_t$ , se observó el mismo comportamiento. Al descartar el gradiente  $10 \text{ s}^{-1}$ , las remociones de turbiedad variaron desde 67 hasta 85 por ciento mientras que la  $DQO_t$  fluctuó entre 38 y 55 por ciento, los porcentajes menores coincidieron al utilizar  $20 \text{ s}^{-1}$  y 20 min de contacto.

En el segundo caso, cuando se estudio el efecto del gradiente y tiempo con 2.5 mg/L de polímero aplicados al AR (Tabla 17), se encontró que el agua cruda presentó una calidad similar en cuanto al contenido de SST (169 mg/L vs 174 mg/L), la turbiedad (207 mg/L vs 218 mg/L) y la  $DQOT$  (528 mg/L vs 580 mg/L). En este caso, al someter el agua a un sistema de TPA con diversas condiciones de gradiente y tiempo, se observó el mismo comportamiento: con un gradiente pequeño ( $10 \text{ s}^{-1}$ ), conforme se incrementó el tiempo de contacto, aumentó la calidad del efluente en los primeros tres tiempo (2, 5 y 10 min), pues la concentración de los SST disminuyó a 75, 66 y 52 mg/L respectivamente; además, se observó una resuspensión de este contaminante en un tiempo de contacto de 20 min. Cuando se incrementó el gradiente a 20, 50 y  $55 \text{ s}^{-1}$ , los tiempos entre 5 y 10 min óptimos para que el proceso de floculación se lleve a cabo eficientemente, en todos los casos. Con estas condiciones, el contenido de SST remanentes varió desde 35 hasta 51 mg/L y la concentración menor se presentó al trabajar con el gradiente de  $50 \text{ s}^{-1}$ . También se observó que 2 min no fueron suficientes, para que la floculación se llevará a cabo de manera eficiente y con 20 min la calidad del agua residual tratada disminuyó por la resuspensión de los mismos flóculos. Con las mejores condiciones de gradiente ( $50$  y  $55 \text{ s}^{-1}$ ), las remociones de turbiedad fluctuaron desde 78 hasta 84 por ciento, mientras que en el efluente se removió un porcentaje de  $DQO_t$  entre 49 y 55 por ciento.

**Tabla 17. Calidad del agua residual cruda (ARC) y tratada (AT) con diversas condiciones (gradiente y tiempo) y dosis de polímero de 1 y 2.5 mg/L**

Gradiente	Tiempo en floculación	DOSIS DE POLÍMERO											
		1 mg/L		2.5 mg/L		1 mg/L		2.5 mg/L		1 mg/L		2.5 mg/L	
		SST	Rem	SST	Rem	Turbiedad	rem	Turbiedad	rem	DQO <sub>t</sub>	rem	DQO <sub>t</sub>	rem
s <sup>l</sup>	min	mg/L	%	mg/L	%	UNT	%	UNT	%	mg/L	%	mg/L	%
A. cruda		174		169		218		207		580		528	
Blanco	5	141	19	146	14	207	5	206				513	3
10	2	79	55	75	56	72	67	65	69	346	40	274	48
10	5	77	56	66	61	81	63	66	68	337	42	278	47
10	10	68	61	52	69	71	67	51	76	339	41	255	52
10	20	60	66	55	67	56	74	47	77	306	47	259	51
20	2	62	64	57	66	68	69	52	75	341	41	264	50
20	5	49	72	43	75	49	78	45	78	301	48	264	50
20	10	51	71	51	70	47	78	53	74	289	50	264	50
20	20	62	64	47	72	71	67	48	77	361	38	252	52
50	2	40	77	42	75	44	80	37	82	273	53	243	54
50	5	46	74	35	79	50	77	33	84	287	50	240	55
50	10	57	67	35	79	50	77	36	82	306	47	258	51
50	20	38	78	36	79	45	79	42	80	282	51	235	55
55	2	44	75	51	70	43	80	45	78	295	49	244	54
55	5	47	73	41	76	37	83	43	79	279	52	268	49
55	10	54	69	35	79	40	82	38	81	280	52	259	51
55	20	32	82	53	69	32	85	36	83	259	55	250	53

### 6.4.1 Análisis de variancia

A partir de los resultados se observó que para la etapa de floculación el factor gradiente, la  $F_{calculada}$  de 10.7 (1.0 mg/L de polímero) y 5.06 (2.5 mg/L de polímero) fue mayor que la  $F_{0.05, 3,12} = 3.49$  de Tablas (con un nivel de significancia menor de 0.05), por tanto, se rechaza la hipótesis nula con un 95 por ciento de confianza al tener los gradientes un efecto significativo. Por otro lado, el factor tiempo presentó una  $F_{calculada}$  de 1.9 y 1.3 (para 1.0 y 2.5 mg/L de polímero) menor que la  $F_{0.05, 4,12} = 3.26$  de Tablas (con un nivel de significancia mayor de 0.05), por tanto, se acepta la hipótesis nula con un 95 por ciento de confianza al tener los tiempos un efecto no significativo.

Además, se observó que ninguna  $F_{calculada}$  fue menor de la unidad por ello, en primera instancia no se sospecha de un modelo inadecuado o de un error "inflado".

**Tabla 18. Análisis de variancia, gradiente-tiempo (1.0 mg/L de polímero)**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculado	Nivel de significancia
Gradiente s-1	1945.1	3	648.4	10.7	0.001
Tiempo, min	470.6	4	117.6	1.9	0.17
Residual	725.4	12	60.4		
Total	3141.7	19			

Ningún valor fue excluido.

Los valores de Fo están basados en el cuadrado medio del error

**Tabla 19. Análisis de varianza, gradiente-tiempo (2.5 mg/L polímero)**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	Nivel de significancia
Gradiente s-1	2527.3	3	842	5.1	0.0074
Tiempo, min	670.3	3	223	1.3	0.287
Residual	4207	25	168		
Total	7404.8	31			

NOTA: Ningún valor fue excluido, los valores de Fo están basados en el cuadrado medio del error

Debido al efecto significativo del factor gradiente, se llevó a cabo una prueba de mínima diferencia significativa para determinar el mejor nivel de los gradientes. De acuerdo con la Tabla 20, los gradientes entre 55 y 50 s<sup>-1</sup> y el 50 y 20 s<sup>-1</sup> no presentaron diferencias. En la Figura 25a de los promedios con intervalos de la Mínima Diferencia Significativa (LSD, por sus siglas en inglés, a un 95%), se observó que un incremento del gradiente de 10 s<sup>-1</sup> (29rpm) a 20 s<sup>-1</sup> (46 rpm) y a 50 s<sup>-1</sup> (84 rpm) produjo una disminución en los SST, pero un aumento a 55 s<sup>-1</sup> (99 rpm) ya no ocasionó un decremento significativo de éstos.

**Tabla 20. Análisis de intervalos múltiples (1.0 mg/L) con 95 por ciento de significancia**

Nivel	Número	LSD media	Grupos homogéneos	Diferencia +/-	Límites
55	5	42	X		
50	5	44	XX		
20	5	54	X		
10	5	67	X		
Contraste					
10-20				13	10.7*
10-50				22	10.7*
10-55				25	10.7*
20-50				9.7	10.7
20-55				11.9	10.7*
50-55				22.6	10.7

\* Estadísticamente tienen diferencias significativas.

De acuerdo con la Tabla 21 (2.5 mg/L de polímero) los niveles 50 y 55  $s^{-1}$  no presentaron diferencias. En la Figura 25b de los promedios con intervalos de la Mínima Diferencia Significativa (LSD, a una percentila del 95%), se observó que un aumento de 10  $s^{-1}$  (29rpm) a 20  $s^{-1}$  (46 rpm) y a 50  $s^{-1}$  (84 rpm) causó una disminución en los SST, pero un aumento a 55  $s^{-1}$  (99 rpm) se produjo un incremento del contenido de estos (Figura 25b).

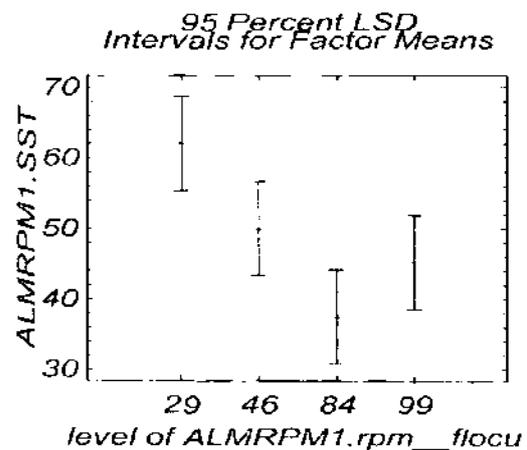
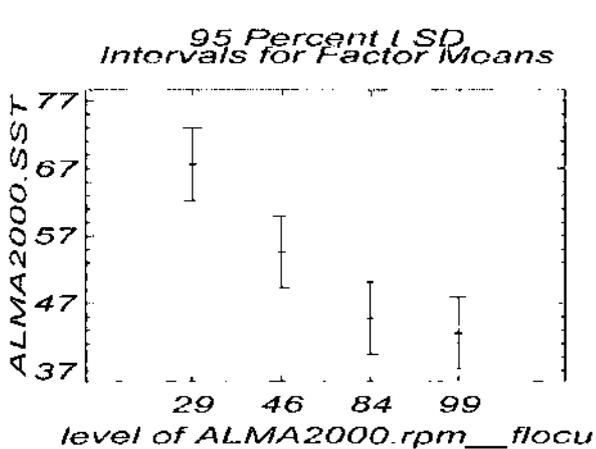
**Tabla 21. Análisis de intervalos múltiples (2.5 mg/L) con 95 por ciento de significancia**

Nivel	Número	LS mean	Grupos homogéneos	Diferencia +/-	Límites
50	8	37	X		
55	8	45	X		
20	8	50	XX		
10	8	62	X		
Contraste					13
10-20				12	13
10-50				24	13*
10-55				16	13*
20-50				12	13
20-55				4.7	13
50-55				-7.7	13

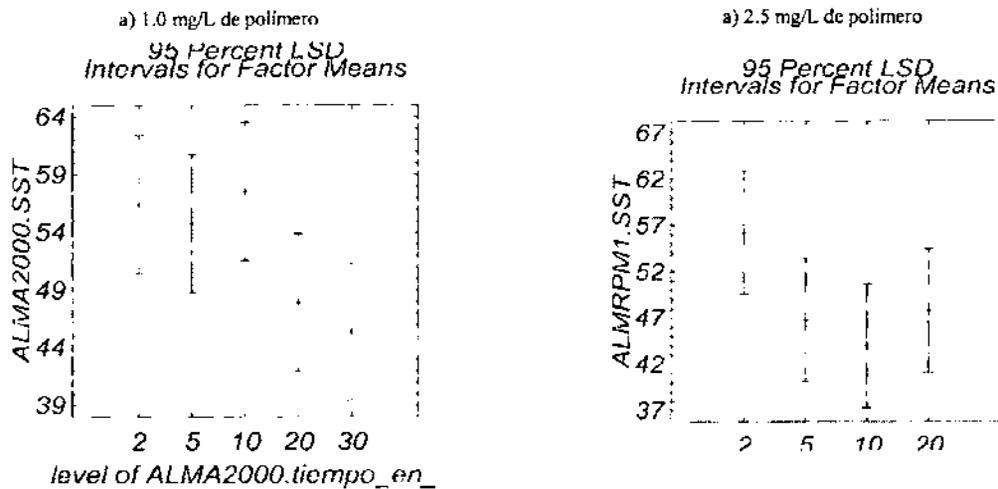
\* Estadísticamente tienen diferencias significativas.

a) 1.0 mg/L de polímero

b) 2.5 mg/L de polímero



**Figura 25. Promedios con intervalos de la Mínima Diferencia Significativa a partir del gradiente utilizado**

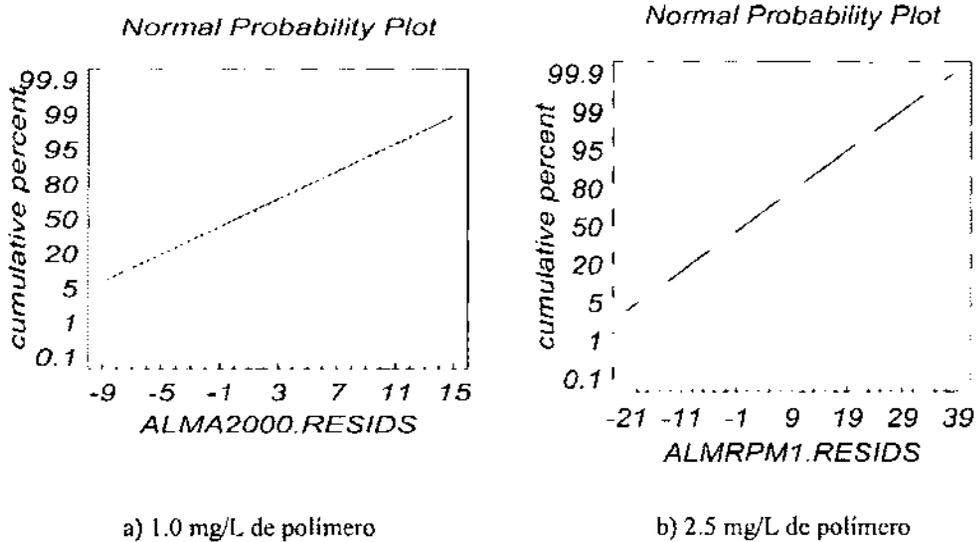


**Figura 26. Promedios con intervalos de la Mínima Diferencia Significativa a partir del tiempo utilizado**

### Comprobación de la idoneidad del modelo

#### Suposición de normalidad

El estudio de la normalidad de los residuos no mostró evidencias de desviaciones mayores, incluso los residuos cercanos se hallaron cerca del cero en los dos casos (Figura 27 a y b). Un análisis demostró que el residuo más alejado de la media fue de 1.54, mucho menor de 3 (es decir, de 3 desviaciones estándar) por tanto no existe una inquietud real por la presencia de residuos inusitados.



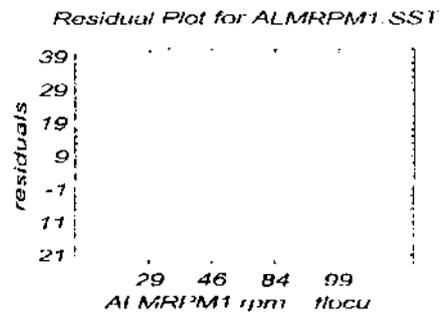
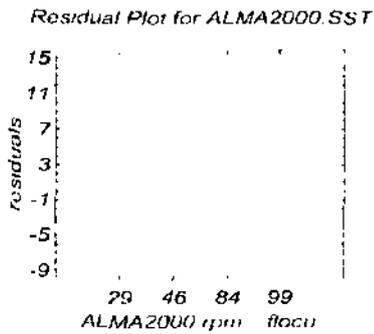
**Figura 27 (a y b). Distribución normal de los residuos**

### **Suposición de homocedasticidad**

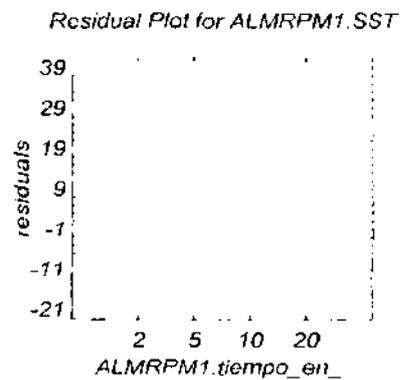
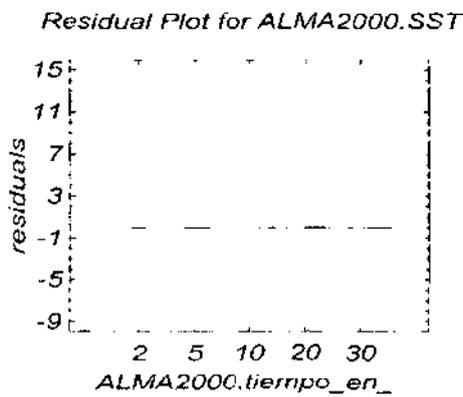
En las Figuras 28 (a y b) y 29 (a y b) se muestran los datos de residuos con relación a los factores involucrados, De acuerdo con dichas gráficas, no se observó patrón alguno que ponga en riesgo la homocedasticidad. Esto se refuerza por la variancia sin tendencia con respecto a los factores gradiente y tiempo.

a) 1.0 mg/L de polímero

b) 2.5 mg/L de polímero



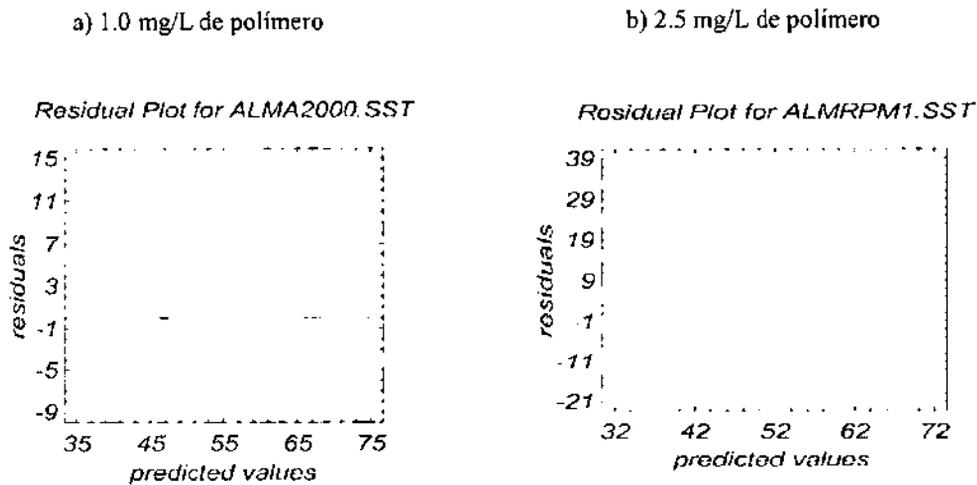
**Figura 28 (a y b). Homocedasticidad de los residuos para el factor gradiente**



**Figuras 29 (a y b). Homocedasticidad de los residuos para el factor tiempo**

**Suposición de independencia**

Con base en la Figura 28 (a y b), los valores predichos muestran que los residuos se ubicaron con valores tanto positivos como negativos, sin una marcada tendencia que pusiera en peligro la independencia de éstos para los dos casos de polímero.



**Figura 30 (a y b). Independencia de los residuos para el factor gradiente**

**6.5. Caracterización y determinación del lodo producido con las mejores condiciones de operación**

El contenido y la concentración de lodo producido en un sistema de TPA dependen de la eficiencia de remoción de sólidos que se alcanza en el sistema, el tipo de coagulante y de la dosis aplicada. En la Tabla 22, se observa que independientemente del gradiente utilizado, para el caso del sulfato de aluminio, el volumen de lodo producido fue de 11.6 L/m<sup>3</sup> de agua tratada (0.37 g/L), con una concentración promedio de 1.1 por ciento de ST, de los cuales el 68.4 por ciento fueron STV que nos indica el contenido de materia orgánica en el lodo y el 31.6 por ciento se presentaron en forma de STF que se refiere a la cantidad de materia inorgánica presente. Para el caso del PAX XL-60, este coagulante produjo un mayor volumen

de lodo (16.5 L/m<sup>3</sup> de agua tratada) con una concentración de 0.35 g/L. El porcentaje de sólidos totales, ST, fue menor (0.9 por ciento): un 64 por ciento correspondió a sólidos totales volátiles, STV, que es la cantidad de materia orgánica presente y un 36 por ciento se presentó en la forma de sólidos totales fijos, STF que es la cantidad de materia inorgánica obtenida.

**Tabla 22. Cantidad y calidad de volumen producido en un TPA con diversas condiciones de operación**

Coagulante	Dosis	Gradiente	tiempo en floculación		STT	STV	STF	ST	STV	STF
	mg/L		Vol	T30 (mL)	mg/L	mg/L	mg/L	%	%	%
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	10	2	10.5	13747	9325	4422	1.5	67.9	32.1
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	10	5	9.5	14142	9619	4523	1.0	68.1	31.9
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	10	10	12.0	11908	8096	3813	0.9	68.1	31.9
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	10	20	13.5	11635	7899	3736	0.9	67.8	32.2
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	20	2	11.7	12202	8249	3953	0.9	68.0	32.0
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	20	5	10.0	15613	10777	4836	1.1	68.9	31.1
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	20	10	12.0	14681	10353	4328	1.0	69.6	30.4
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	20	20	12.5	10492	6983	3508	0.7	66.6	33.4
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	20	30	16.0	29150	25513	3637	2.3	87.5	12.5
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	50	2	12.0	14421	9613	4808	1.0	66.6	33.4
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	50	5	10.5	14234	9530	4703	1.1	67.0	33.0
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	50	10	10.0	16500	10980	5520	1.1	66.5	33.5
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	50	20	10.7	15667	10270	5398	1.1	65.6	34.4
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	50	30	11.0	14491	9488	5003	1.0	65.5	34.5
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	55	5	12.3	13946	9333	4613	1.0	66.9	33.1
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	55	10	12.0	14517	9683	4833	1.0	66.7	33.3
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	55	20	11.0	15745	10527	5218	1.1	66.9	33.1
PAX XL-60	30	20	10	22.0	9014	5541	3473	0.8	61.5	38.5
PAX XL-60	30	50	10	15.0	10687	7073	3613	0.9	66.2	33.8
PAX XL-60	30	50	20	17.5	10923	6984	3939	0.9	63.4	36.6
PAX XL-60	30	50	30	17.0	10394					
PAX XL-60	30	55	5	28.0	9143	5486	3657	0.8	60.0	40.0
PAX XL-60	30	55	10	11.0	12900	8873	4027	1.2	68.8	31.2
PAX XL-60	30	55	20	15.0	10693	6940	3753	0.9	64.9	35.1

Al incrementar la dosis de los dos coagulantes utilizados, se produjo un mayor volumen de lodo, según se observa en la Tabla 23. En el caso del sulfato de aluminio, dicho volumen aumentó de 9 L/m<sup>3</sup> a 18.5 L/m<sup>3</sup> de agua tratada; en el caso del PAX XL-60, el incremento fue de 15 a 33 L/m<sup>3</sup> de agua tratada. El porcentaje de ST fue diferente para los coagulantes (1.3 y 2.0 por ciento ST respectivamente), sin embargo, la concentración promedio y la relación de STV y STF permaneció de manera constante (60 y 40 por ciento respectivamente).

**Tabla 23. Contenido de lodo de acuerdo a la dosis y tipo de coagulante aplicado**

Coagulante	Dosis de coagulante	Dosis de polímero	Volumen de lodo (mL)	STT	STV	STF	ST	STV	STF
	mg/L	mg/L	mL	mg/L	mg/L	mg/L	%o	%	%
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	25	2.5	9.0	23135	14349	8786	1.2	62.0	38.0
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35	2.5	10.1	19663	12245	7419	1.3	62.3	37.7
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	2.5	12.5	18657	11097	7560	1.5	59.5	40.5
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	75	2.5	16.5	14246	8225	6021	1.6	57.7	42.3
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	100	2.5	18.5	13063	7572	5491	1.2	57.9	42.1
PAX XL-60	16.4	2.5	20.0	10763	6504	4259	1.9	60.2	39.8
PAX XL-60	22	2.5	15.5	15707	9178	6529	2.7	58.5	41.5
PAX XL-60	32.8	2.5	20.5	11652	6968	4684	2.3	59.7	40.3
PAX XL-60	49.3	2.5	29.0	9562	5386	4176	1.7	56.3	43.7
PAX XL-60	65.3	2.5	33.0	8767	4856	3911	1.5	55.2	44.8

### 6.6. Remoción de microorganismos con base en los gradientes utilizados

En cuanto a la remoción de microorganismos, el sistema de TPA independiente de las condiciones de gradiente, tiempo aplicado, dosis de floculante y tipo de coagulante permitió reducir los huevos de helminto (HH) hasta una concentración que fluctuó entre 0.4 y 2.0 HH/L, por lo que este valor se encuentra dentro de la norma para riego restringido. En cuanto a la eficiencia de remoción de los coliformes fecales (CF) y Salmonellas se observó que durante el tratamiento y sin importar cualquier condición de trabajo, existió una reducción mínima de estos microorganismos (menor a 2 unidades logarítmicas, Tabla 24) lo cual se encuentra fuera de la norma, por consiguiente es necesario un tratamiento posterior que puede ser una desinfección a base de Cloro, Ozono o UV, para poder asegurar la eliminación de microorganismos o indicadores de contaminación.

La alta remoción de HH encontrada en este sistema se debe presumiblemente a que dado su tamaño (de 20 hasta 80 µm) estos microorganismos pueden estar asociados a partículas (HH-SST) mientras que los CF y las Salmonellas que presentan un menor diámetro (0.75-7.5 µm) difícilmente permiten dicha asociación.

**Tabla 24. Contenido de microorganismos en el agua tratada con diversas condiciones de operación [50 mg/L  $Al_2(SO_4)_3$  y 30 mg/L de PAX XL-60]**

Coagulante	Tipo de muestra	Floculación	tiempo en floculación	SST	HH	CF	Salmonellas
		$s^{-1}$		mg/L	HH/L	NMP/100 mL	NMP/100 mL
$Al_2(SO_4)_3$	A. Cruda	A. Cruda		174	14.7	2.82E+08	5.43E+06
$Al_2(SO_4)_3$	Tratada	10	30	54	1.60	1.50E+07	
$Al_2(SO_4)_3$	Tratada	10	30	54	1.60	1.50E+07	
$Al_2(SO_4)_3$	Tratada	50	5	46		5.10E+07	4.00E+05
$Al_2(SO_4)_3$	Tratada	50	20	38	0.60	5.45E+06	9.85E+05
$Al_2(SO_4)_3$	Tratada	50	20	38	0.60	5.45E+06	9.85E+05
$Al_2(SO_4)_3$	Tratada	50	30	43	2.00	8.50E+06	1.50E+06
$Al_2(SO_4)_3$		50			1.20	2.00E+06	7.00E+06
$Al_2(SO_4)_3$		55	5		0.60	8.00E+07	3.60E+06
$Al_2(SO_4)_3$	Tratada	55	5	47	1.40	6.85E+07	4.30E+06
$Al_2(SO_4)_3$	Tratada	55	10	54		4.70E+06	5.30E+05
$Al_2(SO_4)_3$	Tratada	55	10	54		4.70E+06	5.30E+05
PAX XL-60	A. Cruda	A. Cruda		174	14.7	2.82E+08	5.43E+06
PAX XL-60	Tratada	10	30	24	0.80	4.10E+07	
PAX XL-60	Tratada	50	5	20	0.7	5.75E+07	1.30E+06
PAX XL-60	Tratada	55	5		0.4	1.7E+07	1.80E+06
PAX XL-60	Tratada	50	20	29	0.60	1.60E+08	3.00E+06
PAX XL-60	Tratada	55	5	25	0.80	4.85E+07	4.80E+06
PAX XL-60	Tratada	55	10	24		6.50E+06	6.30E+05
PAX XL-60	Tratada	55	20	20		7.90E+06	7.00E+05

Con un incremento en la dosis de los coagulantes (PAX XL-60 y sulfato de aluminio) no se mejoró la eficiencia de remoción de los microorganismos (HH, CF y las Salmonellas), como lo muestra la Tabla 25. El agua cruda presentó para este caso una concentración de huevos de helminto, coliformes fecales y salmonella de 17.8 HH/L,  $10^9$  NMP/100 ml y  $10^7$  NMP/100 ml respectivamente. Para una dosis máxima de 100 mg/L de coagulante, no se ve un incremento mayor de remoción, obteniendo 0.32 HH/L,  $10^7$  NMP/100 ml y  $10^5$  NMP/100 ml respectivamente. Para el caso del PAX XL-60 se obtuvieron valores semejantes de remoción, lo que indica que es necesario poner mayor énfasis en los procesos complementarios.

**Tabla 25. Contenido de microorganismos con base en el tipo de coagulante y la dosis aplicada**

Coagulante	Dosis, mg/L	HH, HH/L	CF, NMP/100 mL	Salmonellas, NMP/100 mL
A. Cruda	A. Cruda	17.8	5.59E+09	4.48E+07
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	25	1.60	3.67E+08	5.90E+06
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35	1.40	2.30E+07	7.00E+05
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	0.60	3.40E+07	2.45E+06
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	75	0.30	4.85E+07	1.00E+06
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	100	0.32	2.00E+07	4.50E+05
PAX XL-60	16	0.60	1.90E+07	1.80E+06
PAX XL-60	22	0.60	1.95E+07	1.75E+06
PAX XL-60	33	0.80	2.25E+07	2.05E+06
PAX XL-60	50	0.60	9.50E+06	1.60E+06
PAX XL-60	65	0.50	2.50E+07	1.60E+06

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN

La dosis de coagulante requerida para tratar un agua residual doméstica dependerá del tipo de coagulante que se quiera usar y de la calidad del agua que se quiera obtener. Para este caso se encontró que con polícloruro de aluminio (PAX XL-60) se requiere de una dosis menor (30 mg/L) que la requerida con el sulfato de aluminio (50 mg/L) para producir una calidad similar de agua tratada. En efecto, con PAX XL-60 se obtuvo un efluente con una concentración de SST de 32 mg/L, la DQO<sub>t</sub> de 248 mg/L y turbiedad de 41 UNT. Mientras que con Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> la concentración para SST fue de 39 mg/L, la DQO<sub>t</sub> de 251 mg/L y turbiedad de 30 UNT.

El análisis estadístico mostró que en un proceso de TPA, el tiempo de contacto que se aplique durante la etapa de coagulación tiene un efecto importante para el desempeño óptimo del proceso. De acuerdo con el análisis de variancia el tratamiento de 336 s<sup>-1</sup> y 30 s, mostró ser completamente diferente a los otros tratamientos, lo que indicó que bajo estas condiciones de gradiente y tiempo de contacto el sistema de coagulación trabajará en forma eficiente.

Durante esta etapa se encontró que conforme se incrementa el tiempo de contacto se favorece la coalición y aglomeración de las partículas. El tiempo óptimo requerido para todos los casos fue de 30 s. Bajo estas condiciones pero usando gradiente de 183 s<sup>-1</sup>, se espera un contenido de SST en el efluente de 41 mg/L, con 336 s<sup>-1</sup>, la concentración esperada será de 38 mg/L y con 520 s<sup>-1</sup> de 40 mg/L, para este último caso se determinó que con un incremento en el tiempo de contacto se presentó una resuspensión de las partículas formadas, mientras que con gradientes de 336 s<sup>-1</sup> el incremento en el tiempo no es tan drástico.

Durante la etapa de floculación el análisis estadístico mostró que el gradiente aplicado durante los tratamientos tuvo un efecto significativo. Con el gradiente de 55 s<sup>-1</sup> y un tiempo

de 5 min se encontraron las mejores condiciones que permitieron reducir los SST hasta 47 mg/L.

Al comparar los resultados obtenidos durante la etapa de floculación se encontró que al incrementar el tiempo de contacto se ve favorecida la formación de partículas capaces de sedimentar fácilmente hasta un tiempo máximo de 5 min, al incremento de este tiempo se observó un rompimiento de los flóculos ya formados. Para un gradiente de  $10 \text{ s}^{-1}$  y 5 min el contenido de SST en el efluente fue de 77 mg/L, con  $20 \text{ s}^{-1}$  el contenido fue de 49 mg/L, con  $50 \text{ s}^{-1}$  de 50 mg/L y finalmente al aplicar un gradiente de  $55 \text{ s}^{-1}$  se obtuvo 47 mg/L.

Bajo las condiciones óptimas de gradiente y tiempo, el coagulante que mejor desempeño tuvo para tratar este tipo de agua fue el PAX XL-60 el cual se obtuvo una mayor eficiencia de remoción de SST de 85.6 hasta 90.4 por ciento.

Durante el estudio de dosis de floculante con diversos gradientes y tiempos de contacto aplicados en la etapa de floculación se encontró que el tiempo aplicado en el sistema tuvo un mayor efecto sobre el tratamiento, es decir el incremento de la eficiencia dependió de las fuerzas que se aplicaron y no de la dosis de floculante. El análisis de variancia indicó que la dosis de floculante no tuvo un efecto significativo sobre los tratamientos, es decir, si a estas condiciones se le incrementa la dosis de polímero hasta 2.5 mg/L, no hubo evidencias de mejorar el sistema por lo que se sugiere aplicar solo un 1.0 mg/L para asegurar una buena sedimentación de los flóculos.

En cuanto a la remoción de microorganismos independientemente de las condiciones de gradiente, dosis de coagulante y floculante, el sistema TPA removió los huevos de helminto en un intervalo comprendido entre 0.4 hasta 2.0 HH/L, mientras que los CF y las Salmonellas ( $2.82 \times 10^8$  y  $5.73 \times 10^6$  NMP/100 ml) se reducen hasta  $10^7$  y  $10^5$  NMP/100 ml respectivamente. Cuanto más grande sea el tamaño de los microorganismos se permite fácilmente la asociación entre las partículas y por ende la fácil separación de los mismos. Para este punto sólo el contenido de los huevos de helminto presente en el agua residual tratada cumplió con la norma mexicana para riego restringido, para reducir la concentración de coliformes y

salmonella presentes se recomienda que después del tratamiento fisicoquímico se realice un proceso de desinfección.

El volumen de lodo producido en el sistema de TPA dependerá del tipo y dosis de coagulante aplicado, sin embargo, en todos los casos se alcanzó una concentración de ST de 1 hasta 2 por ciento de los cuales el 65 por ciento se presentó de forma volátil que nos indica la cantidad o la relación de materia orgánica presente y el 35 por ciento de forma fija que nos indica la relación de la cantidad de materia inorgánica y por ende es necesario darles un tratamiento antes de su disposición final.

Existe evidencia que la optimización de un proceso fisico-químico reduce considerablemente los costos de inversión y de operación de una planta de tratamiento, los gradientes y tiempos determinados en cada una de las etapas que componen el proceso podrán servir de base para el diseño de la misma. Estadísticamente y bajo las condiciones de trabajo analizadas se puede esperar los mismos resultados en cualquier experimento que se desee repetir, sin embargo se recomienda ejecutar pruebas de tratabilidad en cada caso a partir de las condiciones de trabajo obtenidas en este estudio.

# CAPÍTULO 8

## REFERENCIAS

- 📖 American Water Works Association. (1990). **Water Quality and Treatment. A handbook of Community Water Supplies.** McGraw-Hill, 4ª ed. Mexico.
- 📖 Arboleda, J. (1981). **Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua.** Organización Panamericana de la Salud. Centro Paramericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente "CEPIS".
- 📖 Benefiel, L. D. (1982). **Process chemistry for water and wastewater treatment.** Pentice Hall Inc. Englewood Cliffs, NY. Pp. 191-236.
- 📖 Black, A. P.; Birkner, F. B. and Morgan, J. J. (Dec. 1965). **Destabilization of Dilute Clay Suspensions with Labeled Polymers.** *Jour. AWWA*, 57:1547.
- 📖 Chaudhary R., Shao Y. J., Cross J. and Soroushian F. (1991). **Evaluaction of Chemical Addition.** *Water Environment & Technology*, febrero p.p. 66-71.
- 📖 Cifuentes E.; Blumenthal J.; Ruíz-Palacios G. and Beneth S. (1992). **Health Impact Evaluation of Wastewater in Mexico.** *Public. Health Revue*.19, 243-250.
- 📖 Comma, J.; Jabbouri, A.; Grasmick, A, and Elmaleh, S (1991). **Intensive Primary Treatment.** *Water Science and Technology*, Vol. 27, pp. 217-222.
- 📖 Degrémont. (1979). **"Water Treatment Handbook"**. A halsted press book. Jonh Wiley & Sons, 4ª ed., New York, USA pp. 135-138.

- Desbos, G.; Laplace, C. and Rogalla, F. (1990). **Extended Coagulation for Reagent and Space Savings with Wastewater Lamella Settling.** *Chemical Water and Wastewater Treatment Proceedings of the 4<sup>th</sup> Gothenburg Symposium.* Edición a cargo de H.H. Hahn y R. Klute. Berlin, Springer Verlag, p.p. 461-463.
- Fettig, J.; Ratnaweera, H.; Odegaard, H. (1990), **Synthetic Organic Polymers as Primary Coagulants in Wastewater Treatment.** *Water Supply*, Vol. 8, Jonkoping, p. 19-26.
- Gambrill, M. P.; Mara, D. D.; Oragui, J. I. and Silva, S. A. (1989). **Wastewater Treatment for Effluent Reuse: Lime- induced Removal of Excreted Pathogens.** *Water Science and technology*, Vol. 21, No. 3, p.p. 79-84.
- Griffith, D. and R. Williams. (1972). **Application of Jar Test Analysis at Phoenix, Arizona.** *Journal of American Water Works Association*, p.p. 825-830.
- Harleman R. (1992). **Chemically Enhanced Primary Treatment for Municipal Wastewater: Flocculants, Coagulants and Precipitants for Drinking Water and Wastewater Treatment.** *Intertech Conference* pp 1-18. October 29-30.
- Heinzmann B. (1994). **Coagulation and Flocculation of Stormwater from a Separate Sewer System: A New Possibility for Enhanced Treatment.** *Water Science and Technology*, Vol. 29, No. 12, 1994, p.p. 267-278.
- James, C. R. and O'Melia C. R. (1982). **Considering sludge production in the selection of coagulants.** *Journal of American Water Works Association*, Vol. 74. p.p. 148-151.
- Jiménez B. and Chávez A. (1996). **Evaluación de las condiciones de mezclado, punto de adición de coagulante y floculante en la eficiencia de un Tratamiento Primario Avanzado.** *XXV Congreso interamericano. Ingeniería Sanitaria y Ambiental.* Consolidación para el Desarrollo Memorias en disco, Sesión 0139614 (noviembre 1996).

- Jiménez B. and Chávez A. (1997). **Treatment of Mexico City Wastewater for Irrigation Purpose.** *Environmental Technology*, Vol. 18, p.p. 721-730.
- Kawamura, S. (1973). **Coagulation considerations.** *Journal American Water Works Association*, Vol. 65, p.p. 417-423.
- Kawamura, S. (1991). **Integrated Design of Water Treatment Facilities,** A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York. pp. 104-127.
- Lee, S. Y. and Gregory J. (1990). **The effect of Charge Density and molecular Mass of Cationic Polymers on Flocculation Kinetics in Aqueous Solutions in Water Supply,** Vol. 8. *Jonkoping*, p.p. 11-17.
- Mhaisalkar, V. A.; Paramasivam, R. and Bhole, A. G. (1991). **Optimizing Physical Parameters of Rapid Mix Design for Coagulation-Flocculation of Turbid Waters.** *Water Research* Vol. 25, No. 1, p.p. 43-52.
- Metcalf & Eddy Inc. (1991). **Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse.** Third Edition McGraw-Hill Book Company, USA. pp.1333.
- Montgomery D. C. (1991). **"Diseño y análisis de experimentos"**. Arizona State University Grupo editorial iberoamérica.
- Morrow, J. J. and Rausch, E. G. (1974). **Colloid Destabilization with Cationic Polyelectrolytes as affected by Velocity Gradients.** *Journal of American Water Works Association.* Vol. 66, pp. 646-653.
- Muotka, Britt (2000). **Selection of the optimal coagulant in industrial water treatment processes.** *Tratamiento Químico de Aguas Residuales Industriales y Municipales.* 3<sup>er</sup> Seminario en Tratamiento Químico del Agua. 25 de Mayo. México D.F.

- ☞ *Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL/1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.* "Diario Oficial de la Federación". Enero 6 de 1997. 67-87
- ☞ Odegaard H. (1988). **Coagulation as the First Step in Wastewater Treatment.** *Chemical Water and Wastewater Treatment Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Gothenburg Symposium.* Edición a cargo de H.H. Hahn y R. Klute. Berlin, Springer Verlag, p. 249-261.
- ☞ O'Melia, C. R. (1969). **A Review of the Coagulation Process.** Public Works. Vol. 100. pp. 87-89.
- ☞ O'Melia, C. R. (1970). **Coagulation in Water and Wastewater Treatment in Advanced in Water Quality Improvement –Physical and Chemical Processes.** Gloyna, E.F. and Eckenfelder Jr, W. W. Edition University of Texas Press, Austin Texas, pp. 219-236.
- ☞ Powell, S. T. (1979). **Acondicionamiento de aguas para la industria.** Ed. Limusa. México pp. 35-74.
- ☞ Sawyer C. N. and McCarty P. L. (1990). **Chemistry for environmental engineering.**
- ☞ Schwartzbrod J., Stien J. L., Bouhoum K. and Baleux B. (1989). **Impact of Wastewater Treatment on Helminth Eggs.** *Wat. Sci. Tech.* Vol 21 No. 3 pp. 295-297.
- ☞ Shao Y. J., Liu A., Jenkins D., Wada F. Y Crosse J. (1993). **Advanced Primary Treatment: an Alternative to Biological Secondary Treatment: The city of the Los Angeles, C.A. Hyperion Treatment Plant Experience.** *66<sup>th</sup> Annual Conference & Exposition, Anaheim California, USA.* October 3-7, Wat. Env. Fed. Pp. 181-191.
- ☞ Shao Y., Liu A., Wada F., Crosse J. and Jenkins D. (1996). **Advanced Primary Treatment: An Alternative to Biological Secondary Treatment: The city of the**

- Los Angeles, C.A. Hyperion Treatment Plant Experience.** *Wat. Sci. Tech.* Vol. 34, p.p. 223-233.
- 📖 **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** (1995). 19<sup>th</sup> edn. American Public Health Association /American Water Works Association/Water Environmental Federation. Washington D. C. USA.
- 📖 Stumm W and O´Melia. (1968). **Stoichiometry of Coagulation.** *Journal AWWA.* p.p. 514-539.
- 📖 Vázquez O, Horan N. and Mara D. (1996). **Management of Domestic Wastewater for Reuse in Irrigation.** *Wat. Sci. Tech.* Vol. 10-11. p.p. 355-362.
- 📖 Vrale, L. and Jordan, R. (1971). **Rapid Mixing in Water Treatment.** *Journal of American Water Works Association,* p.p. 52-58.
- 📖 Weber W. J. Jr. (1979). **Control de la calidad del agua, Procesos Físicoquímicos.** Editorial Reverté, S. A., 654p. ISBN-84-291-7522-9. Edición en español, impreso en España.

# CAPÍTULO 9

## GLOSARIO

Aguas residuales.-	Las aguas de composición variada, provenientes de las descargas de los usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, domésticos y similares, así como la mezcla de ellas. Aguas que no pueden ser utilizadas por el mismo proceso que las produjo.
Coagulación.-	Proviene del latín coagulare que significa conducir junto. Es el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales, que puede conseguir por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas negativas.
Coloides.-	Son partículas con tamaño entre 0.001 hasta 0.1 $\mu\text{m}$ que no son removidas por sedimentación ni por los tratamientos físicos convencionales.
Contaminantes.-	Son aquellos que en concentraciones por encima de, determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente, dañar la infraestructura hidráulica e inhibir los procesos de tratamiento de las aguas residuales.
Floculación.-	Proviene del latín flocculare, que significa formador de flóculo, es el siguiente estado de formación después de la desestabilización y consiste en agrupar las partículas descargadas negativamente para aglomerarlas.
Limite máximo permisible.-	Valor o intervalo que no debe ser excedido por el responsable de la descarga de aguas residuales y que se define en términos de la concentración de contaminantes básicos y tóxicos, a excepción de los parámetros de temperatura y potencial hidrógeno, que se establecen en sus propias unidades.
NOM-001 ECOL/1996.-	Norma oficial mexicana, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas de aguas residuales vertidas en aguas y bienes nacionales, con objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos.
Polielectrólitos.-	Son polímeros orgánicos sintéticos de alto peso molecular que poseen la característica de tener una alta tendencia a

absorberse en la superficie de las partículas en suspensión que están compuestos por unidades denominadas monómeros. La reacción química que se emplea para juntar los monómeros se denomina polimerización. Algunos se fabrican a partir de productos naturales: alginatos (extracto de algas, almidones (extractos de granos vegetales, derivados de la celulosa y ciertas gomas. Otros son totalmente sintéticos, se distinguen, por una parte, las poliacrilamidas, de larga cadena y gran peso molecular ( $2$  a  $4 \times 10^6$  g/mol) y por otra, las poliaminas, que tienen generalmente cadenas más cortas y menor peso molecular  $1 \times 10^6$  g/mol.

Potencial Z.-

Es el potencial eléctrico que presenta un coloide en la superficie de intercambio y es menor al potencial total de superficie.

TPA.-

Es un proceso fisicoquímico en el cual se adicionan coagulantes (sulfato de aluminio o cloruro férrico) acompañados de floculantes generalmente compuestos aniónicos de alto peso molecular en dosis inferiores a los procesos de potabilización.

## **ANEXO 1**

# **RESULTADOS TOTALES DETERMINADOS DURANTE LA ETAPA DE COAGULACIÓN**

Clave de la muestra	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Fecha de realización de prueba	Tipo de coagulante	Dosis de coagulante	Coagulación		Floculación		Sedimentación		SST	Turbiedad
							rpm	Tiempo	rpm	Tiempo	rpm	Tiempo		
							mg/L	sec		min		min		
AC	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99		A cruda							226	>461
11	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	200	5	50	5	0	5	144	199
12	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	5	50	5	0	5	56	40
13	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	10	50	5	0	5	58	40
14	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	20	50	5	0	5	46	33
15	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	30	50	5	0	5	40	25
16	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	300	5	50	5	0	5	148	181
17	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	5	50	5	0	5	60	44
18	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	10	50	5	0	5	38	17
19	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	20	50	5	0	5	54	24
20	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	30	50	5	0	5	62	34
21	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	400	5	50	5	0	5	172	176
22	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	5	50	5	0	5	50	25
23	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	10	50	5	0	5	62	31
24	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	20	50	5	0	5	50	38
25	E. Central	12/06/99	10:00	12/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	30	50	5	0	5	44	25

\* PARAMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

Clave de la muestra	DQO <sub>r</sub>	Color (R)	Color (A)	STT	SDT	pH	Temp del agua	P. Redox	Cand.	SDT (calculado)	Alcalinidad (4.5 de PH)	Alcalinidad (8.3 de PH)	Tiempo form. Floc.	Tamaño del floc	Observaciones
	mg/L	Pt-Co	Pt-Co	ppm	mg/L		°C	mv	mS/cm	g/l	mg CaCO <sub>3</sub> /L	mg CaCO <sub>3</sub> /L	min.		
AC	615	< 550	194		690	7.96	23.5	-79.3	1.380		318				No se determinó el tipo de floc
11	529	550	215		664	7.95	23.2	-78.5	1.32		294				No se determinó el tipo de floc
12	303	222	90		617	8.06	23.2	-83.9	1.235		304				No se determinó el tipo de floc
13	291	201	77		560	7.73	23.1	-66.5	1.117		260				No se determinó el tipo de floc
14	281	137	57		668	7.4	23.1	-49.0	1.333		248				No se determinó el tipo de floc
15	268	160	50		641	7.48	23	-53.3	1.281		252				No se determinó el tipo de floc
16	230	550	105		673	7.8	23	-70.5	1.2		304				No se determinó el tipo de floc
17	306	211	72		651	7.21	23.1	-39.3	1.347		228				No se determinó el tipo de floc
18	264	180	47		665	7.8	23.1	-70.3	1.349		262				No se determinó el tipo de floc
19	613	170	69		683	7.99	23.4	-81.2	1.362		248				No se determinó el tipo de floc
20	286	188	78		684	7.73	24.1	-67.4	1.359		256				No se determinó el tipo de floc
21	515	550	163		679	7.42	24.1	-50.6	1.351		250				No se determinó el tipo de floc
22	278	165	67		687	7.9	25.1	-76.5	1.361		252				No se determinó el tipo de floc
23	298	181	81		680	7.96	24.4	-79.4	1.368		254				No se determinó el tipo de floc
24	295	208	75		686	7.91	24.3	-76.4	1.365		250				No se determinó el tipo de floc
25	267	153	73		581	7.89	23.9	-76.1	1.157		252				No se determinó el tipo de floc

Clave de la muestra	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Fecha de realización de prueba	Tipo de coagulante	Dosis de coagulante mg/L	Coagulación		Floculación		Sedimentación		*	
							rpm	Tiempo	rpm	Tiempo	rpm	Tiempo	SST	Turbiedad
								sec		min		min	mg/L	UNT
AC	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99		A cruda						208	218	
13	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	200	30	50	5	0	5	136	186
14	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	5	50	5	0	5	40	29
15	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	10	50	5	0	5	46	31
16	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	20	50	5	0	5	58	64
17	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	30	50	5	0	5	40	45
18	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	40	50	5	0	5	46	36
31	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	60	50	5	0	5	44	44
19	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	300	30	50	5	0	5	120	199
20	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	5	50	5	0	5	28	28
21	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	10	50	5	0	5	64	32
22	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	20	50	5	0	5	38	40
23	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	30	50	5	0	5	38	30
24	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	40	50	5	0	5	44	30
32	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	60	50	5	0	5	48	30
25	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	400	30	50	5	0	5	160	198
26	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	5	50	5	0	5	60	36
27	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	10	50	5	0	5	50	52
28	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	20	50	5	0	5	26	24
29	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	30	50	5	0	5	26	26
30	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	40	50	5	0	5	50	43
33	E. Central	16/06/99	08:30	16/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	60	50	5	0	5	52	47

PARAMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

Clave de la muestra	DQO <sub>5</sub>	Color (R)	Color (A)	STT	SDT	pH	Temp del agua	P. Redox	Cond.	SDT (calculado)	Alcalinidad (4.5 de PH)	Alcalinidad (8.3 de PH)	Tiempo form. Floc.	Tamaño del floc	Observaciones
	mg/L	Pt-Co	Pt-Co	ppm	mg/L		°C	mv	mS/cm	g/l	mg CaCO <sub>3</sub> /L	mg CaCO <sub>3</sub> /L	min.		
AC	621	>550	248	1276	813	7.58	22.2	-73.8	1.623	1068					No se determinó el tipo de floc.
13	475	>550	205	1190	687	7.63	23.6	-53.5	1.371	1054					No se determinó el tipo de floc.
14	337	221	97	978	787	7.31	27.3	-37.6	1.57	938					No se determinó el tipo de floc.
15	343	205	95	1060	786	7.31	28.9	-53.5	1.569	1014					No se determinó el tipo de floc.
16	392	256	156	1038	754	7.3	27	-45.6	1.505	980					No se determinó el tipo de floc.
17	343	224	106	1046	691	7.32	29.2	-52.5	1.379	1006					No se determinó el tipo de floc.
18	362	216	118	1002	673	7.34	31.8	-57.3	1.344	956					No se determinó el tipo de floc.
31	363	251	118	884	791	7.32			1.579	840					No se determinó el tipo de floc.
19	517	>550	204	1196	790	7.76	25.8	-57.4	1.576	1076					No se determinó el tipo de floc.
20	358	206	99	996	793	7.4	28.8	-62.4	1.582	968					No se determinó el tipo de floc.
21	392	261	105	1060	762	7.36			1.522	996					No se determinó el tipo de floc.
22	368	220	97	1010	776	7.36			1.548	972					No se determinó el tipo de floc.
23	331	157	92	992	742	7.4			1.48	954					No se determinó el tipo de floc.
24	358	210	122	1056	752	7.36			1.499	1012					No se determinó el tipo de floc.
32	338	235	150	992	769	7.33			1.535	944					No se determinó el tipo de floc.
25	533	>550	231	1164	784	7.66			1.565	1004					No se determinó el tipo de floc.
26	372	260	108	1058	796	7.33			1.589	998					No se determinó el tipo de floc.
27	334	207	96	1088	657	7.35			1.312	1038					No se determinó el tipo de floc.
28	329	187	109	1026	797	7.37			1.591	1000					No se determinó el tipo de floc.
29	348	199	106	978	766	7.35			1.531	952					No se determinó el tipo de floc.
30	355	246	115	1066	738	7.34			1.472	1016					No se determinó el tipo de floc.
33	358	226	109	1012	762	7.58			1.521	960					No se determinó el tipo de floc.

Clave de la muestra	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Fecha de realización de prueba	Tipo de coagulante	Dosis de coagulante mg/L	Coagulación		Floculación		Sedimentación		SST mg/L	Turbiedad UNT
							rpm	Tiempo	rpm	Tiempo	rpm	Tiempo		
								sec		min		min		
AC	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99		A cruda						156	177	
11	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	200	30	50	5	0	5	134	174
12	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	5	50	5	0	5	56	53
13	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	10	50	5	0	5	50	37
14	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	20	50	5	0	5	48	50
15	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	30	50	5	0	5	30	38
16	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	40	50	5	0	5	30	29
17	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	60	50	5	0	5	30	32
18	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	300	30	50	5	0	5	124	169
19	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	5	50	5	0	5	62	47
20	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	10	50	5	0	5	48	45
21	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	20	50	5	0	5	56	50
22	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	30	50	5	0	5	32	31
23	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	40	50	5	0	5	48	65
24	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	60	50	5	0	5	24	37
25	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	400	30	50	5	0	5	120	169
26	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	5	50	5	0	5	58	39
27	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	10	50	5	0	5	62	69
28	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	20	50	5	0	5	42	167
29	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	30	50	5	0	5	38	38
30	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	40	50	5	0	5	34	34
31	E. Central	18/06/99	08:30	18/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	60	50	5	0	5		182

\* PARAMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

Clave de la muestra	DQO	Color (R)	Color (A)	STT	SDT	pH	Temp.	P. Redox	Cond.	SDT (calculado)	Alcalinidad (4.5 de PH)	Alcalinidad (8.3 de PH)	Tiempo form. Floc.	Tamaño del floc	Observaciones
	mg/L	Pt-Co	Pt-Co	ppm	mg/L		°C	mv	mS/cm	g/l	mg CaCO <sub>3</sub> /L	mg CaCO <sub>3</sub> /L	min.		
AC	479	>550	200	1070	0.810	7.93	21.1	-77.0	1.620						
11	461	>550	216	954	0.781	7.66	23.3	-61.6	1.558	820.000			12 3 4 5	A A A A A	Floculo muy flacido
12	289	254	121	878	0.779	7.42	23.4	-47.7	1.554	822.000			12 3 4 5	A B B - C B - C B - C	
13	261	212	75	934	0.778	7.41	23.4	-47.2	1.552	884.000			12 3 4 5	A B B B B	
14	270	255	98	890	0.778	7.41	23.4	-46.8	1.553	842.000			12 3 4 5	A B B - C C C	
15	246	201	89	998	0.778	7.45	23.4	-49.4	1.55	968.000			12 2' 50" 3 3' 50" 4' 50"	A B - C C C - D D D D	Floculo perfecto
16	240	157	85	950	0.78	7.36	23.4	-44.0	1.556	920.000			0.34 115 1.44 2.15 3 4	A A - B B B - C C C C - D	
17	238	159	75	888	0.779	7.42	23.4	-47.7	1.555	858.000					
18	450	>550	189	1072	0.778	7.62	23.5	-6.2	1.552	948.000			30" 12 3 4 5	A A - B B B B B	
19	269	221	95	920	0.781	7.44	23.6	-48.8	1.558	858.000			12 2' 50" 3 4 5	A B - C C - D D E E	Pero no es muy compacto
20	279	227	81	942	0.781	7.41	23.4	-47.0	1.558	894.000			27" 12 3 4 5	A A - B B - C A - C B - C	
21	265	224	88	958	0.778	7.4	23.1	-46.6	1.551	902.000			11' 21" 2 2' 37" 3 3' 35" 4	A B B - C C - D C - D D D D	
22	229	160	64	824	0.778	7.44	23	-48.6	1.552	792.000			9" 11' 30" 2 3 4 5	A A - B B B B - C B - C	
23	254	203	77	926	0.777	7.44	23.1	-48.5	1.55	878.000			36" 12 2' 20" 3 3' 15" 4	A B C C C - D D D	
24	242	144	86	882	0.778	7.48	23.4	-51.0	1.552	858.000					
25	441	>550	200	1082	0.778	7.64	23.8	-60.6	1.552	962.000			30" 12 2' 30" 3 4	A A - B B B - C C C - D	
26	249	206	82	916	0.777	7.56	23.4	-55.6	1.551	858.000			30" 12 3 4 5	A A - B B - C C C C - D	Floculo muy flacido
27	311	282	98	984	0.775	7.44	23.3	-48.7	1.547	922.000			11' 30" 3 4 5	A - B B B B B	
28	461	>550	95	1074	0.781	7.38	23.4	-45.2	1.558	1032.000			12 3 4 5	A - B B C C C	
29	261	209	91	866	0.778	7.42	23.4	-47.6	1.552	828.000			12 2' 45" 4 5	B C - D D D D	Muy bien
30	252	179	93	922	0.779	7.44	23.6	-48.9	1.552	888.000			11' 21" 3 4 5	A A A A A	
31	476	>550	100	1190	0.78	7.66	23.8	-61.8	1.555	1190.000			1	A	

Clave de la muestra	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Fecha de realización de prueba	Tipo de coagulante	Dosis de coagulante mg/L	Coagulación		Floculación		Sedimentación		SST mg/L	Turbiedad UNT
							rpm	Tiempo sec	rpm	Tiempo min	rpm	Tiempo min		
AC	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99		A cruda								>461
11	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	200	30	50	5	0	5	1042	>461
12	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	5	50	5	0	5	64	53
13	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	10	50	5	0	5	52	36
14	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	20	50	5	0	5	38	31
15	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	30	50	5	0	5	22	23
16	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	40	50	5	0	5	62	41
17	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	60	50	5	0	5	40	32
18	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	300	30	50	5	0	5	1192	>461
19	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	5	50	5	0	5	78	54
20	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	10	50	5	0	5	84	44
21	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	20	50	5	0	5	44	34
22	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	30	50	5	0	5	36	25
23	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	40	50	5	0	5	64	25
24	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	60	50	5	0	5	102	37
25	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	400	30	50	5	0	5	1054	>461
26	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	5	50	5	0	5	90	44
27	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	10	50	5	0	5	68	41
28	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	20	50	5	0	5	78	41
29	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	30	50	5	0	5	40	23
30	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	40	50	5	0	5	46	29
31	E. Central	25/06/99	08:30	25/06/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	60	50	5	0	5	90	72

PARAMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

Clave de la muestra	DQO, mg/L	Color (R) Pt-Co	Color (A)	STT ppm	SDT mg/L	pH	Temp del agua °C	P. Redox mv	Cond. mS/cm	SDT (calculado) g/l	Alcalinidad (4.5 de PH) mg CaCO <sub>3</sub> /L	Alcalinidad (8.3 de PH) mg CaCO <sub>3</sub> /L	Tiempo form. Floc. min.	Tamaño del floc	Observaciones
AC	941	>550	130			7.51	16.8	-51.7	0.913						
11	439	>550	152	1456	0.46	7.45	22.6	-49.1	0.917	414					
12	137	300	64	558	0.471	7.23	22.9	-36.3	0.94	494			10" 1 2 3 4 5	A A-B A-B A-B A-B A-B	
13	121	196	78	504	0.473	7.21	22.6	-35	0.944	452			30" 1 2 3 4 5	A A-B B B B B	
14	118	146	107	532	0.475	7.16	22.6	-32.1	0.947	494			10" 1 2 3 4	A-B A-B B B B B	Flacido
15	127	132	53	540	0.473	7.19	23	-34.2	0.944	518			10" 50" 1' 20" 1' 50"	A A-B B B-C B-C C-D C-D C-D	Flacido
16	114	237	48	518	0.477	7.13	22.8	-30.6	0.951	456			1 2 3 4 4' 30" 5	A A A A A A	Flacido
17	123	185	55	458	0.475	7.28	23	-39	0.947	418			24" 1 2 3 4 5	A A A A A A	
18	485	>550	160	1554	0.462	7.46	23.1	-49.9	0.921	362					
19	125	305	57	542	0.473	7.19	22.3	-34.1	0.943	464			10" 1 2 3 4 5	A A A A A A	
20	13	253	44	538	0.477	7.18	21.7	-33.3	0.953	454			20" 1 2 3 4 5	A A A A A A	
21	112	204	57	482	0.475	7.22	21.8	-35.5	0.947	438			10" 1 2 3 4 5	A A A A A A	
22	121	143	51	510	0.472	7.21	21.4	-35.1	0.942	474			10" 11' 30" 2 2' 30" 3 4 5	A A-B C C-D D D D D	Bien p.p.
23	110	143	44	518	0.477	7.13	21.7	-30.4	0.951	454			15" 1 2 3 4 5	A A A A A A	
24	122	196	51	476	0.476	7.15	22.3	-31.8	0.949	374			10" 1 2 3 4 5	A A A A A A	
25	418	>550	170	1396	0.461	7.51	22.2	-52.7	0.919	342					
26	129	178	69	554	0.445	7.19	21.5	-33.5	0.9	464			10" 1 2 3 4 5	A A A A A A	
27	126	230	52	440	0.472	7.19	21.6	-33.6	0.943	372			5" 50" 1 2 3 4 5	A A-B A-B A-B B B B	
28	129	249	48	554	0.472	7.22	21.7	-35.6	0.942	476			10" 1 2 3 4 5	A A A A A A	
29	138	133	47	474	0.473	7.17	21.9	-32.8	0.945	434			5" 30" 11' 30" 2 3 4 5	A A-B B C D D D D	Bien p.p.
30	125	156	86	626	0.474	7.23	22.5	-36.5	0.946	580			10" 50" 1' 30" 2 3 4 5	A A-B B B B B B	
31	188	402	63	834	0.477	7.22	23.6	-35.7	0.951	744			10" 1 2 3 4 5	A A A A A A	

Clave de la muestra	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Fecha de realización de prueba	Tipo de coagulante	Dosis de coagulante mg/L	Coagulación		Floculación		Sedimentación		SST mg/L	Turbiedad UNT
							rpm	Tiempo sec	rpm	Tiempo min	rpm	Tiempo min		
AC	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99		A cruda						218	136	
11	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	200	30	50	5	0	5	150	121
12	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	5	50	5	0	5	84	37
13	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	10	50	5	0	5	42	37
14	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	20	50	5	0	5	48	38
15	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	30	50	5	0	5	46	33
16	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	40	50	5	0	5	56	39
17	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	60	50	5	0	5	42	32
18	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	300	30	50	5	0	5	54	117
19	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	5	50	5	0	5	54	36
20	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	10	50	5	0	5	38	25
21	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	20	50	5	0	5	70	39
22	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	30	50	5	0	5	26	23
23	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	40	50	5	0	5	32	29
24	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	60	50	5	0	5	34	26
25	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	400	30	50	5	0	5	164	130
26	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	5	50	5	0	5	62	36
27	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	10	50	5	0	5	84	43
28	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	20	50	5	0	5	36	34
29	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	30	50	5	0	5	36	27
30	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	40	50	5	0	5	50	31
31	E. Central	28/06/99	08:30	28/06/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	60	50	5	0	5	38	29

\* PARAMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

Clave de la muestra	DQO <sub>5</sub>	Color (R)	Color (A)	STT	SDT	pH	Temp del agua	P. Redox	Cond.	SDT (calculado)	Alcalinidad (4.5 de PH)	Alcalinidad (8.3 de PH)	Tiempo form. Floc.	Tamaño del floc	Observaciones
no	mg/L	Pt-Co		ppm	mg/L		°C	mv	mS/cm	g/l	mg CaCO <sub>3</sub> /L	mg CaCO <sub>3</sub> /L	min.		
AC	495	>550	185	1072	0.738	7.84	26.6	-73.2	1.472	854					
11	417	>550	175	1178	0.738	7.39	26.5	-46.3	1.472	1028					
12	231	206	74	1084	0.737	7.28	25.6	-39.6	1.471	1000			1 2 3 4 5	A A A A A	
13	222	169	70	1024	0.736	7.36	24.8	-43.9	1.469	982			1 2 3 4 5	A B-C-C-D-C-D-C-D-C-D	
14	234	206	89	1026	0.733	7.39	25.3	-46.2	1.463	978			1 2 3 4 5	B B B B-C-B-C	
15	218	183	83	1000	0.734	7.36	22.4	-44.1	1.465	954			1 2 3 4 5	B B-C-C-C-C	Rompimiento de floc
16	242	202	91	1048	0.734	7.42	25.3	-47.6	1.465	992			1 2 3 4 5	B B-C-B-C-B-C-B-C	Flácido
17	226	181	85	996	0.735	7.38	22.9	-45.3	1.466	954			1 2 3 4 5	B B-C-C-C-C-C	Buena formación de floc
18	411	>550	160	1054	0.738	7.59	25.2	-57.9	1.473	1000					
19	234	221	77	968	0.738	7.49	25.1	-52	1.473	914			1 2 3 4 5	B B B-C-B-C-B-C	
20	205	124	65	994	0.736	7.28	24.1	-39.6	1.47	956			22" 1 2	C D D D D D	Sin rompimiento
21	243	199	70	938	0.736	7.32	25.1	-41.7	1.47	868			1 2 3 4 5	B B B B B	
22	199	120	48	886	0.74	7.29	24.2	-40	1.477	860			1 2 3 4 5	C-D D D D D	
23	209	156	78	912	0.74	7.58	23.1	-56.9	1.476	880			1 2 3 4 5	C C C C C	
24	198	121	79	948	0.74	7.36	23.4	-44	1.477	914			1 2 3 4 5	B C C C C	
25	464	>550	191	1116	0.741	7.54	25.1	-55.2	1.478	952					
26	236	214	68	884	0.737	7.36	23.4	-43.9	1.471	822			1 2 3 4 5	A B B-C-B-C-C	
27	256	250	59	822	0.735	7.45	25	-49.6	1.467	738			1 2 3 4 5	A A A A A	
28	216	161	78	880	0.74	7.28	23.6	-39.3	1.476	844			1 2 3 4 5	B B C C C C C	Flácido
29	215	131	76	866	0.738	7.24	24.8	-37.1	1.472	830			1 2 3 4 5	B B-C-B-C-B-C-B-C	
30	213	178	73	680	0.737	7.25	24.1	-37.4	1.471	630			1 2 3 4 5	C C C C C	
31	227	152	61	808	0.74	7.22	25.5	-36	1.476	770			1 2 3 4 5	B B-C-C-C-C	

Clave de la muestra	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Fecha de realización de prueba	Tipo de coagulante	Dosis de coagulante mg/L	Coagulación		Floculación		Sedimentación		SST mg/L	Turbiedad UNT
							rpm	Tiempo	rpm	Tiempo	rpm	Tiempo		
								sec		min		min		
AC	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99		A cruda						964	426	
11	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	200	30	50	5	0	5	360	180
12	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	5	50	5	0	5	58	34
13	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	10	50	5	0	5	56	30
14	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	20	50	5	0	5	58	34
15	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	30	50	5	0	5	46	28
16	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	40	50	5	0	5	24	21
17	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	200	60	50	5	0	5	38	24
18	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	30	50	5	0	5	434	224
19	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	5	50	5	0	5	66	34
20	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	10	50	5	0	5	42	31
21	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	20	50	5	0	5	42	31
22	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	30	50	5	0	5	36	27
23	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	40	50	5	0	5	44	25
24	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	300	60	50	5	0	5	32	20
25	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	0	400	30	50	5	0	5	484	235
26	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	5	50	5	0	5	60	30
27	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	10	50	5	0	5	48	30
28	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	20	50	5	0	5	54	27
29	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	30	50	5	0	5	52	26
30	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	40	50	5	0	5	28	21
31	E. Central	02/07/99	09:00	02/07/99	$Al_2(SO_4)_3$	50	400	60	50	5	0	5	62	27

\* PARAMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

Clave de la muestra	DQO <sub>t</sub> mg/L	Color (R) Pt-Co	Color (A)	STT ppm	SDT mg/L	pH	Temp del agua °C	P. Redox mv	Cond. mS/cm	SDT (calculado) g/l	Alcalinidad (4.5 de PH) mg CaCO <sub>3</sub> /L	Alcalinidad (8.3 de PH) mg CaCO <sub>3</sub> /L	Tiempo form. Flac. min.	Tamaño del flac	Observaciones
AC	611	>550	147	1452	0.522	7.47	21.9	-49.7	1.04	488					
11	403	>550	127	760	0.518	7.51	18.9	-51.9	1.033	400					
12	165	189	70	582	0.523	7.29	19.4	-39.3	1.043	524		1 2 3 4 5	B-C B-C B-C B-C B-C		
13	157	164	64	576	0.522	7.29	19.4	-39.2	1.042	520		15" 40" 5	A B-C B-C		
14	171	190	68	732	0.524	7.25	19.4	-37.3	1.045	674		1 2 3	B-C B-C B-C B-C B-C		
15	168	155	73	604	0.523	7.31	19.3	-40.7	1.044	558		1 3' 30"	C-D	Rompimiento de flac	
16	153	116	84	614	0.522	7.29	19	-39.3	1.042	590		30" 1 2 2' 45"	C-D DD DD	Rompimiento de flac	
17	155	133	70	612	0.524	7.29	19.1	-39.4	1.046	574		30" 1	B C-D		
18	354	>550	158	622	0.524	7.57	19.1	-55.6	1.046	188					
19	169	206	75	996	0.523	7.32	19	-40.8	1.04	930		1 2 3	A-B A-B B-C		
20	160	170	61	600	0.52	7.3	18.8	-40	1.039	558		1 2 3	B-C B-C B-C		
21	163	170	58	610	0.522	7.44	18.7	-47.8	1.041	568		30" 1' 30" 2 3	B C C C		
22	160	141	67	608	0.522	7.35	18.7	-42.6	1.042	572		1' 1' 30" 2	B-C C C-D		
23	162	134	68	584	0.523	7.28	18.5	-38.4	1.043	540		38" 1 2	C-D C-D C-D	Buena sedimentación	
24	167	117	55	588	0.522	7.32	18.7	-40.8	1.042	556		40" 1' 15"	B-C C-D		
25	378	>550	129	1036	0.516	7.59	18.7	-56.4	1.029	552					
26	181	188	81	540	0.522	7.32	18.7	-40.9	1.041	480		1 2 5	B-C B-C B-C		
27	159	176	71	534	0.522	7.33	18.5	-41.5	1.042	486		50" 1' 30" 3	C-C-D C-D	No hay rompimiento de flac	
28	175	148	87	568	0.521	7.33	18.6	-41.9	1.041	514		1' 3' 30" 3 4	C-C-D C-D	Rompimiento de flac	
29	154	133	64	610	0.523	7.31	18.7	-40.6	1.042	558		1' 30" 2 3	C-D C-D C-D		
30	151	117	60	610	0.52	7.4	18.8	-46.1	1.037	582		1 2	C-D D	Se rompe el flac	
31	159	127	64		0.521	7.48	18.4	-50	1.04	598		1 2	C-D D		

Clave de la muestra	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Fecha de realización de prueba	Tipo de coagulante	Dosis de coagulante mg/L	Coagulación		Floculación		Sedimentación		SST mg/L	Turbiedad UNT
							rpm	Tiempo sec	rpm	Tiempo min	rpm	Tiempo min		
AC	E. Central	05/07/99	08:30:00 a.m.	05/07/99		A cruda						326	164	
11	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	200	30	50	5	0	5	224	122
12	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	5	50	5	0	5	44	22
13	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	10	50	5	0	5	46	23
14	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	20	50	5	0	5	32	16
15	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	30	50	5	0	5	64	35
16	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	40	50	5	0	5	14	17
17	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	200	60	50	5	0	5	26	16
18	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	300	30	50	5	0	5	270	136
19	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	5	50	5	0	5	36	22
20	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	10	50	5	0	5	38	21
21	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	20	50	5	0	5	18	8
22	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	30	50	5	0	5	18	14
23	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	40	50	5	0	5	26	19
24	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	300	60	50	5	0	5	18	14
25	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	400	30	50	5	0	5	254	132
26	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	5	50	5	0	5	44	21
27	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	10	50	5	0	5	54	31
28	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	20	50	5	0	5	60	10
29	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	30	50	5	0	5	30	18
30	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	40	50	5	0	5	30	21
31	E. Central	05/07/99	08:30	05/07/99	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	400	60	50	5	0	5	22	26

PARAMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA															
Clave de la muestra	DQO <sub>5</sub> mg/L	Color (R) Pt-Co	Color (A)	STT ppm	SDT mg/L	pH	Temp del agua °C	P. Redox mv	Cond. mS/cm	SDT (calculada) g/l	Alcalinidad (4,5 de PH) mg CaCO <sub>3</sub> /L	Alcalinidad (8,3 de PH) mg CaCO <sub>3</sub> /L	Tiempo form. Floc. min.	Tamaño del floc	Observaciones
AC	309	>550	148	886	0.52	7.77	19.8	-44.3	1.04	560					
11	275	>550	139		0.47	7.49	21.8	-28.5	0.95						
12	103	117	77	544	0.48	7.33	23.9	-18.8	0.97	500			12 3 4 5	A-B A-B A-B A-B	
13	113	132	45	584	0.42	7.22	23.3	-12.6	0.84	538			12 3 4 5	A-B B B B B	
14	94	83	40	544	0.45	7.21	23.2	-12	0.89	512			11' 12" 1' 50" 2' 20" 3 4	A-B B-C C C C-D C-D	
15	124	175	30	426	0.46	7.44	23	-25.5	0.91	362			12" 12 3 4 5	C-D D D D D D	Muy bien
16	127	76	35		0.46	7.46	22.7	-26.4	0.93				1 1' 10" 2 3 4	A-B C-B C-D C-D D	
17	121	106	71		0.48	7.28	23.2	-16.4	0.97				1 1' 10" 1' 50" 2' 15" 3	B C C-D C-D C-D	
18	273	>550	144		0.45	7.66	23.2	-38.7	0.9						
19	104	97	29	514	0.46	7.46	24.6	-27.2	0.95	478			1' 30" 2 3 4 5	A-B A-B A-B A-B A-B	
20	107	99	32	528	0.48	7.31	25.1	-23.2	0.97	490			12 3 4	A-B B-C B-C B-C	
21		64	37	484	0.38	7.22	25.3	-20.1	0.76	466			37" 55" 1' 50" 2 3	A-B B-C C C C C	
22	102	59	38		0.44	7.39	23.7	-23	0.88				55" 1' 30" 2 4	B-C C-D C-D C-D C-D	
23	107	103	41		0.49	7.48	23.5	-28.3	0.98				1' 50" 3 4 5	B-C B-C C C C	
24	95	63	23		0.4	7.54	23.5	-31.7	0.81				50" 1' 20" 2 3 4 5	B-C D D D D D	Floc flacido
25	273	>550	136		0.46	7.64	23.2	-37.7	0.94						
26	107	108	42	580	0.46	7.44	24.8	-25.1	0.93	536			12 3 4 5	A-B A-B A-B B-C	
27	110	98	41	596	0.47	7.48	23.2	-27.9	0.95	542			12	A-B C	Rompimiento de floc
28	90	57	39	514	0.45	7.64	23.1	-37.6	0.91	454			22" 45" 1' 50" 5	C-D D D D D D	Muy bien
29	93	80	40		0.47	7.5	24.1	-31.1	0.93				1 1' 30" 2 4	B-C C-D C-D C-D	Rompimiento de floc
30	97	116	37		0.45	7.46	23.8	-29.3	0.91				35" 12 3 4	A-B B B-C C C	Rompimiento de floc
31	318	171	34		0.49	7.39	23.9	-26.2	0.98				30" 1' 40" 3	A-B B-C D D	Rompimiento de floc

## **ANEXO 2**

# **RESULTADOS TOTALES DETERMINADOS DURANTE LA ETAPA DE FLOCULACIÓN**

clave	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora	Coagulante	Dosis mg/L	Floculante	Dosis mg/L	Coagulación		Floculación		Sedimentación		STT mg/L	SST mg/L
								rpm,	Tiempo	rpm,	Tiempo	Tiempo			
									sec		min	min			
A. Cruda	E. Central	20/12/99	09:00	A. Cruda	A. Cruda	Prosifloc A-252	1	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	1066	180	
0	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5	1034	128	
1	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	2	5	974	34	
2	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5	970	56	
3	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	10	5	984	66	
4	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	20	5	976	54	
5	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	30	5	960	46	
6	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5	1024	136	
7	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	2	5	950	38	
8	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5	954	18	
9	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	10	5	934	46	
10	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	20	5	932	24	
11	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	30	5	944	32	
12	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5	1032	186	
13	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	2	5	948	30	
14	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5	944	16	
15	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	10	5	1058	74	
16	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	20	5	972	44	
17	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	30	5	610	46	
18	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5	1140	154	
19	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	2	5		40	
20	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5		26	
21	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	10	5		50	
22	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	20	5		44	
23	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	30	5		36	
24	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	30	5	944	52	
25	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	10	5	944	70	
26	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5	922	30	
27	E. Central	20/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5		40	
28	E. Central	20/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	29	30	5	884	24	
29	E. Central	20/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	46	10	5	930	26	
30	E. Central	20/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5	876	24	
31	E. Central	20/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5	936	28	

\* PARÁMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

clave	Color R	Color A	Turbiedad	SDT	Cond.	DQO <sub>5</sub>	Temperatura	pH	P. Redox	Alcalinidad	HH	CF	Salmonellas	Tamaño de floc
	Pt-Co	Pt-Co	UNT	mg/L	mS/cm	mg/L	°C		mV	mg CaCO <sub>3</sub> /L	HH/L	NMP/100 ml	NMP/100 ml	
A. Cruda	500	183	223	794	1582	630				478	15	6.20E+08		
0	550	182	216	754	1502	617								
1	217	82	46	791	1577	303								A
2	254	87	83	790	1577	388								A
3	268	88	98	776	1545	404								A
4	214	85	68	739	1475	331								A
5	191	76	36	761	1519	304								D
6	550	157	182	760	1515	602								
7	218	96	48	784	1565	378								B
8	195	66	42	781	1561	302								B
9	173	73	42	788	1541	314								C-D
10	179	85	44	786	1568	352								A
11	199	91	46	781	1560	311								B-C
12	550	182	187	756	1507	736								
13	202	89	57	770	1535	285								B
14	149	65	44	778	1553	278								C-D
15	327	97	51	787	1568	431								A
16	186	93	50	792	1582	303								A
17	233	81	51	791	1576	331								A
18	550	162	177	791	1579	627								
19	181	87	45	783	1563	315								B
20	162	91	34	789	1573	266								C-D
21	202	101	43	788	1571	307								A
22	205	90	37	785	1569	319								A
23	200	89	39	791	1577	293								A
24	168	87	66	784	1568	297	20.7	7.95	-29.5	456	1.6	1.50E+07		
25	165	91	43	783	1558	364	19.6	8.03	-34.8	416				
26	144	96	35	790	1578	287	19.8	8	-33.9	494				
27	126	85	32	785	1566	275	20.3	8.19	-42.9	428	1.4	5.9x106		
28	157	100	77	795	1585	287	19.6	8.13	-40.4	450	0.8	4.10E+07		C-D
29	133	101	38	794	1586	312	20.8	8.34	-51.3	420				C
30	157	97	48	797	1588	291	20.6	8.1	-38.3	460				C
31	154	84	33	789	1570	297	20.5	8.11	-39.3	422	0.8	6.00E+07		C-D

clave	Lugar	Fecha	Hora	Coagulante	Dosis	Floculante	Dosis	Coagulación		Floculación		Sedimentación	STT	SST
								rpm,	Tiempo	rpm,	Tiempo	Tiempo		
					mg/L		mg/L		sec		min	min	mg/L	mg/L
A. Cruda	E. Central	22/12/99	09:00	A. Cruda	A. Cruda	Prosifloc A-252	1	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	1002	172
0	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5		122
1	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	2	5		108
2	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5		66
3	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	10	5		26
4	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	20	5		68
5	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	30	5		56
6	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5		154
7	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	2	5		48
8	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5		
9	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	10	5		30
10	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	20	5		54
11	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	30	5		66
12	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5		134
13	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	2	5		38
14	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5		36
15	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	10	5		36
16	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	20	5		24
17	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	30	5		34
24	E. Central	22/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	46	10	5	956	22
25	E. Central	22/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	84	20	5		26
26	E. Central	22/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	84	30	5	920	26
27	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	10	5	938	18
28	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	20	5	928	38
29	E. Central	22/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	30	5	914	32

\* PARÁMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

clave	Color R	Color A	Turbiedad	SDT	Cond.	DQO <sub>5</sub>	Temp.	pH	P. Redox	Alcalinidad	HH	CF	Salmonellas	Tamaño de floc
	Pt-Co	Pt-Co	UNT	mg/L	mS/cm	mg/L	°C		mV	mg CaCO <sub>3</sub> /L	HH/L	NMP/100 ml	NMP/100 ml	
A. Cruda	550	180	206	780	1550	464				490	12	7.30E+07	1.50E+06	
0	550	180	188	770	1530	574								
1	314	90	98	770	1540	384								
2	240	93	58	760	1510	306								
3	209	98	54	770	1540	336								
4	218	90	56	770	1530	307								
5	207	91	51	770	1550	301								
6	550	163	201	760	1520	659								
7	273	100	62	760	1520	308								
8	186	54	30	750	1500	213								
9	174	73	29	750	1500	211								
10	355	84	88	790	1590	423								
11	264	69	47	790	1570	305								
12	550	161	226	770	1530	609								
13	197	66	42	750	1510	260								
14	299	66	67	760	1520	272								
15	268	70	51	760	1510	299								
16	172	59	28	760	1520	268								
17	160	50	25	760	1500	265								
24	213	66	40	770	1540	248	20	8.12	-54.8	424				
25	150	64	22	760	1530	260	20.1	7.55	-24.3	412		1.60E+08	3.00E+06	
26	141	62	26	780	1560	280	21.4	7.59	-26.9	422	0.6	7.70E+06	5.00E+05	
27	147	80	29	750	1500	215	20	7.836	-33.3	420				
28	141	67	70	760	1510	323	20.8	7.97	-17.5	422		6.60E+06	1.50E+06	
29	156	49	23	760	1510	260	21.1	7.77	-30.5	440	2	8.50E+06	1.50E+06	

clave	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora	Coagulante	Dosis	Floculante	Dosis	Coagulación		Floculación		Sedimentación		
								rpm	Tiempo	rpm	Tiempo	Tiempo	STT	SST
									sec		min	min	mg/L	mg/L
A. Cruda	E. Central	27/12/99	09:00	A. Cruda	A. Cruda	Prosifloc A-252	1	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	968	148
0	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5		128
1	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	2	5		86
2	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5		84
3	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	10	5		82
4	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	20	5		34
5	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	30	5		
6	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5		120
7	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	2	5		86
8	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5		48
9	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	10	5		56
10	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	20	5		62
11	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	30	5		
12	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5		136
13	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	2	5		38
14	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5		40
15	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	10	5		34
16	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	20	5		22
17	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	30	5		58
18	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5		130
19	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	2	5		
20	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5		44
21	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	10	5		24
22	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	20	5		20
23	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	30	5		
24	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	20	5	840	66
25	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	10	5	802	30
26	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	20	5	804	40
27	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	10	5	784	32
28	E. Central	27/12/99	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	20	5	820	32
29	E. Central	27/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	29	20	5	828	48
30	E. Central	27/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	84	10	5	834	30
31	E. Central	27/12/99	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	84	20	5	798	32

\* PARÁMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

clave	Color R	Color A	Turbiedad	SDT	Cond.	DQO <sub>1</sub>	Temp.	pH	P. Redox	Alcalinidad	HH	CF	Salmonellas	Tamaño de floc
	Pt-Co	Pt-Co	UNT	mg/L	mS/cm	mg/L	°C		mV	mg CaCO <sub>3</sub> /L	HH/L	NMP/100 ml	NMP/100 ml	
A. Cruda	550	169	181	700	1393	551	17	8.13	-41	366	17	1.00E+07	1.60E+06	-
0	550	167	168	674	1345	485								
1	289	85	69	693	1384	303								
2	272	76	67	683	1363	293								
3	220	81	60	685	1367	301								
4	168	69	32	690	1376	252								
5														
6	550	146	168	693	1383	514								
7	302	88	79	684	1364	300								
8	158	80	45	685	1366	235								
9	202	89	46	690	1376	251								
10	211	69	52	694	1385	269								
11														
12	550	164	164	694	1384	480								
13	158	66	32	693	1382	243								
14	160	59	34	696	1388	273								
15	129	67	23	693	1384	222								
16	107	78	21	698	1394	225								
17	199	76	45	694	1385	259								
18	550	163	169	699	1396	504								
19														
20	130	75	28	694	1386	244								
21	113	56	21	695	1388	229								
22	121	67	19	698	1395	219								
23														
24	232	70	53	699	1396	299	17.7	7.72	-18.3	324				
25	147	58	30	692	1381	253	20	7.88	-19	326				
26	202	59	43	670	1337	267	17.6	8.04	-35.7	322	0.6	4.30E+06	4.70E+05	
27	143	68	29	684	1365	241	17.4	7.88	-26.6	328		4.70E+06	5.30E+05	
28	168	96	41	692	1380	238	18.6	7.87	-26.4	324				
29	233	98	58	696	1389	312	18.4	8.06	-36.4	330				
30	208	91	43	690	1377	275	18.3	7.98	-32.3	338				
31	199	78	41	691	1379	298	18.1	8.12	-40.3	342	0.6			
32	179	80	39	695	1386	253	19.5	8.09	-38.5	340		7.90E+06	7.00E+05	

clave	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora	Coagulante	Dosis	Floculante	Dosis	Coagulación		Floculación		Sedimentación		SST	SST
								rpm	Tiempo	rpm	Tiempo	Tiempo	STT		
									sec		min	min	mg/L		
A. Cruda	E. Central	04/01/00	09:00	A. Cruda	A. Cruda	Prosifloc A-252	1	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	1144	184	
0	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5		154	
1	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	2	5		112	
2	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5		90	
3	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	10	5		72	
4	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	20	5		76	
5	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	30	5			
6	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5		164	
7	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	2	5		94	
8	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5		66	
9	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	10	5		68	
10	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	20	5		108	
11	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	30	5			
12	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5		176	
13	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	2	5		52	
14	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5		66	
15	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	10	5		68	
16	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	20	5		60	
17	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	30	5			
18	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5			
19	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	2	5		34	
20	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5		58	
21	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	10	5		80	
22	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	20	5			
23	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	30	5			
24	E. Central	04/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5	966	58	
25	E. Central	04/01/00	09:00	PAX-XL 60	30	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5	932	22	

\* PARÁMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

clave	Color R	Color A	Turbiedad	SDT	Cond.	DQO <sub>5</sub>	Temp.	pH	P. Redox	Alcalinidad	HH	CF	Salmonellas	Tamaño de floc
	Pt-Co	Pt-Co	UNT	mg/L	mS/cm	mg/L	°C		mV	mg CaCO <sub>3</sub> /L	HH/L	NMP/100 ml	NMP/100 ml	
A. Cruda	836	225	233	741	1479	674	21.9	7.61	-22.8			1.35E+08	1.70E+07	
0	774	226	221	762	1501	591								
1	418	79	91	731	1453	392								
2	495	88	86	711	1427	361								
3	292	64	56	745	1484	316								
4	275	86	71	714	1436	341								
5														
6	806	211	219	723	1431	582								
7	408	75	102	717	1430	378								
8	292	60	61	739	1473	454								
9	316	36	69	740	1477	376								
10	400	116	101	739	1474	400								
11														
12	814	208	221	738	1474	626								
13	227	101	44	727	1449	305								
14	274	79	59	737	1469	317								
15	301	63	55	731	1458	324								
16	264	72	56	719	1435	305								
17														
18														
19	159	83	29	714	1424	274								
20	336	81	36	726	1450	305								
21	272	72	57	729	1455	341								
22														
23														
24	336	81	36	726	1450	305	21.3	7.58	-21			5.70E+07	5.00E+06	
25	164	77	34	735	1466	266	21.8	7.65	-27.2	330		3.70E+07	4.80E+06	

clave	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora	Coagulante	Dosis mg/L	Floculante	Dosis mg/L	Coagulación		Floculación		Sedimentación	•	
								Rpm	Tiempo	rpm	Tiempo	Tiempo	STT	SST
									sec		min	min	mg/L	mg/L
A. Cruda	E. Central	06/01/00	09:00	A. Cruda	A. Cruda	Prosifloc A-252	1	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	A. Cruda	1194	186
0	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5		172
1	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	2	5		54
2	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	5	5		90
3	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	10	5		96
4	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	20	5		
5	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	29	30	5		
6	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5		166
7	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	2	5		46
8	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	5	5		62
9	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	10	5		68
10	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	20	5		
11	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	46	30	5		
12	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5		196
13	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	2	5		44
14	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	5	5		58
15	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	10	5		102
16	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	20	5		
17	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	84	30	5		
18	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5		166
19	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	2	5		58
20	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	5	5		58
21	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	10	5		82
22	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	20	5		
23	E. Central	06/01/00	09:00	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	50	Prosifloc A-252	1	300	30	99	30	5		

\* PARÁMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

clave	Color R	Color A	Turbiedad	SDT	Cond.	DQO <sub>5</sub>	Temp.	pH	P. Redox	Alcalinidad	HH	CF	Salmonellas	Tamaño de floc
	Pt-Co	Pt-Co	UNT	mg/L	mS/cm	mg/L	°C		mV	mg CaCO <sub>3</sub> /L	HH/L	NMP/100 ml	NMP/100 ml	
A. Cruda	834	235	246									5.70E+08	1.60E+06	
0	814	204	240											
1	226	162	55											
2	427	167	112											
3	385	101	87											
4														
5														
6	814	213	226											
7	247	102	47											
8	252	94	65											
9	259	128	71											
10														
11														
12	800	209	230											
13	243	102	44											
14	254	97	56									5.10E+07	4.00E+05	
15	455	115	89											
16														
17														
18	802	117	229											
19	282	221	54											
20	267	99	55									8.00E+07	3.60E+06	
21	240	91	49											
22														
23														

## **ANEXO 3**

# **ANÁLISIS DE VARIANCIA**

## ANÁLISIS DE VARIANCIA

Es útil describir las observaciones mediante el modelo estadístico lineal.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \left\{ \begin{array}{l} i=1, 2, \dots, a \\ j=1, 2, \dots, n \end{array} \right.$$

en donde  $y_{ij}$  es la (ij)-ésima observación,  $\mu$  es un parámetro común a todos los tratamientos denominado media global,  $\tau$  es un parámetro único para el  $i$ -ésimo tratamiento llamado efecto del tratamiento  $i$ -ésimo, y  $\varepsilon_{ij}$  es la componente aleatoria del error. Nuestro objetivo será probar hipótesis apropiadas con respecto a los efectos del tratamiento y hacer una estimación de ellos. Para probar la hipótesis, se supone que los errores del modelo son variables aleatorias independientes con distribución normal, con media cero y variancia  $\sigma^2$ . Se supone que esta última es constante para todos los niveles del factor.

El modelo estadístico ecuación anterior, describe dos situaciones con respecto al efecto de los tratamientos. Primero, los  $a$  tratamientos podrían haber sido seleccionados específicamente por el experimentados. En esta situación se desea probar hipótesis sobre las medias de los tratamientos y las conclusiones se aplican sólo a los niveles del factor considerados en el análisis. Las conclusiones no pueden hacerse extensivas a tratamientos similares que no hayan sido considerados específicamente. También sería deseable estimar los parámetros del modelo ( $\mu$ ,  $\tau$ ,  $\sigma^2$ ). Este modelo se denomina modelo de efectos fijos.

### ***ANÁLISIS DEL MODELO DE EFECTOS FIJOS***

En este modelo los efectos de tratamiento  $\tau$ , se definen usualmente como desviaciones con respecto a la media general, por esta razón.

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$$

Sea  $y_i$  el total de las observaciones bajo el  $i$ -ésimo tratamiento, y  $\hat{y}_i$ , el promedio de las observaciones bajo el  $i$ -ésimo tratamiento. Similarmente, sea  $y$  la suma de todas las observaciones y  $\hat{y}$  la media general de las observaciones. Expresado matemáticamente

$$y_i = \sum_{j=1}^n y_{ij}, \quad \hat{y}_i = y_i/n \quad i=1, 2, \dots, a$$

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \hat{y}_{..} = y_{..}/N$$

En donde  $N = an$  es el número total de observaciones. Entonces la notación de "punto" en el subíndice implica la suma sobre el subíndice que reemplaza.

La media del  $i$ -ésimo tratamiento es  $E(y_{ij}) = \mu_i = \mu + \tau_i$ ,  $i=1, 2, \dots, a$ . Por tanto, el valor medio del  $i$ -ésimo tratamiento consta de la suma de la media general y el efecto del  $i$ -ésimo tratamiento. Interesa probar la igualdad de las medias de los  $a$  tratamientos; es decir, hay que observar

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \quad \text{for at least one pair } (i,j)$$

que si  $H_0$  es verdadera, todos los tratamientos tiene la media común  $\mu$ . Una forma equivalente de expresar las hipótesis anteriores es en términos de los efectos de tratamiento  $\tau_i$ , o sea

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \quad \text{for at least one } i$$

Por tanto, es posible hablar de probar la igualdad de las medias de los tratamientos, o bien de probar que los efectos de tratamiento (las  $\tau$ ) son cero. El procedimiento apropiado para probar la igualdad en el nivel medio de  $a$  tratamientos es el análisis de variancia.

## **DESCOMPOSICION DE LA SUMA DE CUADRADOS**

La denominación análisis de variancia resulta de descomponer la variabilidad total de los datos en sus partes componentes. La suma total de cuadrados corregida

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \hat{y}_{i.})^2$$

se usa como medida de la variabilidad total de los datos. Intuitivamente esto parece razonable, ya que si se divide  $SS_T$  entre el número apropiado de grados de libertad (en este caso entre  $an-1=N-1$ ), se obtiene la variancia muestral de  $y$ . Obviamente, la variancia muestral es una medida estándar de la variabilidad.

Por tanto, se tiene

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \hat{y}_{i.})^2 = n \sum_{i=1}^a (\hat{y}_{i.} - \hat{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \hat{y}_{i.})^2$$

La ecuación anterior muestra que la variabilidad total de los datos, medida por la suma total de cuadrados corregida, puede descomponerse en la suma de cuadrados de las diferencias entre los promedios de los tratamientos y el promedio general, y en la suma de cuadrados de las diferencias entre las observaciones dentro del tratamiento y el promedio del mismo. La diferencia entre los promedios observados de los tratamientos y el promedio general constituye una medida de la diferencia entre las medias de tratamiento, mientras que la causa de las diferencias de las observaciones dentro de los tratamientos con respecto al promedio del tratamiento puede ser solamente el error aleatorio. Por tanto, simbólicamente la ecuación anterior puede ser escrita como

$$SS_T = SS_{\text{Tratamientos}} + SS_E$$

en donde  $SS_{\text{Tratamientos}}$  se denomina suma de cuadrados debido a los tratamientos (es decir, entre tratamientos) y  $SS_E$  se llama suma de cuadrados debido al error (es decir, dentro de los tratamientos).  $SS_T$  tiene  $N - 1$  grados de libertad porque hay un total de  $an = N$  observaciones. Por otra parte, existen  $a$  niveles del factor (y  $a$  medias de tratamiento), de manera que  $SS_{\text{Tratamientos}}$  tiene  $a - 1$  grados de libertad. Finalmente, existen  $n$  réplicas dentro de cada tratamiento, las cuales proporcionan  $n - 1$  grados de libertad para estimar el error experimental. Como hay  $a$  tratamientos, se tienen  $a(n - 1) = an - a = N - a$  grados de libertad para el error.