DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA DOSIFICACIÓN DE CLORURO FÉRRICO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO PRIMARIO QUÍMICAMENTE ASISTIDA

GERMÁN J. ESCAF PAYARES

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2006

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

TRABAJO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

DESARROLLO DE UN MODELO PARA DOSIFICACIÓN DE CLORURO FÉRRICO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO PRIMARIO QUÍMICAMENTE ASISTIDA

GERMÁN J. ESCAF PAYARES

ASESORES:
MANUEL RODRÍGUEZ SUSA
IVÁN CASTILLO

BOGOTÁ D.C. AGOSTO DE 2006

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Generalidades 1
1.2 Antecedentes 1
1.3 Motivación y Definición del Problema 2
1.4 Objetivos 2
1.4.1 Objetivo Específico 2
1.4.2 Objetivos Generales 3
1.5 Resumen de Contenido 3
1.6 Resultados Principales 3
2. PLANTA DE TRATAMIENTO EL SALITRE 5
2.1 Caracterización Afluente PTAR El Salitre 5
2.2 Remociones y Eficiencias de la PTAR El Salitre 16
2.3 Calidad del Efluente de la PTAR El Salitre 21
3. METODOLOGÍA 28
3.1 Planta Piloto TPQA 28
3.1.1 Componentes Físicos 28
3.1.2 Características de Diseño y Operación 32
3.2 Cronogramas de Operación y Muestreos 34
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS 37
4.1 Caracterización Planta Piloto TPQA 37
4.2 Análisis Estadístico de Parámetros 41
5. DESARROLLO DEL MODELO DE DOSIFICACIÓN 48
5.1 Selección de la Arquitectura del Modelo 48
5.2 Definición del Modelo de Dosificación 48
5.3 Calibración del Modelo de Dosificación 51
5.4 Validación del Modelo de Dosificación 54
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 56
6.1 Conclusiones 56
6.2 Recomendaciones 56
7. BIBLIOGRAFÍA 57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 pH Afluente PTAR El Salitre. 5
Figura 2.2 Alcalinidad Afluente PTAR El Salitre. 6
Figura 2.3 Turbiedad Afluente PTAR El Salitre. 6
Figura 2.4 Histograma de Turbiedad Afluente PTAR El Salitre. 7
Figura 2.5 Operación Típica Estación Elevadora PTAR El Salitre. 8
Figura 2.7 Histograma de SST Afluente PTAR El Salitre.....9
Figura 2.8 SSV Afluente PTAR El Salitre.....10
Figura 2.9 Histograma de SSV Afluente PTAR El Salitre. 10
Figura 2.10 SSV/SST Afluente PTAR El Salitre.....11
Figura 2.11 Histograma de SSV/SST Afluente PTAR El Salitre. 11
Figura 2.12 DBO_5 Afluente PTAR El Salitre. 12
Figura 2.13 Histograma de DBO_5 Afluente PTAR El Salitre. 13
Figura 2.14 DQO Afluente PTAR El Salitre. 14
Figura 2.15 Histograma de DQO Afluente PTAR El Salitre. 14
Figura 2.16 DBO_5/DQO Afluente PTAR El Salitre. 15
Figura 2.17 Histograma de DBO_5/DQO Afluente PTAR El Salitre. 15
Figura 2.18 Remoción de SST PTAR El Salitre. 16
Figura 2.19 Histograma de Remoción de SST PTAR El Salitre. 17
Figura 2.20 Remoción de DBO_5 PTAR El Salitre.....17
Figura 2.21 Histograma de Remoción de DBO_5 PTAR El Salitre. 18
Figura 2.22 Dosis Histórica de $FeCl_3$ PTAR El Salitre. 18
Figura 2.23 Histograma de Dosificación de $FeCl_3$ PTAR El Salitre. 19
Figura 2.24 Dosis Histórica de Polímero PTAR El Salitre. 20
Figura 2.25 Histograma de Dosificación de Polímero PTAR El Salitre.....20
Figura 2.26 pH Efluente PTAR El Salitre. 21
Figura 2.27 Alcalinidad Efluente PTAR El Salitre. 22
Figura 2.28 Turbiedad Efluente PTAR El Salitre. 22
Figura 2.29 Histograma de Turbiedad Efluente PTAR El Salitre. 23
Figura 2.30 SST Efluente PTAR El Salitre. 24
Figura 2.31 Histograma de SST Efluente PTAR El Salitre. 24
Figura 2.32 SSV Efluente PTAR El Salitre. 25
Figura 2.33 Histograma de SSV Efluente PTAR El Salitre.....25
Figura 2.34 DBO_5 Efluente PTAR El Salitre.....26
Figura 2.35 Histograma de DBO_5 Efluente PTAR El Salitre. 27
Figura 3.1 Plano de Diagrama de Flujo de la Planta Piloto TPQA.....29
Figura 3.2 Plano de Conjunto General Flujo de la Planta Piloto TPQA.....29

Figura 4.1 Concentración de SST Afluente Planta Piloto TPQA. 37
Figura 4.2 Histograma de concentración de SST Afluente Planta Piloto TPQA..... 38
Figura 4.3 Turbiedad Afluente Planta Piloto TPQA. 38
Figura 4.4 pH Afluente Planta Piloto TPQA. 39
Figura 4.5 Temperatura Afluente Planta Piloto TPQA..... 39
Figura 4.6 Conductividad Afluente Planta Piloto TPQA..... 40
Figura 4.7 Potencial Rédox Afluente Planta Piloto TPQA..... 40
Figura 4.8 Correlación de los SST y la turbiedad del afluente. 41
Figura 4.9 Estimación de la DBO_5 utilizando los SST y conductividad del afluente de la Planta Piloto TPQA. 42
Figura 4.10 Estimación de la DBO_5 utilizando los SST y conductividad del afluente de la PTAR El Salitre. 42
Figura 4.11 Correlación del Potencial Rédox con la eficiencia de la43 Planta Piloto TPQA. 43
Figura 4.12 Correlación de la Conductividad con la eficiencia de la Planta Piloto TPQA. 43
Figura 4.13 Correlación de la DQO con la eficiencia de la Planta Piloto TPQA. 44
Figura 4.14 Correlación del Caudal con la eficiencia de la Planta Piloto TPQA. 44
Figura 4.15 Correlación de los SST con la eficiencia de la Planta Piloto TPQA. 45
Figura 4.16 Modelo Estadístico de los SST y la dosificación en el sistema..... 46
Figura 4.17 Relación del nivel del canal y los SST en la eficiencia sistema..... 46
Figura 5.1 Estructura Global del Modelo No.1. 49
Figura 5.2 Estructura Global del Modelo No.2. 49
Figura 5.3 Estructura Interna del Modelo No.1. 50
Figura 5.4 Estructura Interna del Modelo No.2. 50
Figura 5.5 Reglas y funciones de membresía del Modelo No.1. 51
Figura 5.6 Reglas y funciones de membresía del Modelo No.2. 51
Figura 5.7 Superficie envolvente del Modelo No.1. 52
Figura 5.8 Superficie envolvente (SSTa-Nivel) del Modelo No.2. 52
Figura 5.9 Superficie envolvente (Coagulante-Nivel) del Modelo No.2. 53
Figura 5.10 Superficie envolvente (Coagulante-SSTa) del Modelo No.2. 53
Figura 5.11 Validación del Modelo No.1. 54
Figura 5.12 Validación del Modelo No.2. 55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características del agua residual afluente de la PTAR El Salitre. 4
Tabla 1.2 Características del agua residual de la Planta Piloto. 4
Tabla 3.1 Caudales Escalados Planta Piloto TPQA. 33
Tabla 3.2 Ubicación de Válvulas en Tanques de Floculación. 33
Tabla 3.3 Mediciones realizadas en las Campañas de Monitoreo. 34
Tabla 3.4 Campaña de Monitoreo 1. 35
Tabla 3.5 Campaña de Monitoreo 2. 35
Tabla 3.6 Campaña de Monitoreo 3. 36
Tabla 4.1 Características del agua residual afluente de la planta piloto. 37
Tabla 4.2 Características del agua residual efluente de la planta piloto. 41

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En la antigüedad las aguas residuales producto de la actividad humana eran vertidas sobre los cauces naturales sin previo tratamiento. Inicialmente, este hecho no se traducía en un deterioro palpable de la calidad del agua, debido a que el caudal y las características de las aguas residuales eran de una magnitud tal, que la sola capacidad de auto-depuración del cuerpo de agua permitía degradar la carga de materia orgánica presente. Sin embargo, el crecimiento desmedido de la población y la incursión del hombre en nuevas actividades industriales ha ocasionado que las aguas residuales se tornen muy difíciles de tratar de manera natural en los cuerpos de agua.

Lo anterior ha logrado que la humanidad propenda por retornar las aguas servidas a su ciclo natural con unas características de calidad tales, que permitan su posterior re-uso. Las plantas de tratamiento de aguas residuales aparecen entonces como una solución a esta problemática, logrando mediante diferentes procesos la remoción de la carga orgánica, los nutrientes y demás agentes contaminantes asociados con las características inherentes a las diferentes actividades industriales y domésticas.

El Tratamiento Primario Químicamente Asistido (TPQA) hace parte de los métodos de tratamiento avanzado que en la actualidad se encuentran en auge, gracias a las ventajas que proveen. Este tipo de tratamiento ha demostrado ser altamente efectivo cuando se encuentra una amplia variación estacional en el caudal de aguas residuales; en espacios limitados para construir una planta de tratamiento; cuando las características del cuerpo receptor definen la necesidad de un grado de tratamiento mayor que el primario pero menor que el secundario; o en las instancias en que se busca optimizar la desinfección del agua residual sin necesariamente buscar lo mismo en cuanto a una remoción de materia orgánica (como podría ser el caso para descargas submarinas o sistemas de re-uso para riego agrícola).

Más recientemente, el proceso TPQA ha recibido una atención destacada debido a su capacidad de remover fósforo, nutriente que causa eutroficación en cuerpos de agua. Además, la adición química previa al proceso primario está siendo usada para incrementar la capacidad de tratamiento primario existente y para ayudar a disminuir la carga biológica en instalaciones existentes de tratamiento secundario (Sandino, 1999).

Debido a la alta dependencia a la dosificación de coagulantes en una planta TPQA este tipo de sistemas ha optado por la automatización y el control del proceso de dosificación, con el fin de mantener unas remociones adecuadas optimizando la cantidad de químicos utilizados y a la vez disminuyendo los costos de operación (Ratnaweera et. al., 2002).

1.2 Antecedentes

La PTAR El Salitre fue concebida como una planta de tratamiento por fases, en la cual la primera fase contempló un tratamiento primario por medio de rejillas de

desbaste, una remoción de grasas por medio de aireación y una posterior sedimentación primaria; la segunda fase de la planta estimaba la construcción de un sistema de lodos activados acompañado de una sedimentación secundaria cuyo efluente sería descargado al río Bogotá.

Actualmente la PTAR El Salitre cuenta con la infraestructura de la primera fase, con una capacidad para tratar 4 m^3/s en promedio. Con el fin de cumplir con los criterios de eficiencia impuestos por la legislación colombiana (40% de remoción en la DBO_5 y 60% de la remoción en los SST) la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) se ha visto en la necesidad de asistir químicamente el tratamiento primario (Departamento de Operaciones PTAR El Salitre).

La asistencia química de la PTAR El Salitre se ha llevado acabo utilizando cloruro férrico (función de coagulante) y polímero CIBA 1011 (para la aglomeración de partículas coloidales sedimentables). La dosificación de estos dos agentes se realiza en los tres canales dobles aireados dispuestos para el desengrasado, remoción de arenas y materia inerte. El seguimiento a la dosificación de estos químicos (cantidad en mg/l) depende de la remoción diaria obtenida mediante la toma de unas muestras compuestas y la toma de conos Imhoff a la salida de las cámaras de reparto, con el fin de observar la sedimentabilidad, el tamaño del floc y cantidad de sobrenadantes, y así modificar la dosificación de químicos.

1.3 Motivación y Definición del Problema

De acuerdo con el funcionamiento y desempeño de la PTAR El Salitre, la EAAB ha tomado la decisión de ampliar la capacidad del sistema al doble del caudal tratado y a la vez adecuar la planta de tratamiento para operar como una planta de TPQA. En este orden de ideas, la EAAB ha realizado el diseño y construcción de una planta piloto representativa de este tipo de sistema.

Con el fin de conocer el comportamiento característico de este sistema se desea desarrollar un modelo que permita predecir la conducta del mismo bajo las diferentes características de la calidad del agua residual que se toman en la PTAR El Salitre y la apropiada dosificación de cloruro férrico (como coagulante), resultando en una posible automatización y control del sistema que garantice unas remociones adecuadas del 40% en la DBO y 60% en los SST bajo diferentes regimenes de operación, y un posible ahorro significativo en la cantidad de coagulante a ser utilizado.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Específico

Estudiar y analizar el funcionamiento de la planta piloto TPQA para desarrollar un modelo que describa el comportamiento (remoción SST) de la planta bajo diferentes dosificaciones de cloruro férrico.

1.4.2 Objetivos Generales

- Estimar el rango de dosificación de cloruro férrico al cual se tienen mejores remociones de DBO_5 y SST a diferentes tiempos de retención del sistema de coagulación y floculación.
- Determinar y analizar la correlación de diferentes parámetros medidos en línea (pH, Temperatura, Conductividad, Turbiedad, DBO_5, DQO, Caudal y Potencial Rédox) con respecto a la DBO_5, DQO y SST del agua residual tratada y sin tratar.
- Identificar los parámetros adecuados que permitan obtener un modelo parsimonioso desarrollado con técnicas de inteligencia artificial (lógica difusa y/o redes neuronales) o de análisis estadístico de múltiples variables.
- Estudiar la sensibilidad del modelo desarrollado con el fin de calibrarlo y validarlo.

1.5 Resumen de Contenido

En el Capítulo 1 del documento de investigación se presentan la introducción, los antecedentes, la motivación y definición del problema, los objetivos del estudio y los principales resultados obtenidos.
En el Capítulo 2 se describe la caracterización del afluente de la PTAR El Salitre, la eficiencia que ha presentado la planta a lo largo de su operación y la calidad del efluente dispuesto en el brazo del río Bogotá.
El Capítulo 3 aborda la metodología de la investigación, detalla los componentes físicos que conforman a la planta piloto, la operación de la misma y los cronogramas de muestreo seguidos durante el estudio.
El Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos de la caracterización efectuada en la planta piloto TPQA, las diferentes relaciones de parámetros encontrados y el análisis estadístico efectuado para la definición de los parámetros del modelo.
La definición, la calibración y la validación del modelo se encuentran en el Capítulo 5, haciendo referencia al procedimiento utilizado para el desarrollo del modelo de dosificación de cloruro férrico en una planta TPQA.
Por último, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación, seguidas de la bibliografía consultada durante todo el estudio en el Capítulo 7.

1.6 Resultados Principales

- Se caracterizó adecuadamente el afluente que ha sido tratado por la PTAR El Salitre durante mayo del 2001 a diciembre de 2005. Las características principales de calidad se resumen a continuación:

Tabla 1.1 Características del agua residual afluente de la PTAR El Salitre.

PARÁMETROS	AFLUENTE	EFLUENTE
pH	7.3	7.2
Conductividad	659 mS/cm	692 mS/cm
Turbiedad	171 NTU	77 NTU
SST	227 mg/l	84 mg/l
SSV	159 mg/l	65 mg/l
DBO_5	252 mg/l	152 mg/l

	SST	DBO_5
Remoción	62%	40%

- Se caracterizó adecuadamente el afluente y efluente de la planta piloto bajo las condiciones de operación estudiadas. Las características principales de calidad son las siguientes:

Tabla 1.2 Características del agua residual de la Planta Piloto.

PARÁMETROS	AFLUENTE	EFLUENTE
pH	7.3	7.2
Conductividad	665 mS/cm	676 mS/cm
Turbiedad	160 NTU	83 NTU
SST	185 mg/l	91 mg/l
Potencial Rédox	-212 mV	
Temperatura	22 °C	20 °C
DBO_5	263 mg/l	182 mg/l
DQO	299 mg/l	209 mg/l

- Se determinó que las variables medidas: el pH, el caudal, el nivel del canal, el potencial rédox, la DQO, la DBO_5, la temperatura y la conductividad, no inciden en la eficiencia de una planta piloto TPQA bajo las condiciones de operación determinadas en la investigación.

- Se identificaron los parámetros del modelo de dosificación, la concentración de SST y la dosificación del cloruro férrico.

- Se desarrolló un modelo de dosificación que permite emular el comportamiento de una planta piloto TPQA operada bajo las condiciones presentadas en el estudio, con un error de la raíz media cuadrada de 19.96 mg/l en la concentración de los SST efluente del sistema.

2. PLANTA DE TRATAMIENTO EL SALITRE

La PTAR El Salitre entró en funcionamiento en agosto de 2000 y a partir del primero de mayo de 2001 se tuvieron registros de la calidad del agua residual afluente y efluente de la planta de tratamiento. A partir de julio de 2004 la planta de tratamiento pasó a manos de la EAAB. Durante este periodo y hasta la fecha la EAAB ha sido responsable del funcionamiento y adecuada eficiencia de la planta de tratamiento ante las entidades públicas reguladoras de Colombia (Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el DAMA).

2.1 Caracterización Afluente PTAR El Salitre

Entre las mediciones de calidad para la línea de aguas que realiza el laboratorio de la planta de tratamiento se encuentra el pH, la alcalinidad, la turbiedad, SST, SSV y la DBO_5. Estos registros corresponden a dos muestras compuestas diarias tomadas por un equipo automático de muestreo en las horas de 0:00 a.m. a 12:00 a.m. (muestra a.m.) y 12:00 a.m. a 12:00 p.m. (muestra p.m.). A continuación se presentan estas medidas de calidad a partir de mayo de 2001 hasta diciembre de 2005.

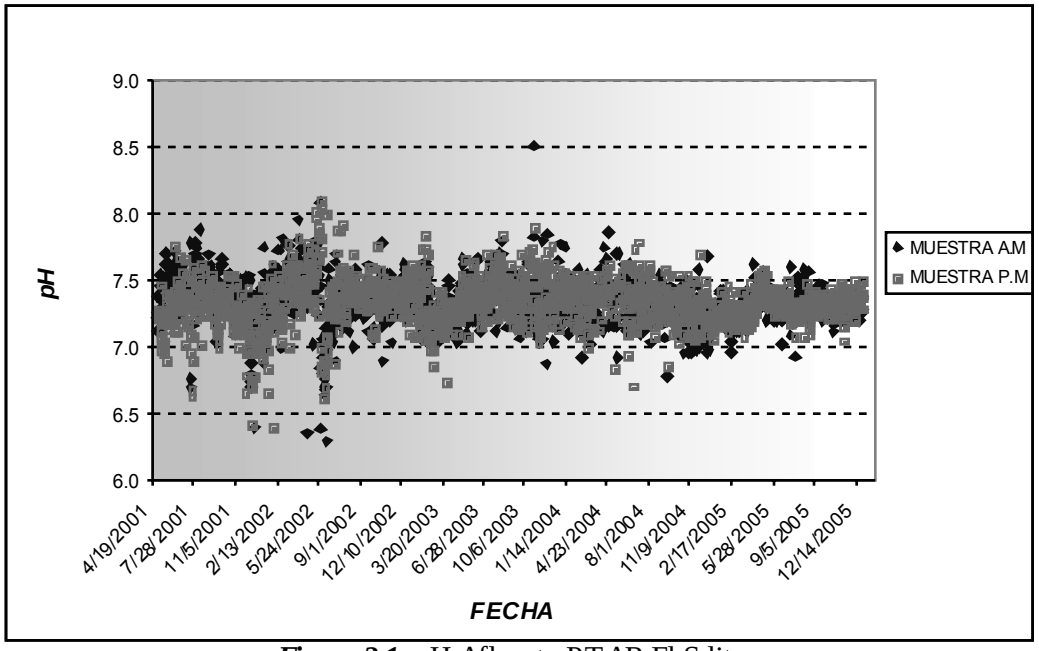


Figura 2.1 pH Afluente PTAR El Salitre.

Como se puede observar de la ***Figura 2.1*** el pH del afluente de la planta de tratamiento a mantenido un promedio de 7.34 teniendo una leve tendencia a estabilizar y a disminuir la dispersión que va del 2001 al 2003.

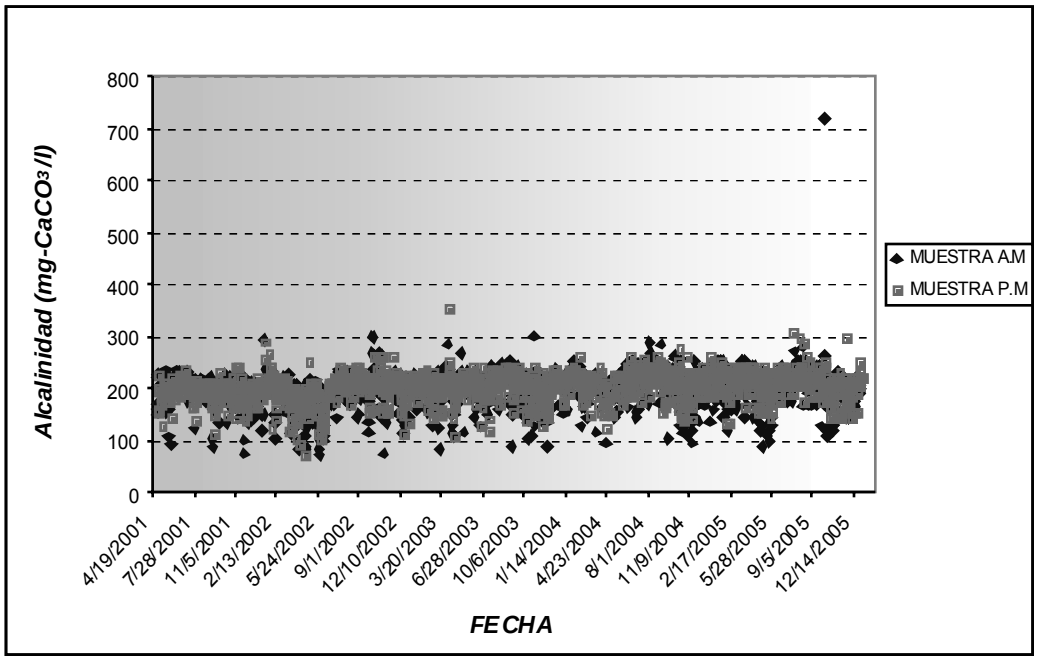


Figura 2.2 Alcalinidad Afluente PTAR El Salitre.

En la ***Figura 2.2*** se aprecia como la alcalinidad mantiene un promedio de 203 mg-$CaCO_3$/l y la tendencia describe un leve ascenso de esta medida no muy significativa.

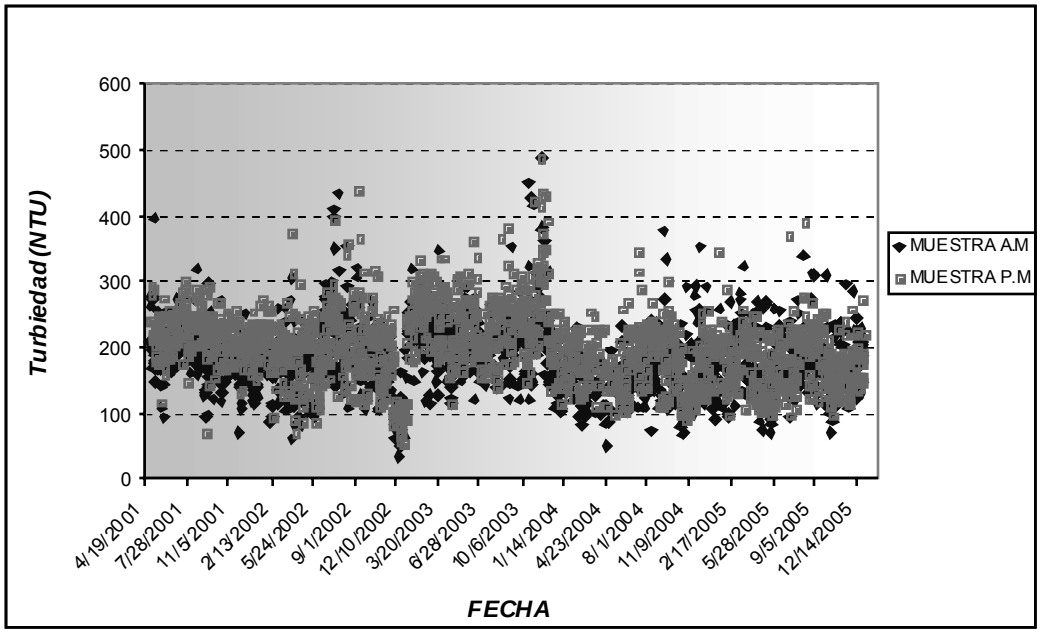


Figura 2.3 Turbiedad Afluente PTAR El Salitre.

La turbiedad del afluente de la PTAR El Salitre presenta una media aritmética de 203 NTU teniendo registros máximos y mínimos de 488 y 55 NTU respectivamente. En el período 2001-2003 se puede apreciar como la turbiedad aparentemente incrementaba su valor en el canal de conducción, pero a partir de esa fecha hasta finales del 2005 ésta se disminuyó y se mantuvo. Con el fin de profundizar un poco

más en el comportamiento de esta variable a continuación se presenta el histograma de la misma.

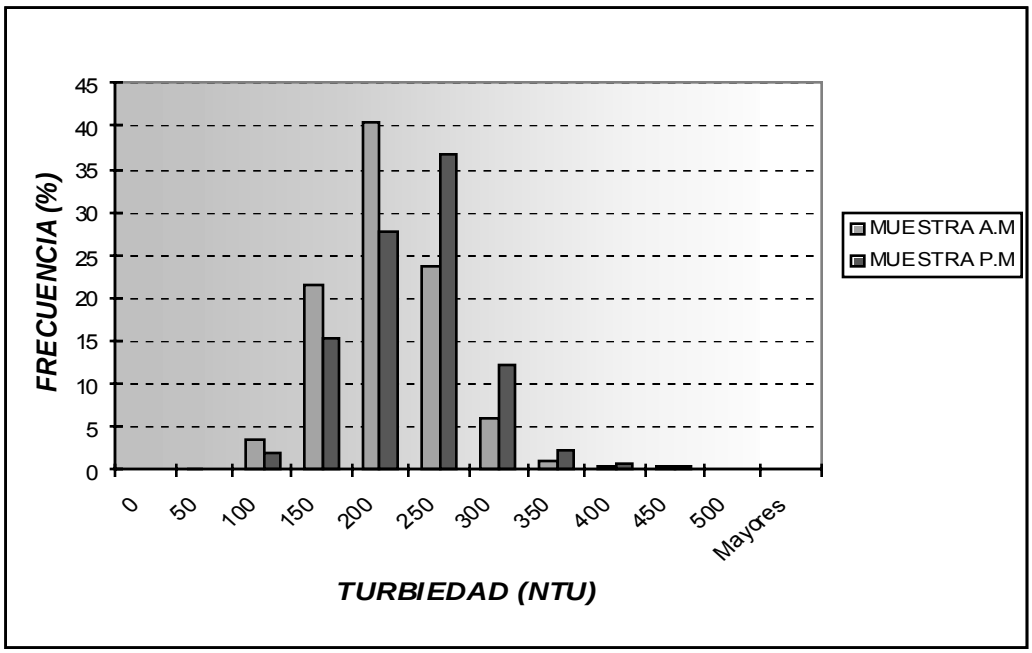


Figura 2.4 Histograma de Turbiedad Afluente PTAR El Salitre.

Como ilustra la ***Figura 2.4*** se puede observar que para el 40% de las Muestras A.M la turbiedad del afluente es de 200 NTU, mientras que este valor máximo que presenta la campana de Gauss para las Muestras P.M se desplaza, teniendo para una frecuencia del 36.8% una turbiedad aproximada de 250 NTU. Este comportamiento se debe a la particularidad en la operación de toma de agua mediante la estación de bombeo.

En la PTAR El Salitre el régimen de toma y elevación de agua residual se realiza tratando de seguir el nivel del canal a unas determinadas cotas que no representen inundación del mismo, con el fin de tratar toda el agua residual dispuesta en el alcantarillado de la cuenca. De acuerdo con ciertos niveles preestablecidos (2572 m.s.n.m. con una diferencia de 20 cm entre el canal y el Río Bogotá) el sistema de toma de agua puede, en determinado caso, realizar una disposición directa del agua residual al brazo del Río Bogotá que se conecta con el canal Salitre a través de una serie de compuertas para aliviar flujos de exceso. Como en horas de la noche el caudal residual doméstico disminuye por la poca actividad antropogénica, el flujo remansado es ingresado a través de un aumento en el número de tornillos para la toma de agua (8 m^3/s), generando un arrastre de sedimentos depositados en el fondo del canal por bajas velocidades presentadas durante el día.

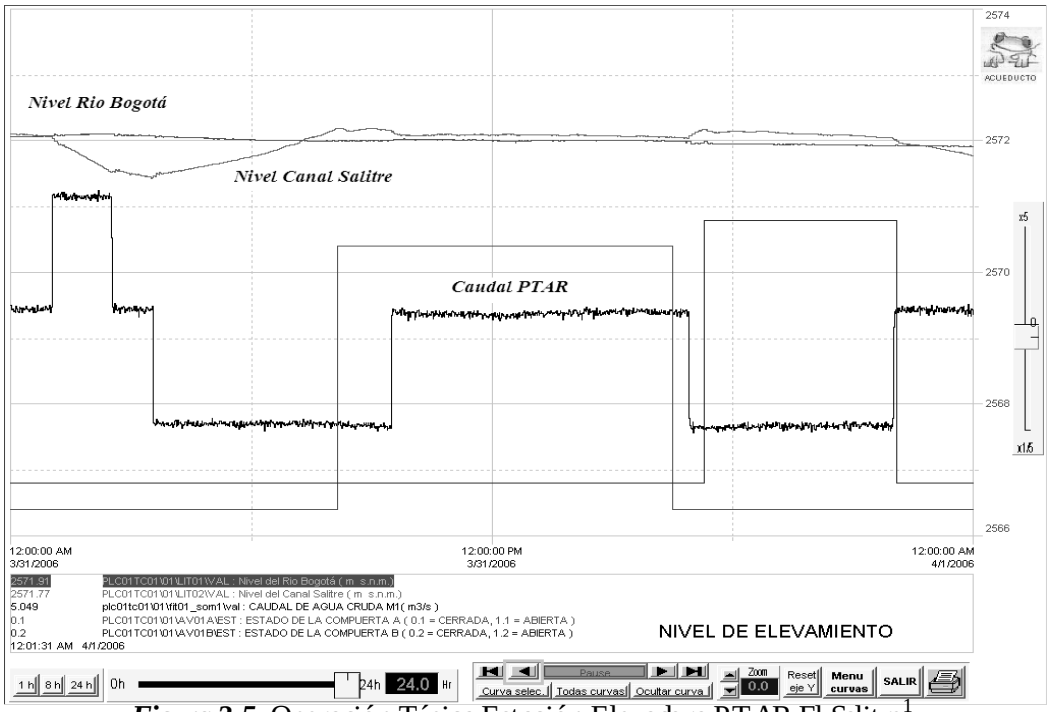


Figura 2.5 Operación Típica Estación Elevadora PTAR El Salitre[1].

En la ***Figura 2.5*** se presenta un día típico del funcionamiento de la PTAR El Salitre, en donde se puede observar que en las horas de la madrugada se realiza un arrastre en el caudal (línea negra), y posteriormente se disminuye la toma de agua con el fin de seguir el comportamiento del nivel del canal durante el resto del día.

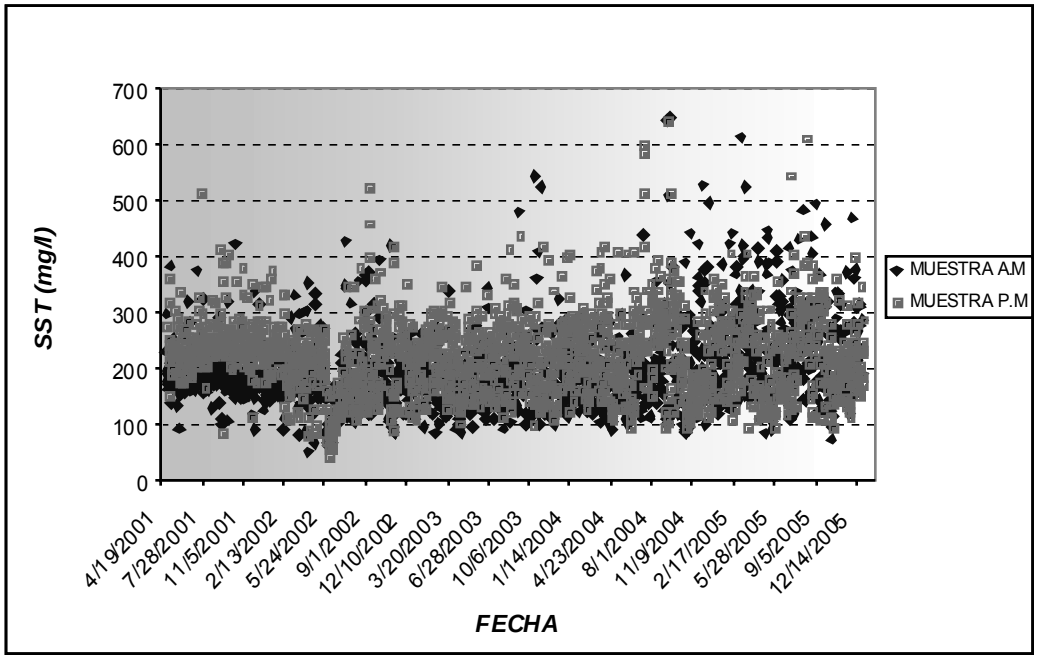


Figura 2.6 SST Afluente PTAR El Salitre.

[1] Departamento de Operaciones PTAR El Salitre.

Siguiendo con la caracterización del afluente, la concentración promedio de los sólidos suspendidos totales en la planta de tratamiento es de 227 mg/l aproximadamente. La ***Figura 2.6*** muestra como este parámetro ha aumentado su dispersión desde mediados del año 2004 manteniéndose durante todo el 2005.

Debido a la difusividad de la medida de SST se presentan valores máximos y mínimos de 645 y 44 mg/l respectivamente.

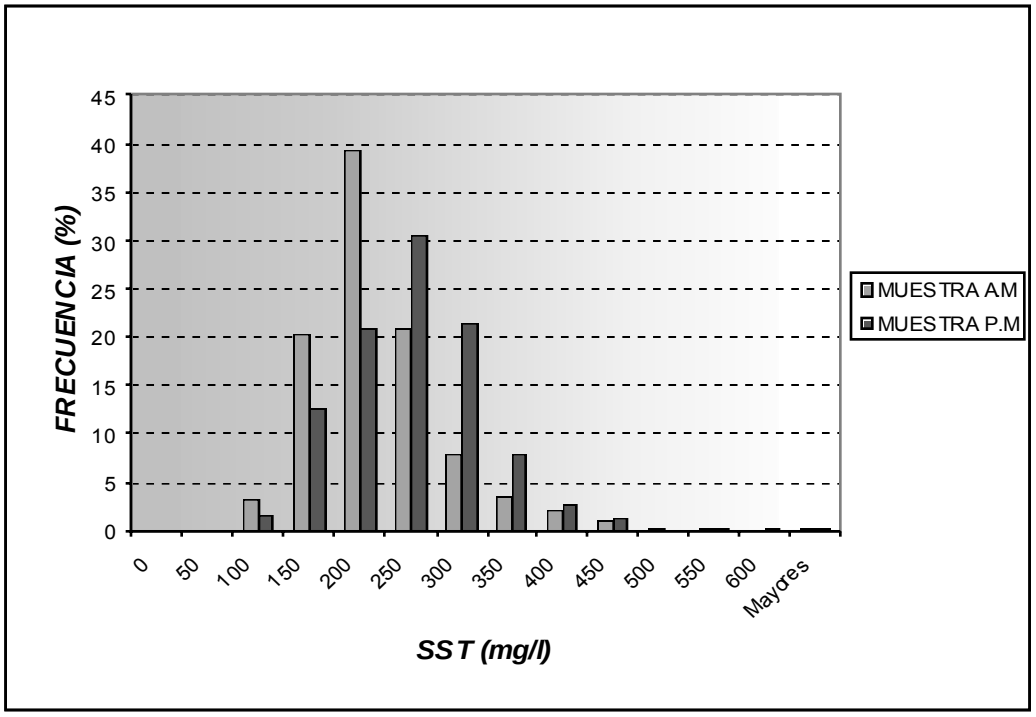


Figura 2.7 Histograma de SST Afluente PTAR El Salitre.

De igual manera que sucede con la Turbiedad los SST de las Muestras P.M se desplazan 50 mg/l a favor de las Muestras A.M debido a la singularidad en la operación de la toma del agua residual en la PTAR El Salitre. El 39.5% de la Muestras A.M poseen una concentración alrededor de 200 mg/l mientras que el 30.5% de las Muestras P.M tienen una concentración superior de 250 mg/l.

Los SSV del afluente de la PTAR El Salitre describen un comportamiento muy similar al mostrado por los SST. Se puede observar como a partir de septiembre del 2002 aumenta la dispersión del parámetro característico de la materia orgánica en el agua residual quizá debido a los procesos de hidrólisis que en determinado momento se pueden estar llevando acabo durante la conducción de las aguas residuales domésticas en el canal El Salitre, lo cual sumado al paulatino descenso del pH y aumento de la alcalinidad fortalece esta hipótesis. A continuación se presenta dicho comportamiento en la ***Figura 2.8***.

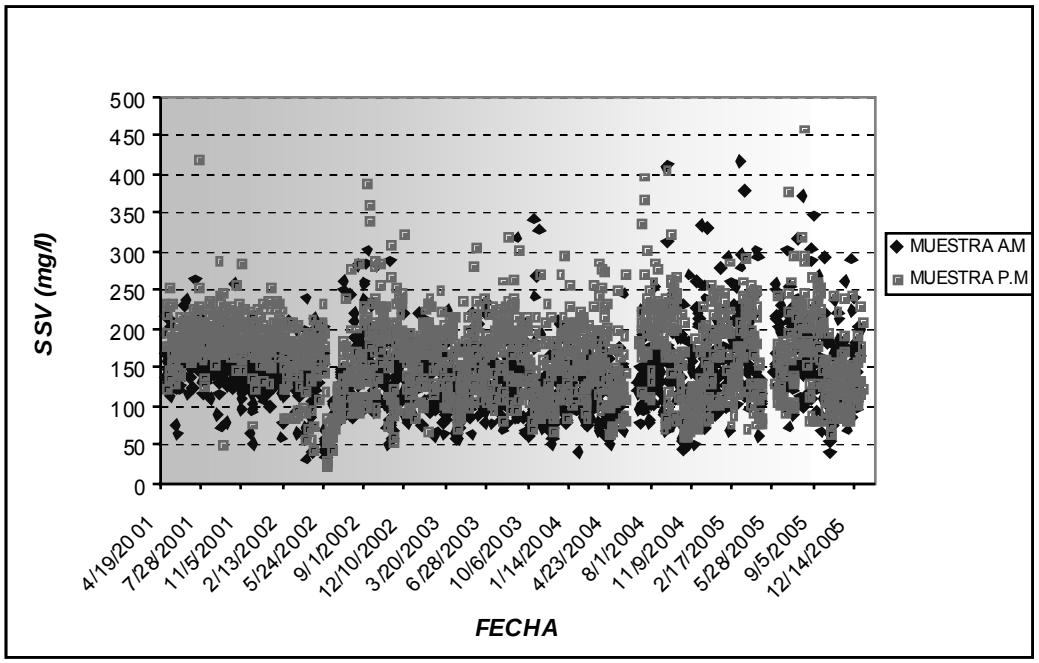


Figura 2.8 SSV Afluente PTAR El Salitre.

En el histograma de SSV se puede apreciar como la concentración de éstos oscila entre el promedio aritmético (168 mg/l). Los SSV presentan concentraciones máximas de 460 mg/l y mínimas de hasta 24 mg/l. El comportamiento que se encontró en la Turbiedad y SST se repitió en los SSV alcanzando frecuencias del 40.1% para Muestras A.M y del 35.6% para las Muestras P.M.

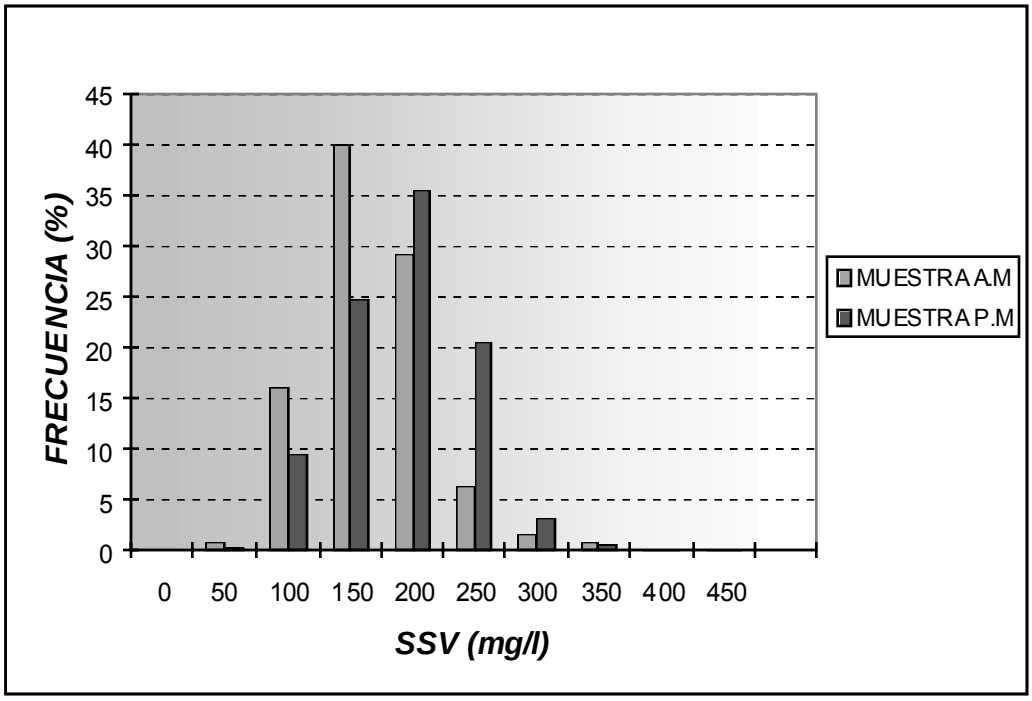


Figura 2.9 Histograma de SSV Afluente PTAR El Salitre.

Con el fin de estudiar aún más la dinámica de los sólidos suspendidos, la relación de SSV/SST se presenta la ***Figura 2.10*** y la ***Figura 2.11***, en las cuales se puede apreciar el comportamiento histórico de esta relación y la frecuencia de dicho parámetro en el afluente de la PTAR El Salitre.

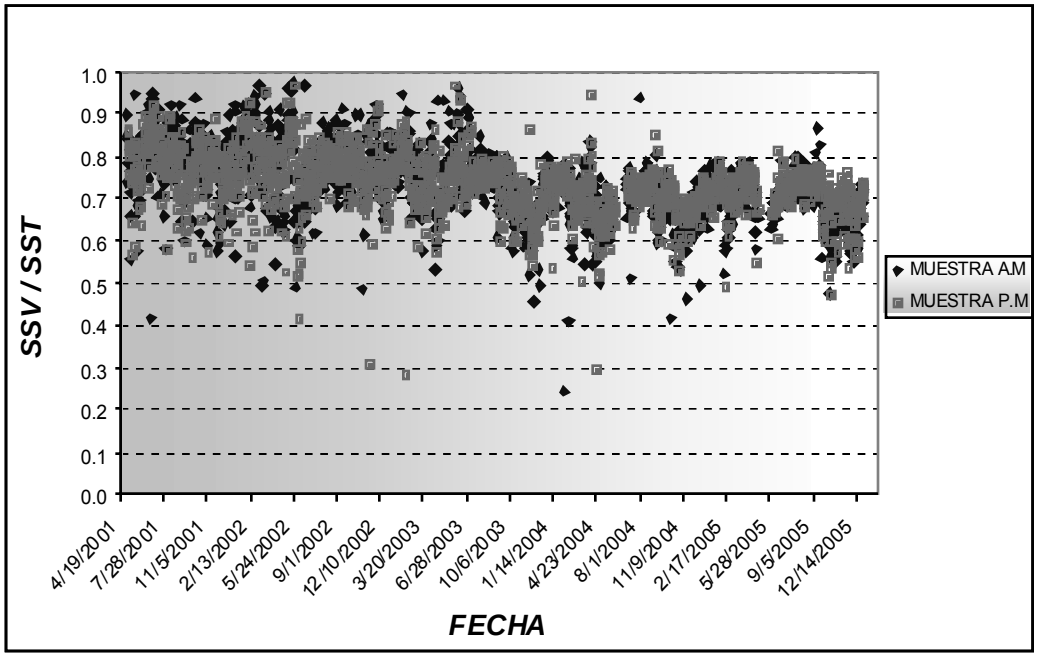


Figura 2.10 SSV/SST Afluente PTAR El Salitre.

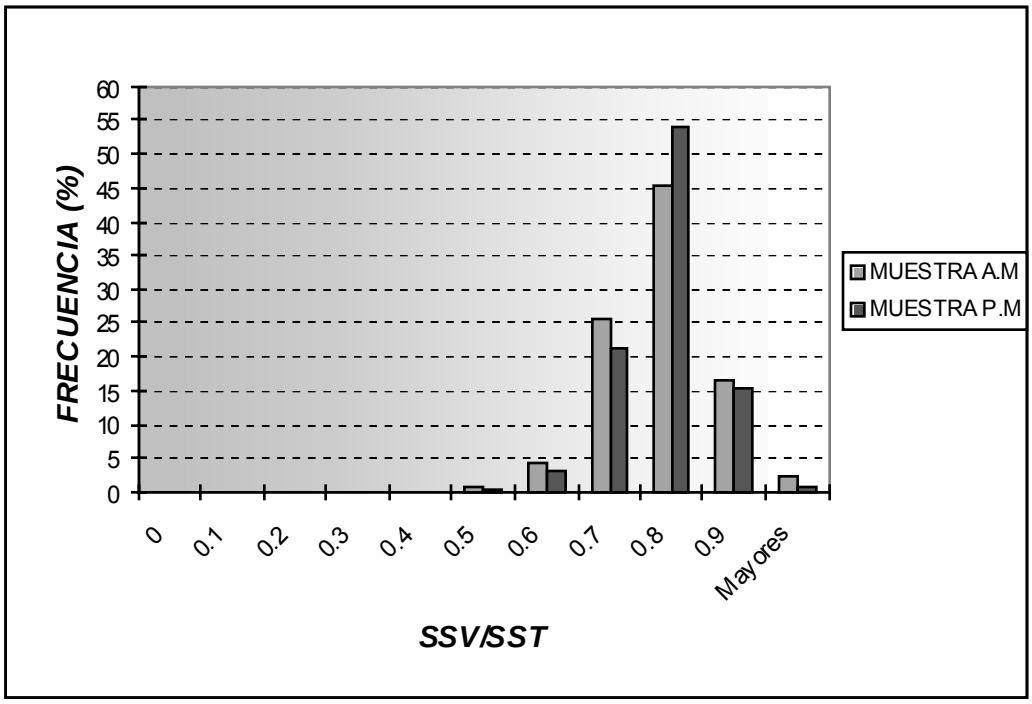


Figura 2.11 Histograma de SSV/SST Afluente PTAR El Salitre.

Como se puede observar en la ***Figura 2.10*** es clara la disminución de la relación SSV/SST a partir de marzo del 2003 de un 0.8 a un 0.7, lo cual muestra una tendencia a ingresar la materia orgánica en estado soluble y no particulado, dificultando el buen funcionamiento del sistema. Aunque se piensa que este fenómeno hace referencia al aumento del tiempo de retención en el canal y por ende a la permanente hidrólisis de la materia orgánica que se presenta en el afluente.

Este hecho se puede asumir teniendo conocimiento del modo de operación de la PTAR El Salitre, en cuanto a la toma de agua, y al aumentó de frecuencia que se presenta en el histograma de SSV/SST para las Muestras P.M (53.9 % para una relación de 0.8) y así mismo la disminución en la desviación de la curva de Gauss haciéndola más empinada respecto al comportamiento presentado por las Muestras A.M.

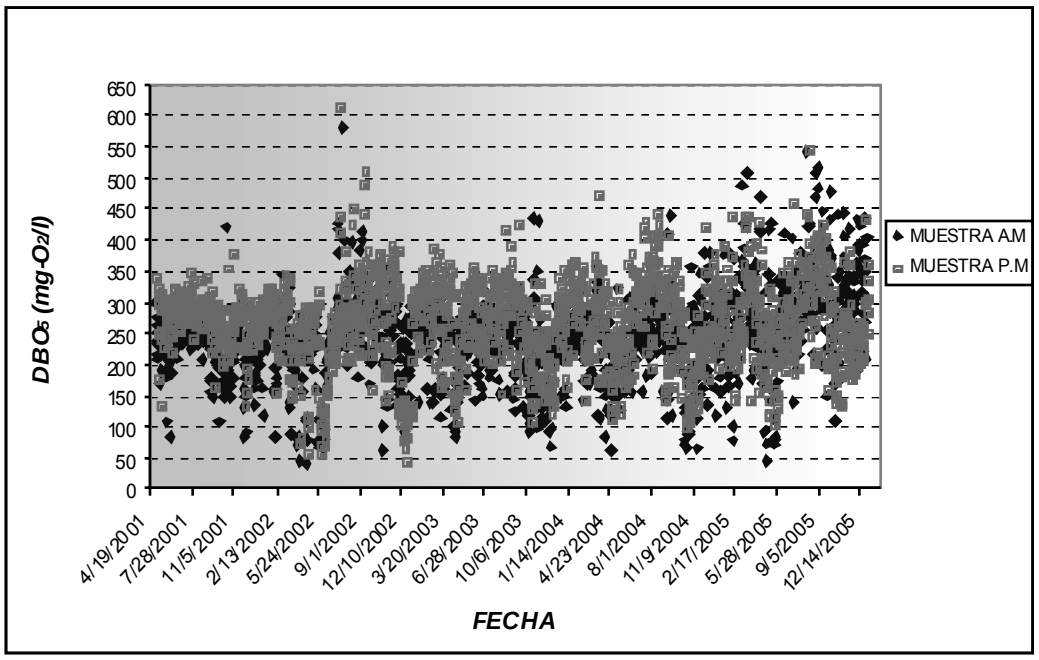


Figura 2.12 DBO_5 Afluente PTAR El Salitre.

De acuerdo con la hipótesis presentada en la dinámica de los sólidos suspendidos del afluente de la planta de tratamiento, ésta se ve reafirmada con el comportamiento histórico de la demanda biológica de oxígeno, la cual presenta un sutil ascenso en los últimos dos años y medio. Debido a la hidrólisis que se lleva acabo en el canal El Salitre, la DBO_5 (tanto de las Muestras A.M como P.M) aumenta gracias al requerimiento adicional de oxígeno que demandan los microorganismos para poder estabilizar la materia orgánica. Este fenómeno ocurre por la disminución en la eficiencia de estabilización que los microorganismos pueden alcanzar entre una materia orgánica seudo estabilizada y una no afectada por dicho proceso, considerada como un agua residual fresca.

En el histograma de DBO_5 que se presenta en la siguiente figura se puede observar como la tendencia de los sólidos suspendidos se repite en la demanda biológica de oxígeno a los cinco días. Las Muestras A.M se caracterizan por una mayor frecuencia

en promedios menores a los de las Muestras P.M, 34.2% para concentraciones de 300 mg/l y 9.9% para concentraciones de 350 mg/l, con respecto a frecuencias de un 31.2% para concentraciones de 300 mg/l y 22.3% para concentraciones de 350 mg/l.

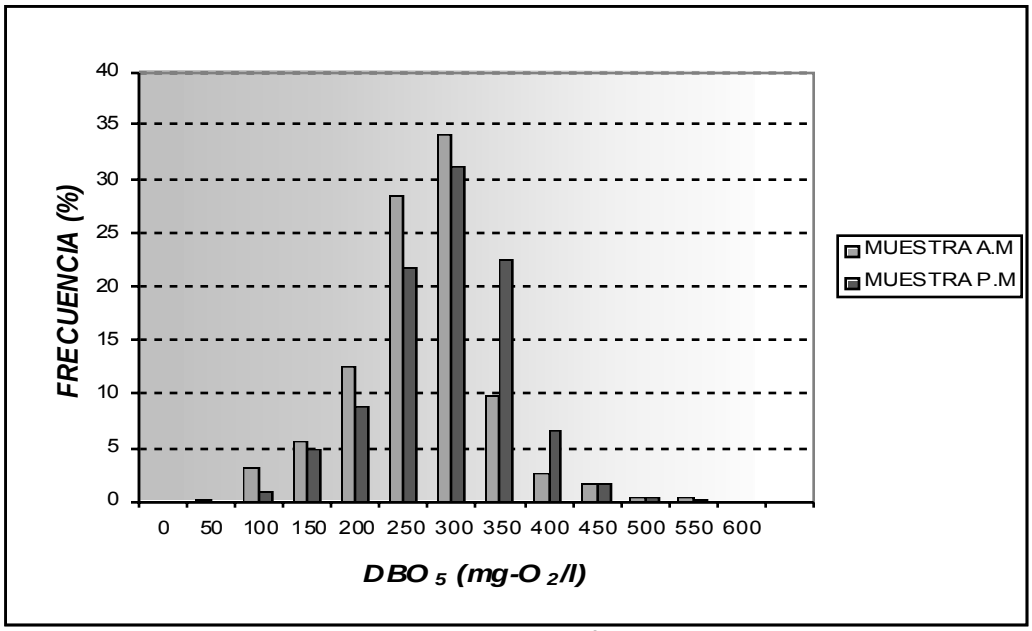


Figura 2.13 Histograma de DBO_5 Afluente PTAR El Salitre.

Por último, se presenta el comportamiento de la demanda química de oxígeno histórica de la PTAR El Salitre del 1 de mayo del 2001 al 28 de febrero del 2004, ya que en el momento no se cuenta con valores de esta medida a la fecha. Así mismo, se establece una relación entre la DBO_5 y la DQO con el objetivo de determinar algún comportamiento particular de la misma.

Como se ilustra en la ***Figura 2.14*** la DQO que se presenta en el afluente de la planta de tratamiento describe una conducta muy similar a la observada en la demanda biológica de oxígeno a los cinco días. Mantiene un promedio aproximado de 526 mg-O_2/l con concentraciones máximas y mínimas de 2248 y 108 mg-O_2/l respectivamente.

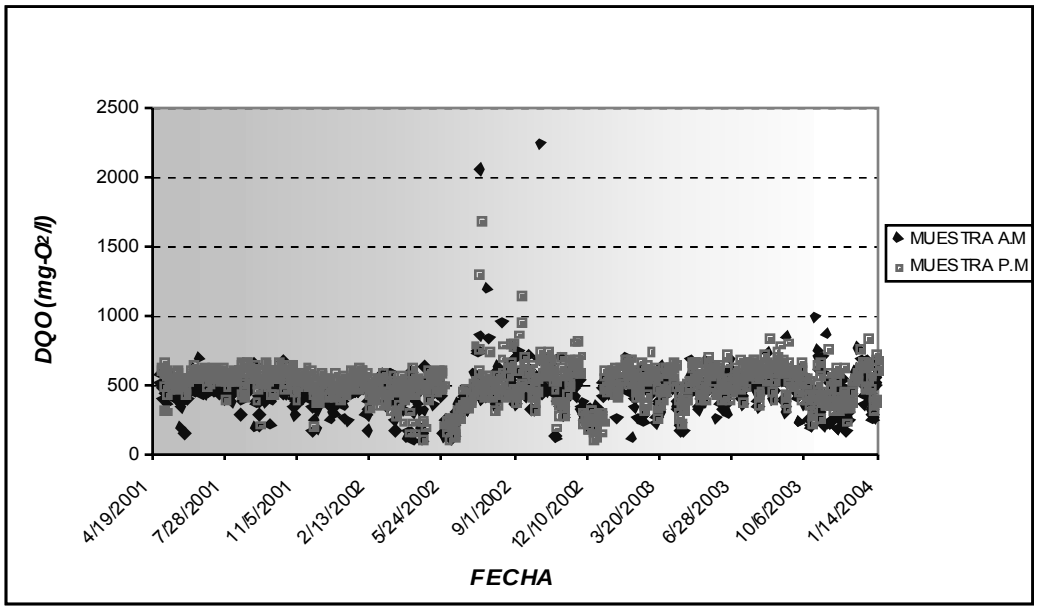


Figura 2.14 DQO Afluente PTAR El Salitre.

En el histograma presentado en la ***Figura 2.15*** se hace referencia al desplazamiento sufrido por las Muestras P.M en lo que respecta a las concentraciones promedio del afluente. Para un 37.9% de las Muestras A.M estas presentan una concentración de 500 mg-O_2/l mientras que para las Muestras P.M el 34.5% de las mediciones poseen una concentración de 600 mg-O_2/l. Se puede concluir que este comportamiento se debe a la resuspensión del material particulado sedimentado en el canal, como resultado de las bajas velocidades del mismo y al remanso generado por la operación de toma de agua, el cual produce un aumento de la DQO en horas de la madrugada correspondientes a las Muestras P.M compuestas.

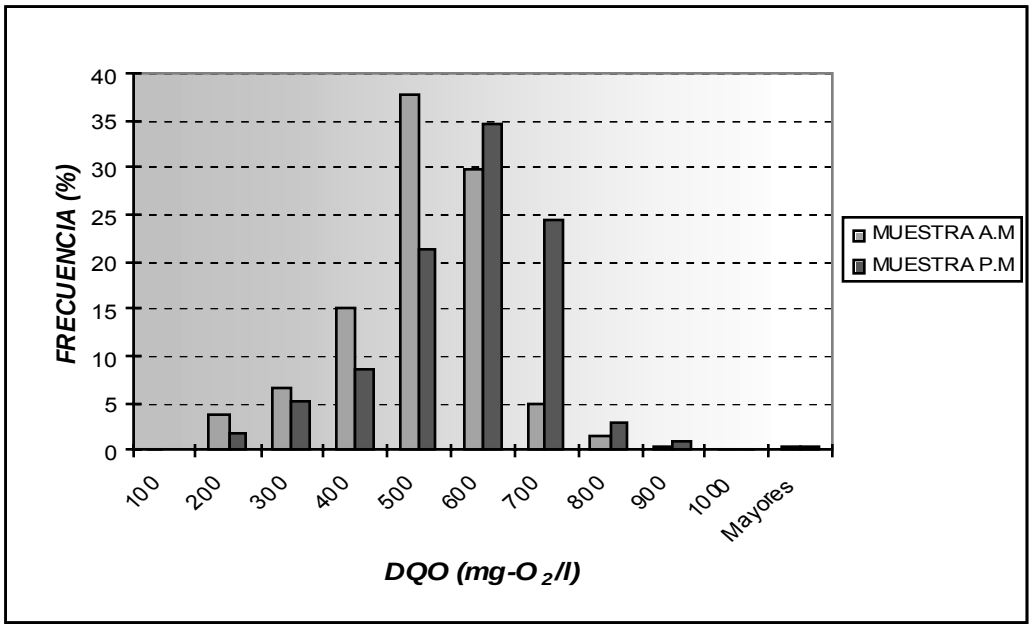


Figura 2.15 Histograma de DQO Afluente PTAR El Salitre.

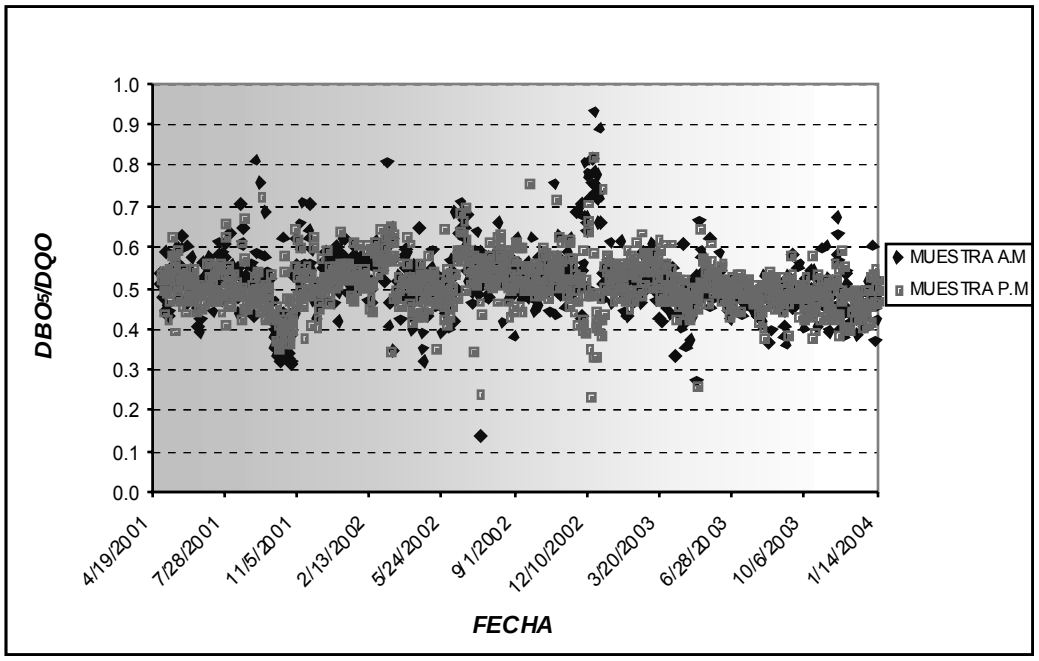


Figura 2.16 DBO_5/DQO Afluente PTAR El Salitre.

En lo que respecta a la relación DBO_5/DQO esta mantiene una media aritmética de 0.51, la cual es muy constante, variando entre valores máximos de 0.824 y mínimos de 0.234.

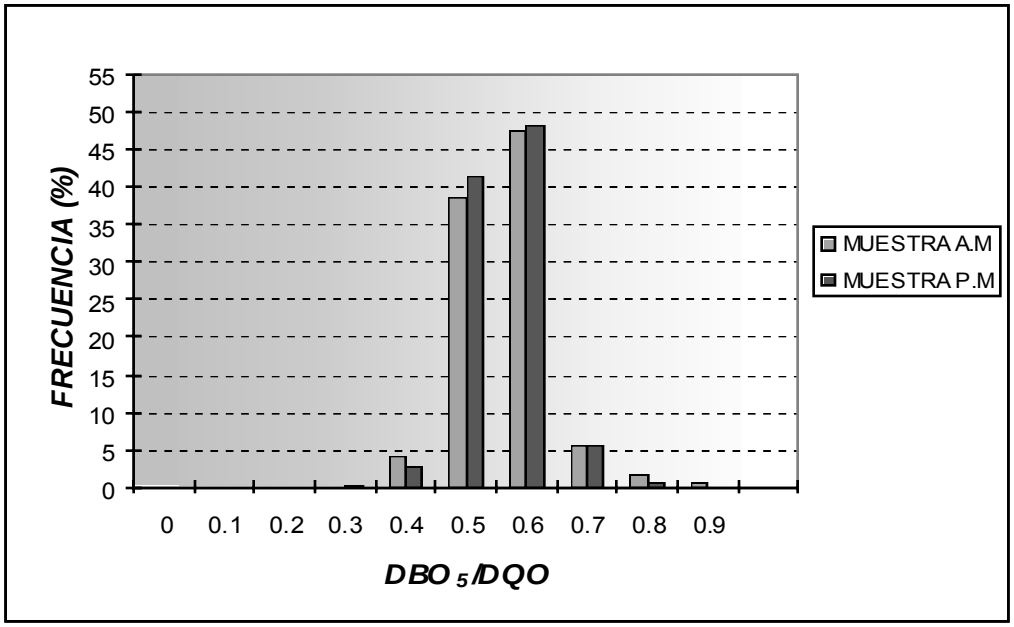


Figura 2.17 Histograma de DBO_5/DQO Afluente PTAR El Salitre.

En la ***Figura 2.17*** se puede observar como esta relación se mantiene constante a lo largo del día en las Muestras A.M y P.M. El 86% de la Muestras A.M mantienen una relación DBO_5/DQO dentro de 0.5 y 0.6, de igual forma, el 89% de las Muestras P.M se mantienen en el mismo rango.

2.2 Remociones y Eficiencias de la PTAR El Salitre

Dado que la administración de la PTAR El Salitre pasó a manos de la EAAB a partir de julio de 2004, solamente se tiene acceso a información de las remociones y eficiencia de la planta de tratamiento desde la fecha anteriormente mencionada. A continuación se presenta el comportamiento que ha tenido la planta bajo las diferentes características del afluente, ya ilustradas, y la asistencia química realizada bajo diferentes dosificaciones de cloruro férrico y polímero CIBA 1011.

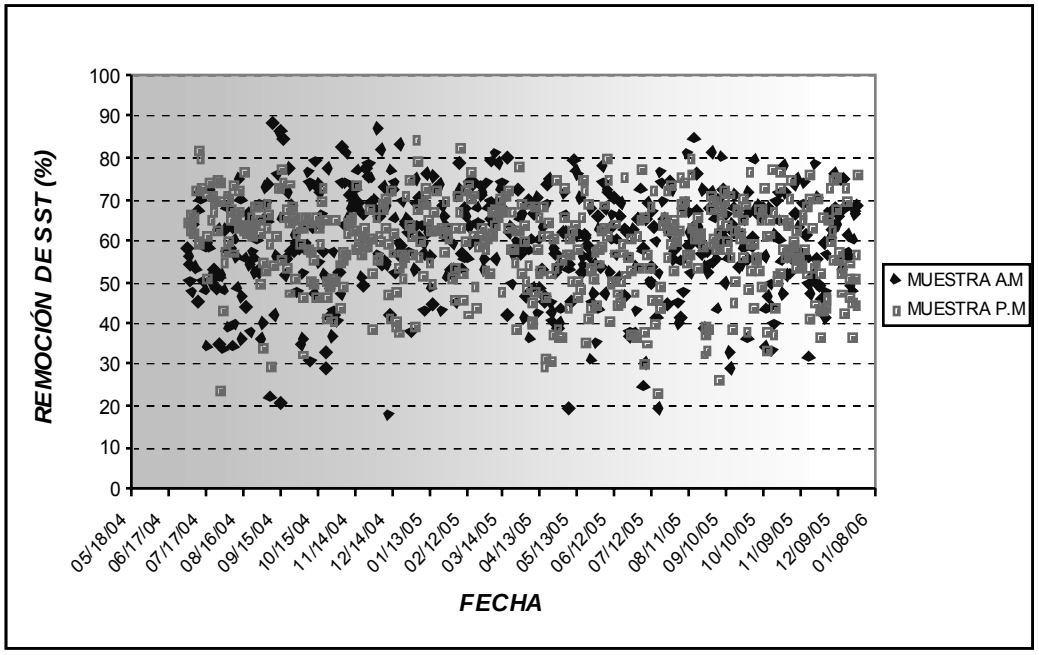


Figura 2.18 Remoción de SST PTAR El Salitre.

En la ***Figura 2.18*** se ilustra el comportamiento que ha tenido la PTAR El Salitre en lo que respecta a remociones de SST hasta el 31 de diciembre de 2005. Se puede apreciar lo disperso de los resultados obtenidos y se estima un promedio de 60%, teniendo valores máximos de remociones de hasta el 75% y mínimos de 19.1%.

En el siguiente histograma se puede observar como el desempeño de la PTAR El Salitre es sutilmente superior en las Muestras P.M, un 7% más en remociones del 70%. Esto acontece debido al arrastre generado en horas de la madrugada, aumentando las concentraciones de SST y por ende, para una misma dosificación, obteniendo unas mejores remociones.

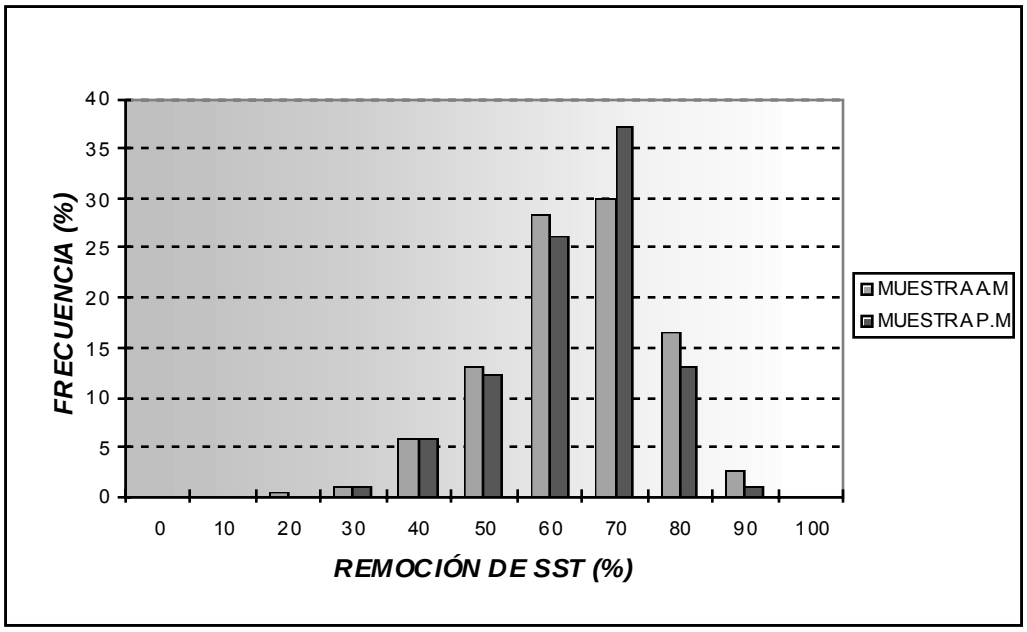


Figura 2.19 Histograma de Remoción de SST PTAR El Salitre.

La remoción de DBO_5 presenta un comportamiento distinto al de los sólidos suspendidos totales, pero coherente con las características ya estudiadas del afluente de la planta de tratamiento, ***Figura 2.20***.

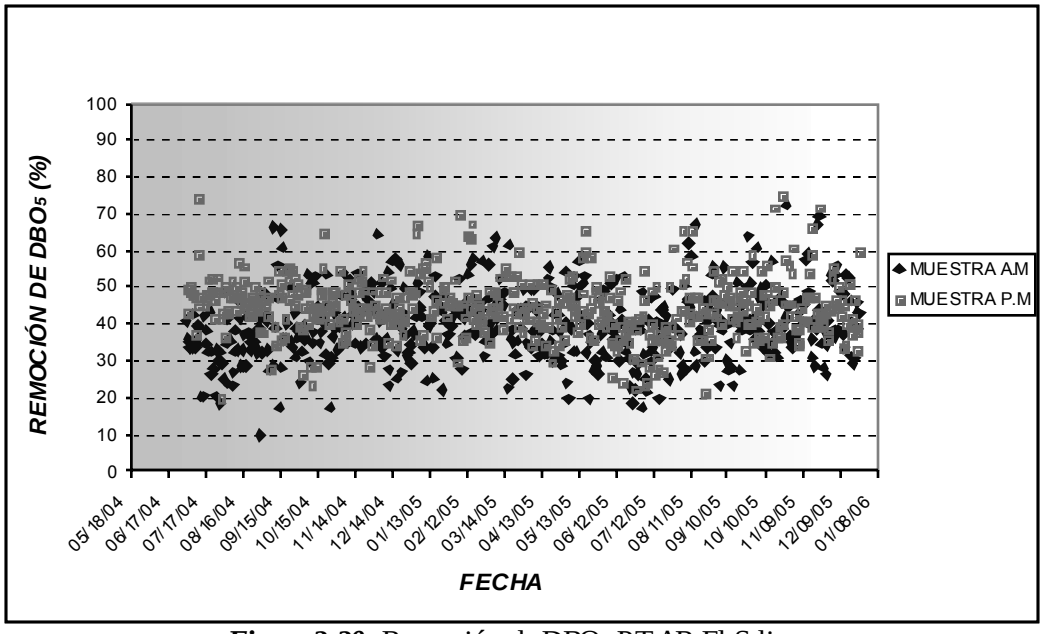


Figura 2.20 Remoción de DBO_5 PTAR El Salitre.

Como se puede observar en la ***Figura 2.20*** la difusividad de las Muestras A.M y P.M es considerable, pero para mediados del año 2005 (julio a diciembre) se puede ver que las Muestras A.M se mantienen constantes en un 40% aproximadamente y las Muestras P.M presentan un comportamiento aleatorio por encima del 40% en su mayoría.

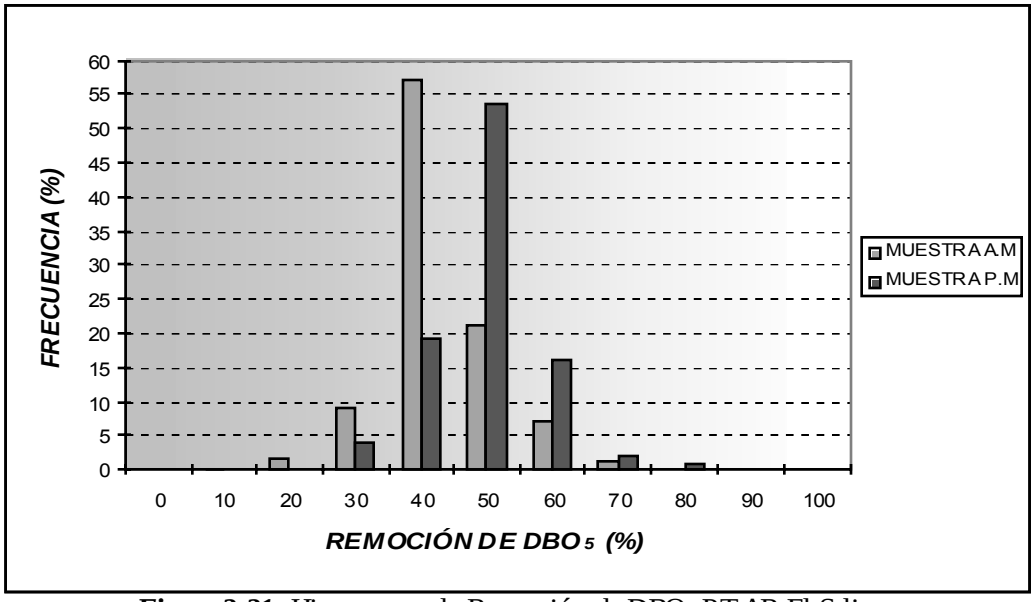


Figura 2.21 Histograma de Remoción de DBO_5 PTAR El Salitre.

Esta característica particular en el funcionamiento de la PTAR El Salitre durante los meses mencionados anteriormente se puede confirmar con el histograma de la ***Figura 2.21***. Las Muestras A.M presentan una frecuencia del 56.9% para una remoción del 40%, mientras que para las Muestras P.M el 53.4% de los valores se encuentran aproximadamente en el 60% de remoción de DBO_5, otra consecuencia más del arrastre nocturno propiciado en la planta de tratamiento.

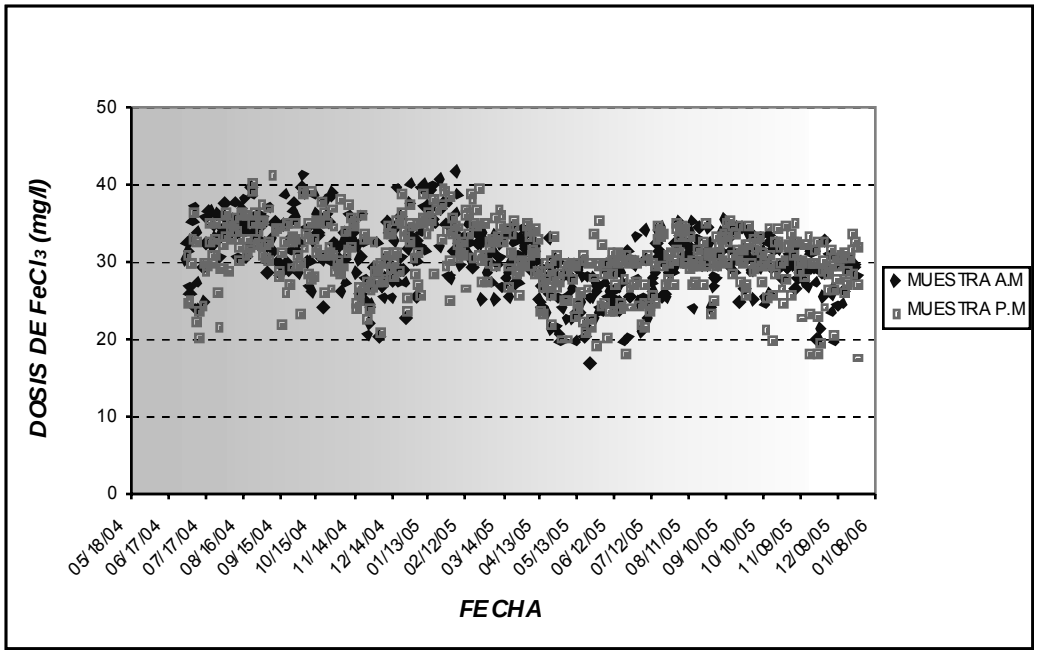


Figura 2.22 Dosis Histórica de $FeCl_3$ PTAR El Salitre.

Durante la operación de la PTAR El Salitre la dosificación de cloruro férrico a presentado una dosis promedio de 30.6 mg/l con valores máximos y mínimos de 45.5 mg/l en Muestras A.M y 35.6 mg/l en Muestras P.M; 16.7 mg/l en Muestras A.M y 17.8 mg/l en Muestras P.M, respectivamente.

En la figura anterior se puede apreciar la dinámica de la dosificación de coagulante en la planta de tratamiento. Es particularmente interesante el manejo que se le ha venido dando con el tiempo y se puede ver como para el último año (mayo de 2005) la dosis se disminuyó considerablemente tanto en las Muestras A.M como P.M sin afectar la remoción exigida a la planta de tratamiento. Este hecho indica que un adecuado estudio de la dinámica del tratamiento primario químicamente asistido de la PTAR El Salitre puede disminuir un poco más la dosificación del sistema y aumentar la eficiencia operativa, basado en sistemas de medición en línea y no solamente en un conocimiento empírico.

En el histograma de la ***Figura 2.23*** se ilustra la frecuencia de las diferentes dosis utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales de la cuenca del Río Salitre.

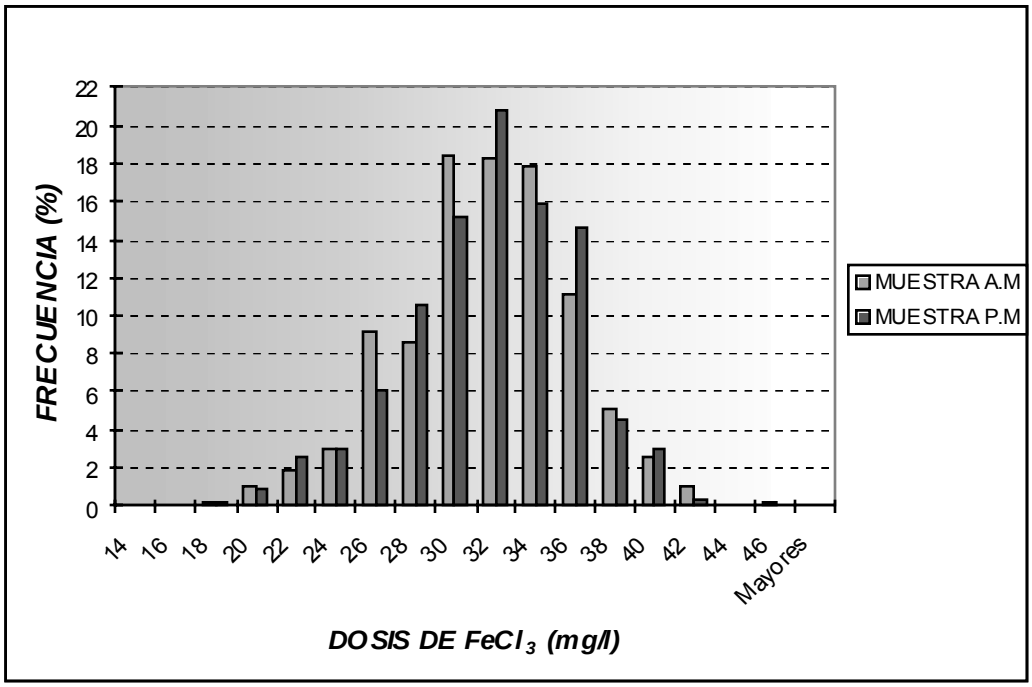


Figura 2.23 Histograma de Dosificación de $FeCl_3$ PTAR El Salitre.

Se puede concluir que ambas campanas de Gauss que se observan en el histograma anterior (Muestras A.M y P.M) presentan el mismo comportamiento.

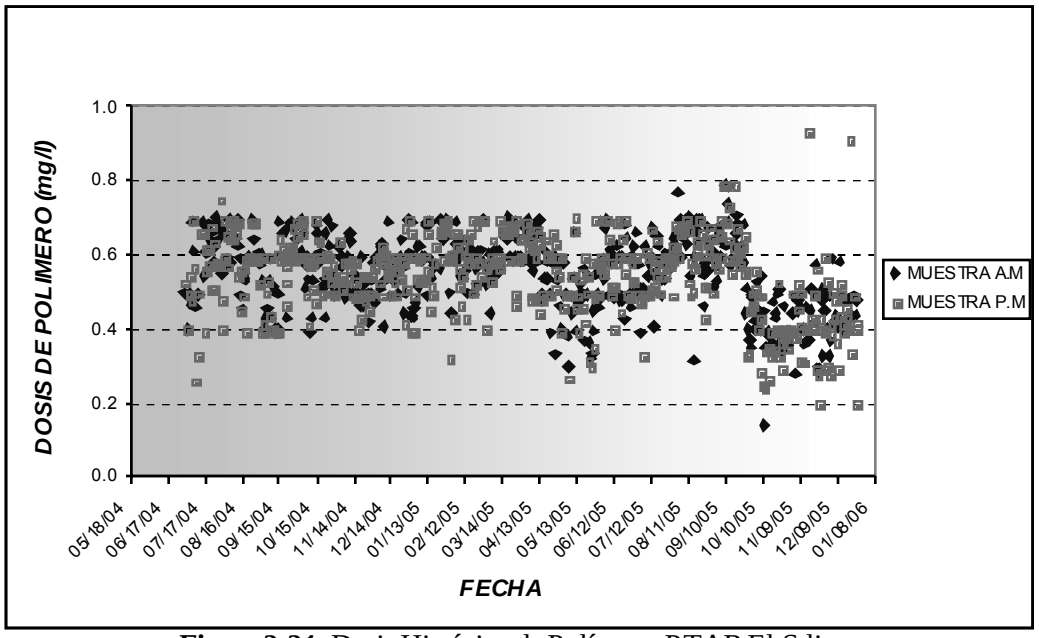


Figura 2.24 Dosis Histórica de Polímero PTAR El Salitre.

En la ***Figura 2.24*** se observa la dosis histórica de polímero CIBA 1011 utilizado en la planta de tratamiento. De la figura se puede apreciar como la dosis de polímero aparentemente presenta una correlación con respecto al comportamiento descrito anteriormente por el cloruro férrico. Es claro que los valores observados presentan una dispersión alta, y en los últimos dos meses del 2005 la dosificación de polímero disminuyó sustancialmente (en un 33% aproximadamente).

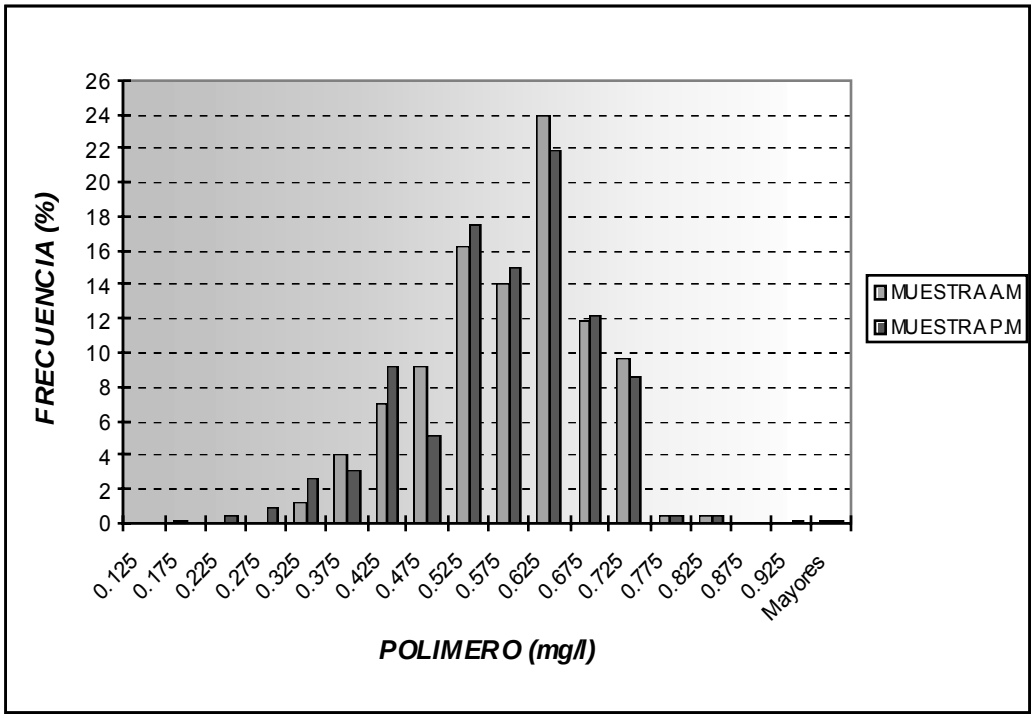


Figura 2.25 Histograma de Dosificación de Polímero PTAR El Salitre.

La dosificación promedio de polímero es de 0.54 mg/l presentando concentraciones máximas y mínimas de 0.93 y 0.19 mg/l respectivamente. El 23.9% de las Muestras A.M poseen una concentración de 0.625 mg/l, mientras que las Muestras P.M un 21.8%. De acuerdo a la naturaleza del tratamiento químico asistido es importante el tratar de establecer una correlación entre la dosis óptima de polímero y coagulante para una eficaz remoción de SST y DBO_5.

2.3 Calidad del Efluente de la PTAR El Salitre

Actualmente, el efluente de la PTAR El Salitre es dispuesto a un brazo del Río Bogotá. En este numeral se presentan las características relevantes de la calidad del efluente de la planta de tratamiento (línea de aguas), entre las cuales se encuentran: el pH, la alcalinidad, la turbiedad, SST, SSV y la DBO_5.

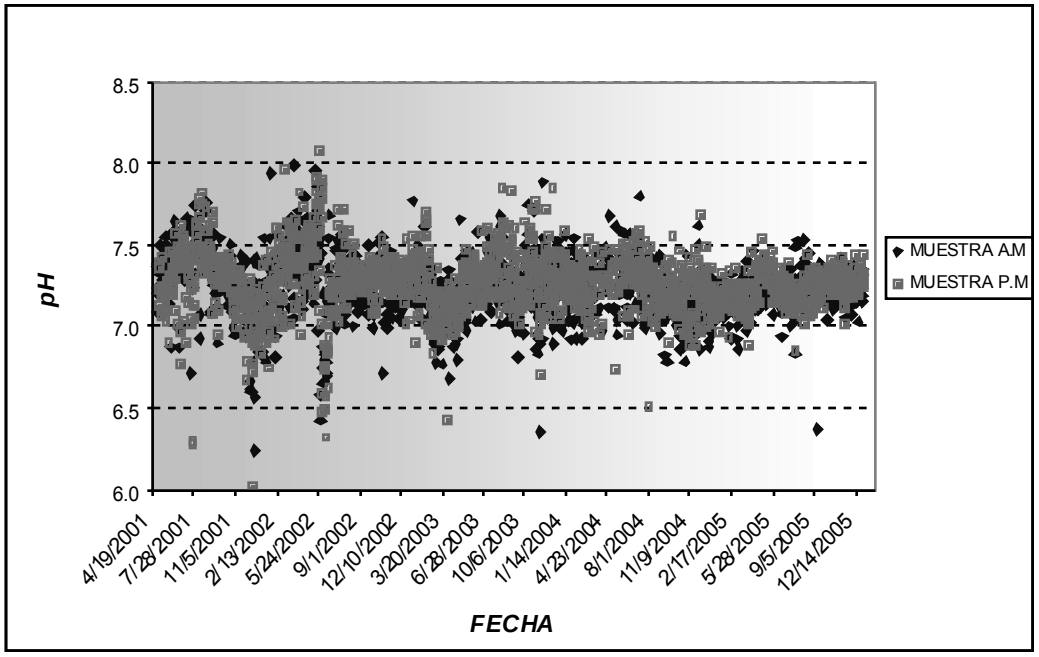


Figura 2.26 pH Efluente PTAR El Salitre.

Como se puede observar de la ***Figura 4.26*** el pH del efluente de la planta de tratamiento posee un promedio de 7.27 manteniendo constante una tendencia a disminuir la dispersión durante el 2003 al 2005. Esta dinámica contrasta de manera similar con la encontrada en el comportamiento del pH en el afluente.

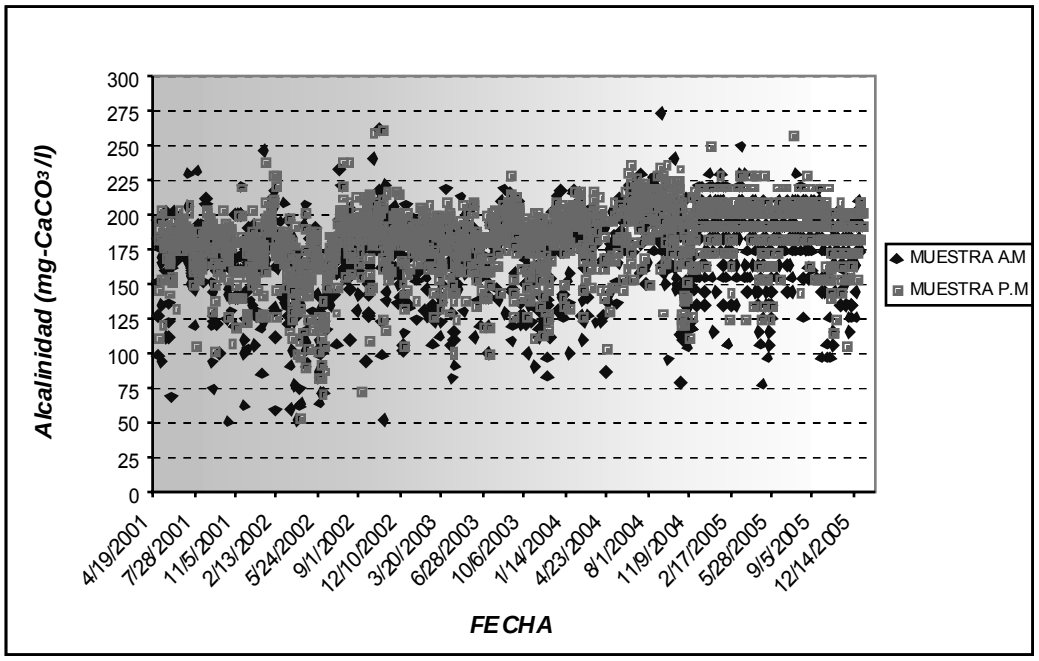


Figura 2.27 Alcalinidad Efluente PTAR El Salitre.

En la ***Figura 2.27*** se ilustra el comportamiento de la alcalinidad del efluente de la planta y se puede observar la difusividad de este parámetro. La alcalinidad promedio del efluente es de 182 mg-$CaCO_3$/l variando entre picos máximos y mínimos de 262 y 54 mg-$CaCO_3$/l, respectivamente. De igual forma que la alcalinidad presentada en el afluente, la del efluente posee la misma leve tendencia al ascenso.

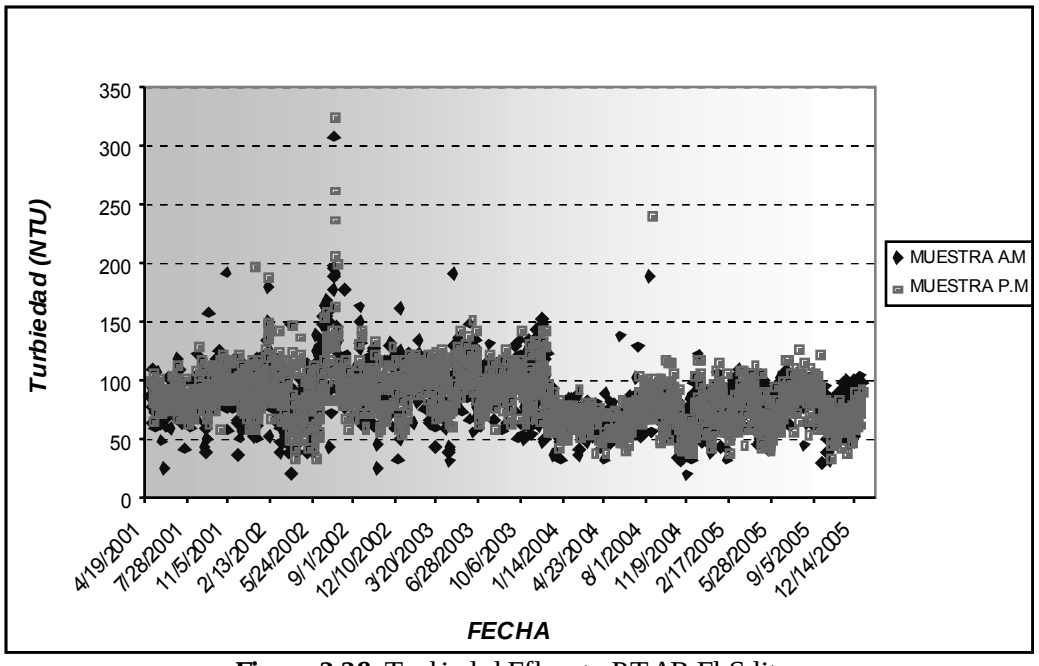


Figura 2.28 Turbiedad Efluente PTAR El Salitre.

De la figura anterior se puede apreciar la tendencia histórica de la turbiedad en el efluente de la PTAR El Salitre. Claramente se ve como la turbiedad presenta una media aritmética de 87 NTU teniendo registros máximos y mínimos de 326 y 35 NTU respectivamente. En el período 2001-2003 se puede apreciar como la turbiedad aparentemente incrementaba su valor en el canal de conducción, pero a partir de esa fecha hasta finales del 2005 ésta se disminuyó y mantuvo, de la misma forma que se presento esta dinámica en el afluente.

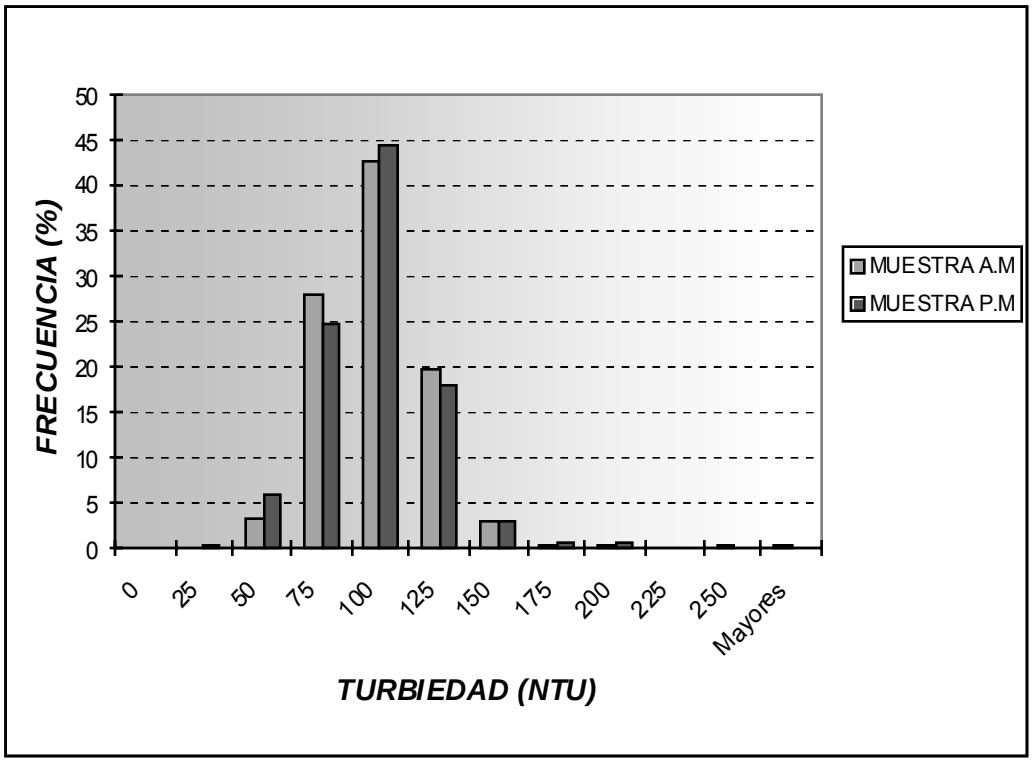


Figura 2.29 Histograma de Turbiedad Efluente PTAR El Salitre.

A diferencia del comportamiento presentado en el histograma de turbiedad del afluente se puede observar como tanto las Muestras A.M y P.M exhiben el mismo comportamiento, lo que indica la capacidad de la PTAR El Salitre para atenuar diferencias en valores de turbiedad de 50 NTU, ver ***Figura 2.29***.

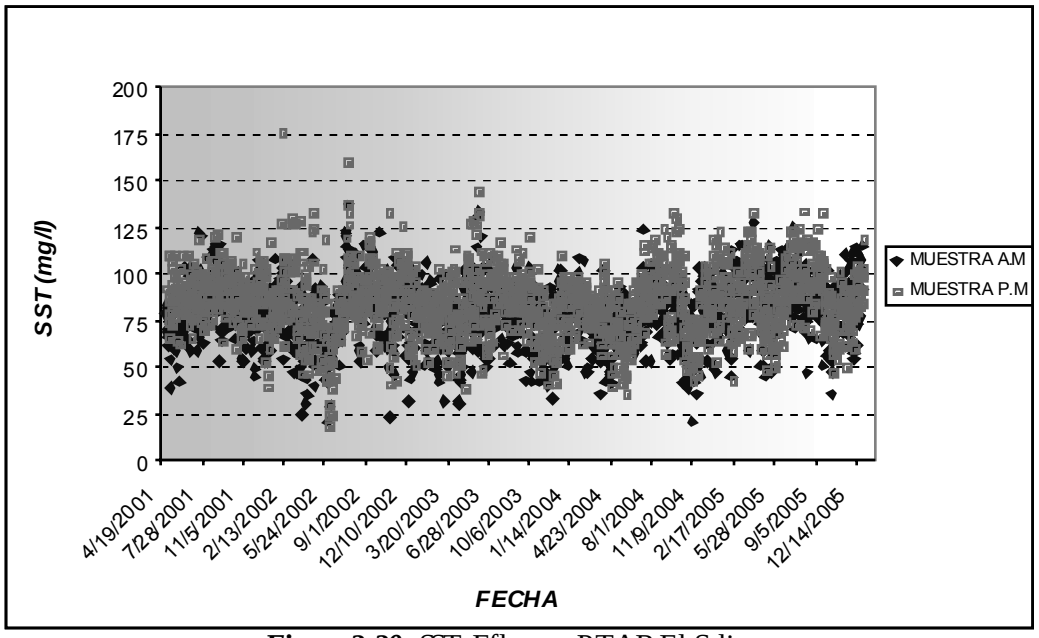


Figura 2.30 SST Efluente PTAR El Salitre.

La concentración de los sólidos suspendidos totales del efluente de la planta de tratamiento posee una media aritmética de 89 mg/l presentando valores máximos y mínimos de 175 y 24 mg/l respectivamente. En la ***Figura 2.30*** se puede apreciar como en el mes de noviembre hasta diciembre de 2005 la tendencia de los SST presenta un leve ascenso. Este fenómeno hace referencia a la disminución de la dosis de cloruro férrico y polímero para las mismas fechas, y por ende el incremento en la medida de este parámetro en el efluente.

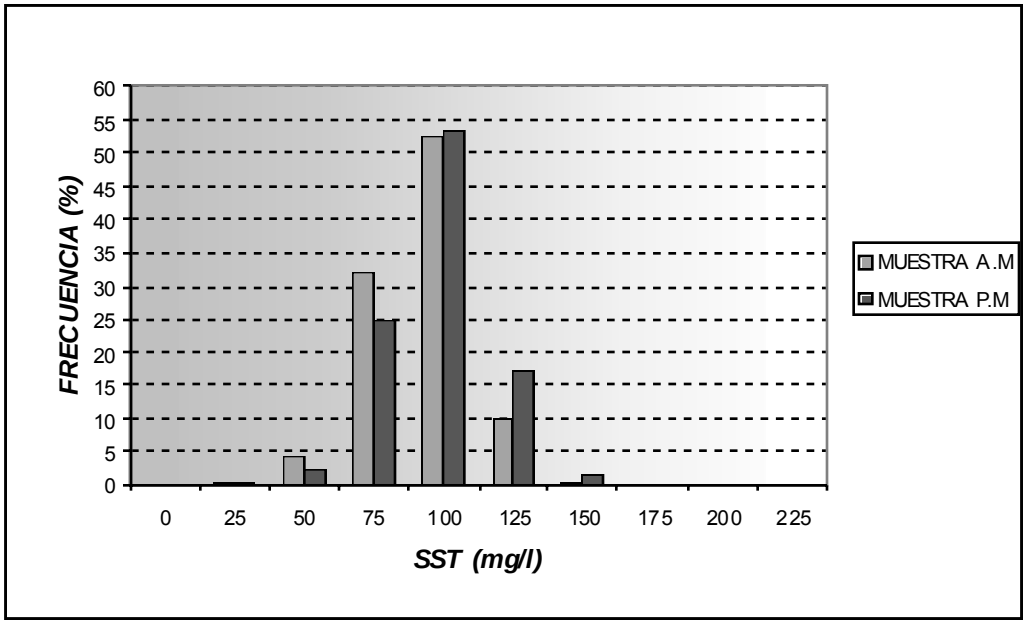


Figura 2.31 Histograma de SST Efluente PTAR El Salitre.

De igual manera que sucede con la Turbiedad los SST de las Muestras A.M y P.M describen un mismo comportamiento. En el histograma de la ***Figura 2.31*** se puede ver que el 52% de la Muestras A.M y el 53% de las Muestras P.M poseen una concentración alrededor de 100 mg/l.

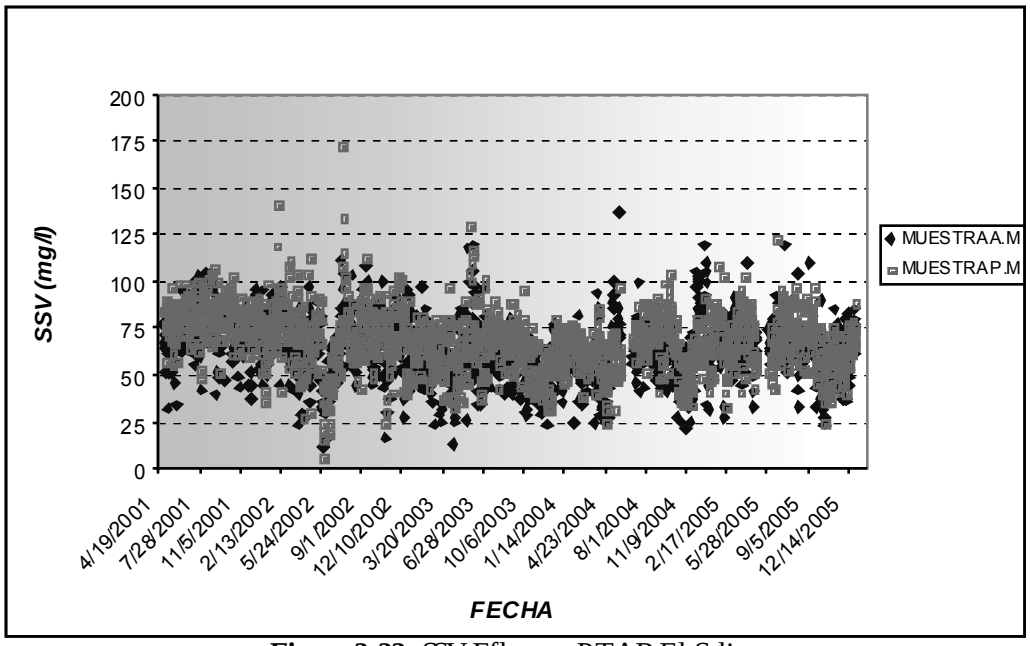


Figura 2.32 SSV Efluente PTAR El Salitre.

La concentración de SSV del efluente de la planta de tratamiento presenta una concentración promedio de 70 mg/l. Al igual que los SST la dinámica de los SSV mantiene el mismo comportamiento descrito anteriormente.

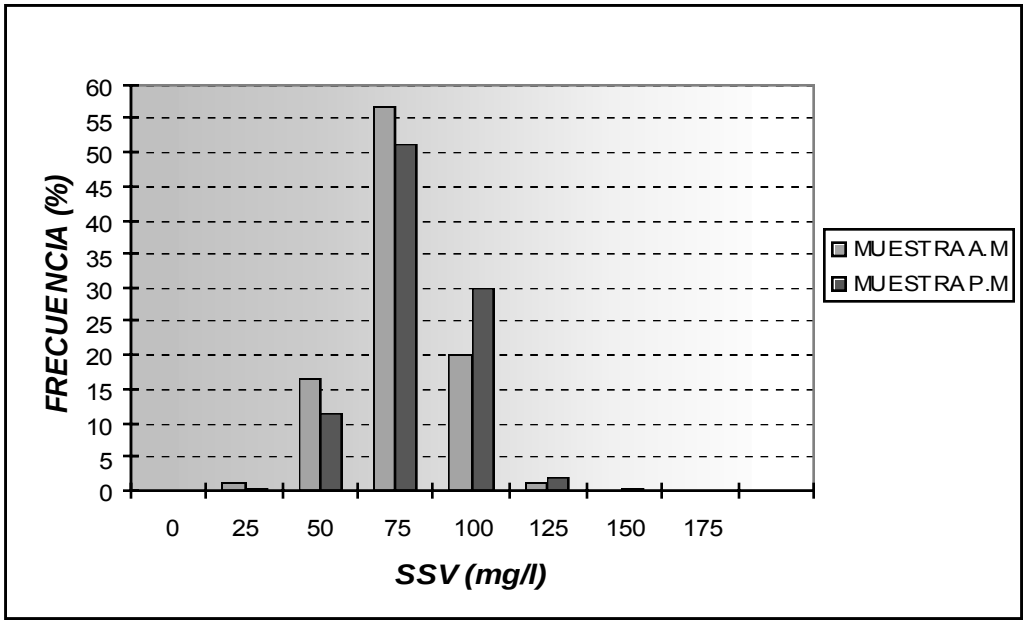


Figura 2.33 Histograma de SSV Efluente PTAR El Salitre.

La frecuencia de Muestras A.M y P.M para una concentración de 75 mg/l es de 56.5 y 51.1% respectivamente. De la ***Figura 2.33*** se puede apreciar como para una concentración de 100 mg/l la diferencia entre las Muestras A.M y P.M es significativa (33.3%). Esto se debe al incremento sutil que se presentó tanto en los SST y SSV en el mes de noviembre de 2004 hasta finales del 2005 por la disminución de la dosificación de polímero y coagulante.

Por último, se presenta la tendencia histórica de la DBO_5 en el efluente de la PTAR El Salitre y su comportamiento a nivel de frecuencia de concentraciones en los muestreos.

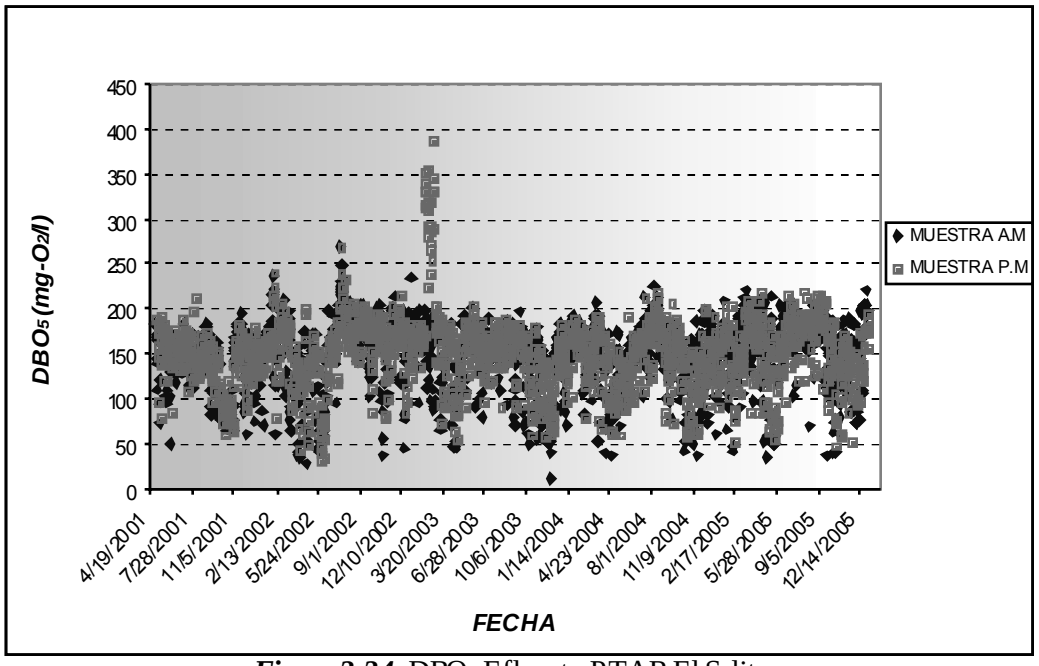


Figura 2.34 DBO_5 Efluente PTAR El Salitre.

El comportamiento que ilustra la ***Figura 2.34*** para la demanda biológica de oxígeno a los cinco días en el efluente de la planta de tratamiento describe una tendencia constante y relativamente dispersa. La concentración de DBO_5 tiene un promedio de 150 mg-O_2/l presentando valores máximos de 389 mg-O_2/l y mínimos de 39 mg-O_2/l.

En el histograma de la ***Figura 2.35*** se puede observar como la DBO_5 de las Muestras A.M y P.M exhiben la misma campana Gauss. Este hecho es una vez más atribuible a la capacidad atenuante de la PTAR El Salitre para homogenizar diferencias de 50 mg-O_2/l en el afluente del sistema.

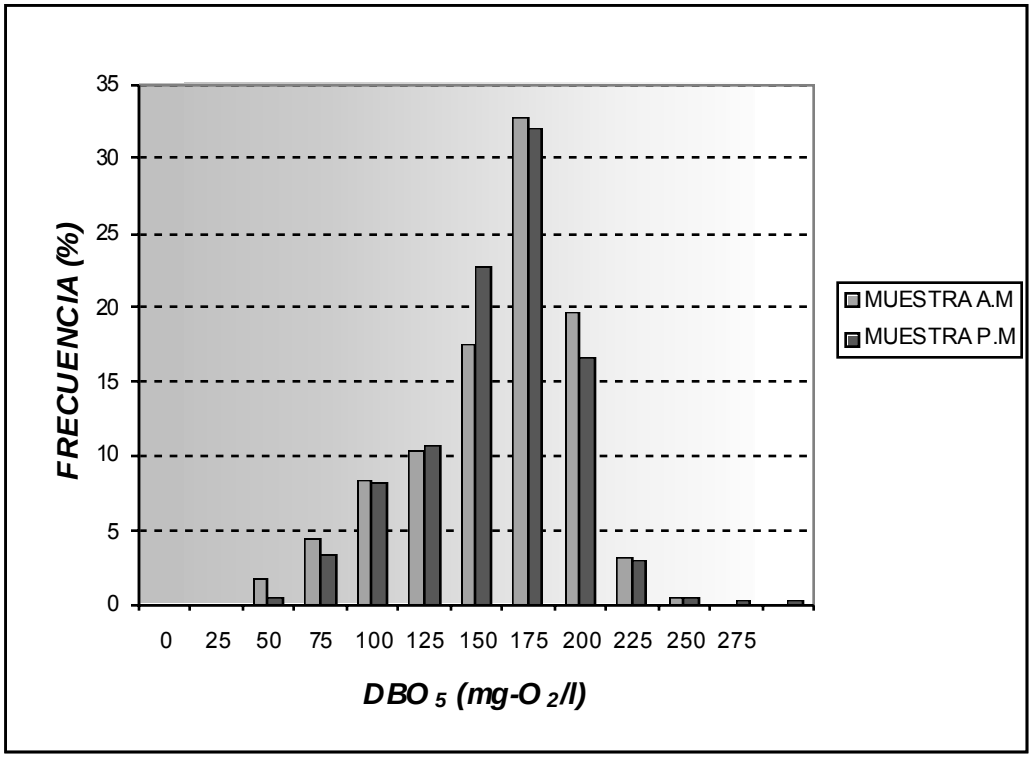


Figura 2.35 Histograma de DBO_5 Efluente PTAR El Salitre.

3. METODOLOGÍA

Para la realización del proyecto de investigación la EAAB realizó un estudio para el diseño de una Planta Piloto TPQA por intermedio de la empresa de consultoría inglesa WRc (Water Research Centre). La construcción y puesta en marcha de la planta se llevó a cabo por Protón S.A. y la WRc, respectivamente. A continuación se presentan los componentes físicos que de la Planta Piloto TPQA, el modo de operación, los ensayos y mediciones que se llevaron acabo para el estudio de este sistema de tratamiento de aguas residuales.

3.1 Planta Piloto TPQA

En diciembre de 2004 la WRc hizo entrega a la EAAB un diseño preliminar de la Planta Piloto TPQA, con el fin de realizar un estudio para la ampliación de la PTAR El Salitre y conocer el comportamiento y eficiencia de la planta con unas adecuadas estructuras inherentes en un tratamiento primario químicamente asistido. De acuerdo con la información anterior Protón S.A. realizó un diseño constructivo de la Planta Piloto TPQA en el mes de marzo de 2005 e inició su construcción en la primera semana de abril de 2005. El 24 de abril de 2005 Protón S.A. hizo entrega de la Planta Piloto TPQA a la EAAB en la PTAR El Salitre. En el mes de mayo de 2005 la WRc realizó los ensayos de la puesta en marcha (pruebas de bombas peristálticas, protocolos de calibración de equipos, estancamiento, operación de agitadores y válvulas) de la planta piloto. Una vez aprobada la puesta en marcha de la planta piloto se inició la ejecución del cronograma de muestreos y mediciones el 20 de junio de 2005.

A continuación se presenta una descripción cuantitativa y cualitativa de los componentes físicos de la planta piloto y el modo de operación del sistema.

3.1.1 Componentes Físicos

La Planta Piloto TPQA esta constituida grosso modo por una estructura de captación y medición, un tanque de mezcla rápida, tres tanques para la floculación, un tanque sedimentador, una estructura para la dosificación de químicos, una estructura metálica de soporte y un tanque para la medición y disposición del efluente al alcantarillado interno de la PTAR El Salitre (como se ilustra en la ***Figura 3.1 y 3.2***).

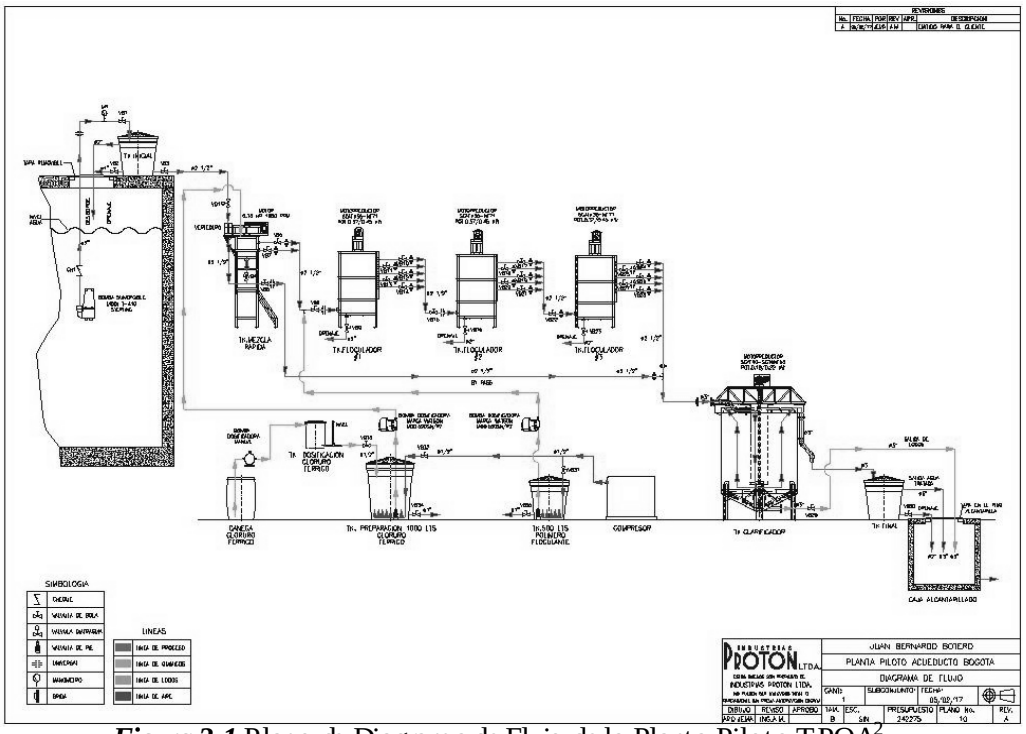


Figura 3.1 Plano de Diagrama de Flujo de la Planta Piloto TPQA[2].

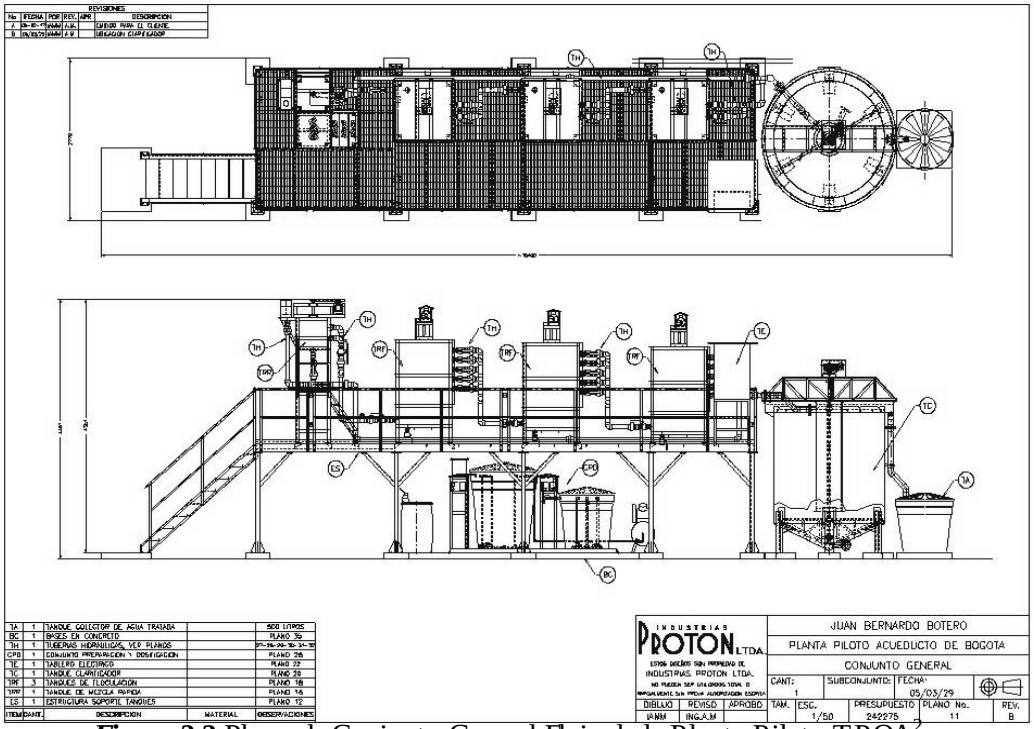
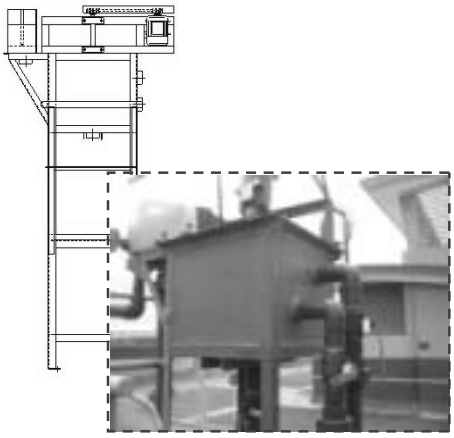


Figura 3.2 Plano de Conjunto General Flujo de la Planta Piloto TPQA[2].

Las especificaciones y características constructivas de cada componente de la planta piloto son las siguientes:

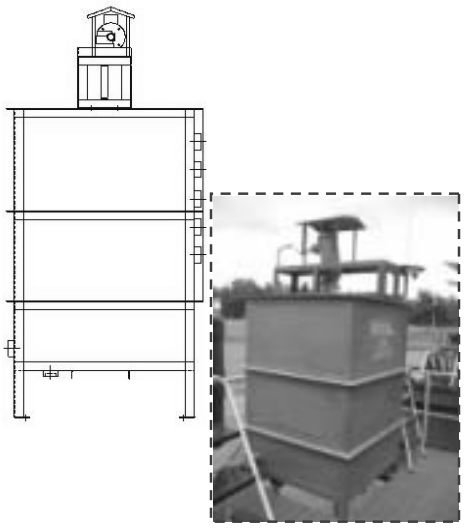
[2] Proton S.A.

1. TANQUE DE MEZCLA RÁPIDA



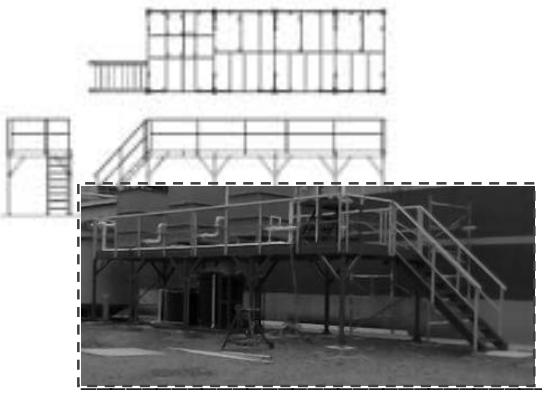
- **Características Constructivas**
  - Forma: cuadrada, fondo plano.
  - Dimensiones: 0.6m x 0.6m x 0.56m (AxLxH).
  - Construcción: FRP.
  - Conexiones: tubería de 3" (entrada/salida), tubería de drenaje 2".
  - Agitador: Tipo hélice, SS316.
  - Velocidad de Rotación: 1,450 RPM (variable).
  - Motor: 0.4 HP.
- **Especificaciones de Diseño**
  - Tiempo de retención mínimo: 60 seg.
  - Ajuste tiempo retención: mediante válvulas localizadas en 2 niveles.

2. TANQUES DE FLOCULACIÓN



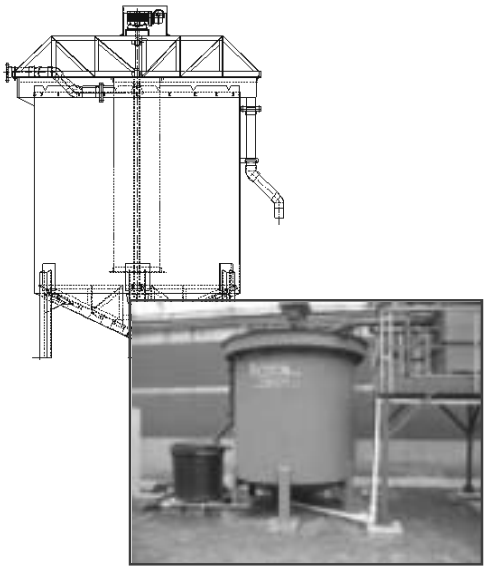
- **Características Constructivas**
  - Forma: cuadrada, fondo plano.
  - Dimensiones: 1.0m x 1.0m x 1.5m (AxLxH).
  - Construcción: FRP.
  - Conexiones: tubería de 3" (entrada/salida), tubería de drenaje 2".
  - Agitador: Tipo hélice, SS316.
  - Velocidad de Rotación: 250 RPM (variable).
  - Motor: 0.6 HP.
- **Especificaciones de Diseño**
  - Tiempo de retención total: 10 minutos por tanque.
  - Ajuste tiempo retención: mediante válvulas localizadas en 5 niveles.

3. ESTRUCTURA DE SOPORTE



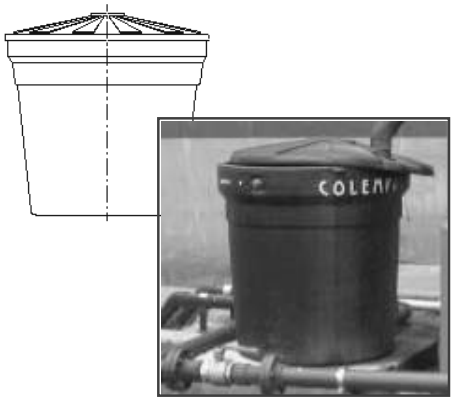
- **Características Constructivas**
  - Plataforma superior provista de pasarela y patas de soporte al piso.
  - Dimensiones: 9.0 x 2.5 x 1.9m (LxAxH).
  - Estructura en acero al carbono, piso en rejilla galvanizada.

4. TANQUE DE SEDIMENTACIÓN



- **Características Constructivas**
  - Forma: cilíndrico vertical, fondo cónico
  - Diámetro: 2 m Altura cilindro: 1.9 m
  - Construcción: Acero.
  - Conexiones: tubería de 3" (entrada/salida), tubería de drenaje 2".
  - Barredor de lodos: Accionamiento central.
  - Velocidad de Rotación: 0.3 RPM (fija).
  - Motoreductor: 0.3 HP.
- **Especificaciones de Diseño**
  - Carga superficial: 1.24 m^3/m^2h
  - Tiempo de retención: 1.66 horas.

5. TANQUE INICIAL Y FINAL

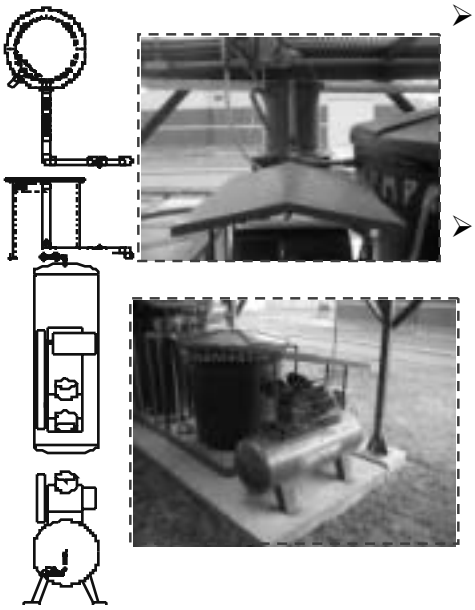


- **Tanque Alimentación (Inicial)**
  - Forma: tronco cilíndrico vertical, con tapa.
  - Volumen: 500 Litros.
  - Construcción: Polietileno.
  - Conexiones: tubería de salida 2.5"; tubería de entrada/rebose 2".
- **Tanque Colector Agua Tratada (Final)**
  - Forma: tronco cilíndrico vertical, con tapa.
  - Volumen: 500 Litros.
  - Construcción: Polietileno.
  - Conexiones: tubería de entrada/salida 3"; tubería de drenaje 1".

6. SISTEMA DE PREPARACIÓN DE QUÍMICOS

- **Tanque de preparación de Cloruro Férrico**
  - Forma: tronco cilíndrico vertical, con tapa.
  - Volumen: 1000 Litros.
  - Construcción: Polietileno.
  - Conexiones: tubería de entrada 1.5"; tubería de drenaje 1".
  - Agitación: Aire, tubería perforada PVC.

- **Tanque de preparación de Polímero**
  - Forma: tronco cilíndrico vertical, con tapa.
  - Volumen: 500 Litros.
  - Construcción: Polietileno.
  - Conexiones: tubería de drenaje 1".
  - Agitación: Aire, tubería perforada en PVC.



- **Tanque de dosificación Cloruro Férrico**
  - Forma: cilíndrico vertical, con tapa.
  - Volumen: 15 Litros.
  - Construcción: PRFV.
  - Conexiones: tubería de salida 1/2".
- **Compresor**
  - Capacidad: 10 CFM, 125 psi.
  - Tanque horizontal de 35 galones.
  - Lubricado con aceite.
  - Válvula de seguridad.
  - Motor: 2 HP.

7. BOMBAS DOSIFICADORAS

- **Cloruro Férrico**
  - Bomba peristáltica Watson Marlow.
  - Modelo: 520SN/R2, 220 rpm.
  - Capacidad: 50 - 700 ml/min.
- **Polímero**
  - Bomba peristáltica Watson Marlow.
  - Modelo: 520SN/R2, 220 rpm.
  - Capacidad: 5 - 300 ml/min.

3.1.2 Características de Diseño y Operación

La Planta Piloto TPQA localizada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre fue diseñada para emular el comportamiento que presentaría la PTAR El Salitre con unas estructuras adicionales para la mezcla rápida y una serie de flocuradores para la adecuada conformación del floc. Por ende, la planta piloto puede manejar varios caudales de operación entre los cuales se encuentran:

Tabla 3.1 Caudales Escalados Planta Piloto TPQA.

CAUDAL No.	CAUDAL PLANTA PILOTO (l/s)	CAUDAL ESCALADO PTAR EL SALITRE (m^3/s)
1	1.08	4
2	1.35	5
3	1.62	6
4	1.89	7
5	2.16	8

Estos caudales presentados anteriormente serán objeto de estudio a lo largo del proyecto de investigación.

Otro aspecto fundamental de las características de diseño de la planta piloto es la variabilidad que se puede tener en tiempos de retención en los tanques de floculación y mezcla rápida. Estos constan de una serie de válvulas que permiten cambiar el tiempo de retención de cada reactor manteniéndolo a la vez fijo durante la consecución de un ensayo bajo determinado caudal.

Para el tanque de mezcla rápida se encuentran dos válvulas para el efluente ubicadas a una altura del fondo del reactor de 0.18 m y 0.36 m garantizando una mezcla completa libre de cortocircuitos para unos volúmenes de 64.9 L y 129.8 L, respectivamente.

Para los tres tanques floculadores que se encuentran en serie se tienen cinco válvulas para el efluente de los reactores ubicadas a las siguientes alturas del fondo y volúmenes del tanque.

Tabla 3.2 Ubicación de Válvulas en Tanques de Floculación.

VOLÚMEN DEL TANQUE DE FLOCULACIÓN (m^3)	ALTURA DE VÁLVULA (m)
0.649	0.65
0.811	0.81
0.973	0.97
1.136	1.14
1.298	1.30

Por último, el tanque de sedimentación de la planta piloto fue diseñado para operar a la misma velocidad ascensional a la cual operan actualmente los sedimentadotes de la PTAR El Salitre (1.24 m^3/m^2h). Cuenta con un volumen de 6.46 m^3 y para el caudal mínimo de la planta piloto de 1.08 l/s posee un tiempo de retención de 1.66 horas.

La operación de la Planta Piloto TPQA para el presente estudio fue realizada para todos los caudales presentados anteriormente con un tiempo de retención en los tanques de floculación de 30 minutos (WEF Manual of Practice No. 8 Fourth Edition, 1998) y una velocidad de agitación de 100 rpm; un tiempo de mezcla rápida ajustado para los tres caudales inferiores en el nivel mínimo de la válvula del reactor y para los dos caudales superiores en el nivel máximo de la válvula con una velocidad de agitación de 350 rpm (Rossini et. al.,1999). La dosis de coagulante (Cloruro Férrico) fue variada a lo largo del cronograma de muestreo (0,10,20,25,30,35,40,45 mg/l) y la

de polímero (CIBA 1011) se mantuvo en 0.5 mg/l como dosis crucero promedio utilizada en la PTAR El Salitre (Leentvaar et.al., 1979).

Inicialmente la planta piloto operó de 8:00 a.m. a 5:00 p.m. y eventualmente se decidió mantener una operación de 24 horas durante la segunda fase de ensayos para el desarrollo, alimentación de datos y calibración del modelo. Para la obtención de datos a utilizar en la validación del modelo se propuso una tercera campaña intensiva en la cual se operó la planta piloto de 8:00 a.m. a 5:00 p.m., los detalles de los ensayos realizados y las características de estas campañas de monitoreo se presentan en el siguiente numeral.

3.2 Cronogramas de Operación y Muestreos

Durante los meses de junio a octubre de 2005 se realizó la primera fase de los ensayos experimentales de la planta piloto, seguidos de la segunda fase comprendida entre los meses de diciembre de 2005 a principios de enero de 2006 (6 de enero de 2006), la ultima fase se llevó acabo en el mes de abril de 2006 y tuvo un período de ejecución de 3 semanas. Los ensayos realizados en las tres diferentes campañas de muestreo fueron los siguientes:

Tabla 3.3 Mediciones realizadas en las Campañas de Monitoreo.

CAMPAÑA DE MONTOREO	*TIPO DE MUESTRA*	*ENSAYOS REALIZADOS*	*HORAS DE TOMA AFLUENTE*	*HORAS DE TOMA EFLUENTE*
1	PUNTUAL/ COMPUESTA	Conductividad, SST, DBO_5, pH, Potencial Rédox, Temperatura	10:00 a.m. 12:00 a.m/ 2:00 p.m	12:00 a.m. 2:00 p.m / 4:00 p.m
2	PUNTUAL/ COMPUESTA	Conductividad, SST	1:30 a.m. / 6:30 a.m / 10:30 a.m 3:30 p.m. / 8:30 p.m	2:30 a.m / 7:30 a.m / 11:30 a.m 4:30 p.m / 9:30 p.m
3	PUNTUAL	Conductividad, SST, DQO	8:00 a.m. / 9:00 a.m / 10:00 a.m 11:00 p.m. / 12:00 a.m / 1:00 p.m 2:00 p.m. / 3:00 p.m	10:00 a.m / 11:00 a.m. / 12:00 a.m. 1:00 p.m / 2:00 p.m / 3:00 p.m. 4:00 p.m / 5:00 p.m

Nota: *Las horas de toma de muestras en el efluente están sujetas al caudal del sistema con el fin de seguir la masa de agua en el afluente.*

Adicional a las mediciones presentadas anteriormente se midió el nivel del canal Salitre en la PTAR El Salitre y el caudal a la entrada de la Planta Piloto TPQA.

A continuación se presentan los cronogramas que se siguieron en las tres diferentes fases del proyecto de investigación:

Tabla 3.4 Campaña de Monitoreo 1.

ACTIVIDAD	Semana 1							Semana 2							Semana 3							Semana 4						
	20/06	21/06	22/06	23/06	24/06	25/06	26/06	27/06	28/06	29/06	30/06	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07	08/07	09/07	10/07	11/07	12/07	13/07	14/07	15/07	16/07	17/07
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
Sin químicos	1.08	1.35	1.62	1.89	2.16																							
Caudal 1,08 l/s								10	20	30	35	40																
Caudal 1,62 l/s															10	20	30	35	40									
Caudal 2,16 l/s																						10	20	30	35	40		

ACTIVIDAD	Semana 5							Semana 6							Semana 7							Semana 8						
	18/07	19/07	20/07	21/07	22/07	23/07	24/07	25/07	26/07	27/07	28/07	29/07	30/07	31/07	01/08	02/08	03/08	04/08	05/08	06/08	07/08	08/08	09/08	10/08	11/08	12/08	13/08	14/08
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
Caudal 1,35 l/s	10	20	30	35	40																							
Caudal 1,89 l/s								10	20	30	35	40																
Caudal 1,08 l/s															25	30	35	40	45									
Caudal 1,35 l/s																						25	30	35	40	45		

ACTIVIDAD	Semana 9							Semana 10							Semana 11							Semana 12						
	15/08	16/08	17/08	18/08	19/08	20/08	21/08	22/08	23/08	24/08	25/08	26/08	27/08	28/08	29/08	30/08	31/08	01/09	02/09	03/09	04/09	05/09	06/09	07/09	08/09	09/09	10/09	11/09
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
Caudal 1,62 l/s		30	35	40	45	40	40																					
Caudal 1,89 l/s								25	30	35	40	45																
Caudal 2,16 l/s															25	30	35	40	45									

1.08 Caudal utilizado por día.
10 Dosis de Cloruro Férrico utilizada por día.

Tabla 3.5 Campaña de Monitoreo 2.

ACTIVIDAD	Semana 1							Semana 2							Semana 3							Semana 4						
	12/12	13/12	14/12	15/12	16/12	17/12	18/12	19/12	20/12	21/12	22/12	23/12	24/12	25/12	26/12	27/12	28/12	29/12	30/12	31/12	01/01	02/01	03/01	04/01	05/01	06/01	07/01	08/01
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
Caudal 1,08 l/s	20	25	30	35																								
Caudal 2,16 l/s								20	25	30	35	40																
Caudal 3,37 l/s															20	25	30	35	40									
Caudal 2,70 l/s																						20	25	30	35	40		

20 Dosis de Cloruro Férrico utilizada por día.

Tabla 3.6 Campaña de Monitoreo 3.

ACTIVIDAD	Semana 1							Semana 2							Semana 3						
	03/04	04/04	05/04	06/04	07/04	08/04	09/04	17/04	18/04	19/04	20/04	21/04	22/04	23/04	24/04	25/04	26/04	27/04	28/04	29/04	30/04
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
Caudal 1,08 l/s A.M.	25	30	40																		
Caudal 1,08 l/s P.M.	35																				
Caudal 1,35 l/s A.M.				30	35																
Caudal 1,35 l/s P.M.			25		40																
Caudal 1,62 l/s A.M.								25	30	40											
Caudal 1,62 l/s P.M.								35													
Caudal 1,89 l/s A.M.											30	35									
Caudal 1,89 l/s P.M.										25		40									
Caudal 2,16 l/s A.M.															25	30	40				
Caudal 2,16 l/s P.M.															35						

A.M. Muestreo de 8:00 a 11:00 a.m.
P.M. Muestreo de 12:00 a 3:00 p.m.
Dosis de Cloruro Férrico utilizada por día.

Paralelo a la ejecución de los cronogramas de muestreo, éstos se fueron ajustando a los resultados y se realizó una depuración de los datos analizados por el laboratorio de la PTAR El Salitre, obteniendo así las posibles variables de medición en línea del modelo de dosificación.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez culminadas las tres campañas de monitoreo se procedió a organizar la información muestreada, evaluar las condiciones de la planta piloto e identificar los parámetros para el desarrollo del modelo de dosificación, mediante la utilización de una herramienta de análisis estadístico.

4.1 Caracterización Planta Piloto TPQA

Durante las etapas experimentales, la planta piloto alcanzó remociones máximas del 75% de SST, dependiendo de la calidad del afluente y la dosificación de cloruro férrico empleada. El afluente a lo largo del estudio presentó las siguientes caracteríticas promedio:

Tabla 4.1 Características del agua residual afluente de la planta piloto.

PARÁMETROS	AFLUENTE
pH	7.3
Conductividad	665 mS/cm
Turbiedad	160 NTU
SST	185 mg/l
Potencial Rédox	-212 mV
Temperatura	22 °C
DBO_5	263 mg/l
DQO	299 mg/l

Para el afluente se encontró que en la medición de SST, el 62% de la frecuencia de las muestras que ingresaron al sistema fue inferior a 200 mg/l, poniendo en evidencia un caudal muy diluido a lo largo del periodo de muestreo.

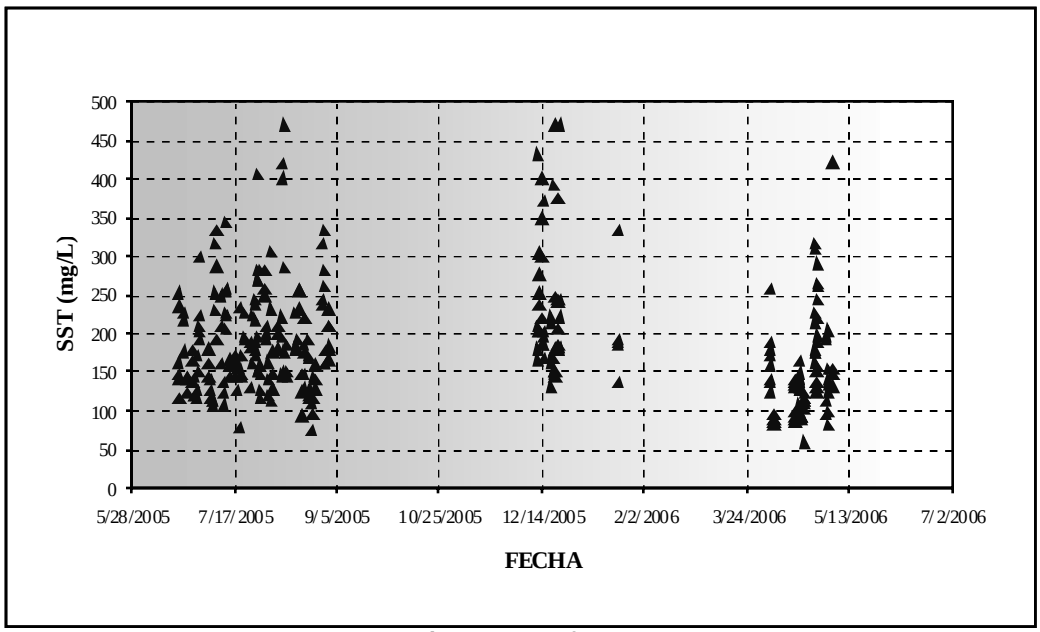


Figura 4.1 Concentración de SST Afluente Planta Piloto TPQA.

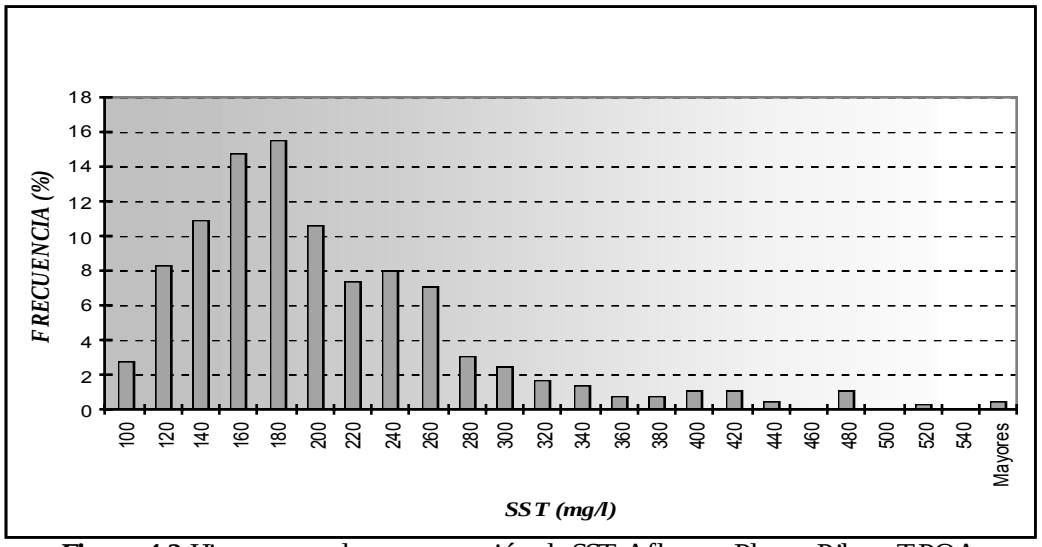


Figura 4.2 Histograma de concentración de SST Afluente Planta Piloto TPQA.

Este hecho podría corresponder al número significativo de conexiones erradas de la red de alcantarillado en la cuenca del canal Salitre y a las bajas velocidades, entre 0.06 m/s y 0.18m/s que propician la sedimentación alterando las características de calidad del agua residual tomada, debido a un efecto de remanso en el mismo (Hernández, 2003).

Teniendo en cuenta esta hipótesis se cree que la fracción sedimentable puede estar siendo disminuida por la hidrolización de la materia orgánica debido a los altos tiempos de retención del agua residual en el canal Salitre. Aspecto el cual puede llegar perturbar la eficiencia de este tipo de tratamientos químico dependiendentes. Esta teoría se puede relacionar con la disminución de la fracción de SSV/SST del afluente de la PTAR El Salitre en los últimos cinco años (***Figura 2.10***).

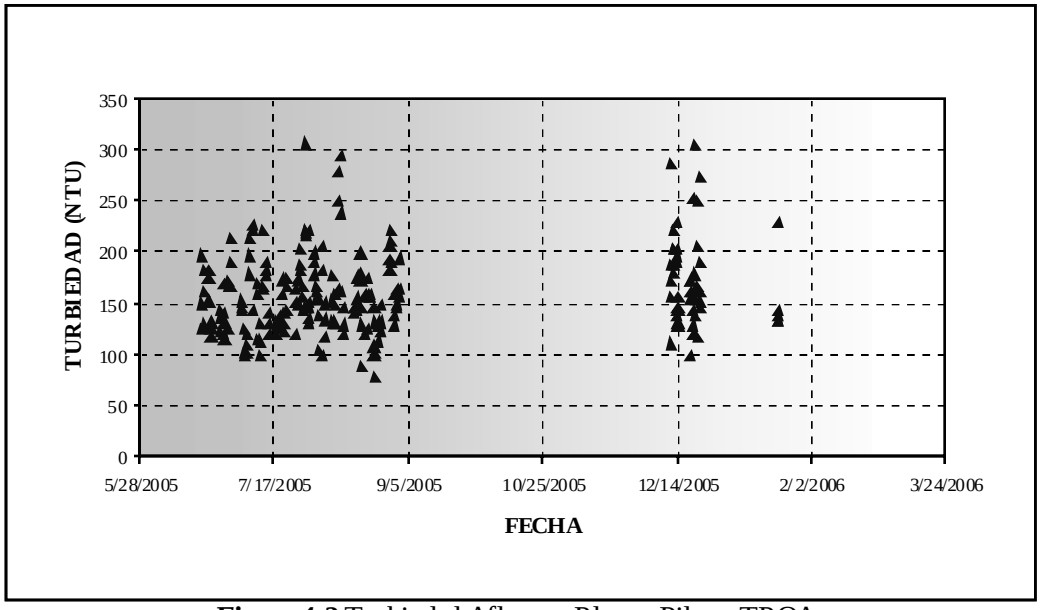


Figura 4.3 Turbiedad Afluente Planta Piloto TPQA.

Como se puede apreciar en la ***Figura 4.3*** la turbiedad sigue el comportamiento de los SST del afluente, alcanzando valorea máximos de 306 NTU y mínimos de 78 NTU.

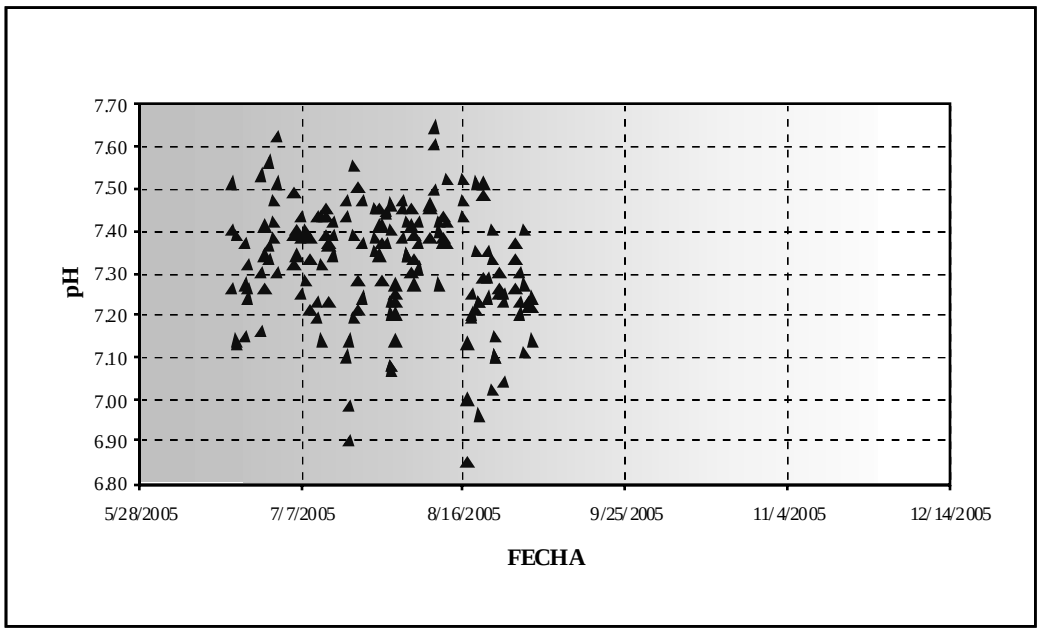


Figura 4.4 pH Afluente Planta Piloto TPQA.

El pH del afluente se mantiene en un valor igual al promedio encontrado en la PTAR El Salitre, mostrando una neutralidad del agua residual a tratar, alcanzando valores máximos de 7.65 y mínimos de 6.85.

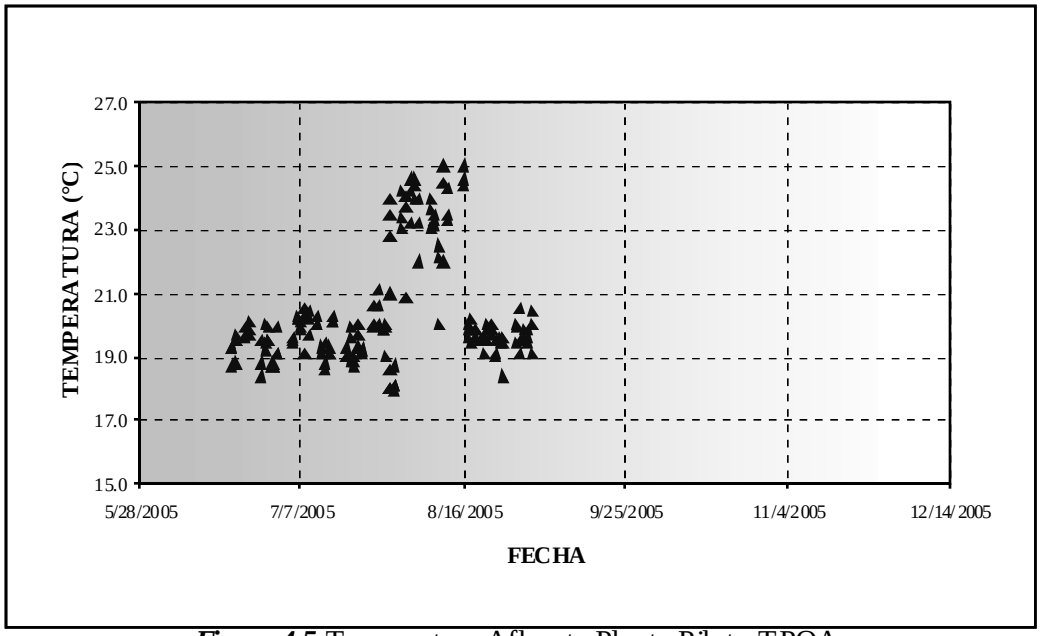


Figura 4.5 Temperatura Afluente Planta Piloto TPQA.

Tanto la temperatura, la conductividad y el potencial rédox presentaron una conducta característica de un agua residual relativamente diluida en períodos estacionales de alta precipitación y su comportamiento es ilustrado en las ***Figuras 4.5, 4.6 y 4.7***, respectivamente.

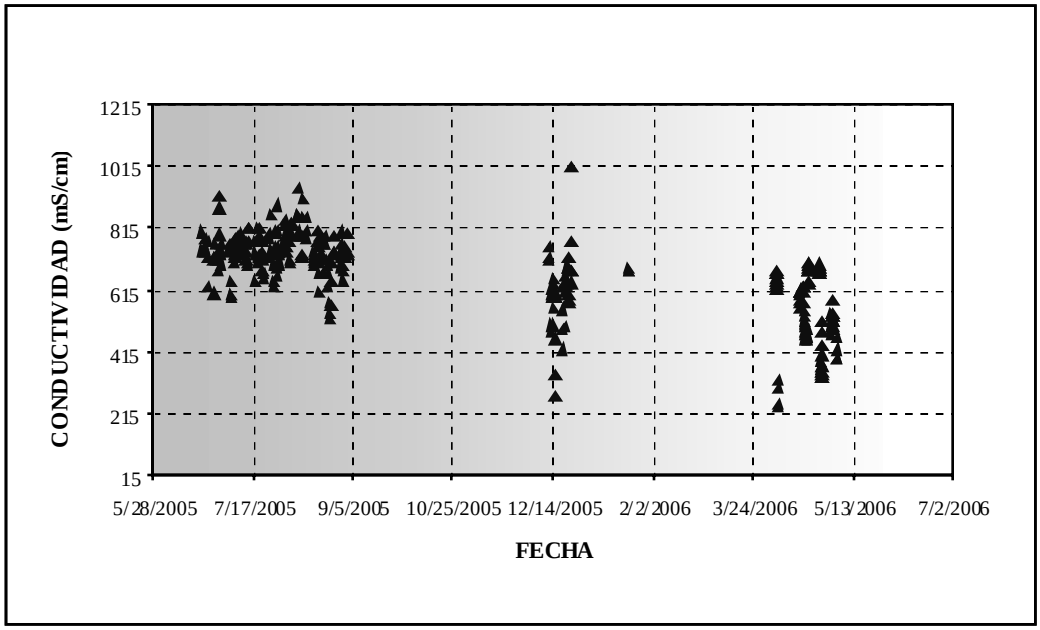


Figura 4.6 Conductividad Afluente Planta Piloto TPQA.

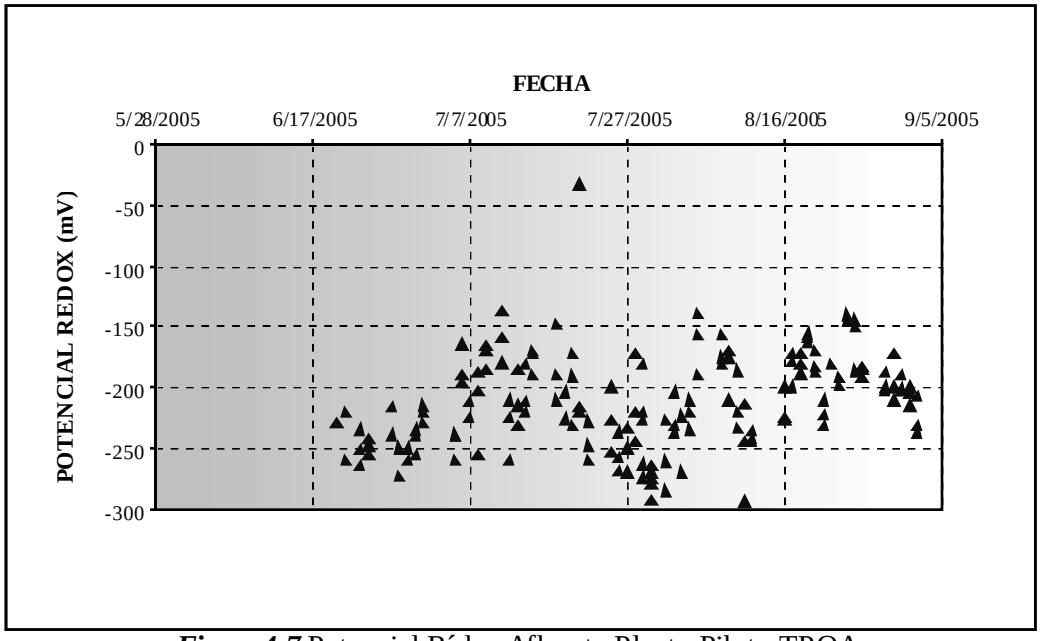


Figura 4.7 Potencial Rédox Afluente Planta Piloto TPQA.

Los valores máximos presentados por la temperatura, conductividad y potencial rédox fueron 25 °C, 1018 mS y -33 mV; de la misma manera los mínimos fueron 17.9 °C, 232 mS y -294 mV, respectivamente.

Por último, las características promedio del efluente de la planta piloto TPQA durante la realización de todos los ensayos son los siguientes:

Tabla 4.2 Características del agua residual efluente de la planta piloto.

PARÁMETROS	EFLUENTE
pH	7.2
Conductividad	676 mS/cm
Turbiedad	83 NTU
SST	91 mg/l
Temperatura	20 °C
DBO_5	182 mg/l
DQO	209 mg/l

4.2 Análisis Estadístico de Parámetros

Con la ayuda de un herramienta informática para el análisis estadístico de modelos lineales, DATAFIT 8.1 de la Oakdale Engineering, se identificaron los parámetros preliminares del modelo de dosificación (Rauch et. al., 1998). En primera instancia, se correlacionaron todos los parámetros presentados anteriormente entre sí y en función de su incidencia en el desempeño de la planta piloto, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Los SST se pueden estimar mediante la turbiedad, ningún otro parámetro incurre en su predicción.

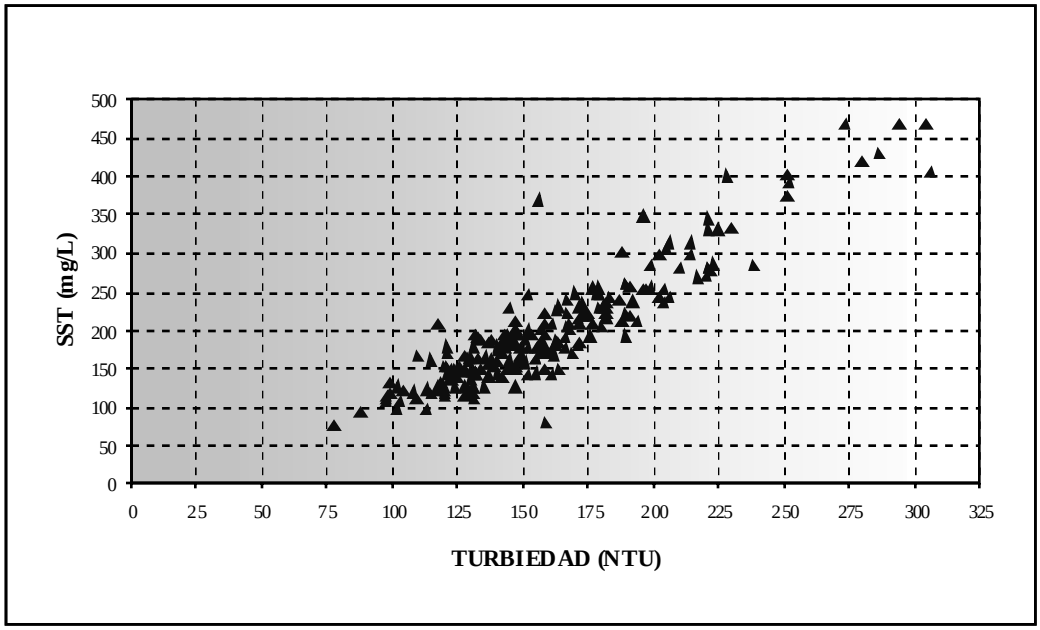


Figura 4.8 Correlación de los SST y la turbiedad del afluente.

Como se puede observar en la ***Figura 4.8***, los SST y la turbiedad del agua residual guardan una estrecha relación lineal. La dispersión en los datos correlacionados es una característica intrínseca de la conducta que presenta este tipo de sistemas.

2. La DBO_5 se puede estimar usando los SST y la conductividad del agua residual.

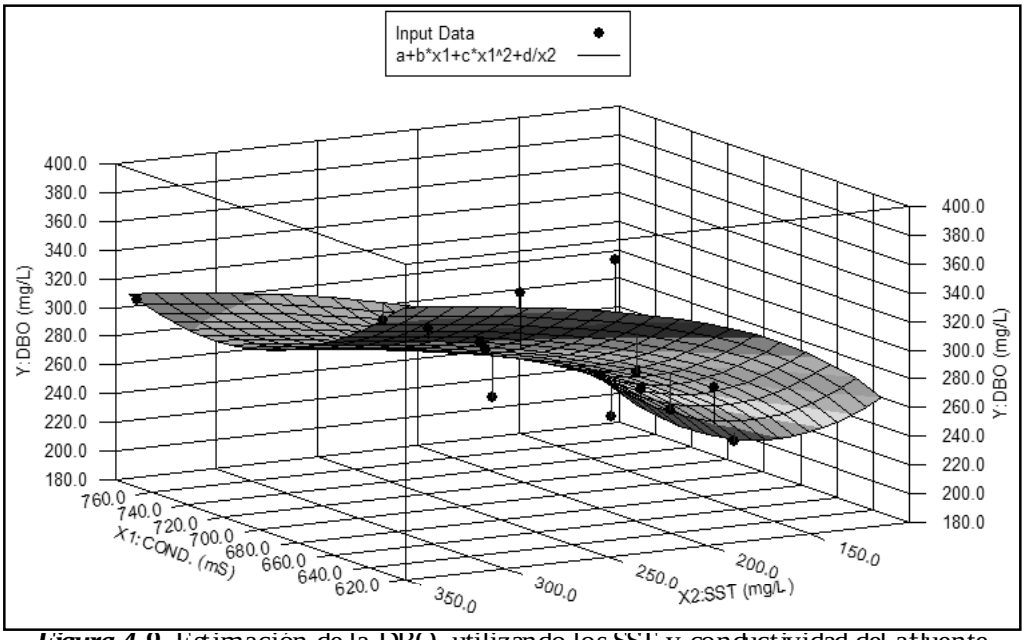


Figura 4.9 Estimación de la DBO_5 utilizando los SST y conductividad del afluente de la Planta Piloto TPQA.

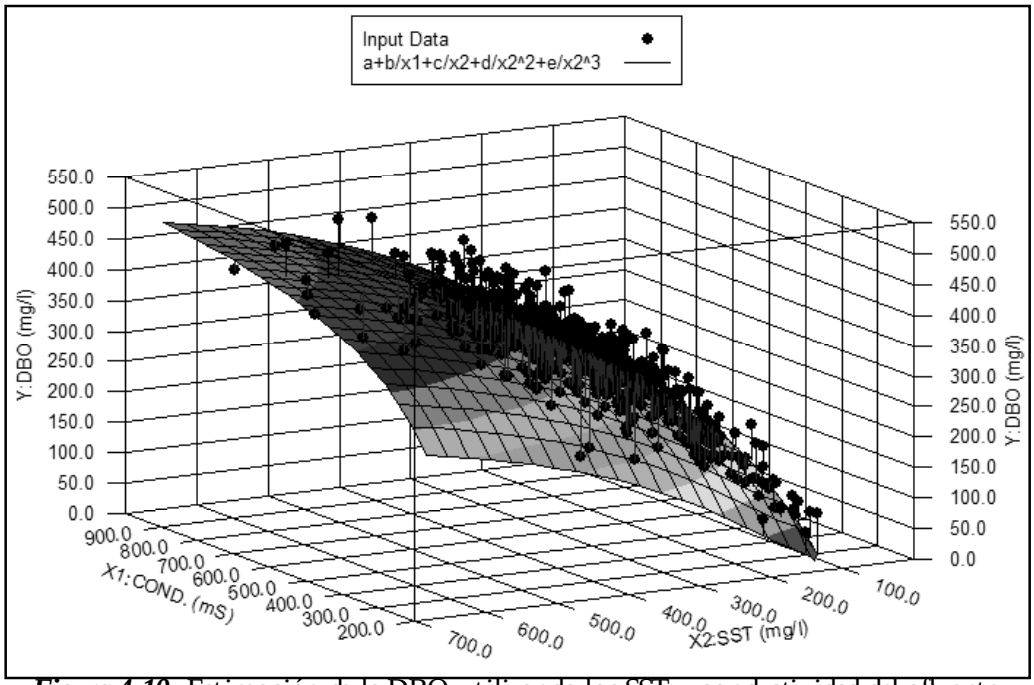


Figura 4.10 Estimación de la DBO_5 utilizando los SST y conductividad del afluente de la PTAR El Salitre.

Como lo ilustra la ***Figuras 4.9*** esta estimación para los datos analizados en la planta piloto TPQA es satisfactoria con un coeficiente de correlación de 0.798 utilizando un modelo de baja complejidad y de 0.969 con un polinomial. Con el fin de confirmar este comportamiento se correlacionaron los datos históricos de la PTAR El Salitre y se encontró la misma conducta. En la ***Figura 4.10*** se puede observar la dependencia

de la DBO_5 en estos dos parámetros. Para un polinomio de décimo grado el coeficiente de correlación para la estimación de la DBO_5 utilizando los SST y la conductividad es de 0.809, sin la conductividad es de 0.717.

3. El pH, el caudal, la DQO, la DBO_5, la temperatura, la conductividad y el potencial rédox no tienen ninguna incidencia claramente identificable en la determinación de los SST, pero sí en la remoción de los mismos.

Como ejemplo de este comportamiento se ilustran los resultados obtenidos en las correlaciones del potencial rédox, la conductividad, la DQO y el caudal a lo largo del estudio.

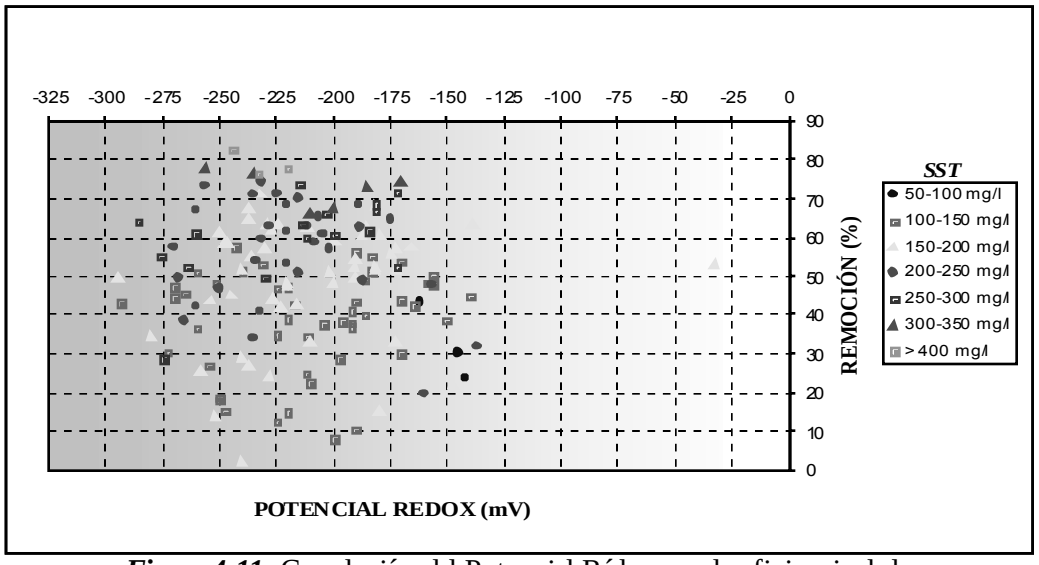


Figura 4.11 Correlación del Potencial Rédox con la eficiencia de la Planta Piloto TPQA.

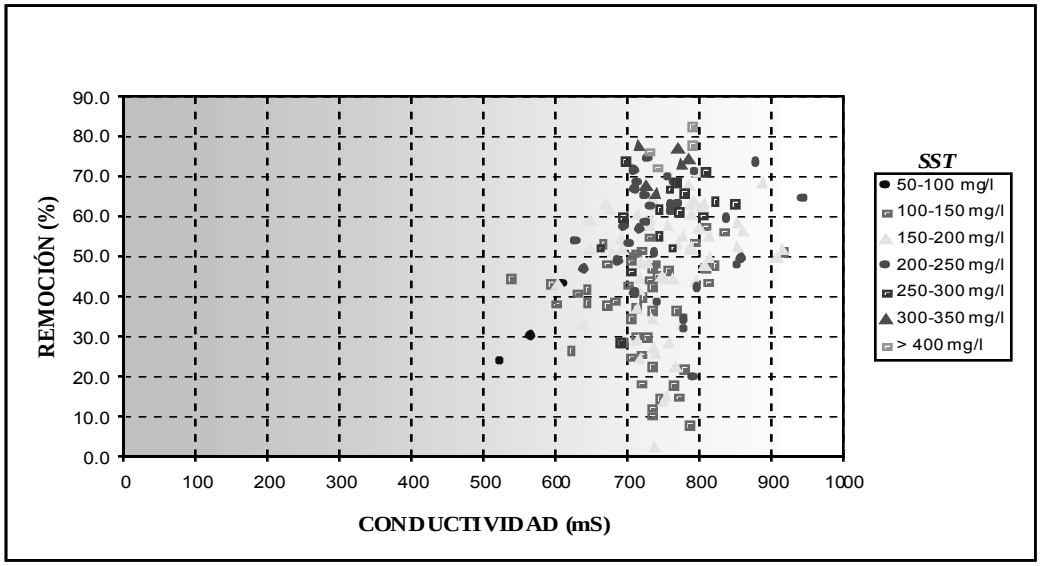


Figura 4.12 Correlación de la Conductividad con la eficiencia de la Planta Piloto TPQA.

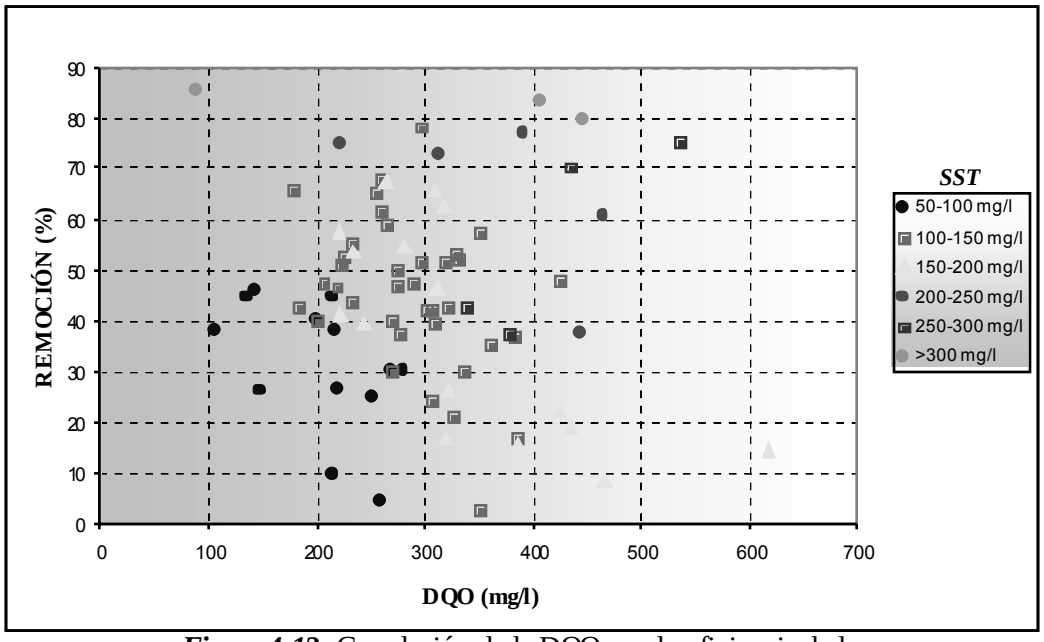


Figura 4.13 Correlación de la DQO con la eficiencia de la Planta Piloto TPQA.

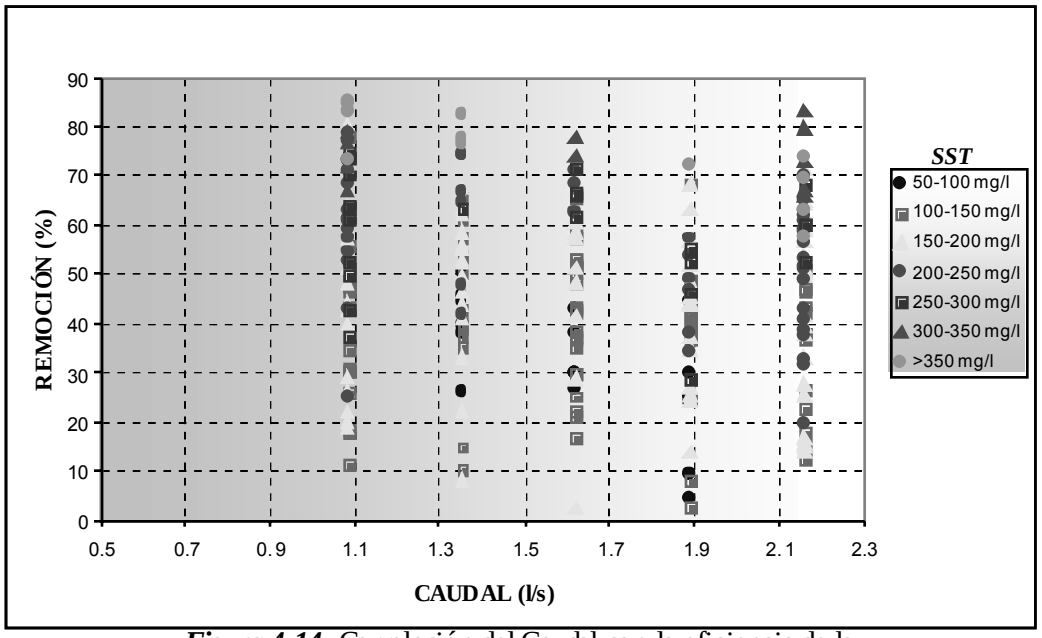


Figura 4.14 Correlación del Caudal con la eficiencia de la Planta Piloto TPQA.

Para los diferentes escenarios analizados en los ensayos se encontró que el caudal no incide de manera alguna en el desempeño de la planta TPQA debido a que la dosis de cloruro férrico fue modificada automáticamente, acorde con el caudal de ingreso. Este hecho, el cual no sucede en una planta de tratamiento a escala real, puede diezmar el efecto que tiene el caudal afluente. Un exceso o disminución en los tiempos de retención de los floculadores puede fracturar el floc o evitar su adecuada conformación, respectivamente, reduciendo la eficiencia del sistema. Este efecto pasa

desapercibido en la remoción de SST, para cualquier caudal y concentración de sólidos suspendidos (***Figura 4.14***).

4. Los SST y la turbiedad parecen ser los únicos parámetros que afectan están relacionadas directamente con la eficiencia de la planta piloto bajo las condiciones específicas de operación del sistema.

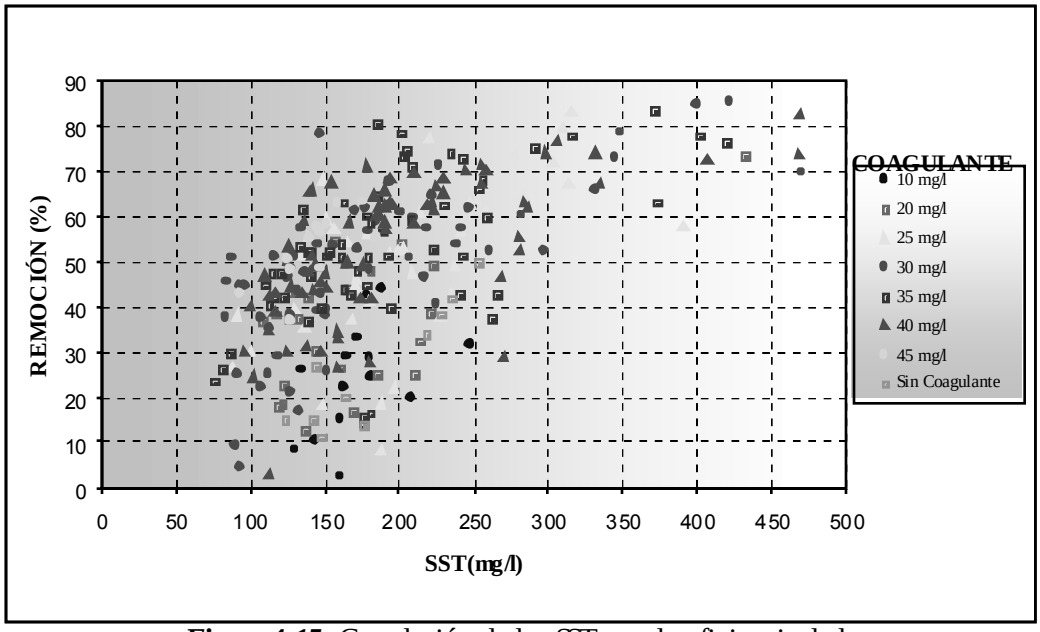


Figura 4.15 Correlación de los SST con la eficiencia de la Planta Piloto TPQA.

Como se aprecia en la ***Figura 4.15***, las dosificaciones inferiores a 25 mg/l no son capaces de desestabilizar el material coloidal para su posterior aglomeración mediante el uso de polímero. Estas dosificaciones alcanzan remociones del 50% de SST en el mejor de los casos, con una carga de sólidos suspendidos de 250 mg/l, y prácticamente remociones nulas con un afluente de SST entre 100 mg/l y 150 mg/l, en el peor de los escenarios. Claramente se observa una tendencia logarítmica, la cual al aumentar la concentración de SST en el afluente y a la vez en la dosificación (hasta 45 mg/l) se obtiene una mejor eficiencia en una planta TPQA.

Estudiando aún más el comportamiento de ésta variable se encontró el siguiente modelo estadístico para los muestreos realizados en la planta piloto.

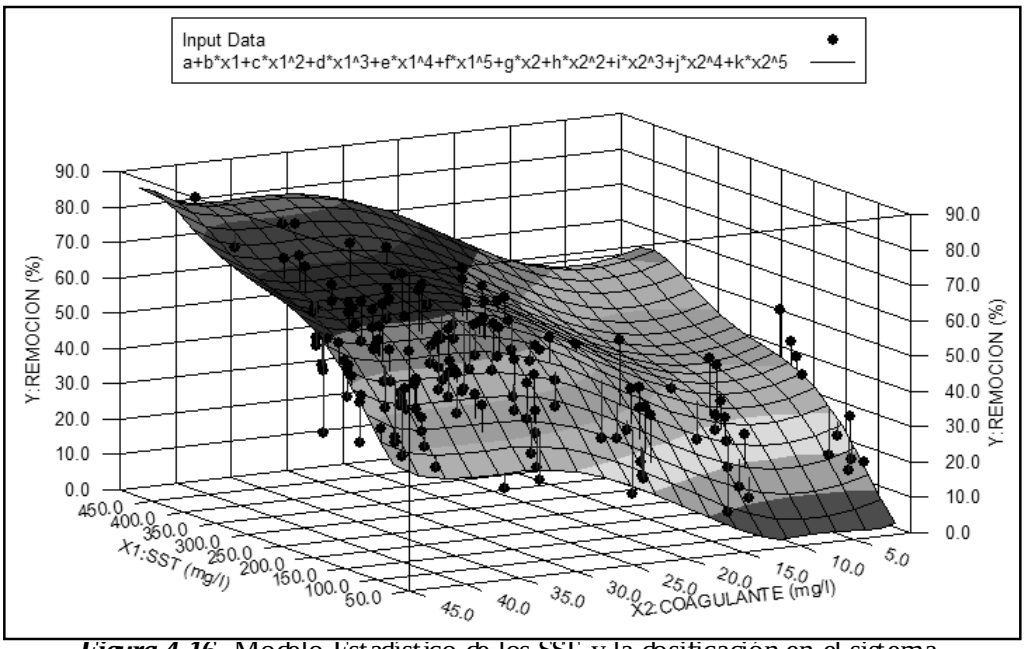


Figura 4.16 Modelo Estadistico de los SST y la dosificación en el sistema.

El modelo estadístico presenta un R^2 de 0.68 e ilustra la dispersión de los resultados esperados con dos variables (SST y dosificación de coagulante). Rotundamente se manifiesta la importancia de los SST en el comportamiento del sistema estudiado y se escoge éste como un parámetro de medición en línea del modelo de dosificación.

5. El nivel del canal introduce un ruido aparente en el comportamiento del proceso, el cual se debería confirmar en el desarrollo del modelo.

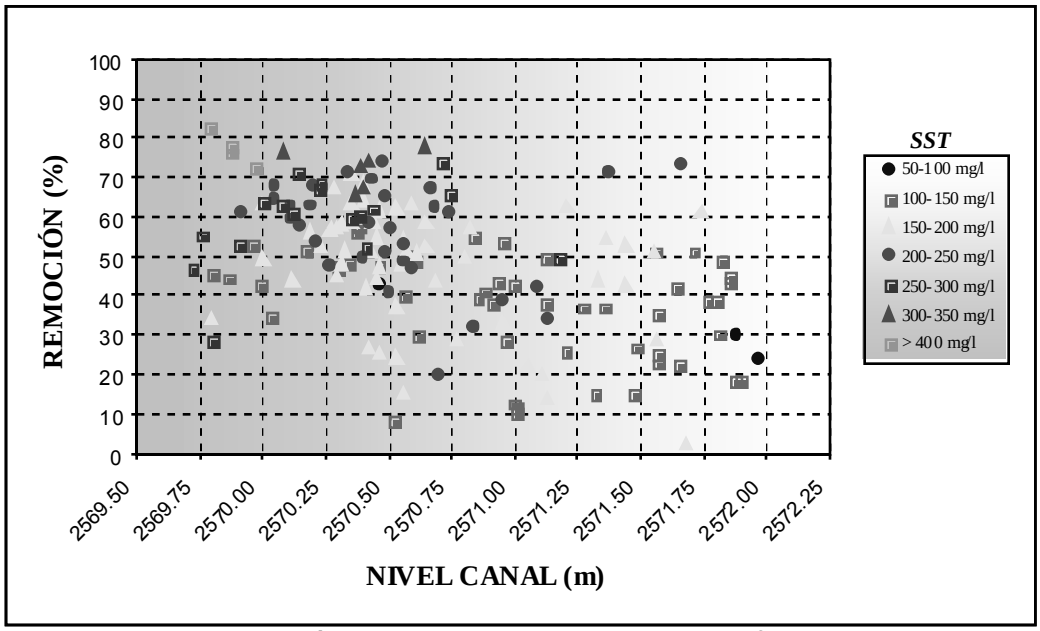


Figura 4.17 Relación del nivel del canal y los SST en la eficiencia sistema.

Examinando la incidencia del nivel del canal en la eficiencia de la planta piloto se halló una tenue relación de esta variable en la conducta que puede tener este tipo de sistemas, ya que el nivel del canal puede estar asociado a la hidrólisis que se presenta en el canal y a la disminución de la fracción de los sólidos sedimentables en el agua residual.

Como se puede observar en la ***Figura 4.17***, el nivel del canal de cierta manera incide en el desempeño de la planta piloto. De acuerdo con un nivel bajo en el canal (cotas 2569.75 m – 2570.50m) y una concentración de 150 mg/l de SST en adelante se pueden esperar remociones de SST del orden del 50% al 80%. Mientras que para niveles altos del canal (cotas 2751.0 en adelante) con concentraciones particulares menores 200 mg/l de SST para estos casos, la remoción de la planta de tratamiento escasamente alcanzará el 60% de SST. La importancia en la medición de este parámetro para la simulación de la planta piloto debe de ser verificada, con el fin de determinar su inclusión en el modelo de dosificación.

5. DESARROLLO DEL MODELO DE DOSIFICACIÓN

5.1 Selección de la Arquitectura del Modelo

Habiendo identificado los parámetros para el desarrollo del modelo de dosificación, los sólidos suspendidos totales del afluente, la dosis de coagulante y el nivel del canal de aproximación a la planta de tratamiento, se procedió a seleccionar la arquitectura del modelo basándose en las características de los datos analizados (Hiirsakmi et. al., 2000).

De acuerdo con la complejidad del problema, la aleatoriedad y dispersión que presentaron los datos estudiados para la planta piloto, se decidió desarrollar un modelo utilizando las técnicas de Lógica Difusa y Redes Neuronales. Entre las ventajas de la Lógica Difusa se encuentra la estructura para resolver problemas en presencia de la vaguedad y ambigüedad de los conjuntos de datos. Las primacías de las Redes Neuronales radican en la generalización y adaptabilidad, a través del conocimiento de un proceso por medio del aprendizaje, de la misma forma en que funciona el cerebro humano (Mathworks, Matlab 7.0).

Al implementar estas dos técnicas de manera simultánea surge una arquitectura híbrida de inteligencia artificial conocida como ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Esta técnica permite obtener las ventajas de las dos arquitecturas, proveyendo al modelo las características para adaptarse a los escenarios estudiados conforme el transcurrir del tiempo.

5.2 Definición del Modelo de Dosificación

Para la construcción del modelo utilizando la metodología de ANFIS, se utilizó el programa MATLAB de la MathWorks. Este tipo de escenario permite la programación directa del modelo y su ventaja radica en el análisis y simulación de sistemas dinámicos.

Inicialmente, para la definición del modelo de dosificación se propusieron dos modelos. El modelo No. 1 tendría como parámetros de entrada la dosificación de coagulante y los SST. El modelo No. 2 tendría como parámetros de entrada la dosificación de coagulante, los SST y el nivel del canal de aproximación. Esto con el fin de determinar y verificar la importancia del nivel del canal como variable en el modelo, la cual había quedado en duda en el análisis estadístico. Ambos modelos tendrían como parámetro de salida la concentración de los SST en el efluente de la planta piloto.

Seguidamente, se dispuso construir la arquitectura de los modelos basados en la creación de unas reglas y funciones de membresía, que le conferían a cada modelo una estructura diferente utilizando el método de inferencia difusa de Takagi-Sugeno, ***Figuras 5.1 y 5.2***.

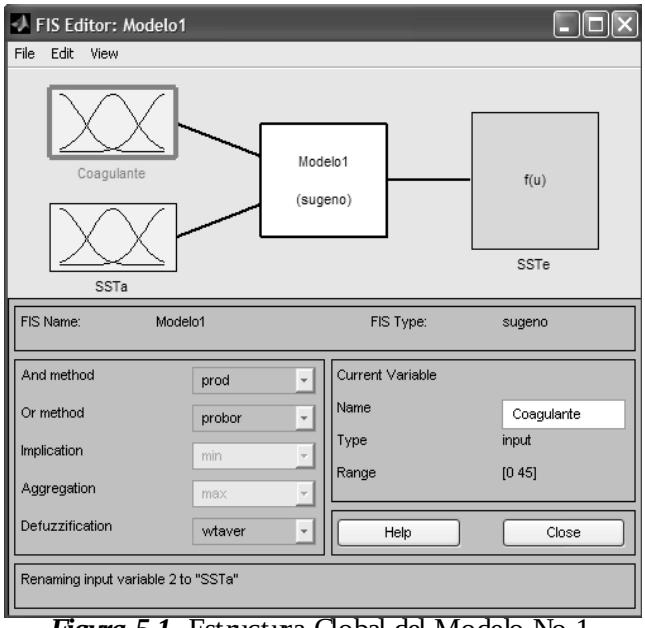


Figura 5.1 Estructura Global del Modelo No.1.

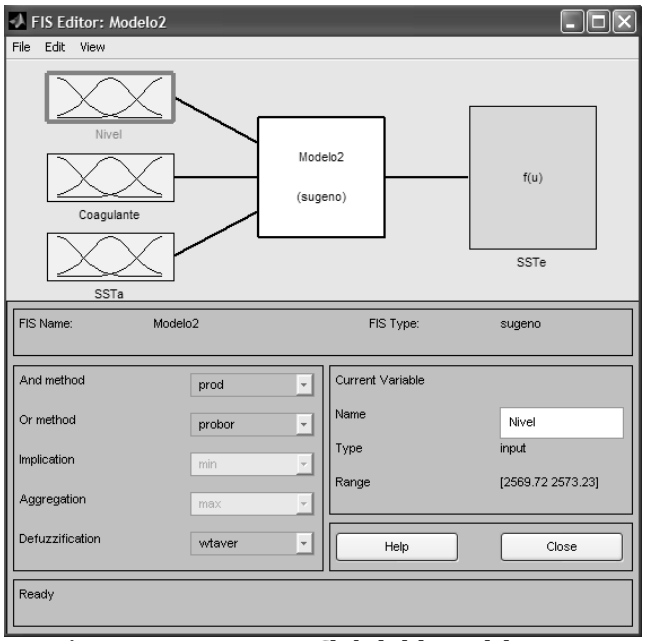


Figura 5.2 Estructura Global del Modelo No.2.

En las ***Figuras 5.3 y 5.4*** se puede apreciar el número de reglas relacionadas para cada modelo (rules) y el número de funciones de membresía asociadas a éstas (input mf). Estas reglas y funciones de membresía se estimaron inicialmente de acuerdo al comportamiento de los datos analizados, y posteriormente se fueron ajustando de acuerdo con el desempeño alcanzado por el modelo durante la etapa de calibración.

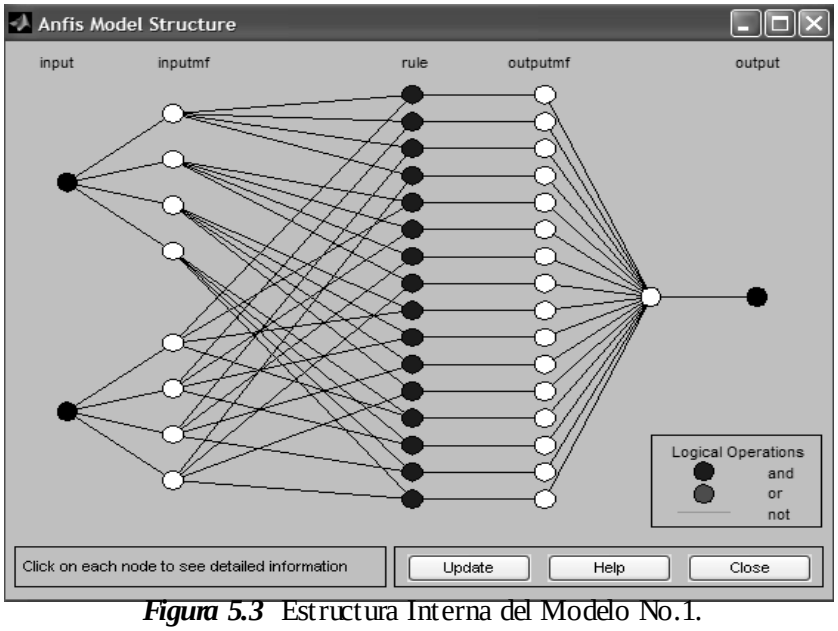


Figura 5.3 Estructura Interna del Modelo No.1.

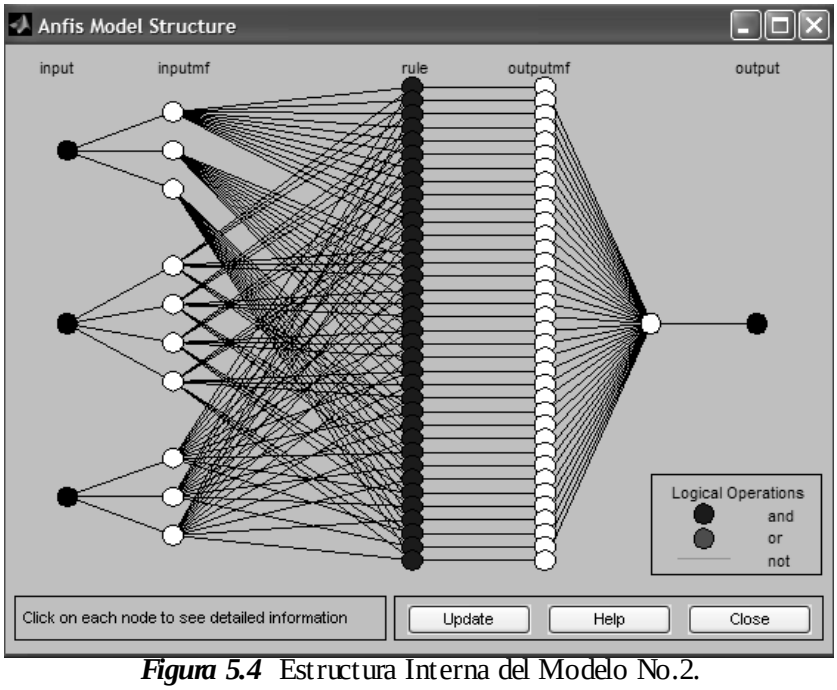


Figura 5.4 Estructura Interna del Modelo No.2.

Para el modelo No.1 se determinaron cuatro funciones de membresía trapezoidal por cada una de los parámetros de entrada. Esta iniciativa conllevó a la formación de 16 reglas que constituyen el funcionamiento de aproximación del modelo (***Figura 5.5***). Debido a que el modelo No.2 tenía un parámetro más, se determinó asociar las funciones de membresía trapezoidal de la siguiente forma: tres para el nivel del canal, cuatro para la dosis de coagulante y tres para la concentración de SST en el afluente. Por ende, en el modelo No. 2 se conformaron 36 reglas que constituyen el funcionamiento de aproximación del modelo (***Figura 5.6***).

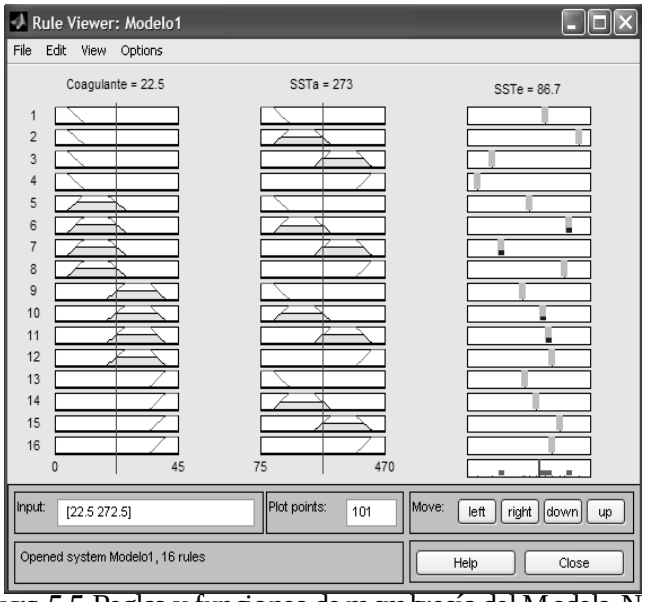


Figura 5.5 Reglas y funciones de membresía del Modelo No.1.

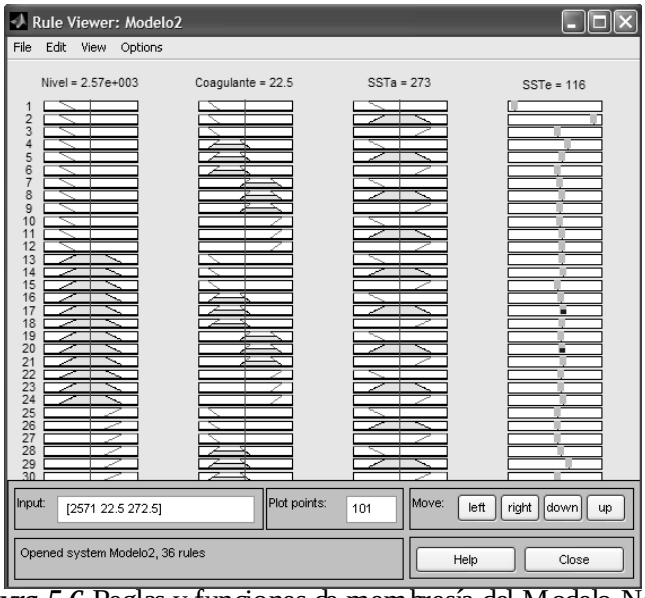


Figura 5.6 Reglas y funciones de membresía del Modelo No.2.

5.3 Calibración del Modelo de Dosificación

Una vez determinadas las estructuras de los dos modelos se realizó la calibración de ambos, a través del ajuste de sus respectivas funciones de membresía. Este procedimiento se realiza automáticamente en Matlab mediante una aplicación iterativa que converge las funciones de membresía (cambian su forma) hasta alcanzar un error mínimo de la raíz media cuadrada (RMSE) constante. Para la calibración se utilizó el 80% de los datos muestreados en las campañas experimentales, 235 pares de muestras de entrada y salida de la planta piloto por cada parámetro. En las ***Figuras 5.7-5.10*** se presentan las superficies envolventes para cada modelo, una vez habiendo

definido las mejores opciones de funciones de membresía que se ajustan a cada caso. Para el modelo No.1 se tiene una superficie y tres para el modelo No.2, por la diferencia de parámetros.

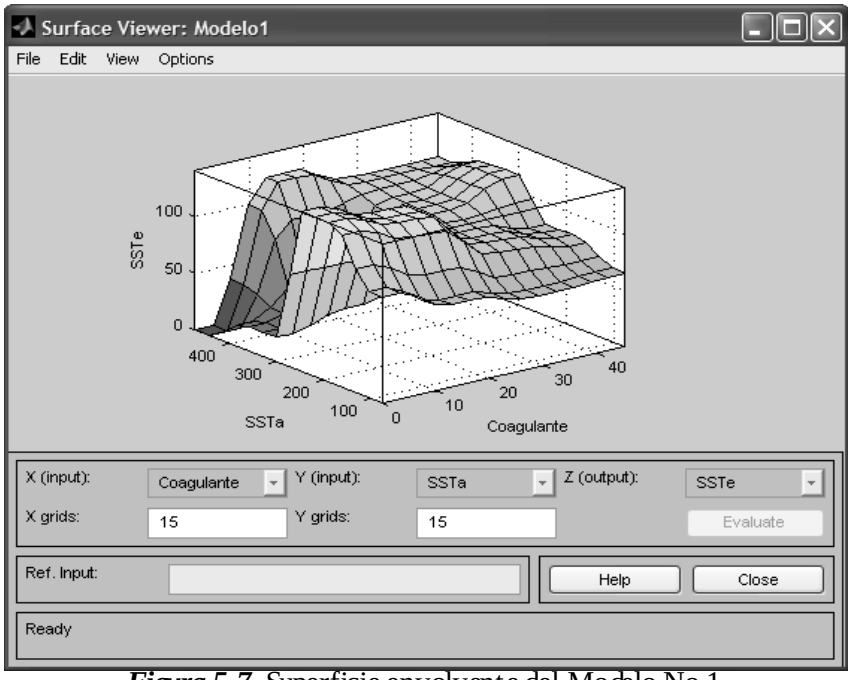


Figura 5.7 Superficie envolvente del Modelo No.1.

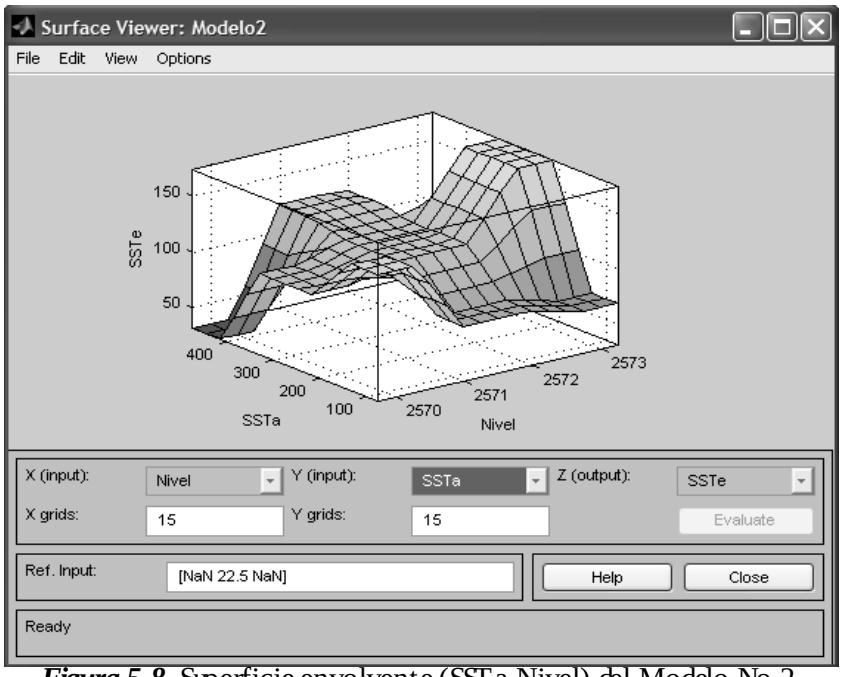


Figura 5.8 Superficie envolvente (SSTa-Nivel) del Modelo No.2.

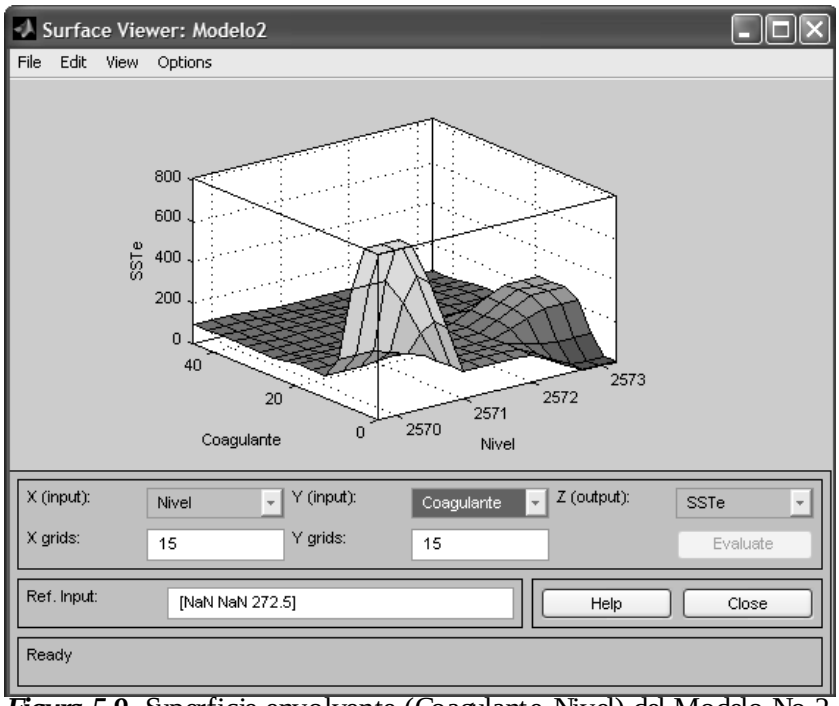


Figura 5.9 Superficie envolvente (Coagulante-Nivel) del Modelo No.2.

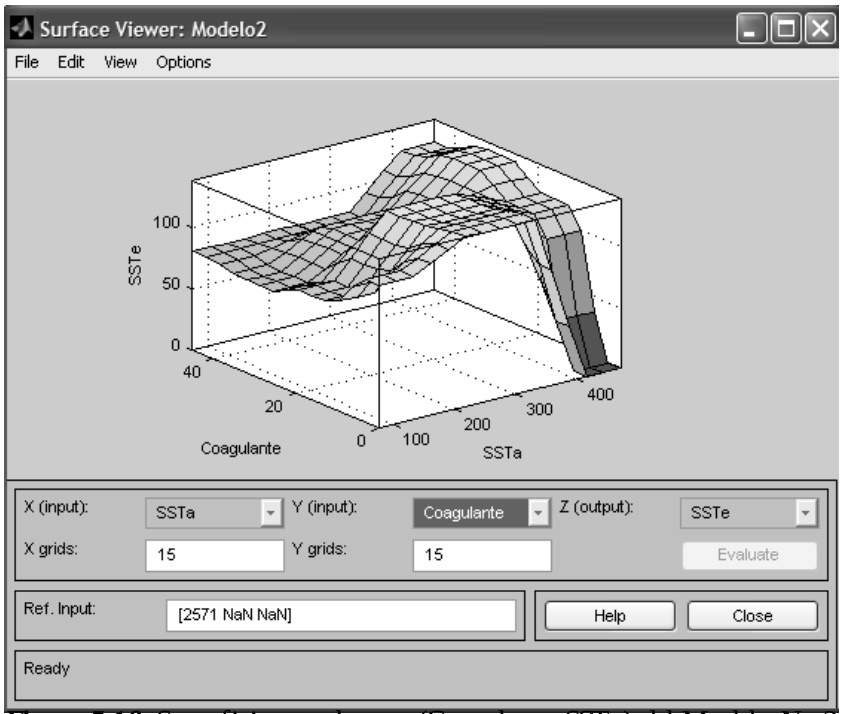


Figura 5.10 Superficie envolvente (Coagulante-SSTa) del Modelo No.2.

Como se puede apreciar de las figuras anteriores, las superficies representan muy bien el comportamiento de la planta piloto TPQA, exceptuando los valores encontrados a concentraciones superiores de 400 mg/l para los SSTa y dosificaciones inferiores a 20 mg/l de cloruro férrico. Este error es muy común en este tipo de modelos y se debe al

bajo número de datos representativos con estas características estudiados en los ensayos.

Definidas las funciones de membresía en ambos modelos se puede obtener el error de la raíz media cuadrada, que equivale a la banda de confianza en la que se pueden encontrar los resultados del modelo durante su uso. Para el modelo No.1 el RMSE de la calibración fue de 21.17 mg/l para la concentración de los SST en el efluente, mientras que para el modelo No.2 fue de 22.02 mg/l.

5.4 Validación del Modelo de Dosificación

Para la validación de los dos modelos propuestos se utilizó el restante 20% de datos obtenidos en las campañas de monitoreo, los cuales equivalen a 53 pares de muestras de entrada y salida de la planta piloto por cada parámetro y se simuló el comportamiento. Los resultados encontrados para ambos modelos se presentan a continuación en las ***Figuras 5.11 y 5.12***.

En el escenario simulado, el modelo No.1 obtuvo un RMSE de 19.96 mg/l en los SST del efluente de la planta piloto, manteniendo el error encontrado en la calibración. El modelo No.2 igualmente conservó la condición descrita con un RMSE de 20.48 mg/l.

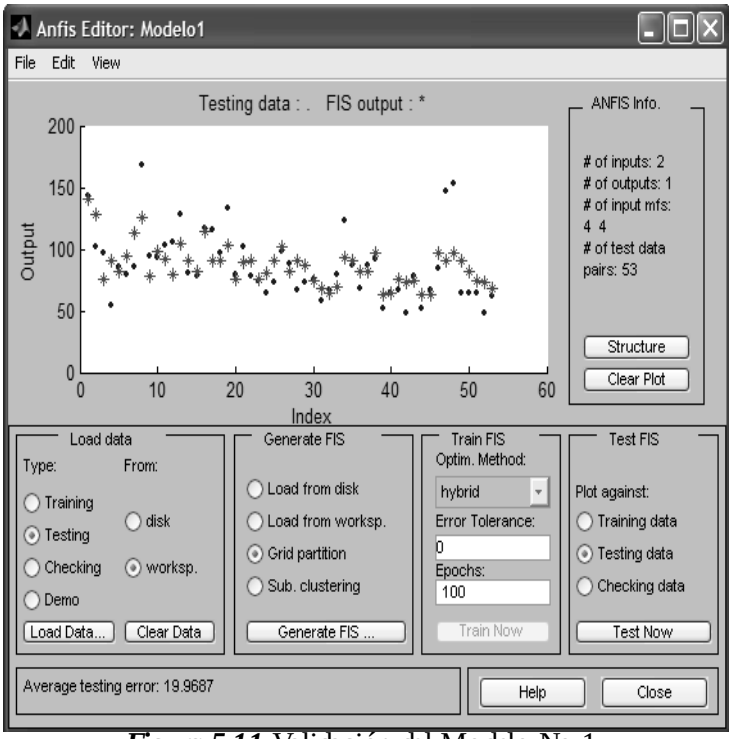


Figura 5.11 Validación del Modelo No.1.

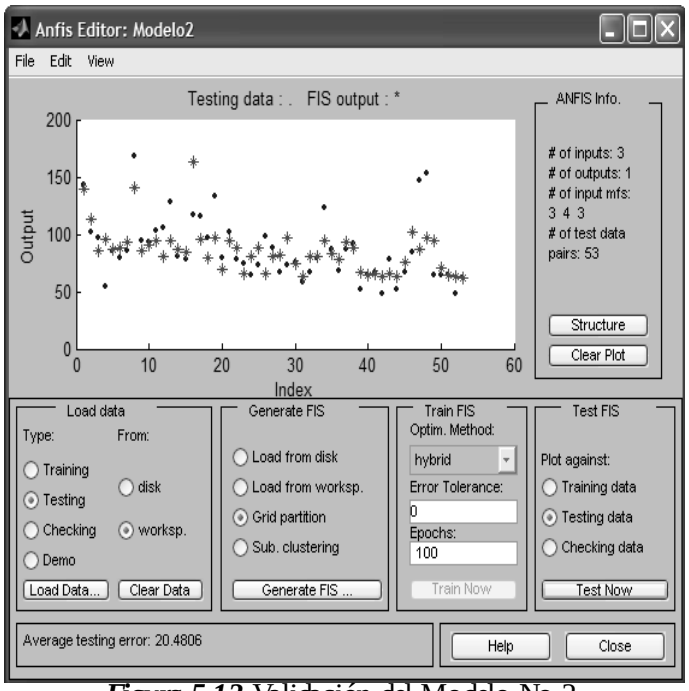


Figura 5.12 Validación del Modelo No.2.

La magnitud de este error se encuentra asociada a los posibles errores efectuados en la toma de muestras y en los ensayos de laboratorio realizados para cada parámetro. Un estudio para la determinación del error en la predicción de los SST, en las muestras de la PTAR El Salitre, se llevó acabo utilizando muestras patrones y se determinó que el error asociado a una medida de este parámetro en el laboratorio se encuentra en el orden de 10 mg/l.

Se cree que este error puede ser disminuido mediante la utilización de sondas para la medición en línea de los SST en la planta piloto (Schutze et. al., 2001), las cuales permitan relacionar un menor error en la medición y robustecer con un mayor número de datos la alimentación y calibración de los modelos. Sin embargo, un error de esta magnitud afecta muy poco el valor de dosificación de coagulante necesario para mantener un sistema eficiente (0.5-1 mg/l de cloruro férrico). Con un mayor número de datos adquiridos a través del funcionamiento, el modelo de dosificación podrá adaptarse a los escenarios propiciados en la operación convencional de una planta de tratamiento químicamente asistida.

Finalmente, se puede ultimar que el parámetro del nivel del canal de aproximación de la PTAR El Salitre no incide significativamente en el desempeño de la planta piloto, debido a que los resultados del modelo No.1 y No. 2, prácticamente no difieren en cuanto a su magnitud de error. El modelo de dosificación de una planta piloto TPQA depende primordialmente de la concentración de los SST en su afluente y la dosificación de coagulante utilizado.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha desarrollado un modelo a nivel de simulación que describe el comportamiento de una planta de tratamiento químicamente asistida bajo las condiciones de operación estudiadas a lo lardo de la investigación. Este modelo permite conocer la eficiencia de una planta de tratamiento de este tipo basándose en la concentración de SST en el afluente y la dosificación de cloruro férrico ha ser utilizada como coagulante.

6.1 Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones del proyecto de investigación:

- El modelo desarrollado permite identificar los parámetros más importantes para el montaje de automatización de la dosificación de cloruro férrico en la PTAR El Salitre. También, puede ser utilizado como una herramienta en la toma de decisiones para el diseño de plantas de tratamiento primario químicamente asistidas, en casos donde se necesite modelar el comportamiento futuro del efluente de la planta de tratamiento a ser construida.

- Los únicos parámetros que tuvieron una relación directa en el comportamiento de la planta piloto TPQA, bajo las condiciones de los ensayos propuestos y operación descrita en el estudio, fueron los sólidos suspendidos totales en el afluente y la dosificación de coagulante. El pH, el nivel del canal, la conductividad, el potencial rédox, la temperatura, la DBO_5 y la DQO no tuvieron una relación directa con este parámetro.

- La arquitectura híbrida de inteligencia artificial conocida como ANFIS permite la verificación de los parámetros identificados, después de un análisis estadístico. El desarrollo de este tipo de modelos permite describir el comportamiento de sistemas complejos, cuya peculiaridad radica en parámetros difusos y aleatorios.

- El error de la raíz media cuadrada del modelo de dosificación (19.96 mg/l) puede ser minimizado, mediante la recolección de datos adicionales para la calibración del modelo y el uso de sondas de SST que describan de una manera más precisa el comportamiento de la planta piloto en tiempo real.

6.2 Recomendaciones

Es importante seguir estudiando el comportamiento de este tipo de planta de tratamiento, con el fin de establecer las bases óptimas de su operabilidad. El tiempo de retención hidráulico y la dosificación de polímero deben incorporarse como variables experimentales para las próximas investigaciones, dado que su incidencia en el proceso no se encuentra establecida.

Por último es recomendable incorporar el uso de sondas de SST, tanto en el afluente como el efluente de la planta piloto. Estos aditamentos permitirán aumentar el número de datos aforados y a la vez, investigar las variaciones en la concentración que puede llegar a presentar el afluente del sistema durante un período prolongado.

7. BIBLIO GRAFÍA

1. Hernández Castillo, María Elvira 2003. Directrices para la operación de la estación elevadora y el canal de aducción de la planta de tratamiento de aguas residuales de "El Salitre" en función de la calidad afluente, Universidad de los Andes.

2. Hiirsakmi M. et al. 2000. Discovery of Fuzzy Models from observation data. FUME Project. VTT Information Technology. *Research Report TTE 1-2000-43*.

3. Leentvaar J. et. al. 1979. Optimalization of coagulant dose in coagulation-flocculation of sewage. *Water Research* 13(3):229-236.

4. Manesis S. A. et. al. 1998. Intelligent Control of wastewater treatment plants, *Artificial Intelligence in Engineering;* 12(3):275-281.

5. MathWorks, Matlab 7.0.

6. Oakdale Engineering, DATAFIT 8.1, downloadable web version 2006.

7. Ratnaweera H. et al. 2002 Simulation program for wastewater coagulation. *Water Science Technology* 46(4-5):27-33.

8. Rauch W. et. al. 1998. Requirements for integrated wastewater treatment models-driven by receiving water objectives. *19th IWAQ Biennial Conference, Vancouver, Canada.*

9. Rossini M. et. al. 1999. Optimization of coagulation-flocculation treatment: influence of rapid mix parameters. *Water Research* 33(8):1817-1826.

10. Sandino J. & Steichen Mark. 1999. Tratamiento Primario Químicamente Asistido (TPQA): Alternativa Viable para soluciones Sanitarias en América Latina. *Water Environment Federation.*

11. Schutze M. et al. 2001. Parameter optimization of real-time control strategies for urban wastewater systems. *Water Science Technology* 43(7):139-46.

12. WEF Manual of Practice No. 8 Fourth Edition. 1998. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, Water Environmental Federation.