

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

TRATAMIENTO DE AGUA

COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

Documento preparado por:

Ing. Yolanda Andía Cárdenas.

Lima, Abril del 2000

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

PRESENTACIÓN

El presente curso ha sido preparado, para dar a conocer y/o actualizar los fundamentos teóricos del proceso de Coagulación y Floculación para el grupo de personas que tiene la responsabilidad del tratamiento de agua con fines de potabilización; especialmente para los Operadores y Técnicos de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Sedapal; y Profesionales de la Planta de Agua u otras áreas relacionadas al tratamiento de aguas; que deseen recordar o estar actualizados en los conceptos Básicos de Coagulación y floculación.

El objetivo de este curso es de ayudar a mejorar el proceso de tratamiento del agua para obtener los resultados deseados, muchas veces el proceso de tratamiento es realizado sin tener en cuenta estos conceptos ni los requerimientos básicos para realizar un buen proceso de Coagulación y Floculación, tales como : Dosis, adición del coagulante, puntos de aplicación, intensidad de mezcla, etc.

Lo que sin duda trae como consecuencias : calidad del agua no deseada; costos de tratamiento variables; pérdida de la eficiencia de las unidades, entre otros.

El contenido del curso es de fácil comprensión, contiene ejemplos reales tomados de las actividades que realizamos en el Control y Evaluación de Plantas; con el que espero alcanzar el objetivo de este curso.

Lima, Abril del 2000

Yolanda Andía Cárdenas.

TRATAMIENTO DE AGUA

COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

Sumario

I. INTRODUCCIÓN

II. PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

- 2.1. Tamaño de las Partículas en Suspensión.
- 2.2. Afinidad de las Partículas Coloidales por el Agua.
- 2.3. Carga Eléctrica y Doble Capa.
- 2.4. Factores de Estabilidad e Inestabilidad

III. COAGULACIÓN

- 3.1. Objetivo Principal.
- 3.2. Que es Coagulación.
- 3.3. Mecanismos de la Coagulación.
 - 3.3.1. Compresión de la Doble Capa.
 - 3.3.2. Adsorción y Neutralización de Cargas.
 - 3.3.3. Atrapamiento de Partículas en un Precipitado.
 - 3.3.4. Adsorción y Puente..
- 3.4. Coagulantes Utilizados.
- 3.5. Factores que influyen en la Coagulación.
 - 3.5.1. Influencia del pH.
 - 3.5.2. Influencia de Sales Disueltas.
 - 3.5.3. Influencia de la Temperatura del Agua.
 - 3.5.4. Influencia de las Dosis de Coagulante.
 - 3.5.5. Influencia del Mezcla.
 - 3.5.6. Influencia de la Turbiedad.
 - 3.5.7. Sistemas de Aplicación de Coagulantes.
- 3.6. Coagulación del Color.
- 3.7. Fases de la Coagulación.
- 3.8. Tipos de Coagulación.
- 3.9. Clasificación del agua según comportamiento en la coagulación
- 3.10. Remoción de la Turbiedad.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

IV. FLOCULACION

- 4.1 . Objetivo de la Floculación
- 4.2 . Definición
- 4.3 . Tipos de Floculación
- 4.4 . Parámetros de la Floculación
- 4.5 . Floculantes.

V. APLICACIÓN PRACTICA DE LOS COAGULANTES Y FLOCULANTES

- 5.1 . Requisitos Principales
 - 5.1.1. Verificación del Caudal de Tratamiento.
 - 5.1.2. Dosificación de Productos Químicos
 - 5.1.3. Manejo de Equipos de Medida y Medios de Medición
- 5.2. Ensayos de Pruebas de Jarras.
 - 5.2.1. Definición.
 - 5.2.2. Objetivo.
 - 5.2.3. Materiales y Equipos Necesarios.
 - 5.2.4. Preparación de Solución de Coagulantes y Polímeros.
 - 5.2.5. Obtención de Resultados.
 - 5.2.6. Desarrollo de las Pruebas de Jarras.
 - 5.2.7. Aplicación de la Dosis Óptima en Plantas.

VI. BIBLIOGRAFÍA

ANEXO

TRATAMIENTO DE AGUA

COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

I. INTRODUCCIÓN

La turbiedad y el color del agua son principalmente causados por partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. Por otro lado aunque su concentración es muy estable, no presentan la tendencia de aproximarse unas a otras.

Para eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación, la coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión es decir facilitar su aglomeración. En la práctica este procedimiento es caracterizado por la inyección y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene por objetivo favorecer con la ayuda de la mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un floc que pueda ser fácilmente eliminado por los procedimientos de decantación y filtración.

Es muy importante que los procedimientos de coagulación y floculación sean utilizados correctamente, ya que la producción de un floc muy pequeño o muy ligero produce una decantación insuficiente; mientras que el agua que llega a los filtros contienen una gran cantidad de partículas de floc que rápidamente ensucian los filtros y necesitan lavados frecuentes. Por otro lado cuando el floc es frágil, este se rompe en pequeñas partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la calidad del agua producida.

Las aguas superficiales pueden contener una gran variedad de materias, el tamaño de las partículas de estas materias y su naturaleza determinan los tipos de tratamiento dentro de las plantas de agua. Las partículas de tamaño muy grande como los detritus orgánicos, algas protozoarios, grava, arena, limo, etc. los bichos en la materia en suspensión del tamaño de 10 micrómetros a 10 mm y mas, pueden ser eliminados por los tratamientos de separación física que conlleva aproximadamente los siguientes:

10 a 100 mm son separados por medio de los sistemas de rejillas.

0.2 a 10 mm pueden ser separados por desarenación, sedimentación, decantación y flotación.

0.01 a 0.1 mm son separados por filtración (macro y microtamizado).

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Las partículas muy finas son una parte de las materias solubles y de las materias coloidales como: proteínas, virus; moléculas y los iones pueden ser separados por adsorción o intercambio de iones.

II. PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN.

Las partículas en suspensión de una fuente de agua superficial provienen de la erosión de suelos, de la disolución de sustancias minerales y de la descomposición de sustancias orgánicas. A este aporte natural se debe adicionar las descargas de desagües domésticos, industriales y agrícolas. En general la turbiedad del agua es causado por las partículas de materias inorgánicas (arcillas, partículas de lo), en tanto que el color está formado por las partículas de materias orgánicas e hidróxidos de metal (hierro por ejemplo).

Planta de Agua de La Atarjea.

La fuente de abastecimiento del agua para el tratamiento es el río Rímac; cuyas características principales de turbiedad y caudal son:

- ***Alta Turbiedad***, se presenta durante los meses de lluvia (Diciembre a Marzo), por lo tanto hay una alta concentración de partículas en suspensión como consecuencia del arrastre de los sedimentos durante el trayecto del río hacia la bocatoma de la planta. En esta época la turbiedad del río varía de valores superiores de 50 a 50000 NTU, con un valor promedio de 300 NTU (para el año 1999).

Durante estos meses el caudal del río también es variable; para el presente año se encontró como caudal máximo 106 m³/s., y un caudal mínimo de 23 m³/s. La calidad físicoquímica del agua también varía en su composición: mayor cantidad de metales disueltos (plomo, aluminio, hierro); mayor cantidad de compuestos orgánicos, etc.

- ***Baja Turbiedad***, se presenta en los meses de Abril a Noviembre, donde la cantidad de las partículas en suspensión es muy baja y los valores de turbiedad en el río varían entre 6 a 50 NTU, con valor promedio de 15 NTU. El caudal del río varía aproximadamente de 18 a 25 m³/s.

Las características de las partículas en suspensión son las siguientes:

2.1 . Tamaño de las partículas en Suspensión.

Las partículas se clasifican de acuerdo a su tamaño; así las partículas con diámetro inferior a 1 micrómetro (1 μ m) que corresponden a partículas de materias orgánicas o inorgánicas, se depositan muy lentamente.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

La tabla siguiente indica los tiempos de decantación de las diferentes partículas en función de : sus dimensiones; densidad y de la temperatura del agua.

Tipo de Partículas	Diámetro (mm)	Tiempo de Caída	
		Densidad 2.65	Densidad 1.1
Grava	10	0.013 s.	0.2 s.
Arena Gruesa	1.0	1.266 s.	20.9 s.
Arena fina	0.1	126.66 s.	34.83 min.
Lodo fino	0.01	3.52 h.	58 h.
Bacterias	0.001	14.65 d.	249.1 d.
Coloides	0.0001	4.12 a.	66.59 d.

Se observa fácilmente que a la misma densidad, las partículas mas pequeñas tienen un tiempo de duración de caída mas grande, esto imposibilita la decantación sin la adición de un factor externo.

Los Coloides son suspensiones estables, por lo que es imposible sus sedimentación natural, son sustancias responsables de la turbiedad y del color del agua.

Los sistemas coloidales presentan una superficie de contacto inmensa entre la fase sólida y la fase líquida, por ejemplo 1 cubo de 1 cm³, tiene una superficie total de 6 cm²; si está dividido en pequeños cubos elementales, la superficie total de todos aquellos es mucho mas grande.

2.2 . Afinidad de las Partículas Coloidales por el Agua

Las partículas coloidales se caracterizan por ser hidrofílicos (tienen afinidad por el agua) e hidrófobos (es decir que rechazan al agua), los primeros se dispersan espontáneamente dentro del agua y son rodeados de moléculas de agua que previenen todo contacto posterior entre estas partículas; las partículas hidrofóbicas no son rodeados de moléculas de agua, su dispersión dentro del agua no es espontáneo por lo que requiere de la ayuda de medios químicos y físicos.

Las partículas hidrofobas son en general partículas de materias inorgánicas mientras que las hidrofílicas son materias orgánicas; en realidad solo un poco son las partículas que son exclusivamente hidrofílicas o hidrofóbicas; se obtienen mas bien partículas hidratadas a los diferentes grados.

La carga eléctrica y la capa de agua que rodean las partículas hidrófilas tienden a desplazar las partículas unas de otras y, en consecuencia los estabiliza entro de la solución.

2.3 . Carga Eléctrica y Doble Capa.

Dentro del Agua Superficial, **las partículas coloidales**, son las causantes de la turbiedad y del color por lo que el tratamiento del agua está orientado a la remoción de estas partículas; estas poseen normalmente una carga eléctrica negativa situado sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos (fig. 1).

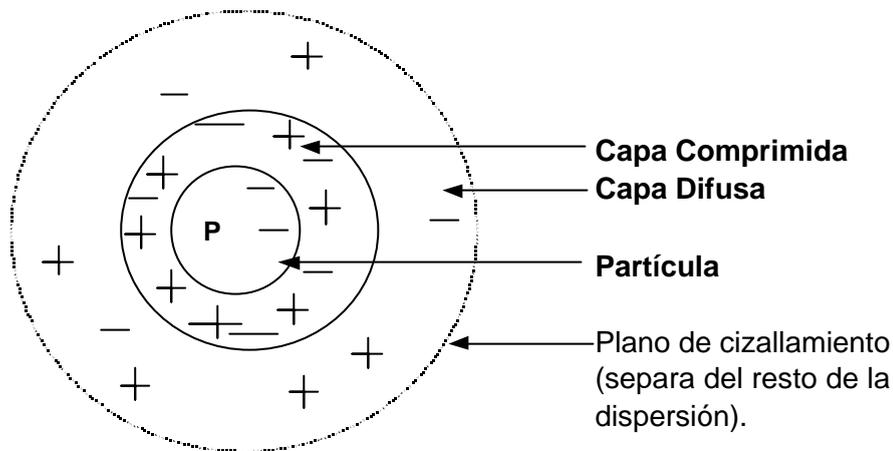


Figura 1 Doble Capa de Una Partícula coloidal.

Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta.

2.4. Factores de Estabilidad e Inestabilidad.

Las partículas coloidales están sometidos a dos grandes de fuerzas :

- **Fuerzas de atracción de Van der Waals** : E_a (factores de Inestabilidad); son fuerzas de atracción producidas por el movimiento continuo de las partículas.
- **Fuerzas de repulsión electrostáticas** : E_b (columbicas – factor de estabilidad); son fuerzas que impiden la aglomeración de las partículas cuando estas se acercan unas a otras; por ejemplo 2 partículas de igual digno no se pueden aproximar , estas rechazan.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

El equilibrio de una suspensión coloidal dependen de la fuerza resultante entre la fuerza de atracción y la fuerza de repulsión : E_r , (ver fig. 2.)

$$E_r = E_a + E_b$$

III. COAGULACIÓN

3.1. Objetivo Principal

El objetivo principal de la coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración; en consecuencia se eliminan las materias en suspensión estables; la coagulación no solo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos.

3.2. Qué es la Coagulación.

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

En la siguiente figura 3 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos.

La coagulación es el tratamiento mas eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos.

El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas. Por lo tanto que se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante esta mal ajustada.

En esta figura se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos.

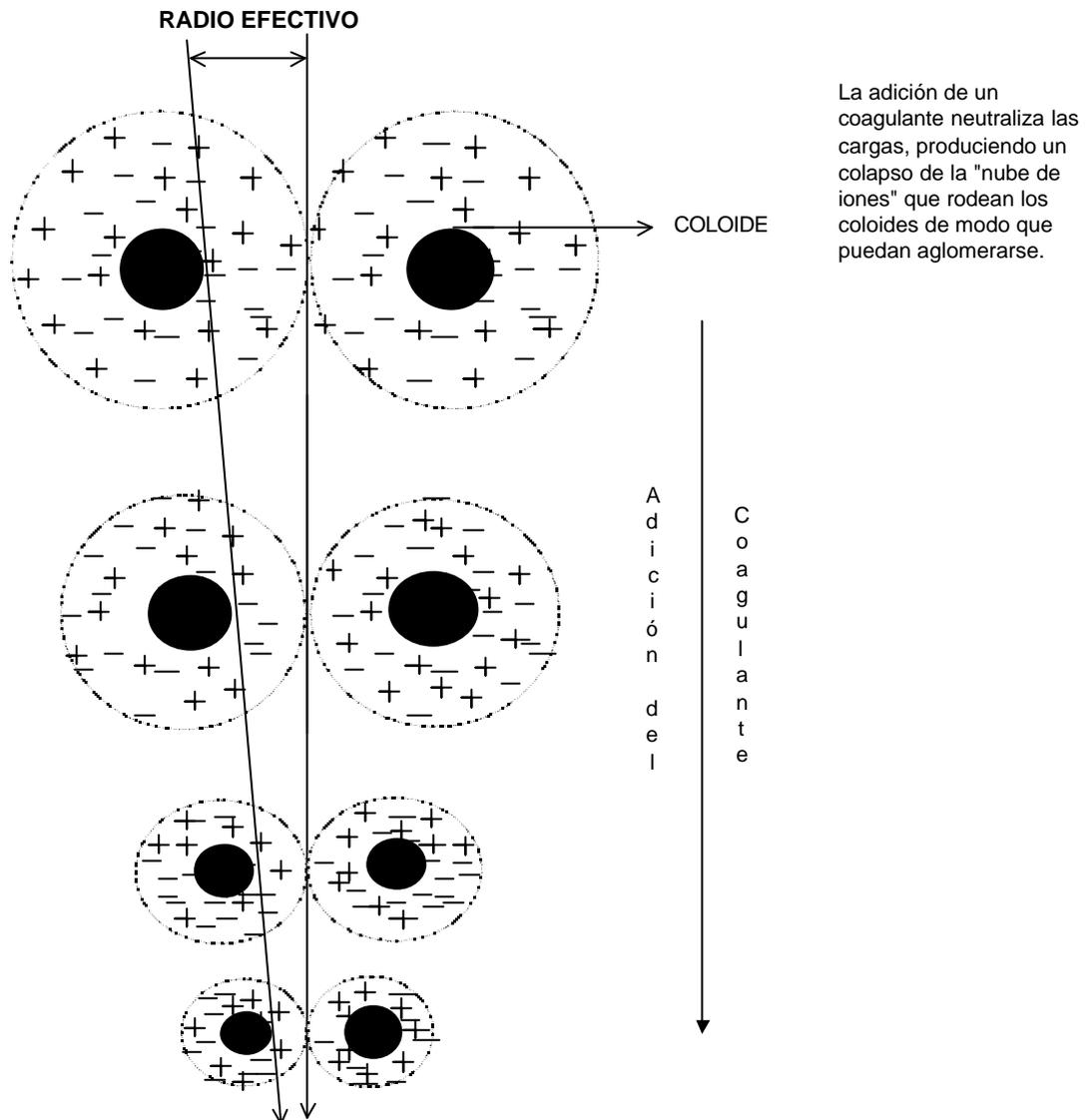


Fig. 3: Coagulación

3.3. Mecanismo de la Coagulación

La desestabilización se puede obtener por los mecanismos fisicoquímicos siguientes:

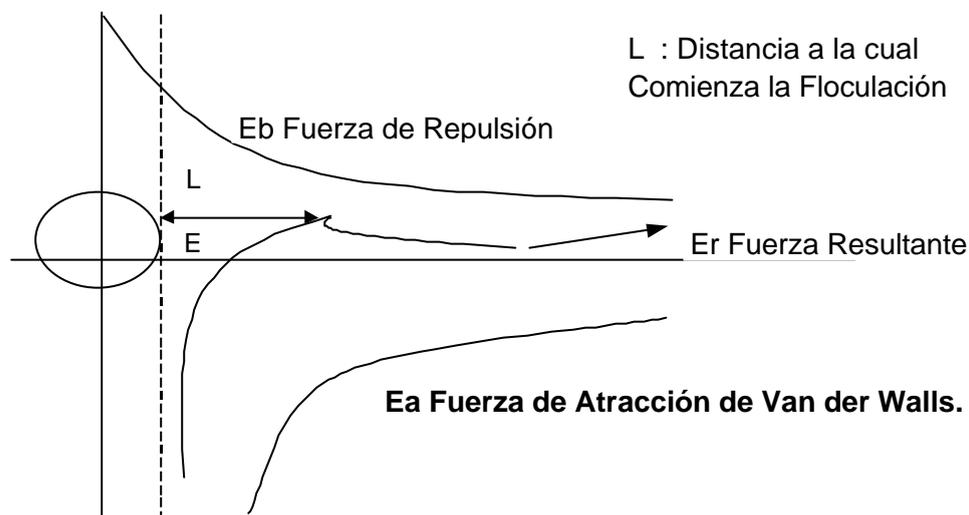
- Compresión de la doble capa.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente.

3.3.1. Compresión de la Doble Capa

Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas, esto se consigue sólo con los iones del coagulante. (Ver Fig. 2).

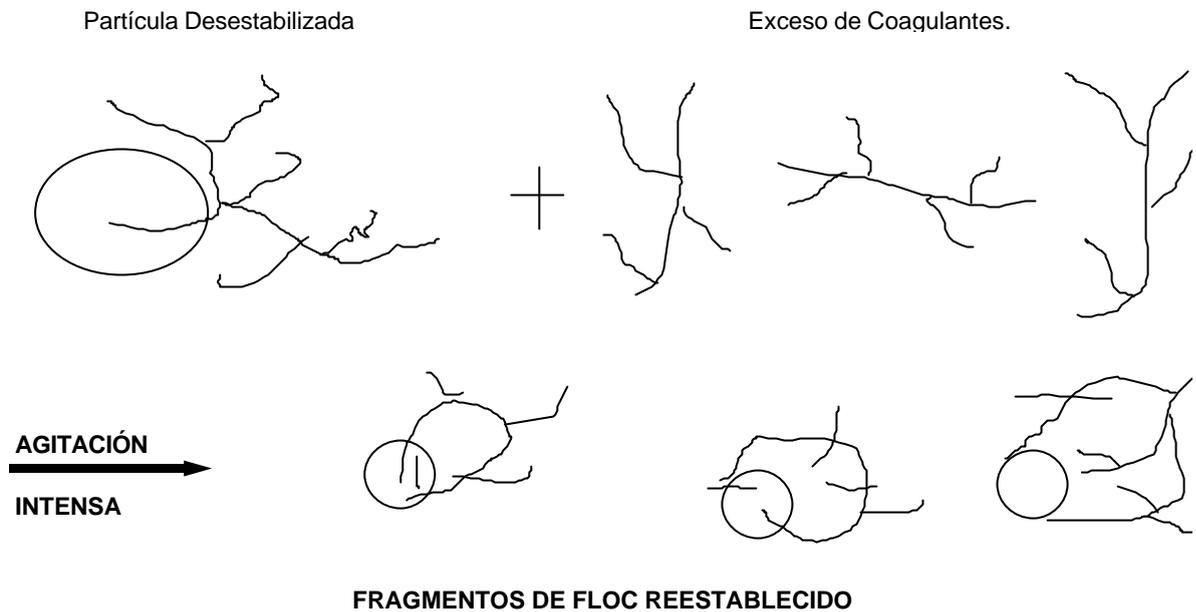
Existe por otro lado un potencial de atracción o fuerzas de atracción E_a , entre las partículas llamadas fuerzas de Van der Waals, que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos últimos. Contrariamente a las

Fig. 2 Fuerzas de Atracción y Repulsión.



Si la distancia que separa a las partículas es superior a “L”, entonces las partículas, no se atraen. E es la energía que los mantiene separados.

Fig. 4 Reestabilización de Partículas.



Fuerzas de repulsión, las fuerzas de Van der Waals no son afectados por las características de la solución. Ver fig. 2.

3.3.2. Absorción y Neutralización de Cargas

Las partículas coloidales poseen carga negativa en sus superficie, estas cargas llamadas primarias atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide.

El potencial en la superficie del plano de cizallamiento es el potencial electrocinético – potencial ZETA, este potencial rige el desplazamiento de coloides y su interacción mutua.

Después de la teoría de la doble capa la coagulación es la considerada como la anulación del potencial obtenido por adición de productos de coagulación – floculación, en la que la fuerza natural de mezcla debido al movimiento browniano no es suficiente requiriéndose una energía complementaria necesaria; por ejemplo realizar la agitación mecánica o hidráulica.

Cuando se adiciona un exceso de coagulante al agua a tratar, se produce a la reestabilización de la carga de la partícula; esto se puede explicar debido a que el exceso de coagulante son absorbidos en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original. (Ver Fig. 4.)

3.3.3. Atrapamiento de Partículas dentro de un Precipitado

Las partículas coloidales desestabilizadas, se pueden atrapar dentro de un floc, cuando se adiciona una cantidad suficiente de coagulantes, habitualmente sales de metales trivalente como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, o Cloruro Férrico $FeCl_3$, el floc está formado de moléculas de $Al(OH)_3$ o de $Fe(OH)_3$. La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales aceleran la formación del precipitado. Las partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del floc; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. En otras palabras, una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menor cantidad de coagulante.

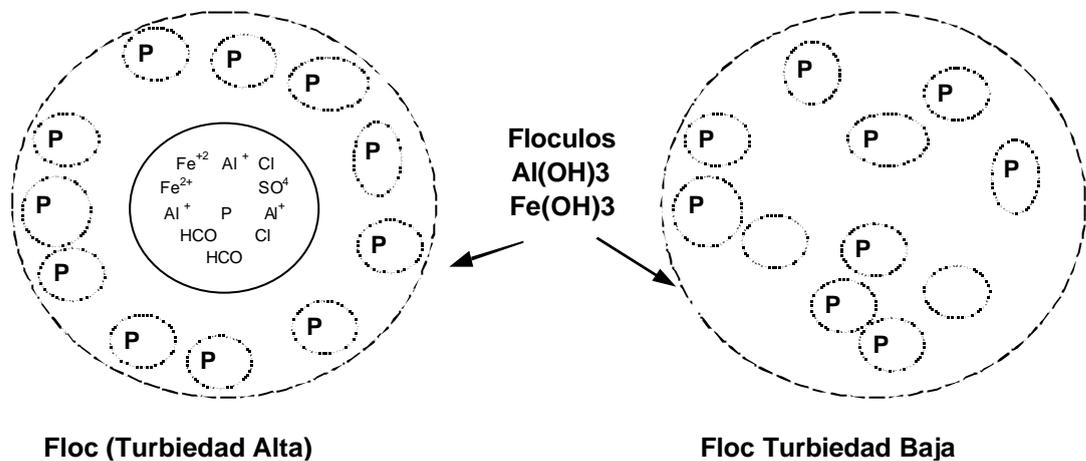
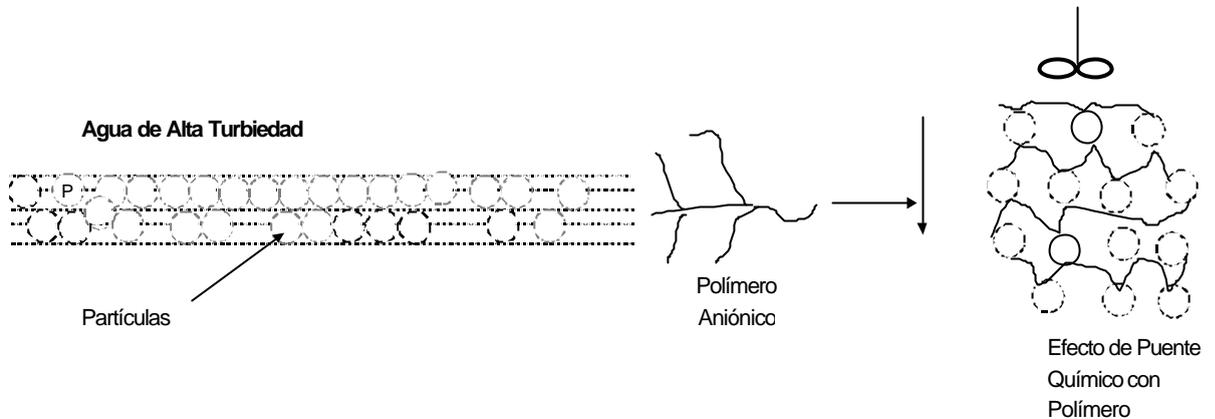


Fig. 5 Atrapamiento de las Partículas en un Floc.

3.3.4. Adsorción y Puente

En cualquier caso, se obtiene el tratamiento mas económico utilizando un polímero aniónico, cuando las partículas están cargadas negativamente. Este fenómeno es explicado por la teoría del “puente”. Las moléculas del polímero muy largas contienen grupos químicos que pueden absorber las partículas coloidales. La molécula de polímero puede así absorber una partícula coloidal en una de sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para absorber otras partículas. Por eso se dice que las moléculas de los polímeros forman el “puente” entre las partículas coloidales. Esto puede tener una restabilización de la suspensión, por una excesiva carga de polímeros.

Fig. 6 Efecto de Puente de las Partículas en Suspensión



3.4. Coagulantes Utilizados

Los componentes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando.

Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floc son :

- Sulfato de Aluminio.
- Aluminato de Sodio.
- Cloruro de Aluminio.
- Cloruro Férrico.
- Sulfato Férrico.
- Sulfato Ferroso.
- Polielectrolitos (Como ayudantes de floculación).

Siendo los mas utilizados las sales de Aluminio y de Hierro; cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son mas eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados.

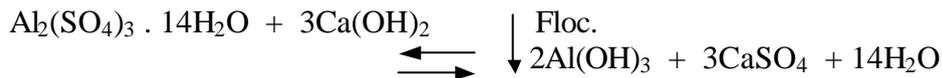
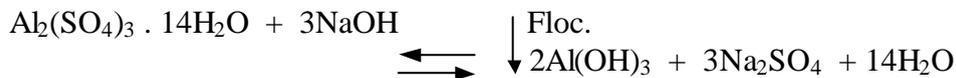
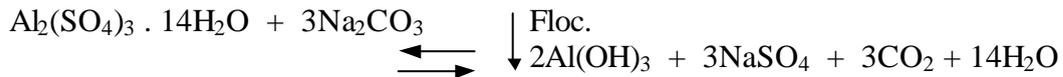
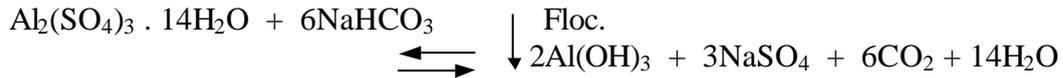
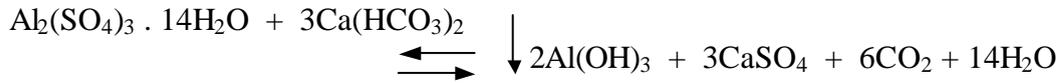
Alcalinidad.- Es un método de análisis, con el que se determina el contenido de bicarbonatos (HCO_3^-); carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos de un agua natural o tratada. La alcalinidad tiene relación con el pH del agua.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Las principales reacciones de sulfato de aluminio con la alcalinidad del agua son:



Planta de Agua de la Atarjea.

Los siguientes productos químicos con utilizados como coagulantes :

?? **Sulfato de Aluminio en Solución al 8% (Sal de Aluminio).**

- <i>Fórmula Química</i>	:	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- <i>Color</i>	:	Pardo Amarillento.
- <i>Concentración de Oxido de Aluminio</i>	:	7.9 a 8.3 como % Al_2O_3 .
- <i>Basicidad (% Al_2O_3 libre)</i>	:	No mayor de 0.2
- <i>Acidez (% Al_2O_3 libre)</i>	:	No mayor de 0.2
- <i>Fierro Total (% Fe_2O_3)</i>	:	No mayor de 0.35
- <i>Residuo Insoluble (%)</i>	:	No mayor de 1%
- <i>Densidad</i>	:	1.3 a 1.35 g/cc.

Se abastece a la planta en tanques cisternas de 30 toneladas de capacidad.

?? **Sulfato de Aluminio Granulado Tipo B. (Sal de Aluminio).**

- <i>Fórmula Química</i>	:	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$
- <i>Color</i>	:	Pardo Amarillento.
- <i>Concentración de Oxido de Aluminio</i>	:	15.6 a 17 como % Al_2O_3 .
- <i>Basicidad (% Al_2O_3 libre)</i>	:	No mayor de 0.5
- <i>Acidez (% Al_2O_3 libre)</i>	:	No mayor de 0.3
- <i>Fierro Total (% Fe_2O_3)</i>	:	No mayor de 0.75
- <i>Residuo Insoluble (%)</i>	:	No mayor de 2%

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

- **Tamaño:** *No menor del 95% pase por la malla 10 Standard.
El 100% pase la malla de 4 hilos/pulg.
No mas del 25% pase la malla de 35 hilos/pulg.*

Se recepciona en bolsas multipliego de 50 kg. De peso.

?? **Cloruro Férrico al 40% (Sal de Hierro).**

- **Fórmula Química** : *FeCl3*
- **Color** : *Pardo Oscuro.*
- **Concentración de Cloruro Férrico** : *38 a 45% como % FeCl3.*
- **Concentración de Cloruro Ferroso** : *No mayor de 0.5% como FeCl2*
- **Acidez Libre (% HCl)** : *No mayor de 0.5*
- **Contenido de Metales Totales** : *No mayor de 0.01%*
- **Residuo Insoluble (%)** : *No mayor de 0.5%*
- **Densidad** : *1.4 a 1.45 g/cc.*

3.5. Factores que Influyen en la Coagulación.

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación:

- ?? pH.
- ?? Turbiedad.
- ?? Sales disueltas.
- ?? Temperatura del agua.
- ?? Tipo de coagulante utilizado.
- ?? Condiciones de Mezcla.
- ?? Sistemas de aplicación de los coagulantes.
- ?? Tipos de mezcla y el color.

La interrelación entre cada uno de ellos permiten predecir cuáles son las cantidades de los coagulantes a adicionar al agua.

3.5.1. Influencia del pH.

El pH es una medida de la actividad del ion hidrógeno en una solución, y es igual a:

$$\text{Ph} = -\log\{\text{H}^+\}$$

El pH es la variable mas importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua.

El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6.5 a 8.0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5.5 a 8.5 unidades.

Caso Río Rímac.- El pH del río varía entre 7.5 a 8.2 unidades y el agua de entrada a las plantas tiene un pH promedio 7.3 a 7.8 unidades.

3.5.2. Influencia de las Sales Disueltas

Las sales contenidas dentro del agua ejercen las influencias siguientes sobre la coagulación y floculación:

- Modificación del rango de pH óptimo.
- Modificación del tiempo requerido para la floculación.
- Modificación de la cantidad de coagulantes requeridos.
- Modificación de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente.

3.5.3. Influencia de la Temperatura del Agua

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace mas lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación.

Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un floc.

3.5.4. Influencia de la Dosis del Coagulante

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así:

- ° Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microfloculos es muy escaso, por lo tanto la turbiedad residual es elevada.
- ° Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada.
- ° La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de pruebas de jarra.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

La selección del coagulante y la dosis juegan un rol muy importante sobre :

- La buena o mala calidad del agua clarificada.
- El buen o mal funcionamiento de los decantadores.

Por ejemplo : en el siguiente cuadro se observa para Turbiedad inicial de $T_o = 20$ NTU, los valores de dosis de coagulantes son diferentes para los diferentes valores de pH y alcalinidad.

PH: Unidades	Alcalinidad	Dosis Op. FeCl3 Soluc.	Dosis Op. Al2(SO4)3 Soluc.
7.46	91 p.p.m CaCO3	14 p.p.m	26 p.p.m.
7.29	85 p.p.m CaCO3	16 p.p.m	30 p.p.m.

3.5.5. Influencia de Mezcla

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecho y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración (60 seg., máx.) llamado **mezcla rápida**; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar, y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los microfloculos.

La mezcla rápida se efectúa para la inyección de productos químicos dentro de la zona de fuerte turbulencia, una inadecuada mezcla rápida conlleva a un incremento de productos químicos.

Tipos de Mezcla

Las unidades para producir la mezcla pueden ser :

- Mezcladores Mecánicos : - Retromezcladores (agitadores)
- Mezcladores Hidráulicos: - Resalto Hidráulico: Canaleta Parshall y Vertedero Rectangular
- En línea: Difusores (tuberías y canales)
- Inyectores, etc.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Planta de Agua de La Atarjea

En la planta de La Atarjea se utilizan como mezcladores los del tipo hidráulico tipo vertedero:

Planta 1: Hay 6 vertederos horizontales de 2.68m., de longitud cada uno

Planta 2: 24 vertederos de 1 m., de longitud cada uno.

Ventajas y Desventajas de los Mezcladores Hidráulicos y Mecánicos

El gradiente de velocidad en un mezclador mecánico no varía con el caudal, tiene la ventaja adicional de controlar el grado de agitación, haciendo variar la velocidad de rotación del impulsor; sin embargo tiene la limitante de depender de la energía externa que una falla hace que el proceso de mezcla se perjudique.

Los mezcladores hidráulicos se caracterizan por presentar poca flexibilidad a las variaciones de caudal, no depende de una energía externa. Por lo general se utilizan como mezcladores rápidos las canaletas parshall y vertederos.

3.5.6. Influencia de la Turbiedad

Turbiedad.- Es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide el efecto de la dispersión que estas partículas presentan al paso de la luz; y es función del número, tamaño y forma de partículas.

La turbiedad del agua superficial es gran parte debido a partículas de lodos de sílice de diámetros que varían entre 0.2 a 5 μm . La coagulación de estas partículas es muy fácil de realizar cuando el pH se mantiene dentro del rango óptimo. La variación de la concentración de las partículas permiten hacer las siguientes predicciones:

- Para cada turbiedad existe una cantidad de coagulante, con el que se obtiene la turbiedad residual mas baja, que corresponde a la dosis óptima.
- Cuando la turbiedad aumenta se debe adicionar la cantidad de coagulante no es mucho debido a que la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada; por lo que la coagulación se realiza con facilidad; por el contrario cuando la turbiedad es baja la coagulación se realiza muy difícilmente, y la cantidad del coagulante es igual o mayor que si la turbiedad fuese alta.
- Cuando la turbiedad es muy alta, conviene realizar una presedimentación natural o forzada, en este caso con el empleo de un polímero aniónico. (En la Planta de la Atarjea, se realiza este último, en época de alta turbiedad).
- Es siempre más fácil coagular las aguas de baja turbiedad y aquellas contaminadas por desagües domésticos industriales, por que requieren mayor cantidad de coagulante que los no contaminados.

3.5.7. Sistema de Aplicación del Coagulante

Se considera que una reacción adecuada del coagulante con el agua se produce cuando:

- La dosis del coagulante que se adicione al agua es en forma constante y uniforme en la unidad de mezcla rápida, tal que el coagulante sea completamente dispersado y mezclado con el agua.
- El sistema de dosificación debe proporcionar un caudal constante y fácilmente regulable; en las siguiente fig. 7 se observan las condiciones de mezcla del coagulante con el agua; se observa que la mejor mezcla es cuando el coagulante adicionado cae en su totalidad a la masa de agua (fig. 7b). Esta condición se obtiene por medio de los equipos de dosificación tanto para los coagulantes al estado sólido y estado líquido, que deben encontrarse calibrados y comprobados en la práctica por medio de las pruebas de aforamiento.

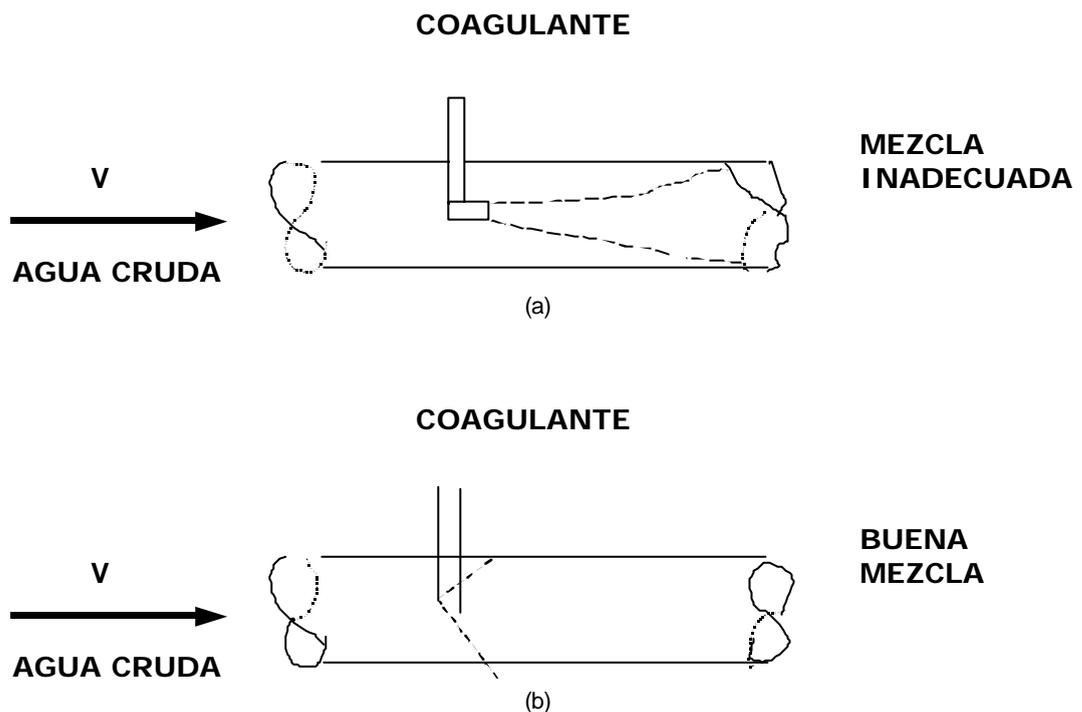


Fig 7. Condiciones de Mezcla.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Planta de Agua de la Atarjea

Los equipos de dosificación existentes en las Plantas de Tratamiento de la Atarjea son :

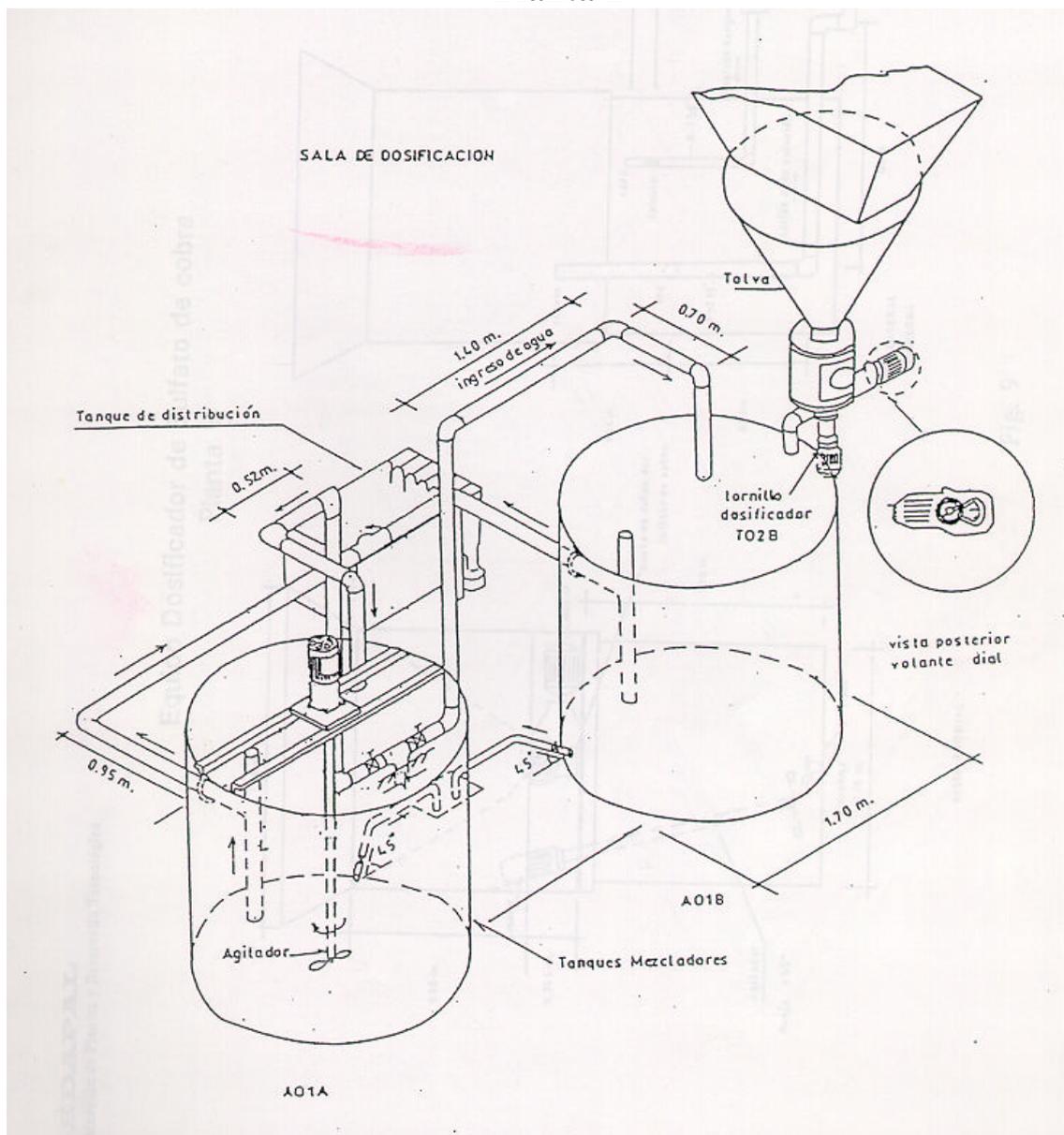
° *Dosificadores en Seco – Tipo Volumétrico de Tornillo Giratorio :*

Planta 1 : Dosificador de Sulfato de Aluminio Granular (Fig. 8)

Dosificador de Sulfato de Cobre (Fig. 9)

Planta 2 : Dosificador de Cal.

Equipo Dosificador de Sulfato de Aluminio (Granular) Planta 1



Equipo dosificador de Sulfato de Cobre

Planta 1

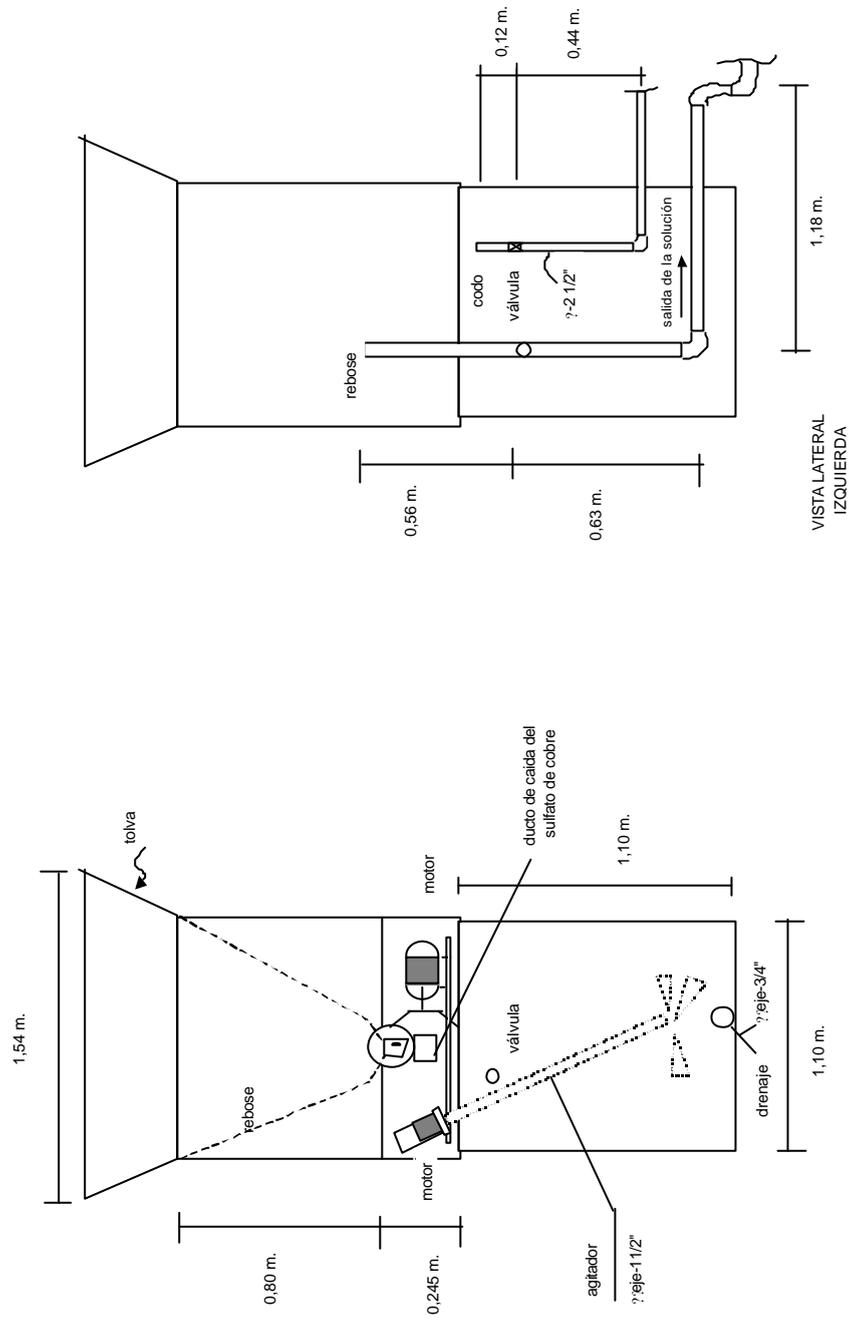


fig. 9

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

° *Dosificadores en Solución (Figuras 10 y 11)*

Sistema por Gravedad: Dosificación de Cloruro Férrico – Planta 1.
Sistema por Bombeo: En Plantas 1 y 2, para dosificación de Sulfato de Aluminio Solución.

En Plantas 1 y 2 para la dosificación de Polielectrolito Catiónico y dosificación de Cloruro Férrico en Planta 2.

3.6. Coagulación del Color

En general el color de un agua es debido a la descomposición de la materias orgánica que contienen los humos de los suelos; esto depende de una gran variedad de compuestos orgánicos como las sustancias húmicas que son de masa molecular variada de 800 a 50000 gr/mol.

Los mecanismos que permiten la eliminación del color no son los mismos que los utilizados para la turbiedad.

3.7. Etapas o Fases de la Coagulación

El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas. (Fig. 12)

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- Formación de Compuestos químicos poliméricos.
- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- Adsorción mutua de coloides.
- Acción de barrido.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

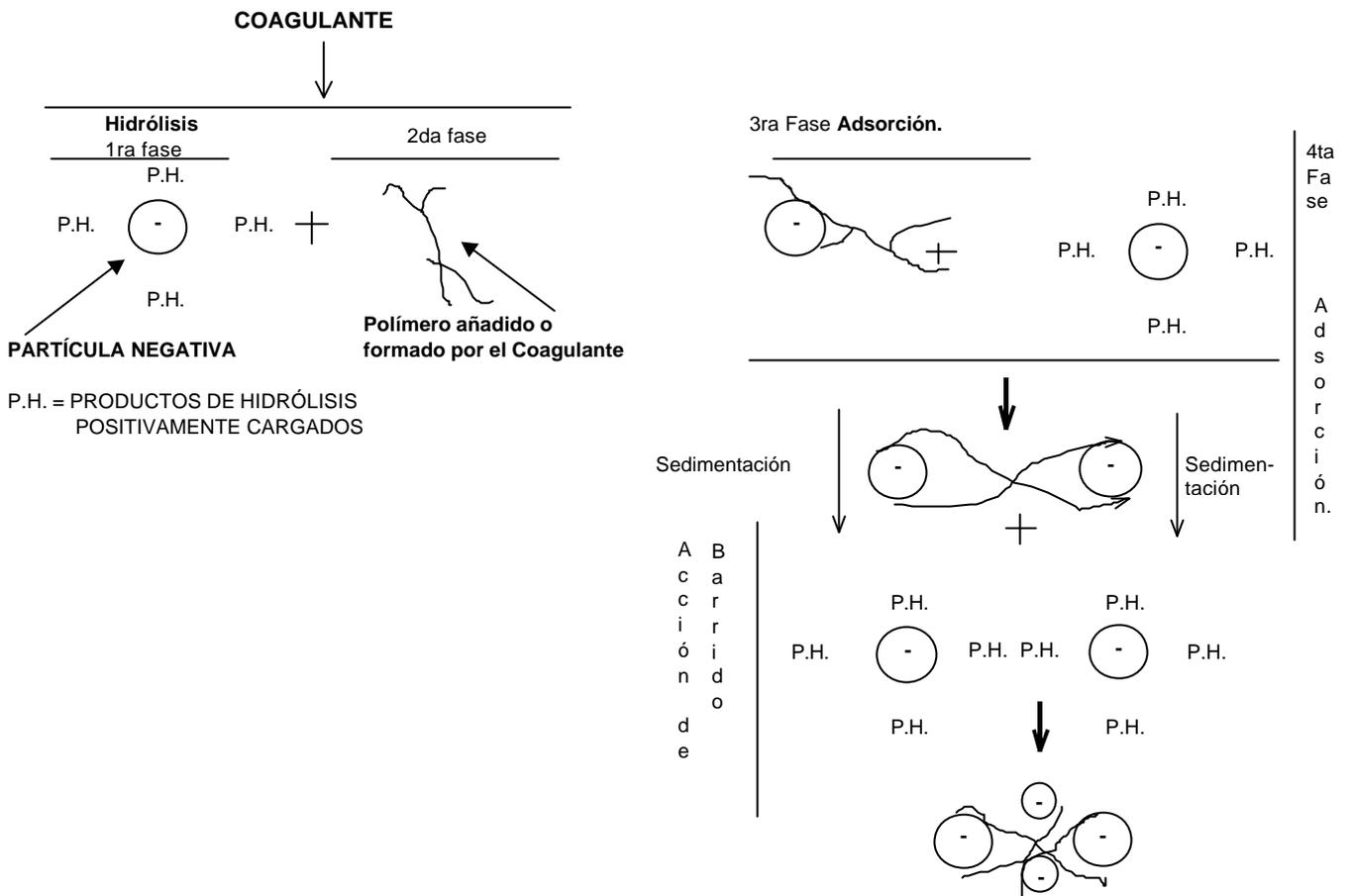


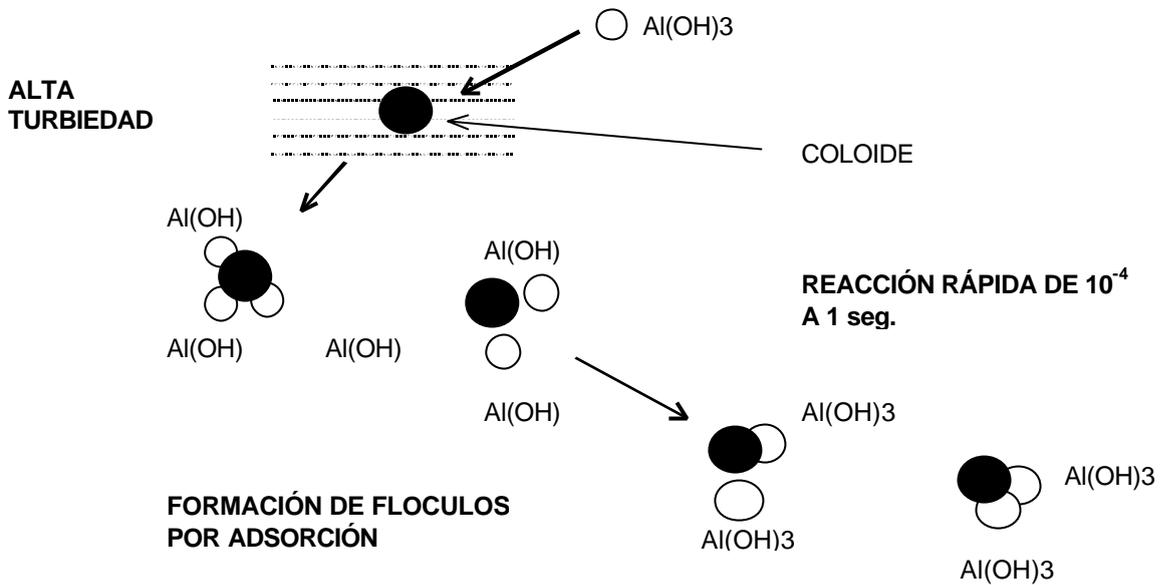
Fig. 12 Fases de la Coagulación

3.8. Tipos de Coagulación

Se presentan dos tipos básicos de coagulación: Por Adsorción y Por Barrido.

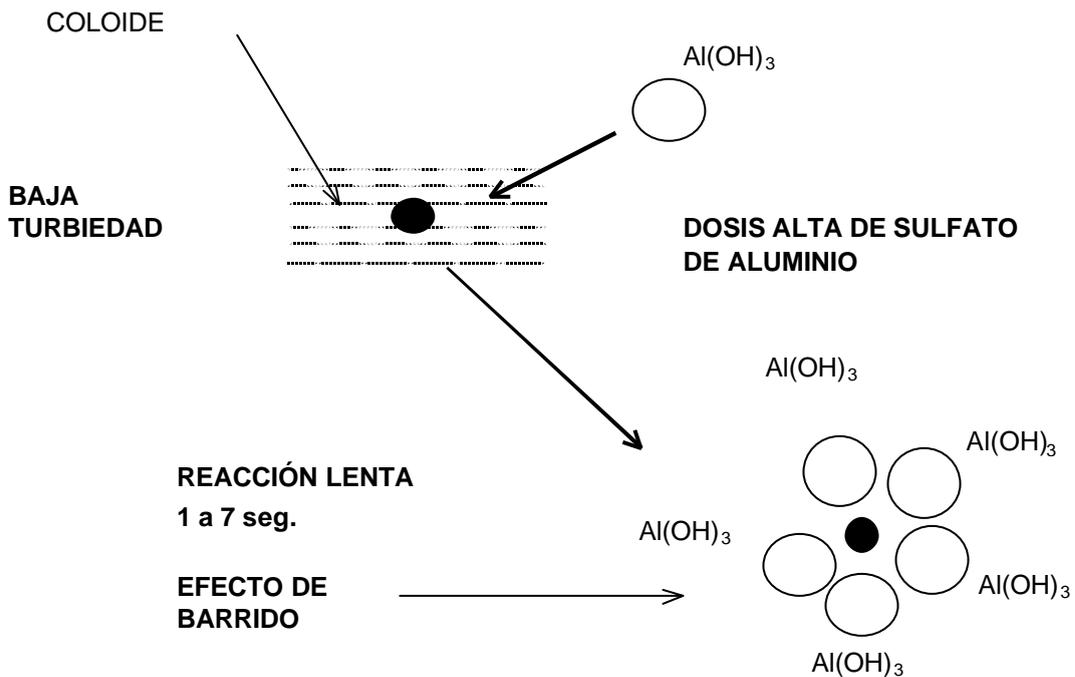
- a) **Coagulación Por Adsorción.-** Se presenta cuando el agua presenta una alta concentración de partículas al estado coloidal; cuando el coagulante es adicionado al agua turbia los productos solubles de los coagulantes son absorbidas por los coloides y forman los flocúlos en forma casi instantánea.

Fig. 13 Coagulación Por Adsorción.



Coagulación por Barrido.- Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (presenta baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es pequeña; en este caso las partículas son entrampadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico.

Fig. 14 Coagulación por Barrido



SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Planta de Agua de La Atarjea

En las Plantas de agua de la Atarjea, durante los meses de alta turbiedad; el proceso de coagulación que se realiza, es por adsorción, debido a la alta concentración de partículas coloidales, expresados en como valores de turbiedad, que normalmente se encuentren en el rango de 200 a 600 NTU a la entrada de las plantas.

Siendo el coagulante adecuado el cloruro férrico por la alta eficiencia que tiene en la reducción de la turbiedad; la dosis empleada de este coagulante son función de la turbiedad y varían de 18 a 26 p.p.m.

*Durante la época de baja turbiedad (9 meses), la turbiedad de entrada a las plantas es de 6 a 50 NTU, por lo que la coagulación que se presenta es del tipo **barrido**, siendo el coagulante utilizado el sulfato de aluminio solución.*

Se adjuntan los gráficos de dosis optima con respecto a la variación de la turbiedad, de estos coagulantes.

3.9. Clasificación del Agua Según su Comportamiento en la Coagulación.

Tipo de Agua.	Tipo de Coagulación.	Requerimiento.
1. Baja Concentración de Coloides, baja alcalinidad.	Formación de precipitado. Floc de barrido	Alta dosis de coagulantes. Adición de alcalinidad o partículas, o ambas.
2. Baja concentración de coloides, alta alcalinidad.	Formación de precipitado. Floc de Barrido	Alta dosis de coagulantes. Adición de partículas.
3. Alta concentración de coloides, baja alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos, en la superficie de los coloides. (pH 4 a 7).	Dosis de coagulantes incrementa con concentración de partículas, adición de alcalinidad
4. Alta concentración de coloides, alta alcalinidad.	Adsorción de polímeros, metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos (pH>7)	Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas.

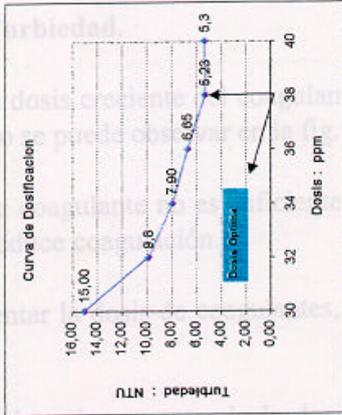
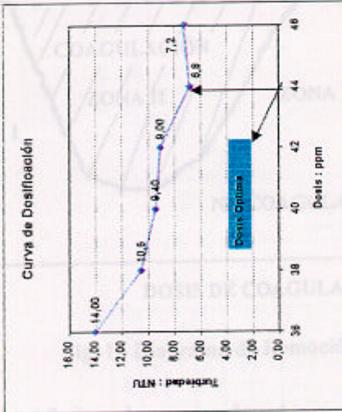
Planta de Agua de La Atarjea

El agua de entrada a la Planta presenta estos 4 tipos de agua, que han sido identificados durante los ensayos de “Pruebas de Jarra para Determinación de la Dosis Optima”; cuyos resultados de los ensayos se puede observar en los siguientes cuadros y gráficos; llegándose a la conclusión que cuando la alcalinidad del agua es baja la cantidad de coagulante requerido es mayor que cuando la alcalinidad es alta.

En la siguiente figura 15, se pueden observar los resultados, para los 4 tipos de agua.

Fig. 15 CLASIFICACION DEL AGUA SEGUN SU COMPORTAMIENTO EN LA COAGULACION
COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO

1.- Alta Turbiedad Baja Alcalinidad : Coagulación por Adsorción.

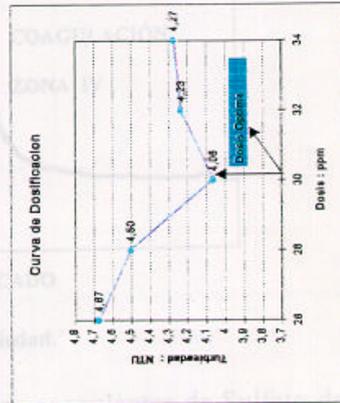


2.- Alta Turbiedad Baja Alcalinidad : Coagulación por Adsorción.

Jarra PPM	Tf ntu	pH und
1	30	15,00
2	32	9,8
3	34	7,90
4	36	6,65
5	38	5,23
6	40	5,3

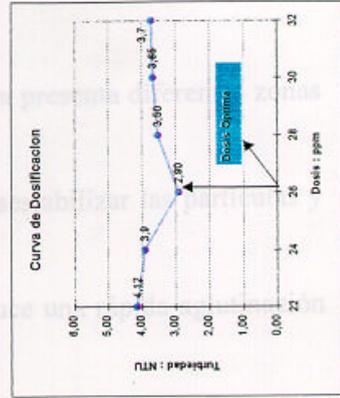
To NTU 269,0
pH und 7,42
Alcal ppm 99
T°C 20,9

3.- Baja Turbiedad Baja Alcalinidad : Coagulación por Barrido.



To NTU 57,9
pH und 7,41
Alcal ppm 77,3
T°C 21,2

4.- Baja Turbiedad Alta Alcalinidad : Coagulación por Barrido.



To NTU 13,3
pH und 7,66
Alcal ppm 119
T°C 21,9

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

3.10. Remoción de Turbiedad.

La aplicación de una dosis creciente del coagulante al agua presenta diferentes zonas de coagulación, como se puede observar en la Fig. 16.

Zona 1 .- La dosis de coagulante no es suficiente para desestabilizar las partículas y por lo tanto no se produce coagulación.

Zona 2.- Al incrementar la dosis de coagulantes, se produce una rápida aglutinación de los coloides.

Zona 3 .- Si se continua incrementando la dosis, llega un momento en que no se produce una buena coagulación, ya que los coloides se reestabilizan.

Zona 4 .- Al aumentar aún mas la dosis, hasta producir una supersaturación se produce de nuevo una rápida precipitación de los coagulantes que hace un efecto de barrido, arrastrando en su descenso las partículas que conforman la turbiedad.

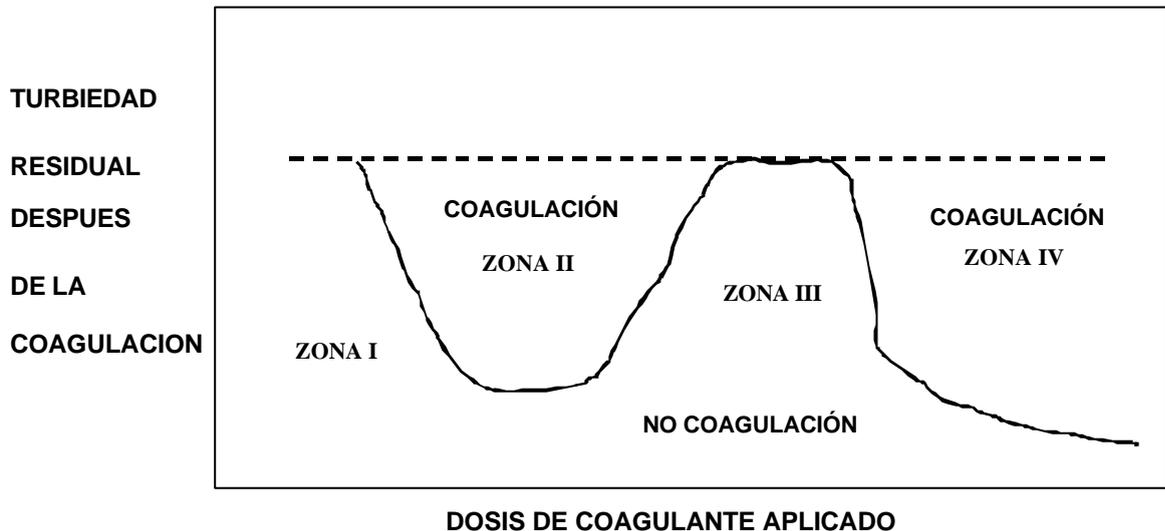


Fig. 16 Diagrama de Remoción de Turbiedad

En los gráficos 17 y 18, se observa, las 4 zonas para los coagulantes de Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico.

4. FLOCULACIÓN.

4.1. Objetivo de la Floculación

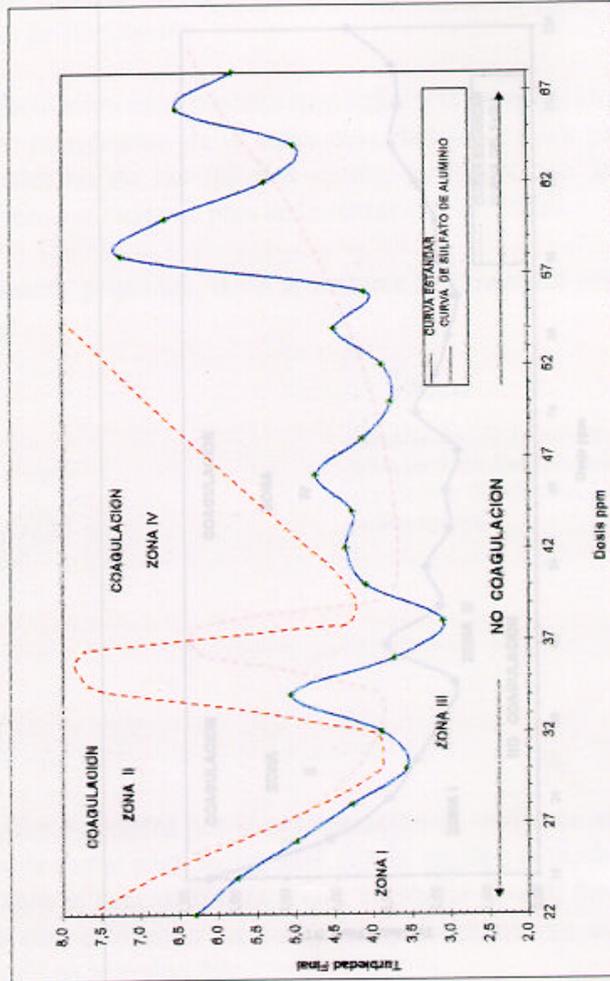
En la segunda etapa de la mezcla que corresponde a una mezcla lenta tiene por objeto permitir los contactos entre los flóculos, la turbiedad y el color, la mezcla debe ser lo suficiente para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad pero no muy grande, ya que los flóculos corren el riesgo de romperse; aún si el tiempo es no mas del tiempo óptimo de floculación.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Fig. 17 **DIAGRAMA DE REMOCION DE TURBIEDAD**
COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO



Características Iniciales.

To NTU 117,0
pH und 7,43
Alcal ppm 83,0
T°C 21,2

Jarra	ppm	Tf NTU	pH und
1	22	6,29	7,28
2	24	5,76	7,18
3	26	4,89	7,12
4	28	4,28	7,08
5	30	3,68	7,05
6	32	3,9	6,95
7	34	5,07	6,91
8	36	3,74	6,80
9	38	3,11	6,88
10	40	4,1	6,87
11	42	4,36	6,66
12	44	4,28	6,84
13	46	4,75	6,82
14	48	4,14	6,81
15	50	3,78	6,80
16	52	3,89	6,77
17	54	4,51	6,76
18	56	4,12	6,74
19	58	7,25	6,72
20	60	6,68	6,71
21	62	5,4	6,69
22	64	5,02	6,67
23	66	6,53	6,66
24	68	5,81	6,65

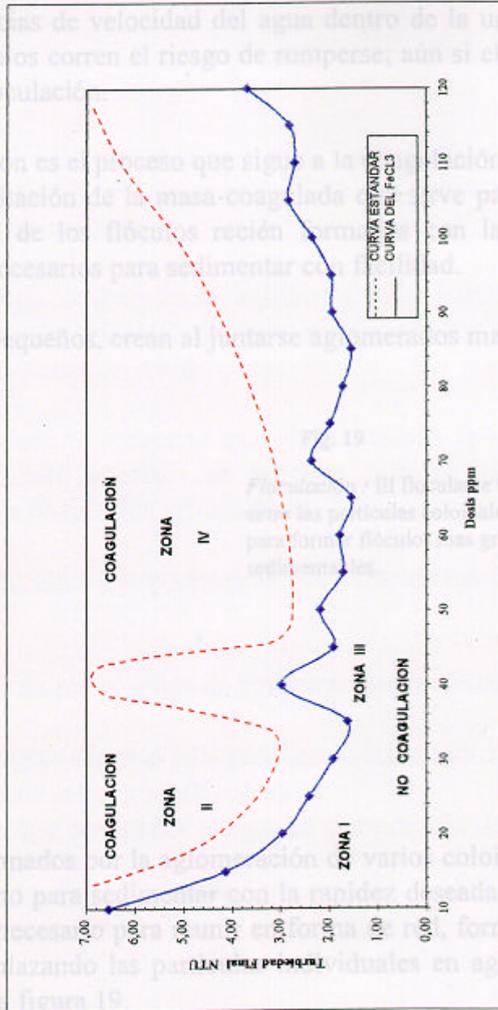
En este caso el incremento de las dosis produce la resuspensión continua del floculo cuando la dosis está por encima de la dosis optima, el area de coagulación es menor.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Fig. 18 **DIAGRAMA DE REMOCION DE TURBIEDAD**
COAGULANTE CLORURO FERRICO



El Incremento de la Dosis de Cloruro Férrico, produce una resuspensión parcial de los floculos formados, pero se observa una disminución del pH.

Características Iniciales.

To NTU 111,0
pH und 7,39
Alcal ppm 87,0
T°C 23,6

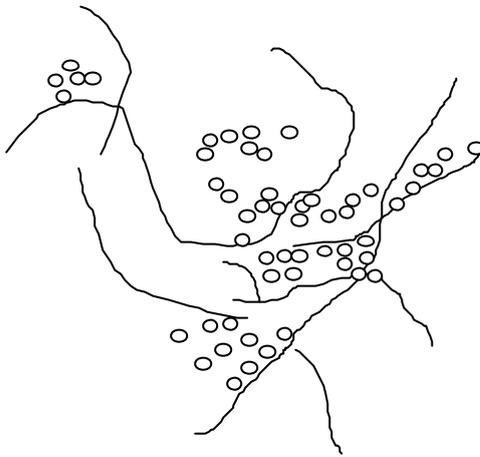
Jarra	ppm	Ti NTU	pH und
1	10	6,54	7,25
2	15	4,14	7,10
3	20	2,97	7,08
4	25	2,42	6,9
5	30	1,93	6,78
6	35	1,63	6,65
7	40	2,99	6,60
8	45	1,92	6,52
9	50	2,2	6,48
10	55	1,72	6,42
11	60	1,79	6,38
12	65	1,55	6,34
13	70	2,37	6,31
14	75	1,99	6,28
15	80	1,73	6,23
16	85	1,55	6,17
17	90	1,95	6,13
18	95	1,97	6,05
19	100	2,36	6,02
20	105	2,86	5,97
21	110	2,72	5,88
22	115	2,84	5,83
23	120	3,7	5,8

4.2. Definición

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad.

Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar.

Fig. 19



Floculación : El floculante tiende un puente entre las partículas coloidales aglomeradas para formar flóculos mas grandes fácilmente sedimentables.

Sucedan que los flóculos formados por la aglomeración de varios coloides no sean lo que suficientemente grande como para sedimentar con rapidez deseada, por lo que el empleo de un floculante es necesario para reunir en forma de red, formando puentes de una superficie a otra enlazando las partículas individuales en aglomerados, tal como se está mostrando en la Figura 19.

La floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también aumenta su peso.

La floculación puede ser mejorado por la adición de un reactivo de floculación o ayudante de floculación.

4.3. Tipos de Floculación.

Hay 2 tipos de floculación:

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

4.3.1. Floculación Pericinética

Esta producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.

4.3.2. Floculación Ortocinética

Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microfloculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego se produce la floculación ortocinética.

4.4. Parámetros de la Floculación

Los parámetros que se caracterizan la floculación son los siguientes:

- Floculación Ortocinética (Se da por el grado de agitación proporcionada: Mecánica o Hidráulica).
- Gradiente de Velocidad (energía necesaria para producir la mezcla).
- Número de colisiones (choque entre microfloculos).
- Tiempo de retención (tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación).
- Densidad y tamaño de floc.
- Volumen de lodos (los floculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación).

4.5. Floculantes

Los floculantes son polímeros o polielectrolitos con pesos moleculares muy elevados moléculas orgánicas solubles en agua formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en cadenas larga.

Estos floculantes pueden ser de naturaleza : mineral, orgánico natural y orgánico de síntesis.

a) Floculantes Minerales.- Se encuentra la sílice activada, que es el primer floculante empleado, que debe ser preparado antes de emplear, su preparación es tan delicada y presenta el riesgo de la gelatinización; produce la neutralización parcial de la alcalinidad de silicato de sodio en solución. (caso Atarjea en los años 70 – 80, se utilizó en el tratamiento de agua).

b) Floculantes Orgánicos Naturales.- Son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Los alginatos, cuya estructura polimérica son:

- Los ácidos manuránicos y.
- Los ácidos glucónico.

c) **Floculantes Orgánicos de Síntesis.**- Son los más utilizados y son macromoléculas de una gran cadena, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de 106 a 107 gr./mol, estos se clasifican de acuerdo a la ionicidad de los polímeros:

- Aniónicos (generalmente copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico).
- Neutros o no ionicos (poliacrilamidas).
- Catiónicos (copolímero de acrilamidas + un monómero catiónico).

Planta de Agua La Atarjea.

Desde los años 80 se vienen utilizando polímeros:

- **Aniónico**, en la etapa de pretatamiento para la reducción de la alta turbiedad presente durante los meses de verano. La dosis que se emplea fluctúa entre 0.3 a 0.8 p.p.m, siendo la cantidad máxima a emplear igual a 1.0 p.p.m.
- **Catiónico**, utilizado como floculante en las unidades de Decantador de Manto de Lodos en dosis de 0.15 a 0.25 p.p.m., esta dosificación se realiza con la finalidad de mejorar la separación de los flóculos.

V. APLICACIÓN PRACTICA DE LOS COAGULANTES Y FLOCULANTES

5.1 . Requisitos Principales

La aplicación de los coagulantes desde el punto de vista práctico en la operación de una Planta de Tratamiento, requieren de :

- Verificación del caudal de tratamiento.
- La dosificación de los productos químicos.
- El manejo de los Equipos / Aparatos de medida y los medios de medición.

5.1.1 Verificación del Caudal de Tratamiento.

Se deben considerar 2 aspectos fundamentales :

- Calibración del Equipo de Medición (caudalímetro; correntómetros; etc.)
- Ajuste de las Curvas de Calibración para el Punto de Medición y verificación de las curvas de medición para cada condición de flujo.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

5.1.2 Dosificación de Productos Químicos.

a) Estados de Presentación Productos Químicos

- a.1. *Productos Químicos Sólidos.*- Deben ser utilizados después de haber sido puestos en solución y pueden ser aplicados de las siguiente manera:
 - En Continuo: la dosis es calibrado por medio de un dosificador en seco del tipo volumétrico, la disolución se debe realizar dentro de un tanque de nivel constante provisto de un agitador (aplicación de Sulfato de Aluminio Granular; Sulfato de Cobre y Cal, en la Planta de La Atarjea).
 - Por lotes o Batch: el operador prepara puntualmente una solución o una suspensión de cierta cantidad de producto y luego realiza la dosificación (aplicación de Polielectrolito catiónico en la Planta de la Atarjea).
- a.2. *Productos Líquidos :* son utilizados puros o diluidos por medio de equipos de bombeo o por sistemas de gravedad (aplicación de Sulfato de Aluminio Solución y Cloruro Férrico, en la Planta de La Atarjea).

b) Aplicación de Productos Químicos

La aplicación de productos químicos en la planta requiere de las siguientes precauciones fundamentales:

- b.1. Concentración de las soluciones, se deben tener en cuenta los límites de solubilidad y la naturaleza del agua de dilución. No realizar diluciones sin control, ya que se produce la hidrólisis antes de la aplicación además de presentar dificultad en la determinación del consumo real de los productos químicos.
- b.2. La dispersión, se debe realizar por un sistema de dispersión a fin de evitar la formación de los aglomerados que son difíciles de disolverse.
- b.3. Agitación necesaria, para conseguir la mezcla completa de los productos químicos, en el caso de los polielectrolitos es recomendable agitar 30 minutos ~~nas~~ después de haber sido preparado, requerido para el desarrollo completo de la cadena polimerica.

c) Medida de la Concentración de una Solución o Suspensión.

La utilización de un densímetro y la curva correspondiente entre la densidad y la concentración de la solución considerada, permite conocer la concentración real en el momento de la medición; en cada recepción del Sulfato de Aluminio Solución se mide la densidad de la solución (Planta La Atarjea).

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

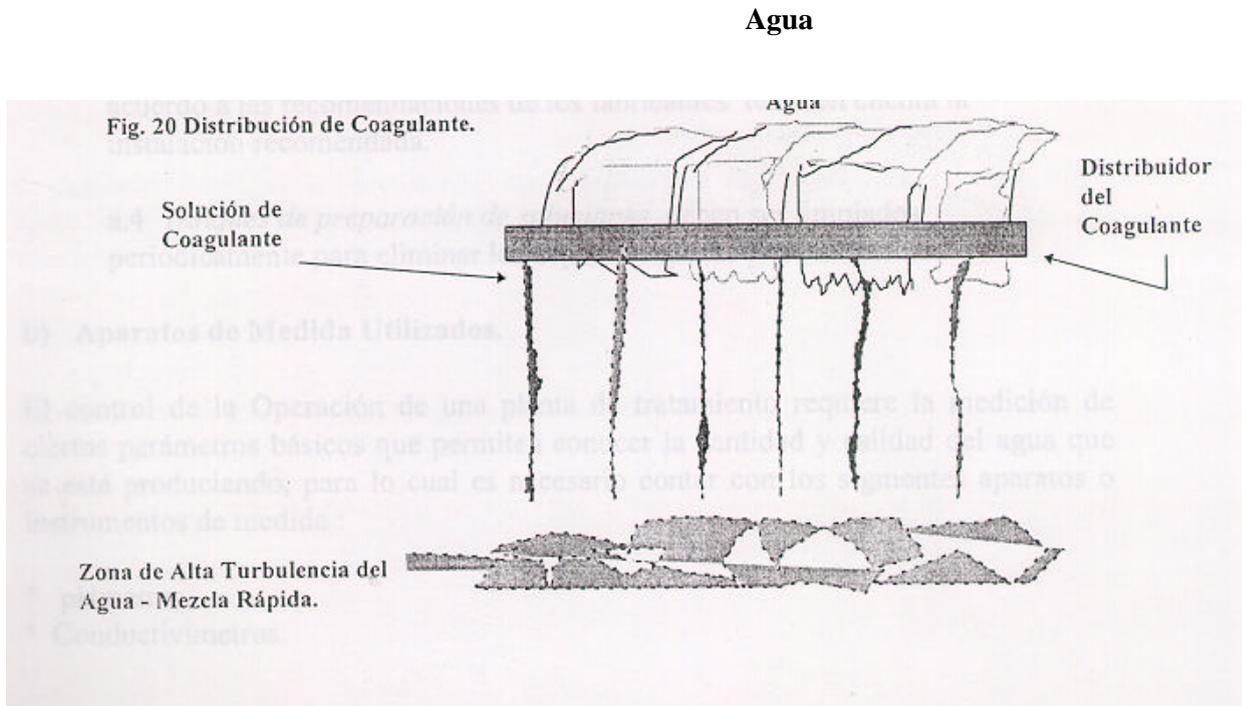
TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

d) Medida de Caudal Inyectado

- d.1. Si la aplicación del coagulante es por gravedad, la variación de la altura en el tanque de almacenamiento así como las pruebas de aforamiento permiten conocer rápidamente el caudal del producto químico aplicado.
- d.2 Si la aplicación es realizada por medio del sistema de bombeo, se debe verificar las curvas de calibración de las bombas, establecer dentro de las condiciones de concentración, viscosidad, presión para los cuales se pueden utilizar y deben ser verificados por las pruebas de aforamiento. Los siguientes dispositivos permiten realizar mejor el control de la dosificación :
 - Un rotámetro, es utilizado para medir el volumen de agua de dilución.
 - Un cronómetro y un recipiente graduado, son utilizados para las pruebas de aforamiento. La medida puede ser hecha sea en la descarga inmediata de la bomba o en el punto de aplicación.

e) Distribución del Coagulante en La Unidad de Mezcla Rápida.

La distribución de la solución debe ser uniforme en la mesa de agua, al mismo tiempo debe recibir igual cantidad del coagulante . (Fig. 20.)



SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

5.1.3 Manejo de Equipos de Medida y Medios de Medición.

Equipos de Medida.- Involucra a todos los medios de medición, patrones, materiales de referencia, aparatos auxiliares que son necesarios para realizar una medición.

Medio de Medición.- Dispositivo destinado a realizar una medición, solo o en conjunto con otros dispositivos complementarios.

a) Equipos para la Aplicación de los Productos Químicos

Para el buen funcionamiento de los equipos de distribución; la aplicación continua y conservación adecuada de los productos químicos, entre otros; condicionan el buen funcionamiento de la planta ; su cuidado es una parte importante del trabajo del operador y de los responsables de la producción de agua; para lo cual se deben prestar atención a los siguientes puntos:

- a.1. *Stock de productos Químicos*, La cantidad de los productos químicos disponibles deben ser, el mínimo requerido para la Operación continua de la planta, teniendo en cuenta: Importancia del producto; Procedencia : Nacional o Importación : Tiempo de Adquisición y Costos.
- a.2. *Todos los productos Químicos*, deben ser almacenados en ambientes que tengan temperaturas requeridas para el producto considerando : naturaleza del producto sólido o líquido, vida útil, etc.
- a.3. *Bombas dosificadoras*, se debe tener en cuenta las consignas de mantenimiento preventivo y de la limpieza periódica de las bombas, de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes tener en cuenta la instalación recomendadas.
- a.4. *Tanques de preparación de soluciones*, deben ser limpiados periódicamente para eliminar los depósitos que se pueden formar.

b) Aparatos de Medida Utilizados.

El control de la Operación de una planta de tratamiento requiere la medición de ciertos parámetros básicos que permiten conocer la cantidad y calidad del agua que se está produciendo, para lo cual es necesario contar con los siguientes aparatos o instrumentos de medida:

- ° pHmetros.
- ° Conductívimetros.
- ° Turbidímetros.
- ° Analizadores de Oxidantes residual (ejemplo cloro residual).
- ° Colorímetros.
- ° Caudalímetros.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

La validez de la medida hechos por estos instrumentos están en función de los siguientes factores:

- Condiciones de Instalación.
- Calibración y Verificación.
- Modo de Operación seguido para la medida.
- Estados de Mantenimiento requeridos.

5.2 . Ensayos de “Pruebas de Jarra”

Las pruebas mas representativas para determinar el comportamiento de los coagulantes y floculantes a escala pequeña es el Ensayo de “**Prueba de Jarra**”.

5.2.1. Definición

Es un método de simulación de los procesos de Coagulación y floculación, realizado a nivel de laboratorio que permite obtener agua de buena calidad, fácilmente separable por decantación; los flóculos formados con diferentes dosis del coagulante dan como resultado valores de turbiedad deferentes.

5.2.2 Objetivo

Determinar las variables físicas y químicas de los procesos de coagulación; floculación y sedimentación ; tales como : selección del coagulante; selección del pH óptimo; gradientes y tiempos de mezcla rápida y floculación y correlación de las velocidades de sedimentación y la eficiencia de remoción.

5.2.3. Materiales y Equipos Necesarios

- Agitador Múltiple o Floculador, equipo provisto de 6 agitadores planos; tiene como elementos adicionales vasos de 2 litros de capacidad, de forma cuadrada con una tubería de 4 mm de diámetro, para la extracción de muestra.
- Un turbidímetro.
- Un pHmetro.
- Materiales necesarios para medir la alcalinidad.

5.2.4. Preparación de Solución de Coagulantes y Polielectrolitos para los Ensayos de Pruebas de Jarra.

El método que se describe a continuación es el que se utiliza en las Pruebas de Jarra que a diario realiza el:

Grupo de Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico; del Equipo de Operación y Mantenimiento de Plantas de la Gerencia de Producción de SEDAPAL.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

a) Sulfato de Aluminio Solución al 10% (solución madre)

Se obtiene a partir de la muestra de Sulfato de Aluminio que se encuentra almacenado en los tanques; para la preparación se tiene en cuenta la densidad del Sulfato de Aluminio que es = 1.32 gr./c.c. . Se toma 76 ml. de la muestra de Sulfato de aluminio y se coloca en una fiola de 1,000 ml. Y se procede a enrasar con agua Filtrada. Esta solución tiene una duración de 15 días; después del cual se desecha y se prepara otra nueva solución con el mismo procedimiento.

Esta solución debe ser conservado en un recipiente de color oscuro y debe tener una etiqueta en el que se indiquen: la concentración; fecha de preparación y fecha de vencimiento.

b) Sulfato de Aluminio Solución al 1%

Esta solución se obtendrá tomando una alicuota de 10 ml. de la solución Madre de sulfato de aluminio solución al 10 %, se coloca en una fiola de 100ml. luego se enrasa con agua filtrada, se agita y se deja reposar unos 5 minutos antes de utilizarla. Esta solución se prepara diariamente, la que es utilizada en las pruebas de jarra; la solución residual se desecha.

c) Sulfato de Aluminio Granular al 10 % (solución madre)

Se obtiene a partir de una muestra de Sulfato de Aluminio Granular que se encuentra en los almacenes de las Plantas; se pesa 10gr. De muestra de Sulfato de Aluminio granular, en una balanza analítica debidamente calibrada.

Se coloca en un recipiente y se procede a disolver con agua filtrada agitando vigorosamente; se coloca en una fiola de 100ml. y se enrasa con agua Filtrada. Esta solución tiene una duración de 15 días después del cuál es desechado.

d) Sulfato de Aluminio Granular al 1%

La Solución se obtendrá tomando una alicuota de 10ml. de la Solución Madre de Sulfato de Aluminio Granular al 10% y se coloca en una fiola de 100ml. luego se enrasa con agua filtrada, se agita y se deja reposar unos 5 minutos antes de utilizarla. Esta solución se preparará diariamente luego se desecha.

e) Cloruro Férrico 10 % (solución madre)

Se obtiene a partir de la muestra de Cloruro Férrico que se deposita en los tanques de almacenamiento de las plantas. Para la preparación se tendrá en cuenta la densidad del Cloruro Férrico que es =1.43 gr./cc.

Se toma 70ml. de la muestra de Cloruro Férrico y se coloca en una fiola de 1,000. Y se procede a enrasar con agua Filtrada. Esta Solución tendrá una duración de 15 días a los cuales se desecha y se prepara otra con el mismo procedimiento.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

f) Cloruro Férrico 1%

La solución se obtendrá tomando una alícuota de 10 ml. de la Solución Madre de Cloruro Férrico al 10%; se coloca en una fiola de 100ml., luego se enrasa con agua filtrada, se agita y se deja reposar unos 5 minutos antes de utilizarla. Esta solución se prepara diariamente, que luego de ser utilizada se desecha.

g) Solución de Polímero Catiónico al 0.1%

La muestra se obtiene a partir de la muestra de Polímero Catiónico que se extrae de los cilindros almacenados en las Plantas. Se pesa en la Balanza Analítica 0.5 gr. De la muestra de Polímero y se coloca en un vaso con agua y se va agitando hasta obtener una solución uniforme; luego vaciar en la fiola de 500ml. y enrasar con agua Filtrada. De esta solución se toman los volúmenes a utilizar en las pruebas de jarras; el tiempo de conservación es no más de una semana.

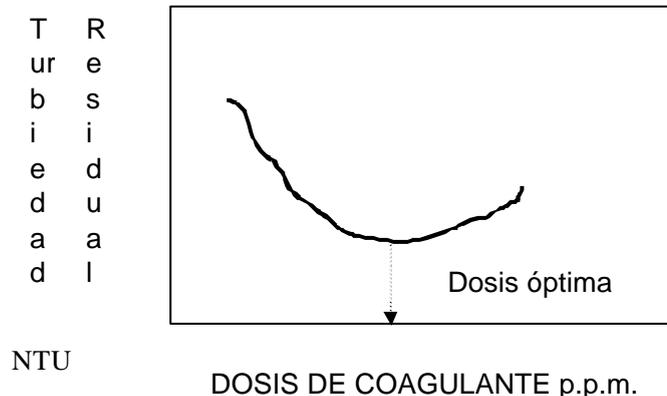
h) Solución de Polímero Aniónico al 0.1 %

Se pesa en la Balanza Analítica 1gr. De la muestra de Polímero (extraída del punto de almacenamiento) y se coloca en un vaso con agua, se procede a disolver con agua filtrada utilizando un equipo de agitación magnética (en caso de no contar con este equipo se puede realizar manualmente) hasta que la solución se encuentre homogénea y luego se coloca en la fiola de 1000 ml., luego enrasa con agua filtrada. Esta Solución es la que se utiliza en los ensayos y tiene un tiempo de duración no mayor de 1 semana.

5.2.5. Obtención de Resultados

Por lo general este ensayo se realiza para la determinación de la dosis óptima de los coagulantes y floculantes; donde los resultados de turbiedad obtenidos en las diferentes jarras para dosis variables de coagulantes son graficados; colocando los valores de turbiedad en el eje "Y" y la dosis en el eje "X".

La dosis óptima se obtiene en el punto de inflexión, que es el punto mas bajo de la curva, tal como podemos observar en la siguiente Figura 21.



SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

5.2.6. Desarrollo de las Pruebas de Jarras

Las pruebas de jarra se realizan siguiente el procedimiento descrito en los Instructivos : GP-I-103; GP-I-105 y GP-I-106; que pueden ser empleados de acuerdo a la prueba que se desea realizar. Se encuentra en el anexo.

Estos instructivos son parte de la documentación del Sistema de Calidad del Proceso de Tratamiento de Agua de la Planta de La Atarjea ISO 9002. Se adjuntan en el anexo tanto el procedimiento, formatos y gráficos correspondientes.

5.2.7. Aplicación de la Dosis Óptima en la Planta

Con la dosis óptima obtenida en las pruebas de Jarra, se determina la cantidad del coagulante a aplicar en kg./hora.

Ejemplo de Aplicación Para el Cloruro Férrico.

Datos.

- Dosis de Coagulantes : 14 p.p.m. (o 14 gr./m³) de Cloruro Férrico.
- Densidad: 1.42 Kg./l.
- Caudal de Tratamiento: 8.5 m³/seg.

Cálculo.

- Cantidad requerida: Kg./hr. De Cloruro Férrico a ser utilizado en la Planta.

$$14 \text{ gr./m}^3 * 8.5 \text{ m}^3/\text{seg.} * 3600 \text{ seg./1000 gr.} = 428.4 \text{ Kg./Hr.}$$

- Aforo de la Solución de Cloruro Férrico: 1/Hr.

$$\text{Densidad} = \text{Masa} / \text{Volumen.}$$

Reemplazando los valores de densidad y masa (cantidad requerida); se obtiene el volumen de cloruro férrico a dosificador por cada hora.

$$\text{Entonces : } V_{\text{FeCl}_3} = \frac{428.4 \text{ Kg./Hr.}}{1.42 \text{ Kg. /l.}} = 301.69 \text{ litros/hora}$$

$$\text{Por lo tanto: } \begin{array}{l} 301.69 \text{ litros} \quad \text{-----} \quad 3600 \text{ seg.} \\ 1 \text{ litro} \quad \quad \quad \text{-----} \quad X \text{ seg.} \end{array}$$

Aforo = 1 litro de Cloruro Férrico / 11.93
--

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Con el aforo hallado se consigue aplicar la dosis de 14 p.p.m. , de Cloruro Férrico, para el caudal de tratamiento de 8.5 m³/seg.

SEDAPAL

Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

VI. BIBLIOGRAFIA

- Lyonnaise des Eaux – Dumez, **“Tratamiento de Agua”**, 1985.
- F. Edeline. **“Tratamiento Físicoquímico del Agua”**, 1990.
- Raymond Desjardins **“Tratamiento del Agua”**, 1992.
- Copias y Experiencias del Expositor en la Planta de Tratamiento de Agua de Lima de SEDAPAL, desde 1982 a la fecha.