



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“Correlación de parámetros químicos en plantas de tratamiento  
de agua operando con Clorhidróxido de aluminio”**

**Tesis**

**que para obtener el Grado de:  
Maestría en Ingeniería Ambiental**

**Presenta:**

**Ing. René Huixtlaca Quintana**

**Dra. Margarita Teutli León**

**Asesora de tesis**

**Puebla, 2014**

Dedico esta tesis con mucho aprecio a mis familiares y amigos pues sin su apoyo y consejo difícilmente podría ser de utilidad para ofrecer a la comunidad mis conocimientos profesionales.



Oficio No. 4769/2013

**C. RENÉ HUIXTLACA QUINTANA**

Pasante de la Maestría en Ingeniería Ambiental  
Facultad de Ingeniería, BUAP.  
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Correlación de parámetros químicos en plantas de tratamiento de agua operando con clorhidróxido de aluminio**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental. Asignándose como Asesor a la Dra. María Maura Margarita Teutli León.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E  
"PENSAR BIEN, PARA VIVIR MEJOR"  
H. Puebla de Zaragoza, a los dieciocho días del mes de Diciembre de 2013.

M. I. EDGAR IRAM VILLAGRAN ARROYO  
DIRECCIÓN



C.c.p. Dra. María Maura Margarita Teutli León, Asesor de Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

GJS/MPGA/sco\*

**M. I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO**

DIRECTOR

FACULTAD DE INGENIERIA B. U. A. P.

PRESENTE.

Estimada Maestro:

Por este medio le informo que la tesis titulada "*Correlación de parámetros químicos en plantas de tratamiento de agua operando con Clorhidróxido de Aluminio*", elaborada por el **Ing. René Huixtlaca Quintana**, ha sido debidamente revisada y corregida.

Por lo anterior le manifiesto que **se autoriza la impresión** de la misma. Así el Ingeniero Huixtlaca puede continuar con sus trámites para realizar el examen de grado.

Agradeciendo su atención quedo a sus órdenes.

H. Puebla de Z., 4 de Abril de 2014.



Dra. Ma. Maura M. Teutli León

## ÍNDICE

1.- Introducción	2
1.1.- Objetivo general	8
1.2.- Objetivos específicos	8
2.- Antecedentes	9
2.1.- Desempeño del Clorhidróxido de aluminio como coagulante	9
2.2.- Características físico-químicas de la molécula del agua	13
2.3.- El solvente universal	17
2.4.- La disponibilidad del recurso hídrico	19
2.5.- La contaminación del agua y su tratamiento	21
2.6.- Potabilización	26
3.- Metodología	30
3.1.- Prueba de jarras	30
3.1.1.- Marco teórico	31
3.1.2.- Equipos y materiales	37
3.1.3.- Tabla descriptiva de prueba de jarras	43
3.1.4.- Coagulantes aplicados en las plantas del estudio	45
3.2.- Desarrollo experimental	46
3.3.- Prueba en planta	47
3.3.1.- Muestreo	51
3.3.2.- Parámetros de la prueba	53
3.3.3.- Verificación de la calidad del agua	53
3.3.4.- La problemática del manejo de lodo en las plantas potabilizadoras	54
4.- Casos de implementación del coagulante propuesto en plantas	62
4.1.- Planta de Villahermosa, Tabasco	63
4.1.1.- Localización geográfica	63
4.1.2.- Características generales	64
4.1.3.- Prueba de jarras y valoración de resultados	64
4.1.4.- Implementación del coagulante	65
4.1.5.- Adecuación y desarrollo de la prueba	65
4.1.6.- Resultados	69
4.1.7.- Análisis de resultados	72
4.2.- Evaluación de ACH en pruebas en Zamora, Michoacán	76
4.2.1.- Localización geográfica	76
4.2.2.- Características generales	77
4.2.3.- Pruebas de jarras y valoración de resultados	78
4.3.- Planta Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	80
4.3.1.- Localización geográfica	80
4.3.2.- Características generales	82
4.3.3.- Pruebas de jarras y valoración de resultados	82
4.3.4.- Implementación del coagulante	83
4.3.5.- Resultados y análisis por parámetros	84
4.3.6.- Conclusiones	86
5.- Conclusiones generales	88
Compendio de información técnica de coagulantes	91
Referencias	

## RESUMEN

La presente tesis estableció como objetivo comparar coagulantes que demuestren el mejor desempeño durante las etapas de pruebas piloto a nivel laboratorio (Pruebas de jarras) y en plantas potabilizadoras instaladas en el país interesadas en optimizar la operación. Tradicionalmente en México se ha preferido aplicar el Sulfato de aluminio (SAL) como coagulante barato y ampliamente disponible en el mercado mexicano. Revisando las condiciones de operación de éste frente a la opción del Clorhidróxido de Aluminio (ACH). Los datos corresponden a casos reales de aplicación en cinco plantas en diferentes zonas del país. Se determinaron los consumos de ambos coagulantes a nivel laboratorio y en planta se evaluó la opción propuesta, con los resultados que arrojó el monitoreo de los parámetros establecidos tales como: pH, sólidos suspendidos, turbiedad y color se determinaron perfiles de desempeño, a su vez se utilizan para determinar el costo aplicado del ACH frente a SAL en Pesos por metro cúbico. Los resultados del estudio demuestran que la sustitución del coagulante es rentable y representa una mejora de la operación al disminuir la frecuencia de retrolavados durante el proceso de limpieza de los filtros de las potabilizadoras. La dosis de aplicación del ACH en planta fueron menores que los estimados a nivel laboratorio y durante la temporada de estiaje mostró un desempeño sobresaliente frente al tradicional SAL, las dosis de aplicación que se hallaron muestran una proporción de 1 a 3 de ACH frente a SAL.

(Palabras clave: coagulantes, sulfato de aluminio, clorhidróxido de aluminio, sólidos suspendidos, turbiedad, color)

## 1.- INTRODUCCIÓN

### **La preservación del agua potable como meta última de los sistemas de tratamiento.**

La percepción social de que el agua nunca se va a acabar se basa en que el 71% de la superficie del planeta está cubierto por ella, es decir 1,358 millones de kilómetros cúbicos la integran, sin embargo la disponibilidad de agua susceptible de ser utilizada por los seres humanos en la calidad y cantidad suficiente cada vez es menor.

Un ejemplo tangible es la Ciudad de México.

En 1521 durante la conquista el agua disponible bañaba prácticamente al Valle de México. En el Siglo XIX, 400 años después del periodo colonial, se inició la perforación de pozos en 1847 había 500, en 1886 incrementó a más de 1,000. Como consecuencia se presentó un fenómeno que nadie esperaba: el hundimiento de la ciudad, entre 1891 a 1895 se registró un descenso de 5 centímetros por año, además se redujo la presión de los acuíferos y disminuyó el caudal del manantial de Chapultepec.

Durante el Siglo XX la tendencia de perforación de pozos continuó y se aceleró el hundimiento a 18 centímetros por año, como paliativo se comenzó a utilizar el agua del río Lerma para abastecer a la ciudad [1].

La recarga de los mantos freáticos se ha detenido debido a que las ciudades al cubrirse de cemento prácticamente impiden que de manera natural se complete el ciclo hidrológico con la irrigación de la capa acuífera del subsuelo.

Como el Ciclo hidrológico (Fig. 1.1) ha sido alterado se debe considerar que el agua residual de las ciudades debe ser tratada para alcanzar la calidad necesaria para que pueda inyectarse al subsuelo y evitar en el futuro riesgos adicionales de hundimiento o disponibilidad de agua para su uso en el futuro.





Fig. 1.1.- Ciclo hidrológico destacando la recarga de acuíferos y manto freático [2].

Desde luego que en cada país la calidad del agua debe ser monitoreada por la autoridades en la materia, en México existe una normatividad vigente desde 1996; la cual está plasmada en las normas:

- NOM-001-SEMARNAT-1996 enfocada a la calidad de agua tratada para descarga en aguas y bienes nacionales (barrancas, ríos, lagunas y mares).
- NOM-002-SEMARNAT-1996 establece la calidad del agua tratada que se descarga a los sistemas de alcantarillado urbano y/o municipal.
- NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece la calidad de agua que ha sido tratada y que se reutiliza para servicios al público (riego de áreas verdes, lagos artificiales, etc).

Es de una gran importancia conocer los parámetros que establece la autoridad competente en la materia, porque de esta manera quienes operen los sistemas de tratamiento serán capaces de entender la importancia de su trabajo y mantener dentro de los límites permitidos la calidad del agua tratada, los límites máximos permisibles se establecen en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y son aplicables para el agua tratada, las otras dos normas hacen referencia a esta tabla para la disposición o uso del agua tratada [3].

En la Tabla 1.1 se muestran los principales parámetros con los límites máximos permisibles para cada uno de ellos.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																					
PARÁMETROS  (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO				
	Uso en riego agrícola (A)		Uso Público Urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)		
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub>	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

(1) Instantáneo  
(2) Muestra Simple Promedio Ponderado  
(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.

P.D.= Promedio Diario; P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Tabla 1.1.- Límites máximos permisibles para contaminantes básicos.

Independientemente de los valores numéricos es importante comprender el significado de cada uno de los contaminantes y su impacto en el agua residual, a continuación se muestra su descripción en la Tabla 1.2.

Parámetro:	Descripción:
Temperatura	Establece un índice que garantice el oxígeno disuelto en el seno del medio acuático
Grasas y aceites	Establece que garantice la presencia del oxígeno disuelto en el seno del medio acuático, así como el paso de la luz para la fotosíntesis
Materia flotante	Indica que la materia orgánica o cuerpos extraños susceptibles de descomponerse pueden alterar la disponibilidad de oxígeno disuelto
Sólidos sedimentables	Indica la importancia de disminuir la presencia de arenas o partículas pequeñas en el agua tratada que causan interferencias
Sól. Susp. Totales	Indica la presencia de partículas coloidales solubles o insolubles flotando en el medio
Demanda bioquímica de oxígeno <sub>5</sub>	Indica la calidad del agua en función del oxígeno disuelto en ella, señala el nivel de contaminación de un cuerpo de agua
Nitrógeno total	Mide la presencia de este nutriente relacionado con la cantidad de detergentes presentes en agua, es muy importante mantener en los límites
Fósforo total	Mide la presencia de este nutriente relacionado con la cantidad de detergentes presentes en agua, es muy importante mantener en los límites

Tabla 1.2.- Descripción de contaminantes en el agua residual.

Los contaminantes del agua son: residuos sólidos, líquidos o gaseosos, sólidos en suspensión, materia tóxica, microorganismos infecciosos, desechos radioactivos, etc. Los cuales le confieren al agua características indeseables como corrosividad, incrustabilidad, toxicidad, mal olor, sabor y apariencia indeseable.

Cuando los sólidos en suspensión son excesivos reducen la penetración de la luz y limitan la fotosíntesis de las plantas acuáticas, lo que disminuye la aportación de nutrientes al medio acuático.

Los fertilizantes y detergentes contienen elevadas cantidades de fósforo, nitrógeno y potasio, que al ser arrastrados a esteros y lagunas se provoca un crecimiento desmedido de las especies acuáticas, alterando el equilibrio ecológico, con el consecuente deterioro debido a un crecimiento excesivo de plantas que al

descomponerse consumen el oxígeno disuelto causando putrefacción y afectando al sistema en su conjunto.

Los fosfatos generan enormes cantidades de espuma que interfieren en la transferencia de luz y oxígeno de los ríos, arruinando su valor estético.

Otros contaminantes dañinos son los metales pesados como mercurio, cadmio, plomo, arsénico, cromo, etc., que provocan enfermedades cardiovasculares, asimilación en fauna consumible por el hombre y causando enfermedades psicomotoras, ceguera, cáncer y muerte. Es claro que estos contaminantes proceden de la actividad industrial, por lo que la estrategia de tratamiento *in-situ* en las mismas fuentes generadoras de dichos contaminantes es la única opción viable para impedir que sigan incrementando su presencia en los barrancas, ríos, arroyos, esteros, lagos, presas y mares de México [1].

En función del tratamiento que se haga de las aguas residuales se podrá evitar problemas de salud y mejor disponibilidad de agua en los mantos freáticos y aguas superficiales disponibles para operaciones tales como la Potabilización.

La presente tesis se enfoca a la potabilización de agua, en México se cuenta con una normatividad específica en la materia la NOM-127-SSA1-1994, la que establece las características organolépticas reportadas en la Tabla 1.3:

Característica:	Límite permisible:
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Tabla 1.3.- Características organolépticas de agua potable [10].

En la potabilización se eliminan los sólidos suspendidos durante la filtración, sin embargo la presencia de presencia de partículas suspendidas le imprime cierta turbiedad y color aparente, por ello son el color verdadero (después de filtrado el medio) y la turbiedad los parámetros de control medibles con los cuales puede llevarse un control estadístico para monitoreo del proceso mismo de potabilización.

## **OBJETIVOS**

### **1.1.-Objetivo general**

Realizar un seguimiento estadístico en diferentes plantas potabilizadoras del país para evaluar el desempeño de un coagulante, que anteriormente demostró ser eficiente en operaciones de depuración de agua residual.

### **1.2.- Objetivos específicos**

- 1.- Demostrar el beneficio de aplicar un coagulante de amplio desempeño en diferentes condiciones de trabajo.
- 2.- Construir una correlación por parámetro para visualizar el perfil de desempeño en función de las dosis óptimas de aplicación y los costos de operación.
- 3.- Evaluar la disminución en la producción de lodo por la variación de retrolavados en las diferentes plantas potabilizadoras.

## 2.- ANTECEDENTES.

### 2.1.- Desempeño del Clorhidróxido de aluminio como coagulante.

En un trabajo previo desarrollado de enero a junio de 2003 conjuntamente entre la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), el Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado en el Municipio de Puebla (Soapap) y una empresa privada proveedora de químicos para tratamiento de agua se evaluaron los coagulantes siguientes: Cloruro férrico, Clorhidróxido de aluminio, Policloruro de aluminio, Polisilicato de cloruro de aluminio, Sulfato férrico y Sulfato de aluminio, probados en la plantas tratadoras de agua residual Planta San Francisco, Planta Atoyac del Sur, Planta Alseseca, dicha memoria quedó registrada en la tesis: "Evaluación y mejoras del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales municipales" [4].

**El sulfato de aluminio** es un coagulante inorgánico que se emplea en procesos de clarificación de aguas, ya sean en procesos de potabilización como de depuración de aguas residuales, tanto de naturaleza urbana como de carácter industrial. Se emplea habitualmente en forma líquida, siendo la denominación comercial del sulfato de aluminio líquido (SAL) 8,2 %, que corresponde a la fórmula química de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , espondiendo el 8,2% en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Se comercializa también en forma sólida, siendo en este caso SAS la denominación comercial tiene 17% en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

La mayor parte del sulfato de aluminio se fabrica y vende en forma líquida y el campo de aplicación más extendido es el uso como coagulante para aguas empleadas en potabilización, para consumo humano. La aplicación del producto es inmediata, empleándose equipos dosificadores desde los tanques de almacenamiento, entrando en contacto el producto con el agua a tratar, donde mediante procesos de mezcla y reacciones de hidrólisis consiguen precipitar el hidróxido metálico, después de sendos procesos de desestabilización coloidal y de neutralización de cargas eléctricas, después de reaccionar el producto con la materia coloidal presente en el agua se consigue con todo ello eliminar el color, la turbidez, las bacterias, los virus y microorganismos en general,. Los flóculos producidos se eliminan en los sucesivos procesos de decantación y filtración, resultando un agua

clarificada, el proceso empleado generalmente requiere coadyuvantes (polielectrolitos).

El Sulfato de aluminio tiene la característica de contar con un pH de 2.6 a 3.0, y carecer de basicidad, por lo consiguiente es un coagulante que requiere un ajuste preliminar con cal (óxido de calcio CaO), para que pueda actuar eficazmente en el proceso de potabilización, con la consecuente generación de lodo adicional por el aporte de la cal, lo que en planta significa generar mayor volumen de lodo y un incremento en el número de retrolavados de filtros.

**El Policloruro de aluminio** de alta basicidad es un producto desarrollado para resolver problemas concretos que pueden presentarse en el mundo del tratamiento del agua (eliminación de nutrientes, presencia de filamentosas, reducción de trihalometanos, eliminación de materia orgánica, etc).

Este producto es resultado de haber incorporado en la molécula una serie de sustancias que aportan basicidad relativa, por lo que reaccionan con mayor rapidez con el agua, al potenciarse los procesos de hidrólisis, formación y crecimiento del flóculo.

Se cuenta con un contenido de alúmina ( $Al_2O_3$ ) del orden del 23 %, adicionalmente estos productos logran un resultado interesante en cuanto a minimización del volumen de los lodos, contenidos de aluminio residual en el agua tratada y reducción de productos complementarios en el tratamiento como pueden ser la cal o los polielectrolitos, etc.

**El Sulfato Férrico** es un coagulante inorgánico producido por oxidación de sulfato ferroso procedente del proceso de fabricación del Dióxido de Titanio. Este coagulante líquido tiene un contenido de hierro ( $Fe^{+3}$  del 9%).

Se emplea como coagulante en procesos de depuración de aguas residuales de naturaleza urbana o industrial, siendo especialmente efectivo en procesos de eliminación de materia en suspensión y materia orgánica en tratamientos fisicoquímicos en plantas tratadoras de aguas residuales, así como en procesos de



eliminación de nutrientes, o en control de olor en la línea por precipitación de sulfuros.

La evaluación de los seis coagulantes condujo a seleccionar sólo tres: Sulfato de aluminio (SAL, el coagulante tradicional), Clorhidróxido de aluminio (ACH) y Sulfato férrico.

En las Tablas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 se observan las dosis óptimas de cada producto así como los costos aplicados en cada Planta de tratamiento de la ciudad de Puebla [4].

Las pruebas se desarrollaron para seleccionar las mejores opciones compatibles con el tipo de agua residual de cada región en la ciudad de Puebla. Se realizaron cerca de 120 pruebas de jarras a nivel laboratorio con la finalidad no sólo de evaluar el desempeño en la disminución de parámetros tales como Sólidos suspendidos, Turbiedad, Color y pH, sino también volumen de lodos generados, DQO y Sulfuros, destacando el ACH como una opción viable para la sustitución del SAL.

Planta San Francisco: Dosis óptimas							
Coagulantes:	Dosis, mg/L:	Sól. Susp., mg/L:	Turbiedad, NTU:	Color, U Pt-Co.:	pH:	Coli. T. NMP:	Sulfuros, mg/L:
SAL	63.33	49.00	67.00	378.50	7.48	5.42	0.16
ACH	25.00	48.00	68.00	378.50	7.60	5.26	0.13
Sulfato férrico	45.00	52.00	75.00	423.67	7.55	5.04	0.15

Tabla 2.1.- Dosis óptima aplicadas de reactivos en la Planta San Francisco del Soapap.

Costos (actualizados a 2014)				
San Francisco	Dosis		Costo producto:	Costo aplicado:
Coagulantes:	mg/L	Kg/m <sup>3</sup>	Pesos/Kg:	Pesos/m <sup>3</sup>
SAL	63.33	0.06	0.80	0.05
ACH	25.00	0.03	4.00	0.10
Sulfato férrico	45.00	0.05	1.90	0.09

Tabla 2.2.- Costos aplicados por metro cúbico de agua tratada en la Planta San Francisco del Soapap.

Planta Atoyac sur: Dosis óptimas							
Coagulantes:	Dosis, mg/L:	Sól. Susp., mg/L:	Turbiedad, NTU:	Color, U Pt-Co.:	pH:	Coli. T. NMP:	Sulfuros, mg/L:
SAL	73.33	83.67	134.33	635.67	7.52	5.05	0.50
ACH	26.67	84.83	134.33	633.50	7.68	4.69	0.34
Sulfato férrico	63.33	94.00	138.00	703.17	7.53	5.08	0.36

Tabla 2.3.- Dosis óptimas dosis de reactivos en la Planta Atoyac sur del Soapap.

Costos (actualizados a 2014)				
Atoyac Sur	Dosis		Costo producto:	Costo aplicado:
Coagulantes:	mg/L	Kg/m <sup>3</sup>	Pesos/Kg:	Pesos/m <sup>3</sup>
SAL	73.33	0.07	0.80	0.06
ACH	26.67	0.03	4.00	0.11
Sulfato férrico	63.33	0.06	1.90	0.12

Tabla 2.4.- Costos aplicados por metro cúbico de agua tratada en la Planta Atoyac sur.

Planta Alseseca: Dosis óptimas							
Coagulantes:	Dosis, mg/L:	Sól. Susp., mg/L:	Turbiedad, NTU:	Color, U Pt-Co.:	pH:	Coli. T. NMP:	Sulfuros, mg/L:
SAL	40.00	51.17	68.83	338.00	7.66	4.89	0.0917
ACH	13.33	44.33	71.00	328.17	7.80	4.72	0.0915
Sulfato férrico	25.00	43.83	65.83	339.83	7.83	5.20	0.0940

Tabla 2.5.- Dosis óptimas dosis de reactivos en la Planta Alseseca.

Costos (actualizados a 2014)				
Alseseca	Dosis		Costo producto:	Costo aplicado:
Coagulantes:	mg/L	Kg/m <sup>3</sup>	Pesos/Kg:	Pesos/m <sup>3</sup>
SAL	40.00	0.04	0.80	0.03
ACH	13.33	0.01	4.00	0.05
Sulfato férrico	25.00	0.03	1.90	0.05

Tabla 2.6.- Costos aplicados por metro cúbico de agua tratada en la Planta Alseseca.

El ACH demuestra ser una opción viable porque la dosis óptima seleccionada es baja, el costo aplicado no se desvía desproporcionadamente al alza con respecto al SAL. A partir de los datos anteriores, se presupone un mejor desempeño en plantas potabilizadoras con diferentes fuentes de abastecimientos que comprenden: Ríos, pozos, presas, etc.

## **2.2.- Características físicoquímicas de la molécula del agua.**

El agua es un elemento vital de la civilización, sin embargo se ha prestado poca atención a sus principales características que la distinguen como una sustancia completamente fuera de lo común: es líquida en condiciones normales, mientras que muchas sustancias “parecidas” como el alcohol se evaporan, en su forma sólida flota sobre su forma líquida, aunque lo lógico es que fuera al revés, en su forma líquida se asemeja más a un sólido, es incompresible, dejar caer un objeto sobre su superficie garantiza un golpe como si chocara contra el suelo, cuando se congela se forma el hielo, aunque hay nueve tipos de hielo dependiendo del grado de congelamiento.

Las principales características que la definen como útil al ser humano y que deben cumplirse son: Debe ser incolora, inodora e insípida, sin estos factores no se le usaría tan ampliamente como se le hace.

Sin embargo el agua posee una aplicación excepcional sobre otras sustancias similares para el hombre: es el mejor disolvente que existe (de sólidos, líquidos y gases).

Desde la antigüedad se le incluyó entre los cuatro “elementos” esenciales: aire, tierra y fuego, y no fue objeto de mayor estudio por el hombre hasta que prácticamente en el siglo XIX se le sintetizó en el laboratorio.

Ya en el siglo XX hubo mayor actividad científica alrededor del "agua ordinaria": se investigaron sus propiedades estructurales por medio de rayos X y luz infrarroja, así como por la transmisión de ondas sonoras. Se reconoció que las interacciones entre el medio acuoso y los solutos son fuertes y se inició la interpretación en términos de

las ligaduras entre los hidrógenos y el oxígeno que forman la molécula del agua. La década de los años cincuenta vio surgir un gran número de modelos fisicoquímicos; por fin en los sesenta el estudio del agua empezó a ser un campo aparte: se reconocieron estructuras extrañas, como asociaciones de moléculas en cúmulos dentro del seno del líquido; se investigaron con mayor profundidad las fuerzas moleculares que generan los hidrógenos del agua y cómo afectan éstas las propiedades observables.

El agua es un líquido a temperatura ambiente, no un gas como otras sustancias que pudieran parecersele, su forma sólida flota sobre su fase líquida, en un líquido “común” las moléculas se mueven con mucha independencia, sin embargo en el caso del agua existe un “orden colectivo”, las moléculas se “pegan” unas con otras, lo que le confiere valores extremadamente altos en su viscosidad, tensión superficial y calores latentes de evaporación y solidificación.

El agua tiene la capacidad de disolver una gran variedad de sustancias, pero no reacciona químicamente con ellas, por tal motivo pueden tratarse las aguas contaminadas, aunque dicho tratamiento significa un costo adicional.

El agua se forma a partir de dos átomos de hidrógeno ( $H^+$ ) unido a un átomo de oxígeno ( $O_2^-$ ), la investigación sobre su naturaleza molecular ha mostrado que una de sus principales claves es la ligadura de hidrógeno.

La unión entre los dos átomos del hidrógeno con uno del oxígeno forma un ángulo de  $105^\circ$ , con el oxígeno en el vértice, (Fig. 2.1).

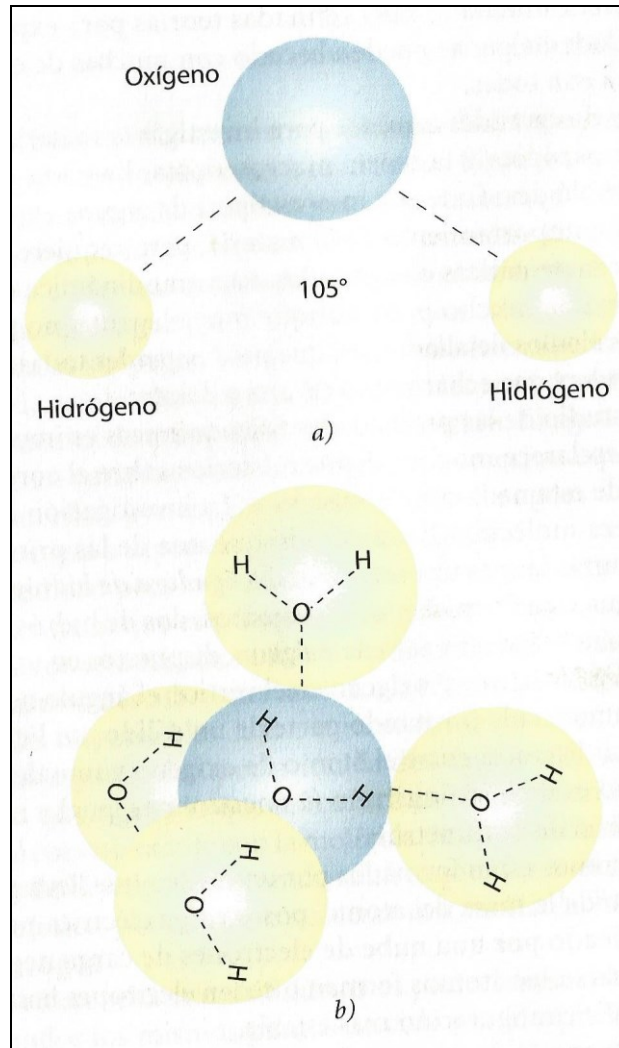


Fig. 2.1.- Molécula del agua y formación de un Tetraedro al unirse 5 moléculas.

Esta característica molecular le confiere una estabilidad molecular máxima.

Una sola molécula de agua adquiere una forma como la que logra apreciarse en la Figura 2.2 contenida dentro de un cubo con el oxígeno en el centro, los hidrógenos en los vértices opuestos de una cara y unas protuberancias que se proyectan en la cara opuesta, que son las nubes electrónicas.

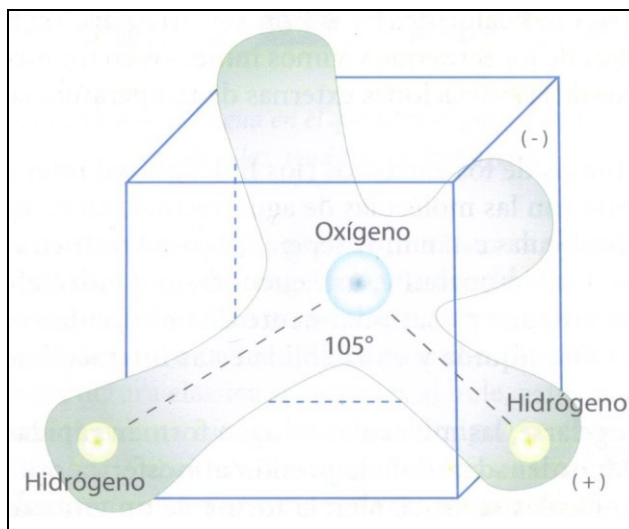


Fig. 2.2.- Nube de electrones en los vértices del arreglo que forma la molécula.

Los átomos tienen una nube de electrones que los rodean; al formarse la molécula del agua, estas nubes engloban los tres átomos de cada elemento; se trata del origen de la ligadura del hidrógeno, responsable de las propiedades del agua.

Estas nubes atraen a los átomos de hidrógeno de otra molécula de agua y dan lugar a lo que se conoce como una ligadura (o puente de hidrógeno).

No es el agua la única molécula que tiene ligaduras de hidrógeno ya que el amoníaco, el ácido fluorhídrico y los alcoholes también lo poseen, sin embargo lo que hace única a la molécula del agua es que fácilmente se aglomeran en redes tridimensionales, con muchos huecos, la geometría que forman depende del ángulo de los tres átomos componentes, lo que a su vez le permite una gran cohesión, independientemente de la fase líquida o sólida la misma estructura se mantiene.

Si sus átomos estuvieran dispuestos en una forma lineal el agua no sería tan buen solvente como en realidad lo es, y tampoco podría transportar los nutrientes en los seres vivos.

### **2.3.- El solvente universal**

Gracias a esta peculiar estructura molecular el agua puede almacenar el calor en cantidades enormes como puede hacerlo (Capacidad calorífica), mientras que al congelarse se forman rápidamente estructuras ordenadas, bajo la presión atmosférica ordinaria cuatro moléculas se asocian en la forma de un tetraedro, las que a su vez conforman una estructura de anillos hexagonales.

De esta forma el hielo posee una estructura muy poco compacta (tiene muchos huecos) por ello el agua sólida es menos densa que la líquida y puede flotar sobre el agua, la expansión del agua al congelarse tiene un papel interesante, en la forma líquida puede penetrar los pequeños intersticios de las rocas (capilaridad) una consecuencia de su alta tensión superficial, al congelarse el hielo formado dentro de las rocas ejerce presiones tan altas que las fractura y de esta forma las convierte en tierra y se desprenden del resto de la masa rocosa.

Esta tenaz interacción entre las ligaduras del agua (aún en su fase líquida), hace que se preserve un poco el “orden colectivo” de las moléculas del agua, por lo que romper la superficie del líquido es muy difícil, cualquier persona que caiga sobre la superficie de una piscina puede sentir esta manifestación de la tensión superficial.

Una manifestación muy importante de la tensión superficial se debe a que las moléculas del agua son muy “pegajosas” entre ellas y con otras sustancias debido a las ligaduras de hidrógeno.

El efecto de sentir que el agua “moja” es que la interacción de sus moléculas es muy fuerte y la capilaridad de las superficies es grande, no todos los líquidos “mojan”, el mercurio por ejemplo, ni siquiera en un tubo capilar muy pequeño logra ascender, el alcohol logra “mojar” muy poco.

La capilaridad hace que el agua subterránea ascienda hacia la superficie, en terrenos arcillosos el agua puede ascender hasta 10 metros por encima del nivel del manto freático.

En su fase líquida el agua puede aceptar ciertas cantidades de gases y sólidos en su seno: esto se conoce disolución, no todo sólido o gas puede incorporarse a un líquido, ni en cualquier cantidad. El límite de la concentración de un soluto (la sustancia que se agrega) en un solvente (la que recibe) se le llama solubilidad, esta propiedad puede modificarse por la temperatura y la presión.

Los gases se disuelven en los líquidos en distintas cantidades, por ejemplo en el agua se disuelven inmensas cantidades de ácido sulfhídrico y bióxido de carbono. El amoníaco es también muy aceptado (100 gramos en medio vaso de agua), aunque el oxígeno y el nitrógeno se disuelven con mucha menos facilidad (0.07 y 0.03 gramos por Litro, respectivamente), ello es muy importante para la vida acuática, pues aunque hay un centésimo de gramo por aire por litro, éste es suficiente para los peces.

El agua disuelve los nutrientes que necesitan los seres vivos (mejor que cualquier otro líquido), regula la temperatura tanto del medio ambiente como del interior de los organismos, favorece el crecimiento y da cuerpo a las estructuras vivas: la turgencia de las plantas se debe a su contenido de agua.

Esta característica fundamental del agua la convierte en un recurso que permite controlar el suministro de reactivos en un proceso productivo mediante bombeo en diferentes procesos, desde el uso doméstico hasta su aprovechamiento industrial, el agua potable se convierte en residual al llevarse consigo todos los residuos de diferentes tipo de uso en los que se le aplica como un solvente, arrastrando con ella sólidos suspendidos, proteínas, grasas, aceites, nutrientes, metales pesados, y materia orgánica, ésta al descomponerse, como veremos más adelante, significa un incremento importante de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, parámetro crucial para catalogar a los diferentes tipos de agua residual y los distintos escenarios en los que se encuentra su nivel de contaminación.

Existen otros factores como la temperatura y pH que dañan a los ecosistemas e impactan de la misma forma en la contaminación del agua, lo ideal es que el agua



potable no sufra alteraciones sin embargo el sólo hecho de extraerla sistemáticamente del subsuelo comienza a alterar el equilibrio natural de la tierra.

#### 2.4.- La disponibilidad del recurso hídrico

Como bien se sabe tres cuartas partes del planeta están cubiertas por mares y océanos y de las tierras emergidas una décima parte la cubren los glaciares.

Para visualizar objetivamente el concepto se incluye la tabla 2.7.

Distribución del agua en la tierra		
Fuente:	Volumen (Km <sup>3</sup> ):	Porcentaje %:
Océanos	1,320,500,000	97.22
Capas de hielo	29,000,000	2.13
Agua subterránea	8,300,000	0.61
Glaciares	210,000	0.02
Lagos de agua dulce	125,000	0.01
Mares internos (salados)	104,000	0.01
Humedad de la tierra	67,000	0.005
Atmósfera	13,000	0.001
Ríos	1,250	0.0001
Total:	1,358,320,250	100.00

Tabla 2.7.- Disponibilidad del agua en el planeta

Desde luego que la mayor proporción es agua salada, no se tendría inconveniente de utilizarla si no significara un gran costo el desalinizarla y suavizarla, por lo tanto se tiene que utilizar el agua subterránea, y la superficial de lagos y ríos, que representan el 0.6201% del total de agua disponible del planeta, ni siquiera representan el 1% del total, lo que desde luego exige un uso sustentable, es decir el utilizarla y sanearla para su reuso o compensar su contaminación.

## **La importancia de dar solución a la baja disponibilidad del recurso hídrico en México.**

La República Mexicana está geográficamente localizada entre los 37° 43' y 14° 33' latitud norte, en la franja de grandes desiertos de la Tierra. Las dos terceras partes de su territorio son áridas o semiáridas, y no hay ríos importantes que lo crucen: el agua es escasa en la mayor parte del país. Las áreas de clima benigno, templado, se deben más a su altitud que a su latitud; la más importante de ellas es el Altiplano, que es la más densamente poblada y en donde se aloja la capital.

El país está surcado por tres grandes estructuras montañosas, la Sierra Madre Oriental y del Sur, la Sierra Madre Occidental y el Eje Volcánico Transmexicano. Su morfología, sus amplios litorales y su forma triangular que se estrecha hasta 200 kilómetros en el Istmo de Tehuantepec, hacen que se intercepten los vientos húmedos de los océanos Pacífico y Atlántico y precipiten como lluvia, particularmente en el sur y el sureste.

Sin embargo, el 67% de la lluvia cae en tan sólo cuatro meses y está muy desigualmente distribuida: en el norte; la tercera parte del país, solamente se recibe el 4% mientras que en el sureste y zonas costeras se recibe el 50%. Además, en el norte, por las características desérticas del territorio, la evaporación es muy grande, por lo que realmente se recauda solamente el 27% de la precipitación total.

La creciente deforestación ha ido disminuyendo este porcentaje de agua retenida [16]. El Valle de México está situado al sur de la Mesa Central; tiene una extensión de 9600 Km, su forma es elíptica, con el eje mayor orientado de noreste a suroeste y longitud de 80 km. El valle se encuentra completamente rodeado de montañas y las altitudes de su planicie central oscilan entre 2,240 y 2,390 metros sobre el nivel del mar.

México corre un serio riesgo de perder sus acuíferos, en la figura 2.3 se ven los acuíferos sobreexplotados, según datos de la Comisión Nacional del Agua [1].

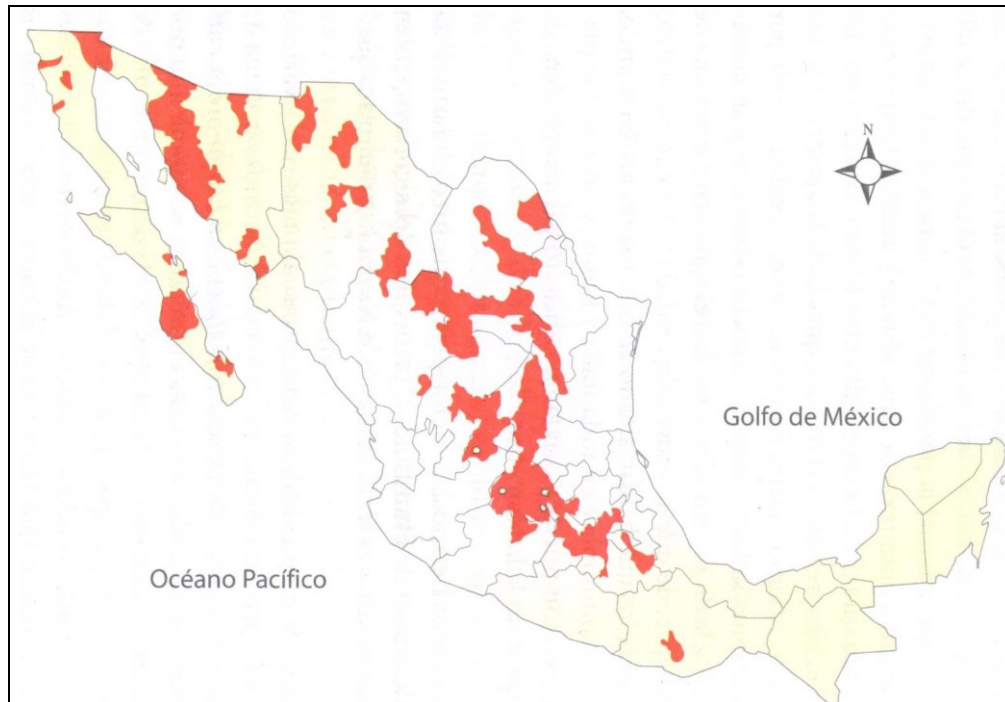


Fig. 2.3.- Acuíferos sobreexplotados en diferentes regiones de México [16].

## 2.5.- La contaminación del agua y su tratamiento

Es importante señalar las principales características del agua residual proveniente principalmente de los núcleos urbanos que es donde se asientan los parques industriales y donde se hace un uso intensivo del agua en todas las actividades, por lo que es muy común contar con agua que contiene desechos orgánicos de los hogares, aceites, jabones, productos químicos de limpieza, derrames de gasolina, grasas; es decir, a las planta tratadoras municipales llega un coctel de aguas grises con aguas negras.

Se debe recordar que la “escasez” referida al agua disponible para las necesidades del hombre y salud del ecosistema, obliga a las ciudades a tratar completamente sus aguas residuales, así como los lodos que se concentran de dichas operaciones y procesos.

Los contaminantes del agua se pueden englobar en: residuos sólidos, líquidos y gaseosos, sólidos en suspensión, materia tóxica, microorganismos infecciosos,

desechos industriales, en su mayoría; esta serie de sustancias le confieren propiedades indeseables como corrosividad, incrustabilidad, toxicidad, mal olor, mal sabor y mala apariencia.

Los sólidos en suspensión, cuando son excesivos, reducen la penetración de la luz y por consiguiente limitan la fotosíntesis de las plantas acuáticas, ocasionando su degradación, lo que a su vez disminuye la aportación que hacen de nutrientes al medio, provocando escenarios de aguas estancadas donde el oxígeno disuelto prácticamente desaparece así como la sustentabilidad de vida.

Algunos contaminantes como los plaguicidas tienen componentes de gran agresividad química, al ser arrastradas a ríos y mares pueden ser asimiladas por peces, y por esa vía regresar al hombre.

Los fertilizantes contienen fósforo, nitrógeno y potasio, pero en esteros y lagunas provocan un crecimiento desmedido de plantas, lo cual altera el equilibrio ecológico, pues al causar el deterioro de la flora se origina una excesiva descomposición, con la consecuente demanda de oxígeno disuelto que afecta al ecosistema.

Los detergentes son otros contaminantes graves del agua, pues al contener fosfatos (compuestos orgánicos que no se degradan fácilmente) forman verdaderas montañas de capas de espuma que interfieren con la vida acuática, arruinan el valor estético de los cuerpos de agua y demandan sistemas más complejos para su tratamiento.

Otros contaminantes dañinos son los metales pesados como el mercurio, el cadmio, el plomo, el arsénico, el cromo, etc., que provocan graves anomalías en la salud.

El cadmio trae consigo enfermedades cardiovasculares, el mercurio (que por asimilación de los peces se convierte en metilmercurio o mercurio orgánico, provoca la pérdida de control de movimientos, ceguera y muerte, el arsénico es cancerígeno en pequeñas cantidades y letal en dosis medias.

Es importante destacar la contaminación por microorganismos patógenos (nocivos) que producen cólera, hepatitis, fiebre tifoidea y diarreas que dañan a niños, existen microorganismos mayores como las amibas y la triquina que es común encontrarlas en aguas residuales.

Estas corrientes pueden restaurarse a una condición de reuso, por lo que es importante diagnosticar el daño que tiene cada cuerpo de agua para darle el tratamiento adecuado y eliminar las características indeseables según el destino que pretenda dárseles. La acidez del medio (medida a través del potencial de hidrógeno o pH) que varía de 0 en líquidos extremadamente ácidos hasta 14 en los más básicos; y el valor de 7 corresponde a un líquido neutral.

Desde luego la temperatura es un parámetro vital, el agua caliente es más peligrosa que la fría porque no disipa el calor, la máxima temperatura recomendable es 30°C.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) es un parámetro importante que indica el grado de contaminación de un cuerpo de agua, mediante este parámetro se mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos, que está contenida en una muestra de agua residual, y se utiliza para medir el grado de contaminación, normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción ( $DBO_5$ ), y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro ( $mg O_2/L$ ), en la tabla 2.8 se muestran los criterios de contaminación en base al parámetro de  $DBO_5$ .

Niveles de contaminantes según la $DBO_5$		
mg/L $DBO_5$	Criterio	Descripción
< 6	No contaminada	Agua natural limpia
> 6 y $\leq$ 30	Buena calidad	Con baja concentración de materia orgánica o presencia de agua municipal tratada con procesos biológicos
> 30 y $\leq$ 120	Con indicios de contaminación	Presencia de agua municipal sedimentada o de industria poco contaminante
> 120	Contaminada	Presencia de agua residual municipal cruda o de industria contaminante

Tabla 2.8.- Los niveles de  $DBO_5$  para conocer los niveles de contaminación

Existe otro parámetro llamado DQO ó Demanda Química de Oxígeno que puede utilizarse y requiere un periodo de tiempo menor (3 horas aprox.) para su determinación, esta prueba establece la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y que sea susceptible de ser oxidada por el permanganato de potasio.

La cantidad requerida de agente oxidante está en proporción de la cantidad materia orgánica. La oxidación completa se logra usando agentes oxidantes fuertes a alta temperatura en condiciones ácidas.

La determinación puede ser colorimétrica, o puede realizarse por medio del método de reflujo con dicromato, el método de reactor digestor y el método de digestión manganoso III, se reporta en mg/L.

En la figura 2.4 se observa el diagrama de un tratamiento preliminar y primario; en la figura 2.5 se muestra un tratamiento secundario. Ambos tratamientos en conjunto hace un tren de tratamiento típico para agua residual.

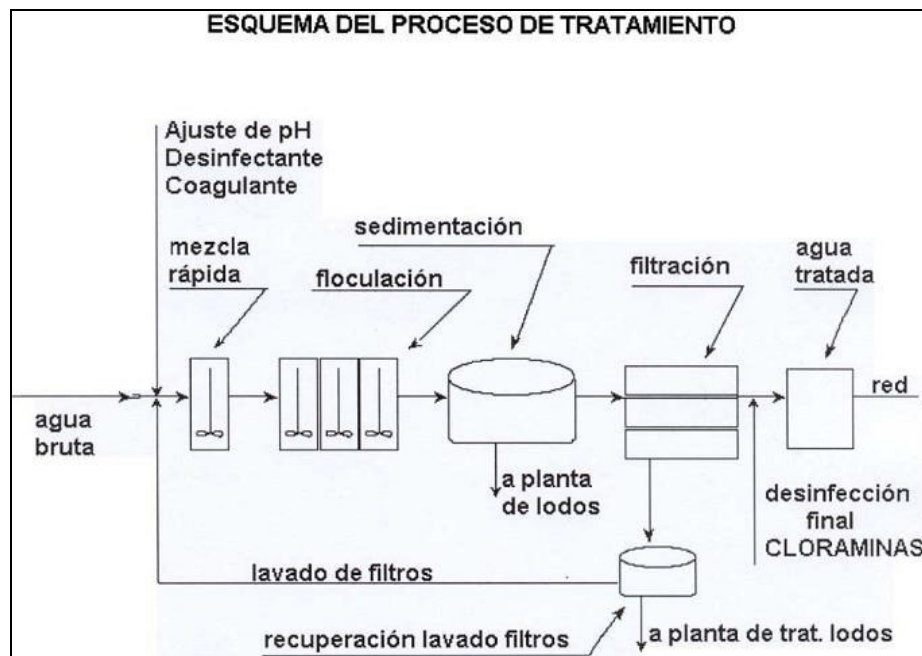


Fig. 2.4.- Diagrama tratamiento preliminar y primario.

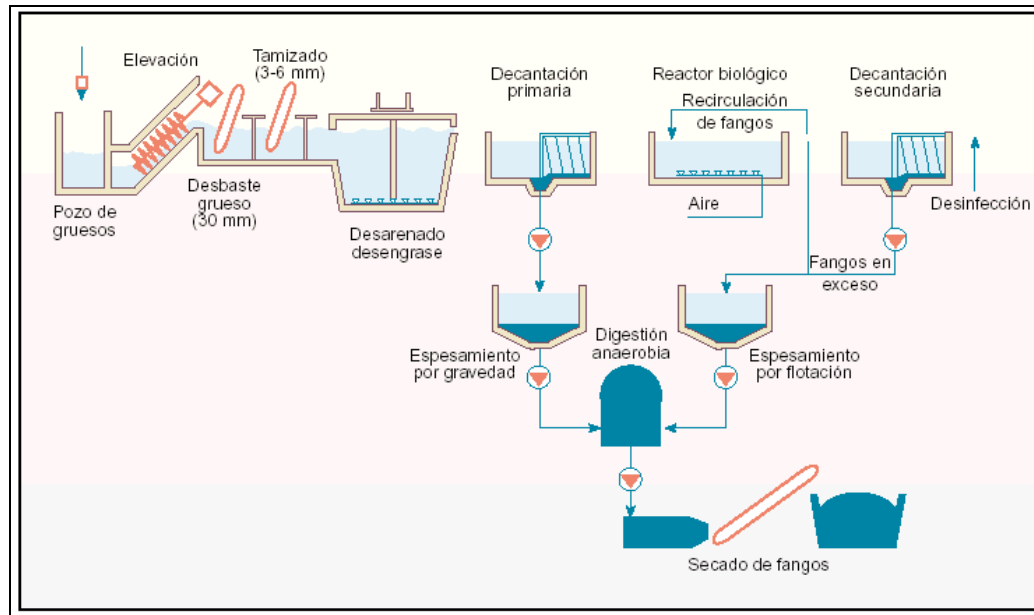


Fig. 2.5.- Diagrama de tratamiento secundario.

Existe una variante denominada Tratamiento Primario Avanzado (PTA) que combina las ventajas del tratamiento biológico, el tratamiento físico-químico y el acondicionamiento de lodo.

Las etapas incluyen un tratamiento preliminar para eliminar sólidos gruesos con rejillas, desarenador y tanque de sedimentación, el tratamiento primario incluye la fase de Coagulación-Floculación, sedimentación y filtrado del lodo físico-químico, posteriormente el tratamiento secundario inicia con aireación, desinfección, sedimentación y acondicionamiento de lodo, que incluye las operaciones de espesamiento y deshidratado, a continuación se muestra una tabla descriptiva con el propósito principal de cada una de las operaciones que se llevan a cabo en cada fase del tratamiento [13].

Fase de tratamiento	Equipo:	Función:
Preliminar	Rejillas	Atrapar los sólidos mayores a 2 mm que lleguen en el influente de la Planta tratadora
	Desarenador	Captar las partículas que se depositan a lo largo del canal como gravas y arena fina
	Sedimentador	Separación de partículas que se depositen en el fondo previo a tratamiento
Primario	Ecualizador	Homogeneizar la características como pH, temperatura, sólidos suspendidos previo a tratamiento
	Tanque coagulador	Inyectar el coagulante con el influente, aprovechar una alta turbulencia para diluir la sal férrica ó alumínica
	Tanque floculador	Inyectar el floculante con el objetivo de darle peso a las partículas formadas y formar un lodo
	Tanque separador	Mediante sedimentación o flotación lograr la separación del agua tratada del lodo y conducir las fases a la siguiente etapa
	Deshidratado de lodo	El lodo se envía a prensado, mediante filtro prensa, banda, centrifugado o lecho de secado para disposición de lodo seco
Secundario	Aireación	Inyectar aire disuelto al sistema aerobio de lodos activados para digestión de agua residual y oxidación de materia orgánica
	Sedimentador	El lodo biológico es analizado para decidir si se recircula al sistema o una proporción se envía a deshidratado
	Deshidratado de lodo	El lodo se envía a prensado, mediante filtro prensa, banda, centrifugado o lecho de secado para disposición de lodo seco

Tabla 2.9.- Descripción de etapas de tren de tratamiento físico-químico [5].

## 2.6.- Potabilización de agua

La potabilización es una serie de operaciones unitarias que tiene como objetivo proporcionar a la población un agua con sabor agradable y libre de sustancias peligrosas para la salud o inadecuadas para su uso industrial o doméstico.

En la Figura 2.6 se observa el diagrama general de una planta potabilizadora, con sus principales operaciones unitarias.



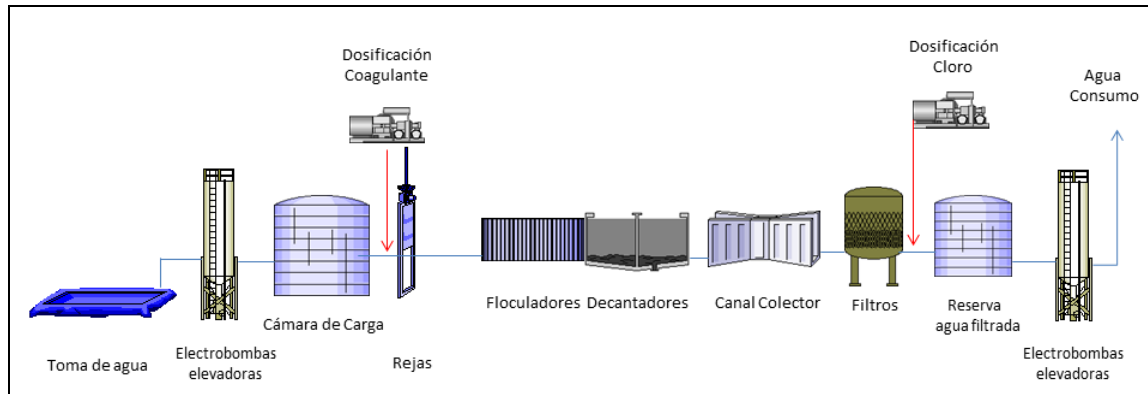


Figura 2.6.- Diagrama general de un tren de Potabilización

Desde el almacenamiento, la aireación, la coagulación, la sedimentación, el ablandamiento, la filtración y la desinfección.

En muchas plantas potabilizadoras el agua se almacena por largos periodos de tiempo para que sedimente la mayor cantidad posible de partículas sólidas suspendidas, lo que ayuda a reducir el contenido de bacterias.

El agua se airea por medio de agitadores, cascadas o en charolas o por aspersión a través de boquillas, con el objetivo de suprimir el Bióxido de carbono disuelto, que causa corrosión, así como eliminar malos olores y sabores.

El siguiente paso es someter el agua a coagulación, es decir a un proceso en el que se provoca que las partículas mayores formen coloides que sedimenten. Lo que se logra por la adición de coagulantes como el Sulfato de aluminio líquido (SAL) o la propuesta del Clorhidróxido de aluminio (ACH), el desempeño de este último es evaluado en la parte experimental de la presente tesis a nivel planta.

La coagulación y sedimentación coadyuvan en reducir el contenido de bacterias, eliminan el color y la turbiedad, e indirectamente también reducen los olores y sabores.

El calcio, magnesio y otros metales normalmente presentes en el agua debido a su incorporación en su paso con las rocas son perjudiciales en exceso. Para reducir estos minerales el agua se somete a ablandamiento, que opera por precipitación al añadir productos químicos o por un filtrado a través de unas membranas llamadas de intercambio iónico, que atrapan estos minerales.

Después el agua se filtra en recipientes con arena que eliminan la materia suspendida. La arena está compuesta de sílice, cuarzo molido o antracita (carbón).

Las algas, cuando se encuentran en grandes cantidades se suprimen con un filtro de esponja de metal.

En lo que toca a desinfección el compuesto más común que se emplea es el cloro, aunque puede también recurrirse al ozono o a la radiación ultravioleta. El cloro se aplica antes de la distribución, la mayor parte de las plantas de tratamiento emplean cloro líquido que asegura la cantidad residual suficiente de cloro libre para actuar sobre las bacterias y virus a los que inactiva. Sin embargo cuando el agua presenta exceso de cloro (olor intenso), el cloro puede reaccionar con la materia orgánica disuelta causando un sabor desagradable.

En algunos casos excepcionales al agua se le da un tratamiento posterior (Terciario) que incluye membranas especiales que prácticamente reducen a cero la materia suspendida.

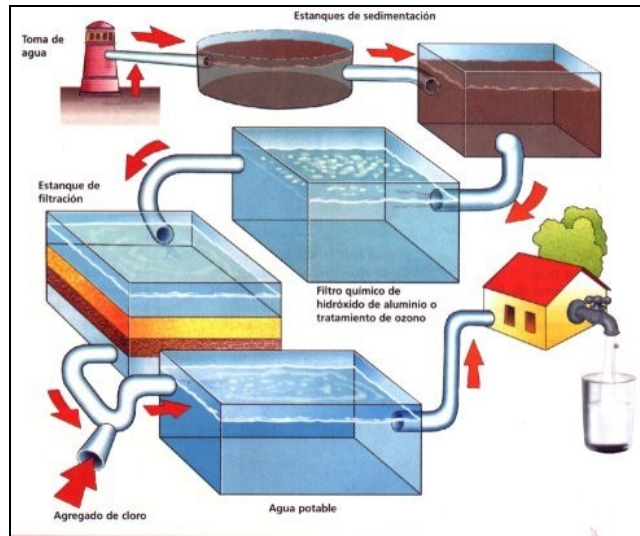


Fig. 2.7.- Cloración al final del tratamiento o potabilización.

### 3.- Metodología

A continuación se describen el conjunto de equipos, materiales, técnicas y desarrollo de las pruebas que se realizaron tanto a nivel laboratorio como en planta.

#### 3.1.- Prueba de jarras.

La prueba de jarras tiene como objetivo determinar las dosis óptimas de aplicación tanto de coagulantes como floculantes en un sistema de tratamiento de agua y están relacionadas con el diseño y control de una planta de tratamiento, tanto de agua residual como de potabilización, es una prueba piloto que se realiza con el agua a tratar generalmente en equipos especializados para ello, ver figura 3.1, que cuentan con 6 vasos de 1 L y utilizan un sistema de agitación con el que se simula cada una de las etapas de contacto y mezclado con los agentes químicos para lograr la separación de la fase líquida (agua tratada) de la fase seca (lodo desestabilizado)[6].

Muchas impurezas en el agua natural y en la residual están presentes como sólidos coloidales que no sedimentan a la velocidad que se desearía. La separación se puede lograr si se promueve la aglomeración de estas partículas mediante la adición de reactivos como coagulantes y floculantes, seguida por procesos de sedimentación o flotación.



Fig. 3.1.- Equipo de jarras para pruebas de coagulación-floculación y sedimentación.

### 3.1.1.- Marco teórico

Las **partículas coloidales** están presentes en todo tipo de agua susceptible a ser tratada por medios físico-químicos, su tamaño oscila entre 1 nm a 1  $\mu\text{m}$ , pueden ser afines con el agua (hidrofílicos) o no mostrar una atracción considerablemente menor con el agua (hidrofóbicos), su presencia en el medio acuoso le confiere turbiedad o color aparente, en la siguiente figura 3.2 se muestra el tamaño de estas partículas con respecto a partículas de diferentes tamaños también presentes en el agua.

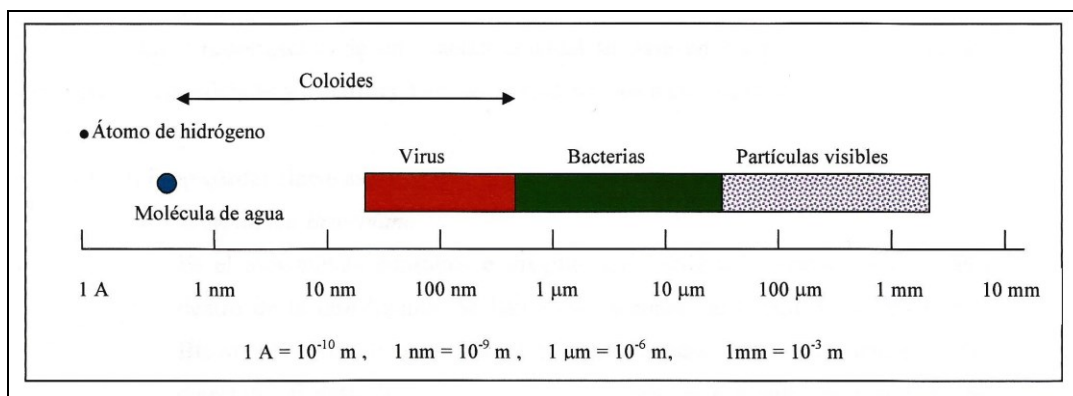


Fig. 3.2.- Distribución de tamaño de partículas [4].

Se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa. Es decir cada material disuelto en el medio posee un área total superficial y un tiempo de sedimentación probable, en función de ausencia de movimiento del medio acuoso, ver tabla 3.1.

Ejemplos evidentes de la estabilidad de los coloides lo son la sangre (suspensión de glóbulos rojos y otras partículas en un medio acuoso), la leche (suspensión de microgotas de grasa en agua), las partículas suspendidas en el aire, pinturas, tintas, etc. un sinnúmero de materiales biológicos y sintéticos.

<b>Diámetro de la Partícula mm.</b>	<b>Escala de tamaños.</b>	<b>Área superficial Total* m<sup>2</sup></b>	<b>Tiempo requerido Para sedimentar**</b>
10	Grava	3.15 cm <sup>2</sup>	0.3 s
1	Arena gruesa	31.50 cm <sup>2</sup>	3.0s
0.1	Arena fina	315.00 cm <sup>2</sup>	38.0s
0.01	Sedimento	3150.00 cm <sup>2</sup>	33.0 min
0.001	Bacteria	3.15 m <sup>2</sup>	55.0 horas
0.0001	Partícula coloidal	31.50 m <sup>2</sup>	230.0 días
0.00001	Partícula coloidal	0.283 ha	6.3 años
0.000001	Partícula coloidal	2.83 ha	63.0 años

\* Área de partículas del tamaño indicado, producida a partir de una partícula de 100 mm de diámetro y gravedad específica de 2.65

\*\* Cálculos basados en esferas con gravedad específica de 2.65 que sedimentan 30 cm

Adaptada de Metcalf and Eddy (1991).

Tabla 3.1.- Comparativo de tamaño de partícula y tiempo de sedimentación.

La característica fundamental que hace a estos sistemas interesantes es que los fenómenos de superficie juegan un gran papel, debido a la enorme relación entre el área y el volumen del sistema, por ejemplo 1 Kg de partículas de polímero de un diámetro de 20 nm (aproximadamente la composición de 5 L de pintura), es decir poseen una superficie total de unos 15, 000 m<sup>2</sup>, poseen una enorme cantidad de interfase en el sistema.

La otra características importante de un coloide es su estabilidad, las partículas pueden mantener un estado suspendido en que se repelen todo el tiempo (no es conveniente que la sangre coagule, por ejemplo), fenómeno que ha sido estudiado en el movimiento browniano, el cual está basado en la teoría cinética como el resultado del bombardeo desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del líquido [9].

La **coagulación** se define como el proceso de desestabilización de la carga eléctrica de los coloides y sólidos suspendidos en el agua problema, en ellos se alojan bacterias y virus, mediante el uso de un coagulante para propiciar su aglutinamiento y facilitar su separación del agua tratada, en la coagulación se aplican sales férricas o aluminicas y el objetivo es disolver completamente el reactivo en el agua a tratar.

Los coloides inmersos en el agua se cargan electronegativamente por la influencia de cargas disueltas en la solución, lo que tiende a influir en los coloides disueltos, al añadir iones de Hierro ( $\text{Fe}^{+3}$ ) o Aluminio ( $\text{Al}^{+3}$  a  $\text{Al}^{+7}$ ) las partículas coloidales comienzan a aglutinarse y de esta forma se forman pequeñas partículas visiblemente separadas del medio acuoso.

Generalmente en la potabilización sólo se aplica esta etapa del tratamiento físico-químico, a menudo es en las plantas tratadoras de agua residual que se aplica el floculante para acelerar la separación de las fases.

La **floculación** es la etapa subsecuente de la coagulación, una vez los coloides ya desestabilizados forman partículas que se rompen fácilmente con pequeñas turbulencias, por lo tanto es útil añadir un reactivo aglutinante como lo son las poliacrilamidas aniónicas o catiónicas, las cuales en solución logran desarrollar una alta viscosidad que permite formar conglomerados más grandes de partículas coloidales ya desestabilizadas, de esta forma se logra clarificar el agua tratada y se estimula la coalescencia de las partículas al formar grumos compactos.

En la figura 3.3 se muestra el proceso de ambas etapas del tratamiento físico-químico, se le conoce de esta forma ya que para que los reactivos químicos que se aplican desarrollen su máxima eficiencia dependen del mezclado, las velocidades y tiempo de contacto de los reactivos con el agua problema.

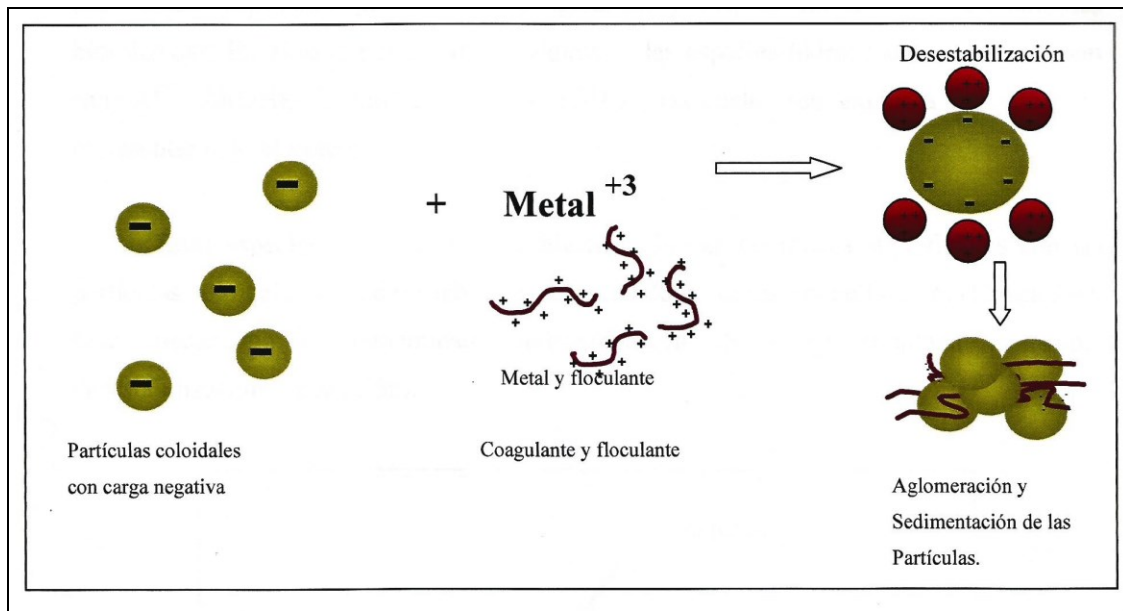


Fig. 3.3.- Etapa de coagulación-floculación [4].

La agitación del agua por mezclado hidráulico (en la tubería de una planta) o mecánico (paletas de un equipo de jarras) está relacionado con un gradiente de velocidad, cuya intensidad controla el grado de floculación producida.

La cantidad de colisiones entre las partículas inmersas con los reactivos está relacionada directamente con el gradiente de velocidad y es posible determinar la potencia que se requiere para dar un grado particular de floculación [7].

Las pruebas de jarras permiten establecer recomendaciones de tipo de coagulante y floculante a aplicar, dosis óptima, pH de trabajo, tiempos y velocidades de agitación.

Pueden incluso ser guía para los diseñadores de plantas tratadoras de aguas residuales industriales, municipales o plantas potables, dado que le permite escalar los resultados para determinar los tiempos de retención requeridos en cada etapa [12].

### Limitaciones de la prueba de jarras

Son pruebas que generalmente realizan una parte parcial del proceso (mezclado).



No hay flujo continuo como realmente ocurre en la planta de tratamiento real, las condiciones hidráulicas de las plantas pueden incluso limitar las dosis de aplicación y los resultados obtenidos en la prueba a nivel planta.

### **Características del agua relacionados con partículas coloidales**

La presencia de las partículas coloidales en el agua a tratar le imprime ciertas características, todas ellas medibles mediante métodos colorimétricos, a continuación se describen los principales:

**Turbiedad:** Es una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua. Es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea remitida y no transmitida a través de la suspensión.

Es causada por las partículas en suspensión dentro del medio acuoso, que varían de tamaño desde dispersiones coloidales de 0.08  $\mu\text{m}$  hasta 0.001 mm, entre otros arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos, microorganismos, etc.

El método más usado para determinar la turbiedad es el nefelométrico, el cual mide la turbiedad mediante un nefelómetro y su valor se registra en Unidades de Turbiedad Nefelométrica (UTN) [8].

**Color:** Esta característica se subdivide en color aparente y color verdadero, el primero es el color de un agua tratada sin filtrar, incluye el color de sustancias en solución, partículas coloidales y material suspendido, mientras que el color verdadero del agua tratada se obtiene una vez que las partículas se han retenido mediante filtración para eliminar cualquier sesgo en el valor por efecto de la turbiedad.

Esta característica no se debe únicamente a la descomposición de material orgánico en el agua, sino también a la presencia de hidróxidos metálicos, como el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,

además de compuestos orgánicos desconocidos presentes en los desechos domésticos industriales.

La determinación de esta característica es colorimétrica y las unidades de referencia son Unidades Platino Cobalto, (U Pt-Co.) [8].

**Sólidos:** Esta característica se clasifica en sedimentables, suspendidos, suspendidos totales y disueltos.

El contenido de sólidos totales es la característica física más importante del agua residual, los sólidos totales se componen de materia sedimentable, suspendida y disuelta.

**Sólidos sedimentables:** La denominación se aplica a los sólidos en suspensión que se sedimentarán, bajo las condiciones de reposo, por acción de la gravedad. Se determina utilizando un cono Imhoff de 1 L, registrando el volumen de material que se deposita en el fondo en un periodo de 1 hr, el resultado se expresa en ml/L, permite estimar el contenido de lodos que se depositarán en volúmenes más grandes en los tanques de la planta de tratamiento, el control estadístico de este parámetro permite visualizar el comportamiento del influente e inferir el desempeño de las operaciones y procesos en la planta de tratamiento.

**Sólidos suspendidos totales:** Se determinan filtrando la solución con papel filtro con poro de 0.45  $\mu\text{m}$ , estos sólidos retenidos son la fracción contaminante que puede ser eliminada por sedimentación, floculación o sedimentación y está constituida por partículas orgánicas e inorgánicas.

**Sólidos suspendidos:** Específicamente lo que se consideran como partículas coloidales se agrupan dentro de esta clasificación, se caracterizan porque su tamaño se encuentra en el intervalo de 10 nm a 10  $\mu\text{m}$ , presentan una enorme estabilidad en el medio acuoso, las partículas al estar cargadas negativamente se repelen todo el tiempo y le confieren al líquido que las contiene un "color" y apariencia uniforme, son el objetivo principal de los tratamientos físico químicos, toda aquella partícula insoluble disuelta en el agua es capaz de ser coagulada por medio del tratamiento

con reactivos como sales férricas o alumínicas, esta característica puede determinarse por el método colorimétrico y se mide en mg/L del parámetro de sólidos suspendidos.

**Sólidos disueltos (filtrables):** Son aquellos que pueden atravesar un medio filtrante de un poro de 0.45  $\mu\text{m}$ , se constituyen por material coloidal de 1 nm a 1  $\mu\text{m}$ , esta clasificación incluye a las moléculas e iones disueltos en el medio acuoso.

Es importante resaltar que la eliminación de la materia coloidal requiere de procesos como coagulación u oxidación biológica, seguida por sedimentación. En cambio para la eliminación de material disuelto requiere de métodos más específicos, como la ósmosis inversa, electrodiálisis, destilación e intercambio iónico.

**Demanda química de oxígeno (DQO):** Se trata de un parámetro alternativo para la  $\text{DBO}_5$ , con lo que se determina la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y susceptible a ser oxidable por un oxidante fuerte, desde luego que el valor es mayor que el resultado de una  $\text{DBO}_5$  debido a que el oxidante degrada por completo a la materia orgánica, sin embargo nos permite tener un estimado muy cercano al valor de la  $\text{DBO}_5$ .

La determinación es colorimétrica, se puede realizar por medio de un reactor digestor y el valor se determina en un espectrofotómetro y se reporta en mg/L.

### **3.1.2.- Equipos y materiales**

El trabajo que se realiza a nivel laboratorio es fundamental para dimensionar las cantidades de reactivo que deben aplicarse a nivel planta, por ello un manejo sistemático en la realización de las pruebas de jarras, apoyado en los equipos de agitación, dosificación y medición de parámetros, permiten obtener resultados con los cuales se establecen perfiles de desempeño para los parámetros fundamentales como: Sólidos suspendidos, Turbiedad, Color, pH, tamaño del flóculo, volumen de lodo formado y su consiguiente establecer el Control estadístico por parámetros de todo el proceso físico-químico durante la operación de una planta tratadora de agua residual o potabilizadora, según sea el caso.

En la realización de la prueba de jarras se propone aplicar un coagulante, el cual posee una densidad propia que la define el mismo fabricante, dicho dato es importante para considerarlo en la determinación de dosis de aplicación en miligramos de reactivo por litro de agua a tratar (o en su caso a potabilizar), el procedimiento general ha sido descrito al inicio del capítulo 3 de esta tesis, sin embargo para detallar su realización y como se utilizan los diferentes equipos y materiales se mencionará la fase en la que se utilizan cada uno de ellos.

**Equipo de jarras:** Dispositivo en el que se controlan las velocidades de agitación del agua a tratar con los reactivos químicos (coagulantes y floculantes) que simulan la operación de una planta de tratamiento o potabilización, existen en el mercado diferentes marcas, que varían en el número de unidades de agitación que se componen de una paleta que realiza la agitación mecánica del reactivo con el agua y un vaso de precipitado tipo Berzelius, que permite contener 1 L de agua a tratar y los reactivos que se quieren evaluar sin que se derramen durante la agitación. Existen equipos programables en los que se establece la duración en minutos o segundos de las fases de mezclado rápido, lento, sedimentación y postmezclado, sin embargo aún en equipos analógicos se pueden controlar perfectamente las etapas para lograr una excelente simulación de la operación en planta.



Fig. 3.4.- Equipo de jarras.

**Micropipetas:** Una vez definidas las dosis base seca de aplicación de los coagulantes y relacionadas entre la densidad, del producto a aplicar, se puede determinar las dosis volumétricas a dosificar en cada una de las jarras, generalmente las unidades de aplicación se determinan en microlitros de coagulante por litro de agua a tratar o potabilizar ( $\mu\text{l/L}$ ).

Estos equipos cuentan con un dispositivo interno que trabaja en 3 tiempos: succión, retención y expulsión, con puntillas ajustables al tamaño de boquilla de la micropipeta, generalmente vienen graduadas para trabajar en diferentes intervalos, en el proceso de simulación de operación de una planta de tratamiento cumplen la función de una bomba dosificadora, porque inyectan la dosis propuesta para cada una de las jarras, se recomienda que se añada el coagulante al inicio de la mezcla rápida (que generalmente dura 1 minuto), de esta forma la sal férrica o aluminica se disuelve y le da la cationicidad que se busca en el medio acuoso para obtener la coagulación.



Fig. 3.5.- Micropipetas para dosificación de coagulantes en prueba de jarras.

En potabilización generalmente no se incluye la aplicación de floculantes debido a que estos productos son derivados de hidrocarburos (Poliacrilamidas aniónicas o catiónicas), aun controlando una dosificación mínima un residual podría reaccionar en la etapa de desinfección con cloro y formar cloraminas, compuestos que se distinguen por ser precursores de formación de radicales libres y causantes de cáncer, el agua potable debe garantizar la máxima inocuidad de cualquier riesgo para la población, por lo tanto se excluye la dosificación de floculantes en la presente tesis.

**Colorímetro:** El equipo utilizado es un colorímetro marca Hach RD/890 que contiene un microprocesador y un fotómetro con filtro alimentado por Led, entre las ventajas que tiene es que es un equipo portátil para usarse tanto en el laboratorio como en campo, cuenta con 188 parámetros para poder leer diferentes iones o metales presentes en el agua a estudiar, aunque en ocasiones requiere de agentes químicos, estándares o reactivos para el parámetro en cuestión, ver figura 3.6.

Los resultados obtenidos en cada parámetro analizado se muestran en la pantalla del equipo en función de su concentración, absorbancia o porcentaje de transmitancia.

La selección de la longitud de onda se establece automáticamente en función del rango de los programas preestablecidos.

Los datos pueden almacenarse para el uso tanto en campo como en laboratorio.

De acuerdo a las características establecidas en la normatividad vigente para agua potable [10] los parámetros que fueron evaluados con el colorímetro son los siguientes: Sólidos suspendidos, Turbiedad y Color, los programas 94, 95 y 19 respectivamente.



Fig. 3.6.- Colorímetro portátil.

#### **Medidor del potencial de hidrógeno:**

El equipo marca Conductronic modelo PC 18 se compone de sensor utilizado en el método electroquímico para medir el potencial de Hidrógeno de una solución, ver figura 3.7. La determinación de pH consiste en medir el potencial que se desarrolla a través de una fina membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferente concentración de protones. Se conoce la sensibilidad y la selectividad de las membranas de vidrio ante el pH.

El pH indica la concentración de los iones de hidrógeno en una disolución, expresado como un logaritmo de la concentración de iones hidrógeno  $H^+$ , matemáticamente se expresa como:

$$pH = - \log [H^+]$$

$[H^+]$  es la concentración de iones de hidrógeno en moles por litro. Debido a que los iones de hidrógeno se asocian con las moléculas de agua para formar iones hidronio

$\text{H}_3\text{O}^+$ , en ocasiones el pH se expresa en término de la concentración de iones Hidronio.

En agua pura a  $25^\circ\text{C}$  existen cantidades similares de iones  $\text{H}_3\text{O}^+$  y de iones  $\text{OH}^-$ , la concentración de cada uno es de  $10^{-7}$  moles/L. Por lo tanto el pH del agua potable es  $-\log [10^{-7}] = 7$ .

Si se añade un ácido al agua se forma un exceso de iones  $\text{H}_3\text{O}^+$ , por lo tanto su concentración puede variar entre  $10^{-6}$  y  $10^{-1}$  moles/L dependiendo del ácido aplicado, por lo que las soluciones ácidas tienen un pH que varía desde 6 a 1.

Por otro lado si se añade una solución básica, concentración baja de iones  $\text{H}_3\text{O}^+$  y un exceso de iones  $\text{OH}^-$  el pH variará desde 8 hasta 14 y se considera que es el rango de las soluciones alcalinas.

El equipo puede medir también temperatura y conductividad, sin embargo no se consideraron como datos relacionados con la coagulación de partículas por lo que se excluyeron del enfoque del estudio y seguimiento estadístico.



Fig. 3.7.- Medidor de pH.



### **3.1.3.- Tabla descriptiva de prueba de jarras**

A continuación se muestra cada una de las etapas que integran una prueba de jarras, es importante definir un procedimiento específico para cada tipo de agua a tratar tanto los tiempos de contacto como los tiempos de reposo y verificar las características de las partículas, de acuerdo a las condiciones particulares para cada influente y buscando mejorar los resultados que se tienen en cada una de las plantas donde se proponen coagulantes diferentes al aplicado en línea.

Generalmente antes de iniciar una prueba de jarras se tiene que tomar en cuenta que los coagulantes y floculantes sólidos se deben preparar en función de las recomendaciones técnicas de cada producto, las soluciones de coagulantes generalmente se preparan al 20%, mientras que los floculantes sólidos se pueden preparar de 1 al 3% para que desarrollen su capacidad máxima de trabajo, además se deben dejar reposar para optimizar su uso y obtener los mejores resultados.

Tabla descriptiva de la prueba de jarras en general					
Etapa:	Duración, min:	RPM:	Reactivo:	Equipos:	Objetivo:
Preliminar	-	-	-	Colorímetro, Medidor pH	Evaluar los parámetros del influente de la planta, sólidos suspendidos, color, turbiedad y pH, registrar en bitácora si el agua contiene sólidos gruesos, que afecten la eficiencia de los productos en la prueba de jarras. Preparar los coagulantes y floculantes según sea el caso.
Mezcla rápida	5	100	Coagulante	Mezcladores del equipo de jarras, micropipetas y Medidor pH	Simular el tiempo de contacto del reactivo en un tiempo proporcional al de planta, aplicar la dosis exacta del coagulante, evaluar el cambio de pH del medio en todas las jarras.
Mezcla lenta	10	50	Floculante	Mezcladores del equipo de jarras, pipeta volumétrica	Simular el tiempo de contacto del reactivo en un tiempo proporcional al de planta, aplicar la dosis exacta del floculante, en potabilización no se añade floculante.
Sedimentación	10	0	-	Colorímetro, Medidor pH	Evaluar la formación final del lodo, tiempo de sedimentación, en caso de flotar el lodo señalarlo en bitácora. Toma de muestras para lectura de parámetros.
Mezcla rápida (II)	3	100	-	Mezcladores del equipo de jarras	Evaluar el rompimiento del lodo y observar al final cómo se comporta, opcional en pruebas de agua residual, en potabilización no aplica.

Tabla 3.2.- Descripción en detalle de una prueba de campo para evaluación de coagulantes y floculantes según sea el caso.

La realización de la prueba de jarras supone una simulación lo más cercana posible a lo que sucede en una planta real, se recomienda que la muestra del influente se tome directamente del tanque igualador o de un punto donde las características sean lo más cercanas a la calidad del agua que se trate o potabilice, según sea el caso, con la finalidad principal de evitar interferencias o desviaciones si el agua que se va a tratar lleva consigo reactivos que se estén aplicando en planta y no se notifiquen al personal que desarrolla la prueba, así se puede proporcionar resultados confiables y con menor margen de error.

La muestra puede incluso ser compuesta como lo establece la normatividad en la materia [3], para obtener un resultado con mayor respaldo técnico y con resultados más cercanos a la realidad.

Es importante recordar que se trata de una prueba, que simula una reproducción parcial del proceso real, ya que no hay un flujo continuo del influente, la dosificación real en la planta puede incluso tener deficiencias si no se cuentan con las bombas dosificadoras adecuadas, en ocasiones incluso se puede dosificar a gravedad debido a las condiciones geográficas de las plantas o carencia de recursos materiales en los organismos operadores, además las condiciones hidráulicas reales no son del todo escalables con la simulación del laboratorio que se realiza en el laboratorio.

#### **3.1.4.- Coagulantes aplicados en las plantas del estudio.**

La propuesta de sustituir el coagulante tradicionalmente aplicado Sulfato de aluminio (SAL) por el Clorhidróxido de aluminio (ACH) está fundamentado por el eficaz desempeño que este coagulante ha mostrado tanto en aguas residuales como en agua potable. El estudio presenta la reseña de 8 casos tanto de pruebas de jarras a nivel laboratorio como 3 pruebas a nivel planta con resultados importantes en cuanto a la calidad de agua, así como mejoras técnicas en cuanto a operación en planta.

Existen al menos 3 variedades de ACH dependiendo de alguna característica desde disponibilidad sólida y líquida, mayor contenido de silicatos o alta basicidad, se

presenta una tabla descriptiva de los productos aplicados en cada prueba, y se anexan las fichas técnicas correspondientes en el Compendio de información técnica de coagulantes.

Caso:	Localidad:	Fecha de aplicación:	Nombre comercial:
1	Villahermosa, Tab.	ACH líquido	PAX 18
			PAX XL 19
		ACH sólido	PAX PD
		Polisulfato de aluminio	ALS
		Sulfato de aluminio	SAL
2	Zamora, Mich.	ACH líquido	PAX 18
		ACH sólido	PAX PD
3	Tuxtla Gutiérrez, Chis	ACH líquido	PAX 18
		Sulfato de aluminio	SAL

Tabla 3.3.- Variedades de coagulantes aplicados en las pruebas.

### 3.2.- Desarrollo experimental

La evaluación de un nuevo coagulante que mejore las condiciones de operación de las plantas tratadoras y potabilizadoras en México ha significado un esfuerzo técnico notable, desde el trabajo preliminar en el laboratorio, muestreos en diferentes condiciones climáticas (estiaje y lluvia), convencimiento cultural entre los operadores de las plantas potabilizadoras que muestran incertidumbre ante una nueva forma de trabajar y negativa en algunos casos de establecer a nivel planta la nueva propuesta en función de intereses políticos.

La realización de las pruebas de jarras como se ha discutido anteriormente deben realizarse en las condiciones más reales que las que prevalecen en cada una de las plantas potabilizadora para evitar interferencias y errores en los puntos de dosificación adecuados.

La propuesta de probar un coagulante alternativo se discute con los directores de las plantas potabilizadoras, se exponen las ventajas de hacer pruebas a nivel laboratorio y posteriormente implementar en planta, al mismo tiempo se explica a los

operadores de cada una de las plantas el alcance de la implementación y mejoras que significarían en su actividad diaria.

Dependiendo de las condiciones estacionales se puede optar por realizar muestras compuestas en su caso para obtener resultados confiables y poder predecir el comportamiento del reactivo en todas las etapas de la planta potabilizadora según su caso, como lo establece la normatividad vigente [3].

El personal técnico del laboratorio de cada una de las plantas debe validar por duplicado los resultados obtenidos tanto en el laboratorio como en campo, en ocasiones se puede optar por determinar DQO. Coliformes fecales por el método del número más probable, se reportan en las hojas de campo de las pruebas de jarras pero no forman parte del enfoque central de la presente tesis.

### **3.3.- Prueba en planta**

Después del trabajo preliminar de las pruebas de jarras se obtienen datos precisos de las dosis de aplicación de los productos (coagulante y flocuante en su caso), además de relaciona el caudal de la planta con el consumo, no solo de la dosis de bombeo de producto sino del consumo por día de cada uno de los reactivos involucrados.

Se revisa con los usuarios los sistemas de bombeo y los puntos de dosificación, las etapas que se monitorearán y los puntos para toma de muestras.

Desde luego el Influyente, la salida de filtros, el punto de unión de filtros y desinfección (cloro) son los principales puntos que se debe vigilar debido a la dinámica en la hidráulica de la planta.

El influente es la entrada de agua al sistema de potabilización, generalmente pasa por un pretratamiento que incluye: Rejillas gruesas, rejillas finas, desarenador, ver figuras 3.8 y 3.9.



Fig. 3.8.- Rejillas finas para eliminar sólidos gruesos a la planta.



Fig. 3.9.- Canal desarenador para ayudar a sedimentar todas las partículas que logran pasar las rejillas finas.

Durante la operación de potabilización sólo ocurre un proceso: La coagulación, por lo que se debe considerar un gran tiempo de contacto del agua con el coagulante, se trata de plantas lo suficientemente grandes para lograr que las partículas obtenidas sedimenten a lo largo de su paso por el sistema. Su diseño hidráulico permite para controlar caudales del orden de 2000 L/s por ejemplo, sin que causen problemas en la potabilización, ver Figura 3.10. En la Figura 3.11 se muestra un corte transversal.



Fig. 3.10.- Sedimentador del proceso de coagulación.

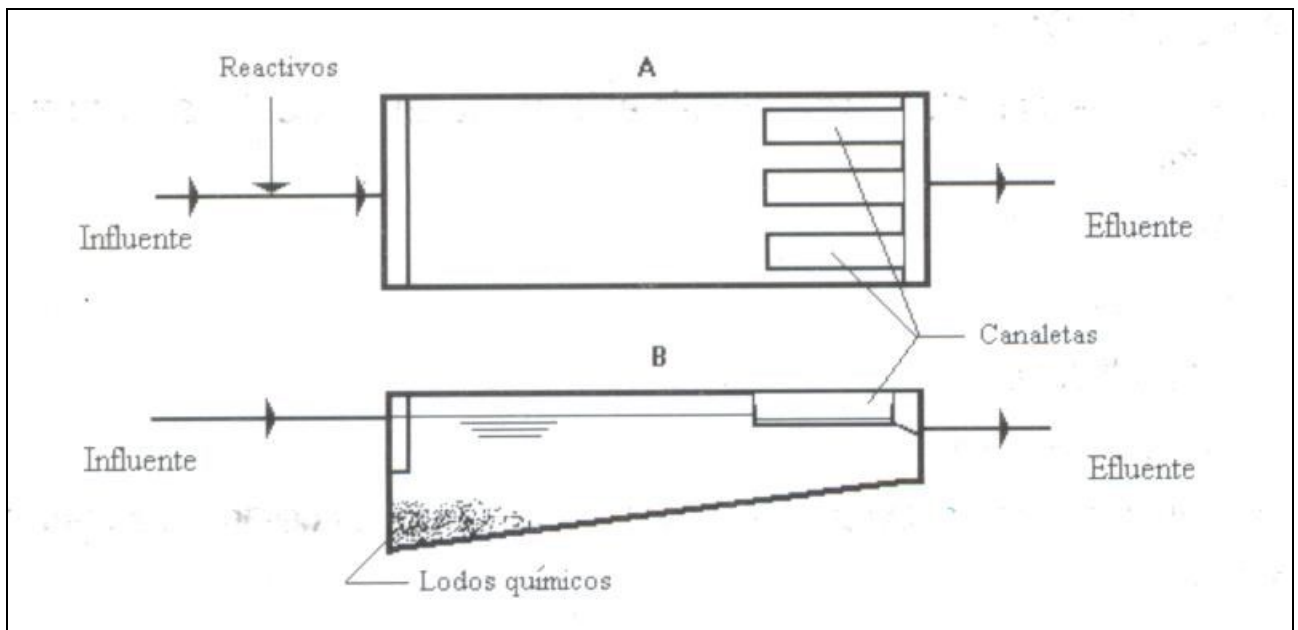


Fig. 3.11.- Corte transversal de los equipos sedimentadores.

Posterior a la sedimentación el agua tratada es enviada a filtros para eliminar las partículas aún en suspensión en el agua tratada. En la Figura 3.12 se muestra una foto de un sistema de filtros.



Fig. 3.12.- Filtros.

Para la desinfección del agua tratada por medio de cloro, en esta etapa final de la potabilización se garantiza a la población el recibir un agua libre de organismos patógenos. En la Figura 3.13 se muestra una fotografía del efluente de la cloración en una planta potabilizadora, y en la Figura 3.14 un esquema del arreglo para el sistema de desinfección.

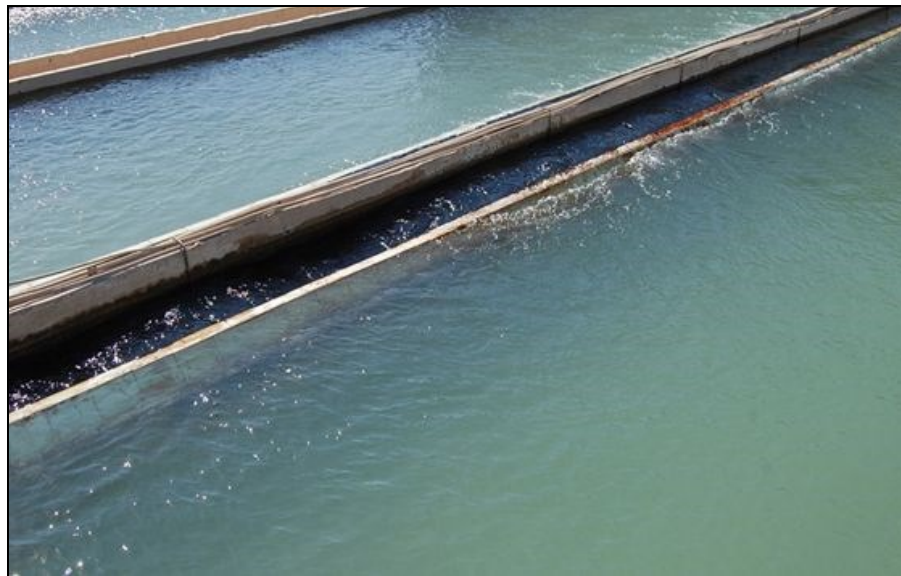


Fig. 3.13.- Efluente de agua potable salida de cloración.



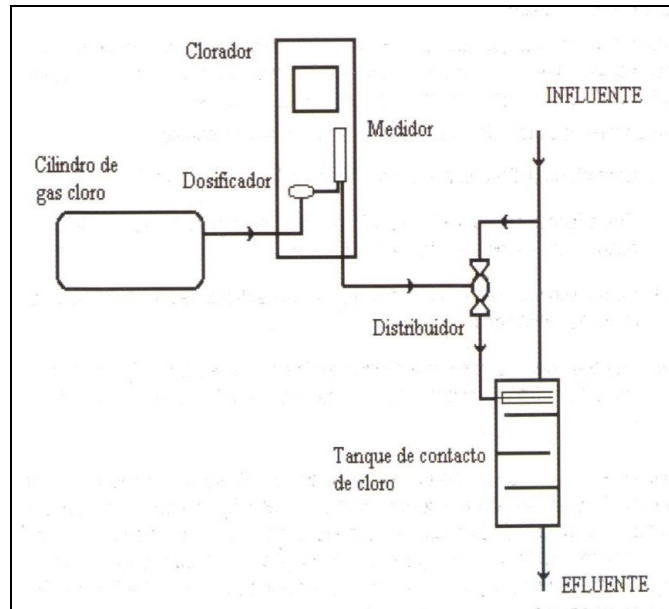


Fig. 3.14 Diagrama típico de cloración posterior a filtros.

### 3.3.1.- Muestreo

La toma de una muestra representativa de 20 L para realizar las pruebas preliminares a nivel laboratorio (jarras) se colecta directamente del cárcamo de bombeo posterior al tratamiento preliminar (eliminación de sólidos gruesos), la periodicidad durante una prueba en planta se fija de común acuerdo para monitorear la dosificación en planta.

Por otro lado a partir de que se inicia la dosificación de los productos se determina comenzar a monitorear los principales puntos de se consideren clave para vigilar que no se altere la sedimentación de las partículas desestabilizadas con los coloides, pudiendo ser:

- Influyente (posterior a tratamiento preliminar).
- Canaletas (2 puntos) posteriores al tanque sedimentador.
- Filtros (2 puntos).
- Precloración.

- Postcloración.

Realizar un muestreo por hora permite el conocer el desempeño del sistema, diagnosticar si se pueden modificar puntos de dosificación e inclusive si se requiere mejorar la dosificación con equipos de bombeo nuevos.

Por otro lado el monitorear tanto el influente como el efluente cada hora permite comprender el que durante un periodo de 24 horas cada planta muestre un perfil de picos a determinado tiempo, debido a las actividades humanas, industriales o incluso a detectar derrames inesperados que afecten el consumo de reactivos en una planta, además se garantiza un correcto uso de los coagulantes y floculantes, en el caso de que éstos últimos se apliquen. En la figura 3.15 se muestra un ejemplo.

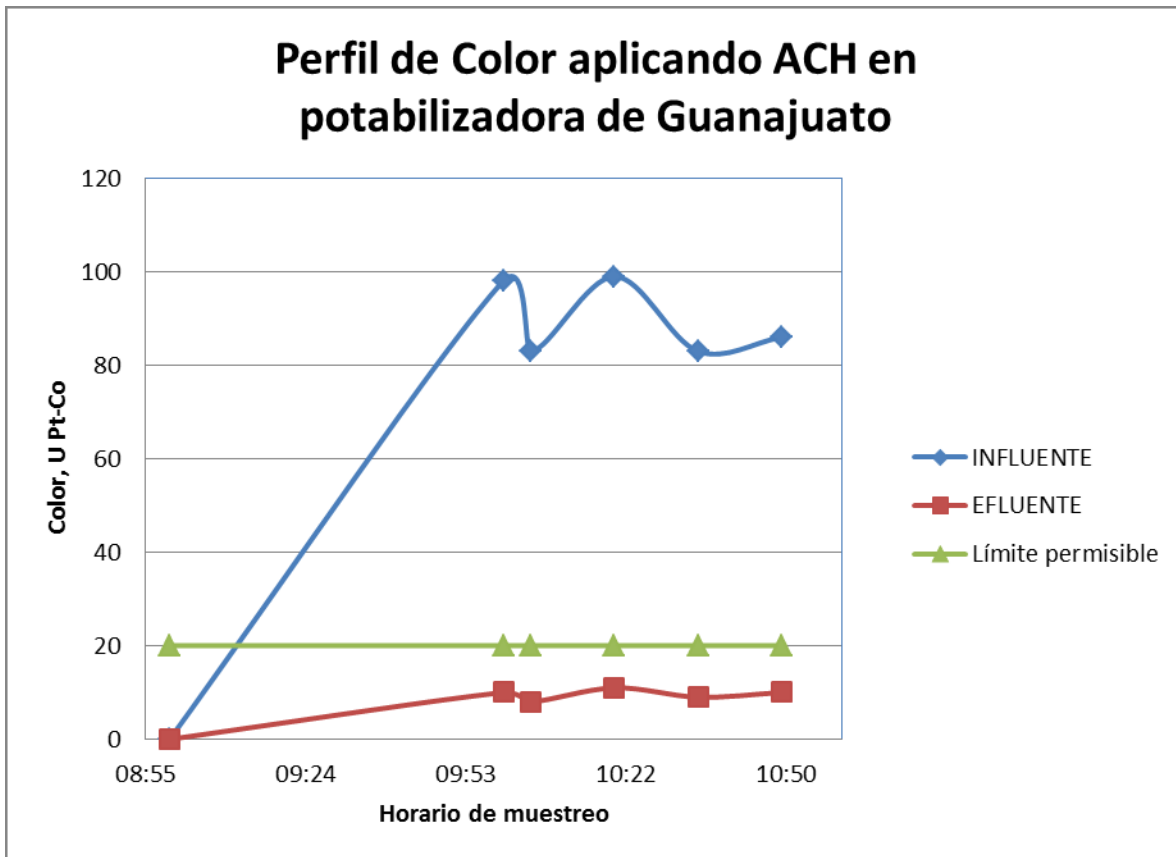


Fig. 3.15 Monitoreo de una prueba en planta durante 2 horas de aplicación de Clorhidróxido de aluminio (ACH).

### **3.3.2.- Parámetros de la prueba**

La NOM-127-SSA1-1994 establece que el abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radioactivas.

Define las características físicas y organolépticas como aquellas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos, mientras que el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio [10].

Como se muestra en la tabla 1.3 el Color en agua potable tiene como límite permisible 20 U Pt-Co., mientras que Turbiedad 5 UTN, la determinación de sólidos suspendidos permite identificar la presencia de coloides aún presentes en el agua potabilizada, sin embargo es un indicativo de la disminución de  $DBO_5$  o en su caso de la DQO.

El monitoreo se basa en registrar los valores de las principales características del agua: Sólidos suspendidos que se miden en mg/L, Turbiedad que se miden en NTU y Color en U Pt-Co. como ya fue discutido ampliamente en el 3.1.

El pH es una característica importante en la potabilización, este parámetro es constantemente evaluado a lo largo de la operación, en ocasiones no se cuenta con un registro pormenorizado por fases de la operación completa, sin embargo los datos de influente y efluente se registran en la bitácora de operación.

### **3.3.3.- Verificación de la calidad del agua**

Para evaluar los parámetros Color, Turbiedad y Sólidos suspendidos se utiliza el Colorímetro HACH DR/890 descrito en el apartado 3.1.2 de Equipos y materiales.

En los gráficos correspondientes se marcará los valores que establece la norma como límites permisibles, en el caso específico de Sólidos suspendidos se graficará

para evaluar el desempeño de influente, efluentes y otros puntos monitoreados durante las pruebas a nivel planta.

El pH se medirá como fue discutido en el mismo apartado 3.1.2, otras características como DBO5, DQO o Coliformes se mencionarán como parte del levantamiento en el laboratorio de la misma planta, aunque no forman parte del enfoque del estudio.

Aunque la calidad de agua incluye la ausencia de Organismos totales y Escherichia coli, generalmente es a través de una correcta dosificación de cloro (desinfección) que se garantiza esta calidad, sin embargo la coagulación también aporta a la eliminación de los sólidos suspendidos donde los microorganismos se alojan y de esta forma se concentran en el lodo el cual es acondicionado con cal para eliminarlos.

#### **3.3.4.- La problemática del manejo del lodo en las plantas potabilizadoras**

En diciembre de 2007 la Comisión Nacional del Agua editó el “Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento” en el que resaltó el hecho de que en una revisión a 9 plantas potabilizadoras importantes del país que abastecen a las ciudades de México DF (Magdalena Contreras), Estado de México (Naucalpan de Juárez, Villa de Allende y Peñón Texcoco), Sinaloa (Culiacán), Veracruz (Cerro Azul), y Jalisco (Guadalajara) se observó que existe una problemática en el manejo del lodo proveniente de sedimentadores y lavado de filtros, sólo se dispone en terrenos agrícolas o lagunas de sedimentación. Sin embargo es importante mencionar que los lodos provenientes de una planta potabilizadora varían en composición de acuerdo con el tipo de influente que procesen y con los residuos que le demande la aplicación para cada coagulante.

Los flóculos precipitados que sedimentan en los procesos se dejan un cierto tiempo en los clarificadores para que espesen, mientras que los sólidos del lavado de los filtros son producidos en periodos menores de 1 hora las veces que demande su limpieza en función del monitoreo que establece cada planta de los parámetros

principales o del caudal que traten, en la figura 3.16 se muestra un filtro de potabilizadora. En la figura 3.16 se muestra un filtro típico de potabilización.



Fig. 3.16.- Lecho de arena del filtro y canaleta.

Estos lodos contienen alúmina hidratada, materia inorgánica, sedimentos y arcillas, debido a ello estos sólidos no sufren descomposición biológica [14].

Las características del lodo de las potabilizadoras difiere de una población a otra debido a que son fuertemente dependientes de las características del agua cruda (influyente), además del tren de potabilización a que se someta. A continuación se muestra una tabla comparativa de las características del lodo proveniente de potabilización aplicando sales de aluminio.

Características del lodo con alúmina				
DBO <sub>5</sub> , mg/L	DQO, mg/L	pH	% Sólidos totales	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
30 a 300	30 a 5,000	6 a 8	0.1 a 4	15 a 40

Tabla 3.4.- Lodos provenientes de potabilización con sales alumínicas.

### Filtración

La operación de filtrado es uno de los métodos más frecuentemente usados para potabilizar aguas superficiales. Se emplea con o sin pretratamiento de coagulación y sedimentación (filtración directa). Un filtro típico tiene un tanque de concreto de profundidad aproximada mayor de 2.7 m. El espesor típico del medio es de 0.6 a

0.75 m y se encuentra colocado sobre grava y un bajo dren o falso fondo. (ver figura 3.17)

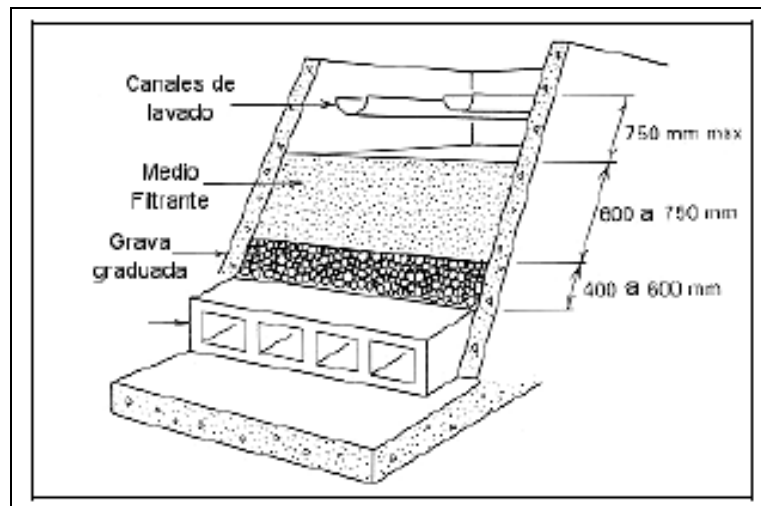


Fig. 3.17.- Corte frontal de un filtro típico [14].

En la potabilización el esquema más frecuente consiste en combinar la operación de coagulación-floculación con una sedimentación previa a la filtración. La tasa de filtración usual es de 5 a 25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h.

La coagulación es esencial para remover las partículas muy finas que de otra forma lograrían salir del filtro. Si se emplean una cantidad excesiva de floculante se forman aglomerados muy gruesos que recubren y se depositan en la parte superior del filtro tapando el paso del agua. Sin embargo flóculos muy pequeños pueden atravesar el filtro. Por ello la operación adecuada de un filtro debe ser analizada en forma conjunta con la coagulación. La filtración óptima ocurre cuando los flóculos coagulados no sedimentables son retenidos en los poros de todo el filtro para lograr verdaderamente la filtración en profundidad, en la figura 3.18 se muestra un esquema de tamaño de flóculos formados.

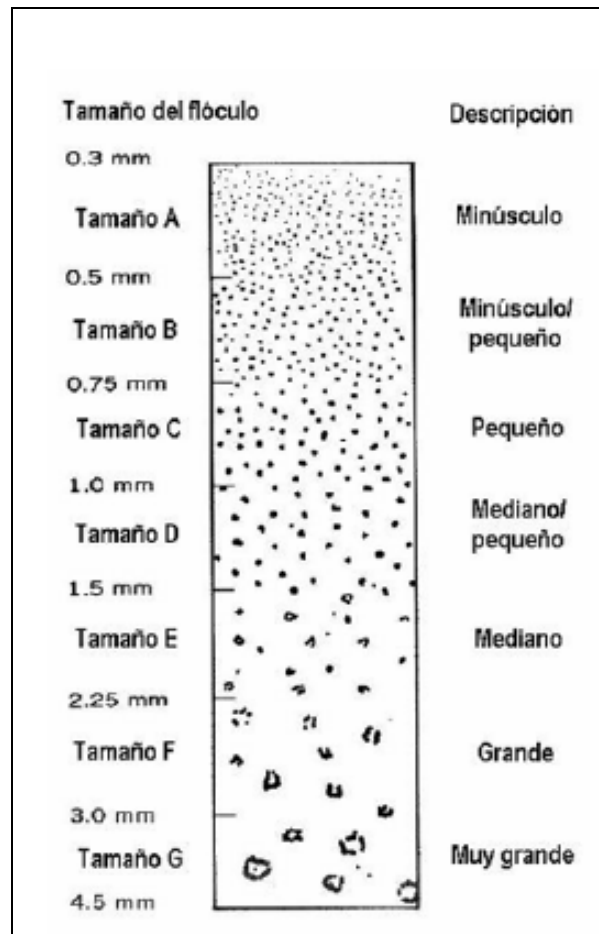


Fig. 3.18.-Tamaño del floculo producido, característica visual [14].

Si repentinamente se incrementa la velocidad de filtración en un equipo que contiene sólidos depositados, las fuerzas hidráulicas de corte también se incrementarán y llevarán sólidos retenidos hasta el efluente, por lo que deben evitarse cambios de velocidad o disponer del filtro adicionales que puedan entrar en operación cuando se requiera aumentar el caudal tratado, que incrementar la tasa de filtración en un equipo en operación, en la figura 3.19 se muestra un arreglo de filtros de planta potabilizadora.



Fig. 3.19.- Batería de filtros de tasa declinante.

### Medio filtrante

Generalmente se utiliza la arena, antracita, tierra diatomeas, perlita y carbón activado en polvo o granulado. Un filtro se puede rellenar con un solo tipo de medio o una combinación de éstos. El medio más común empleado es la arena de sílice o arena con antracita. Se emplea carbón activado como medio filtrante cuando se pretende no sólo eliminar los sólidos en suspensión, sino también eliminar los materiales disueltos por adsorción.

También el medio filtrante ideal para los filtros granulares profundos debe ser de un tamaño tal que retenga una gran cantidad de sólidos suspendidos y pueda limpiarse fácilmente por retrolavado, en la tabla 3.5 se muestran sus características.

Propiedades típicas de medios filtrantes para equipos de lecho granular					
Parámetros:	Arena sílice	Antracita	Carbon activado granular	Granate	Ilmenita
Densidad de grano ( $\rho_s$ ), g/cm <sup>3</sup>	2.65	1.45 a 1.73	1.30 a 1.50	3.6 a 4.2	4.20 a 4.60
Porosidad de lecho, $\epsilon_0$	0.42 a 0.47	0.56 a 0.60	0.50	0.45 a 0.55	N D
Esfericidad, $C_e$	0.70 a 0.80	0.46 a 0.60	0.75	0.60	N D

Tabla 3.5.- Propiedades típicas de medios filtrantes.



## **Lavados de filtros**

Los filtros se lavan para restablecer su capacidad cuando la calidad del efluente se degrada, o cuando la caída de presión a través del filtro alcanza un valor predeterminado. Para los filtros de gravedad, la pérdida de carga terminal seleccionada es generalmente la carga real disponible. En algunos casos, los filtros se lavan en un ciclo regular de tiempo, basado en la experiencia del operador.

Esta operación unitaria produce una cantidad relativamente grande de agua con un pequeño contenido de sólidos, se calcula que entre 0.01 a 0.1% (100 a 1000 mg/L), de sólidos.

Lo que a su vez depende de la eficiencia previa de coagulación y sedimentación, pues representa el 30% de los sólidos que escapan de estas etapas y pasan al filtrado.

En volumen el agua con lodo equivale al 2 o 3% del total del agua potabilizada, que generalmente se recupera en el influente y se inyecta nuevamente al proceso.

El agua de lavado de filtros y los lodos de los sedimentadores, se retornan generalmente sin enviarse propiamente a una fase de espesamiento y deshidratado de lodo, el manejo y tratamiento de los lodos en México es deficiente y en la mayoría de los casos no existe, por lo que son dispuestos en terrenos agrícolas o enviados a los ríos.

Por lo tanto la aplicación de coagulantes que reduzcan la generación de residuos o ayudan a que su futuro deshidratado mejore y demande unidades de espesamiento menores es de suma importancia.

En el estudio realizado en 2003 [4] se determinaron las dosis de aplicación de los coagulantes Sulfato de aluminio contra el Clorhidróxido de aluminio, la reducción fue de 2.53 a 1 Ton/m<sup>3</sup> de agua tratada y al realizar el balance en masa de la generación de lodo se determinó una reducción del 60% en la producción proveniente de hidróxidos metálicos, aunado a que la propuesta no incluye la

aplicación de cal como un reactivo de ajuste de pH que demanda operativamente el uso del Sulfato de aluminio.

Datos históricos de producción de lodo con Sulfato de aluminio muestran que la producción fue de 37.57 Ton/d (Soapap 2003), en lodos municipales la cantidad de Hidróxidos de aluminio son 25 g/pd (gramos por personas por día) y considerando un caudal de 1000 L/s que dividido por el dato promedio de agua que la población de México consume 250 L/pd (Litros por persona al día), se abastece a una población de 345,600 al relacionarse el dato anterior con la cantidad de Hidróxidos de aluminio provenientes del Sulfato de aluminio se estima una generación de 8.64 Ton/día de lodo proveniente de esta fase del lodo (sólo hidróxidos de aluminio).

En el estudio realizado en 2003 [4] se concluyó que mientras se aplicaban 2.53 Ton/día de Sulfato de aluminio, para el tratamiento, con Clorhidróxido de aluminio se aplicaba 1 Ton/día, por lo que se estimaba una producción de Hidróxidos de aluminio de 5.12 Ton/día, lo que representa una reducción de lodos en un 60%.

Como se ha analizado anteriormente el manejo de los lodos desde su formación en la coagulación-floculación, sedimentación, filtrado y disposición representa un desafío por optimizar por lo que cualquier optimización de origen rendirá beneficios económicos a largo plazo en las operaciones de la planta.

En cada estudio de los presentados se mencionará la relación de la propuesta del Clorhidróxido de aluminio frente al Sulfato de aluminio.

### **Cloración**

Esta operación no se relaciona con la etapa de coagulación-floculación, sin embargo se menciona dado la importancia de considerar condiciones óptimas de operación tales como tiempo de contacto, pH y temperatura.

La cloración se emplea en la potabilización para destruir patógenos, controlar problemas de olor, disminución de Hierro (Fe) y Manganeseo (Mn), así como eliminar nitrógeno amoniacal.

El cloro tiene una fuerte afinidad por varios compuestos y elementos, tales como Fe, Mn, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, así como con la mayor parte de los compuestos orgánicos presentes con quienes reaccionan muy lentamente y su grado de desarrollo depende de la cantidad de cloro disponible.

La aplicación más común del cloro es para desinfectar. Esta acción ocurre como producto de la reacción entre el HOCl (ácido hipocloroso) HOCl y las estructuras de las bacterias y virus, que inactiva procesos básicos para la vida. El HOCl es más eficiente que el ión Hipoclorito, por ello el poder del cloro residual disminuye conforme se incrementa el pH. La acción bactericida del cloro combinado es mucho menor que las del cloro residual libre, particularmente en términos de la velocidad de la reacción.

Los principales factores que afectan la eficiencia de desinfección son:

- Tiempo de contacto: Tiempo disponible para que el cloro actúe sobre los microorganismos. Este tiempo debe ser como mínimo de 10 a 15 minutos en agua potable y de 15 a 30 minutos en agua residual.
- Temperatura: La destrucción de microorganismos con cloro es mucho más rápida a mayor temperatura. A pesar de esto, el cloro es más estable en agua fría, lo que en la práctica se compensa la menor velocidad de desinfección. Así para lograr la misma acción a 4°C que a 21°C, la concentración de cloro residual debe ser el doble.
- pH: Afecta la acción desinfectante del cloro, particularmente la del cloro residual combinado. De forma general, mientras más alcalina sea el agua se requieren mayores dosis para una misma temperatura y tiempo de contacto. A un pH de 6.5 y una temperatura de 21°C, 0.3 mg/L de cloro residual combinado causa un efecto letal al 100% de bacterias. A la misma temperatura y para lograr el mismo efecto, el cloro residual combinado debe aumentarse hasta 0.6 mg/L a pH de 7.0 y hasta 1.2 mg/L a pH de 8.5

#### 4.- Casos de implementación del coagulante propuestos en Plantas potabilizadoras de México.

A lo largo de una década se ha evaluado tanto en plantas de tratamiento industriales como en plantas potabilizadoras la eficiencia del Clorhidróxido de aluminio como una alternativa real de sustitución frente al Sulfato de aluminio o Sales férricas que en ocasiones causan problemas de dosificación por su alta capacidad corrosiva.

A continuación se presenta una reseña de cada una de las pruebas en plantas potabilizadoras en las que se desarrolló el trabajo técnico a nivel laboratorio y a nivel planta para aprobarse su implementación.

El marco legal de las licitaciones donde se participó exigen discrecionalidad de los datos específicos como domicilios e incluso imágenes de cada una de las unidades de operación, sin embargo los datos técnicos de las pruebas y sus resultados forman parte del desarrollo profesional que se comparte con la comunidad técnica para dejar constancia de los resultados de su aplicación. En la tabla 4.1 se indican las plantas objeto de estudio.

Implementación de Clorhidróxido de aluminio a nivel laboratorio y/o planta		
Caso:	Localidad:	Prueba:
1	Villahermosa, Tabasco	Jarras
2	Zamora, Michoacán	Jarras
3	Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	Prueba en planta

Tabla 4.1.- Plantas potabilizadoras objetos de estudio.

#### **4.1.- Planta potabilizadora en Villahermosa Tabasco**

En el mes de julio de 2004 se propuso evaluar diferentes presentaciones disponibles de Clorhidróxido de aluminio (variantes en presentación, basicidad o densidad) frente al sulfato de aluminio y en condiciones diferentes de acuerdo con la variación de condiciones (alta y baja turbulencia del río Carrizal) del que se toma el influente a dicha planta potabilizadora.

El perfil de comportamiento por parámetro (Color, Turbiedad y Sólidos suspendidos) nos permite conocer el desempeño por producto, visualizar como disminuye cada uno de los parámetros y en su caso comparar contra el resto de los coagulantes evaluados.

Frente a la misma calidad del influente da la certeza de elegir un producto que mantenga una tendencia invariable, salvo condiciones muy cercanas al estiaje, baja turbiedad y color, debido a un cambio repentino de las condiciones climáticas de cada región.

##### **4.1.1.- Localización geográfica**

Villahermosa, Tabasco está ubicada entre las coordenadas geográficas extremas del municipio son: al norte 18° 20', al sur de 17° 43' de latitud norte; al este 92°35', al oeste 93° 15' de longitud oeste.

La planta está localizada en el centro de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, toma el influente del río carrizal el cual es un brazo del principal río del sureste que se origina desde Chiapas, el río Grijalva.

Villahermosa es una ciudad que abastece de agua potable a una población de 640, 359 habitantes [15]. En la figura 4.1 se muestra un mapa de la región.

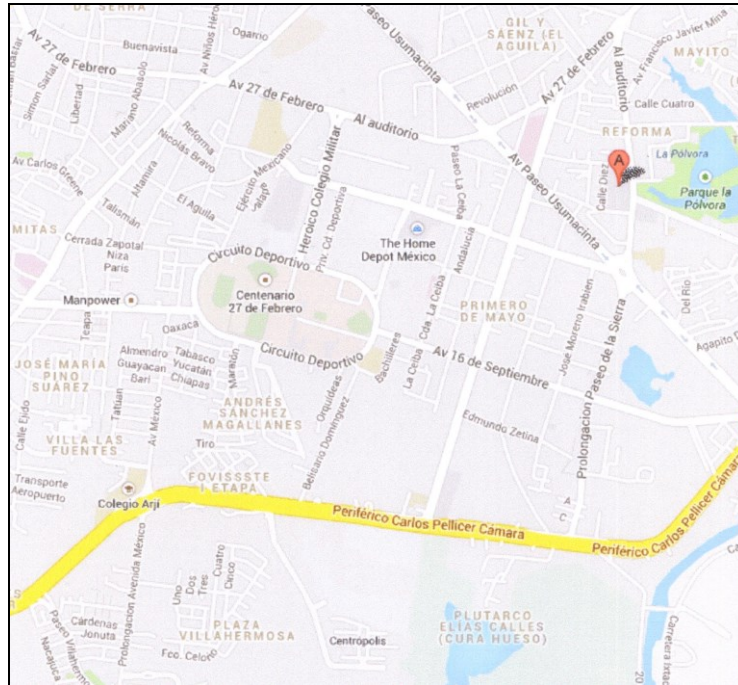


Fig. 4.1.- Ciudad de Villahermosa, Tabasco, la planta se señala en el punto A.

#### 4.1.2.- Características generales

La planta cuenta con un tren de tratamiento típico con un desarenador, cárcamo de bombeo, clarificadores, filtros y cloración, trata un caudal de 480 m<sup>3</sup>/d (5.5 L/s), debido a que se alimenta de uno de los ríos más caudalosos del país (Se conoce como subcuenca del Bajo Grijalva al recorrido comprendido entre la ciudad de Villahermosa hasta la desembocadura al Golfo de México en la Barra de Frontera, Tabasco. Es la mayor y más importante de Tabasco con un área de 21,780 km<sup>2</sup>.

Por lo anterior en condiciones de alta turbulencia por lluvia las características como Color, Turbiedad y Sólidos suspendidos son muy diferentes a la de condiciones de estiaje.

#### 4.1.3.- Prueba de jarras y valoración de resultados

La prueba de jarras se realizó el 29 de julio de 2004 en el laboratorio central de la Planta potabilizadora, el caudal registrado fue de 480 m<sup>3</sup>/d (5.5 L/s), se determinaron

los valores de los parámetros Turbiedad, Color, Sólidos suspendidos y pH como se muestra en la tabla 4.2.

<b>Características del influente Planta Villahermosa</b>		
<b>Parámetro:</b>	<b>Valor:</b>	<b>Unidades</b>
Turbiedad	158	UNT
Color	150	U Pt-Co
Sólidos suspendidos	122	mg/L
pH	7.6	-

Tabla 4.2.- Influyente de la Planta potabilizadora de Tabasco

#### 4.1.4.- Implementación del coagulante

El alcance de las pruebas fue a nivel laboratorio, se propuso los coagulantes que se muestran en la tabla 4.3.

<b>Coagulantes aplicados en la prueba de jarras:</b>					
<b>Nombre comercial:</b>	<b>Naturaleza química:</b>	<b>Presentación disponible:</b>	<b>% Basicidad:</b>	<b>% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:</b>	<b>Densidad liq., gr/ml:</b>
PAX PD	Clorhidróxido de aluminio	Sólida	50 a 90	29	1.23
PAX XL 19	Clorhidróxido de aluminio	Líquida	80	23	1.32
SAL	Sulfato de aluminio sin hierro	Líquida	0	7.5	1.30
PAX 18	Clorhidróxido de aluminio	Líquida	41	17	1.37
ALS	Sulfato de aluminio con hierro	Líquida	0	20	1.23

Tabla 4.3.- Descripción técnica de principales coagulantes aplicados en los estudios.

El ALS es un sulfato de aluminio comercial que contiene trazas de hierro, es más barato y ampliamente disponible en el mercado.

#### 4.1.5.- Adecuación y desarrollo de la prueba

Se recolectaron 50 L del influente para desarrollar la evaluación con los 5 coagulantes anteriormente descritos, el pH del medio mostró un valor de 7.6

(neutralidad) por lo que no se decidió ajustar este parámetro y por otro lado se pudo comparar en las mismas condiciones a todas los reactivos disponibles.

Sólo se aplicaron los coagulantes y los tiempos de contacto por fase se muestran en las tablas 4.4 y 4.5.

<b>Prueba de jarras:</b>		
<b>Mezclado:</b>	<b>Tiempo de contacto, min:</b>	<b>Revoluciones por minuto:</b>
Rápido	2	100
Lento	3	50
Floculación	5	10
Reposo	10	0

Tabla 4.4.- Tiempos de contacto y mezclado en Pruebas de jarras.

#### **Prueba de jarras por productos:**

<b>Serie 1</b>	<b>Dosis</b>		<b>Formación de floc</b>	<b>Velocidad sedimentación</b>	<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>	<b>Sólidos suspendidos</b>	<b>pH</b>
	<b>mg/L</b>	<b>µl/L</b>	<b>Seg</b>	<b>Seg</b>	<b>UNT</b>	<b>U Pt-Co</b>	<b>mg/L</b>	
Producto	0	0	0	0	158	150	122	7.6
ALS	10	8.13	60	30	28	45	14	7.1
	20	16.26	50	30	17	25	5	7.0
	30	24.39	50	30	12	15	1	6.8
	40	32.52	50	30	9	15	1	6.6
	50	40.65	50	30	7	10	1	6.5
	60	48.78	50	30	5	5	1	6.4

Tabla 4.5.- Primera Serie con ALS, Sulfato de aluminio estandar

El coagulante ALS tiene una densidad de 1.23 g/ml, se observa que el flóculo formado en las primeras 3 jarras es muy fino, mientras que en el resto fue mediano y tardó en promedio 50 segundos en formarse.

Los resultados de la 2ª. Serie se muestran en la tabla 4.6.



Serie 2	Dosis		Formación de floc	Velocidad sedimentación	Turbiedad	Color	Sólidos suspendidos	pH
	mg/L	µl/L						
Producto	0	0	0	0	158	150	122	7.6
PAX PD	5	20.83	60	50	10	15	1	7.6
	10	41.67	50	40	6	10	1	7.5
	15	62.50	40	30	10	10	1	7.4
	20	83.33	40	30	8	10	1	7.3
	25	104.17	40	30	5	5	1	7.2
	30	125.00	40	30	8	5	1	7.0

Tabla 4.6.- Segunda serie con PAX PD.

El coagulante PAX PD se preparó al 20% en peso (al dosificar es importante considerar este factor) y tiene una densidad de 1.2 g/ml, se observa que el flóculo formado en la primer jarras es mediano, mientras que en el resto fue grande y tardó en promedio 40 segundos en formarse, es una buena opción de aplicarse. En la tabla 4.7 se muestran los resultados de la tercera serie.

Serie 3	Dosis		Formación de floc	Velocidad sedimentación	Turbiedad	Color	Sólidos suspendidos	pH
	mg/L	µl/L						
Producto	0	0	0	0	158	150	122	7.6
PAX XL 19	5	3.70	40	40	8	10	1	7.5
	10	7.41	30	30	6	5	1	7.4
	15	11.11	30	30	8	10	1	7.3
	20	14.81	30	30	7	10	1	7.2
	25	18.52	30	30	4	5	1	7.1
	30	22.22	30	30	4	5	1	7.0

Tabla 4.7.- Tercera serie con PAX XL 19

El coagulante PAX XL 19 es líquido y tiene una densidad de 1.35 g/ml, se observa que el floculo formado en la primer jarras es mediano, mientras que en el resto fue grande y tardó en promedio 30 segundos en formarse, también es una buena opción de aplicarse. En la tabla 4.8 se muestran los resultados de la cuarta serie.

Serie 4	Dosis		Formación de floc	Velocidad sedimentación	Turbiedad	Color	Sólidos suspendidos	pH
	mg/L	µl/L	Seg	Seg	UNT	U Pt-Co	mg/L	
Producto	0	0	0	0	158	150	122	7.6
SAL	30	1000	40	50	7	15	3	7.2
	60	2000	30	50	5	10	1	7.0
	90	3000	30	50	6	5	1	6.8
	120	4000	30	60	8	10	3	6.5
	150	5000	30	60	11	15	5	6.3
	180	6000	30	60	12	15	3	6.0

Tabla 4.8.- Cuarta Serie con SAL libre de hierro

El sulfato de aluminio libre de hierro mostró un comportamiento muy similar al ALS, sin embargo ofrece mejores resultados al posicionarse por debajo en los perfiles de desempeño de Turbiedad, Color y Sólidos suspendidos, el floc se apreciar en la primeras 3 jarras mediano, donde se logran sus mejores resultados de desempeño, los resultados se muestran en la tabla 4.9.

Serie 5	Dosis		Formación de floc	Velocidad sedimentación	Turbiedad	Color	Sólidos suspendidos	pH
	mg/L	µl/L	Seg	Seg	UNT	U Pt-Co	mg/L	
Producto:	0	0	0	0	158	150	122	7.6
PAX 18	5	4	40	60	18	20	10	7.5
	10	7	30	60	9	10	2	7.4
	15	11	30	50	6	5	1	7.3
	20	15	30	50	6	4	1	7.2
	25	18	30	50	5	3	1	7.1
	30	22	30	50	3	2	1	7.0

Tabla 4.9.- Quinta Serie con PAX 18

El PAX 18 es un coagulante que tiene una densidad de 1.37 g/ml, en la primer jarra forma un flóculo fino, mientras que en el resto se aprecia mediano y tarda en formarse 30 segundos, es una buena opción para probarse nuevamente incluso en planta.

#### 4.1.6.- Resultados

A continuación se muestran los perfiles de desempeño para cada uno de los parámetros esenciales en los que se observa el trabajo de cada coagulante. En la figura 4.2 se compara la turbiedad.

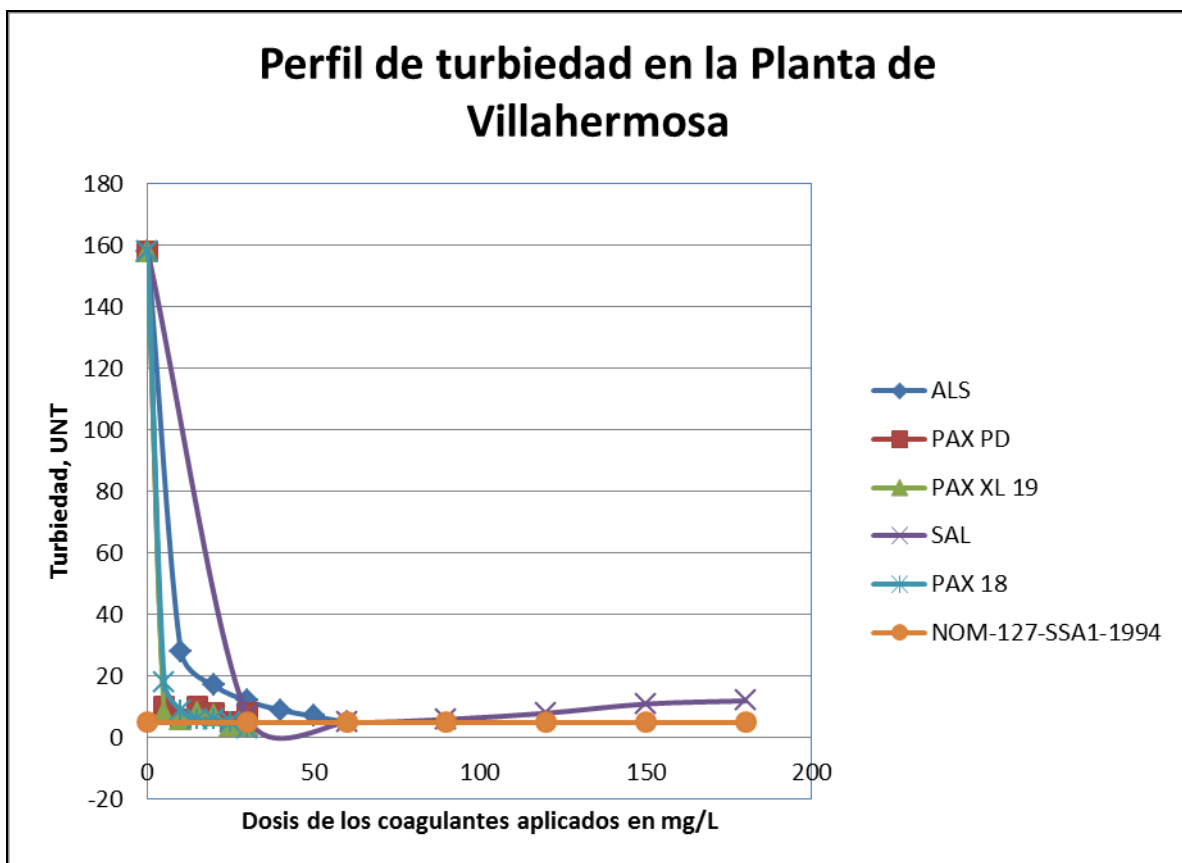


Fig. 4.2.- Desempeño de los coagulantes aplicados en Turbiedad.

Se observa como todas las opciones de Clorhidróxido de aluminio se ajustan a la baja tanto en resultados como en dosis de aplicación y cumplen con los valores que solicita la norma 127, en el caso de ALS sólo en la última dosis alcanza a entrar a los

valores de la norma, pero con una dosis mucho mayor, el SAL (libre de hierro) lo logra en la segunda dosis de aplicación aunque a dosis mayores se dispara y se desvía de los valores que requiere la norma. En la figura 4.3 se compara el color.

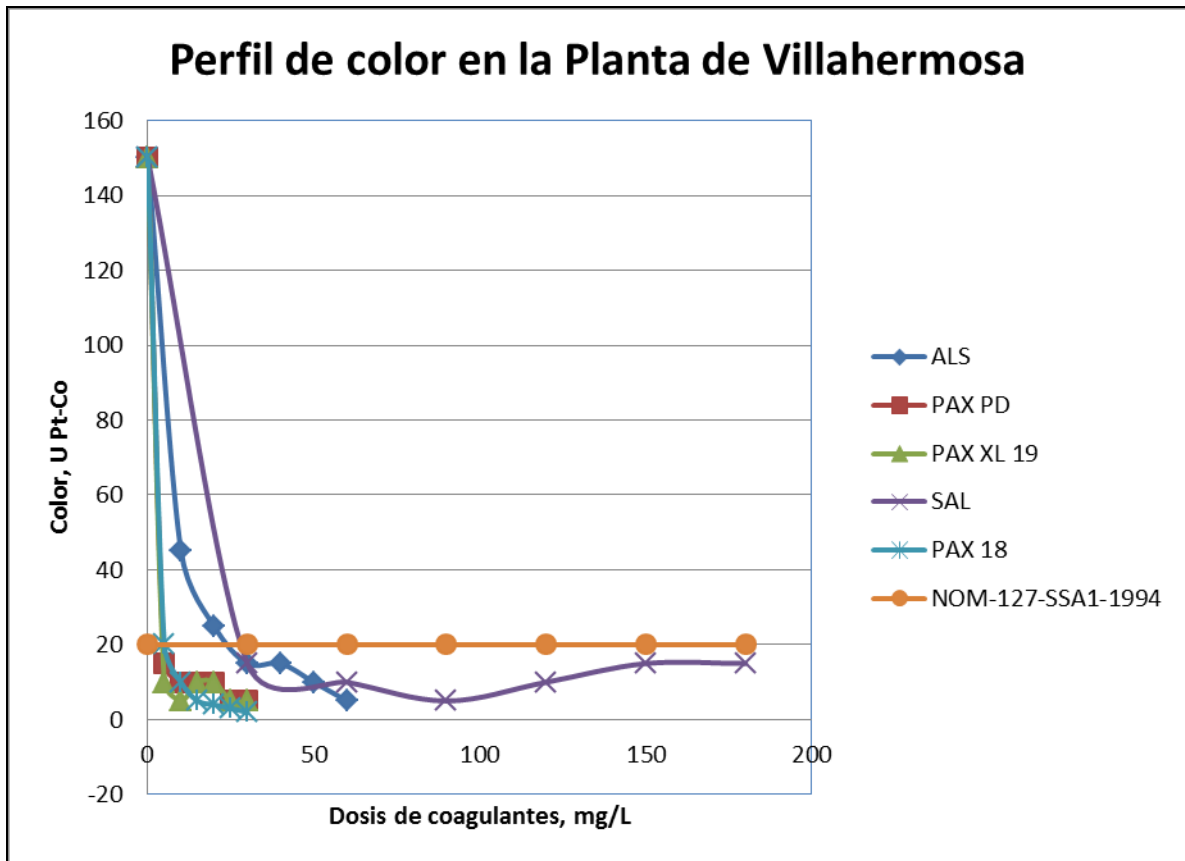


Fig. 4.3.- Desempeño de los coagulantes probados en Color.

Los resultados obtenidos para el parámetro de color nuevamente se observa que las opciones de Clorhidróxido de aluminio se ajustan a la baja tanto en resultados como en dosis de aplicación y cumplen con los valores que solicita la norma 127, mientras que tanto ALS como SAL (libre de hierro) logran cumplir con dosis mayores, sin embargo el SAL muestra una variación alta por lo que de implementarse en planta debe controlarse la dosis de aplicación. En la figura 4.4 se comparan los sólidos suspendidos.

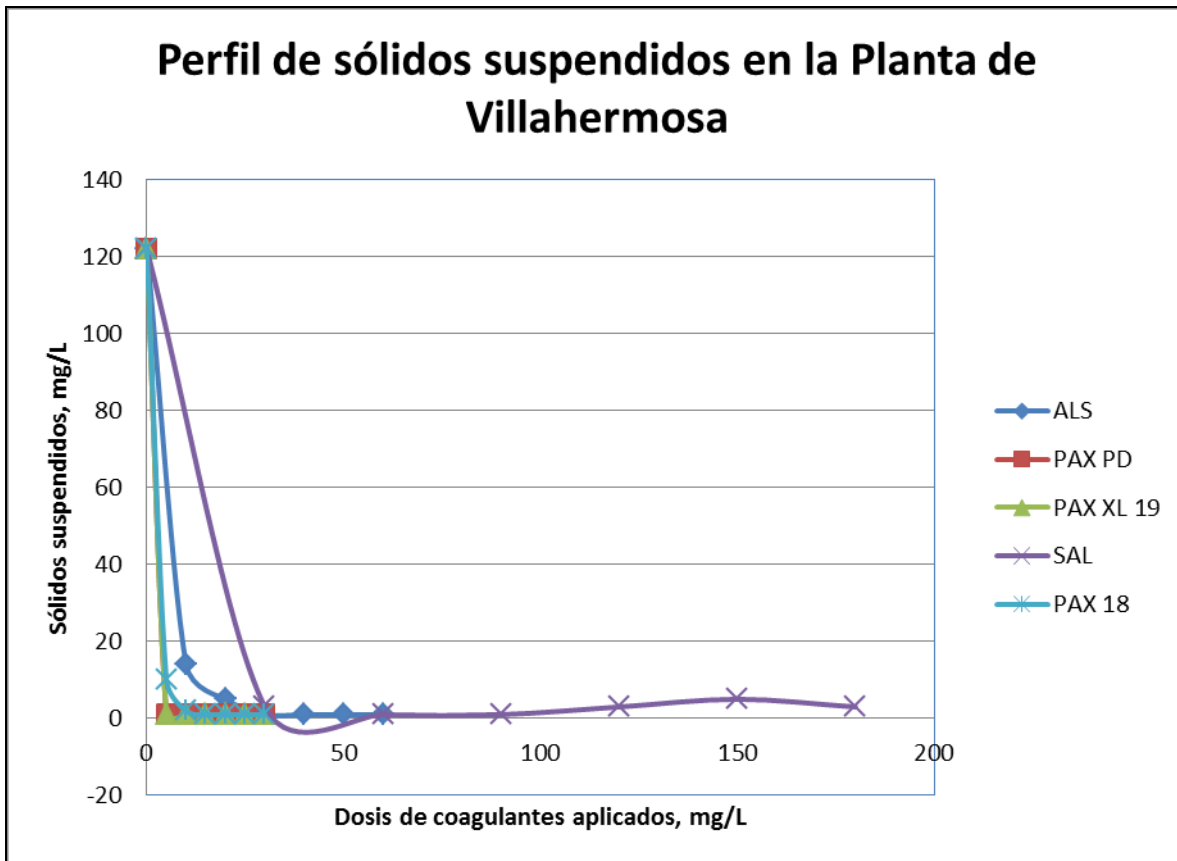


Fig. 4.4.- Deseempeño de los coagulantes probados en sólidos suspendidos.

En sólidos suspendidos no existe un valor normativo, de hecho se menciona en la NOM-127-SSA1-1994 que debe haber ausencia de los mismos, desde luego que estas pruebas no pasaron a través de un filtrado que garantizaría su total eliminación. Sin embargo es claro que todas la variedades de Clorhidróxido de aluminio muestran una tendencia a la baja tanto en resultados como en dosis de aplicación, mientras que tanto ALS como SAL requieren dosis mayores para alcanzar valores similares que el resto de los coagulantes.

#### 4.1.7.- Análisis de resultados

Evidentemente la alternativa de Clorhidróxido de aluminio en cualquiera de sus presentaciones resulta viable, no se obtienen valores fuera de norma y sus dosis óptimas por producto se muestran en la tabla 4.10:

Resultados de aplicación en prueba de jarras:	
Coagulante aplicado:	Dosis óptima, mg/L
PAX PD	10
PAX XL 19	10
SAL	30
PAX 18	10
ALS	60

Tabla 4.10.- Dosis óptimas de aplicación

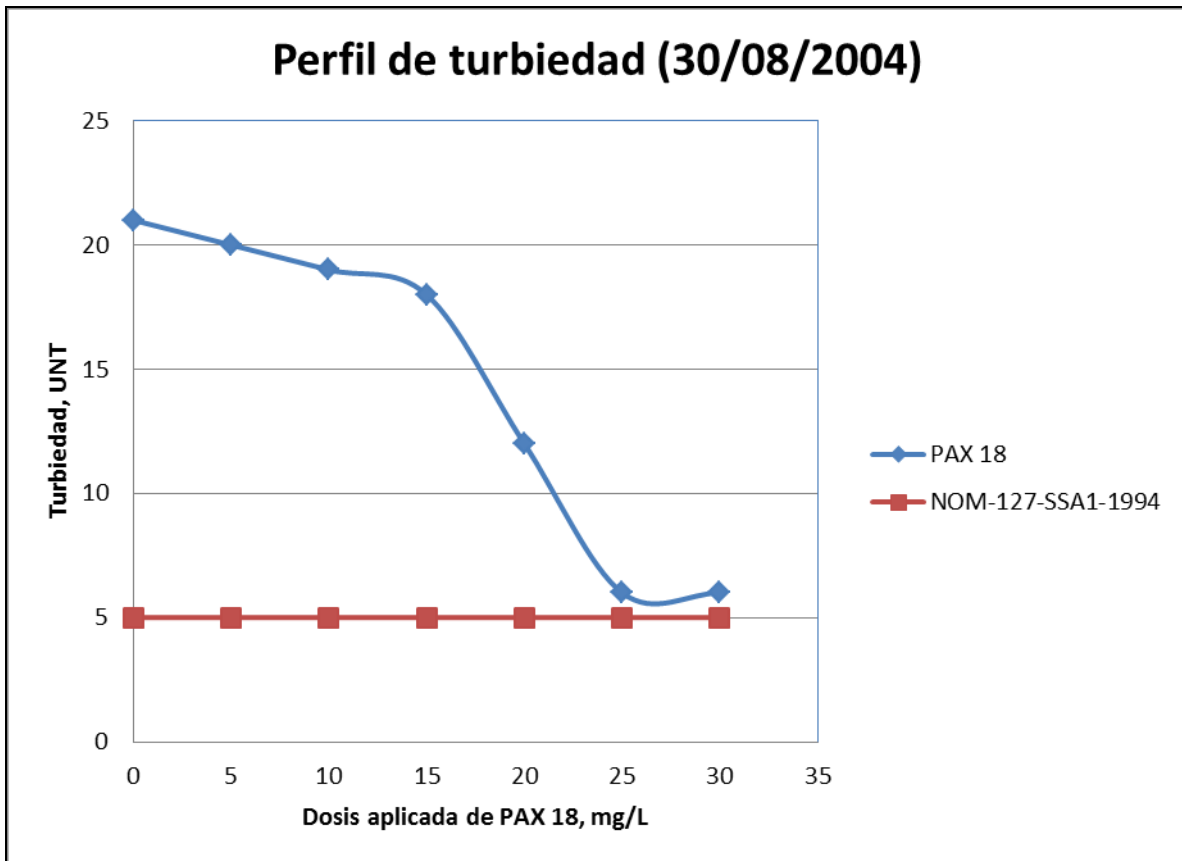
Nuevamente se cumple la relación del Sulfato de aluminio frente al Clorhidróxido de aluminio de 3 a 1, como se pudo apreciar en las descripciones de cada serie en cuanto a la formación de las partículas de lodo con Clorhidróxido de aluminio se formaron más compacto y de tamaño mediano, lo que reduce el volumen de lodo formado y permite un mejor filtrado, se espera que a nivel planta repercuta en una mejor eficiencia de operación en los filtros.

#### **Nueva evaluación el 30 de agosto de 2004 con PAX 18 en la planta de Villahermosa.**

En función de los resultados obtenidos, así como de la disponibilidad para una prueba a nivel planta se evaluó nuevamente la mejor opción de Clorhidróxido de aluminio para la planta de Villahermosa, el PAX 18. Los resultados se muestran en la tabla 4.11 y en la figura 4.4 se compara la turbiedad.

Serie 1	Dosis		Formación de floc	Velocidad sedimentación	Turbiedad	Color	Sólidos suspendidos	pH
	mg/L	μl/L	Seg	Seg	UNT	U Pt-Co	mg/L	
Producto	0	0	0	0	21	40	15	6.91
PAX 18	5	4	30	50	20	35	15	6.90
	10	7	30	50	19	35	15	6.86
	15	11	30	50	18	25	13	6.86
	20	15	30	40	12	20	7	6.81
	25	18	30	40	6	15	2	6.78
	30	22	30	40	6	15	2	6.8

Tabla 4.11.- Revisión de resultados aplicando nuevamente el PAX 18 con otro influente



Fing. 4.5.- Perfil de turbiedad en nuevas pruebas de PAX 18

Es importante resaltar el hecho de que las condiciones del influente cambiaron drásticamente, días previos había dejado de llover en la zona y las características del agua del río descendieron a valores más bajos, generalmente en las plantas potabilizadoras este fenómeno les significa un seguimiento más cercano para mantener una dosis y una operación muy puntual porque una sobredosis hace que las flóculos se vuelvan más quebradizos y floten, afectando tanto la sedimentación como el filtrado.

En este caso la turbiedad registrada el 30 de agosto de 2004 fue de 20 Unidades nefelométricas, al evaluar el desempeño del PAX 18 se observó que demandó una dosis mayor que en las pruebas del 29 de julio del mismo año, la dosis de 25 mg/L se acercó al valor que fija la norma para el parámetro de turbiedad, por lo que en caso de que se dosificara en planta habría que dar un seguimiento cada hora para mantener dentro de los límites todos los factores de la operación de la planta, incluyendo el tamaño del floculo. En la figura 4.6 se muestra la disminución de color.

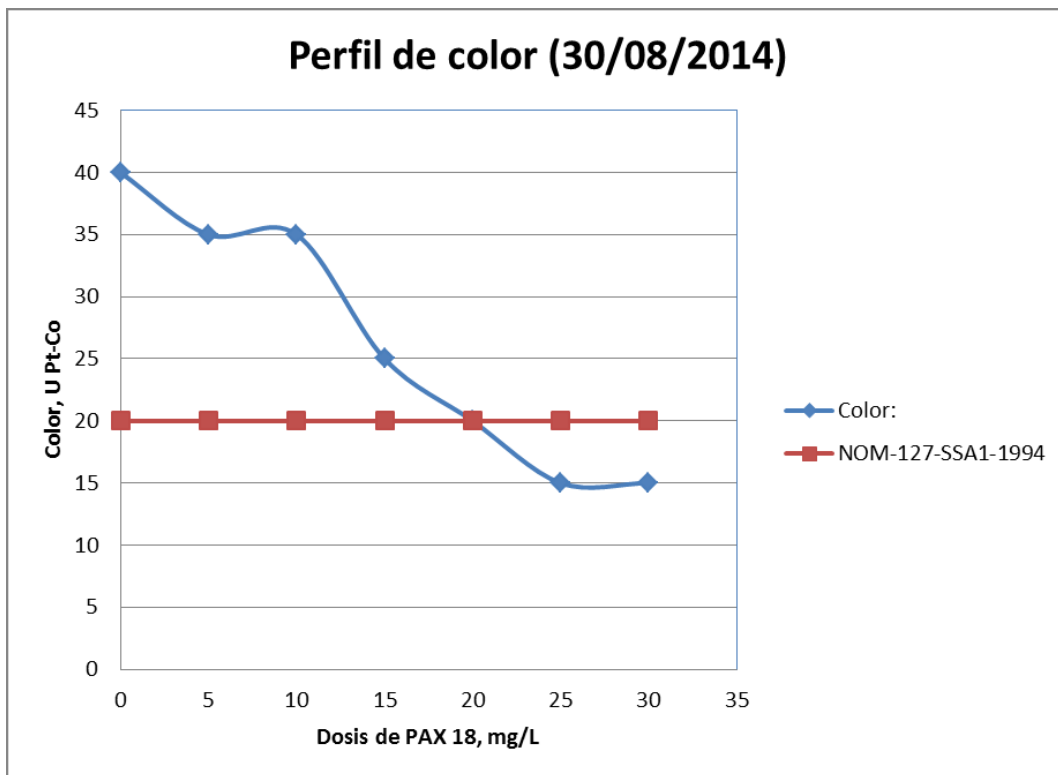


Fig. 4.6.- Perfil de color aplicando el PAX 18



De la misma forma el parámetro de color descendió dramáticamente y es hasta la tercera dosis de 20 mg/L de PAX 18 que se logra alcanzar el valor que marca la norma para color, nuevamente se concluye que un monitoreo a nivel laboratorio permitirá mantener la operación de la planta en los límites permisibles para este parámetro, a su vez la formación de la partícula, monitoreo del influente y control en el filtrado mantendrá la operación normal en la planta potabilizadora. En la figura 4.7 se muestra el perfil de sólidos suspendidos.

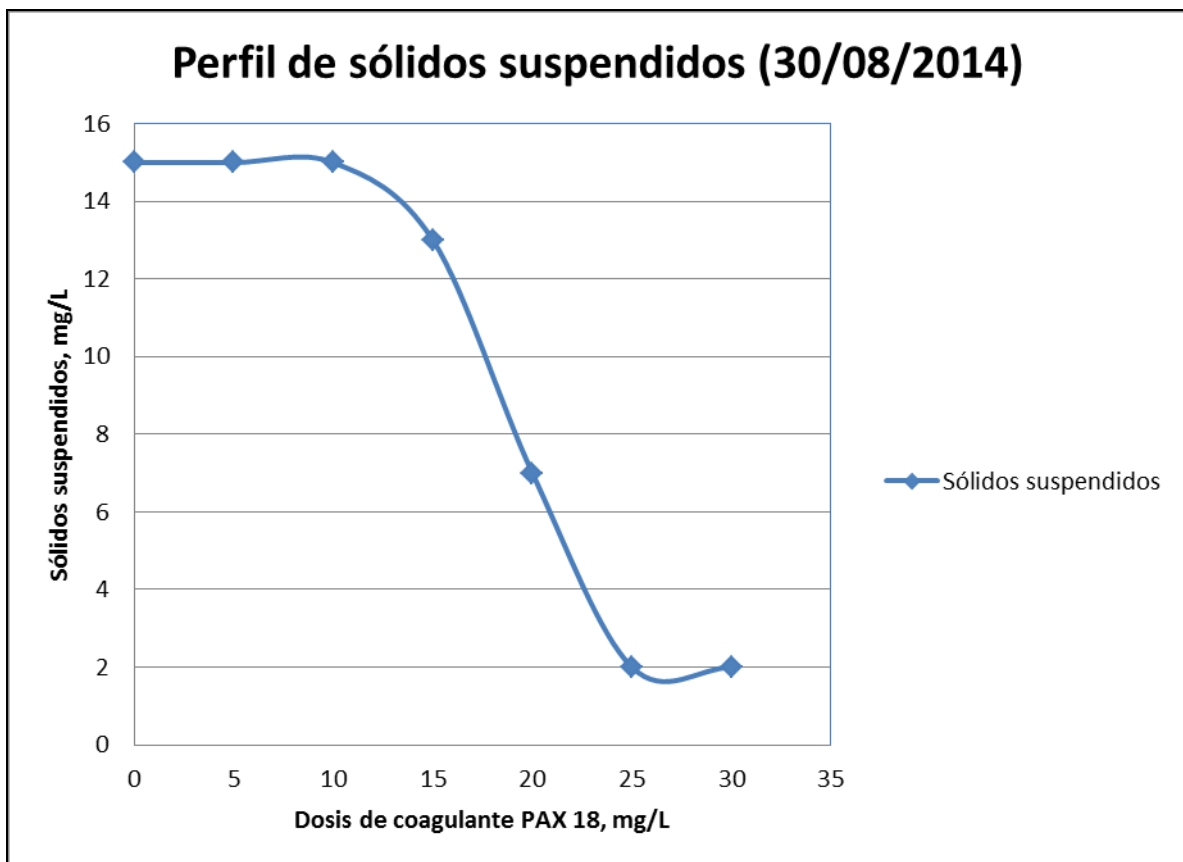


Fig. 4.7.- Evaluación de PAX 18 en sólidos suspendidos.

Los sólidos suspendidos son una muestra del desempeño del coagulante aplicado en la planta potabilizadora, mientras menor sea este valor mayor confianza permitirá determinar la dosis de aplicación.

En la etapa de filtrado se garantizará cualquier posibilidad de arrastre de partículas

floculadas a lo largo del proceso. Los resultados de las pruebas en la Potabilizadora de Villahermosa dejaron un buen precedente para evaluar nuevas opciones de coagulantes alternativas al Sulfato de aluminio, desafortunadamente decisiones comerciales entorpecieron su seguimiento para evaluar inmediatamente en planta de acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

#### **4.2.- Evaluación de ACH en pruebas en Zamora, Michoacán con influentes provenientes de pozos**

La zona Occidental de México se encuentra localizada dentro un área de acuíferos sobreexplotados, como se abordó en el capítulo 2.4 existen lugares con baja disponibilidad del recurso, por lo que en el Municipio de Zamora Michoacán una fuente de abastecimiento son los pozos, aunque es un agua muy confiable existe presencia de algunos minerales que le imprimen cierta turbiedad al influente al oxidarse con la extracción.

##### **4.2.1.- Localización geográfica**

Zamora de Hidalgo se localiza al norte del estado de Michoacán, en las coordenadas 19°59' de latitud norte y 102°17' de longitud oeste, a una altitud de 1,560 metros.

Dos sistemas hidráulicos cruzan el valle de Zamora. Por un lado el río Duero, y por el otro, el río Celio. Varios arroyos confluyen en estos ríos, entre los más importantes se encuentran el arroyo Prieto, el Hondo, y el Blanco. Hay un sistema de presas que contienen y regulan las corrientes fluviales compuesto por la Presa de Álvarez, la Presa del Colorín, y la Presa de Abajo. Las corrientes de superficie temporales son abundantes según la época del año, sin embargo cada vez más se recurre a extraer agua del subsuelo. Cuenta con una Población de Zamora de Hidalgo: 201 348 habitantes [15].

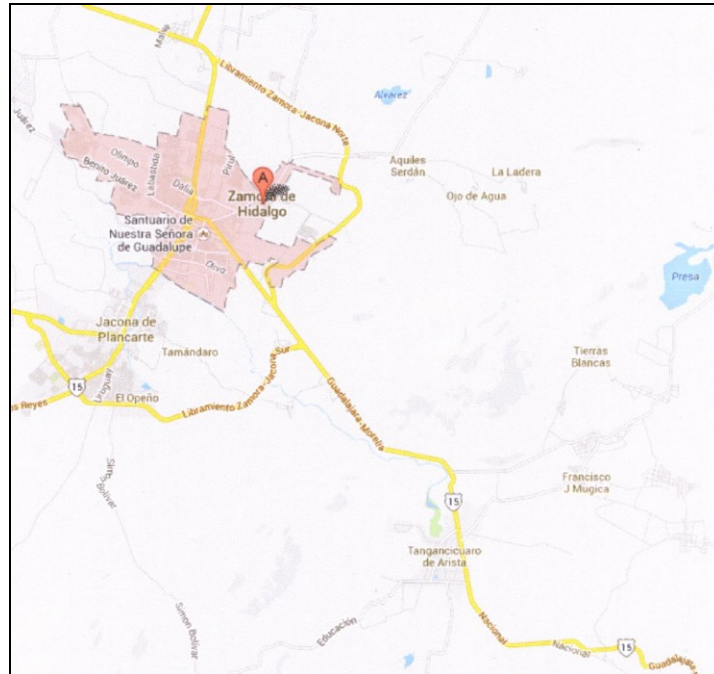


Fig. 4.8.- Ciudad de Zamora, Michoacán, la ciudad no cuenta con potabilizadoras

#### 4.2.2.- Características generales

No existe una planta potabilizadora como tal en el Municipio de Zamora, Michoacán, sin embargo las necesidades de acondicionamiento del agua tanto superficial como del subsuelo han despertado el interés de los operadores del organismo por conocer algunas alternativas de tratamiento.

El 4 de agosto de 2005 se llevaron a cabo una serie de pruebas con el objetivo de evaluar la efectividad del Clorhidróxido de aluminio con agua proveniente del subsuelo.

Se determinaron los parámetros básicos de Sólidos suspendidos, Turbiedad, Color y pH, como se aprecia en la tabla 4.12.

Características del agua de 3 pozos en Zamora				
Pozo:	Turbiedad, UNT	Color, U Pt-Co	Sólidos suspendidos, mg/L	pH
1	11	52	10	7.8
2	8	37	3	7.3
3	32	165	30	7.5

Tabla 4.12.- Influyente de tratamiento para pruebas de jarras

Se asume que debido a las características del subsuelo de la región el agua del subsuelo tiene dureza por las sales y una alta presencia de sólidos disueltos como cloruros y sulfatos, por lo que por medio de la coagulación-floculación y filtración puede resolverse esta problemática local.

#### 4.2.3.- Prueba de jarras y valoración de resultados

Se realizaron una serie de pruebas preliminares aplicando por separado los coagulantes PAX PD y PAX 18 (ambos Clorhidróxidos de aluminio), en dosis muy bajas y controlables debido principalmente a que el influente no presentaba valores muy altos a eliminar por medios físico-químicos.

Para ello se realizaron las pruebas de jarras pertinentes con los tiempos de contacto y Revoluciones por minuto que se muestran en la tabla 4.13.

Prueba de jarras Zamora		
Mezclado	Tiempo de contacto, min	Revoluciones por minuto
Rápido	1	200
Floculación	5	40
Sedimentación	10	0

Tabla 4.13.- Tiempos de contacto y mezclado en pruebas de jarras de Zamora, Mich

En la tabla 4.14 se muestran las pruebas de jarras por cada caso:

Pozo 1		Dosis		Formación de floc	Velocidad sedimentación	Turbiedad	Color	Sólidos suspendidos	pH
		mg/L	µl/L	Seg	Seg	UNT	U Pt-Co	mg/L	
No. Jarra	Producto	0	0	0	0	11	52	10	7.8
1	PAX PD	10	44	10	5	3	0	0	7.5
2		15	65	10	5	3	0	0	7.5
3		10	44	10	8	4	0	0	7
4		8	35	10	10	4	0	0	7

4.14.- Resultados obtenidos en el pozo núm 1.

Se observa que la turbiedad es el parámetro que nos indica un perfil sistemático de remoción, aunque en color y sólidos suspendidos la disminución de parámetros se

reduce a cero, realmente es en la turbiedad en la que se aprecia un perfil de abatimiento progresivo, en las últimas 2 jarras de la serie se aplicó un segundo coagulante con el objetivo de clarificar aún más la calidad del efluente, fue el PAX 18, con el objetivo de mejorar los resultados con las dosis de 5 y 6 mg/L para las jarras 4 y 5 respectivamente. Los resultados se observan en la tabla 4.15.

Pozo 2		Dosis		Formación de floc	Velocidad sedimentación	Turbiedad	Color	Sólidos suspendidos	pH
		mg/L	µl/L						
No. Jarra	Producto	0	0	0	0	8	37	3	7.3
1	PAX PD	10	43	30	10	4	17	2	7.1
2		15	65	20	10	2	0	0	7
3		15	65	20	10	2	0	0	7
4		15	65	20	10	3	3	0	7

4.15.- Resultados obtenidos en el pozo núm 2.

En un tercer pozo se repite la misma estrategia hacer una sinergia de coagulantes para secuestrar tanto los sólidos suspendidos como algunas contaminantes insolubles más afines al PAX 18, las dosis de este segundo coagulante fueron: 5, 7.5, 10 y 15 mg/L. en las 4 jarras respectivamente. En la tabla 4.16 se presentan los resultados.

Pozo 3		Dosis		Formación de floc	Velocidad sedimentación	Turbiedad	Color	Sólidos suspendidos	pH
		mg/L	µl/L						
No. Jarra	Producto	0	0	0	0	32	165	30	7.5
1	PAX PD	15	65	20	12	5	4	3	7.4
2		15	65	20	15	4	0	0	7.4
3		12	65	20	15	5	6	0	7.4
4		12	52	20	12	8	28	5	7.4

4.16.- Resultados obtenidos en el pozo núm 2.

En este último pozo se evaluaron dosis a la baja en la variedad de Clorhidróxido de aluminio sólido (PAX PD) 15 y 12 en las jarras 1,2 y 3,4 respectivamente.

A su vez la dosis del Clorhidróxido de aluminio líquido (PAX 18) aplicadas en las jarras de 1 a 4 fueron: 15, 10, 7.5 y 6.

### **Conclusión:**

Aunque los resultados que se obtienen en esta prueba de jarras no pueden evaluarse a nivel planta, es importante que los organismos operadores impulsen el aprovechamiento de alternativas técnicas disponibles no sólo para potabilizar agua susceptible de ser usada, sino además de impulsar el tratamiento del agua residual que pueda aprovecharse en el sector agrícola que es la principal actividad económica del municipio de Zamora, Michoacán.

### **4.3.- Planta Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez cuenta con la suficiente capacidad instalada para potabilizar el agua proveniente de los ríos que cruzan la ciudad, el 17 de julio de 2007 se iniciaron las pruebas piloto a nivel laboratorio para evaluar el Clorhidróxido de aluminio frente al Sulfato de aluminio, el caudal de la planta fue de 887 L/s.

Del 17 al 20 de julio se realizaron pruebas de jarras para determinar dosis de aplicación en diferentes horarios y calidades de agua, paralelamente se inició la prueba a nivel planta el 17 de julio a las 15:00 Hrs.

Se aplicó como coagulante Clorhidróxido de aluminio (nombre comercial PAX 18) con el objetivo de alcanzar la proporción de 1 a 3 en cuanto a las dosificaciones del Clorhidróxido de aluminio frente al Sulfato de aluminio.

#### **4.3.1.- Localización geográfica**

Tuxtla Gutiérrez está ubicada a los 16°45' de latitud norte y a los 93°07' de longitud oeste a una altitud de 520 metros sobre el nivel del mar. Tiene una superficie aproximada de 117,879 kilómetros cuadrados y una población de 434,174 habitantes, cuenta con cinco

captaciones de agua proveniente de los ríos Grijalva, Santo Domingo, La Chacona, San Agustín, y Rancho Viejo, con las que se captan y distribuyen 1,250 litros por segundo a más de 100,000 tomas domiciliarias.

Tiene una temperatura media anual de 28 grados centígrados alcanzando las temperaturas más altas durante los meses de marzo, abril y mayo, llegando a los 36 grados centígrados; su clima está clasificado como cálido sub-húmedo con lluvias en verano, con precipitaciones anuales del orden de los 940 mm en promedio durante los meses de mayo a septiembre.

Sin embargo durante el invierno también existen lluvias abundantes a lo largo de todo el sureste del país, la capacidad instalada de la planta es de 1000 L/s sin embargo el caudal durante la prueba se fijó en 887 L/s (76,636.38 m<sup>3</sup>/d). En la figura 4.9 se muestra la ubicación de esta planta.

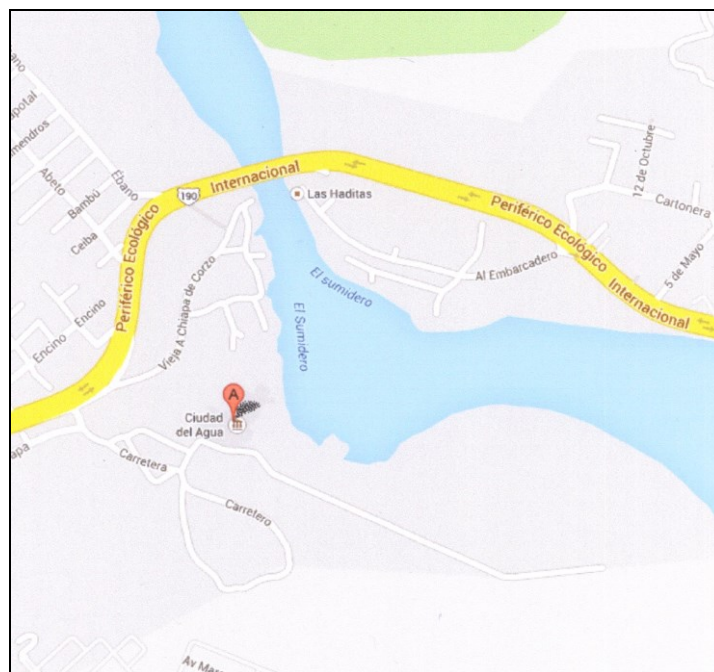


Fig. 4.9.- Planta potabilizadora de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chis.

### 4.3.2.- Características generales

El tren de tratamiento que se aplica en el proceso de potabilización es el uso de agentes químicos denominado de coagulación-floculación, en este tipo de tratamiento el gasto más relevante lo representa la operación.

Para que el tren de tratamiento sea eficiente es necesario encontrar las condiciones óptimas de operación del proceso, como son: los agentes de coagulación-floculación y los ayudantes de floculación más convenientes aplicados en dosis adecuadas; el pH; los sistemas de mezclado rápido y; para lograr una floculación eficiente, la evaluación de posibles opciones de agentes de coagulación naturales de bajo costo o de mayor rendimiento.

### 4.3.3.- Prueba de jarras y valoración de resultados

Se realizaron 13 pruebas de jarras para determinar las dosis de aplicación y los perfiles de comportamiento de ambos coagulantes, pero un ejemplo del influente se presenta en las tablas 4.17 y 4.18. En la figura 4.10 se muestra el comparativo de perfiles de turbiedad.

Características del influente Tuxtla Gutiérrez, Chis		
Parámetro:	Valor:	Unidades
Turbiedad	70	UNT
Color	387	U Pt-Co
Sólidos suspendidos	89	mg/L
pH	7.7	-

Tabla 4.17.- Valores típicos de la calidad del influente.

Prueba de jarras en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas:		
Mezclado:	Tiempo de contacto, min:	Revoluciones por minuto
Rápido	2	100
Lento	15	40
Reposo	10	0

Tabla 4.18.- Tiempos de contacto y velocidad de mezcla.



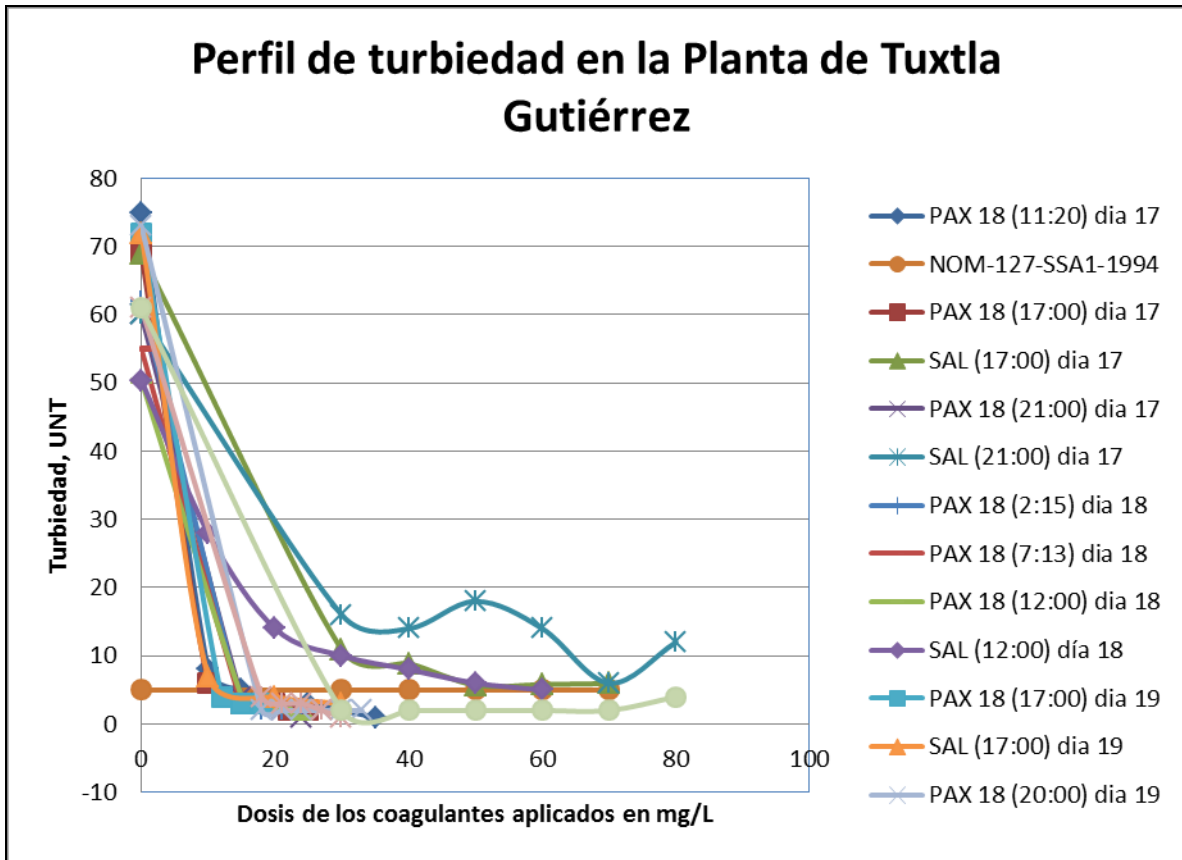


Fig. 4.10.- Perfil de turbiedad a partir de 14 prueba de jarras.

#### 4.3.4.- Implementación del coagulante

Se realizaron pruebas de jarras antes de arrancar la prueba, las cuales arrojaron una dosis promedio de aplicación: 15 mg/L, a las 15:00 horas se comienza el suministro de PAX-18, junto con lo remanente de Sulfato de Aluminio ( debido a que aún había producto en las líneas de aplicación) este se mantuvo durante aproximadamente 15 a 20 minutos), la dosis de PAX-18 con la cual se arranco fue de 25.61, se decidió comenzar con esta dosis para evitar la desestabilización del proceso, posteriormente de común acuerdo se decidió tomar lecturas de la calidad de agua del influente, salida de sedimentadores, salidas filtros 1,2 y 3, del punto después de filtros ( donde convergen todos los filtros) y por último el punto Cisterna 2.

Los parámetros medidos fueron Turbidez NTU, Color aparente UPt-Co, Sólidos Suspendidos mg/L, Potencial Hidrogeno, estos en un intervalo de 2 horas para cada

análisis, así también se analizó el Aluminio Residual en la Cisterna 2 y en el Influyente este parámetro fue leído en intervalos tomados al azar.

Los valores promedio se muestran en la tabla 4.19.

Características promedio por corriente	Turbiedad, UNT	Color, U Pt-Co	Sólidos suspendidos, mg/L
Influyente	66	476	113
Efluente	3	19	3
% de Disminución por parámetro	96	95	97

4.19.- Resumen de características promedio de agua de influente y efluente.

#### 4.3.5.- Resultados y análisis por parámetros:

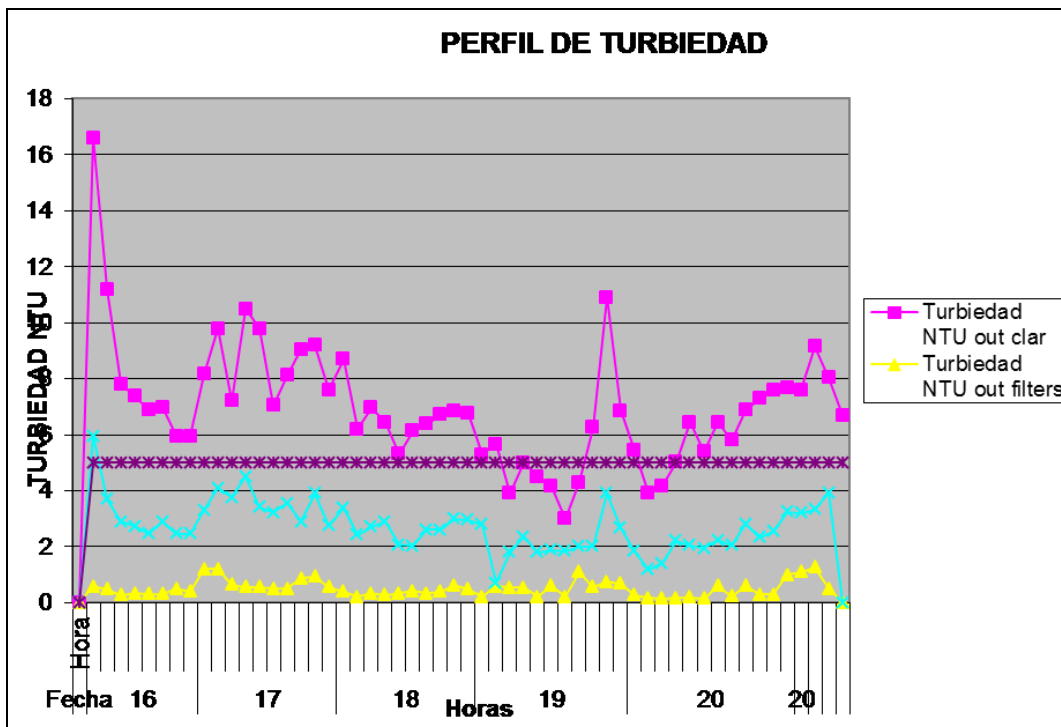


Fig. 4.11.- Monitoreo de turbiedad durante la prueba de 5 días en la planta.

En la figura 4.11 se puede apreciar el monitoreo que se realizó de a la salida de los clarificadores (primera línea morada), a la salida de los filtros (línea amarilla) y el

suministro a la red municipal de agua potable (línea azul), el límite máximo permisible fue 5 UNT de turbiedad.

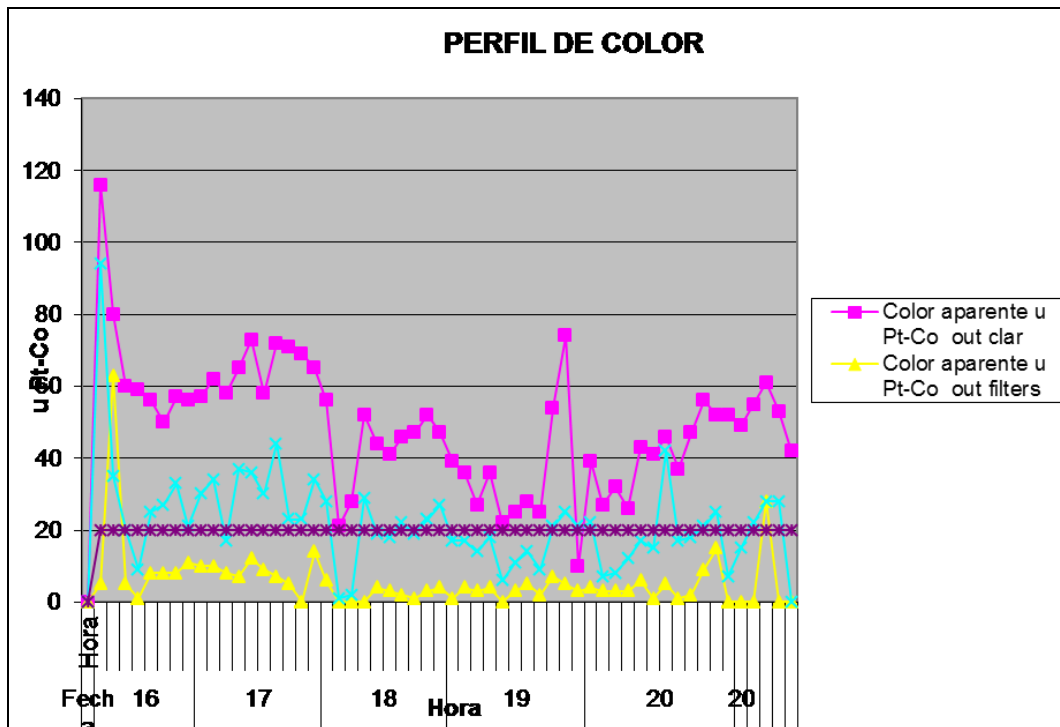


Fig. 4.12.- Monitoreo del parámetro de color de la prueba en planta.

En la figura 4.12 se puede apreciar el monitoreo que se realizó de a la salida de los clarificadores (primera línea morada), a la salida de los filtros (línea amarilla) y el suministro a la red municipal de agua potable (línea azul), el límite máximo permisible fue 20 Unidades de color, salvo algunos puntos que se disparan en los 2 primeros días, el resto cumple con la normatividad exigida.

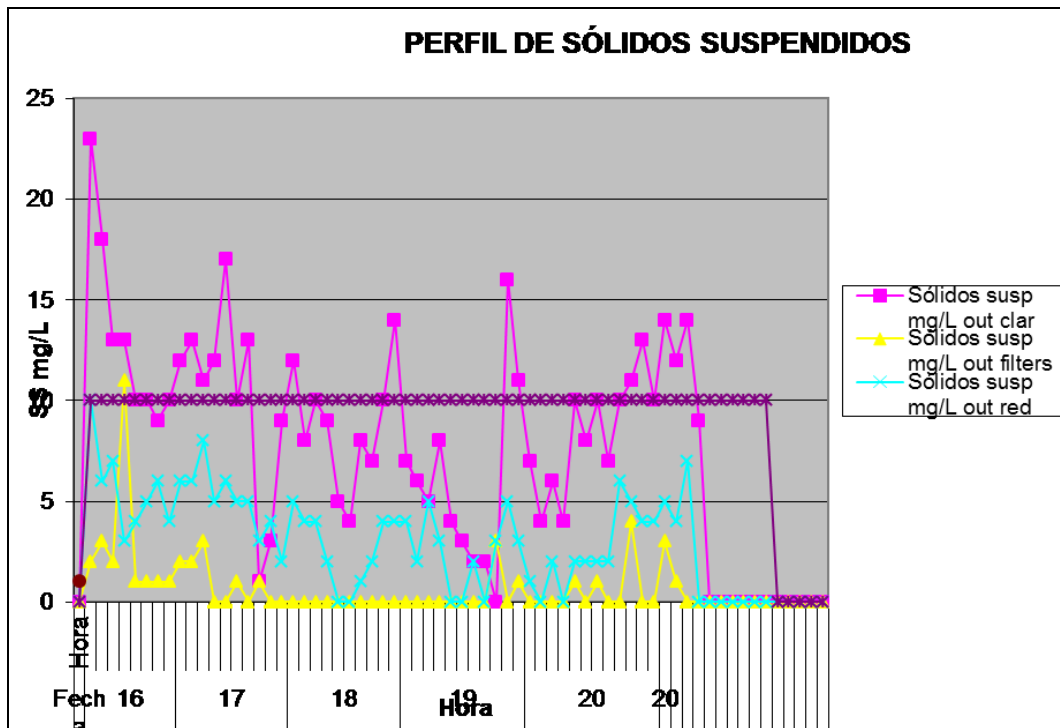


Fig. 4.13.- Monitoreo del parámetro de color de la prueba en planta.

En la figura 4.13 se puede apreciar el monitoreo que se realizó de a la salida de los clarificadores (primera línea morada), a la salida de los filtros (línea amarilla) y el suministro a la red municipal de agua potable (línea azul), el límite máximo fijado por el organismo operador fue de 10 mg/L de sólidos suspendidos, el agua potable enviada a la red municipal cumplió el parámetro establecido.

#### 4.3.6.- Conclusiones

Consumo:

Dividiendo la dosis volumétrica por cada segundo aplicado y multiplicado por los segundos contenidos en una hora y este resultado multiplicado por las horas que se mantuvo la dosificación volumétrica, y por último dividiendo entre mil para convertirlo a litros, esto para cada dosis volumétrica aplicada y sumando todos estos resultados obtenemos el volumen total de litros gastados durante los siete días de operación durante veinticuatro horas

**Flujo Gastado de PAX-18 = 5,649.372 litros / 7 días de operación.**

**Toneladas Gastadas de PAX-18 = 5,649.372 \* 1.35 = 7, 626.6522 kilos.**

Caudal tratado:

Calculando para un gasto volumétrico de agua a tratar de 887 lps, podemos calcular el flujo tratado por hora de operación el cual fue de 3 193 200.00 litros/ hora, se debe tomar en cuenta que el día 22 de julio de 2007, hubo un corte de flujo de 10:30 hasta las 13:14 horas que se reanudo el bombeo, en este tiempo existió un lapso de 2 horas 44 minutos sin suministrar agua por tanto;

Durante 7 días se operaron 168 horas menos las 2.44 horas realmente se operaron 165.56 horas por tanto el flujo tratado durante estas horas fue de 528,666.192 m<sup>3</sup>.

**Caudal Tratado: (3,193,200.00 litros/ hr)\* (165.56 hrs) = 528,666.192 m<sup>3</sup>**

El Clorhidróxido de aluminio (PAX 18) es un coagulante que sustituyó satisfactoriamente al Sulfato de aluminio (SAL) en la planta potabilizadora, cabe hacer mención que a su vez el SAL requería de un ayudante para la floculación, en este caso un coagulante orgánico, de acuerdo al organismo operador se aplicaban 5 mg/L de este floculante (PoliDadmac).

Mientras que el PAX 18 trabajó prácticamente solo y con resultados consistentes apegados a la norma.

En el caso de los retrolavados del filtro se reportaban comúnmente 7 operaciones al día, con el Clorhidróxido de aluminio se redujo a 4, considerando que sólo se aplicó 5 días aproximadamente y la reducción efectiva habría llevado al menos 8 días de operación.

## 5.- Conclusiones generales

La aplicación de un coagulante alternativo al comúnmente usado Sulfato de aluminio ha aportado resultados favorables no sólo en la calidad de agua, sino en su aplicación, suministro y menor generación de lodos.

Como puede apreciarse en los resultados de cada caso, los cuales fueron supervisados por los Departamentos de control de calidad de los organismos donde se realizaron todas las pruebas, la clarificación se obtuvo al aplicar una dosis de Clorhidróxido de aluminio frente al Sulfato de aluminio en una relación de 1 a 3.

Esta disminución se mantuvo en los tres casos estudiados y pudo mantenerse en la prueba en planta analizada en Tuxtla Gutiérrez.

Es importante resaltar al control estadístico del proceso es una herramienta indispensable para la toma de decisiones tanto del operador para controlar las dosis de operación y detectar problemas en los equipos y unidades de las plantas.

Derivado del seguimiento en las planta especialmente en la prueba en planta de Tuxtla Gutiérrez se detectaron algunas oportunidades de mejora que redundarán en beneficio de la operación así como del agua potable producida.

Así como comprender las ventajas y limitaciones en cada unidad del sistema de tratamiento por planta, las dosis de aplicación, los tiempos de residencia, sedimentación, filtrado y retrolavado.

El seguimiento estadístico permite detectar irregularidades, se observaron indicios de deterioro en las paredes de los tanques de mezcla de reactivos, se recomendó dar mantenimiento en un paro técnico, pues se presentan crecimientos algales en el tanque floculador y en el sedimentador.

Se recomendó establecer un programa de mantenimiento preventivo y correctivo para los equipos electromecánicos (bombas) debido a que debieron ser completamente sustituidas por equipo nuevo durante la prueba, trabajar sin las dosificaciones correctas afecta la operación general de la planta potabilizadora, lo

que representa mayor dificultad para el control del proceso, dosificar de manera intermitente con dosis altas no es recomendable por las dificultades que representa la formación del flóculo, el tiempo de permanencia en los clarificadores y la calidad de agua al final que se debe suministrar a la población.

La permanencia del control estadístico de los parámetros Turbiedad, Sólidos suspendidos y Color permite identificar de acuerdo con las condiciones climáticas estacionales los perfiles de desempeño así como la dosis óptimas de aplicación, esta correlación permite suministrar una dosis correcta lo que redundará en reducción de costos de operación.

Puntualizando la propuesta de aplicar el Clorhidróxido de aluminio cumple la relación establecida en los estudios preliminares que se mencionan en los antecedentes de la presente tesis, entre los coagulantes Sulfato de aluminio y Clorhidróxido de aluminio la equivalencia es de 3 a 1.

Como se pudo apreciar en las descripciones de cada serie en cuanto a la formación de las partículas de lodo con Clorhidróxido de aluminio se formó más compacto y de tamaño mediano, lo que reduce el volumen de lodo formado y permite un mejor filtrado, se espera que a nivel planta repercuta en una mejor eficiencia de operación en los filtros.

El Clorhidróxido de aluminio (ACH) es un coagulante que sustituyó satisfactoriamente al Sulfato de aluminio (SAL) en la planta potabilizadora, cabe hacer mención que a su vez el SAL requiere, en ocasiones, de un ayuda “floculante” lo que significa mayores adecuaciones de dosificación y costos relacionados con el bombeo, mantenimiento y costo por metro cúbico tratado, mientras que el Clorhidróxido de aluminio trabajó prácticamente solo y con resultados consistentes apegados a la norma.

En el caso de los retrolavados del filtro se reportaban comúnmente 7 operaciones al día, con el Clorhidróxido de aluminio se redujo a 4, se realiza la operación de retrolavado cuando los operadores detectan una disminución de la calidad del agua

así como una caída de presión en el efluente, por lo que se recurre a retrolavar el lecho filtrante, el lodo obtenido se retorna al influente de la planta.

La evaluación de un nuevo coagulante que mejore las condiciones de operación de las plantas tratadoras y potabilizadoras en México ha significado un esfuerzo técnico notable, desde el trabajo preliminar en el laboratorio, muestreos en diferentes condiciones climáticas (estiaje y lluvia), convencimiento cultural entre los operadores de las plantas potabilizadoras que muestran incertidumbre ante una nueva forma de trabajar y negativa en algunos casos de establecer a nivel planta la nueva propuesta debido a intereses políticos.

La propuesta de probar un coagulante alternativo se discute con los directores de las plantas potabilizadoras, se exponen las ventajas de hacer pruebas a nivel laboratorio y posteriormente implementar en planta, al mismo tiempo se explica a los operadores de cada una de las plantas el alcance de la implementación y mejoras que significarían en su actividad diaria.

El personal técnico del laboratorio de cada una de las plantas valida por duplicado los resultados obtenidos tanto en el laboratorio como en campo, así como determina parámetros relacionados como la DQO, coliformes fecales o ácido sulfhídrico, los cuales ayudan a comprender más a conocer el perfil hidráulico de comportamiento de acuerdo a las condiciones de cada planta potabilizadora.



## Compendio de información técnica de coagulantes.

Fichas técnicas de los coagulantes con los que se desarrollaron las pruebas tanto a nivel piloto como en planta [17].

### Información técnica | Kemira PAX-18

Kemira PAX-18 es un polidloruro de aluminio de mediana basicidad en presentación líquida, es un coagulante eficiente para el tratamiento de agua residual; tanto municipal como industrial.

Kemira PAX-18 es un coagulante de aluminio prepolimerizado de alta carga, que se utiliza en muy baja dosis, lo que reduce el volumen de lodos generados y ajustes en los valores de pH. También mejora la filtración del agua tratada, al aumentar las corridas de filtrado; proporcionando además altos rangos en cuanto a la remoción de turbiedad, fósforo y menor consumo de alcalinidad.

#### Especificación del Producto

	Análisis Típico
Apariencia	Líquido transparente amarillo o verdoso
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.0 ± 0.5 %
Aluminio	9.0 ± 0.3%
Basicidad	41.0 ± 3 %
Insolubles	< 0.5 %
pH	1.0 ± 0.5
Densidad (25 °C)	1.36 ± 0.02 g/cm <sup>3</sup>

#### Características del Producto

	Análisis Típico
Hierro (Fe)	< 0.01 %
Viscosidad	30 ± 5 cP

#### Almacenaje

Los tanques de almacenamiento, válvulas y tubería se recomienda que estén fabricados con material resistente a la corrosión, como fibra de vidrio, PVC o cualquier otro plástico disponible. Kemira PAX-18 es ligeramente corrosivo y en un periodo prolongado atacaría a la mayoría de los metales, como el cobre, el aluminio o el acero inoxidable, puede ser almacenado a temperatura ambiente y debería estar almacenado sin diluirlo.

#### Dosificación

PAX-18 se dosifica con bombas de diafragma con calibración y resistentes a la corrosión, normalmente se dosifica sin diluir.

#### Manejo Seguro

Debe usarse lentes de seguridad y guantes de hule para el manejo del Kemira PAX-18. Si existiera algún contacto con los ojos, se debe lavar suavemente con abundante agua por 15 minutos mínimo. En contacto con la piel, se deberá lavar con abundante agua. Si ocurriera un derrame del líquido, lavar con agua y neutralizar con cal. En caso de emergencia en el transporte contactar al SETIQ las 24 hr al tel. 01-800-0021-400.

#### Entrega

Kemira PAX-18 se surte en tambores de polietileno de alta densidad de 200 litros y en contenedores de 1,000 litros.

#### Producción y Ventas

Kemira PAX-18 es producido Suecia y México. Ventas en México y Centro América a través de Kemira de México, S.A. de C.V.



# Kemira PAX-XL19

## Clorhidróxido de aluminio líquido

Kemira PAX-XL19 es un polihidroxicloriguro de aluminio en presentación líquida. Es un coagulante eficiente para el tratamiento de agua potable y residual; tanto municipal como industrial.

Kemira PAX-XL19 es un coagulante de aluminio prepolimerizado usado en dosis bajas, lo que reduce el volumen de lodos generados y la necesidad de ajustar el pH. PAX-XL19 también mejora la filtración del agua sedimentada; ofreciendo mayor tiempo entre retrolavados y una alta remoción de color y turbiedad, con menor consumo de alcalinidad.

### ESPECIFICACION DE PRODUCTO

Apariencia	Líquido transparente azulado a ligeramente turbio
Aluminio	12.2 +/- 0.5%
Alúmina	23.0 +/- 1.0%
Basicidad	80.0 +/- 5.0%
Gravedad específica	1.32 g/mL min.
Rango de pH	2.0 – 4.0
Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	< 0.03%

### Dosificación

Kemira PAX-XL19 se dosifica en bombas de diafragma con calibración y resistentes a la corrosión, el producto normalmente se dosifica sin dilución.

### Almacenaje

Los tanques de almacenamiento y tuberías para Kemira PAX-XL19 deben ser de fibra de vidrio, polietileno reforzado. Kemira PAX-XL19 es levemente corrosivo y atacará a la mayoría de metales. Es recomendable hacer limpieza de los tanques cada 10 a 2 años.

### Manejo Seguro

Usar ropa de protección, guantes y protección de ojos/rostro. En caso de contacto con los ojos, se debe lavar suavemente con abundante agua, para mayor información consulte la HDS del producto. En caso de emergencia en el transporte contactar a la SETIQ las 24 h al tel. 01 (800) 0021 400.

### Entrega

Kemira PAX-XL19 se surte en tambores de polietileno de alta densidad de 200 litros o contenedores de 1 m<sup>3</sup> y a granel en pipa.

### Calidad

Kemira PAX-XL19 está certificado bajo el Estándar NSF/ANSI 60 donde el nivel máximo de dosificación es de 111 mg/L para uso en agua potable (en base a la evaluación de datos de efectos en la salud, el nivel máximo permisible de aluminio no debe exceder 2.0 mg/L). Kemira PAX-XL19 cumple con la norma mexicana NMX-AA-130-SCFI-2006 y con la norma ANSI/AWWA B408-03: Liquid Polyaluminium Chloride

### Producción y Ventas

Kemira PAX-XL19 es producido en México, USA y otras partes del mundo. Ventas en México y Centro América a través de Kemira de México, S.A. de C.V.



# Kemira PAX-PD

## Policloruro de aluminio

Kemira PAX-PD es un polihidroxiclorigenato de aluminio en presentación sólida. Es un coagulante eficiente para el tratamiento del agua potable municipal. La presencia de silicatos ayuda a obtener una mejor eficiencia y rendimiento del producto.

Kemira PAX-PD es un coagulante de aluminio prepolimerizado usado en dosis bajas, lo que reduce el volumen de lodos generados y la necesidad de ajustar el pH.

### ESPECIFICACION DEL PRODUCTO

Apariencia	Polvo granulado amarillo ocre
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.0% min.
Basicidad	50.0 – 90.0%
Hierro (Fe)	1.5% máx.
Insolubles	1.5% máx.
pH (1% %/w)	3.5 – 5.0
Densidad a granel	0.85 tn/m <sup>3</sup> aprox.

### ELEMENTOS TRAZA / SUSTANCIAS TOXICAS

Arsénico (As)	≤ 2 mg/kg	PAX-PD
Cadmio (Cd)	≤ 2 mg/kg	PAX-PD
Cromo (Cr)	≤ 5 mg/kg	PAX-PD
Mercurio (Hg)	≤ 0.1 mg/kg	PAX-PD
Plomo (Pb)	≤ 10 mg/kg	PAX-PD

### Dilución y dosificación

Kemira PAX-PD se disuelve fácilmente; tanto en lotes como en forma continua. Durante la dilución se requiere una buena agitación para evitar grumos. Para más detalles consulte la hoja técnica "Cómo disolver PAX sólido de Kemira". Inmediatamente después de la dilución se observa una coloración café. Se recomienda una dilución al 20% máx. para evitar soluciones sobresaturadas y facilitar su dosificación.

### Almacenaje y manejo seguro

Kemira PAX-PD es higroscópico, por lo tanto se recomienda almacenarlo en un lugar seco y fresco, mantenerlo en su empaque original hasta su uso. Usar ropa apropiada de protección, mascarilla de respiración, guantes y protección de ojos/rostro. En caso de emergencia en el transporte contactar a la SETIQ las 24 hrs al tel. 01 (800) 0021 400.

### Entrega

Kemira PAX-PD esta disponible en sacos de 25 kg.

### Calidad

Kemira PAX-PD esta certificado para uso en agua potable bajo el Estándar NSF/ANSI60 (el nivel máximo permisible de aluminio en el agua potable no debe exceder 2.0 mg/L). El producto sólido o cualquier solución del mismo cumple con la norma europea EN 883:1997 para productos químicos utilizados en el tratamiento del agua destinada al consumo humano, además cumple ANSI/AWWA B408-03: Liquid Polyaluminum Chloride y la norma NMX-AA-130-SCFI-2006 Potabilización del agua para uso y consumo humano.

### Producción y ventas

# Kemira ALS

## Sulfato de Aluminio libre de fierro

Kemira ALS es un sulfato de aluminio libre de fierro en presentación líquida. Es un coagulante eficiente para el tratamiento de agua potable y residual; tanto municipal como industrial.

Kemira ALS es un coagulante de aluminio con muy bajo contenido de fierro usado también en el proceso de encolado en la industria de papel.

### ESPECIFICACION DE PRODUCTO

Apariencia	Líquido traslucido a transparente
Alúmina ( $Al_2O_3$ )	7.4 – 7.6 %
Hierro ( $Fe_2O_3$ )	≤ 50 mg/kg
Acidez libre	1.5 % máx.
Insolubles	≤ 0.2 %

### CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO

Densidad	33.0 – 34.0 °Be
Densidad	1.29 – 1.31 g/cm <sup>3</sup>
Sulfatos	21.0 min.

### ELEMENTOS TRAZA/SUSTANCIAS TOXICAS

Arsénico (As)	< 1.0 mg/kg ALS
Cromo ( $Cr^{+6}$ )	< 1.0 mg/kg ALS
Plomo (Pb)	< 1.0 mg/kg ALS

Nota: 1 mg/kg = 1 ppm

### Dosificación

Se recomienda el uso de bombas de diafragma de material no corrosivo para la dosificación.

### Almacenaje

Los tanques de almacenamiento, tubería y válvulas deben de ser de material resistente a la corrosión, tales como fibra de vidrio, PVC u otros plásticos apropiados. Kemira ALS es ligeramente corrosivo, a largo tiempo atacará a la mayoría de los metales, tales como aluminio, cobre o acero inoxidable, puede ser almacenado a temperatura ambiente.

### Manejo Seguro

Usar ropa de protección, guantes y protección para ojos y rostro. En caso de contacto accidental con alguna parte del cuerpo, lavar con abundante agua por lo menos durante 15 min., contactar a un médico. En caso de emergencia en el transporte contactar a la SETIQ al tel. 01 (800) 0021 400.

### Entrega

La disponibilidad de este producto es usualmente en pipas de 30 - 40 toneladas, contenedores de 1,000 L.

### Calidad

Kemira ALS para uso en Agua Potable está certificado bajo el Estándar NSF/ANSI 60 (en base a la evaluación de datos sobre efectos en la salud, el nivel máximo permisible de aluminio en el agua potable no debe exceder 2.0 mg/L). Además está certificado ante CERTIMEX de acuerdo a la norma NMX-AA-122-SCFI-2008 Potabilización del agua para uso y consumo humano, así como con la norma ANSI/AWWA B493-03 Aluminum Sulfate Liquid, Ground or Lump. Kemira ALS cumple con la Norma Europea EN 878 para productos químicos utilizados en el tratamiento del agua potable.

### Producción y Ventas

Kemira ALS es producido en plantas de Kemira en varios países incluyendo México. Ventas en México y Centro América a través de Kemira de México.



## Referencias:

- [1].- Manuel Guerrero Legarreta. **El agua**, 5ª. Ed. México, FCE, SEP, Conacyt (2006).
- [2].- [water.usgs.gov/edu/watercyclespanishhi.html](http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanishhi.html)
- [3].- Normas Oficiales Mexicanas, NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México (2013).
- [4].- Javier Serafín Nevarez. *Evaluación y mejoras del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales municipales*, tesis de maestría, BUAP (2005).
- [5].- [www.agua.org.mx](http://www.agua.org.mx) (Planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco, Hgo. (2014)
- [6].- Regina García Hololavsky, Manual de prácticas de laboratorio de Ingeniería, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, (2000).
- [7].- Hermann H. Hanh et al, Chemical Water and Wasterwater Treatment IX, IWA Publishing, (2007).
- [8].- NMX-AA-038-SCFI-2001, Análisis de agua-Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. (2001).
- [9].- Raymond Chang, Química, 7ª. Ed, Mc Graw Hill, México (2002).
- [10].- NOM-127-SSA1-1994 SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION
- [11].- Manual de operación del Colorímetro Hach DR/890, USA, (2009).
- [12].- Sergio A. Martínez Delgadillo, Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales, UAM, (1999).

[13].- Violeta E. Escalante Estrada et al, Identificación y evaluación de procesos biológicos de tratamiento, IMTA, (2000).

[14].- Comisión Nacional del Agua, Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento, México, (2007).

[15].- [www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/](http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/)

[16].- Comisión Nacional del Agua, El agua en México:retos y avances, México (2000).

[17].-<http://www.kemira.com/en/industries-applications/municipal-ater/Pages/default.aspx>