

TEMA 6. APLICACIONES DE LOS EQUILIBRIOS ACIDO-BASE Y COMPLEJACIÓN

6.1 COAGULACIÓN FLOCULACIÓN	2
6.1.1 CARGA ELÉCTRICA Y DOBLE CAPA.....	3
6.1.2 FACTORES DE ESTABILIDAD E INESTABILIDAD.....	4
6.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
6.2.1 PROCESO DE DESESTABILIZACIÓN DEL COLOIDE	6
6.2.2 PROCESO DE FORMACIÓN DE FLÓCULOS.....	7
6.3 MECANISMOS DE DESESTABILIZACIÓN DEL COLOIDE EN LA COAGULACIÓN.....	9
6.3.1 COMPRESIÓN DE LA DOBLE CAPA	10
6.3.2 ABSORCIÓN Y NEUTRALIZACIÓN DE CARGAS	11
6.3.3 ATRAPAMIENTO DE PARTÍCULAS DENTRO DE UN PRECIPITADO	12
6.3.4 ADSORCIÓN Y PUENTE	13
6.4 COAGULANTES UTILIZADOS	14
6.5 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN.....	20
6.6 TIPOS DE COAGULACIÓN	25

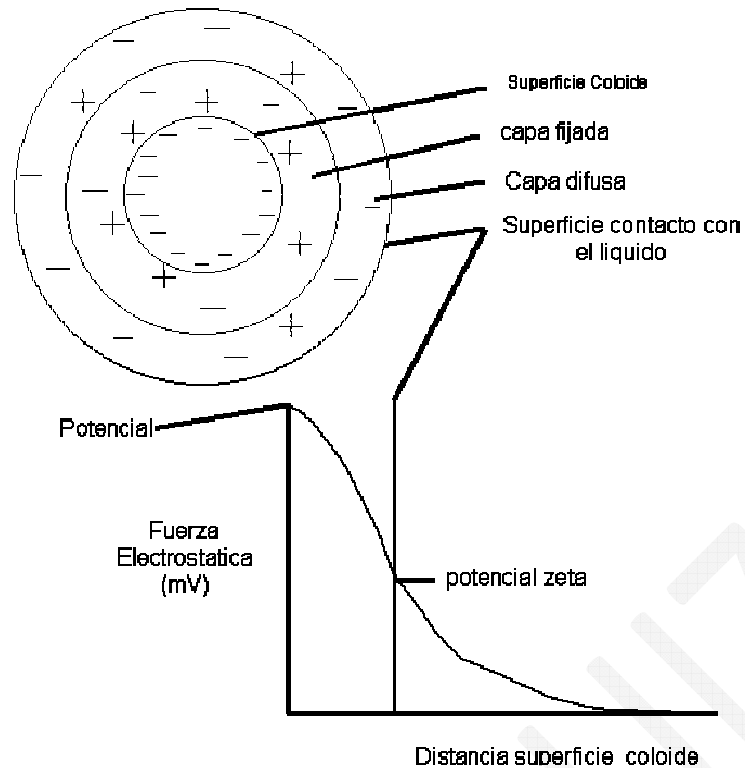
6.1 COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

- En el agua hay material fino que no sedimenta fácilmente, de tamaño entre $1\mu\text{m}$ y $0,2\mu\text{m}$, se denominan **partículas coloidales**
- **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

OBJETIVO COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

“Eliminar del agua las partículas coloidales, que son las causantes de la turbiedad y del color”

6.1.1 CARGA ELÉCTRICA Y DOBLE CAPA



- **Capa adherida o comprimida:**

iones se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella

- **Capa difusa:** iones que se adhieren débilmente

→ *gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta ($E_r = E_a + E_b$)*

→ *Interés coagulación* → *el punto isoeléctrico (potencial Z cero)*

6.1.2 FACTORES DE ESTABILIDAD E INESTABILIDAD.

Fuerzas a las que están sometidas las partículas coloidales:

- **Fuerzas de atracción de Van der Waals** : E_a (factores de Inestabilidad); 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.

El equilibrio de una suspensión coloidal dependen de la fuerza resultante entre la fuerza de atracción (E_a) y la fuerza de repulsión (E_b) : E_r

$$E_r = E_a + E_b$$

6.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- a) Desestabilización del coloide.**
- b) Formación de flóculos.**
- c) Sedimentación de los flóculos y separación de los mismos del agua.**

6.2.1 PROCESO DE DESESTABILIZACIÓN DEL COLOIDE

“Anulación de la carga electrostática negativa de los coloides”

- Adición de reactivos con carga positiva: sales de aluminio o hierro (con iones Al^{3+} y Fe^{3+}) y formación de microfloculos con carga positiva (desestabilización del coloide)

Derivados del aluminio (sulfato de aluminio, alumbre de amonio, aluminato de sodio, polímeros de aluminio o PACs)

Derivados de hierro (sulfato férrico, sulfato ferroso, y cloruro férrico)

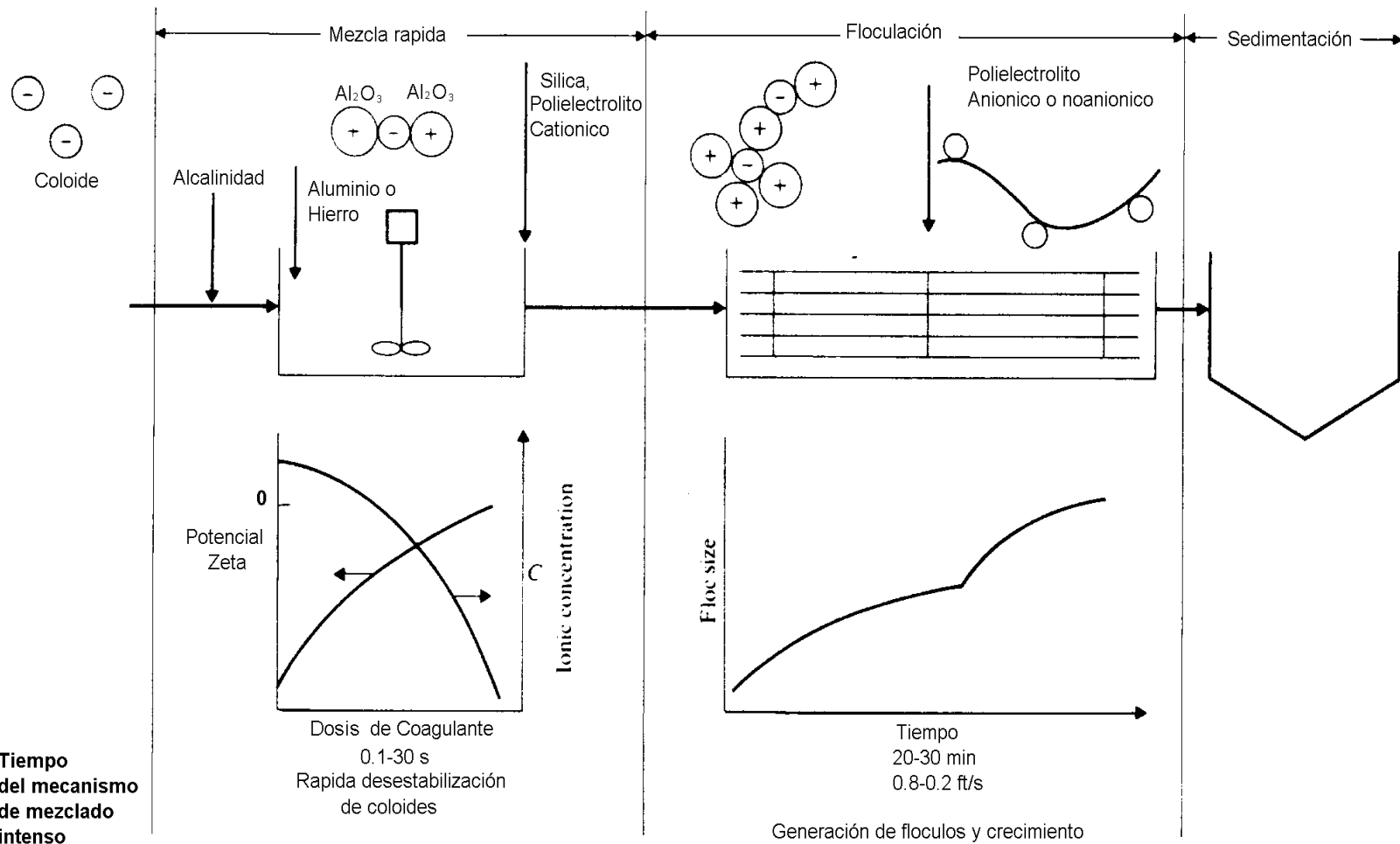
Cal.

- Efectuar una mezcla rápida de 1 a 3 minutos

6.2.2 PROCESO DE FORMACIÓN DE FLÓCULOS

“Captación mecánica que origina un considerable aumento en tamaño y densidad de las partículas ya coaguladas” → Formación de puentes moleculares”

- **Añadir los ayudantes para formar el flóculo y controlar el potencial Zeta**
Floculantes inorgánicos (sílica, arcillas, carbón activo)
Floculantes orgánicos (polielectrolitos aniónicos y catiónicos)
- **Efectuar una mezcla lenta de 20 a 30 minutos.**



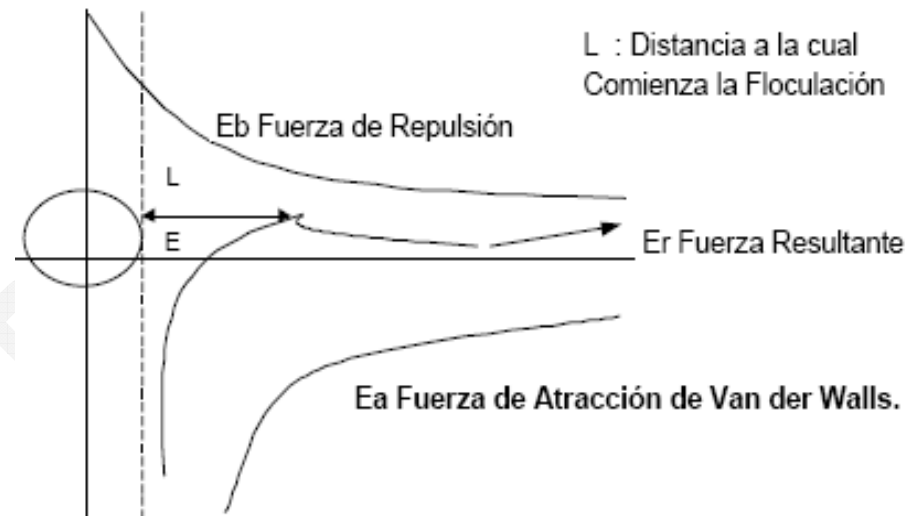
Secuencia ideal para coagulación-floculación.

6.3 MECANISMOS DE DESESTABILIZACION DEL COLOIDE EN LA COAGULACIÓN

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

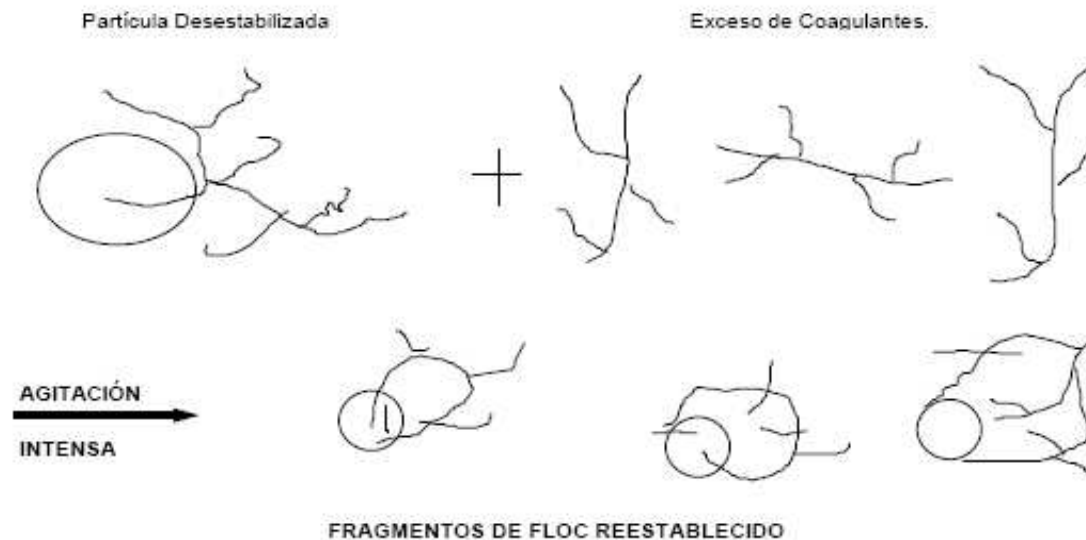
6.3.1 COMPRESIÓN DE LA DOBLE CAPA

- Un aumento de la concentración de electrolito, incorpora iones de signo contrario a la capa difusa, comprimiéndola, disminuyendo las fuerzas repulsivas y con ello el potencial zeta
- **La coagulación comienza** cuando 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.



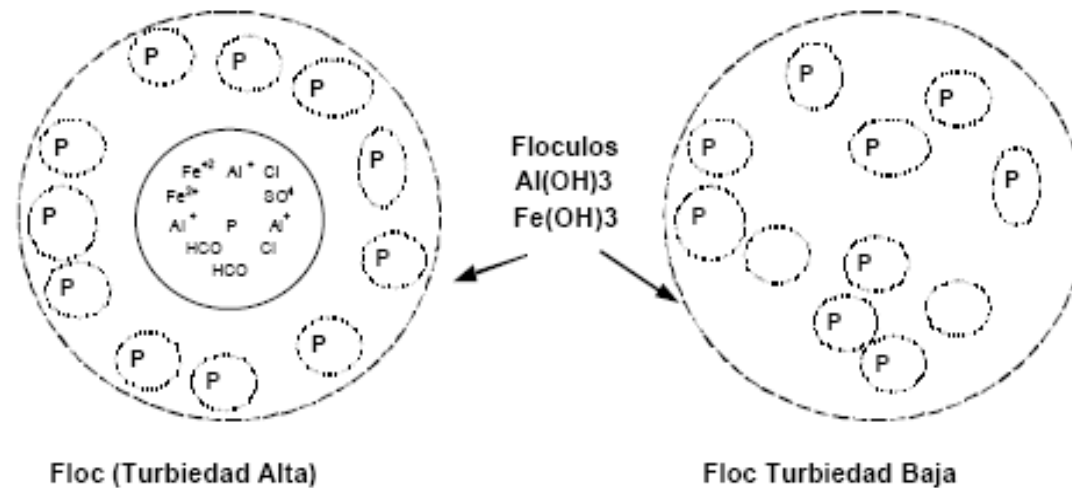
6.3.2 ABSORCIÓN Y NEUTRALIZACIÓN DE CARGAS

- Las partículas coloidales (-) atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera **capa adherida** al coloide.
- **Neutralización** de la carga del coloide con especies de carga + del coagulante
- **Reestabilización** de la carga de la partícula; con el exceso de coagulante, por formación de una carga invertida a la carga original.



6.3.3 ATRAPAMIENTO DE PARTÍCULAS DENTRO DE UN PRECIPITADO

- Formación de un floc ($\text{Al}(\text{OH})_3$ o de $\text{Fe}(\text{OH})_3$), cuando se adiciona una cantidad suficiente de coagulantes, que desestabiliza las partículas coloidales por ser atrapadas en el floc.



6.3.4 ADSORCIÓN Y PUENTE

- Especies negativas de coagulantes de Al y Fe (hidroxocomplejos) pueden desestabilizar el coloide mediante **adsorción** y formación “puente”.
- Con **moléculas del polímero** muy largas se forman el “**puente**” entre las partículas coloidales.
- Posibilidad de una **restabilización de la suspensión**, por una excesiva carga de polímeros.

6.4 COAGULANTES UTILIZADOS

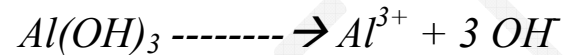
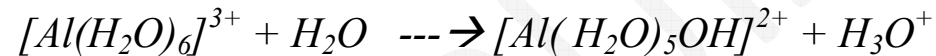
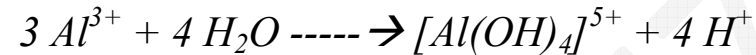
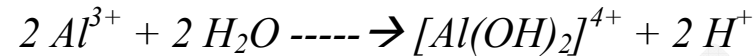
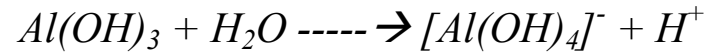
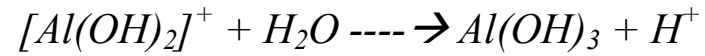
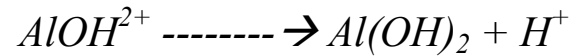
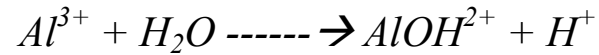
- a) Sulfato de Aluminio.
- b) Aluminato de Sodio.
- c) Cloruro de Aluminio.
- d) Cloruro Férrico.
- e) Sulfato Férrico.
- f) Sulfato Ferroso.
- g) Polielectrolitos (Como ayudantes de floculación).

Los más utilizados son sales de Aluminio y de Hierro:

- **reacciones son muy complejas** → productos de hidrólisis son mas eficaces que los iones mismos
- las sales reaccionan con la alcalinidad del agua
- producen los hidróxidos de Al y Fe que son insolubles y forman los precipitados.

SALES DE ALUMINIO

Reacciones de hidrólisis:



También pueden producirse moléculas neutras $[Al(H_2O)_3(OH)_3]$, o cargadas negativamente $[Al(H_2O)_2(OH)_4]^-$, e incluso sufrir una polimerización $[Al_8(OH)_{20}]^{4+}$.

SALES DE ALUMINIO

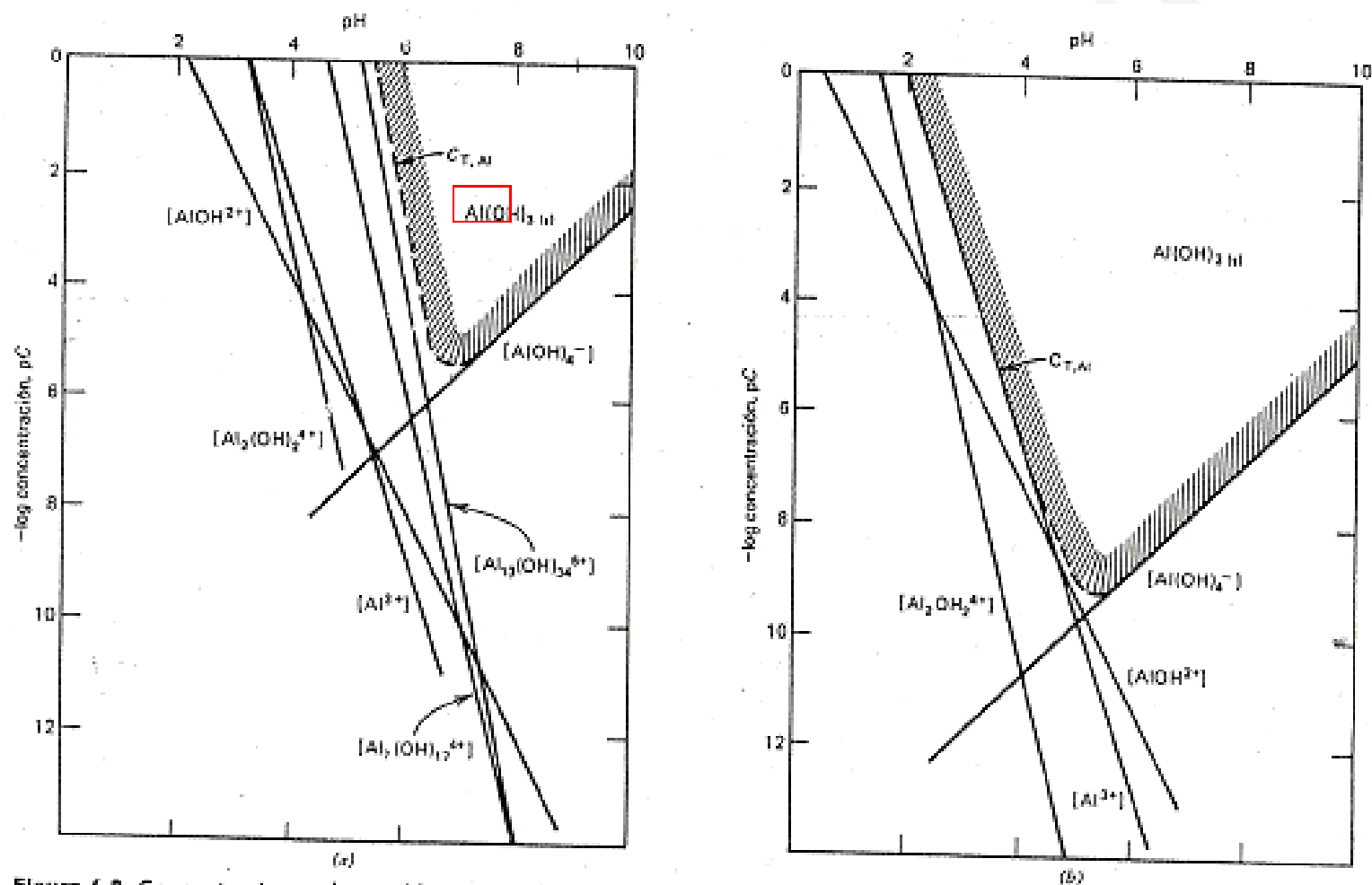


Figura 6-8. Concentraciones de equilibrio de los complejos hidroxaluminio(III) en una solución en contacto con $\text{Al}(\text{OH})_3$ a 25°C. (a) $\text{Al}(\text{OH})_3$ recién precipitado; (b) $\text{Al}(\text{OH})_3$ añejado, gibbsite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

SALES DE ALUMINIO

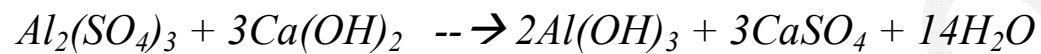
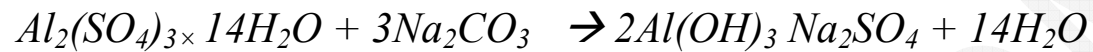
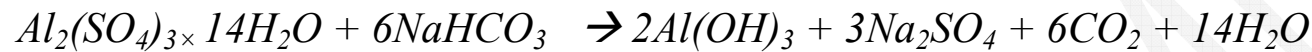
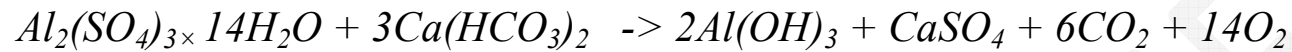
$[Al_{13}(OH)_{34}]^{5+}$, $[Al_7(OH)_{17}]^{4+}$ → controlan la solubilidad para $pH < 6.5$

$[Al(OH)_4]$ → controlan la solubilidad para $pH > 6.5$

$pH = 6.5$ → punto isoeléctrico

- hidroxocomplejos con carga + → desestabilización por neutralización de carga
- hidroxocomplejos con carga - → desestabilización por adsorción – puente
- precipitación de $Al(OH)_3$ → Floculo de arrastre (barrido)

REACCIONES DE SULFATO DE ALUMINIO CON LA ALCALINIDAD DEL AGUA



En términos cuantitativos, 1 mg/L de aluminio reacciona con:

->0.5 mg/L de alcalinidad natural, expresada como $CaCO_3$

->0.33 mg/L de cal viva como CaO

->0.39 mg/L de cal hidratada como $Ca(OH)_2$

->0.54 mg/L de soda ash como $CaCO_3$

→ **NECESIDAD DE CONTROLAR LA ALCALINIDAD DEL AGUA A TRATAR**

→ **ADICCIÓN DE CAL O SOSA PARA MANTENER EL pH ÓPTIMO**

SALES DE HIERRO

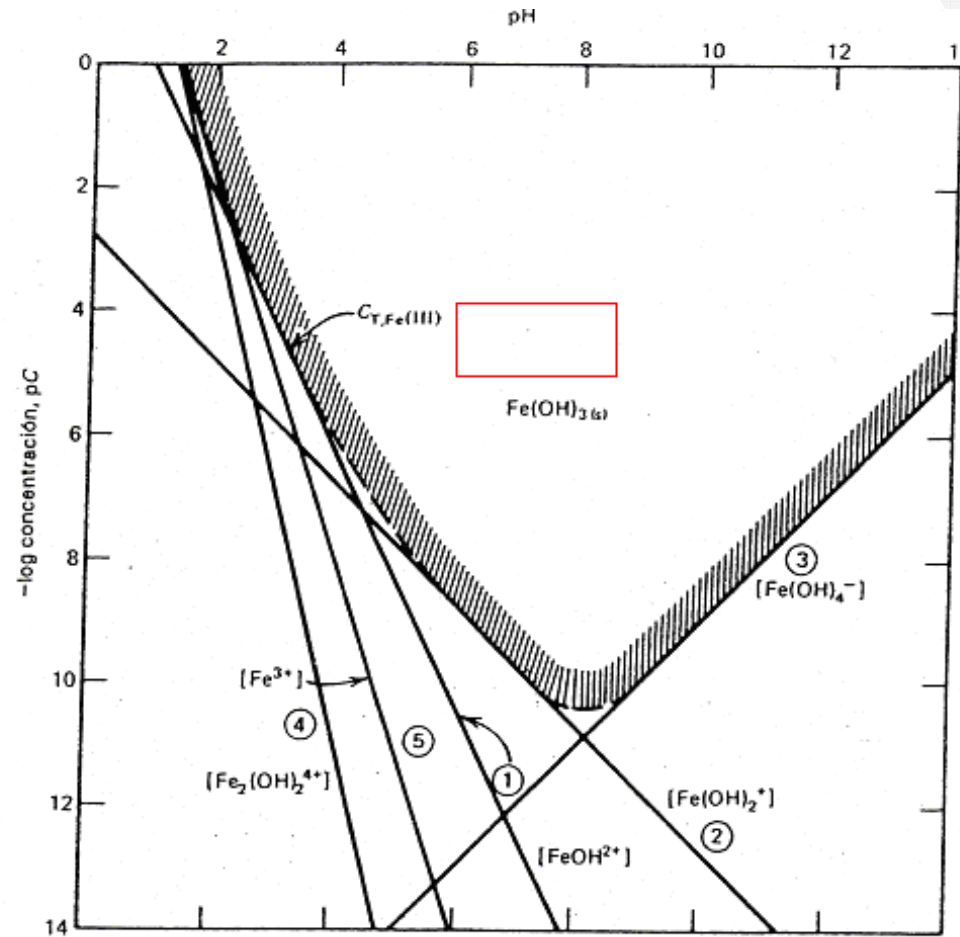


Figura 6-7. Concentraciones de equilibrio de los complejos hidroxio hierro (III) en una solución en contacto con Fe(OH)_{3(s)} recién precipitado a 25°C.

Floculo de arrastre: cloruro Fe (pH = 3-13), sulfato Fe (pH = 4-11)

6.5 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN.

Desestabilización depende entre otros de:

- **pH**
- **Dosis de coagulante**
- **Concentración del coloide (turbidez)**

pH

- es función del tipo de coagulante a ser utilizado y del tipo de agua a tratar
- sales de aluminio **6.5 a 8.0** y para las sales de hierro **5.5 a 8.5** (3-11).

DOSIS DEL COAGULANTE

- 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**
- La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de **pruebas de jarra.**

Por ejemplo : en el siguiente cuadro se observa para Turbiedad inicial de $T_0 = 20$ NTU, los valores de dosis de coagulantes son diferentes para los diferentes valores de pH y alcalinidad.

PH: Unidades	Alcalinidad	Dosis Op. FeCl ₃ Soluc.	Dosis Op. Al ₂ (SO ₄) ₃ Soluc.
7.46	91 p.p.m CaCO ₃	14 p.p.m	26 p.p.m.
7.29	85 p.p.m CaCO ₃	16 p.p.m	30 p.p.m.

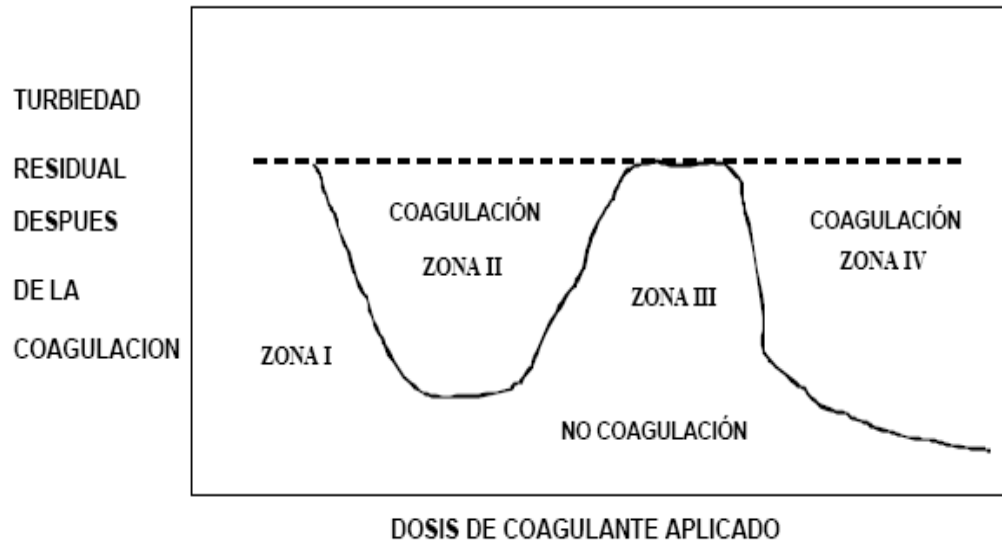
INFLUENCIA DE LA TURBIEDAD (concentración del coloide)

- Si **la turbiedad es alta** → poco coagulante, debido a que la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada.
- Si 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
- 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.

Experimentalmente:

- pH óptimo = 6.5 – 6.9 (6.5-7.5)
- dosis de coagulante 10^{-3} – 10^{-4} M

DOSIFICACIÓN DEL COAGULANTE



Zona 1- Dosis baja de coagulante para la desestabilización → **no se produce coagulación.**

Zona 2.- Incremento de la dosis de coagulantes → rápida **aglutinación de los coloides.**

Zona 3 - Se continua incrementando la dosis → **reestabilización de los coloides.**

Zona 4 .- Al aumentar aún mas la dosis, se da **una supersaturación** y se produce de nuevo una rápida precipitación de los coagulantes que **por efecto de barrido**, arrastran en su descenso las partículas (turbidez)

CLASIFICACIÓN DEL AGUA SEGÚN SU COMPORTAMIENTO EN LA COAGULACIÓN.

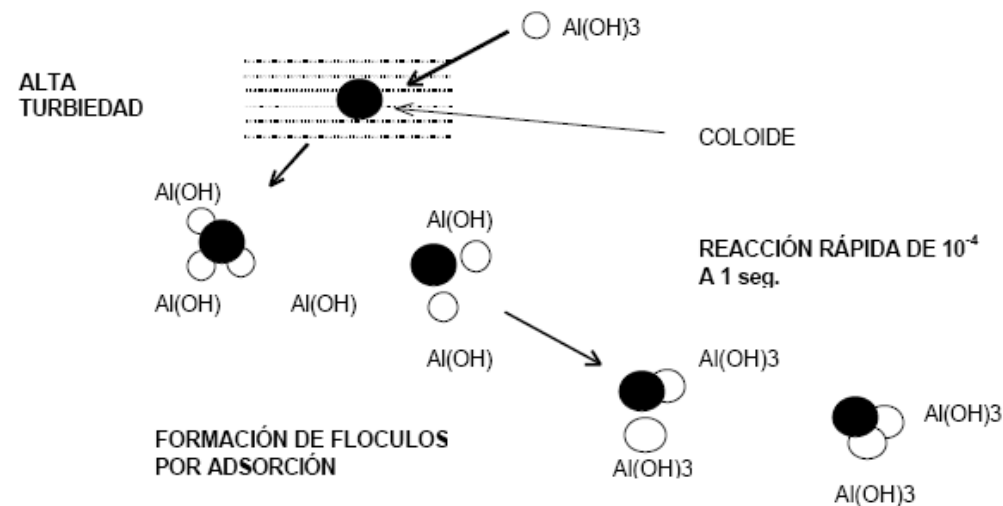
Tipo de agua	Tipo de coagulación	Requerimiento
1. Baja concentración de coloides, baja alcalinidad	Formación de precipitado. Floc de barrido	Alta dosis de coagulantes. Adición de alcalinidad o partículas, ambas
2. Baja concentración de coloides, alta alcalinidad	Formación de precipitado. Floc de barrido	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 precipitación de hidróxidos (pH >7)	Dosis de coagulantes incrementa con concentración de partículas.

6.6 TIPOS DE COAGULACIÓN

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

a) Coagulación por Adsorción.

- agua presenta una **alta concentración** de partículas al estado coloidal
- **adsorción** de los productos solubles de los coagulantes los coloides y forman los floculos en forma casi instantánea.



b) Coagulación por Barrido.

- Agua es clara (presenta baja turbiedad) y hay **pocos coloides**
- Las partículas son **atrapadas por los precipitados** de aluminio o de hierro

