

# TEMA

## COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

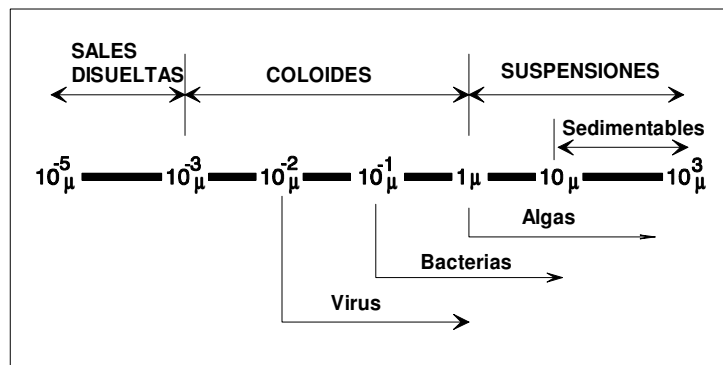
- 1.- TIPOS DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN EL AGUA
- 2.- COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN
- 3.- REACTIVOS QUÍMICOS
  - 3.1.- Coagulantes
  - 3.2.- Floculantes
  - 3.3.- Coadyuvantes
- 4.- INSTALACIONES
- 5.- MANEJO DE REACTIVOS
  - 5.1.- Almacenamiento
  - 5.2.- preparación y dosificación
  - 5.3.- Uso de reactivos

### 1.- TIPOS DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN EL AGUA

El contenido de sólidos totales de un agua, natural o residual, es uno de los parámetros físicos más importantes. Los sólidos totales están compuestos por materias flotantes, materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución.

Los sólidos totales, o residuo seco, se pueden clasificar en sólidos suspendidos y filtrables. La fracción filtrable se compone de sólidos coloidales y disueltos.

La fracción coloidal consiste en partículas con un diámetro que oscila de  $10^{-3}$  a  $1 \mu\text{m}$  (figura siguiente). Los sólidos disueltos se componen de moléculas orgánicas, inorgánicas e iones que se encuentran presentes en disolución verdadera en el agua.



*Clasificación e intervalo de tamaños de partículas presentes en el agua*

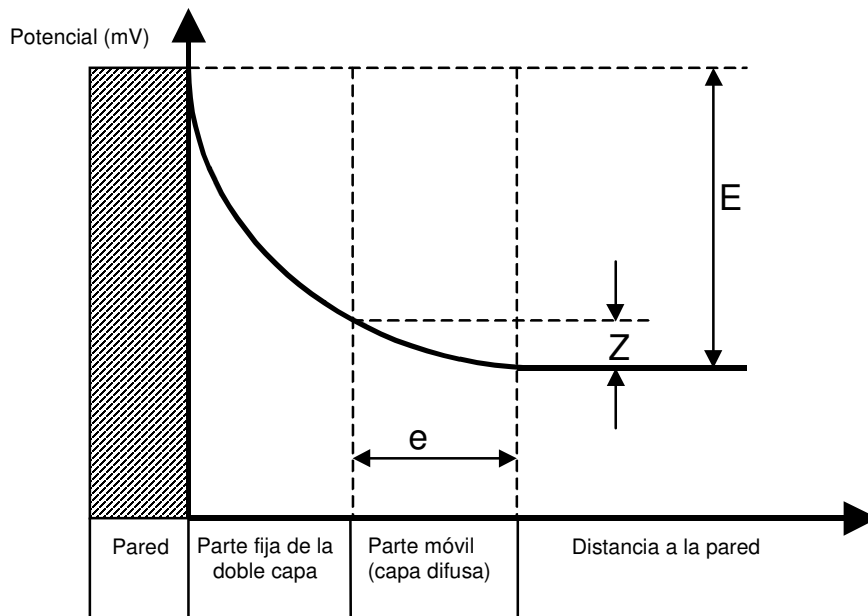
A los sólidos con tamaños mayores que 0.200 mm se les suele denominar arenas. Los limos, arcillas, bacterias, etc., quedan retenidos al filtrar el agua, su tamaño es superior a  $0.1 \mu\text{m}$ . Las hipótesis realizadas en el capítulo anterior sobre decantación libre sólo eran válidas para tamaños mayores de  $200 \mu\text{m}$ . No se puede aplicar la ley de Stokes a tamaños menores. En la sedimentación de pequeñas partículas intervienen otros factores.

La fracción coloidal no puede eliminarse por sedimentación. La turbidez y el color suelen estar asociados a partículas coloidales. En estos tamaños de partículas las

propiedades superficiales y las cargas eléctricas tienen efectos más importantes que el peso relativo de la partícula en el agua.

Las partículas coloidales presentan cargas superficiales electrostáticas que hace que existan fuerzas de repulsión entre ellas y les impida aglomerarse para sedimentar. Estas cargas son, en general, negativas. Un coloide puede estar en suspensión casi un tiempo infinito.

Se considera a las partículas coloidales como ionizadas parcialmente en su superficie, y que se desplazan bajo la acción de un campo eléctrico. Por los efectos electrocinéticos se afirma que hay una doble capa iónica en la interfaz coloide-líquido, con la siguiente estructura ideal:



Se supone que una parte de la doble capa se adhiere a la pared, mientras que la otra se mueve bajo la acción del campo eléctrico, existiendo una diferencia de potencial (Zeta), de tipo electrocinético, entre la superficie que separa la interfaz fija/móvil y el seno del líquido. Existe también un potencial termodinámico, E, igual a la diferencia de potencial entre la pared y el seno del líquido. Z depende a la vez de E y del espesor de la doble capa. Su valor determina la magnitud de las fuerzas electrostáticas de repulsión entre las partículas, y, por tanto, su probabilidad de adhesión. Para medir el potencial Z se utiliza un aparato llamado Zetámetro. También se puede calcular mediante:

$$Z = \frac{k \nu v}{D}$$

donde:

- $\nu$  : movilidad de la partícula (microsegundos/voltio/cm)
- $\mu$  : viscosidad dinámica (poises)
- $D$  : constante dieléctrica del medio
- $Z$  : se expresa en mV

El factor **k** es función de los valores relativos del diámetro de la partícula y del espesor de la doble capa iónica.

	<b>k</b>
Partícula relativamente gruesa	4
Pequeña partícula aprox. esférica	6

Para eliminar los coloides del seno del agua es necesario llevar a cabo una agregación de las partículas en partículas más grandes, y fácilmente decantables. Normalmente es necesario introducir en el agua un producto capaz de:

- neutralizar la carga de los coloides (anular su potencial Z);
- formar agregados de partículas.

El proceso que consigue los anteriores objetivos es el denominado de **COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN**.

## **2.- COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN**

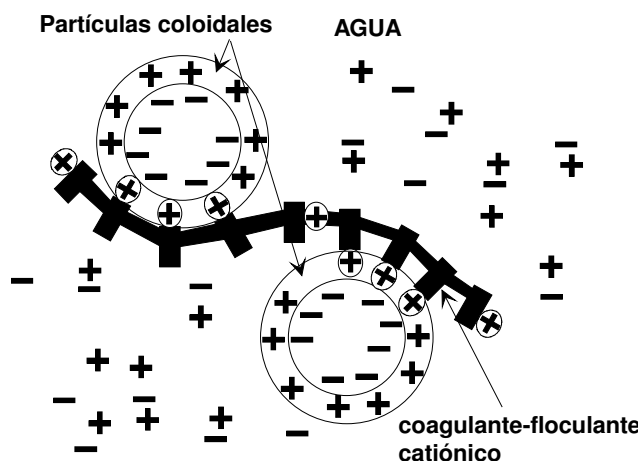
Por **COAGULACIÓN** se entiende el proceso de desestabilización de los coloides. Se eliminan las propiedades que les hacían mantenerse en suspensión. El mecanismo básico de desestabilización es anular las cargas eléctricas. Para ello, se utilizan reactivos químicos que tienen la propiedad de producir la coagulación.

El tiempo que el reactivo requiere para producir la coagulación es menor que 1 segundo. Es muy importante que el reactivo se mezcle rápidamente con toda el agua, pero conseguir una buena mezcla puede llevar de 30 segundos a 3 minutos. Para alcanzar altos rendimientos, en la mezcla se suelen emplear técnicas en las que se aplica mucha energía y "violencia".

Una vez desestabilizadas las partículas interesa que éstas sedimenten. Su tamaño aún no es el óptimo para que lo hagan en períodos cortos de tiempo. Deben aumentar de tamaño. Esto se logra mediante el proceso de floculación.

Con la **FLOCULACIÓN** se consigue agregar las partículas coloidales desestabilizadas (aunque no es necesario que fuesen ex-coloides). La agregación se ve facilitada si las partículas se ponen en contacto y si hay algo que cree enlaces entre ellas y mantenga ese contacto. Lo primero se consigue mediante la mezcla y lo segundo mediante la adición de floculantes. El proceso de formación de enlaces y agregados es lento, se llegan a adoptar tiempos que van desde 10 a 30 minutos.

Hay que mezclar bien el floculante con el agua, pero si se mezcla con demasiada energía se pueden romper los flóculos ya formados. El proceso de mezcla y floculación debe ser lento.



*Esquema del funcionamiento de los reactivos de coagulación y floculación*

Para la eliminación de sólidos disueltos se emplea el proceso de PRECIPITACIÓN. Mediante la adición de reactivos se busca formar sales insolubles a partir de las sales disueltas. No es lo mismo que la sedimentación o la decantación después de la floculación.

### 3.- REACTIVOS QUÍMICOS

La desestabilización de un coloide se provoca mediante la adición de un electrolito de carga opuesta a la de las partículas coloidales y el efecto aumenta marcadamente con el número de cargas que lleva el electrolito. Cuanto mayor es la valencia mejor actúa el coagulante.

Las partículas formadas durante el proceso de coagulación pueden ser todavía de pequeño tamaño o baja densidad y decantar con dificultad. El tamaño de las partículas se puede aumentar con la adición de productos químicos que posean moléculas de alto peso molecular y solubles en agua que, por disociación electrolítica en el agua, den formas iónicas múltiples, capaces de actuar de puentes de unión entre las partículas coaguladas.

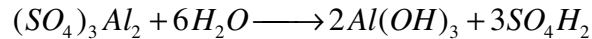
#### 3.1.- COAGULANTES

Son coagulantes habituales:

- **Sulfato de aluminio hidratado:**  $(\text{SO}_4)_3\text{Al}_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ; en el mercado se encuentra en forma granular o líquida.
- **Cloruro férrico:**  $\text{FeCl}_3$ , usado en aguas residuales, pero menos en aguas potables porque da color. Se suele encontrar de forma líquida en concentraciones al 37% - 47%
- **Sulfato ferroso y férrico hidratado:**  $\text{SO}_4\text{Fe} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $(\text{SO}_4)\text{Fe}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; se suministran en forma sólida.
- **Polímeros:** en coagulación se usan poco individualmente. Su uso está muy extendido en la floculación.

- **Polihidroxiclорuro de aluminio:** son compuestos sintéticos nuevos más complejos; sin una fórmula única definida.  $Cl_{3n-m}(OH)_mAl_n$ .

Cuando al agua se añade  $Al^{+3}$  o  $Fe^{+3}$ , una pequeña parte de estos iones trivalentes se dirigen a neutralizar las cargas negativas de los coloides. Mientras, la mayor parte reacciona con agua formando hidróxido insoluble. Por ejemplo, en el caso del sulfato de aluminio:



Por un mecanismo independiente los hidróxidos metálicos insolubles agregan coloides neutralizados y facilitan su posterior floculación y decantación.

### 3.2.- FLOCULANTES

Entre los diferentes tipos de floculantes se pueden citar:

- **Polímeros:** En la UE se recurre a almidones modificados (por ejemplo: de patata) y alginatos, para la floculación de sólidos en suspensión y coloides desestabilizados. Los almidones tienen un gran peso molecular, forman cadenas largas y pueden tener carga eléctrica (iónicos) o ser no iónicos. Los polielectrolitos pueden ser aniónicos (-) o catiónicos (+). Los alginatos de sodio se utilizan especialmente como ayudantes de floculación de las sales férricas, aunque a veces, también dan buenos resultados con sales de aluminio. Se obtienen a partir del ácido alginico, el cual, a su vez, se extrae de algas marinas (en especial, del género *Laminaria*). Hasta hace poco tiempo (año 2009) se podía utilizar, en muy bajas dosis, polímeros de síntesis industrial (principalmente, poliacrilamidas y poliaminas). Actualmente, están prohibidas esas sustancias en el tratamiento de agua potable (Orden SAS/1915/2009) debido a su toxicidad.
- **Sílice activada:** La sílice activada está constituida por una solución de ácido polisilícico  $(H_2SiO_3)_4$  obtenida de procesar ácido silícico. Es poco estable, por lo que se debe preparar "in situ". Hasta el reciente desarrollo de los polielectrolitos se le consideraba el mejor floculador en asociación con las sales de aluminio. Se sigue utilizando con frecuencia en potables. Se suele utilizar en diluciones del 0.5 % al 1 %.

### 3.3.- COADYUVANTES

Tienen la función de mejorar la actuación de los coagulantes y floculantes. Los objetivos de los coadyuvantes pueden ser varios:

- Corrección de pH:** Cada coagulante tiene un pH óptimo de trabajo. Por ejemplo, el sulfato de aluminio tiende a acidificar el agua tratada empeorando las condiciones de coagulación, ya que actúa mejor a pH neutro. Para corregir el pH se le añaden bases o sales alcalinas al agua (cal, hidróxido sódico, carbonato sódico, etc.).

**b) Oxidación de compuestos:** Se cree que el proceso de coagulación-floculación mejora si se eliminan por oxidación algunos compuestos orgánicos que pueden interferir en los procesos. Se pueden utilizar como oxidantes el cloro, el permanganato potásico, el ozono, etc.

**c) Dar peso a las partículas:** Se utilizan los llamados agentes gravimétricos. Se utilizan en aguas con baja turbidez inicial. Se busca mejorar las velocidades de sedimentación. Se puede usar carbón activo en polvo, cal, arcillas, polímeros, etc. La adición de productos tales como la bentonita aumentan la densidad de las partículas y el peso global de la suspensión, al tiempo que proporciona una superficie importante para la adsorción de compuestos orgánicos. Algo similar ocurre cuando se añade carbón activo en polvo al tratamiento. La dosis de arcilla puede oscilar entre 10 y 50 mg/L.

La sílice activada y los polímeros se podrían también considerar como coadyuvantes de la coagulación y la floculación.

#### 4.- INSTALACIONES

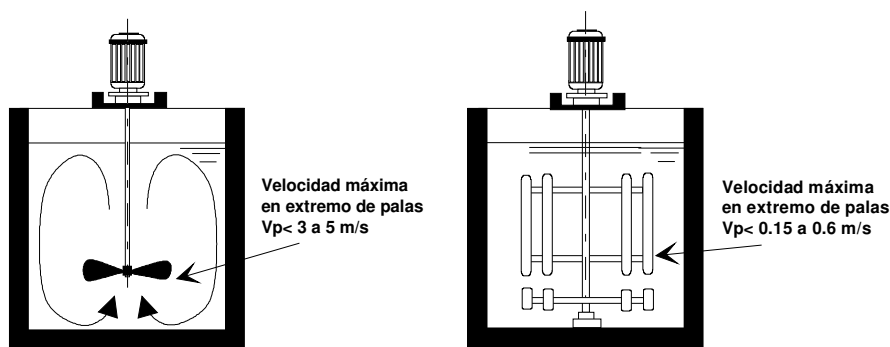
El objetivo de los tanques de coagulación y floculación será mezclar los reactivos con el agua a tratar y favorecer la formación de los flóculos. Hay dos sistemas básicos de mezcla: hidráulicos y mecánicos.

El proceso de coagulación precisaba una mezcla rápida, mientras que la floculación necesita sistemas de mezclado lento.

La mezcla rápida se podría dar en un canal, aprovechando la turbulencia generada en un resalto hidráulico. En tuberías se podría aprovechar la turbulencia generada en el flujo al colocar un estrechamiento o sección de control. En un depósito circular se podría diseñar una entrada tangencial que generase un remolino. Los tres sistemas citados serían hidráulicos de mezcla rápida.

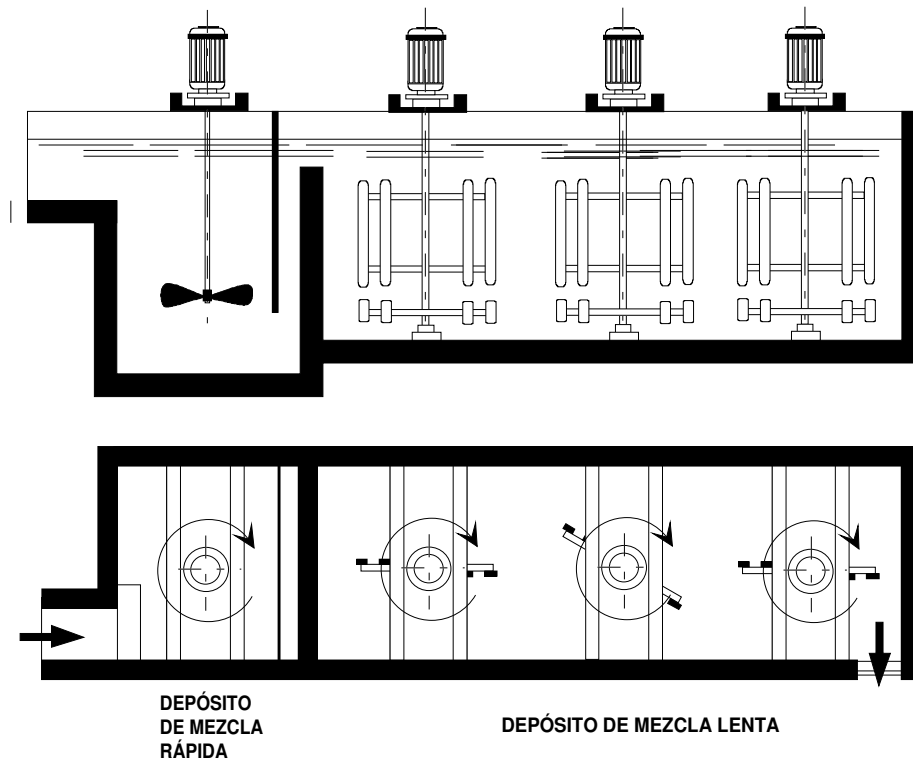
Los sistemas mecánicos consisten en depósitos con un sistema de agitación, normalmente una turbina con eje vertical u horizontal. La energía de mezcla se puede regular mediante las revoluciones del motor y el diseño de la hélice.

La velocidad periférica de la hélice suele oscilar entre 3 y 5 m/s. Se suele utilizar potencias que van desde los 35 a los 70 CV/m<sup>3</sup>/s.



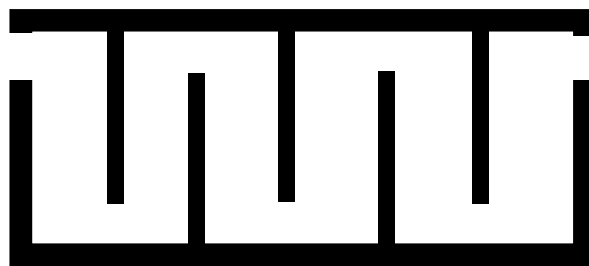
**Depósitos de coagulación y de floculación**

La mezcla lenta se puede realizar también en depósitos con agitadores. En estos casos se suelen utilizar palas en vez de hélices. Se busca una gran superficie de impulsión que gire a poca velocidad. Las velocidades periféricas de las paletas se limitan a velocidades de 0.15 a 0.6 m/s. No se suelen superar los 2 ó 3 CV/m<sup>3</sup>/s. Los tiempos de retención hidráulica van a ser altos respecto a los de coagulación, por lo que los volúmenes de depósito también van a ser mayores. Suelen ser depósitos largos con varios agitadores de eje vertical u horizontal. Al existir varios agitadores se puede regular la energía de mezcla entre el principio y el final. En la última fase del proceso de floculación la energía a aplicar deberá ser menor, pues se busca mantener en suspensión los flóculos ya formados.



**Esquema de Instalación de mezcla-coagulación-floculación**

Otro sistema de mezcla lenta consiste en la utilización de canales largos o depósitos laberínticos (fig.siguiente).



**Esquema en planta de depósito laberíntico para mezcla lenta**

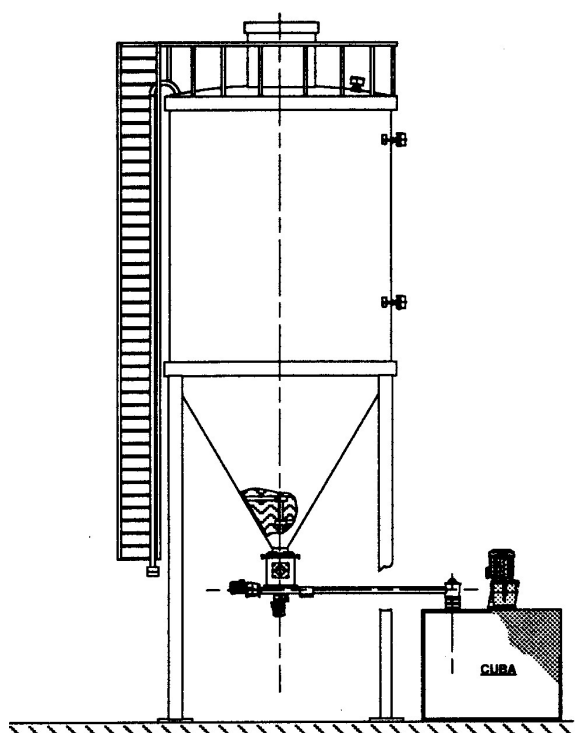
## 5.- MANEJO DE REACTIVOS

Los reactivos se pueden presentar en forma líquida o sólida. Los sólidos, a su vez, pueden presentarse en grano o en polvo. Los reactivos en polvo y los líquidos son los que presentan mayores problemas de manejo. En el manejo de los reactivos hay que diferenciar tres etapas: almacenamiento, preparación y dosificación.

### 5.1.- ALMACENAMIENTO

Las instalaciones de almacenamiento dependen de la forma de presentación del reactivo. La tipología básica consiste en silos, sacos o depósitos.

Los silos son utilizados para el almacenamiento de reactivos en polvo o en grano. Deben disponer de filtros manga y sistemas vibratorios para evitar el "efecto silo", que impide el descenso del material por la tolva.



*Silo con dosificador incorporado (Cortesía de SODIMATE)*



*Salida de silo de cal hacia tanque de preparación de lechada de cal (ETAP-Lugo)*



El uso de sacos para el almacenamiento de productos químicos, es típico en pequeñas instalaciones y para reactivos que se utilizan en dosis bajas (por ejemplo: los floculantes). Se recomienda que no se amontonen en alturas superiores a 1.5 metros. Este dato puede dar una idea de la superficie necesaria de almacén que necesita una determinada instalación.

Los depósitos, generalmente de forma cilíndrica, están fabricados de materiales no corrosivos (plásticos, poliéster, resina y fibra de vidrio, etc.) y pueden disponerse con el eje vertical u horizontal.



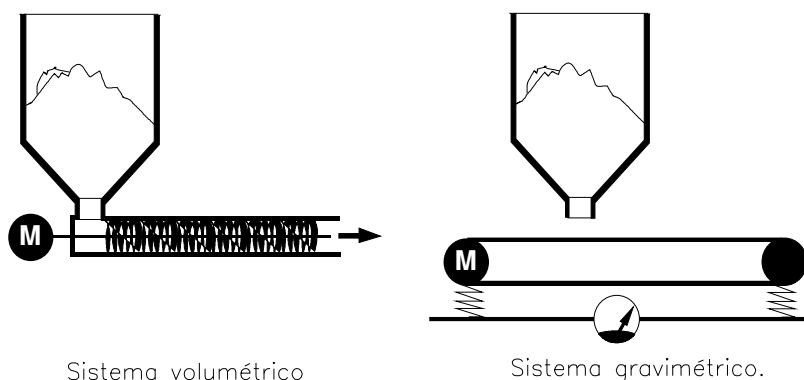
*Polímero a base de almidón de patata y depósito de coagulante (ETAP de Lugo)*

En la planta de tratamiento se debe disponer de una autonomía de uso de reactivos de entre 15 y 20 días considerando las dosis máximas y los caudales máximos.

## 5.2.- PREPARACIÓN Y DOSIFICACIÓN

Algunos reactivos se suministran con demasiada riqueza, o con una forma de presentación inadecuada para realizar una buena dosificación o mezcla. De forma previa a su dosificación final al agua problema, es habitual realizar preparaciones de los reactivos, obteniéndose suspensiones o disoluciones. Esto se hace en depósitos de un tamaño no muy grande, en ciertos casos provistos de agitadores, y desde los cuales se impulsan los reactivos con bombas de dosificación hasta el punto de aplicación (coagulación y/o floculación).

En instalaciones grandes el transporte de productos sólidos a los tanques de preparación se hace mediante cintas transportadoras (sistema gravimétrico) o mediante tornillos (volumétrico), que van acoplados a los silos o tolvas de almacenamiento. Los equipos volumétricos pueden consistir en sistemas de paleta, de disco o tornillos sin fin, en los que la cantidad extraída del silo suele regularse con la velocidad de giro. En el gravimétrico la cinta transportadora va conectada a un sistema de pesada.



### ***Sistemas de transporte de productos químicos en estado sólido (vía seca)***

Con los reactivos líquidos, si se suministran muy concentrados, también se suele realizar una preparación (dilución con agua potable) y se dosifica a partir de esta última.

Los depósitos de preparación se suelen duplicar ya que normalmente trabajan de forma discontinua. El volumen de la solución o suspensión de trabajo debe permitir un funcionamiento mínimo de 24 a 48 horas. Además, debe disponerse de una capacidad de dosificación de, al menos, el doble del consumo máximo. Es normal disponer de una reserva de bombas dosificadoras del 100% si se dispone de un sólo equipo (1+1) y del 50% si se dispone de 2 o más equipos (2+1, 4+2).



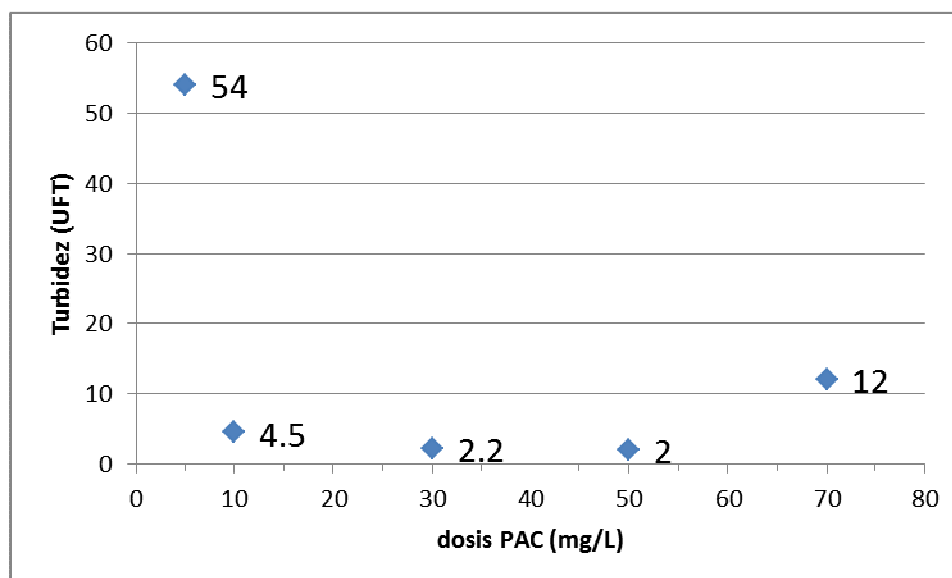
***Tanque de preparación y dosificadoras de reactivos (ETAP - La Telva)***

Las dosis de reactivos se suelen expresar en mg por litro de agua a tratar. Se utiliza una dosis que optimice el tratamiento y reduzca al mínimo los costes.

La dosis óptima, tanto de coagulante como de floculante, se determina mediante ensayos denominados “jar test”, en los cuales se prueba diferentes dosis de reactivos. En general, se emplea la medición de la turbidez residual en el agua tratada del ensayo como parámetro de decisión sobre la dosis óptima a utilizar.



**Ensayo de coagulación-floculación en equipo de “jar-test”**



**Figura.- Ejemplo de resultados gráficos de un jar-test**

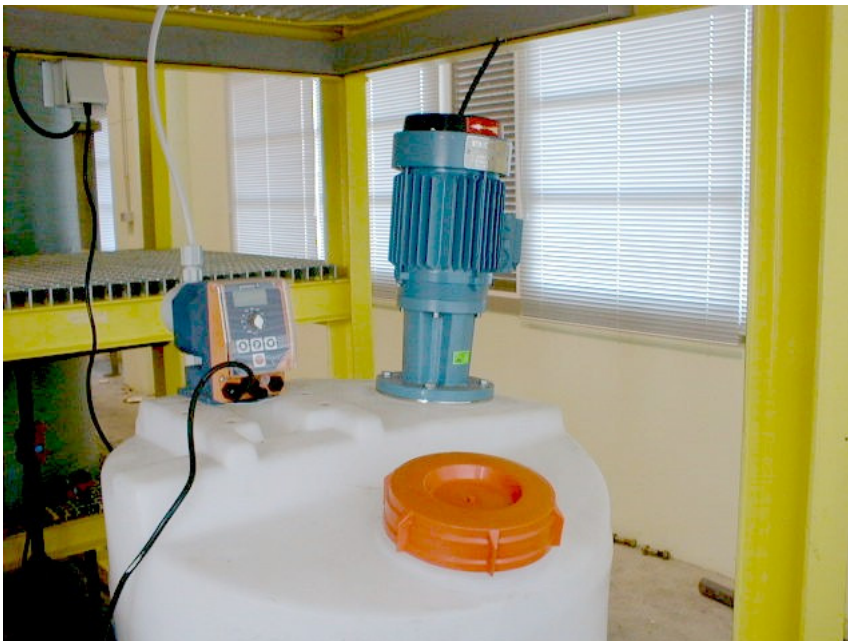
Por otra parte, las bombas de dosificación pueden ser de tipo membrana, pistón, solenoide o peristálticas. Las bombas centrífugas precisan de sistemas complementarios de control de caudal como un rotámetro o un flotador.



***Bombas dosificadoras de membrana***



***Bomba dosificadora peristáltica***



***Bomba de solenoide instalada sobre un tanque de preparación que dispone de agitador***



### 5.3.- Uso de reactivos

En la siguiente tabla se especifican las principales características del uso de reactivos en los procesos de coagulación y floculación.

PRODUCTO	ESTADO	RIQUEZA	SOLUCIÓN TRABAJO	DOSIS	pH óptimo
<b>Sulfato de aluminio</b> $\text{Al}_2\text{SO}_4 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	grano líquido	~100%	~10%	<35-45 mg/L	5.8 a 7.4
<b>Cloruro férrico</b> $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	líquido	37%-47%		<25-35 mg/L	3.5 a 6.5 y > 8.5
<b>Sulfato ferroso</b> $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  <b>Sulfato férrico</b> $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	sólido	90%-94%		<50 mg/L  <25 mg/L	3.5 a 6.5 y > 8.5  3.5 a 7 y > 9.0
<b>Polímeros naturales</b> (almidones modificados, alginatos de sodio)	sólido (en sacos)		< 0.5 %	ND <sup>(1)</sup>	
<b>Cal</b> $\text{Ca}(\text{OH})_2$	polvo 0.5 Kg/L	85%-99%	lechada 10%	corrección pH 0.39 mg/mg alúm. 40 % dosis sulf. $\text{Fe}^{+3}$ 26 % dosis sulf. $\text{Fe}^{+2}$	
<b>Carbón activo</b>	polvo grano	100%	suspensión	<25 mg/L	

<sup>(1)</sup> No disponible.

## EJERCICIOS

- E.1.- ¿A qué tipo de sólidos se les denomina coloides?
- E.2.- ¿En qué consiste el proceso de coagulación?
- E.3.- ¿En qué consiste el proceso de floculación?
- E.4.- ¿Son similares los procesos de coagulación-floculación y los de precipitación?
- E.5.- Cita tres reactivos que se utilicen como coagulantes en tratamiento de aguas.
- E.6.- ¿Qué son los polímeros y por qué se utilizan en tratamiento de aguas?
- E.7.- Citar dos funciones posibles de los reactivos coadyuvantes en tratamiento de aguas.
- E.8.- ¿Por qué se utilizan diferentes velocidades de mezcla en coagulación y floculación?
- E.9.- Cita tres tipos de bombas dosificadoras de reactivos o preparados en forma líquida.
- E.10.- ¿En qué consiste un ensayo de jar-test?
- E.11.- Una planta de tratamiento de agua de 12000 m<sup>3</sup>/d de capacidad, utiliza sulfato de aluminio (alúmina) en dosis de 20 mg/L. Determinar el consumo diario y el volumen necesario de almacenamiento si se desea contar con un mínimo de reserva de 1 mes, teniendo en cuenta que los suministros son quincenales. La densidad de la alúmina es del orden de la del agua.

## BIBLIOGRAFÍA

AWWA; (1975); "Control de calidad y tratamiento de agua"; American Water Works Association; Instituto de Estudios de la Administración Local; Madrid.

AWWA; (1990); "Water Quality and Treatment"; American Water Works Association. McGraw-Hill, 4ª edición.

AWWA -ASCE; (1998); "Water Treatment Plant Design"; American Water Works Association. – American Society of Civil Engineering. McGraw-Hill, 3ª edición.

DEGRÉMONT; (1973); "Manual técnico del agua"; décima edición.

FAIR, G.M.; GEYER, J.C.; OKUN, D.A.; (1971); "Ingeniería sanitaria y de aguas residuales"; 2 vol., Editorial Limusa - Willey; México.

GOMELLA, C.; GUERREE, H.; (1977); "Tratamiento de aguas para abastecimiento público"; Editores Técnicos Asociados; S.A.; Barcelona.

HERNÁNDEZ, A.; (1993); "Abastecimiento y distribución de agua"; Colección Señor (nº 6); Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Madrid; 3ª edición.

METCALF-EDDY; (1985); "Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales"; Editorial Labor; Barcelona.

NALCO CHEMICAL, Co.; (1993); "Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones"; McGraw-Hill; México.

PAZ MAROTO, J.; PAZ CASAÑÉ, J.M.; (1969); "Abastecimiento y depuración de agua potable"; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

ROMERO, J. (1999). "Potabilización del agua". Editado por Alfaomega y Escuela Colombiana de Ingeniería. 3ª edición.

RIGOLA LAPEÑA, M.; (1989); " Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales"; Colección Productiva; Editorial Marcombo; Barcelona (España); 158 págs.

STEEL, E.W.; McGHEE, T.; (1981); "Abastecimiento de agua y alcantarillado"; Editorial Gustavo Gili, S. A.; Barcelona (España); 636 págs.

TEBBUTT; T.H.Y.; (1990); "Fundamentos de control de la calidad del agua"; Editorial Limusa; México; 240 págs.

WEBER, W.J.; (1979); "Control de la calidad del agua. Procesos físico químicos"; Editorial Reverté; Barcelona (España), 654 págs.