

DEFINICIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PRÁCTICO BASADO EN CONDUCCIÓN ELÉCTRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLIACRILAMIDA EN PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN PRIMARIA QUÍMICAMENTE ASISTIDA. CASO DE ESTUDIO PTAR EL SALITRE.



**MELISSA DE LOURDES GIRADO GUZMÁN
LAURA VANESSA ORDÓÑEZ OTERO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
CARTAGENA DE INDIAS D. T y C.
2012**

**DEFINICIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PRÁCTICO BASADO EN CONDUCCIÓN
ELÉCTRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLIACRILAMIDA EN
PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN PRIMARIA QUÍMICAMENTE ASISTIDA. CASO DE
ESTUDIO PTAR EL SALITRE.**

**Melissa de Lourdes Girado Guzmán
Laura Vanessa Ordóñez Otero**

Trabajo de grado como requisito para optar al título de
Ingeniera Ambiental

Director
Juan David Pérez Gutiérrez I. A., MSc

**Universidad Tecnológica de Bolívar
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
Cartagena de Indias D. T y C.
2012**

Cartagena de Indias D.T. y C. 17 de Agosto de 2012

Señores

**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Cartagena**

Cordial saludo.

Atentamente nos permitimos presentar a su consideración, el informe final de la tesis titulada: "Definición de un procedimiento práctico basado en conducción eléctrica para la estimación de la concentración de poliacrilamida en procesos de sedimentación primaria químicamente asistida. Caso de Estudio PTAR El Salitre", como requisito reglamentario para optar el título de Ingeniera Ambiental.

Atentamente,


MELISSA DE LOURDES GIRADO GUZMÁN
Código: T00017632
CC. 1.047.418.909 de Cartagena


LAURA VANESSA ORDÓÑEZ OTERO
Código: T00017629
CC. 1.047.416.069 de Cartagena

Cartagena de Indias D.T. y C. 17 de Agosto de 2012

Señores
COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Cartagena

Cordial saludo.

Me permito comunicarles que he seguido paso a paso la temática del Informe final de la tesis titulada **“Definición de un procedimiento práctico basado en conducción eléctrica para la estimación de la concentración de poliacrilamida en procesos de sedimentación primaria químicamente asistida. Caso de Estudio PTAR El Salitre”**, realizada por las estudiantes **MELISSA DE LOURDES GIRADO GUZMÁN** y **LAURA VANESSA ORDÓÑEZ OTERO**, en el cual me desempeñé cumpliendo la función de Tutor, por lo tanto manifiesto mi participación en la orientación y conformidad con el resultado obtenido.

Atentamente,

JUAN DAVID PÉREZ GUTIÉRREZ
Director





Carta cesión de derechos patrimoniales

Cartagena de Indias, D.T.y C., 17 de Agosto de 2012

Nosotras, **MELISSA DE LOURDES GIRADO GUZMÁN** y **LAURA VANESSA ORDÓÑEZ OTERO**, manifestamos en este documento nuestra voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado “**Definición de un procedimiento práctico basado en conducción eléctrica para la estimación de la concentración de poliacrilamida en procesos de sedimentación primaria químicamente asistida. Caso de Estudio PTAR El Salitre**”, producto de nuestra actividad académica para optar el título de INGENIERO AMBIENTAL de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la ley 23 de 1982. En consecuencia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

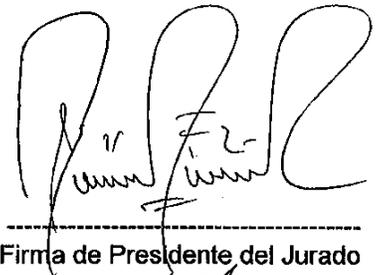

MELISSA DE LOURDES GIRADO GUZMÁN
CC. 1.047.418.909 de Cartagena


LAURA VANESSA ORDÓÑEZ OTERO
CC. 1.047.416.069 de Cartagena

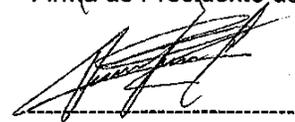
ARTICULO 23

“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en los trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral, y porque las tesis no contengan ataques personales contra nadie, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y justicia”

Nota de aceptación



Firma de Presidente del Jurado



Firma del Jurado



Firma del Jurado

14-9-12

Cartagena de Indias D.T. y C. 17 de Agosto de 2012

Todo se lo debo a las personas que me rodean y que quieren siempre lo mejor para mi, mi gran familia, son mi fuerza y mi lucha. Gracias por todo su amor y por regalarme sin condición el derecho de la educación, ahora es el momento de trabajar y retribuirles todo lo bueno que han hecho en mi vida.

Melissa Girado.

Dedico este logro a quienes me han estado apoyando en cada etapa de mi vida para cumplir mis metas: Dios, mis padres y mis hermanos. Quiero expresarles mi gratitud por la ayuda y confianza que me han brindado de manera desinteresada e incondicional. Los frutos de todo nuestro esfuerzo ya poco a poco se van viendo.

Laura Ordóñez.

AGRADECIMIENTOS

Durante la realización de este trabajo de grado han sido muchas las personas e instituciones que han participado, de una u otra manera, y que han aportado su granito de arena para hacer posible el cumplimiento de esta meta; por lo tanto los autores quieren expresar su gratitud por el apoyo y la confianza:

A Dios quien nos iluminó el camino en la escogencia de la carrera de la cual estamos a las puertas de graduarnos y que nos hará ser una profesional de la Ingeniería Ambiental al servicio de la sociedad, de nuestra familia, de nuestro país, del medio ambiente y de la empresa donde Dios nos tenga destinada para laborar.

A nuestros padres, hermanos y familiares, todo esto nunca hubiera sido posible sin su amparo incondicional.

A la facultad de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Bolívar, y más exactamente al Programa de Ingeniería Ambiental, Director de Programa, docentes y todo el personal por su acogida y el apoyo recibido durante los inolvidables y fructíferos períodos en los que hemos desarrollado nuestra labor investigadora.

Al Director de Tesis, Ingeniero Juan David Pérez, por todo el tiempo que nos ha dado, por sus sugerencias e ideas de las que tanto provecho hemos sacado, por su asesoría, por sus correcciones y sobre todo por haber confiado en el planteamiento de este proyecto y haber apoyado la realización del mismo.

Al personal de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP) y la empresa Aguas de Bogotá (EAB-ESP), quienes nos permitieron desarrollar nuestra tesis en la planta que está bajo su administración y quienes desinteresadamente nos orientaron, colaboraron y apoyaron en la realización de las pruebas, en especial al Ing. Carlos A. Acero, Gerente Corporativo del Sistema Maestro; Ing. Jeniffer Mahecha, Directora de la PTAR El Salitre; Ing. Rubén Latorre, Jefe de Tratamiento de la PTAR El Salitre; Qco. Eduardo López, Coordinador de Laboratorio de la PTAR El Salitre y, finalmente, a los operarios de la planta, representados por el Tecnólogo Saúl Gil, Jefe de Operaciones.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	20
1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	21
1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	21
1.3. HIPÓTESIS	21
1.4. OBJETIVOS	21
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	21
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	21
1.5. METODOLOGÍA	21
1.5.1. <i>Caracterización de la solución de polímero preparado en planta</i>	23
1.5.2. <i>Preparación de soluciones</i>	24
1.5.3. <i>Medición de variables de control</i>	25
1.5.4. <i>Análisis de correlaciones</i>	25
1.5.5. <i>Evaluación analítica de la metodología</i>	25
2. MARCO TEÓRICO	26
2.1. INTRODUCCIÓN	26
2.2. TRATAMIENTO PRIMARIO QUÍMICAMENTE ASISTIDO	26
2.2.1. <i>Reseña Histórica</i>	27
2.2.2. <i>Aplicaciones</i>	30
2.2.3. <i>Teoría de la Clarificación, Coagulación, Floculación y Sedimentación</i>	32
2.3. USO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA	32
2.3.1. <i>Poliacrilamida</i>	32
2.4. PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA MEDIDOS	34
2.4.1. <i>Conductividad</i>	34
2.4.2. <i>pH</i>	36
2.4.3. <i>Temperatura</i>	36
2.5. GENERALIDADES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) EL SALITRE	37
2.5.1. <i>Caudal Captado</i>	38
2.5.2. <i>Dosificación de productos químicos</i>	39

2.5.3.	<i>Pretratamiento</i>	40
2.5.3.1.	Especificaciones del Kit de preparación del polímero empleado en el Pretratamiento	41
2.5.3.2.	Preparación actual de la solución de polímero en el Pretratamiento	43
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	45
3.1.	ENSAYOS EXPERIMENTALES	45
3.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
3.3.	EVALUACIÓN ANALÍTICA DE LA METODOLOGÍA	66
4.	PROPUESTA METODOLÓGICA	78
4.1.	MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA SOLUCIÓN PREPARADA EN PLANTA	78
4.2.	CORRELACIÓN DEL PARÁMETRO DE LA CONDUCTIVIDAD	79
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
5.1	CONCLUSIONES GENERALES	80
5.2	RECOMENDACIONES	81
6.	REFERENCIAS	83

ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 1-1. Variables de Control	22
Tabla 2-1. Especificaciones de los dos agitadores del kit de preparación de polímero	43
Tabla 3-1. Descripción de las actividades	45
Tabla 3-2. Matriz completa de mediciones. Ensayo experimental	47
Tabla 3-3. Caracterización de la solución de polímero preparada en planta	52
Tabla 3-4. Promedio total de los valores de pH para los valores de concentración, correspondiente a las 3 primeras corridas	53
Tabla 3-5. Promedio total de los valores de temperatura para los valores de concentración, correspondiente a las 3 primeras corridas	55
Tabla 3-6. Promedio total de los valores de conductividad para cada valor de concentración, correspondiente a las 17 corridas realizadas	57
Tabla 3-7. Coeficientes de correlación de las 17 corridas	66
Tabla 3-8. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9999	67
Tabla 3-9. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9638	68
Tabla 3-10. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9582	68
Tabla 3-11. Validación de la concentración real a partir del	69

coeficiente de 0.9573

Tabla 3-12.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9540	69
Tabla 3-13.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9535	70
Tabla 3-14.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9521	70
Tabla 3-15.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9514	71
Tabla 3-16.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9463	71
Tabla 3-17.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9457	72
Tabla 3-18.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9457	72
Tabla 3-19.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9456	73
Tabla 3-20.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9446	73
Tabla 3-21.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9433	74
Tabla 3-22.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9431	74
Tabla 3-23.	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9361	75
Tabla 3-24	Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9351	75
Tabla 3-25.	Promedio de conductividades para cada concentración (corridas con mayor correlación)	76

Tabla 3-26. Validación de la concentración en la solución de polímero preparada en planta (5 días)

77

.

ÍNDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1-1. Marco de preparación de las soluciones de polímero a nivel de laboratorio	23
Figura 2-1. Estructura de la Acrilamida	32
Figura 2-2. Plano general PTAR EL SALITRE	37
Figura 2-3. Procesos de la PTAR EL SALITRE	38
Figura 2-4. Captación y elevación del agua en la PTAR	39
Figura 2-5. Dosificación Cloruro Férrico	40
Figura 2-6. Desarenado y desengrasado	41
Figura 2-7. Tanque de preparación de polímero	42
Figura 2-8. Diagrama del proceso de preparación de la solución de polímero en planta	44
Figura 3-1. Preparación soluciones requeridas con equipo de jarras ₂	45
Figura 3-2. Balanzas analíticas para medición de concentraciones requeridas	46
Figura 3-3. Medición de pH	46
Figura 3-4. Conductímetro para la medición de la temperatura y conductividad	47
Figura 3-5. Concentración y pH. Corrida 1	53
Figura 3-6. Concentración y pH. Corrida 2	54
Figura 3-7. Concentración y pH. Corrida 3	54

Figura 3-8.	Concentración y temperatura. Corrida 1	55
Figura 3-9.	Concentración y temperatura. Corrida 2	56
Figura 3-10.	Concentración y temperatura. Corrida 3	56
Figura 3-11.	Concentración y conductividad. Corrida 1	58
Figura 3-12.	Concentración y conductividad. Corrida 2	58
Figura 3-13.	Concentración y conductividad. Corrida 3	59
Figura 3-14.	Concentración y conductividad. Corrida 4	59
Figura 3-15.	Concentración y conductividad. Corrida 5	60
Figura 3-16.	Concentración y conductividad. Corrida 6	60
Figura 3-17.	Concentración y conductividad. Corrida 7	61
Figura 3-18.	Concentración y conductividad. Corrida 8	61
Figura 3-19.	Concentración y conductividad. Corrida 9	62
Figura 3-20.	Concentración y conductividad. Corrida 10	62
Figura 3-21.	Concentración y conductividad. Corrida 11	63
Figura 3-22.	Concentración y conductividad. Corrida 12	63
Figura 3-23.	Concentración y conductividad. Corrida 13	64
Figura 3-24.	Concentración y conductividad. Corrida 14	64
Figura 3-25.	Concentración y conductividad. Corrida 15	65
Figura 3-26.	Concentración y conductividad. Corrida 16	65
Figura 3-27.	Concentración y conductividad. Corrida 17	66

Figura 3-28.	Correlación de Concentración y Conductividad del polímero utilizado en planta, Superfloc 8566®	77
Figura 4-1.	Propuesta Metodológica para la estimación de la concentración real manejada en planta	78

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1-1. Ficha de Seguridad del polímero Superfloc 8566 [®]	64
Anexo 1-2. Manuales de equipos utilizados	73
Anexo 1-3. Medición de los blancos de las soluciones preparadas	85
Anexo 2-1. Teoría de la Clarificación, Coagulación, Floculación y Sedimentación	85
Anexo 2-2. Referencias tanque de preparación de polímero en planta	95
Anexo 3-1. Consigna de explotación, sala de control PTAR	108
Anexo 3-2. Gráficas de las corridas restantes de pH y temperatura (4-17)	120
Anexo 3-3. Promedio total de los valores de pH para cada valor de concentración, correspondientes a las corridas 4-17, junto a la gráfica definitiva	134
Anexo 3-4. Promedio total de los valores de temperatura para cada valor de concentración, correspondientes a las corridas 4-17, junto a la gráfica definitiva	136

1. INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que es necesario tratar el agua para utilizarla en diferentes propósitos, por ejemplo, consumo humano, procesos industriales, recreación, estético, entre otros. Sin embargo, estos usos pueden verse comprometidos si el recurso se contamina, lo cual sin duda causa la pérdida de su valor económico y estético, convirtiéndose en una amenaza para la salud humana, la vida acuática – terrestre, y demás especies que dependen de ésta.

Para abastecer de agua a las comunidades urbanas en el último siglo, se ha tratado ésta mediante procesos físicos y químicos. En contraste, cuando se descarga como agua residual su tratamiento sugiere procesos biológicos. No obstante, sin importar cuál sea la razón del uso del recurso la necesidad de purificar y sanear las fuentes hídricas sigue prevaleciendo (Tsukamoto, 2002).

En el contexto particular del tratamiento de las aguas residuales bajo el esquema de Tratamiento Primario Químicamente Asistido, más conocido en nuestro país como TPQA, es necesario el uso de sustancias químicas para mejorar los procesos y operaciones unitarias al interior de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual – PTARs. En el manejo de sustancias químicas es importante utilizar todas las estrategias necesarias para estimar las dosis óptimas requeridas para lograr los efectos deseados en las especies sujetas a tratamiento. Por lo tanto, es indispensable contar con metodologías que permitan rápida y eficientemente estimar y validar las cantidades de químicos requeridos para asistir el tratamiento del agua residual.

El caso de estudio por excelencia en nuestro país de TPQA es la PTAR El Salitre que se encuentra en la ciudad de Bogotá, en donde luego de conocer su funcionamiento actual, y de forma más detallada el proceso de preparación de solución de polímero, se pudo determinar que no existe una técnica rápida y eficiente para estimar y validar la concentración de poliacrilamida en la solución de polímero preparada, objeto del TPQA.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende solucionar dicha dificultad, lo cual traería resultados positivos en cuanto a que se facilita la toma de decisiones por parte de los operarios encargados de controlar la preparación y posterior dosificación de polímero en la planta para que se efectúe los procesos de coagulación y sedimentación.

Así mismo, se conseguirían beneficios y mejoras en el rendimiento del polímero sobre el presupuesto de funcionamiento de la planta, ya que la metodología ayudará a tener control en las concentraciones de solución de poliacrilamida que deban ser preparadas.

Por lo anteriormente expuesto, se propone definir una metodología validada utilizando la medida de la conductividad, involucrando los parámetros de control cinéticos que aportan al proceso, permitiendo así la estimación de la concentración real de solución de polímero preparado en planta, y proporcionando una solución a la dificultad presentada actualmente, al no tener control total sobre esta actividad en particular.

1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se puede afirmar que la PTAR-EL SALITRE, actualmente no cuenta con una metodología rápida y eficiente que permita constatar que la concentración de poliacrilamida en la solución de polímero preparada es acorde a la concentración estimada en la consigna de operaciones de la PTAR, trayendo consigo posibles errores en la preparación de polímero, así como la incorrecta utilización de producto químico ya sea por exceso o por defecto, presentándose en definitiva un uso ineficaz del producto químico. De igual forma, ineficiencia en el proceso de tratamiento, reproceso en la gestión y dificultad en la toma de decisiones por parte del coordinador de laboratorio y jefe de tratamiento de la planta.

1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

La pregunta de investigación que se busca responder con el desarrollo del presente estudio es: ¿Con qué grado de correlación es posible a partir de la conducción eléctrica, estimar la concentración de poliacrilamida empleada en el proceso de Sedimentación Primaria Químicamente Asistida?

1.3. HIPÓTESIS

La hipótesis planteada en esta investigación sugiere la posibilidad de relacionar de forma directa la conductividad, para estimar la concentración de poliacrilamida, con el propósito de validar la concentración teórica de polímero en solución manejada en la PTAR EL SALITRE.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Definir un procedimiento práctico a partir de la conducción eléctrica, que permita estimar la concentración de poliacrilamida en la solución de polímero preparada empleada en procesos de Sedimentación Primaria Químicamente Asistida.

1.4.2. Objetivos específicos

Efectuar pruebas de laboratorio para preparar las soluciones de polímero requeridas.

Realizar mediciones de las variables de control y de lectura rápida con equipos de laboratorio.

Analizar las correlaciones de los datos de las variables de control y las concentraciones de polímero en solución colectados en laboratorio.

1.5. METODOLOGÍA

A fin de estimar y validar los datos determinados de las concentraciones de solución de poliacrilamida reales y los teóricos, se adoptaron tres criterios que fueron determinados a escala de laboratorio. Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de la PTAR

EL SALITRE, durante los días 10 a 22 de mayo de 2012.

Se realizaron en total 17 ensayos, tomando valores de concentración entre 0.75 y 1.5 g/L, con incrementos de 0.25 g/L. Este rango es intencional y corresponde al utilizado en la planta. Para cada uno de los ensayos se midieron las siguientes variables de control, de acuerdo con la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Variables de control

Variable	Unidades
Temperatura	[°C]
Conductividad	[μS/cm]
pH	[Unidades de pH]
RPM	[Unidades de RPM]
Tiempo	[min]
Poliacrilamida (PAM)	[g/L]

En la Figura 1-1 se puede observar de manera general la secuencia de las actividades llevadas a cabo en la metodología para la realización del experimento de este trabajo.

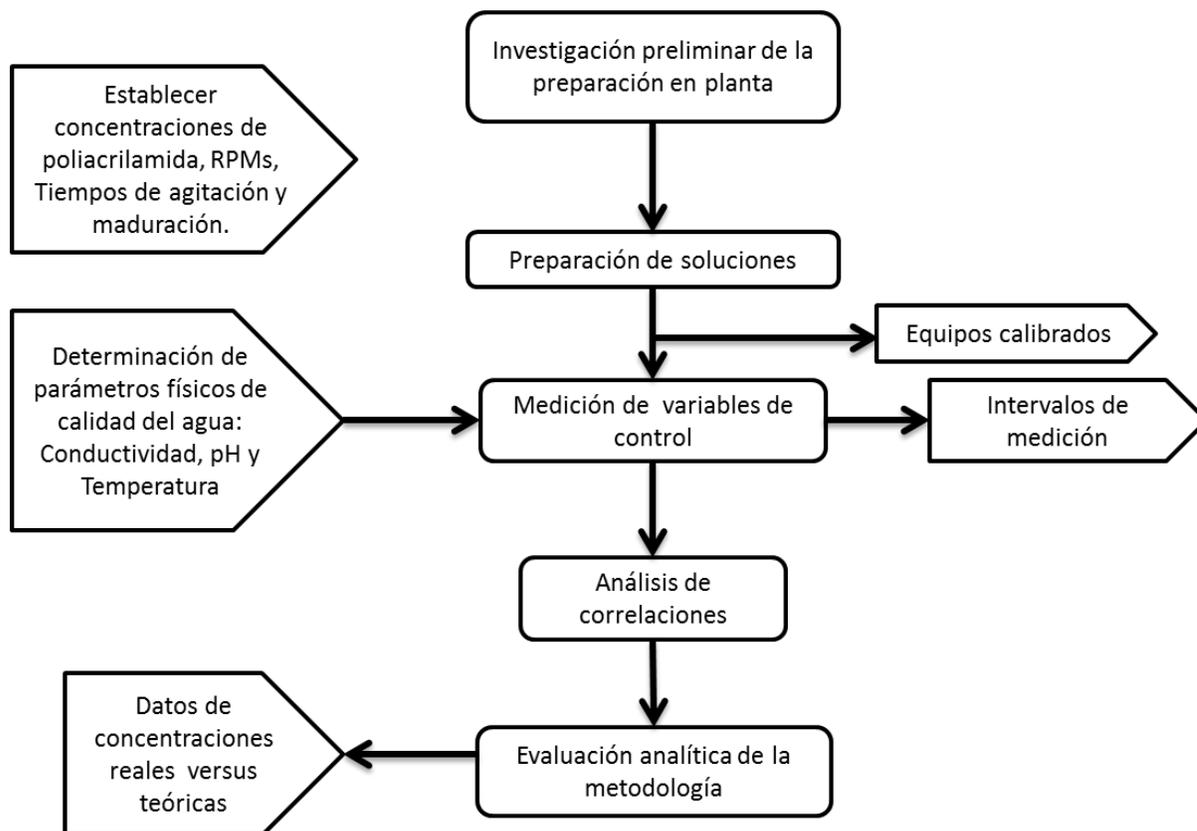


Figura 1-1. Marco de preparación de las soluciones de polímero en laboratorio

1.5.1. Caracterización de la solución de polímero preparado en planta

En este estudio fue usado el mismo producto químico que se utiliza en el proceso llevado a cabo en la planta, este es una Poliacrilamida, (Superfloc 8566, disponible comercialmente), siendo éste suministrado por la empresa fabricante KEMIRA. La estructura molecular detallada de la poliacrilamida no fue revelada, pero las propiedades generales del polímero se pueden apreciar en las especificaciones completas del producto expuestas en la ficha de seguridad. Ver Anexo 1-1.

Se da inicio a la primera etapa experimental con la toma de muestras de la solución de polímero preparado en planta y su posterior caracterización, determinando conductividad, pH y temperatura. Dichos parámetros físicos fueron medidos basados en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2005, Centennial Editio, y se llevaron a cabo durante 5 días consecutivos.

Las especificaciones y referencias de los instrumentos utilizados del laboratorio para medir las variables conductividad, pH y temperatura de cada ensayo y para la preparación de las soluciones fueron: balanza analítica, equipos de jarras, conductímetro, potenciómetros,

probetas y beakers.

Se utilizaron probetas de 25, 100 y 1000 mL, marca Plasti Brand, con errores de ± 0.5 , 1 y 10 mL y beakers con volúmenes aproximados de 50 y 100 mL de igual marca. Para la determinación de la concentración de polímero se utilizó una Balanza Analítica marca Mettler Toledo, AB204-S. Para llevar a cabo la agitación a las diferentes soluciones de polímero preparadas se utilizaron dos tipos de equipos de jarra: Un equipo de jarra₁ (E&Q Equipos, referencia F6-300, serial: 632) y un equipo de jarra₂ (Floculador. Phipps & Bird, Richmond, Virginia 23228, No. de catálogo: 7790-901B, serial: 1097351-23750). Las jarras empleadas con volúmenes aproximados de 1.000 mL, marca Nalgene. Para la determinación de la conductividad, se empleó un Conductímetro marca Mettler Toledo de referencia HQ40d18. HQ Series Portable Meters, Marca: HACH, el cual se verificaba a diario, mediante un patrón estándar de 1.413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un error de $\pm 2\%$. Y por último, para la determinación del pH se usaron dos potenciómetros: pHmetro₁ (pH Schott handylab pH 11), el cual se verificó, utilizando una solución Buffer de 7.00 unidades, y pHmetro₂ (pH Schott 1000063), verificando la calibración mediante soluciones Buffer de 4.00 y 7.00 unidades, ambas con un margen de error de $\pm 0.1\%$ marca Merck.

Cabe apuntar que previamente a la determinación de las mediciones de los parámetros de conductividad, pH y temperatura, se efectuó una revisión de los certificados de calibración de cada equipo a utilizar, verificando *in situ* la calibración de los mismos. En caso tal de haber encontrado una desviación de los valores medidos, se proseguía haciendo la respectiva calibración del equipo, siguiendo el procedimiento descrito o expuesto en los manuales que los rige. Para más detalle en cuanto a la calibración de los equipos empleados consultar Anexo 1-2.

1.5.2. Preparación de soluciones

En primera instancia, se tomaron dos blancos de las mediciones de las variables a determinar del agua de disolución utilizada para la preparación de las soluciones, correspondiente a la medición de los blancos tanto de la solución madre como de la solución requerida, ver Anexos 1-3. Posteriormente, se tomó dicha agua de disolución para efectuar la preparación de una solución madre de 3 g/L, a partir de la cual se hacían una serie de preparaciones de soluciones a diferentes concentraciones de poliacrilamida, fijando de antemano un rango específico de trabajo que oscila entre 0.75 g/L a 1.5 g/L, tomando dosis cada 0.25 g/L, y repitiendo el ensayo de preparación de solución mínimo 10 veces con igual concentración, generando con ello repetitividad y reproducibilidad en las mediciones.

Se utilizaron mezcladores mecánicos con paletas, con el fin de suministrarle energía al proceso (se emplearan el equipo convencional de test de jarras banco-agitador E&Q Equipos, referencia F6-300 y Floculador. Phipps & Bird, con un volumen de 1000mL por cada jarra), para proveer la agitación necesaria a cada una de las soluciones de polímero preparadas. El proceso de mezcla se realizó, aplicando una velocidad fija de agitación inicial de 170 RPM para la solución madre, en un tiempo de 2 h; igualmente se aplicó una velocidad fija de agitación de 170 RPM para cada uno de los ensayos, garantizando una mezcla completa de forma permanente en las soluciones de polielectrolito preparadas. Con la finalidad de que se lograra una mezcla homogénea, se utilizó agua caliente potable de la llave, pues el aspecto

o la forma del polímero (seco) empleado en planta viene en presentación de sólido granular. Luego de la mezcla a una velocidad constante, se prosiguió dejando envejecer o madurar las soluciones preparadas, durante 1 hora aproximadamente, esto se hace con la finalidad de que las cadenas poliméricas se encuentren “abiertas” completamente, facilitando la adsorción por las partículas de turbiedad, favoreciendo esto buenos resultados en los procesos subsecuentes de sedimentación y clarificación del agua.

1.5.3. Medición de variables de control

Seguido a este tiempo de espera, se transfiere a los beakers unas muestras de las soluciones preparadas para que posteriormente les sean determinados mediante análisis de calidad del agua, los parámetros físicos de conductividad, pH y temperatura, a intervalos de tiempo de 0, 1 y 2 horas, las mediciones acordes a lo estipulado en el Standards Methods for the examination of water and wastewater.

1.5.4. Análisis de correlaciones

Se elaboraron las curvas que relacionen las concentraciones medidas y cada uno de los parámetros físicos a analizar (conductividad, pH y temperatura) de forma independiente. Lo anterior, con el fin de analizar el comportamiento a lo largo del tiempo (0h, 1h y 2h) de las variables de control determinadas, así como el grado de correlación entre las mismas.

1.5.5. Evaluación analítica de la metodología

Se compararon los valores medidos de concentración reales vs los valores teóricos plasmados en la consigna de operaciones de la planta, asegurándose de antemano la precisión de los resultados para establecer la confiabilidad de la técnica, esto con el fin de optimizar la preparación de la poliacrilamida, para asistir el proceso de Sedimentación Primaria Químicamente Asistido llevado a cabo en la PTAR EL SALITRE.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se presenta una descripción general de los conceptos del Tratamiento Primario Químicamente Asistido - TPQA, tecnología que se aplica en la ingeniería del tratamiento del agua. Adicionalmente, se describe el uso de las sustancias químicas empleadas en el TPQA haciendo especial énfasis en la poliacrilamida - PAM dado su amplio uso en Colombia.

De igual forma en este capítulo se estudia y describe en detalle las metodologías para la estimación de las dosis óptimas de productos químicos que deben ser adicionadas en un esquema de TPQA y adyacente a esto se revisan las diferentes variables de control del proceso que deben medirse durante el desarrollo y la aplicación de productos químicos en un TPQA. Finalmente, se describen de manera resumida, los procesos y operaciones unitarias que conforman el esquema actual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre – PTAR El salitre, de la ciudad de Bogotá, Colombia.

2.2. TRATAMIENTO PRIMARIO QUÍMICAMENTE ASISTIDO

El Tratamiento Primario de las Aguas Residuales - TPAR es una tecnología para lograr la separación de partículas, debido a que la mayoría de los contaminantes de las AR existen ya sea en forma de partículas, coloidal, o en su defecto, se transforman a este último en el curso del tratamiento (Huang, 1995; Ødegaard, 1998).

Es necesario tratar las aguas residuales con el fin de remover parte de la materia orgánica y de los sólidos suspendidos totales que ésta contiene, de lo contrario, se produce una afectación o impacto tanto en los procesos posteriores al tratamiento primario, como en las descargas vertidas a las fuentes hídricas. El primer proceso unitario en el TP, consiste en la eliminación de materiales gruesos y arenas cuya presencia perturbaría el tratamiento total y el eficiente funcionamiento de las máquinas, equipos e instalaciones de la planta de tratamiento (Hernández, Hernández, & Galán, 1995).

Otro concepto de TPAR es propuesto por Sonune y Ghate (2004) quienes definen que el objetivo del tratamiento primario implica en un principio la reducción en tamaño y posterior remoción de sólidos gruesos y finos, a menudo encontrados en el AR, diferenciando sólidos orgánicos como son, piezas de madera, papel, plástico, basura, etc., junto con materia fecal; y sólidos inorgánicos, tales como, arenas, gravas, vidrio y metales. Posterior a esta unidad de cribado, se realiza la remoción de materia orgánica e inorgánica, mediante procesos físicos de sedimentación y/o flotación, con la finalidad de retener arenas y/o aceites o grasas contenidas en el AR. Igualmente, Sonune y Ghate (2004) plantean: “Aproximadamente del 25 al 50% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno -DBO₅, el 50 al 70% de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y 65% de los aceites y grasas que entran al proceso son removidos durante el tratamiento primario”.

El proceso conforme a Harleman y Murcott (1999) se denomina en inglés Chemically Enhanced Primary Treatment (CEPT por sus siglas en inglés) y en español Tratamiento Primario Químicamente Mejorado o Asistido. El Tratamiento Primario Químicamente Asistido (TPQA) según De Feo, De Gisi, y Galasso (2008) (citado por Metcalf, 2003; Poon & Chu, 1999; Vesilind, 2003), consiste en la adición de productos químicos (sales metálicas y/o polímeros en forma de polielectrolitos orgánicos), con el fin de mejorar los procesos de coagulación, floculación y sedimentación aplicados en las AR. El TPQA, precipita simultáneamente las diversas clases de contaminantes de AR sanitarias, atrapados en flóculos fáciles de eliminar del agua. Este proceso proporciona elevadas tasas de remoción en una sola etapa de tratamiento. A pesar de su uso en nuevas plantas de tratamiento de AR, la versatilidad del proceso permite duplicar la capacidad y la eficiencia de las plantas pre existentes, prácticamente sin la necesidad de obras civiles (Tsukamoto, 2002).

El TPQA es una tecnología apropiada para tratar las AR municipales, utilizada por los países desarrollados como alternativa en los procesos biológicos convencionales (citado por Harleman & Morrisseys, 1990; Harleman & Murcott, 1999; Poon & Chu, 1999; Shao, Liu, Wada, Crosse, & Jenkins, 1996), lo anterior expuesto en un estudio acerca de la práctica del TPQA combinado con lodos activados en AR. Una ventaja del TPQA es que al ser comparado con el resto de procesos existentes para tratar las AR, permite una significativa remoción de las cargas contaminantes presentes, como son: Organismos patógenos, Sólidos Suspendidos, DBO, Fósforo, H₂S y metales pesados (Tsukamoto, 2002).

Este proceso físico químico puede ser aplicado ya sea al comienzo, en medio o al final del tratamiento de las AR, aunque, resulta ser beneficioso económica y ambientalmente si se aplica al comienzo o como etapa única del tratamiento. El TPQA es utilizado en centenares de instalaciones alrededor del mundo, tratando desde las AR de condominios, hoteles y hospitales, hasta las mega ciudades con más de 20 millones de habitantes. Lo anterior descrito por Tsukamoto (2002), en su reporte acerca de los paradigmas sobre este tipo de tratamiento.

Algunas aplicaciones del TPQA se centran en el incremento de la remoción de Sólidos Sedimentables y/o DBO, aumentando la capacidad de flujo, debido a una rápida sedimentación; mientras que otros tratamientos se concentran en la desinfección del efluente por cloro, luz ultravioleta, o precipitación, esta última por la remoción de altos niveles de fósforo. Algunos ejemplos de ciudades que ponen en ejercicio esta práctica, son: Ciudad de México, California del Sur, Hong Kong, Sao Paulo y Rio de Janeiro (Harleman & Murcott, 1999).

Debido a las características variables de las AR, la selección de un coagulante apropiado y las dosis químicas requeridas, deben ser determinadas mediante test a escala piloto o en bancos de prueba. Las dosis típicas de coagulantes son entre 10 y 50 mg/L, dependiendo de varios factores. Mientras que los de floculantes, en la forma de polielectrolitos aniónicos orgánicos, son entre 0 y 1 mg/L. Lo anterior, puntualizado por De Feo et al. (2008) y citado por Metcalf (2003), Vesilind (2003) y Poon y Chu (1999).

2.2.1. *Reseña Histórica*

El TPQA no es una tecnología nueva, de hecho, su primer uso se remonta a 1740 en Francia.

Se abandonó posteriormente tras el desarrollo de reactores biológicos, sin embargo, en los últimos veinte años su interés ha aumentado progresivamente debido al desarrollo de coagulantes y floculantes más eficientes, normatividades más estrictas, así como la necesidad de implementar tecnologías de tratamiento de bajo consumo de energía, especialmente en los países en desarrollo (De Feo et al., 2008).

En el trabajo de Parker, Barnard, Daigger, Tekippe, y Wahlberg (2001), se realizó una investigación de forma más detallada acerca los inicios del TPQA, la cual se trae a colación seguidamente:

Melcalf (1991) indaga sobre las primeras prácticas llevadas a cabo en el uso de esta tecnología hasta nuestros tiempos, reportando inicialmente que Inglaterra fue el pionero en la implementación de este tipo de tratamiento cerca de 1.870, usándolo extensivamente hasta 1.890, y alrededor del año 1.900 fue aplicado en Estados Unidos previo al desarrollo del Tratamiento Biológico, también se señaló que el TPQA resurgió en 1.930 en Estados Unidos.

En 1.960 según Albertson y Sherwood (1967), aparece la necesidad de reducir los niveles de fósforo causado por los problemas de eutricación debido a las descargas municipales en los Grandes Lagos. Es por esto, que Dorr Oliver^[1] estableció un sistema mejorado constituido por dos pasos, consistente por el TPQA seguido por el proceso de lodos activados, llamado "Proceso de extracción de fosfato". En el mismo período diferentes proveedores de productos químicos desarrollaron aplicaciones para el TPQA, entre los que se puede mencionar los estudios: (Dow Chemical Company, 1967a, 1967b; Wukash, 1968). Por ejemplo, Dow Chemical^[2] desarrolló una aplicación concerniente al uso de cloruro férrico como coagulante primario, junto con un polímero anionico como coadyuvante de la coagulación, dicho ensayo tomó el nombre de "Proceso Dow para la remoción de fósforo". Paralelo a esto, Allied Chemical^[3] desarrolló avances en cuanto a las aplicaciones de esta tecnología con sus productos de aluminio, siendo exitoso los resultados obtenidos (Allied Chemical Corporation, 1970, 1973). Para culminar los estudios desarrollados en esta década, Wilson, Bizzari, Burke, Langdon, y Courson (1975) trabajaron ensayos con alumbre y polímero en el TPQA en Tampa, Florida, observando resultados de remoción de SS y DBO, al 83 y 44% respectivamente.

Parker et al. (2001) describe más tarde que para la década de los 70s, se instauró la tecnología del TPQA en el continente Europeo, más exactamente en Escandinavia, a causa de las notorias apariciones de algas. También para esta misma época, la tecnología del TPQA y la remoción del fósforo químico fue considerada en Sudáfrica, siendo la principal razón para la adopción de la remoción de fósforo biológico, la adición de sal con químicos al agua residual (estos usados en el TPQA), así como el aumento de la salinidad a causa de la recirculación de químicos, lo que produjo un deterioro mayor en el efluente.

A finales de la década de los 60s y 70s, se evidenció la problemática producto de las descargas de AR a los océanos en la Costa Oeste de Estados Unidos, notando que se requería la

¹ Empresa que suministra equipos para la separación de sólido-líquido de alto desempeño y sistemas de proceso.

² Corporación multinacional. Empresa caracterizada por la producción de reactivos químicos.

³ Compañía americana con aplicabilidad en las industrias automovilísticas, aeroespaciales, de aceite y gas.

actualización y/o modernización del tratamiento convencional primario al tratamiento biológico, anotando luego que se requería optar por otro tipo de tratamiento que permitiera conjugar la relación costo-efectividad; esto condujo a la búsqueda de un tratamiento apropiado sumándole un proceso de dilución (Parker et al., 2001). Se llevaron a cabo grandes investigaciones y ensayos a escala piloto y en planta para estudiar la efectividad del TPQA, estos fueron realizados en San Francisco, California (Brown&Caldwell,1971; CityandCountryofSanFrancisco, 1967), y Seattle (Brown & Caldwell, 1978a).

Ericsson (1973) reportó ensayos en Suecia del TPQA, probando con bajas dosis de hierro, logrando una baja remoción de SS, pero una disminución de los niveles de fósforo en el efluente. Investigaciones de Ødegaard (1998) realizadas en Norte América acerca del TPQA muestran que la utilización de un polímero orgánico como complemento de la sal metálica, en comparación con el uso de la sal metálica de manera independiente, resulta ser mejor en la sedimentación del floc y a su vez una tasa de sobreflujo superficial. Resultados con mayor significancia se encontraron al evaluar a escala piloto la combinación de un polímero catiónico con sal metálica, encontrando que esto generaba una producción menor de lodos, más no remoción de fósforo. En definitiva, se encontró que la remoción total se lograba al combinar sal metálica y un polímero orgánico.

En este mismo período, continuando con el desarrollo del TPQA en Estados Unidos, se llevaron a cabo trabajos relacionados con la puesta en marcha de un tratamiento combinando, TPQA como etapa inicial, seguido de la utilización del carbón activado. Dichos trabajos, permitieron el desarrollo de metodologías de diseño, entre las que se encuentran, la selección óptima de la dosis de coagulante, valores de pH, tiempos de floculación y sedimentación. Además, se concluyó que utilizando el alumbre no se podía obtener un clarificado completo en el flujo superficial, como el que se obtiene al usar cal en el proceso, así como la dificultad que se presenta al deshidratar los lodos generados al ser adicionado alumbre como coagulante. Durante el mismo tiempo, investigadores de California, estudiaron la aplicación del tratamiento físico químico a escala macro, combinando el TPQA seguido de tratamiento biológico, usando cal como coagulante primario, con el fin de optimizar el TPQA, logrando eficiencias en cuanto a la nitrificación aguas abajo (Hortskotte, Niles, Parker, & Caldwell, 1974).

En 1980, la mayor discusión involucraba el diseño de los procesos referente a dos plantas de tratamiento secundario luego del TPQA, en la que utilizaban sales de hierro, estas se localizan en Cleveland (Ohio) y en Appleton (Wisconsin), la primera corresponde a una planta cuyo tratamiento es con Filtros Percoladores/Contacto de Sólidos, y la de Appleton maneja Nitrificación de Lodos Activados (Parker et al., 2001). Galil y Rebhun (1990) mostraron que utilizando el TPQA con cal y aluminio como coagulante, se reducen los niveles orgánicos, permitiendo esto una reducción en el tamaño del tanque de aeración requerido para la nitrificación en el proceso de lodos activados. Newbigging, Stephenson, y Romano (1995) indican que se logra un beneficio doble, removiendo tanto fósforo y compuestos orgánicos, al adicionar los químicos en el tanque primario, resultando ser óptimo para la remoción de fósforo y nitrificación.

Actualmente las megas ciudades del mundo desarrollado como Europa Occidental y Norte América, siguen un modelo de desarrollo para el uso de tecnologías de AR municipales, el cual

considera parámetros de costo-efectividad y mínimos niveles de tratamiento, estos enfocados en dar solución al problema de salud pública. Durante los pasados diez años, la combinación de bajas dosis de sales metálicas como cloruro férrico, con muy bajas dosis de polímero aniónico, han resultado ser eficientes al ser aplicadas en el tratamiento del TPQA (Harleman & Murcott, 1999).

2.2.2. Aplicaciones

De Feo et al. (2008) propone que el TPQA puede ser implementado en diseños especiales de tanques, como tanques de sedimentación primaria convencional o lagunas de estabilización, dichas aplicaciones sugeridas por Odegaard, Balmer, y Hanaus (1987). El mismo autor, afirma que el TPQA es una tecnología apropiada para el tratamiento de las AR en áreas costeras (citado por Odegaard, 1989). Igualmente Odegaard (1992) a principios de 1990 desarrolló un estudio completo sobre el uso de productos químicos en el tratamiento de las AR. De Feo et al. (2008) señala que el mismo período, Harleman y Murcott (1992) investigaron la aplicabilidad del TPQA para actualizar los múltiples escenarios desarrollados en las plantas de tratamiento de AR municipales.

En el trabajo de De Feo et al. (2008) se especifican las ventajas del TPQA entre las que se incluyen mayores eficiencias de remoción tanto en SST como en DBO, la capacidad de tratar grandes caudales, mejor desempeño en los procesos subsecuentes al tratamiento primario, así como una reducción en el tamaño de las estructuras que estos integran. Por su parte, entre las desventajas del TPQA se encuentran un incremento de los lodos primarios, la producción de sólidos generados que son algunas veces difíciles de espesar y deshidratar, e igualmente un incremento en los costos de operación y mano de obra (citado por Aiyuk, Amoako, Raskin, van Haandel, & Verstraete, 2004; Bolto et al., 1996; C. W. Chu, Poon, & Cheung, 1998; Nenov, 1995; Ødegaard, 1998; Poon & Chu, 1999; Vesilind, 2003; G. R. Xu, Zhang, & Li, 2005).

A su vez, Haydar y Aziz (2009) documentaron que el TPQA además de remover los contaminantes comúnmente conocidos, asiste también la remoción de metales pesados, PCBs y PAHs los cuales están fuertemente asociados con las partículas existentes (citado por Odegaard, 1992). Igualmente, en dicho estudio se hace hincapié que el TPQA reduce la huella o impacto que es generado por las unidades de sedimentación primaria. Cabe mencionar también, que incluso con unas instalaciones no modernas, puede ser aplicado el TPQA aún con una sobrecarga de afluente. Además, puede ser empleado para la remoción de fósforo en el efluente, controlando el proceso de eutrificación.

Según Poon y Chu (1999), diferentes coagulantes químicos como el alumbre, la cal, el cloruro férrico (FeCl_3) y el Cloruro de Polialuminio (PACl), han sido usados en el proceso de tratamiento de las AR (citado por Huang, 1995). Además de adicionar sales metálicas, son usados también polímeros de alto peso molecular, con la finalidad de remover los SST y la DBO (citado por Bolto et al., 1996; Huebner, 1989; Singh, 1985).

Una de las aplicaciones del TPQA fue estudiada por Haydar y Aziz (2009) en donde se investiga el desempeño que tiene este tratamiento en las AR de curtiembres generadas por la industria Saddiq Leather Works (SLW), la cual produce 18.000Kg de cuero por día que

posteriormente será transformado en vestidos y zapatos. En el estudio en mención se establecieron dos objetivos, los cuales fueron: (1) Caracterizar las AR de curtiembre y (2) Examinar la tratabilidad de las AR de curtiembres usando diferentes tipos de coagulantes químicos empleados comúnmente [Alumbre $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$, Cloruro férrico $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y Sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$] mediante el ensayo de test de jarras. Evaluando la eficiencia obtenida de las sustancias químicas analizadas en dicho estudio, se encontró que el alumbre podría ser el coagulante adecuado para el uso del TPQA en las AR de curtiembres con una dosis en un rango de 200 – 240 mg/L.

Por su parte, Wong, Teng, Ahmad, Zuhairi, y Najafpour (2006) llevaron a cabo un trabajo en la fábrica de pulpa y papel Nibong Tebal Paper Mill Sdn.Bhd, donde se hace un uso intensivo del agua, llegando a consumirse 60 m³ de agua por tonelada de papel producido (citado por Thompson, 2001). La generación de AR y las características del efluente en una fábrica de pulpa y papel dependen del proceso de manufactura que se lleva a cabo dentro de la planta. El presente trabajo evaluó el desempeño de nueve diferentes tipos de Poliacrilamida (PAM) aniónicas y catiónicas, las cuales fueron: (Organopol 5415, Organopol 5020, Organopol 5470, Organopol 5450, Organopol 5540, Chemfloc 1515C, Chemfloc 430A, AN 913 y AN 913SH). La finalidad fue investigar la eficiencia de la floculación a partir de la selección del polímero más efectivo en cuanto a la remoción de turbiedad, SST y DQO de las AR descartadas por esta fábrica, usando la técnica de análisis-criterio. La dosis óptima, el tipo y los atributos físicos de cada floculante, como el peso molecular, densidad de carga y grupo funcional, el volumen de lodo sedimentado, el Índice de Volumen de Lodo (IVL), las características del lodo sedimentado y el agua recuperada, fueron evaluados para obtener un mayor entendimiento del mecanismo de floculación de las AR de la fábrica de pulpa y papel. Basados en los resultados obtenidos por el estudio de todos los floculantes, el desempeño de los C-PAM (Polímeros Catiónicos) es mucho mejor que el de los A-PAM (Polímeros Aniónicos) en términos de remoción de turbiedad, SST, de DQO e IVL.

En el estudio de De Feo et al. (2008), el propósito fue definir un procedimiento fácil de usar en la selección del mejor coagulante y la dosis relativa en el proceso de TPQA para el tratamiento de las AR urbanas, teniéndose en cuenta los siguientes aspectos: (1) Maximizar la remoción de la DQO en la sedimentación primaria con el fin de minimizar la carga del afluente orgánico al tratamiento biológico secundario, (2) Minimizar los aspectos desfavorables en el proceso biológico del tratamiento secundario, controlando la variación del porcentaje del pH entre la sedimentación primaria y el TPQA, (3) Minimizar el incremento de los costos controlando el volumen de lodos primarios, dosis y costo del coagulante, y (4) Dar un método que sea fácil de aplicar dentro de un laboratorio de una planta de tratamiento de AR, que sea bueno y económico. Como conclusión, los autores definieron un procedimiento simple de multi-criterio, el cual con su aplicación permitirá elegir tanto el mejor coagulante como la dosis relativa. Los criterios sugeridos fueron: porcentaje de remoción de la DQO, Volumen de lodo después de 2 horas, Dosis de coagulante, Costo de coagulante y Variación del porcentaje del pH.

En resumidas, según Mahmoud (2009) el TPQA es el proceso por el cual se adicionan diferentes químicos, comúnmente sales metálicas y polímeros en la forma de polielectrolitos orgánicos, a los tanques de sedimentación primaria. Estos químicos permiten que las partículas suspendidas se agrupen para dar paso a los procesos de coagulación y floculación. De esta

manera, las partículas agregadas, o los denominados Floccs, sedimentan de manera rápida, logrando una mayor eficiencia del tratamiento con respecto a la remoción de Sólidos, Materia Orgánica y nutrientes presentes en las AR. El TPQA es considerado una tecnología relativamente simple que proporciona efectividad al tratamiento a bajo costo y el cual puede ser fácilmente implementado en una estructura de tratamiento primario. Adicionalmente, el TPQA ofrece la oportunidad de reducir el tamaño de las unidades de los tratamientos subsecuentes y aumentar la capacidad de las plantas de tratamiento convencionales ya existentes, ejemplo, al implementar el proceso de los lodos activados (citado por Harleman & Murcott, 1992; Harleman & Murcott, 2001).

2.2.3. Teoría de la Clarificación, Coagulación, Floculación y Sedimentación

Hernández Muñoz, en su libro titulado “*Depuración y desinfección de Aguas Residuales*”, expone los conceptos que deben entenderse para conocer los procesos de coagulación, floculación, decantación y filtración que son determinantes para obtener un agua clarificada o en su defecto con una reducción apreciable de los constituyentes (o impurezas) que trae consigo el AR; en la parte de Anexos 2-1 se amplía un poco o se hará más énfasis sobre la temática de coagulación y floculación. El autor explica más exactamente la teoría sobre la coagulación y floculación, los factores involucrados que afectan estos procesos, así como los mecanismos de funcionamiento. Así mismo, describe las características más importantes para la selección de apropiados productos químicos para asistir el agua, entre los que están los coagulantes, los floculantes (también conocido como coadyuvantes de coagulación), los criterios que se deben tener en cuenta para seleccionar de una dosis óptima y la preparación de la concentración de solución, los distintos tipos de productos químicos encontrados en el mercado, resaltando los polielectrolitos y su clasificación por ser uno de los floculantes más empleados.

2.3. USO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA

2.3.1. Poliacrilamida

Según Taylor, Morris, Self, y Smart (2002), la innovación y el uso de polielectrolitos sintéticos para la remoción de sólidos suspendidos en el tratamiento de las aguas residuales como floculante, recientemente ha aumentado de manera creciente. Un polímero que se conoce como polielectrolito, es aquel el cual su monómero contiene grupos ionizables, normalmente uno o más por unidad de repetición. La acrilamida es un monómero cristalino, relativamente estable que es soluble en agua y muchos disolventes orgánicos. En la Figura 2-1 se muestra la estructura de la acrilamida.

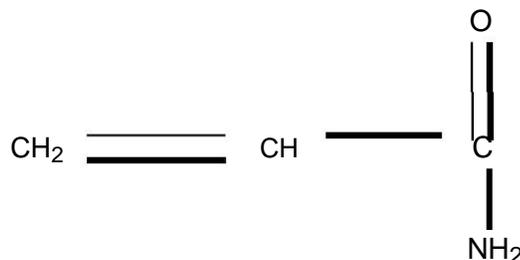


Figura 2-1. Estructura de la Acrilamida. Tomado de Wong, Najafpour, Teng, Zuhairi, y Zinatizadeh (2010)

La poliacrilamida es el tipo de floculante polimérico más comúnmente usado, porque es posible sintetizar la poliacrilamida con funcionalidades variables (Catiónico con carga positiva, aniónico con carga negativa y No iónico con carga neutral), la cual puede ser usada para producir un buen rendimiento del proceso de sedimentación a un costo relativamente bajo. Generalmente, la acrilamida se polimeriza por adición de vinilo, resultando de esto acrilato de poliacrilamida no iónico. El acrilato de sodio es copolimerizado con acrilamida resultando floculantes aniónicos, mientras que el acrilato dimetilaminoetil es usado con acrilamida resultando productos catiónicos. En: (Wong et al., 2010).

En las investigaciones realizadas por Qian, Xiang, Yang, Wang, y Zheng (2004), se expone que la forma de la cadena de un polímero en solución depende principalmente de la concentración del polímero en la solución, para un determinado sistema polímero/solvente. En otras palabras, la concentración puede alterar la forma de la cadena, generando cambios en las propiedades de la solución (citado por J. W. Quian, Qi, & Cheng, 1997; J. W. Quian, Qi, Fang, & Cheng, 1998) y su función (J. Quian, Li, Zhou, & Qi, 2000) e incluso las propiedades del sólido y su función el cual puede afectar la solución del polímero.

Qian et al. (2004) expone: “La solución de polímero usada en el proceso de floculación es muy diluida, por lo tanto, existe una correlación entre el desempeño de la floculación y las propiedades de la solución del polímero”. (p.1700)

La ventaja de los floculantes poliméricos es su habilidad para producir floc grandes, fuertes, compactos, densos y con buenas características de sedimentación, obteniendo una reducción en el volumen del mismo, en comparación a los lodos producidos por coagulación. Además, el rendimiento de los polímeros es menos dependiente del pH, no existen iones residuales de metales o residual añadidos, tales como Al^{3+} y Fe^{3+} y la alcalinidad se mantiene. La eficiencia del proceso de floculación radica en el tipo de floculante primario, sus pesos moleculares y naturaleza iónica, la concentración del mismo en la solución y el tipo de aguas residuales (citado por Qian et al., 2004).

Wong et al. (2010) afirma que el uso de los floculantes poliméricos o polielectrolitos, especialmente aquellos de muy alto peso molecular, han resultado tener mejores desempeños en cuanto a los procesos de separación industrial. Esto también fue planteado en los estudios de Bolto et al. (1996) y C. Chu et al. (2003). De acuerdo a C. Chu et al. (2003), el uso de floculantes puede mejorar la eficiencia del proceso de digestión de las aguas residuales.

En el trabajo de Aguilar et al. (2005) se estudió la manera en que mejora el desempeño del proceso de coagulación-floculación mediante la adición de un coadyuvante (poliacrilamida aniónica), aplicado a las aguas residuales de un matadero. La determinación adecuada del tipo de coagulante y la dosis no sólo mejorarán las características del agua, sino también disminuye el tiempo de sedimentación y los costos asociados. El proceso de coagulación no siempre es perfecto y puede resultar en flóculos pequeños cuando la coagulación tiene lugar a temperatura demasiado baja o cuando se producen flóculos frágiles que se rompen cuando se someten a fuerzas físicas (Hanson y Cleasby, 1990a, b). No sólo es necesario superar estos problemas, sino que además es menester mejorar los procesos de coagulación y floculación para obtener una buena calidad del efluente y la sedimentación rápida de los flóculos formados. Para ello, varios productos, denominados coadyuvantes se pueden utilizar para actuar sobre los

elementos que afectan a la coagulación o con el fin de aumentar la densidad de los flóculos y, por tanto, para mejorar la sedimentación.

Igualmente, en el trabajo de Aguilar et al. (2005) se puntualiza la acogida que han tenido nuevos coagulantes durante los últimos 20 años, tanto inorgánicos como orgánicos, en un intento de mejorar la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos totales durante el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes industriales. El uso de poliacrilamida aniónica aumenta la eficiencia de la floculación del coagulante, aumentando la velocidad de sedimentación, reduciendo la cantidad de coagulante requerida para el tratamiento y la reducción del costo del proceso de coagulación-floculación. Estos productos también se han utilizado para el tratamiento de los desechos de la industria agroalimentaria y, en particular, los de los mataderos.

El agua es extremadamente importante en los mataderos, no sólo para la limpieza de los productos, sino también para eliminar la materia no deseada. El efluente de estos lugares tiene un color rojizo-marrón, una alta DBO₅ y una cantidad considerable de material en suspensión y coloidales. En general, el efluente contiene materia orgánica, grasas, sólidos en suspensión y la materia inorgánica, tal como fosfatos, nitratos, nitritos y sal (Muñoz & Vázquez, 1992; Sáez & Martínez, 1987). Los métodos más comunes utilizados para tratar las aguas residuales de los mataderos son cribado fino, sedimentación, coagulación floculación, filtros percoladores y procesos de lodos activados. Como pre-tratamiento, los procesos fisicoquímicos pueden eliminar una cantidad significativa de partículas y la materia orgánica coloidal de los efluentes de matadero. La separación previa de la materia orgánica significa un menor tratamiento en cualquier paso biológico subsecuente. Así, la eficacia de todas las operaciones posteriores depende del éxito de este proceso.

2.4. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA MEDIDOS

2.4.1. Conductividad

La conductividad del agua según Romero (1999), es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la medición. Por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad.

Por esta razón, el valor de la conductividad se usa mucho en análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos.

La forma más usual de medir la conductividad en aguas, es mediante instrumentos comerciales de lectura directa en $\mu\text{mho/cm}$ a 25°C; con un error menor del 1%. La conductividad leída es igual a la conductividad eléctrica de la muestra medida entre caras opuestas de 1 cubo de 1cm; cómo se demuestra a continuación:

La resistencia específica de un conductor es función de sus dimensiones y puede expresarse como:

$$C = R \cdot A / L \quad [1]$$

Donde:

C = Resistencia específica, ohmio×cm

R= Resistencia, ohmio.

A= Área de la seccional transversal del conductor, cm²

L= Longitud del conductor, cm.

La conductancia específica de un conductor es igual al inverso de su resistencia específica, o sea:

$$K = 1/C = L/R \times A \quad [2]$$

Donde:

K= Conductancia específica, mho/cm.

En otras palabras, es la conductancia de un conductor de un 1cm de (L) y una sección transversal de 1cm²; por tanto, numéricamente es igual a la conductividad.

Cómo en aguas el valor de la conductividad es muy pequeño, se expresa en μmho/cm o en unidades del sistema internacional μSiemens/cm.

1mho = 1Siemens

La experiencia indica que el producto del valor de la conductividad en μmho/cm, por un valor que oscila entre 0,55 y 0,7, es igual al contenido de sólidos disueltos, en mg/L; dicho factor depende de los iones en solución en el agua y de la temperatura; en general es alto, mayor de 0,7, en aguas salinas o de calderas, y bajo, menor de 0,55, en aguas con alcalinidad caustica o acidez mineral.

La conductividad está íntimamente relacionada con la suma de los cationes o aniones determinada en forma química; aproximadamente el producto de la conductividad en μmho/cm por diez, es igual a la suma de los cationes en miliequivalentes por litro; en otras palabras, la conductividad en μmho/cm dividida por cien, es igual al total de miliequivalentes por litro de los cationes y aniones. La medida de la conductividad constituye un parámetro básico de evaluación de la aptitud del agua para riego.

$$\sum \text{cationes} \left(\frac{mE}{L} \right) \times 100 = \text{conductividad} \left(\frac{\mu mho}{cm} \right) \quad [3]$$

Se entiende por conductividad a la habilidad de los iones para moverse a través de una solución y a la propiedad de una solución para conducir el flujo de corriente eléctrica, lo anterior citado por Sierra (1983), esto depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación (citado por Romero, 1996).

Tomando el resumen de Pérez (2010), se define la conductividad como la representación de la concentración de sales disueltas en el agua, por medio de la cual se pueden descubrir las variaciones de los sólidos disueltos en las descargas y, así mismo, en la masa de agua que transita hacia aguas abajo en una corriente.

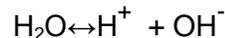
2.4.2. pH

De acuerdo a Metcalf (2004) la concentración del ión hidrógeno, expresado usualmente como pH, es un importante parámetro de calidad tanto en agua potable como en agua residual. El pH es definido como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno. Así:

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+] \quad [4]$$

El rango de concentración adecuado para que haya una mayor existencia de vida biológica es estrecho y crítico (entre 6 a 9 típicamente). Las aguas residuales con concentraciones extremas de pH dificultan el tratamiento biológico, y si la concentración no es alterada antes de ser descargada, el efluente vertido puede alterar la concentración dispuesta en la fuente natural.

La concentración del ión hidrógeno en el agua está estrechamente relacionada con el grado en que las moléculas del agua se disocian. El agua se disocia en hidrógeno e ión hidroxilo de la siguiente manera:



El pH de un sistema acuoso típicamente es medido con un peachímetro. También son usados varios papeles de pH y soluciones indicadoras que cambian de color a ciertos valores de pH. El pH es determinado entonces comparando el color del papel o solución con una serie de colores estándar.

2.4.3. Temperatura

La temperatura del agua es un parámetro importante debido a que éste afecta las reacciones químicas y las velocidades o tasas de reacción, la vida acuática y la posibilidad de usar el agua para usos beneficiosos. Las constantes de equilibrio, las constantes de producto de la solubilidad y las constantes de velocidad de reacción específicas, son todas dependientes de la temperatura. La dependencia de la temperatura con la velocidad y las constantes de equilibrio, pueden ser estimadas usando la relación de Van't Hoff-Arrhenius (Metcalf, 2004).

Así:

$$\frac{d(\ln k)}{dT} = E/RT^2 \quad [5]$$

Donde:

K= Constante de la velocidad de reacción

T= Temperatura, K=273,15+°C

E= Una característica constante de la reacción, J/mol

R= Constante ideal de los gases, 8,314J/mol×K

2.5. GENERALIDADES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) EL SALITRE

Los procesos y operaciones unitarias que a continuación serán mencionados se llevan a cabo en la PTAR El Salitre (Ver Figura 2-2) y son aquellos que están directamente relacionados con este trabajo, por lo cual cada uno se describe brevemente. Sin embargo, es importante resaltar que una vez realizada estas etapas pertenecientes a la línea de agua, dan paso a las etapas de la línea de lodos, éstos son Espesamiento, Digestión y Deshidratación de Lodos.

A continuación se explican los procesos de la PTAR El Salitre, los cuales se pueden apreciar mejor en la Figura 2-3.



Figura 2-2. Plano general PTAR EL SALITRE. Tomado de Google Earth, 2012.

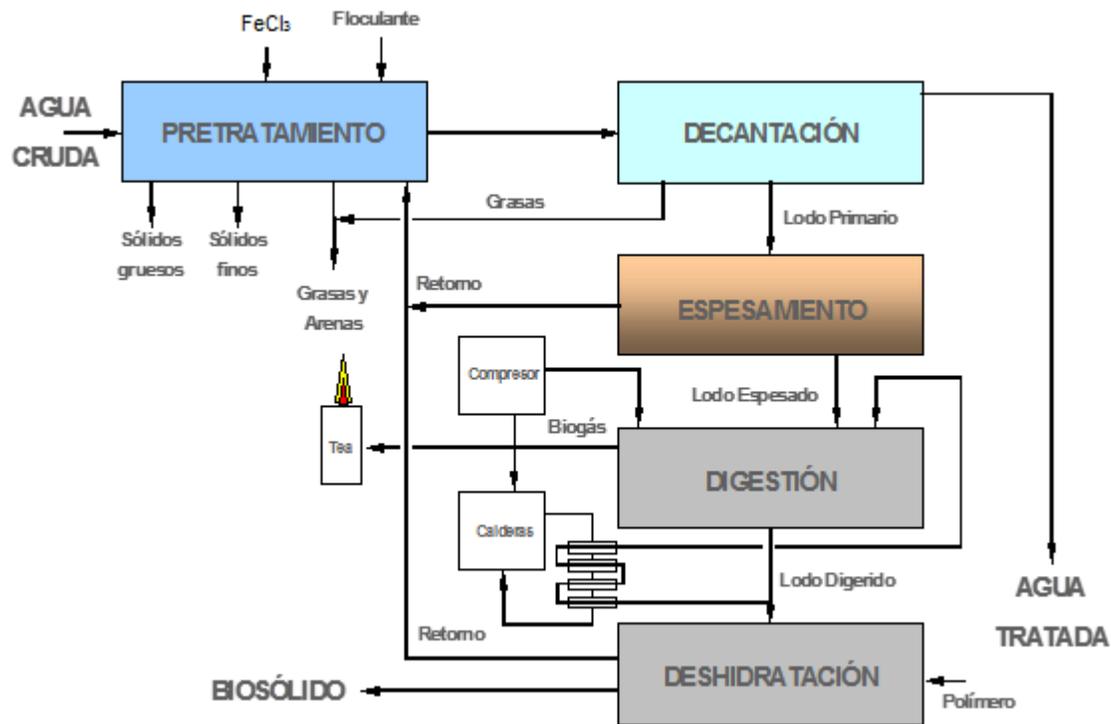


Figura 2-3. Procesos de la PTAR EL SALITRE. Tomado de artículo sobre la PTAR El Salitre, elaborado el 19 de agosto de 2008.

2.5.1. Caudal Captado

La PTAR Salitre en su condición actual de tratamiento capta un promedio de 4 m³/s que es el caudal medio para el cual fue diseñada la instalación. Ver Figura 2-4.

En su dinámica de bombeo, la PTAR Salitre alterna en su operación, la utilización de uno, dos o tres bombas de tornillo de Arquímedes, cada una con capacidad nominal de bombeo de 2.5 m³/s, sin embargo el caudal real captado por tornillo depende de la cota de la lámina de agua en el canal aferente, de tal manera que la PTAR capta entre 1.5 m³/s y 7.8 m³/s aproximadamente como caudales puntuales.

En tiempo de lluvias, el caudal que no puede ser captado hacia la PTAR por superar el caudal de operación, es entregado directamente al receptor, a través de un juego de dos compuertas de By-Pass que se abren solo si han cumplido condiciones de cota del canal Salitre, en un valor igual o superior a 2572.0 m.s.n.m. En estas condiciones, el agua está altamente impactada por presencia de lluvias y presenta alta dilución, de tal manera que el impacto sobre el receptor está por sí mismo minimizado.

El agua cruda que ingresa a la PTAR presenta concentraciones altamente fluctuantes de SST entre 120 mg/L y 300 mg/L y de DBO₅ entre 270 mg/L y 480 mg/L.



Figura 2-4. Captación y elevación del agua en la PTAR. Tomado del informe sobre el Proyecto de Saneamiento del Río Bogotá (PSRB).

2.5.2. Dosificación de Productos Químicos

Para garantizar la remoción de una fracción de la carga entrante y obtener una calidad propia de un tratamiento primario, en la PTAR se dosifican un coagulante inorgánico (FeCl_3 en solución al 42 %) y un floculante (Polímero aniónico predisoluto y madurado *in-situ* antes de su aplicación). En la Figura 2-5 se observa la etapa de la dosificación de Cloruro Férrico en planta.

Las dosis medias como producto puro, que se vienen manejando para estos productos son del siguiente orden:

- Alrededor de 30 p.p.m. para el Cloruro Férrico
- Entre 0.5 y 0.7 p.p.m. para el polímero

Los consumos mensuales para estos dos productos son:

- Para cloruro férrico del orden de 315 ton/mes como producto puro.
- Para el polímero aniónico del orden de 6.4 ton/mes como producto puro.



Figura 2-5. Dosificación Cloruro Férrico. Tomado del informe sobre el Proyecto de Saneamiento del Río Bogotá (PSRB).

2.5.3. Pretratamiento

El área de pretratamiento tiene múltiples objetivos dentro de las actividades de la PTAR, los cuales se enumeran a continuación:

- En primer lugar actúa como recinto de contacto entre los productos químicos y el agua en procura de lograr la coagulación – floculación.
- En segundo lugar presenta estructuras de desarenado en las cuales se remueve material granular pesado, predominantemente inorgánico que viene con el agua cruda. Ver Figura 2-6.
- En tercer lugar cuenta con la actividad permanente de desengrasado (retiro de flotantes) con ayuda de la inyección de aire al seno del líquido, realizando la remoción por flotación y barrido en superficie.

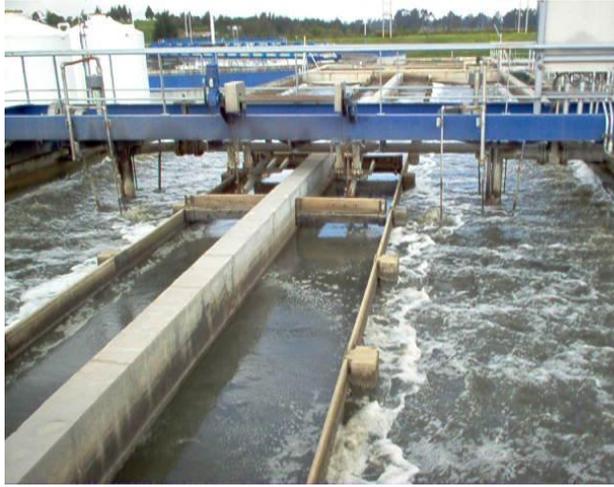


Figura 2-6. Desarenado y desengrasado. Tomado del informe sobre el Proyecto de Saneamiento del Río Bogotá (PSRB).

2.5.3.1. Especificaciones del Kit de preparación de polímero empleado en el Pretratamiento

Uno de los kits de preparación de polímero de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre, es utilizado en el proceso de floculación que se realiza en la línea del afluente que ingresa a la planta y que es sometido a un tratamiento primario químicamente asistido. Por su parte, el otro kit de preparación se emplea en la línea de lodos, más exactamente en el proceso de deshidratación de los lodos generados por los ocho decantadores primarios, en los cuales se lleva a cabo el clarificado del agua residual mediante sedimentación de las partículas.

A lo largo de estas páginas, únicamente serán estudiados los parámetros operacionales del kit de preparación de polímero para el pretratamiento, esto es, las especificaciones técnicas y generalidades del mismo. Estos Kits son conocidos industrialmente como estaciones automáticas de preparación para polielectrolitos en polvo, empleado en el tratamiento de las aguas residuales.

El tanque de preparación de polímero para el pretratamiento tiene una capacidad volumétrica de 12 m^3 , dividido en tres compartimientos construidos en INOX o PVC, también llamadas técnicamente así: Cuba de preparación, Cuba de maduración y Cuba de almacenamiento y/o dosificación (C1, C2 y C3), cuyas dimensiones en su orden son 6m^3 , 3m^3 y 3m^3 . Ver Figura 2-7. Se referencian con el número correspondiente al tipo de máquina, que para este caso es Autofloc 85120.

El tanque de preparación incluye los siguientes componentes:

- Armado de mando
- Controladores de señal PID: 02Q02
- Aspiradora: KFG205.12

- Válvula PVC BS50FF-92
- Tubo de succión DN50 (2´) (Utilización)
- Válvula PVC BS50FF-92
- Tubo de succión DN50 (2´) (Sobre cada tanque para desagüe).
- Detector de niveles tipo BS85120; (NDA- Nivel demasiado alto, NDB- Nivel demasiado bajo, NA- Nivel alto, NB- Nivel bajo).
- Tipo de cuba: 85120 (12 m³); (Cuba de preparación: 6000l; Cuba de maduración: 3000l y Cuba de almacenamiento o dosificación: 3000l).
- Tipo de dosificador: FLOCODOSE 87A2100570A (142 Kg/h); compuesto por: Cuerpo dosificador, tolva 005702A (litros), motorreductor tipo MVA 10M53C-LS630,12), 0,12 KW, IP 55, clase F.
- DISPERFLOC 9730: Caudalímetro tipo IDP 2500 PVC/A-ZE951.
- REG 2F60: Regulador de presión (tipo D06F-A-2´92), electroválvula (tipo EV 8205700.0201F60), válvula de ajuste (tipo válvula de ajuste 2´B).
- Agitador de velocidad lenta_a: Tipo P3400-1054; Tropicalizada o potencia del motor de 2,2 KW, IP 55.
- Agitador de velocidad lenta_b: Tipo P1200-1054; Tropicalizada o potencia del motor de 1,1KW, IP 55.



Figura 2-7. Tanque de preparación de polímero.

Utilizando como guía las especificaciones técnicas del tanque de preparación de polímero para el pretratamiento, el cual se puede visualizar con mayor detalle en el Anexo 2-2, se detallan ciertos parámetros de control cinético u operacional que soportarán posteriormente el análisis de la aplicación del método por conductividad (Ver Tabla 2-1). Entre estos se encuentran:

Tabla 2-1. Especificaciones de los dos agitadores del kit de preparación de polímero. Ficha técnica suministrada por el coordinador de la PTAR EI – Salitre

TIPO	d= Turbina	Q=[m ³ /h]	Vh=[m/s]	RPM= [r/min]	Potencia= [KW]
Agitador_a P3400	600	623	0.66	93	2.2
Agitador_b P1200	500	350	0.5	93	1.1

TIPO	P [Kg]	Ea [daN]	Er [daN]	D	A
Agitador_a P3400	54	16	4	530	30
Agitador_b P1200	47	10	2	480	30

Los dos agitadores que componen el tanque de preparación de polímero, son giratorios de turbina de tres paletas cada uno, ubicadas a un ángulo de 45°C, soldadas sobre los ejes; clasificación dada por la ENOHSA (Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento), describiendo este tipo de floculador así: “Hacen parte de la subdivisión de los floculadores mecánicos, son cada vez más populares en los nuevos proyectos, las turbinas de paletas inclinadas para inducir un movimiento axial (efecto de bombeo) en el líquido, tendiendo a sustituir, con ventajas a los agitadores de paletas”.

2.5.3.2 Preparación actual de la solución de polímero en el pretratamiento

La preparación de la solución de polímero en el pretratamiento de las aguas residuales, ver en Figura 2-8, depende de ciertos factores que son intrínsecos al proceso y otros ajenos (externos) a este, los cuales juntos determinan la dosificación de floculante que debe ser añadido al agua, con el objeto de obtener remociones apreciables y que éstas se encuentren acorde a lo estipulado en la Licencia Ambiental que les rige, (Resolución 0797 del 16 de Mayo del 2008, modificándose la Resolución 1929 de Octubre 31 de 2007, por la cual se modifica la Resolución No.577 del 12 de Junio de 2000, la cual a su vez modificó la Resolución No.817 del 24 de Julio de 1996, modificada por las Resoluciones No.1121 del 16 de Octubre de 1996 y No.821 de Agosto 17 de 2000) en donde se establece de forma detallada el tipo de tratamiento de las aguas residuales, las metas de descontaminación y el plan de cumplimiento de la PTAR-EL SALITRE. Entre los factores ajenos al proceso pero no menos importante (determinantes en el proceso), se encuentra la calidad del afluente, medida en términos de turbiedad, representada por la cantidad de sólidos suspendidos totales y la materia orgánica que contenga el agua

residual; también, el nivel en que se encuentre el canal Salitre, del cual depende el número de tornillos en operación que deben ser accionados para elevar el afluente.

Entre los factores íntimos al proceso de preparación se encuentran: el número de Hertz o las velocidades del tornillo dosificador de polímero, así como el caudal de dilución. Los valores de Hertz y el caudal promedio manejados en planta en el proceso de pretratamiento, es de 5Hz y entre 11.000 y 13.000 L/h de agua potable.

El tiempo de retención del flujo laminar transportado en cada una de las tres cubas de preparación depende igualmente del número de tornillos en operación y de la dosis de polímero que sea necesaria suministrar.

En cuanto a los costos asociados al consumo de polímero empleado en la preparación, se tiene un gasto alrededor de 5000 Kg de polímero, correspondiente a 200 bolsas de polímero al mes. Cada bolsa de polímero contiene 25 Kg y tiene un valor de \$2.000.000' (MCTE). Esto es, mensualmente en el gasto de funcionamiento de la planta está incluido los \$400.000.000' propio del producto químico utilizado como coadyuvante de los procesos de coagulación-floculación, polímero aniónico proveído por la empresa fabricante KEMIRA S.A.

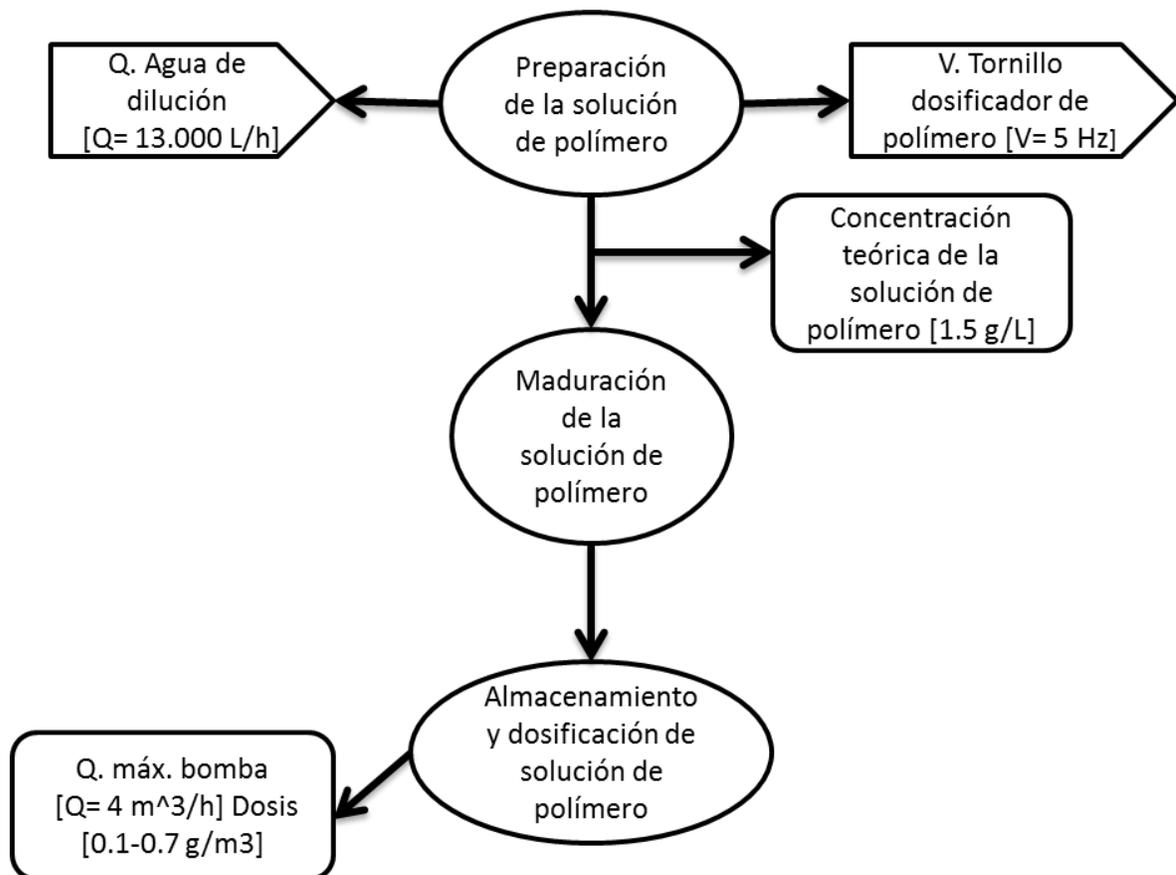


Figura 2-8. Diagrama del proceso de preparación de la solución de polímero en planta

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ENSAYOS EXPERIMENTALES

En el numeral 1.5 se señaló el procedimiento aplicado para la determinación de los parámetros de conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$], pH [unidades de pH], y temperatura [$^{\circ}\text{C}$], medidos de las soluciones preparadas *in situ*. En la Tabla 3-1 se resume la cronología de la realización de las preparaciones realizadas a escala de laboratorio.

Tabla 3-1. Descripción de las actividades

No. Corridas	No. Mediciones	Fecha de ejecución
17	3	10/05/2012 – 22/05/2012

Los equipos de medición empleados para la determinación de los parámetros de conductividad, pH y temperatura, se muestran desde la Figura 3-1 hasta la Figura 3-4.



Figura 3-1. Preparación soluciones requeridas con equipo de jarra₂.



Figura 3-2. Balanzas analíticas para medición de concentraciones requeridas



Figura 3-3. Medición de pH



Figura 3-4. Conductímetro para la medición de la temperatura y conductividad

Los valores reportados por cada equipo de medición fueron consignados en la matriz mostrada en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Matriz completa de mediciones. Ensayo experimental

Corrida	Concentración del polímero [g/L]	Temperatura [°C]			Conductividad [μS/cm]			pH [unidades de pH]		
		t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h
1	0.75	20.5	19.9	19.6	433.0	432.0	435.0	7.51	7.70	7.64
	1.00	20.5	20.0	19.8	530.0	542.0	537.0	7.57	7.72	7.63
	1.25	20.6	19.9	19.6	620.0	628.0	631.0	7.59	7.91	7.81
	1.50	20.3	20.2	19.4	961.0	983.0	981.0	7.72	7.89	7.86

**Tabla 3-2. Continuación de la matriz completa de mediciones.
Ensayo experimental**

Corrida	Concentración del polímero [g/L]	Temperatura [°C]			Conductividad [μS/cm]			pH [unidades de pH]		
		t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h
2	0.75	20.1	19.7	18.9	424.0	420.0	426.0	7.58	7.65	7.51
	1.00	20.2	19.9	19.2	535.0	534.0	535.0	7.65	7.72	7.61
	1.25	20.0	20.0	19.8	627.0	622.0	623.0	7.82	7.68	7.47
	1.50	20.4	19.9	20.0	970.0	977.0	965.0	7.89	7.89	7.74
3	0.75	21.7	19.4	19.0	344.0	342.0	347.0	7.80	7.51	7.80
	1.00	21.7	20.5	20.1	435.0	429.0	436.0	7.85	7.51	7.82
	1.25	20.6	20.9	20.1	542.0	544.0	548.0	7.85	7.72	7.81
	1.50	21.0	20.0	20.1	848.0	851.0	854.0	8.01	7.85	7.78
4	0.75	20.7	20.1	20.3	491.0	490.0	490.0	7.78	7.59	7.73
	1.00	20.3	19.4	19.8	588.0	589.0	588.0	7.74	7.61	7.73
	1.25	20.4	20.1	20.2	729.0	729.0	726.0	7.73	7.58	7.73
	1.50	20.1	19.7	20.0	1141.0	1138.0	1135.0	7.82	7.70	7.70
5	0.75	21.1	20.2	20.3	449.0	449.0	450.0	7.57	7.47	7.52
	1.00	21.8	20.5	20.6	555.0	565.0	562.0	7.66	7.60	7.62
	1.25	22.1	20.4	20.4	679.0	680.0	676.0	7.68	7.64	7.60
	1.50	21.3	20.4	20.3	794.0	795.0	793.0	7.74	7.71	7.65
6	0.75	23.0	21.0	19.8	322.0	322.0	320.0	7.74	7.58	7.54
	1.00	23.4	21.5	20.6	398.0	399.0	396.0	7.70	7.66	7.64
	1.25	22.9	20.7	20.5	504.0	489.0	491.0	7.74	7.72	7.60
	1.50	22.3	20.6	19.9	757.0	753.0	763.0	7.86	7.89	7.73

**Tabla 3-2. Continuación de la matriz completa de mediciones.
Ensayo experimental**

Corrida	Concentración del polímero [g/L]	Temperatura [°C]			Conductividad [μS/cm]			pH [unidades de pH]		
		t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h
7	0.75	20.2	19.0	19.7	468.0	475.0	473.0	7.63	7.64	7.44
	1.00	20.9	19.9	19.7	565.0	571.0	560.0	7.64	7.68	7.59
	1.25	20.8	19.8	19.6	669.0	666.0	679.0	7.72	7.72	7.55
	1.50	20.5	19.8	19.6	1065.0	1016.0	1074.0	7.80	7.80	7.72
8	0.75	21.9	20.0	20.4	359.0	368.0	373.0	7.22	7.34	7.38
	1.00	22.5	20.3	20.5	533.0	535.0	532.0	7.28	7.43	7.47
	1.25	23.0	20.4	20.4	642.0	647.0	644.0	7.42	7.47	7.51
	1.50	21.8	19.6	20.5	1027.0	1025.0	1020.0	7.70	7.66	7.67
9	0.75	19.3	19.4	19.3	559.0	577.0	558.0	7.61	7.58	7.44
	1.00	20.3	19.5	20.1	669.0	675.0	670.0	7.81	7.44	7.66
	1.25	20.8	19.7	20.3	810.0	811.0	817.0	7.74	7.60	7.65
	1.50	20.7	19.6	20.5	1244.0	1222.0	1239.0	7.62	7.70	7.70
10	0.75	21.9	21.7	20.6	575.0	619.0	620.0	7.77	7.63	7.77
	1.00	21.8	21.8	21.0	688.0	750.0	740.0	7.72	7.62	7.71
	1.25	22.0	21.6	20.9	844.0	903.0	907.0	7.72	7.62	7.73
	1.50	21.6	21.4	20.8	1295.0	1377.0	1385.0	7.78	7.71	7.80
11	0.75	22.3	20.9	20.8	471.0	473.0	472.0	7.78	7.78	7.81
	1.00	22.7	21.3	20.8	604.0	606.0	606.0	7.75	7.72	7.79
	1.25	22.3	21.3	20.9	714.0	720.0	719.0	7.77	7.73	7.79
	1.50	22.3	21.4	21.0	1111.0	1110.0	1115.0	7.87	7.85	7.87

**Tabla 3-2. Continuación de la matriz completa de mediciones.
Ensayo experimental**

Corrida	Concentración del polímero [g/L]	Temperatura [°C]			Conductividad [μS/cm]			pH [unidades de pH]		
		t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h
12	0.75	20.1	20.1	19.3	607.0	606.0	606.0	7.74	7.57	7.61
	1.00	20.7	20.5	19.5	726.0	598.0	708.0	7.75	7.60	7.65
	1.25	20.5	20.3	19.4	876.0	882.0	876.0	7.76	7.68	7.67
	1.50	20.5	20.2	18.8	1360.0	1360.0	1364.0	7.89	7.78	7.75
13	0.75	21.7	19.1	19.9	522.0	527.0	528.0	7.77	7.75	7.79
	1.00	22.1	19.8	19.9	644.0	650.0	650.0	7.82	7.87	7.82
	1.25	21.7	20.1	19.4	7774.0	779.0	784.0	7.82	7.82	7.77
	1.50	21.2	19.4	19.6	1204.0	1213.0	1216.0	7.91	7.93	7.95
14	0,75	21.8	20.7	20.1	527.0	530.0	531.0	7.77	7.78	7.81
	1.00	21.4	20.7	20.0	642.0	640.0	640.0	7.80	7.85	7.90
	1.25	21.2	20.7	19.9	790.0	793.0	787.0	7.74	7.88	7.87
	1.50	21.1	20.6	20.1	1183.0	1182.0	1121.0	7.86	7.96	7.95
15	0.75	23.1	22.2	20.6	475.0	476.0	473.0	7.86	7.82	7.86
	1.00	23.1	21.9	20.6	591.0	586.0	588.0	7.87	7.87	7.89
	1.25	22.9	21.6	20.8	722.0	714.0	712.0	7.87	7.91	7.91
	1.50	22.7	21.4	20.9	1099.0	1098.0	1087.0	7.99	8.03	8.04
16	0,75	21.0	19.9	20.0	642.0	647.0	644.0	7.80	7.53	7.45
	1.00	22.0	20.1	20.2	767.0	774.0	771.0	7.80	7.72	7.76
	1.25	21.0	20.4	20.2	934.0	938.0	938.0	7.80	7.74	7.74
	1.50	21.0	20.1	20.1	1425.0	1436.0	1423.0	7.90	7.81	7.79

**Tabla 3-2. Continuación de la matriz completa de mediciones.
Ensayo experimental**

Corrida	Concentración del polímero [g/L]	Temperatura [°C]			Conductividad [μS/cm]			pH [unidades de pH]		
		t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h	t=1h	t=2h	t=3h
17	0.75	22.0	20.9	20.7	534.0	536.0	532.0	7.70	7.49	7.40
	1.00	22.0	20.6	20.4	711.0	681.0	682.0	7.70	7.74	7.60
	1.25	22.0	20.7	20.4	834.0	832.0	829.0	7.70	7.86	7.69
	1.50	21.0	20.6	20.6	1278.0	1272.0	1272.0	7.90	7.91	7.77

Haciendo referencia a los valores de concentraciones teóricas manejadas en planta, también conocidos dichos valores como datos objetivos, (Nótese con más detalle en el Anexo 3-1, Consignas de explotación, sala de control PTAR), se tomaron cinco muestras de la solución preparada en planta, más exactamente a la descarga de las bombas (tipo centrífugas) de polímero, se llevaron al laboratorio y posteriormente se midieron los parámetros de conductividad, pH y temperatura para cada muestra. Esto se hizo durante cinco días consecutivos, desde el martes 15 de mayo hasta el 22 de 2012, incluido sólo días hábiles. Cabe aclarar que durante los días de toma de muestras, no se estaba llevando a cabo una preparación constante en planta, ni tampoco se realizaba dosificación de polímero permanente, aunque los agitadores permanecían encendidos. Las muestras tomadas a lo largo de estos días en horas de la mañana, correspondían a una preparación precedida realizada entre el horario de 12 p.m a 6 a.m, lo anterior, debido a problemas en los mantos de lodos de la PTAR, a causa del incremento de biosólido producido en el tratamiento.

Dichos datos de conductividad, pH y temperatura de la solución preparada en planta se midieron (Ver Tabla 3-3), con el propósito de utilizar éstos a ejemplo de comparación con los valores reales determinados a escala de laboratorio; esto permitirá comparar con los valores máximos y mínimos expuestos en la consigna de explotación, correspondiente éste a un valor exacto de concentración en [g/L] de 1.5 preparada en la PTAR, así como validar la técnica implementada y conocer que tan veraz y efectiva resulta. Cabe resaltar que el valor de 1.5 [g/L] que se maneja en planta, fue el recomendado por el fabricante del kit de preparación de polímero el mismo año en que la planta entró en operación, y dicho valor obedece a el esfuerzo máximo o ideal que deben hacer las bombas para cumplir su función de impulsar el fluido en solución, evitando con ello que trabajen forzadas, que se presente abrasión en las tuberías por colmatación de la solución viscosa, entre otros factores que intervienen. Este valor se controla en planta al aforar el tornillo dosificador de polímero y el caudal entrante al tanque.

Tabla 3-3. Caracterización de la solución de polímero preparado en planta

Parámetros	Medición reportada				
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
pH [unidades de pH]	8.95	8.86	8.63	8.43	7.59
Temperatura [°C]	18.66	19.20	18.20	19.23	18.73
Conductividad [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	426.00	661.00	638.00	592.67	704.67

Día 1: Martes 15 de mayo de 2012 / Día 2: Miércoles 16 de mayo de 2012 / Día 3: Jueves 17 de mayo de 2012 / Día 4: Viernes 18 de mayo de 2012 / Día 5: Martes 22 de mayo de 2012

3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de las mediciones de los parámetros de pH y temperatura se presentan mediante tablas que contienen las primeras 3 corridas realizadas, adicionalmente se muestra gráficamente, las restantes (14 gráficas) se pueden visualizar en el Anexo 3-2. Por el contrario, los datos de la medición de conductividad se presentan para las 17 corridas, junto con las gráficas que los representan.

En cuanto al comportamiento observado de forma general de la correlación entre los parámetros medidos de conductividad y los valores de las concentraciones requeridas, se muestra aproximadamente una linealidad entre estos datos, denotándose una correlación alta y directa entre los perfiles de conductividad versus concentración en todas las corridas. Se muestran variaciones que van desde los 226.98 a los 1300.55 [$\mu\text{S}/\text{cm}$].

- **pH [unidades de pH]**

Se puede observar mediante la tendencia de los datos que el parámetro de pH [unidades de pH] no varía de forma significativa conforme hay cambios de concentración [g/L]. Los rangos aplicados para cada gráfica de concentración y pH se encuentran entre 2 y 10 [unidades de pH], concentrando los resultados obtenidos en el rango entre 7 y 8 [unidades de pH]. Se tiene un valor máximo de pH de 7.93 [unidades de pH] y un valor mínimo de 7.31 [unidades de pH], de todas las corridas realizadas. En la Tabla 3-4 y desde la Figura 3-5 hasta la Figura 3-7, se observan las 3 primeras corridas realizadas, las restantes se detallan en el Anexo 3-3.

Tabla 3-4. Promedio total de los valores de pH para los valores de concentración, correspondiente a las 3 primeras corridas realizadas

Corridas	pH [unidades de pH] a 0.75 [g/L]	pH [unidades de pH] a 1.00 [g/L]	pH [unidades de pH] a 1.25 [g/L]	pH [unidades de pH] a 1.50 [g/L]
1	7.62	7.64	7.77	7.82
2	7.58	7.66	7.66	7.84
3	7.70	7.73	7.79	7.88

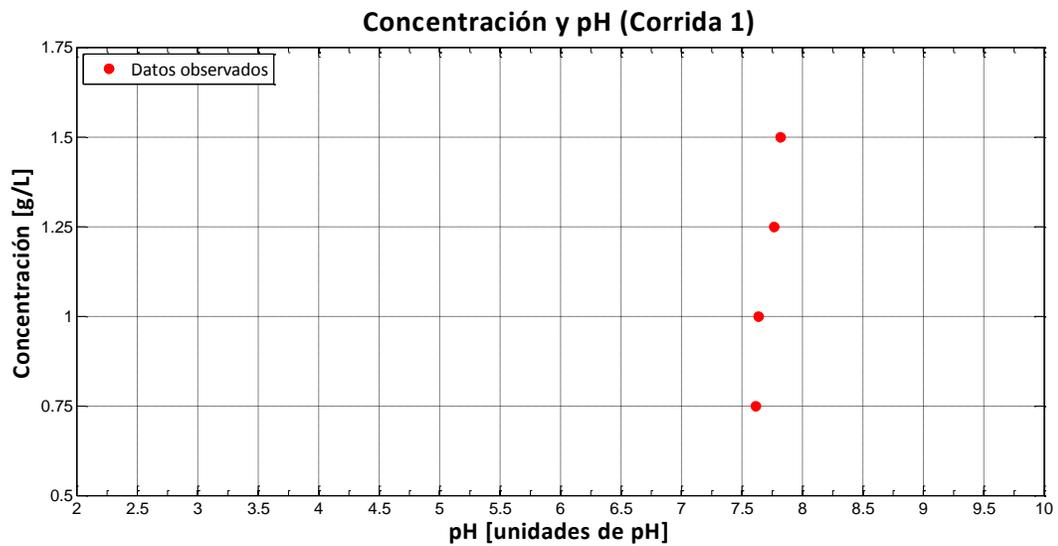


Figura 3-5. Concentración y pH. Corrida 1

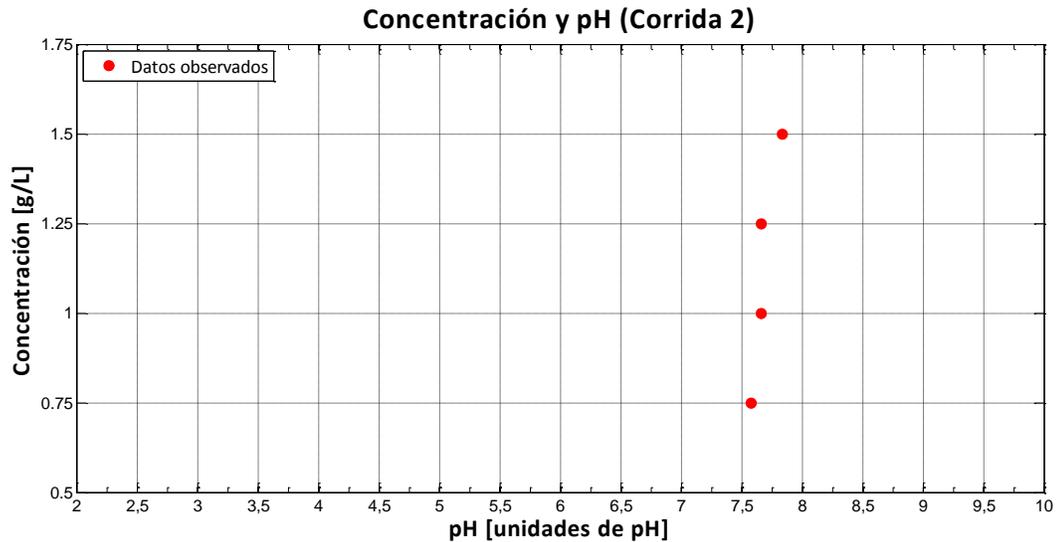


Figura 3-6. Concentración y pH. Corrida 2

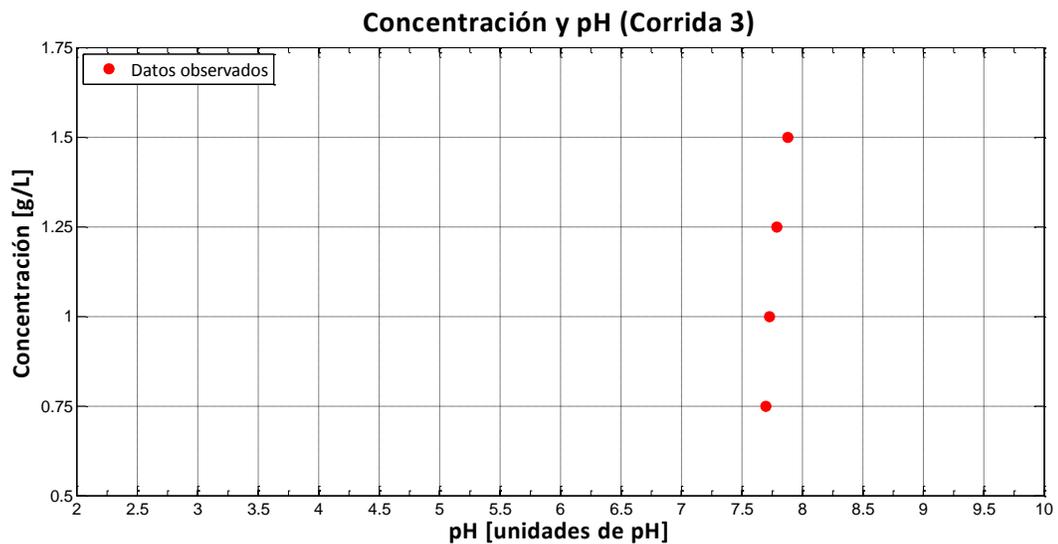


Figura 3-7. Concentración y pH. Corrida 3

- **Temperatura [°C]**

Se puede observar mediante la tendencia de los datos que el parámetro de Temperatura [°C] no varía de forma representativa cuando cambia la concentración [g/L]. Los rangos aplicados para cada gráfica de concentración y temperatura se encuentran entre 10 y 25 [°C], concentrando los resultados obtenidos en el rango entre 19 y 22 [°C]. Se tiene un valor máximo de temperatura de 21.97 [°C] y un valor mínimo de 19.33 [°C], de todas las corridas realizadas. En la Tabla 3-5 y desde la Figura 3-8. hasta la Figura 3-10 se aprecia las 3

primeras corridas realizadas, las restantes se pueden visualizar en el Anexo 3-4.

Tabla 3-5. Promedio total de los valores de temperatura para los valores de concentración, correspondiente a las 3 primeras corridas realizada

Corridas	Temperatura [°C] a 0.75 [g/L]	Temperatura [°C] a 1.00 [g/L]	Temperatura [°C] a 1.25 [g/L]	Temperatura [°C] a 1.50 [g/L]
1	20.00	20.10	20.03	19.97
2	19.57	19.77	19.93	20.10
3	20.03	20.77	20.53	20.37

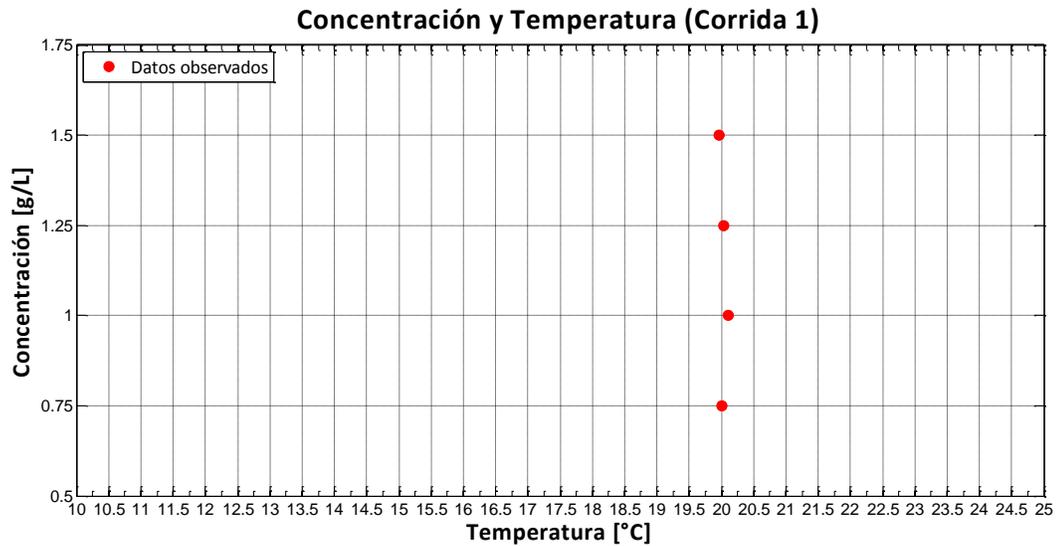


Figura 3-8. Concentración y temperatura. Corrida 1

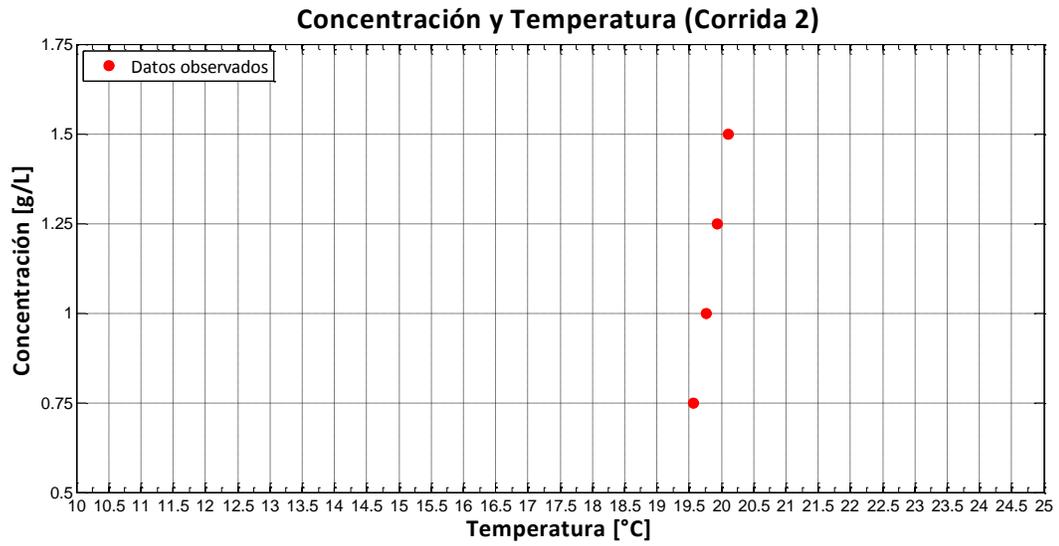


Figura 3-9. Concentración y temperatura. Corrida 2

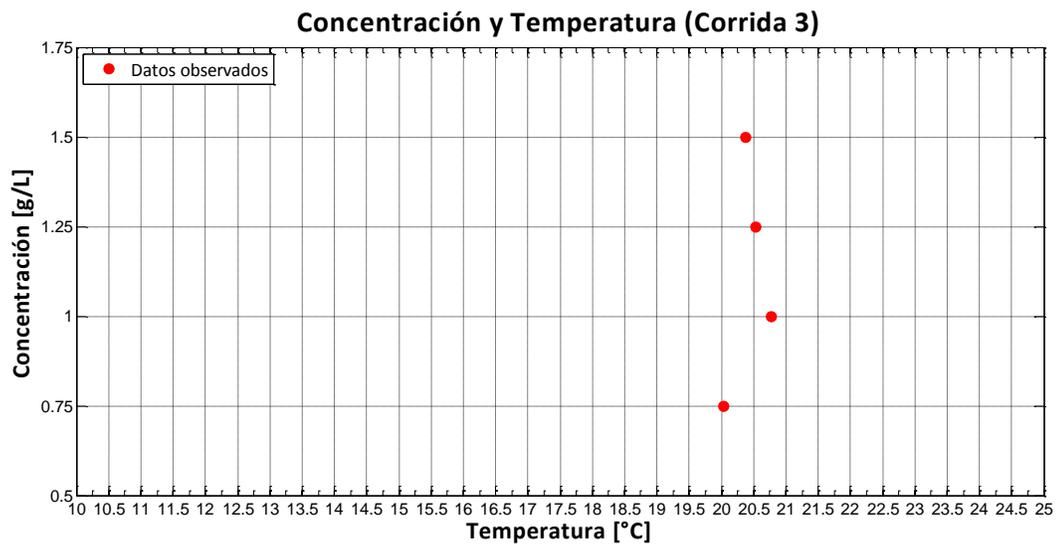


Figura 3-10. Concentración y temperatura. Corrida 3

- **Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]**

Se demuestra mediante la tendencia de los datos una alta correlación entre la concentración [g/L] y la conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. Aunque los rangos varían en todas las gráficas, se fijó el valor menor y mayor (200 y 1400 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]). Los valores máximos y mínimos de conductividad en todas las corridas fueron de 1300.55 y 226.98 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] respectivamente, correspondiente a las concentraciones máxima y mínima (0.75 y 1.50 [g/L]). (Ver Tabla 3-6. y figuras desde la 3-11 hasta la Figura 3-27).

Tabla 3-6. Promedio total de los valores de conductividad para cada valor de concentración, correspondiente a las 17 corridas realizadas.

Corridas	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 0.75 [g/L]	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 1.00 [g/L]	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 1.25 [g/L]	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 1.50 [g/L]
1	336.53	439.53	529.53	871.53
2	326.88	438.22	527.55	874.22
3	245.18	334.18	445.52	751.85
4	392.98	490.98	630.65	1040.65
5	353.03	464.37	582.03	697.70
6	226.98	303.32	400.32	663.32
7	379.70	473.03	579.03	959.37
8	250.27	416.93	527.93	907.60
9	491.82	613.15	771.82	1239.48
10	345.65	478.98	591.32	985.65
11	482.53	553.53	754.20	1237.53
12	379.32	501.65	632.65	1064.65
13	396.53	507.87	657.20	1029.20
14	348.27	461.93	589.60	968.27
15	516.88	643.22	809.22	1300.55
16	402.55	559.88	700.22	1142.55
17	433.22	539.88	681.22	1103.55

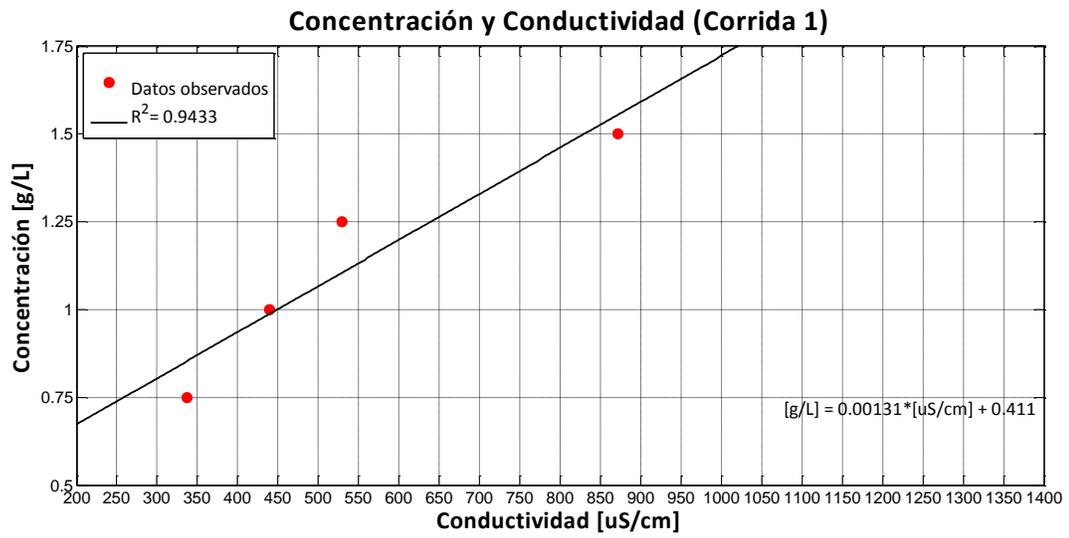


Figura 3-11. Concentración y conductividad. Corrida 1

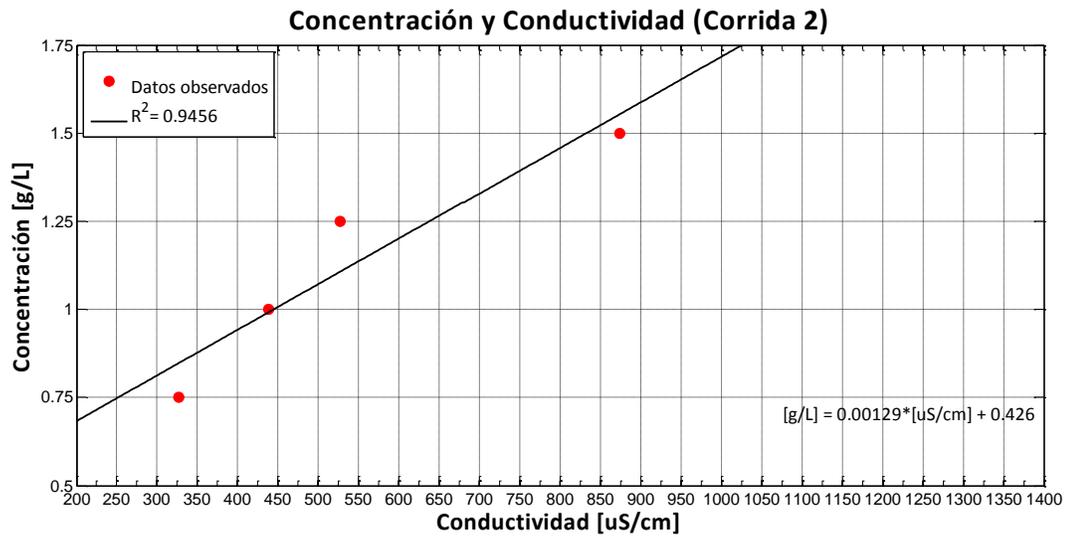


Figura 3-12. Concentración y conductividad. Corrida 2

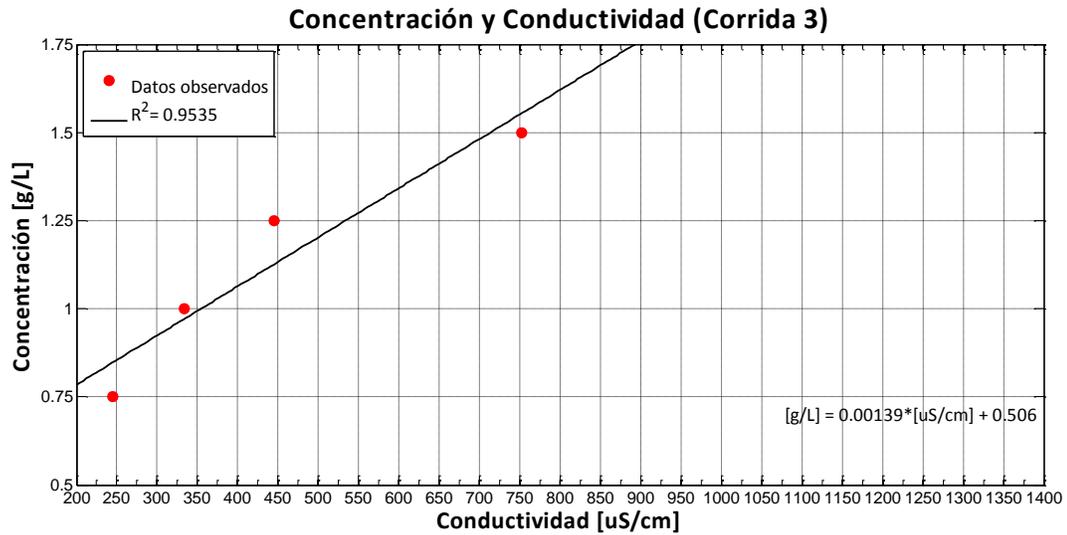


Figura 3-13. Concentración y conductividad. Corrida 3

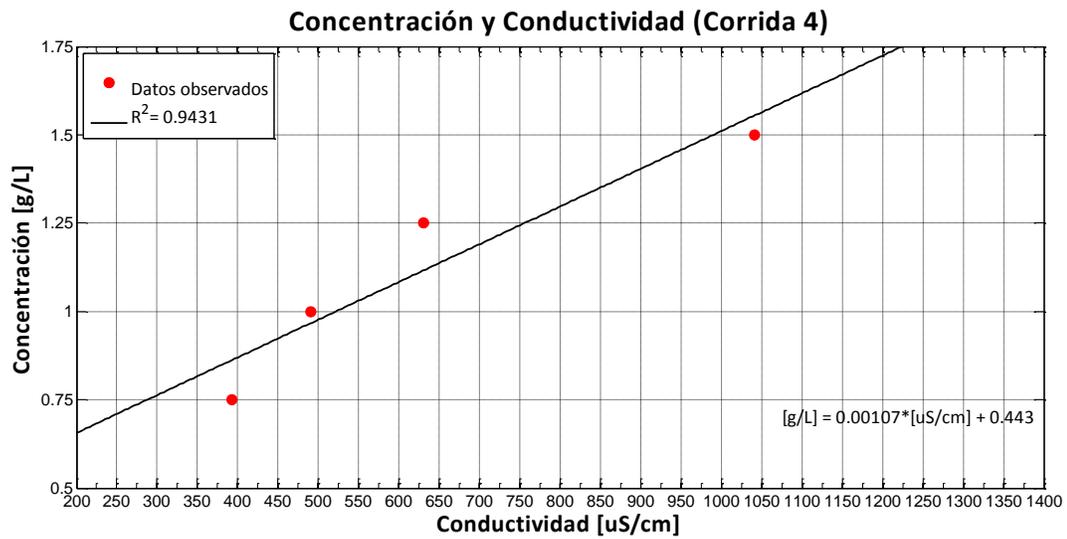


Figura 3-14. Concentración y conductividad. Corrida 4

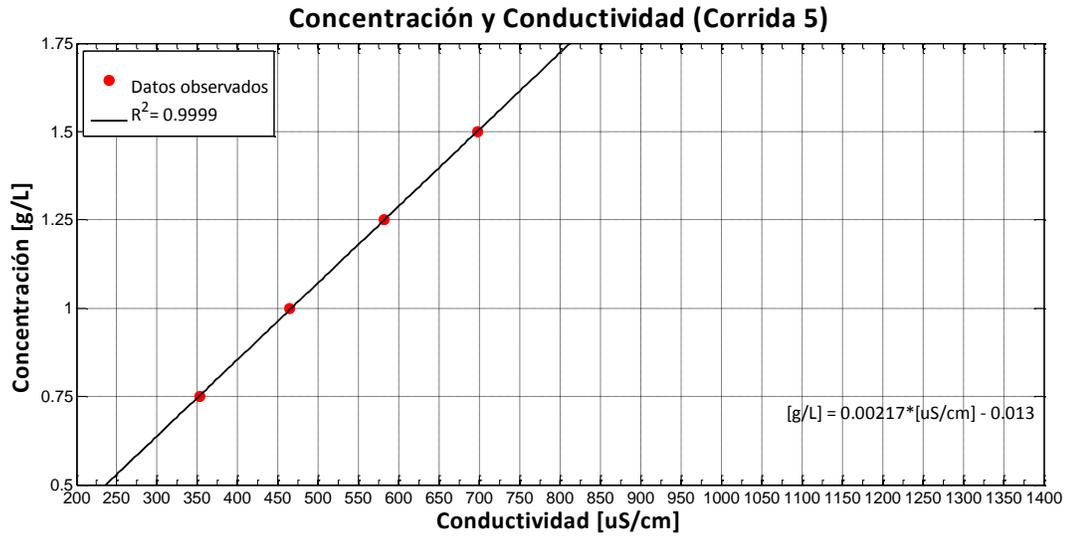


Figura 3-15. Concentración y conductividad. Corrida 5

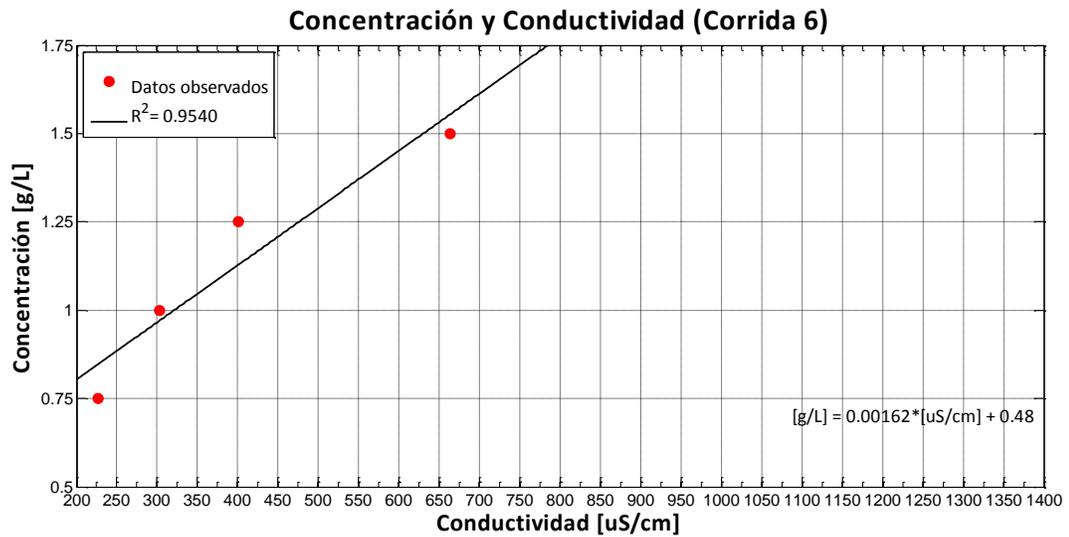


Figura 3-16. Concentración y conductividad. Corrida 6

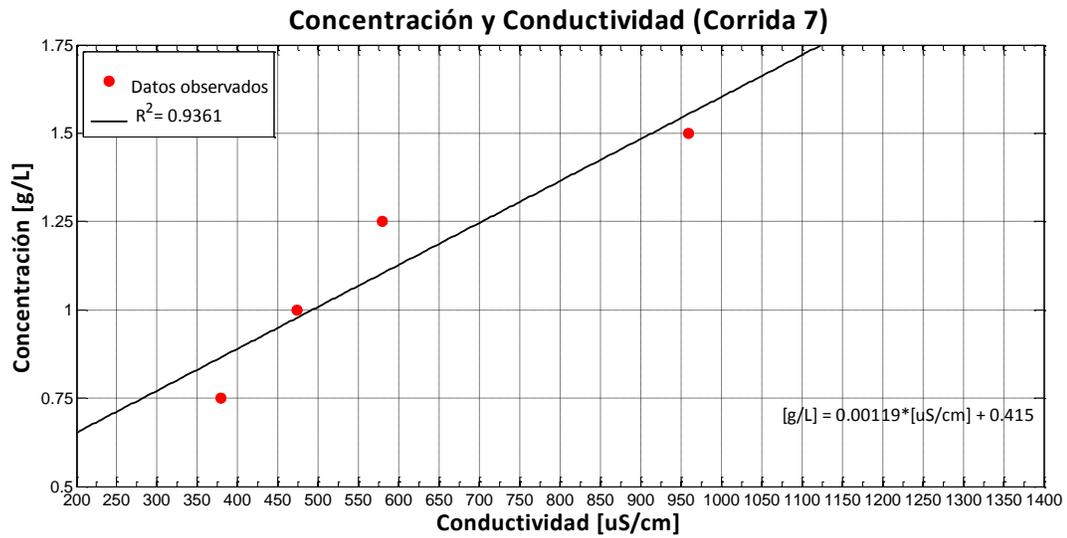


Figura 3-17. Concentración y conductividad. Corrida 7

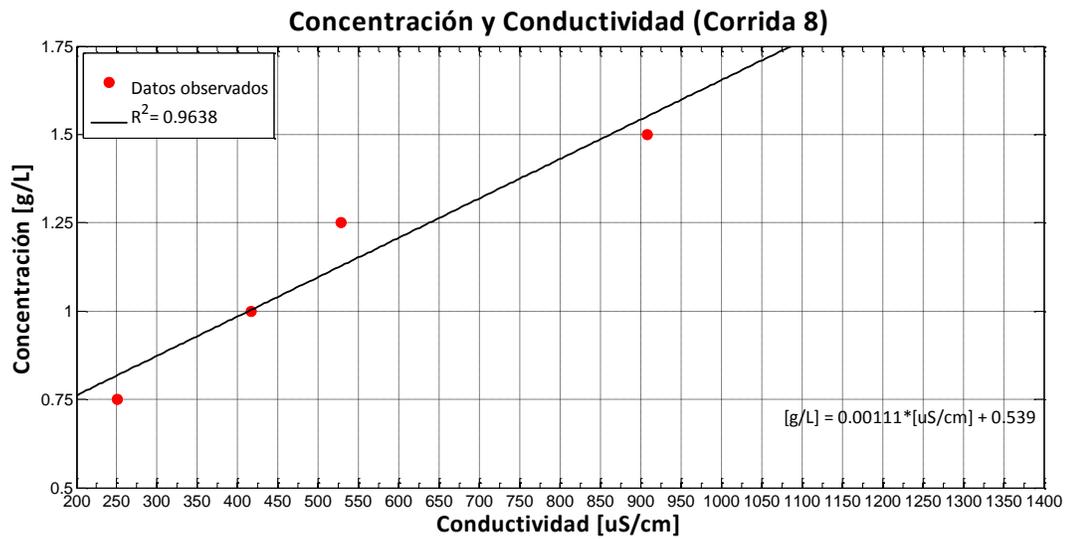


Figura 3-18. Concentración y conductividad. Corrida 8

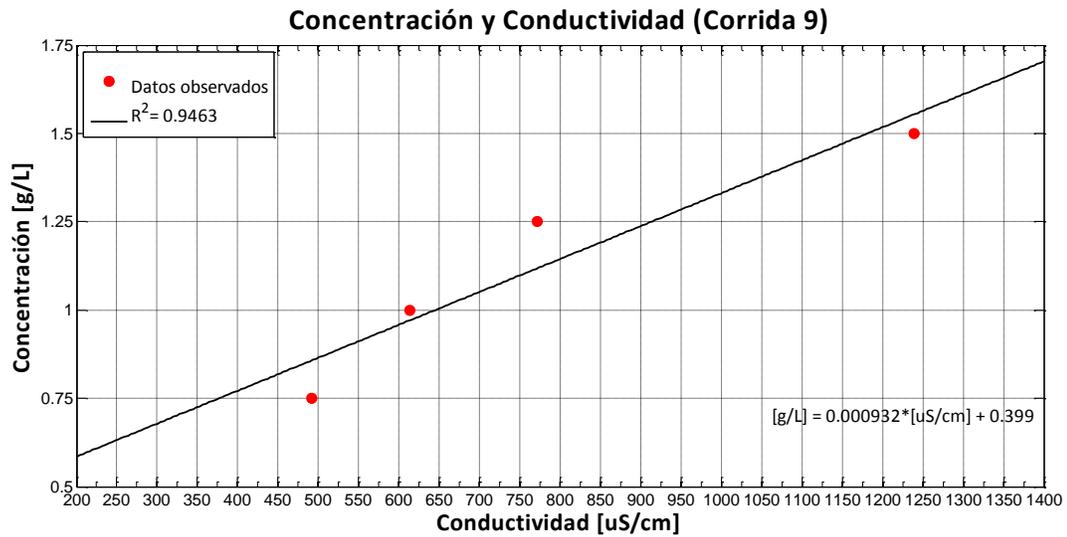


Figura 3-19. Concentración y conductividad. Corrida 9

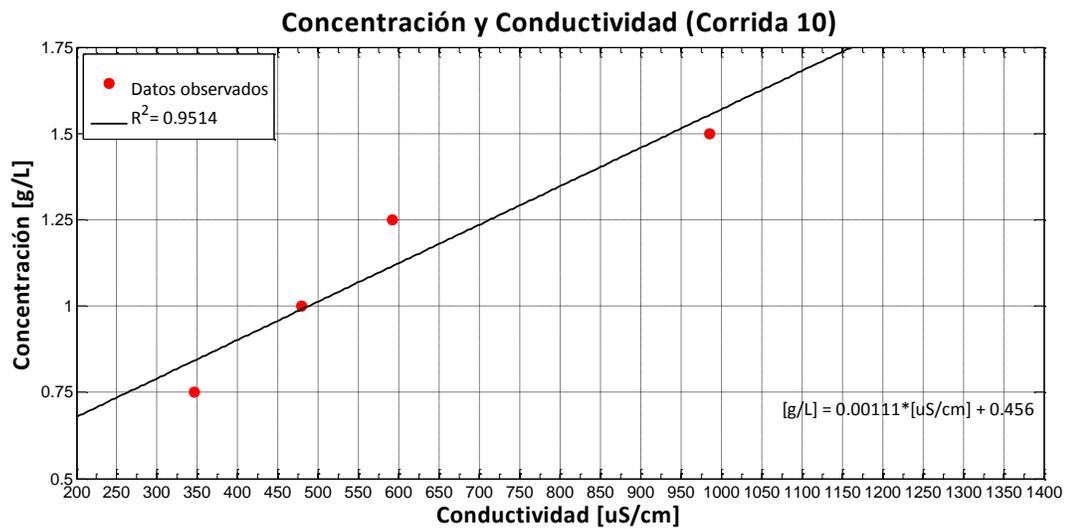


Figura 3-20. Concentración y conductividad. Corrida 10

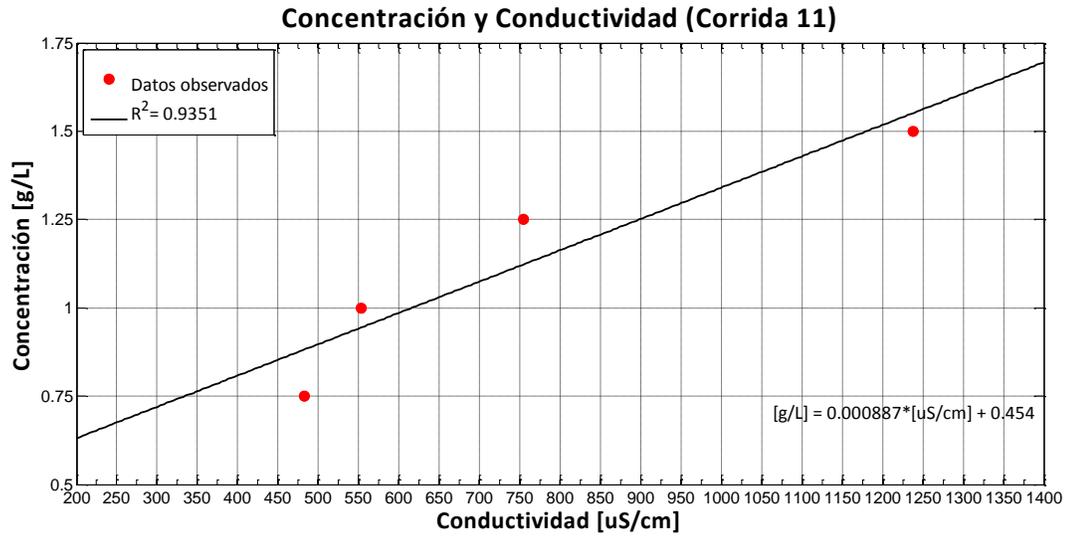


Figura 3-21. Concentración y conductividad. Corrida 11

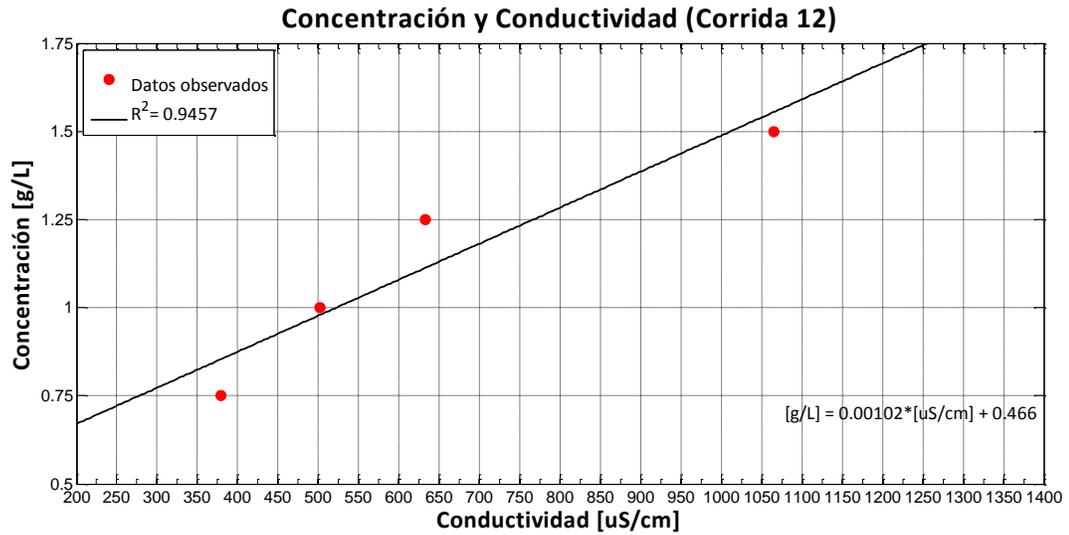


Figura 3-22. Concentración y conductividad. Corrida 12

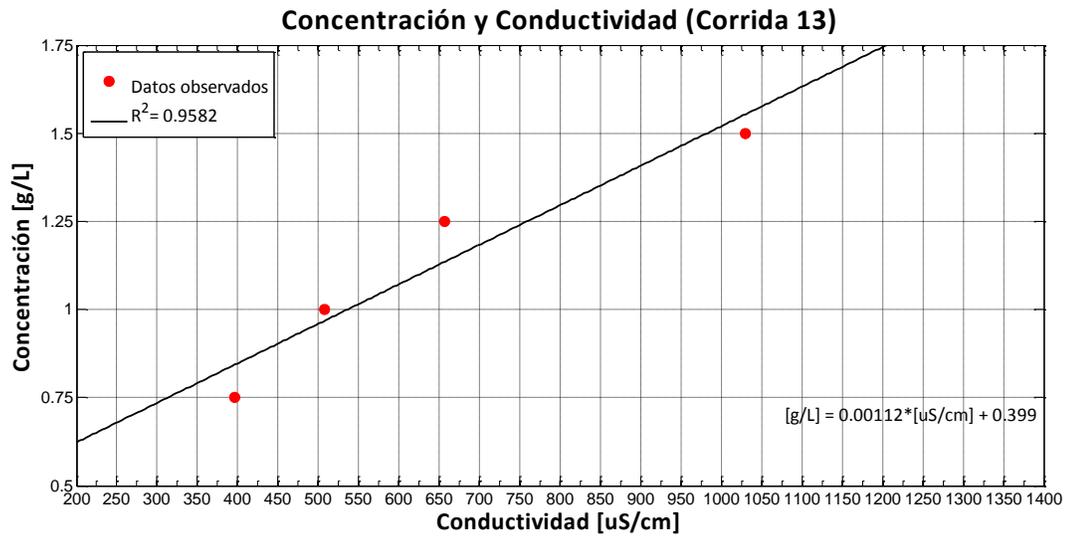


Figura 3-23. Concentración y conductividad. Corrida 13

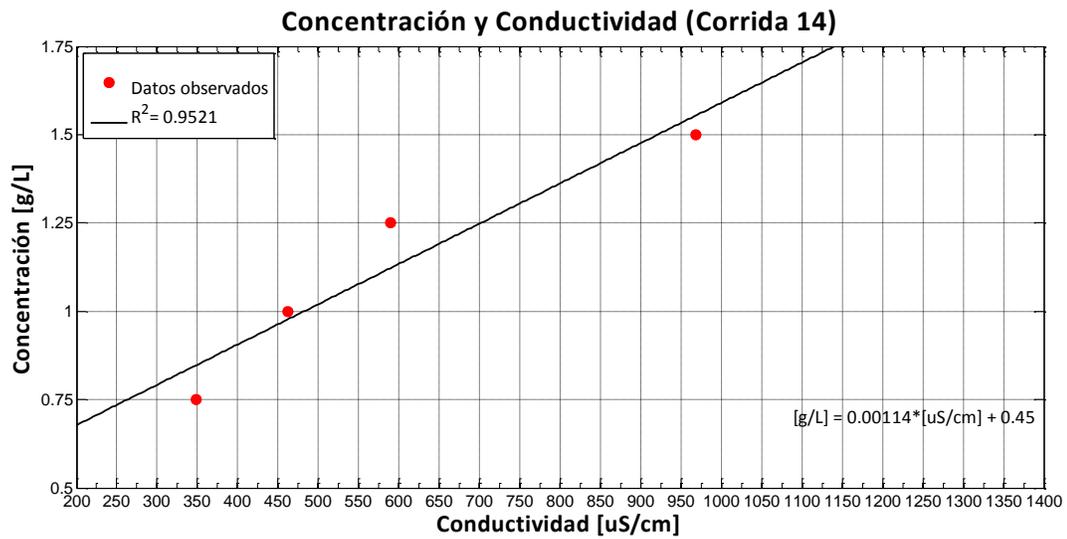


Figura 3-24. Concentración y conductividad. Corrida 14

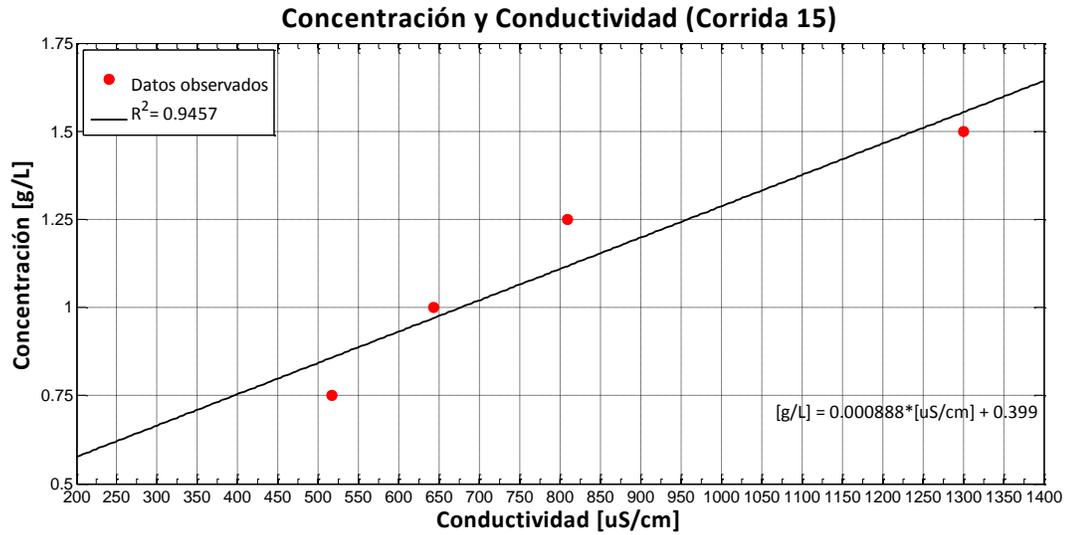


Figura 3-25. Concentración y conductividad. Corrida 15

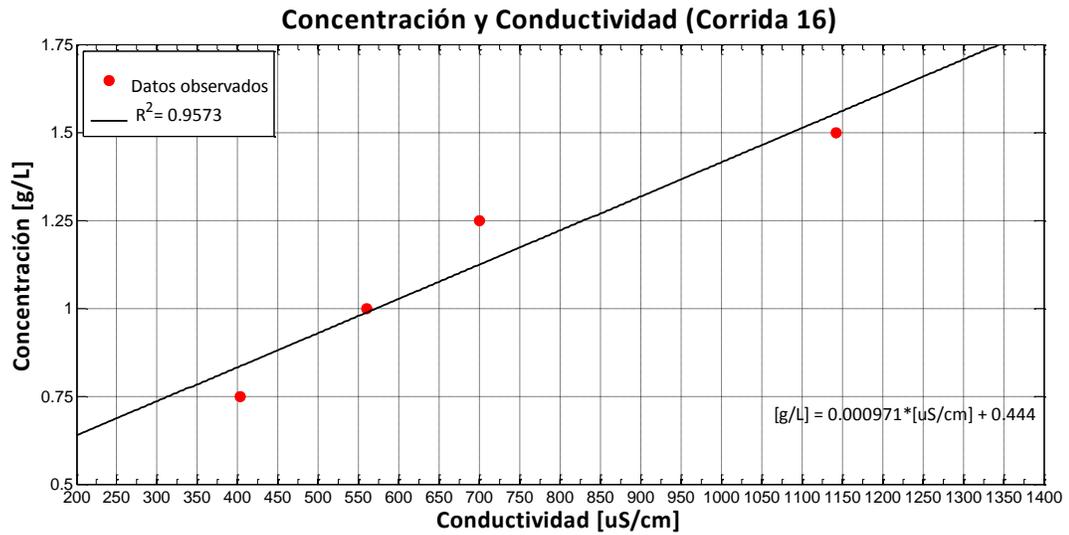


Figura 3-26. Concentración y conductividad. Corrida 16

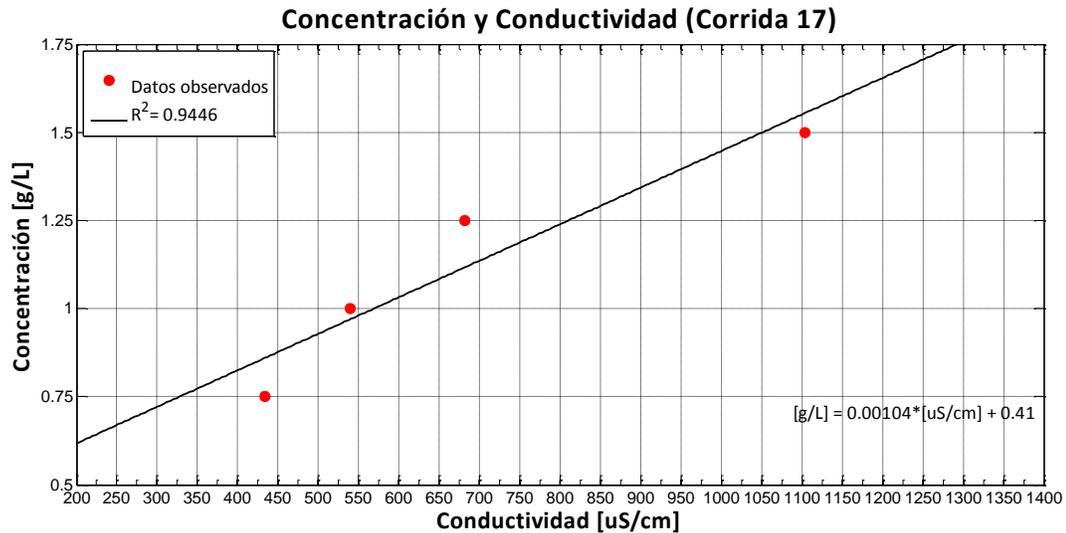


Figura 3-27. Concentración y conductividad. Corrida 17

3.3. EVALUACIÓN ANALÍTICA DE LA METODOLOGÍA

Los valores promedios medidos de conductividad de las muestras tomadas en planta, entre los días 15 a 22 de mayo de 2012, fueron en su orden: 426, 661, 638, 592.7 y 704.7 [$\mu\text{S}/\text{cm}$].

De acuerdo con los coeficientes de correlación obtenidos en las 17 corridas, se efectuaron inicialmente pruebas para validar y analizar de manera individual cada uno de ellos. (Ver desde Tabla 3-8 hasta la Tabla 3-24). Los coeficientes de correlación se pueden apreciar en la Tabla 3-7 junto con las ecuaciones que los representa, los cuales están ordenados desde el valor más alto hasta el mínimo.

Tabla 3-7. Coeficientes de correlación de las 17 corridas

No. de la corrida	Coefficientes de correlación [R^2]	Ecuaciones
5	0,9999	$[\text{g}/\text{L}] = 0.00217 * [\text{uS}/\text{cm}] - 0.013$
8	0,9638	$[\text{g}/\text{L}] = 0.00111 * [\text{uS}/\text{cm}] + 0.539$
13	0,9582	$[\text{g}/\text{L}] = 0.00112 * [\text{uS}/\text{cm}] + 0.399$
16	0,9573	$[\text{g}/\text{L}] = 0.00097 * [\text{uS}/\text{cm}] + 0.444$
6	0,9540	$[\text{g}/\text{L}] = 0.00162 * [\text{uS}/\text{cm}] + 0.480$

Tabla 3-7. Continuación de los coeficientes de correlación de las 17 corridas

No. de la corrida	Coefficientes de correlación [R ²]	Ecuaciones
3	0,9535	[g/L]=0.00139*[uS/cm]+0.506
14	0,9521	[g/L]=0.00114*[uS/cm]+0.450
10	0,9514	[g/L]=0.00111*[uS/cm]+0.456
9	0,9463	[g/L]=0.00093*[uS/cm]+0.400
12	0,9457	[g/L]=0.00102*[uS/cm]+0.466
15	0,9457	[g/L]=0.00088*[uS/cm]+0.399
2	0,9456	[g/L]=0.00129*[uS/cm]+0.426
17	0,9446	[g/L]=0.00104*[uS/cm]+0.410
1	0,9433	[g/L]=0.00131*[uS/cm]+0.411
4	0,9431	[g/L]=0.00107*[uS/cm]+0.443
7	0,9361	[g/L]=0.00119*[uS/cm]+0.415
11	0,9351	[g/L]=0.00088*[uS/cm]+0.454

En la Tabla 3.8 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9999 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00217 \times [uS/cm] - 0.013$$

Tabla 3-8. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9999

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.91142
1.5	1.42137
1.5	1.37146
1.5	1.27309
1.5	1.51613

En la Tabla 3.9 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9638 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00111 \times [uS/cm] - 0.539$$

Tabla 3-9. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9638

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	1.01186
1.5	1.27271
1.5	1.24718
1.5	1.19686
1.5	1.32118

En la Tabla 3.10 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9582 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00112 \times [uS/cm] - 0.399$$

Tabla 3-10. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9582

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.87612
1.5	1.13932
1.5	1.11356
1.5	1.06279
1.5	1.18823

En la Tabla 3.11 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9573 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00971 \times [uS/cm] - 0.444$$

Tabla 3-11. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9573

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.85764
1.5	1.08583
1.5	1.06349
1.5	1.01948
1.5	1.12823

En la Tabla 3.12 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9540 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00162 \times [\mu S/cm] - 0.48$$

Tabla 3-12. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9540

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	1.17012
1.5	1.55082
1.5	1.51356
1.5	1.44012
1.5	1.62156

En la Tabla 3.13 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9535 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00139 \times [\mu S/cm] - 0.506$$

Tabla 3-13. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9535

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	1.09814
1.5	1.42479
1.5	1.39282
1.5	1.32981
1.5	1.48549

En la Tabla 3.14 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9521 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00114 \times [uS/cm] - 0.45$$

Tabla 3-14. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9521

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.93564
1.5	1.20354
1.5	1.17732
1.5	1.12564
1.5	1.25332

En la Tabla 3.15 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9514 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00111 \times [uS/cm] - 0.456$$

Tabla 3-15. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9514

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.92886
1.5	1.18971
1.5	1.16418
1.5	1.11386
1.5	1.23818

En la Tabla 3.16 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9463 calculado mediante la ecuación de la recta:
 $[g/L] = 0.00093 \times [uS/cm] + 0.400$

Tabla 3-16. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9463

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.79618
1.5	1.01473
1.5	0.99334
1.5	0.95121
1.5	1.05537

En la Tabla 3.17 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9457 calculado mediante la ecuación de la recta:
 $[g/L] = 0.00102 \times [uS/cm] + 0.466$

Tabla 3-17. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9457

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.90052
1.5	1.14022
1.5	1.11676
1.5	1.07055
1.5	1.18479

En la Tabla 3.18 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9457 calculado mediante la ecuación de la recta:
 $[g/L] = 0.00088 \times [uS/cm] + 0.399$

Tabla 3-18. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9457

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.77388
1.5	0.98068
1.5	0.96044
1.5	0.92057
1.5	1.01913

En la Tabla 3.19 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9456 calculado mediante la ecuación de la recta:
 $[g/L] = 0.00129 \times [uS/cm] + 0.426$

Tabla 3-19. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9456

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.97554
1.5	1.27869
1.5	1.24902
1.5	1.19058
1.5	1.33506

En la Tabla 3.20 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9446 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00104 \times [uS/cm] + 0.410$$

Tabla 3-20. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9446

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.85304
1.5	1.09744
1.5	1.07352
1.5	1.02640
1.5	1.14288

En la Tabla 3.21 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9433 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00131 \times [uS/cm] + 0.411$$

Tabla 3-21. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9433

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.96906
1.5	1.27691
1.5	1.24678
1.5	1.18743
1.5	1.33415

En la Tabla 3.22 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9431 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00107 \times [uS/cm] + 0.443$$

Tabla 3-22. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9431

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.89882
1.5	1.15027
1.5	1.12566
1.5	1.07718
1.5	1.19702

En la Tabla 3.23 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9361 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00119 \times [uS/cm] + 0.415$$

Tabla 3-23. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9361

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.92194
1.5	1.20159
1.5	1.17422
1.5	1.12031
1.5	1.25359

En la Tabla 3.24 se presentan los valores de concentración real [g/L] alcanzados a partir de un coeficiente de correlación de 0.9351 calculado mediante la ecuación de la recta:

$$[g/L] = 0.00088 \times [uS/cm] + 0.454$$

Tabla 3-24. Validación de la concentración real a partir del coeficiente de 0.9351

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.82888
1.5	1.03568
1.5	1.01544
1.5	0.97557
1.5	1.07413

Por ser los valores de concentración calculados muy variables entre un coeficiente de correlación y otro, se genera cierta incertidumbre y, por tanto, no se puede recomendar o alabar una única ecuación que represente de forma certera y confiable la curva de estimación definitiva de concentración de poliacrilamida en planta. En este orden de ideas, se realizará un promedio aritmético a partir de las 17 corridas realizadas, esto permitirá complementar y darle robustez al procedimiento propuesto, a fin de que permita estimar un valor de concentración lo más parecido a la realidad (Ver Tabla 3-25).

Tabla 3-25. Promedio de conductividades para cada concentración

Corridas	Conductividad [$\mu\text{S/cm}$] a 0.75 [g/L]	Conductividad [$\mu\text{S/cm}$] a 1.00 [g/L]	Conductividad [$\mu\text{S/cm}$] a 1.25 [g/L]	Conductividad [$\mu\text{S/cm}$] a 1.50 [g/L]
5	353.03	464.37	582.03	697.70
8	250.27	416.93	527.93	907.60
13	396.53	507.87	657.20	1029.20
16	402.55	559.88	700.22	1142.55
6	226.98	303.32	400.32	663.32
3	245.18	334.18	445.52	751.85
14	348.27	461.93	589.60	968.27
10	345.65	478.98	591.32	985.65
9	491.82	613.15	771.82	1239.48
12	379.32	501.65	632.65	1064.65
15	516.88	643.22	809.22	1300.55
2	326.88	438.22	527.55	874.22
17	433.22	539.88	681.22	1103.55
1	336.53	439.53	529.53	871.53
4	392.98	490.98	630.65	1040.65
7	379.70	473.03	579.03	959.37
11	482.53	553.53	754.20	1237.53
Promedios	371.08	483.57	612.35	990.45

La gráfica de correlación de concentración y conductividad aún con datos promedios muestra muy claramente el incremento del valor de conductividad a medida aumenta la concentración (Ver Figura 3-28). A una concentración de 0.75 [g/L] se tiene un valor mínimo promedio de conductividad de 371.08 [$\mu\text{S/cm}$], mientras que el valor máximo promedio reportado a una concentración de 1.50 es de 990.45 [$\mu\text{S/cm}$]; pasando por una concentración de 1.00 [g/L] con un valor de conductividad de 483.57 [$\mu\text{S/cm}$], y a 1.25 [g/L] un valor de 612.35 [$\mu\text{S/cm}$].

Un coeficiente de correlación del total de los promedios recopilados calculado en 95.21% (0.9521), nos demuestra una relación aceptable entre la concentración y la conductividad.

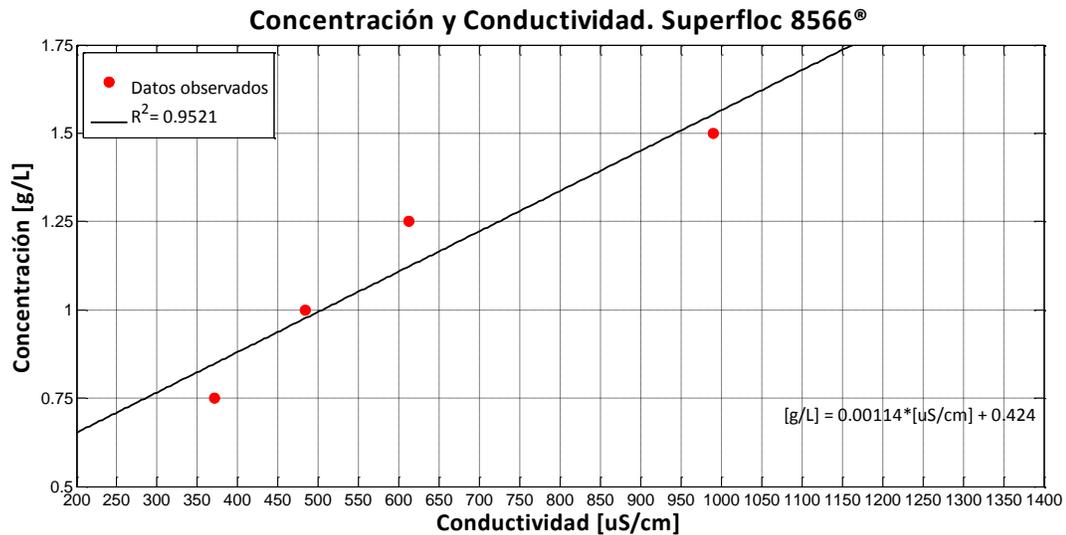


Figura 3-28. Correlación de Concentración y Conductividad del polímero utilizado en planta, Superfloc 8566®

Al utilizar la ecuación de la recta generada mediante método por conductividad, con un coeficiente de correlación de 0.9521, se puede calcular con mayor exactitud la concentración real en [g/L] a la que se encontraba la dilución en el tanque de preparación de polímero en campo durante los 5 días muestreados, bajo las condiciones manejadas en planta, las cuales son: 5 [Hz] de velocidad de tornillo y 13,000 [L/h] de agua de dilución. (Ver Tabla 3-26).

Tabla 3-26. Validación de la concentración en la solución de polímero preparada en planta (5 días)

Concentración Teórica (PTAR) [g/L]	Concentración Real [g/L] Muestras planta
1.5	0.90964
1.5	1.17754
1.5	1.15132
1.5	1.09967
1.5	1.22735

4. PROPUESTA METODOLÓGICA

La técnica a implementar consiste esencialmente en la medición del parámetro de conductividad de la solución preparada *in situ*, para luego con este valor calcular con un alto grado de correlación la concentración real de poliacrilamida contenida en la solución en planta (Ver Figura 4-1).

Dicha metodología se considera de gran utilidad por su practicidad, ya que permite tener una lectura rápida y eficiente del valor de concentración real manejado en planta. Es por esto que podrá ser usada en las actividades diarias llevadas a cabo por el grupo de personas que manejan el área de operación de las plantas, que para este caso involucra a los operarios, técnicos y tecnólogos, a cargo de la operación del proceso de pretratamiento en la PTAR EL SALITRE.

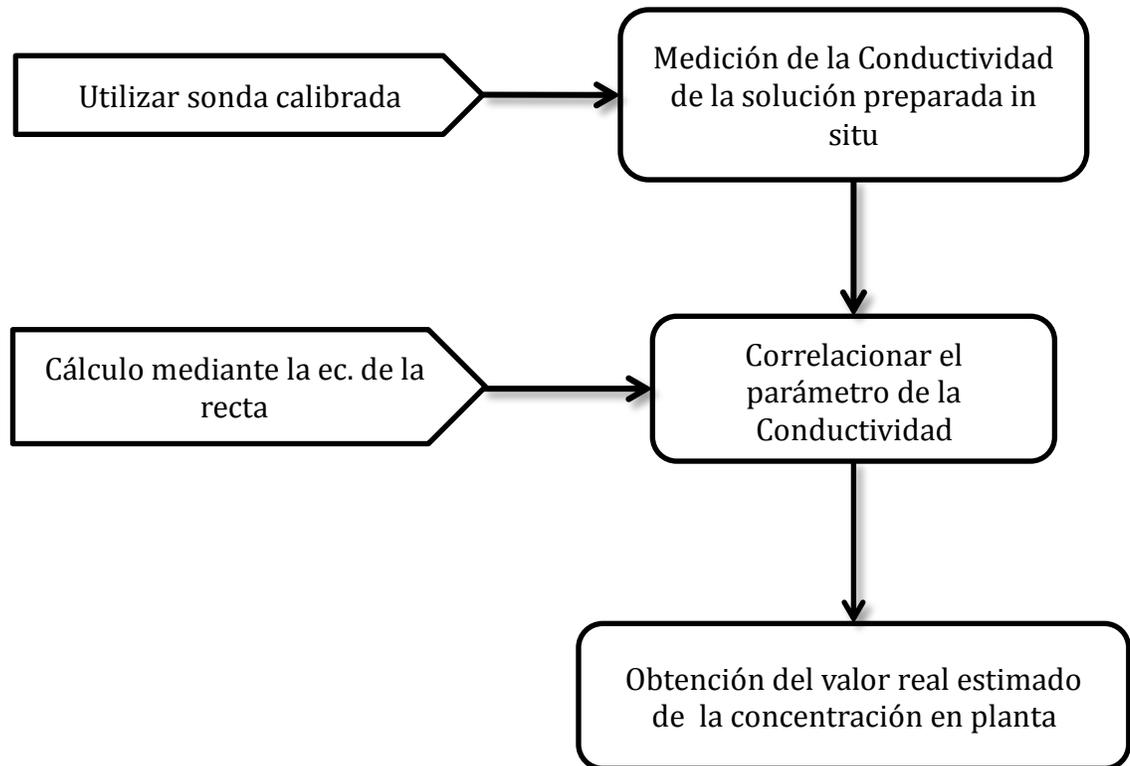


Figura 4-1. Propuesta Metodológica para la estimación de la concentración real manejada en planta

4.1. MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA SOLUCIÓN PREPARADA EN PLANTA

El primer paso consiste en la toma de muestra de la solución preparada en planta, se lleva al laboratorio para que le sea medido por medio de una sonda calibrada la lectura de la conductividad.

4.2. CORRELACIONAR EL PARÁMETRO DE LA CONDUCTIVIDAD

Utilizando la gráfica que mejor correlacione los parámetros de concentración y conductividad, se calcula el valor de concentración en [g/L] a la que se encuentra la solución de poliacrilamida en este instante de tiempo. Se utiliza la ecuación de la recta hallada para mayor exactitud.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Para estimar la concentración a la que se encuentra las soluciones de polímero preparadas en plantas de tratamiento de agua, con el objeto de asistir los procesos y operaciones de tratamiento, se hace necesario contar con procedimientos prácticos que agilicen los trabajos y que se obtengan datos confiables que permitan la toma de decisiones a partir de estos, preferiblemente técnicas o procedimientos validados y estandarizados para cada caso específico.

Con el presente estudio se comprobó que es posible estimar con un alto grado de correlación la concentración de poliacrilamida empleada para asistir procesos de sedimentación primaria químicamente asistido, definiendo para ello un procedimiento práctico desarrollado a escala de laboratorio y utilizando la medición de la conducción eléctrica. Los pasos que fueron requeridos para tal fin, sugirieron la realización de pruebas de preparación de soluciones de polímero requeridas, así como la medición de variables de control que aportaban al proceso, y posterior lectura rápida del parámetro de conductividad.

Por medio del procedimiento llevado a cabo se logró validar la concentración teórica de polímero en solución manejada en la PTAR, inicialmente con datos individuales de conductividad a partir de los mejores coeficientes de correlación (entre 0.95 y 0.99) y, luego, con los datos promedios de los mismos. Con la primera validación realizada, se obtuvo una variabilidad apreciable en los valores de concentración entre un coeficiente de correlación y otro, al evaluar los cinco valores de conductividad caracterizados en planta. Se muestra claramente para todas las validaciones realizadas que las concentraciones reales calculadas aumentan a medida que incrementan los valores de conductividad caracterizados. Se puede apreciar una aproximación mayor al valor de concentración teórico al realizar la validación con el valor de conductividad medido de 704.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para las 8 corridas seleccionadas, siendo éste el último y el mayor de los cinco días muestreados. Esto se puede explicar por el hecho que éste último día de caracterización, se reactivó la dosificación de polímero al agua residual, y por el contrario los cuatro días anteriores a éste no se estaba llevando a cabo una preparación constante en planta, quedando la solución agitada por varias horas.

Con la validación realizada tomando los promedios aritmético calculados a partir de las 8 corridas seleccionadas, se obtuvo una correlación aceptable de 0.9521, reconociendo con esto la veracidad de la técnica para la estimación de valores de concentración real de poliacrilamida en las soluciones de polímero preparadas en planta. Se puede evidenciar mediante esta validación definitiva que la concentración a la que se encuentra la solución del tanque de preparación de polímero en campo, establecida por el sistema de supervisión, no coincide con el valor de concentración real relacionada mediante el método por conductividad, denotándose una inconsistencia pues dichos valores están desviados y no se encuentran cercanos o próximos al hallado por medio del método propuesto. Esto quiere decir, que durante los cinco días muestreados, se tenía un consumo de polímero en planta menor al considerado en sala de operaciones, lo cual produce un ahorro de producto químico que no está siendo reconocido. Dicho ahorro posiblemente se

debe a los costos que implica la compra de producto químico (polímero), el cual debe ser economizado al máximo.

Se considera un factor determinante para obtener resultados más confiables en este tipo de estudios, el número de preparaciones y mediciones realizadas (expresado esto en un tiempo mayor para llevar a cabo la etapa experimental), pues es bien sabido que entre mas datos recopilados se tenga, se logra aumentar el grado de correlación calculado, permitiéndose con esto la obtención de resultados más cercanos a la realidad. Para este caso, se contaba con un tiempo corto para realizar los ensayos en el laboratorio de la planta, logrando hacer 17 corridas y, a partir de éstas, analizar la correlación entre las variables medidas. Además, se caracterizó por 5 días la solución preparada en planta, logrando validar el método sólo con éstos 5 valores de conductividad.

Por lo anterior, se hace necesario que el procedimiento definido en este trabajo sea corroborado por los operarios encargados del pretratamiento de la planta, ya que se necesita realizar más pruebas a nivel de laboratorio (preparación y medición de soluciones requeridas), para revalidar el método. Se hace la salvedad puntualizando que es más óptimo o apropiado realizar la caracterización de la solución preparada, cuando se tenga una operación continua en planta y que la preparación no se vea afectada o interrumpida, permitiendo con esto una mayor aproximación a la concentración real.

El procedimiento definido suple la necesidad expuesta por los funcionarios de la PTAR, al no tener un procedimiento guía que sea fácil de usar, que les permita estimar la concentración de poliacrilamida que se prepara en planta, con la finalidad de asistir el proceso de sedimentación primaria químicamente asistido. Así mismo, con la implementación diaria del procedimiento definido se espera controlar el proceso de preparación de solución de polímero, dándole un uso eficiente al producto químico manejado en planta.

5.2 RECOMENDACIONES

Se le sugiere al grupo de operarios encargados de las labores habituales llevado a cabo en el proceso de pretratamiento, ajustar el valor teórico de concentración manejado (expresado en [g/L]), reportado en la consigna de explotación de la PTAR, con la finalidad de tener control en el manejo y/o consumo exacto del polímero empleado en el proceso de preparación de solución de polímero.

Se recomienda que se realice el procedimiento definido en este trabajo cada turno de 24 horas, con el objetivo de que se reporte diariamente el valor de concentración real manejado en planta. Igualmente cada vez que ocurra alguna eventualidad en la planta que requiera la parada y posterior reactivación de la misma.

Es necesario reconocer que la metodología sugerida en este trabajo sólo se podrá implementar, usando el equipo de conductividad empleado en las mediciones realizadas.

También se recomienda realizar un estudio detallado sobre la factibilidad de contar en la

planta, más exactamente en el tanque de preparación de polímero con un sensor que mida la conductividad a la que se encuentra la solución cada intervalo de tiempo, y, mediante esta señal regule ya sea la dosificación de polímero y/o el caudal de dilución, con el fin de que la concentración se mantenga dentro del rango estipulado, y se tenga con esto un control automatizado en línea. Este estudio debe incluir la afectación en los costos de producto químico sobre el presupuesto de funcionamiento de la planta, evaluando la optimización del proceso de preparación.

Para futuras investigaciones es recomendable incluir o tener en cuenta el estudio de la variación que tiene la conductividad influenciada por la temperatura, con la finalidad de analizar el comportamiento y la afectación de estos parámetros físicos de calidad de agua.

6. REFERENCIAS

- Aguilar, M. I., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., Ortuño, J. F., Meseguer, V., & Fuentes, A. (2005). Improvement of Coagulation-Flocculation Process using Anionic Polyacrylamide as Coagulant aid. *Chemosphere*, *58*, 47-56.
- Aiyuk, S., Amoako, J., Raskin, L., van Haandel, A., & Verstraete, W. (2004). Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept. *Water Research*, *38*(13), 3031-3042. doi: 10.1016/j.watres.2004.04.040
- Albertson, O., & Sherwood, R. (1967). Phosphate Extraction Process. Yakima, Washington: PacificNorthwest Section of the WPCF.
- AlliedChemicalCorporation. (1970). The Use of Aluminum Sulfate Phosphorus Reduction in Waste Waters. Morristown, NJ: Allied Chemical Corporation
- AlliedChemicalCorporation. (1973). Chemical Treatment of Wastewater: Upgrading Existing Facilities Morristown, NJ: Allied Chemical Corporation.
- Bolto, B. A., Dixon, D. R., Gray, S. R., Chee, H., Harbour, P. J., Ngoc, L., & Ware, A. J. (1996). The use of soluble organic polymers in waste treatment. *Water Science and Technology*, *34*(9), 117-124. doi: 10.1016/s0273-1223(96)00794-9
- Brown, & Caldwell. (1978a). West Point Pilot Plant Study, Volume IV, Chemical Treatment Municipality of Metropolitan Seattle. Seattle, WA.
- Brown, & Caldwell, D. (1971). Report on Water Pollution Control Plants, Report I - Phase II, Alternative Treatment Processes for Reductions of Turbidity, Color, Floatables, Grease and Settleable Matter. City and Country of San Francisco.
- CityandCountryofSanFrancisco. (1967). Monthly Operating Reports for North Point Sewage Treatment Plant
- Chu, C., Lee, D., Chang, B., You, C., Liao, C., & Tay, J. (2003). Anaerobic digestion of polyelectrolyte flocculated waste activated sludge. *Chemosphere*, *53*(7), 757-764. doi: 10.1016/s0045-6535(03)00553-8
- Chu, C. W., Poon, C.S., & Cheung, R. Y. H. (1998). Characterization of raw sludge, chemically modified sludge and anaerobically digested sludge in Hong Kong. *Water Science and Technology*, *38*(2), 25-32. doi: 10.1016/s0273-1223(98)00428-4
- De Feo, G., De Gisi, S., & Galasso, M. (2008). Definition of a practical multi-criteria procedure for selecting the best coagulant in a chemically assisted primary sedimentation process for the treatment of urban wastewater. *Desalination*, *230*(1-3), 229-238. doi: 10.1016/j.desal.2007.12.003
- DowChemicalCompany. (1967a). Studies of Removal of Phosphates and Related Removal of Suspended Matter and Biochemical Oxygen Demand at Grayling, Michigan. Midland, MI: Dow Chemical Company.
- DowChemicalCompany. (1967b). Studies of Removal on Phosphates and Related Removal of Suspended Matter and Biochemical Oxygen Demand at Lake Odessa, Michigan. Midland, MI: Dow Chemical Company.
- Ericsson, B. (1973). Chemical pretreatment before biological treatment in sewage plants. *Water Research*, *7*(1-2), 227-247. doi: 10.1016/0043-1354(73)90165-6
- Galil, N., & Rebhun, M. (1990). Primary Chemical Treatment Minimizing Dependence on Bioprocess in Small Treatment Plants *Water Science and Technology*, *22*, 203-210.

- Harleman, D., & Morrisseys, S. (1990). Chemically- Enhanced Treatment. An Alternative to Biological Secondary Treatment for Ocean outfalls. *Hydraulic Engineering - Proceedings of the 1990 National Conference*, 14-19.
- Harleman, D., & Murcott, S. (1992). Upgrading and Multi-Stage Development of Municipal Wastewater Treatment Plants: Applicability of Chemically Enhanced Primary Treatment. World Bank.
- Harleman, D., & Murcott, S. (1999). The role of physical-chemical wastewater treatment in the mega- cities of the developing world. *Water Science and Technology*, 40(4-5), 75-80. doi: 10.1016/s0273-1223(99)00487-4
- Harleman, D., & Murcott, S. (2001). Chemically Enhanced Primary Treatment: Challenging the Status Quo 21, 57.
- Haydar, S., & Aziz, J. A. (2009). Characterization and treatability studies of tannery wastewater using chemically enhanced primary treatment (CEPT)—A case study of Saddiq Leather Works. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 1076-1083. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.07.074
- Hernández, A., Hernández, A., & Galán, P. (1995). *Manual de Depuración Uralita*. España: Paraninfo, S.A.
- Hortskotte, G., Niles, D., Parker, D., & Caldwell, D. (1974). Full-Scale Testing of a Water Reclamation System. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 46, 181-197.
- Huang, J. (1995). Chemically Enhanced Primary Treatment for Sewage in Hong Kong. *Proceedings of Chartered Institution of Water & Environment Management*, 49-53.
- Huebner, W. (1989). The Role of Polymers in Sludge Dewatering. *Water Engineering Management*, 136, 33.
- Mahmoud, E. (2009). Chemically Enhanced Primary Treatment of Textile Industrial Effluents. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18, 651-655.
- Metcalf, E. (1991). *Wastewater Engineering, Treatment Disposal and Reuse, Third Edition*. New York. Metcalf, E. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. (4th ed.). New York.
- Metcalf, E. (2004). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*.
- Muñoz, J., & Vázquez, J. (1992). Caracterización y Tratamiento de las Aguas Residuales de Industrias Cárnicas. *Tecnología del Agua*, 99, 9-24.
- Nenov, V. (1995). TSS/BOD removal efficiency and cost comparison of chemical and biological wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 32(7), 207-214. doi: 10.1016/0273-1223(96)00066-2
- Newbigging, M., Stephenson, J., & Romano, L. (1995). *Upflow or Downflow BAFs - Which Provides The Best Overall Performance*. Paper presented at the Proceedings of the Water Environment Federation 68th Annual Conference and Exposition Miami Beach, Florida, USA.
- Odegaard, H. (1989). Appropriate technology for wastewater treatment in coastal tourist area. *Water Science and Technology*, 21, 1-17.
- Odegaard, H. (1992). Norwegian experiences with chemical treatment of raw wastewater. *Water Science and Technology*, 25, 255-264.
- Ødegaard, H. (1998). Optimised particle separation in the primary step of wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 37(10), 43-53. doi: 10.1016/s0273-1223(98)00297-2
- Odegaard, H., Balmer, P., & Hanaus, J. (1987). Chemical Precipitation in Highly Loaded Stabilization Ponds in Cold Climates. *Water Science and Technology*, 19, 71-77.
- Parker, D., Barnard, J., Daigger, G., Tekippe, R., & Wahlberg, E. (2001). The Future of

Chemically Enhanced Primary Treatment: Evolution not Revolution.

- Pérez, J. D. (2010). *Propuesta Metodológica para la Calibración del Modelo Dinámico de Calidad del Agua MDLC-ADZ-QUASAR en Ríos. Caso de Aplicación: Río Bogotá, tramo Cortijo - Puente Aeropuerto*. Universidad de los Andes, Bogotá.
- Poon, C., & Chu, C. (1999). The use of ferric chloride and anionic polymer in the chemically assisted primary sedimentation process. *Chemosphere*, 39(10), 1573-1582. doi: 10.1016/s0045-6535(99)00055-7
- Qian, J. W., Xiang, X. J., Yang, W. Y., Wang, M., & Zheng, B. Q. (2004). Flocculation performance of different polyacrylamide and the relation between optimal dose and critical concentration. *European Polymer Journal*, 40(8), 1699-1704. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2004.03.009
- Quian, J., Li, J., Zhou, G., & Qi, G. (2000). Association of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer in Dilute Solutions. V. Stability and Pour Point Depression to Max Solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, 78, 836-841.
- Quian, J. W., Qi, G. R., & Cheng, R. S. (1997). Association of Ethylene-Vinyl-Acetate Copolymer in Dilute-Solutions. 1. Solvent, Concentration and Annealing Temperature Effect. *European Polymer Journal*, 33, 1263-1265.
- Quian, J. W., Qi, G. R., Fang, Z. B., & Cheng, R. S. (1998). Association of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer in Dilute-Solutions- II- Molecular Weight, Vinyl-Acetate Content and Cooling process Effect. *European Polymer Journal*, 34, 445-447.
- Romero, J. (1996). *Acuiquímica*. Escuela Colombiana de Ingeniería Santa Fé de Bogotá.
- Romero, J. (1999). *Calidad del Agua*.
- Sáez, J., & Martínez, A. (1987). Caracterización Físicoquímica de Efluentes Líquidos de Mataderos. Correlación de sus parámetros. *Tecnología del Agua*, 38, 77-83.
- Shao, Y., Liu, A., Wada, F., Crosse, J., & Jenkins, D. (1996). Advanced primary treatment: An alternative to biological secondary treatment. The city of Los Angeles hyperion treatment plant experience. *Water Science and Technology*, 34(3-4), 223-233. doi: 10.1016/0273-1223(96)00577-x
- Sierra, J. H. (1983). *Análisis de aguas y aguas residuales*. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería.
- Singh, R. (1985). Some Important Practical Consideration in the Use of Polyelectrolytes in the Treatment of Water and Wastewater. *Indian J. Environment and Health*, 27, 15-30.
- Sonune, A., & Ghatge, R. (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167(0), 55-63. doi: 10.1016/j.desal.2004.06.113
- Taylor, M. L., Morris, G. E., Self, P. G., & Smart, R. S. C. (2002). Kinetics of Adsorption of High Molecular Weight Anionic Polyacrylamide onto Kaolinite: The Flocculation Process. *Journal of Colloid and Interface Science*, 250(1), 28-36. doi: 10.1006/jcis.2002.8341
- Thompson, G., Swain, J., Kay, M. & Forster, C. (2001). The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. *Bioresources Technology*, 77, 275-286.
- Tsukamoto, R. (2002). Nivel Avanzado: Tratamiento Primario Avanzado: El Paradigma Moderno del Tratamiento de Aguas Residuales Sanitarias. *Agua Latinoamérica*, 2, 4.
- Vesilind, P. (2003). *Wastewater Treatment Plant Design*: Water Environment Federation.
- Wilson, T., Bizzari, R., Burke, T., Langdon, P., & Courson, C. (1975). Upgrading Primary Treatment with Chemicals and Water Treatment Sludge. *Journal of the Water Pollution Control*

Federation, 47, 2820-2833.

- Wong, S., Najafpour, G., Teng, T., Zuhairi, A., & Zinatizadeh, A. (2010). Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater with Cationic and Anionic Polyelectrolytes. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 1, 106-115.
- Wong, S., Teng, T., Ahmad, A., Zuhairi, A., & Najafpour, G. (2006). Treatment of pulp and paper mill wastewater by polyacrylamide (PAM) in polymer induced flocculation. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1-3), 378-388. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.076
- Wukash, R. (1968). The Dow Process for Phosphorus Removal. Chicago, Illinois: FWPCA Phosphorus Removal Symposium
- Xu, G., & Quian, C. Wastewater Chemically Enhanced Primary Treatment Combined with Adsorption of Activated Sludge: AS-CEPT in Wastewater Treatment (pp. 623-627). School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology: Harbin, Heilongjiang Province, China.
- Xu, G. R., Zhang, W. T., & Li, G. B. (2005). Adsorbent obtained from CEPT sludge in wastewater chemically enhanced treatment. *Water Research*, 39(20), 5175-5185. doi: 10.1016/j.watres.2005.09.043