

**SYDNEY ALEXANDER SAMUELS MILSON
ID UD14199BMA21645**

**TRATAMIENTO DE AGUAS MUNICIPALES CON
COAGULANTES AUXILIARES**

ATLANTIC INTERNATIONAL UNIVERSITY

TRATAMIENTO DE AGUAS MUNICIPALES CON COAGULANTES AUXILIARES

C O N T E N I D O

1. Introducción
2. Procedimientos de clarificación de aguas.
3. Aglutinación de partículas en la coagulación-floculación.
4. Minerales empleados como coagulantes principales.
5. Polímeros como auxiliares para la coagulación.
6. Uso de sulfato de aluminio para la floculación.
7. Uso de polímeros en comparación con el sulfato de aluminio.
8. Resultados de pruebas de jarras
9. Conclusiones y recomendaciones

1. INTRODUCCIÓN

Aún las aguas naturales más puras están muy lejos de ser puras desde el punto de vista físico, químico o bacteriológico, pues contiene materias suspendidas en cantidades variables. Entre las impurezas comunes en el agua se tienen organismos vegetales o animales o partículas de suelos en suspensión y en solución se encuentran sustancias minerales gases y extractos de plantas.

En el caso de las aguas más peligrosas para la salud por la presencia de sustancias químicas o de microorganismos que se han - usado previamente para propósitos múltiples, o en las que no se ha cuidado su saneamiento, pueden aumentar los riesgos de salud pública, tanto por la contaminación con organismos vivos como por la contaminación con una gran variedad de sustancias químicas.

Algunas de las sustancias químicas en el agua provocan en ella mal sabor o ser estéticamente desagradable, siendo principalmente obstáculos para su uso libre e íntegro. Otras pueden ser capaces de reaccionar para formar sustancias con una toxicidad alterada y aún pueden ser benéficas para la salud animal o humana sin requerir tratamiento alguno como las aguas sulfuradas.

Sin embargo es necesario clarificar y purificar el agua que es captada de ríos que naturalmente arrastran, aquellas sustancias dañinas, que va a ser suministrada para el consumo humano.

Este tratamiento debe realizarse tomando en cuenta la relación costo-beneficio; por consiguiente debe cumplir dos condiciones básicas:

- a) Producir agua sanitariamente segura
- b) Ser a un costo razonable.

La primera condición es imprescindible y para cumplir con ella, el agua tratada no debe contener microorganismos ni sustancias tóxicas o nocivas para la salud. Para cumplir con la segunda, las características del agua efluente de la planta de tratamiento debe ser tal, que su purificación no haya sido excepcionalmente costoso, y además no se produzcan daños a la red de distribución, ni a las industrias, ni a la economía.

La necesidad de considerar ambos factores en nuestro medio, es cada vez mayor si se toma en cuenta el incremento de la población, la urbanización intensificada y el proceso de industrialización. Esto a su vez ha creado la necesidad de introducir modificaciones en la clarificación del vital líquido tal como el uso de polímeros no solo como ayudantes a la coagulación sino también a la filtración.

Los polímeros se han venido utilizando en las últimas cuatro décadas en los Estados Unidos y Europa; a raíz de ello se han realizado intensos trabajos sobre el proceso de coagulación y floculación de partículas en el agua por autores que tratan de explicar qué ocurre cuando se agrega tal o

cual polímero. En Guatemala se realizó la primera investigación en 1979 en la planta de tratamiento de agua de la ciudad de Guatemala llamada “Lo de Coy”, del acueducto nacional Xayá Pixcayá.

En aquel entonces se trató de determinar el cumplimiento de aquellas dos condiciones con los análisis de laboratorio realizados en la mencionada planta de tratamiento ubicada en el municipio de Mixco y que abastece parcialmente a la ciudad de Guatemala. Así mismo, con base en aquella experiencia se estableció la factibilidad del uso de polímeros especialmente en la época de invierno cuando la inversión en sulfato de aluminio solo, es muy grande. Los análisis se realizaron durante el primer invierno de operación de la mencionada planta tomado en cuenta que es en esta época del año cuando se obtienen las turbideces más altas.

Además, en los primeros incisos se describen algunos procedimientos y métodos de efectuar la coagulación-floculación porque el autor es partidario de la opinión de que el tratamiento del agua no puede explicarse, suministrando una serie de especificaciones sin entrar antes en el análisis de los fenómenos, para luego pretender determinar las dosis de coagulantes más económicas y eficientes que se deben usar en la operación de una planta de tratamiento en condiciones similares.

2. PROCEDIMIENTOS DE CLARIFICACIÓN DE AGUAS

El conocimiento de ciertos fenómenos físicos, químicos o biológicos como la adsorción, floculación, decantación, filtración, flotación, etc. han dado como

resultado los procedimientos de clarificación de las aguas ya sean potables o residuales. A continuación se resumen los principios básicos de algunos fenómenos que se han considerado más importantes:

2.1 Adsorción

Es preciso no confundir este término con la absorción, pues este último se refiere a la penetración del ion o la molécula dentro del complejo molecular- mientras que la adsorción es un fenómeno de superficie en el -que un ion o molécula de tamaño variable, llamado "adsorbido" se fija en la superficie de una molécula o de un complejo molecular, llamado "adsorbente".

El mecanismo de la adsorción se puede esquematizar de la siguiente forma: al encontrarse el adsorbido y el adsorbente suficientemente próximas, se desarrollan fuerzas de atracción físicas y químicas. Las primeras se tratan de las fuerzas electrostáticas de Van Der Waals que tienen las características de: poner en juego pequeñas energías por los electrones en sus órbitas que crea un campo magnético, no depender de la naturaleza química del adsorbente, y ser de reacción reversible. Las fuerzas químicas se explican en principio por la irreversibilidad que existe entre los radicales en la superficie del adsorbente con las moléculas adsorbidas.

En la química del agua, se agrupan bajo el término de "adsorbentes" aquellos cuerpos en los que existe una adsorción irreversible, o al menos que la desorción, o desprendimiento del adsorbido, pueda ser

cuidadosamente controlado. En otras palabras, no se trata de un paso efímero, como en catálisis y en intercambio de iones, donde la adsorción sirve de prelude a una reacción química, sino de una permanencia prolongada de esta reacción.

Algunos adsorbentes comunes son: La arcilla muy fina, la sílice, la alúmina activada y el carbón activo. La importancia del carbono en la adsorción, es por su especial estructura electrónica que permite la eliminación de sabores y olores.

El grado de adsorción puede representarse por la relación de Freundlich la cual juega el mismo papel que la ley de Henry que mide la cantidad de gas disuelta en un líquido.

La ley de adsorción, de Freundlich a temperatura constante establece que la cantidad de material adsorbida por unidad de peso de adsorbente x/m es proporcional a la concentración de equilibrio "c" puede expresarse así:

$$\frac{x}{m} = kc \ 1/n$$

En donde:

x = peso de sustancia adsorbida

m = peso de adsorbente

c = concentración del cuerpo adsorbible en el medio exterior.

k y n son constantes empíricas que dependen de la temperatura, del adsorbente y del adsorbido.

Si se expresa la ecuación en logaritmos tenemos:

$$\text{Log. } \frac{X}{m} = \log K + \frac{1}{n} \log. C$$

Que muestra que para diferentes n , en coordenadas logarítmicas se obtienen rectas que permiten la determinación de K y $1/n$. La relación de Freundlich se cumple con bastante eficiencia, cuando C (la concentración) no sea demasiado grande.

2.2 Coagulación-Floculación

Algunos especialistas en el tratamiento del agua reservan el término coagulación para denominar el fenómeno de la desestabilización coloidal, y el de floculación para la aglomeración de los coloides descargados. Sin embargo, para los fines de esta tesis se tomará la desestabilización y aglomeración de coloides como un fenómeno, para llamarle proceso de "Coagulación-Floculación". Tanto en las aguas residuales como las naturales existen partículas coloidales con gravedad específica muy despreciable algunas; otras, aunque más densas que el líquido que las rodea, pero que no pueden sedimentarse debido al movimiento browniano producido por fuerzas electrostáticas de repulsión al estar cargadas negativamente dando como resultado una estabilidad de suspensión de las mismas partículas. A esto se debe la necesidad de introducir en el agua iones positivos llamados

coagulantes para producir la atracción y formar de esa manera el "floc" que sedimentará y evitará aquella turbidez. Al existir aquellas fuerzas electrostáticas de repulsión se crea un potencial de equilibrio generalmente expresado en milivoltios (mV), que es llamado "potencial Zeta". Su principio de medida es equilibrar o igualar la fuerza eléctrica de atracción y la fuerza de rozamiento debido al medio; este equilibrio es por la velocidad casi instantánea que alcanza una partícula sometida a un campo eléctrico; de donde se llega a la siguiente relación entre Z y la movilidad de la partícula:

$$Z = \frac{A \pi u v}{D_c}$$

Donde :

- u Viscosidad absoluta del agua en poises
- v Velocidad con que la partícula se traslada (cm/seg.)
- D_c Constante dieléctrica del medio.

Las aguas naturales suelen mostrar potenciales que varían entre 10 y 30 mV. Como regla general el potencial zeta óptimo de coagulación con aluminio o con hierro se produce muy cerca de cero cuando hay remoción de color, mientras que cuando hay únicamente remoción de arcillas tiende a ser negativo, alrededor de 6 milivoltios.

2.2.1.- Etapas de la Coagulación-Floculación

Para llevar a realizar una desestabilización de las partículas coloidales sin que el flóculo se rompa es necesario el siguiente orden de etapa:

- a) Disolución del coagulante: en esta primera etapa los iones positivos del coagulante se mezclan con los iones negativos de las partículas que están naturalmente presentes en el agua. Para esto es necesario provocar una mezcla íntima y rápida.
- b) Producción de la floculación en sí: aún quedan cargas positivas capaces de neutralizar coloides negativamente ionizados, lo que se logra por medio de una mezcla más lenta para así no romper el floc en formación.
- c) Producción de la adsorción: otras partículas son atrapadas y fijadas a la superficie del floc formado, incluyendo bacterias.

2.3 Separación Sólido-Líquido:

La separación de partículas sólidas de un líquido se puede llevar a cabo por medio de dos procedimientos diferentes ya bien conocidos como lo son: la sedimentación y la filtración•-

2.3.1 Sedimentación:

Este término se refiere a la remoción de partículas más pesadas que el agua a clarificar, haciendo uso de la fuerza de gravedad. Este proceso es el más usado en el tratamiento de agua a potabilizar y de aguas servidas.

La sedimentación simple, resulta de la independencia entre una partícula y otra para decantar partiendo de una velocidad nula, acelerar y alcanzar una velocidad de caída prácticamente constante.

La sedimentación floculada o difusa es la que resulta de una aglomeración, natural o provocada, de las materias coloidales en suspensión. Cuando la concentración de estas materias en suspensión es pequeña, el floculo disperso sedimenta como si estuviera solo pero su velocidad de caída aumenta a medida que crece, como consecuencia de su encuentro con partículas más finas.

2.3.2 Filtración:

Es un procedimiento de clarificación de agua en el que se hace que la mezcla sólido-líquido pase por un medio poroso (filtro) que retiene los sólidos y deja pasar el líquido.

Si las materias retenidas tienen una dimensión superior a la de los poros, esta retención se llevó a cabo en la superficie del filtro; en este caso la filtración se denomina "Superficial o en torta" o también "sobresorte". Cuando sucede el caso contrario, de quedar retenidas las partículas en el interior de la masa porosa la filtración se denomina "en volumen o en profundidad". En ambos casos, el fenómeno de paso de un líquido a través de un medio poroso se rige por la ley de Darcy la cual indica que la pérdida de carga P es proporcional a la velocidad de filtración V (relación de caudal instantáneo Q a la unidad de superficie), siendo K el coeficiente de proporcionalidad en función de la viscosidad dinámica η y de la resistencia del medio R .

$$V = \frac{P}{\eta R} = KP$$

3. AGLUTINACIÓN DE PARTÍCULAS EN LA COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.

3.1 Antecedentes

La aglutinación de partículas no es más que el crecimiento del floc provocado por la agitación lenta que se le dá a la masa líquida por cualesquiera de los diferentes métodos de floculación. Estos métodos dependen del tipo de energía que se requiera para producir la agitación y pueden ser hidráulicos y mecánicos.

Los primeros se clasifican, según el sentido del flujo, - en: de flujo horizontal, de flujo vertical y de flujo helicoidal. Los segundos, así mismo por el sentido del movimiento del agitador, se clasifican en giratorios y reciprocantes.

TABLA 2-1. CLASIFICACION DE FLOCULADORES

Según la energía de agitación	Clasificación	Ejemplo
I Hidráulicos	1. Flujo Horizontal	Tabiques intercalados lado a lado
	2. Flujo Vertical	Tabiques colocados arriba y abajo del tanque
	3. Flujo helicoidal	-----
II Mecánicos	1 Rotatorios	Paletas giratorias de eje horizontal o vertical
	2 Reciprocantes	Paletas o cintas oscilantes

3.2. Floculadores hidráulicos:

Estos derivan su energía para la agitación del líquido, de la carga de velocidad $V^2/2g$ que adquiere al pasar por un conducto. Puede ser de tabiques, los cuales consisten en tanques provistos de pantallas que permiten que el flujo circule en un va y viene alrededor de los tabiques girando 180 grados al final de cada uno; o de flujo helicoidal que como lo indica la expresión existe un movimiento de rotación de la masa líquida imprimido por un par mecánico -creado por el flujo que entre por dos orificios

diametralmente opuestos.

Los floculadores de tabiques más usados son los horizontales (da vuelta en punta) y los verticales (de arriba y abajo). Los helicoidales son poco usados ya que al pasar el floc del floculador al sedimentados se presenta el problema de su ruptura, además en nuestro medio se conoce poco o nada en forma técnica de los floculadores helicoidales.

3.3 Floculadores mecánicos

Estos requieren de una fuente de energía externa que mueve un agitador (paleta o cinta oscilante) en donde el agua permanece un tiempo teórico.

- Los agitadores mecánicos giratorios pueden ser de baja velocidad como las paletas y de alta velocidad como las turbinas.
- Los agitadores mecánicos reciprocantes son los que consisten en cintas oscilantes (ribbons floculator) o en parrillas de madera que suben y bajan alternativamente (walking beams).

Ambos agitadores mecánicos comunican una energía a la masa líquida, directamente proporcional a la energía con que se desplaza el elemento mecánico de cada caso mencionado.

4. MINERALES EMPLEADOS COMO COAGULANTES PRINCIPALES.

4.1 Minerales empleados como coagulantes principales

4.1.1 Uso de sales minerales:

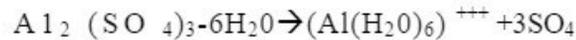
Los principales coagulantes generalmente empleados son las sales de hierro, de aluminio y compuestos varios. Dentro de estas, la sal de hierro utilizada en otros países es el Cloruro Férrico, muy poco se ha usado el Sulfato ferroso que es efectivo para aguas no coloreadas. Podríamos mencionar otras sales de hierro que no son aptas para usarlas como coagulantes en las aguas de Centro América en general y son: el Sulfato Férrico y la Caparrosa Clorinada. ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ Fe Cl_3). Estos compuestos se emplean con mayor efectividad y economía cuando la acidez o alcalinidad del se mantienen dentro de límites relativamente estrechos.

Dentro de las sales de aluminio, puede decirse que, en la mayoría de los casos, el sulfato de aluminio es técnicamente utilizable entre otros como el aluminato de sodio. Aquel se puede obtener en forma -de terrones o como alumbre líquido. Su uso en forma líquida simplifica los problemas de alimentación y reduce la labor necesaria para preparar las soluciones para los alimentadores, sin embargo, debido a su gran contenido de agua, el transporte a grandes distancias resulta antieconómico y solo puede obtenerse dentro de perímetros relativamente cortos de las plantas de producción.

4.1.2 Acción de los coagulantes minerales

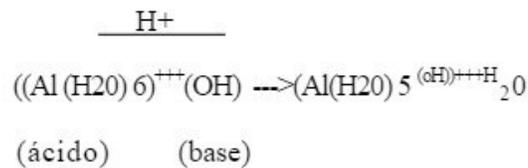
4.1.2.1 Coagulación con Aluminio

Cuando el sulfato de Aluminio está asociado con el agua, o mejor dicho, en solución, se encuentra hidrolizado:



Esta es una propiedad común de todos los minerales catiónicos, que no pueden permanecer puros cuando se encuentran con moléculas de agua. Los iones de aluminio hidratados $(\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6)^{+++}$ actúan como un ácido que dona un protón de hidrógeno H^+ reaccionado con las bases que se encuentran en el agua; así:

- Con la alcalinidad



Con las moléculas de agua H_2O

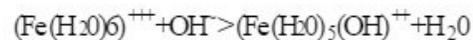
El $(\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6)^{+++}$ reaccionará siempre antes -con las bases de la alcalinidad puesto que son más fuertes que el H_2O . Por tanto, habrá un consumo de alcalinidad y como consecuencia un descenso del pH, del cual depende aquella reacción por estar involucrados los iones H^+ y OH^- .

4.1.2.2 Coagulación con Sales de Hierro

Estas tienen su ventaja sobre las sales de aluminio, porque forman un floc más pesado y por tanto, de mayor velocidad de asentamiento. Las sales de hierro son recomendables para aguas con pH muy elevado; es por ello que se usan cuando el sulfato de aluminio no produce una buena coagulación debido al agua muy alcalina o cuando los sedimentadores están demasiado recargados y resulta más económico aumentar el peso del floc y con ello la eficiencia de estos tanques.

La coagulación con sales de hierro es bastante similar a la del aluminio. Los iones de hierro en solución acuosa están hidrolizados ($\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{+++}$) y al agregarse el agua reacciona primero con la alcalinidad (OH^-) y luego con la molécula de agua (H_2O). Las reacciones del hierro hidrolizado pueden escribirse así:

- Con la alcalinidad:



El $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{++}$ se sigue hidrolizando sucesivamente formando otras reacciones intermedias de producción polimérica hasta llegar como producto final a un hidróxido de hierro neutro $\text{Fe}(\text{OH})_3$ o negativo $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$.

- Con la molécula de H₂O también son reacciones de tipo ácido-base:



En la reacción con el agua al igual que en la de la alcalinidad el producto mostrado -anteriormente sigue su hidrolización hasta polimerizarse.

El descenso del pH es más pronunciado cuando no hay alcalinidad que cuando esta está presente debido a la formación de ácidos - fuertes (H₃O⁺).

5. POLÍMEROS COMO AUXILIARES PARA LA COAGULACIÓN.

5.1. Evolución en el empleo de agentes de Coagulación

Ya hemos mencionado el empleo de sales minerales como coagulantes y que su acción es función de la valencia del ion que posee una carga opuesta a la de las partículas. Esta es una de las razones por las que se han utilizado con preferencia las sales de hierro y de aluminio en todos los tratamientos de coagulación del agua. Sin embargo, debido a la hidrólisis que experimentan, presentan el inconveniente de modificar las características fisico-químicas del agua hasta extremos no deseables; además producen exceso de fangos cuando se usan en fuerte dosis, lo que también constituye un problema; por otro lado, estos agentes no dan siempre un precipitado que muestre la eficiencia del 100% en la sedimentación.

Por estas razones, se han venido usando en los Estados Unidos y Europa polímeros naturales al principio ya sea solos o en combinación con sales minerales, y más tarde polímeros sintéticos con masa molecular elevada y solubles en el agua que pueden ser utilizados también como coagulantes -primarios o como auxiliares, denominados "Poliectrolitos".

5.2 Los polielectrolitos y su empleo como auxiliares de la coagulación.

Los polielectrolitos actúan como polímeros que son macromoléculas de cadena larga con un gran número de sitios lineales o con brazos, obtenidos por asociación de monómeros simples con cargas eléctricas ionizables. Estas cadenas permiten la absorción rápida y más numerosa de coloides a los sitios que van quedando vacantes, hasta formar partículas coaguladas -más pesadas y como consecuencia rápidamente sedimentadas con una cantidad muy pequeña de polielectrolito que varía generalmente entre 0.01 mg./lt y 1 mg/lt si es en polvo. Para polielectrolitos líquidos se usan relaciones de 1 a 20 mg/lt. según la marca. Si se compara la cantidad de polímero con la del coagulante mineral, aquella suele ser muy inferior a esta, pues varía entre el 5% y el 0.25%, lo que compensa su precio que es alto.

Los polielectrolitos son suministrados en forma de polvo o de

líquido viscoso como el almidón; pero deben añadirse al agua a tratar en forma de solución diluida para asegurar una mezcla completa.

Los polielectrolitos se clasifican según su carácter iónico en:

- **No iónicos**, los que no poseen grupos ionizables y son casi exclusivamente de masa molecular comprendida entre 1 y 30 millones.
- **Aniónicos**, grupos ionizados negativamente de masa molecular de algunos millones cuyo papel consiste en la extensión del polímero.
- **Catiónicos**, tienen en sus cadenas una carga eléctrica positiva y son macromoléculas de masa molecular inferior a 1 millón.

5.3 Reacción química de los polielectrolitos

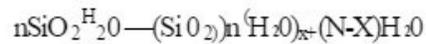
Uno de los más antiguos polielectrolitos usados fue la sílice, activada, que se prepara haciendo reaccionar una solución diluida de silicato de sodio - (Na_2SiO_3) con ácido sulfúrico, o sulfato de amonio, o de aluminio, o cloro, o bicarbonato de sodio o bióxido de carbono. Estos compuestos se denominan agentes activadores y son los que promueven la polimerización del Na_2SiO_3 . La extensión de este proceso depende del porcentaje de neutralización del silicato de sodio y se incrementa con el tiempo. Si se deja que se complete, se forma una pasta gelatinosa que puede tapar los conductos de dosificación.

La reacción se realiza en dos partes:

a) Neutralización:



b) Polimerización:



En donde A es el radical del agente activador.

Se ha considerado que gran mayoría de los polielectrolitos tienen como monómero básico la acrilamida; de aquí que tenemos lo siguiente:

- La poliacrilamida que típicamente es un polímero no iónico puede manejarse en forma variada.
- Los polielectrolitos aniónicos caracterizados por la coexistencia de grupos que permiten la adsorción, y grupos ionizados negativamente (grupos carboxílicos o sulfúricos), cuyo papel consiste en - provocar la extensión del polímero. El más conocido es la poliacrilamida parcialmente hidrolizada por la sosa (Na_2CO_3).
- Los polielectrolitos catiónicos, tienen en sus cadenas una carga eléctrica positiva, debido a la presencia de Grupos amino, imino o amonio-cuaternario.

6. USO DE SULFATO DE ALUMINIO PARA LA FLOCULACIÓN.

6.1 Sulfato de Aluminio

6.1.1 Consumo normal previsto (Con ayuda de Polímeros).

El caudal promedio de agua cruda que ingresa en la planta de tratamiento "Lo de Coy" es de 82.5 millones de litros diarios. Generalmente este volumen varía entre 58 millones de litros y 107 millones de litros diarios. Con base en pruebas de laboratorio hechas sobre las características de las aguas provenientes de los ríos Xayá y Pixcayá, así como del agua tratada, se puede constatar que el requerimiento normal de Sulfato de Aluminio con aditivo Auxiliar para el tratamiento del agua referida es de 45 mg/litro aproximadamente. El requerimiento según las pruebas sin aditivo auxiliar es de 75 mg/litro. Por consiguiente el consumo diario de sulfato de aluminio para la operación normal de la Planta debe estimarse así:

a) Sin polielectrolito:

$$\begin{aligned} 82.5 \text{ millones de litros} \times 75 \text{ Kg/millones de litros} &= 6,188 \text{ Kg.} \\ &= 13,613 \text{ libras/día} \end{aligned}$$

$$\text{Consumo anual: } 13,613 \times 365 = 4,968,745 \text{ libras.}$$

b) Con Polielectrolito:

$$82.5 \text{ millones de litros} \times 45 \text{ Kg/millon de litros}$$

$$= 3712.5 \text{ Kg.} = 8168 \text{ libras} \times 365 \text{ días} = 2,981,138 \text{ libras/año}$$

6.1.2 Requerimiento de sulfato de aluminio en la bodega.

Es necesario importar este producto del exterior por medio de licitaciones anuales, por no producirse en Centro América, pero con entregas periódicas. Se considera que por la importancia de este material para la operación de la planta y considerando atrasos en la entrega ocasionados por los problemas de importación, la planta debería contar con un almacenamiento útil para, al menos, cuatro meses de operación. Esto es:

Sin Polielectrolito:

$$\frac{4,968,745 \text{ libras} \times 4 \text{ meses}}{12 \text{ meses}} = 1,656,248.3 \text{ libras}$$

Lo que representa 16,563 sacos de sulfato de aluminio de 100 libras cada uno.

Con Polielectrolito

$$\frac{2,981,138 \times 4}{12} = 993,713 \text{ libras}$$

Lo que representa 9,937 sacos de sulfato de aluminio de 100 libras cada uno.

6.1.3 Puntos de aplicación del sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio se aplica únicamente en un -- punto, que se encuentra antes del sistema de floculación, en el canal de entrada de agua cruda está incluido un área de mezcla rápida consistente en una canaleta Parshall para luego conducir el agua a los 3 floculadores, a los cuales antecede un canal Parshall secundario a cada uno. La solución de sulfato de aluminio procede del equipo de dosificación se aplicará directamente a la mezcla rápida.

7. USO DE POLÍMEROS EN COMPARACIÓN CON EL SULFATO DE ALUMINIO.

7.1 Comparación del Costo Anual de Tratamiento

a) Costo Anual sin polímero:

Precio de sulfato de aluminio = \$. 0.20/libra

Requerimiento anual = 4,968,745 libras (de sección 6.1.1, inciso a)

Costo anual = 4,968,745 x 0.20 = \$. 993,749

b) Costo anual con polímero:

Sulfato:

Requerimiento anual = 2,981,138 libras (sección 6.1.1 inciso b)

Costo anual uso de sulfato = 2,981,138 x 0.20 = \$ 596,228

Polímero (siguiendo mismo procedimiento):

Requerimiento anual = 82,855 libras

Precio de polímero= \$ 0.42/libra

Costo anual = 82,855 x 0.42 = \$. 34,799

Costo total con polímero: 596,228

 34,799

 \$ 631,027

Ahorro anual estimado = 993,749 – 631,027 = \$ 362,722

7.2 Equipo de Dosificación de la planta:

El equipo dosificador de polielectrolitos está dotado de un sistema intermitente para la preparación de la solución de este químico, debido al pequeño consumo con templado. La concentración de la solución que se utiliza directamente en los puntos de aplicación se recomienda sea de 1.0 %, solución que debería prepararse diariamente para evitar su deterioro. El procedimiento normal es de preparar la solución mencionada por medio de la dilución de una solución de 10 por ciento de concentración no menos frecuente que una vez a la semana; por ejemplo: se ha estimado que la dosificación máxima de polielectrolito líquido será de 214.5 Kg/día. Por consiguiente, para que la concentración de la solución de esta cantidad de polielectrolito sea de 10 % se requerirá de un volumen total de 2145 litros (2.145 m^3). La planta de tratamiento cuenta con 4 tanques de dosificación de polielectrolitos de los cuales los 2 superiores son de 5 m^3 cada uno; la capacidad total de los dos tanques (10 m^3) sería equivalente, aproximadamente a 5 días de operación a máxima dosificación.

Para que la capacidad de los tanques inferiores sea suficiente para una solución de 1.0 % de concentración (10 veces más pequeña), estos deben ser de 10 m^3 de capacidad cada uno, o

sea: 10 veces la dilución/5 días/ m³ como efectivamente se tiene en el primer nivel.

7.3 Dosificación del polielectrolito en el canal de entrada

7.3.1 Manera de dosificar

Una vez preparada una solución diluida, se procede a iniciar la dosificación tomando en cuenta el flujo de la solución (litros por segundo) que debe ser indicado también por el laboratorio. En el canal de entrada, se debe efectuar la dosificación de la siguiente manera:

- 1.- El eductor de polielectrolitos se encuentra instalado en el edificio de operaciones, a donde deberá dirigirse.
- 2.- Abrir las válvulas de compuertas en el tubo de alimentación del eductor, verificando que el rotámetro, en el tubo de alimentación registre el flujo predeterminado; de lo contrario, efectuar los ajustes de flujo necesario.
- 3.- Abrir las válvulas entre el tanque y los rotámetros de polielectrolito así como el de descarga de solución.
- 4.- Debe seleccionarse el rotámetro adecuado para el flujo de solución de polielectrolito recomendado, cuya escala está mostrada en Lts/min y verificar que las

válvulas de los otros rotámetros estén cerrados.

- 5.- Ajustar la válvula de globo (S) del rotámetro como sea requerido en caso de que el rotámetro de polielectrolito no registre el flujo deseado.

Debe tenerse además, mucho cuidado de evitar las obstrucciones de los conductos del equipo de dosificación, pues los polímeros tienden a adherirse a las tuberías.

8. RESULTADOS DE PRUEBAS DE JARRAS

8.1 Interpretación de los resultados de las pruebas

Como el presente trabajo tiene objetivos cualitativos con respecto a los flóculos formados, los ensayos se hicieron por el método de las pruebas de jarras convencional.

Se ejecutó tratando de simular el gradiente G de velocidad y tiempo del proceso de coagulación-floculación que sucede en la planta, colocando seis vasos de boca ancha (beakers) de 1 litro, con agua cruda, agregando diversas dosis de coagulantes (sulfato de aluminio y polielectrolito) a cada uno. Se introducen las paletas para agitar las muestras durante 6' 18" a 104 revoluciones por minuto, luego se van bajando las revoluciones a 78 rpm, 64 rpm y 50 rpm con una duración de 6' 18" para cada velocidad hasta llegar a un total de 25' 18" de duración de la prueba. Estas revoluciones producen respectivamente gradientes de 48, 31, 23 y 16 segs^{-1} los cuales se han determinado considerando un caudal en el canal de entrada de $0.64 \text{ m}^3/\text{seg}$. que es el promedio de lo que en estas fechas se ha tenido.

Aunque este ensayo intenta simular las condiciones en las cuales opera la planta, la prueba de jarras no constituye una reproducción exacta, dado las variaciones de caudal que hace cambiar sensiblemente el gradiente G y el pequeño volumen de agua en los beakers comparado con el gran volumen en los floculadores de la planta; pero es una guía para su mejor operación. La experiencia ha mostrado mejores resultados en la planta que los obtenidos en el laboratorio.

8.1.1. Equipo y Parámetros Utilizados

a) Equipo

- Aparato agitador para prueba de jarras, con paletas de 3" x 1", eléctrico de 115 voltios, base, iluminada.
- Beakers de Pyrex de 1 litro
- Cronómetro
- Pipetas volumétricas de 10 y 50 ml.
- Químicos reactivos para lograr La coagulación
- Turbidímetro, marca Hach, modelo 2100 A
- Colorímetro portátil tipo Hach, modelo AC-DR - para 110 V.60 HZ.

b) Parámetros

- Es conveniente señalar los parámetros que hemos usado para determinar la dosis recomendada previo a las pruebas de jarras y finalmente para encontrar la curva económica de floculantes.

b.1) Gradiente de energía

- El gradiente de energía producido por un aparato Jar Test con paletas 3" x 1" en Beakers de 1 litro está dado por la fórmula

$$G^2 = \frac{8.483 \times 1D^3 Ss}{M}$$

Donde:

G = Gradiente de energía en seg^{-1}

M = Viscosidad absoluta en Lbs-Seg/ple 2 (Ver Table 5.1)

Ss= Velocidad de rotación en rpm

b.2) Standards de calidad de agua

- Los estandares de calidad de agua para la ciudad de Guatemala usados de base para calificar las -pruebas son:

8.1.2 Descripción del Plan de ensayos:

Para obtener toda la gama de puntos que servirán para plotear las curvas que muestran dosificación requerida de químicos (sulfato de aluminio y polielectrolito líquido) contra turbideces de agua cruda hubo necesidad de fijar un programa de ensayos que permitiera encontrar esos puntos de la siguiente manera:

- Primero se obtuvo una cantidad suficiente de agua cruda
- Luego se midieron las características iniciales -de la misma: turbidez, color, y pH, además se tomó la temperatura.
- Se ejecutarán las pruebas de jarras convencionales ya mencionadas

anteriormente procediendo así:

- En el primer ensayo hecho, se agregaron a cada jarra solo sulfato de aluminio en cantidades variables empezando con la primera jarra de la izquierda con una dosis insuficiente y, en orden ascendente hasta la última con una sobre dosificación.
- Se sometió a agitación con los diferentes tiempos y revoluciones para provocar los gradientes mencionados.
- Se detuvo la agitación y se dejó reposar las muestras durante 30 minutos para analizar inmediatamente las características físico-químicas en cada una de las jarras y para comparar en el gabinete con las características iniciales del agua cruda (turbidez, color, pH).
- Se repitió el ensayo con otras 6 muestras de la misma agua con 1 mg/lit de polielectrolito en todas las jarras y con 15 mg/lit de sulfato menos,-- (ver sección 5.3) en cada jarra de lo que se había dosificado en las anteriores.
- Luego se repitió con 2 mg/lit de polielectrolito y 15 mg/lit de sulfato menos que en cada jarra de las anteriores, y
- Así sucesivamente hasta llegar a la dosificación de 3 mg/lit de polielectrolito, si fuese necesario, que es la máxima lo correspondiente de sulfato.
- Por último se hizo una prueba solo con polielectrolito, también en cantidades variable y en orden ascendente.

8.2 Resultados obtenidos de las pruebas de jarras convencionales realizadas

Posteriormente se muestra el gráfico 5.1 de donde se ha concluido que la cantidad de coagulantes necesarios (sulfato de aluminio y polielectrolito), no guarda una relación estequiométrica bien definida con la turbidez de agua cruda, no obstante, es evidente que manteniendo una dosis de polielectrolito, existe un incremento de sulfato de aluminio a medida que aumenta la turbidez. El gráfico mencionado, es el resultado de las pruebas - que mostraran una turbidez residual igual o inmediatamente inferior a 5 NTU - y un color residual máximo de 5 unidades. Las turbididades están calificadas en unidades NTU (Nephelometric Turbidity Units) que son equivalentes a las unidades Jackson usadas antiguamente.

Así mismo, se incluye el cuadro 5.2 que muestra los resultados utilizados para plotear los puntos de dosificaciones necesarias para una agua cruda de 140 U.J. de turbidez.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la investigación realizada sobre el uso de polielectrolitos o polímeros en el laboratorio de la planta de tratamiento de agua "Lo de Coy", se desprenden entre otras las siguientes conclusiones y recomendaciones:

9.1 Conclusiones:

- Para las dosificaciones más económicas, la cantidad de polielectrolito usado para estas pruebas, comparado con la cantidad de sulfato de aluminio representó porcentajes entre 0.25% 20% de esta.

- Los polielectrolitos usados en unión del sulfato de aluminio produce un floc que sedimenta más rápidamente.
- Bajo las condiciones experimentales de las aguas provenientes del río Pixcayá, la dosificación de polielectrolitos en pequeñas cantidades reduce el gasto de sulfato de aluminio.
- Para las mismas aguas, el polielectrolito catiónico presentó más aceptabilidad que el de tipo aniónico.
- La relación entre las dosis de coagulantes y la turbidez de agua cruda no guarda una relación estequiométrica ya que diferentes muestras de agua cruda de igual turbidez, pueden requerir diferentes dosis debido que cualquiera otra característica química no coincida (color, ph, dureza, temperatura, etc.).
- Al sobredosificar con polielectrolitos no se obtiene ninguna efectividad en la clarificación del agua ya que se produce una dispersión en lugar de ayudar a la coagulación.
- Los polielectrolitos no siempre actúan como ayudantes a coagulación, sino como coagulantes.
- La mayor cantidad de resultados obtenidos muestran que es más económico dosificar con 2 mg/l de polielectrolitos, más de dosis necesaria de sulfato de aluminio para cualquier turbidez de agua cruda.

9.2 Recomendaciones

- Para asegurar una mezcla completa, es aconsejable añadir los polielectrolitos en forma de solución diluida
- Se recomienda hacer pruebas de jarras esporádicamente y no basarse siempre en los

resultados de antecedentes, para evitar errores al presentarse una agua con características pocas veces mostrados o se usen otros tipos de coagulantes.

- Para obtener buenos resultados en la coagulación de las aguas de Guatemala, es necesario usar polielectrolitos de tipo catiónico.
- Para reducir el gasto de sulfato de aluminio con el polielectrolito catiónico líquido, tratando de evitar detrimento en la economía, es recomendable tomar en cuenta que cada mg/lit de polielectrolito represente como mínimo cierta cantidad de ahorro de sulfato dependiendo de los tipos de coagulantes a usar.
- No es aconsejable aplicar dosis excesivas de polielectrolito para evitar que se produzca la dispersión de -Partículas en lugar de ayudar a la coagulación.

BIBLIOGRAFÍA

Arboleda J. “Teoría y práctica de la purificación del agua”, 1992.

Campos, J. & Di Bernardo, L. “Uso de polímeros Naturales en el Tratamiento de Agua para Abastecimiento. Edición: CINARA. Cali, Colombia. 1991.

Delgadillo Cáceres Mónica & Ramallo Rocha Javier. “Proceso de coagulación-floculación en el agua”. Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología 2003.

Environmental Protection Agency Office of Water Supply “Report on Coagulant Aids for Water Treatment” 2004