

MANUAL DE LABORATORIO DE OPERACIONES
UNITARIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL

Eduardo Acosta Lara
Profesor de la Sección de
Ingeniería Ambiental, DEPII.
Octubre de 1985.



F
DEPT
10-61
1985
54.3

<u>INDICE DEL CONTENIDO</u>	<u>PAGINA</u>
Introducción	i
Práctica 1. Cinética de reacción	1
Práctica 2. Flujo en reactores	19
Práctica 3. Transferencia de gases	34
Práctica 4. Influencia de mezclado sobre el proce so de floculación	44
Práctica 5. Adsorción	52
Práctica 6. Intercambio iónico	66
Práctica 7. Sedimentación	78
Práctica 8. Flotación	92
Práctica 9. Filtración	100
Práctica 10. Desinfección	114
Bibliografía	125

INDICE DE TABLAS

PAGINA

INTRODUCCION

1.- Interrelación teoría-práctica y resultados esperados.	v
2.- Operaciones unitarias para purificación de agua y tratamiento de agua residual.	vi
3.- Operaciones unitarias para el tratamiento de emisiones contaminantes del aire.	vii
4.- Operaciones unitarias para el tratamiento de desechos sólidos.	vii

PRACTICA 1

1.1.- Ejemplos de modelos matemáticos	10
---------------------------------------	----

PRACTICA 6

6.1.- Capacidad de intercambio de materiales catiónicos.	77
6.2.- Propiedades físicas de intercambiadores de poliestireno.	77

PRACTICA 7

7.1.- Dimensiones típicas de tanques sedimentadores.	89
7.2.- Cargas superficiales y tiempos de retención para algunas suspensiones típicas.	89

PRACTICA 9

9.1.- Aspectos característicos de filtros para tratamiento de agua.	113
---	-----

INDICE DE FIGURAS

PAGINA

INTRODUCCION

1.- Diagrama de flujo de una planta de tratamiento convencional para agua potable.	viii
2.- Diagrama de flujo de una planta convencional de lodos activados.	ix
3.- Algunas operaciones para concentraciones de sólidos y estabilización.	x
4.- Diagrama de flujo de una planta para tratamiento fisicoquímico del efluente secundario.	xi
5.- Diagrama de flujo para tratamiento de contaminantes atmosféricos emitidos por fuentes de humo, polvo y gases.	xii
6.- Diagrama para el tratamiento de basura.	xiii

PRACTICA 1

1.1.- Balance de materia para reactores ideales.	11, 12
1.2.- Dispositivo para flujo continuo con mezcla.	13
1.3.- Dispositivo para flujo pistón en reactor tubular.	14

PRACTICA 2

2.1.- Condiciones de flujo no ideal.	27
2.2.- Distribución del tiempo de retención.	27
2.3.- Curvas F y C	27
2.4.- Relaciones de D/UL y la curva θ vs. C_e	28
2.5.- Patrones de flujo en reactores.	28
2.6.- Curvas bajo flujo disturbado	28
2.7.- Análisis hidráulico del sistema completamente mezclado.	29

2.8.- Análisis hidráulico del corto circuito y zonas estacionarias.	30
2.9.- Flujo completamente mezclado, seguido de flujo pistón.	31, 32
2.10 a- Reactor con mezclado alto	33
2.10 b- Reactor con mezclado medio	33
2.10 c- Reactor con mezclado bajo	33

PRACTICA 3

3.1.- Representación del mecanismo de transferencia de gases.	42
3.2.- Dispositivo experimento 1	43
3.3.- Dispositivo experimento 2	43
3.4.- Dispositivo experimento 3	43

PRACTICA 5

5.1.- Isotermas de adsorción más comunes	62
5.2.- Variación de la concentración del suelo en el tiempo. Adsorción a flujo continuo.	63
5.3.- Curvas de equilibrio y operación en la adsorción a flujo continuo.	64
5.4.- Dispositivo para el experimento de adsorción a flujo continuo.	65

PRACTICA 7

7.1.- Velocidad de sedimentación de partículas discretas.	90
7.2.- Columna para determinar remoción de sólidos suspendidos.	90
7.3.- Remoción de partículas floculentas.	90

7.4.- Altura de la interfase sólido-líquido en la sedimentación por zonas. 91

7.5.- Altura de la interfase respecto al tiempo. 91

PRACTICA 8

8.1.- Procesos de flotación. 98

8.2.- Flotación a presión atmosférica. 99

8.3.- Flotación con aire presurizado. 99

8.4.- Flotación al vacío. 99

PRACTICA 10

10.1.- Curva de cloración a punto de quiebre. 124

10.2.- Distribución de HOCl y OCl^- al pH. 124

INDICE DE ANEXOS

PAGINA

PRACTICA 1

1.1.- Hidrólisis del acetato de etilo.

15

1.2.- Obtención del coeficiente específico
de reacción.

16, 17, 18

INTRODUCCION

Este manual tiene como finalidad el facilitar la realización de prácticas relativas al curso del Laboratorio de Operaciones Unitarias en Ingeniería Ambiental mediante el conocimiento previo de los fines y procedimientos experimentales que se llevarán a efecto.

Las guías de práctica incluyen por lo regular una introducción que trata sobre generalidades teóricas, la definición del objetivo, la descripción del procedimiento experimental, el enunciado de requerimientos de equipo y reactivos, las tablas para asentar resultados y figuras y tablas ilustrativas.

Los experimentos están enfocados a ser demostrativos de propiedades físicas y químicas ó a estudiar la transferencia de movimiento y masa, a obtener coeficientes de ecuaciones que definan comportamientos, o ejemplificar dimensionamiento u operación de equipo relativo a alguna operación unitaria.

La interrelación con los temas de teoría y los resultados esperados para cada práctica se presentan en la tabla 1.

ASPECTOS GENERALES SOBRE OPERACIONES UNITARIAS

Las operaciones unitarias en Ingeniería Ambiental son un conjunto de procedimientos físicos, químicos y biológicos que se aplican para el tratamiento de líquidos, sólidos y gases, y se basan en los fenómenos de transporte de movimiento, masa y calor.

El transporte de movimiento involucra la aplicación de principios que condicionan el movimiento de los fluidos y son base fundamental para determinar requerimientos de energía.

El transporte de masa implica ocurrencia de mecanismos de transferencia de materia sólida, líquida ó gaseosa; siendo usual, por ejemplo, la transferencia de sólidos contenidos en una fase líquida o gaseosa a una fase sólida, o bien la transferencia de gases desde una fase gaseosa a una líquida.

La transferencia de calor se efectúa mediante los procesos de conducción, convección o radiación que involucran cambios en el contenido energético de sólidos, líquidos o gases.

En cuanto a las operaciones unitarias, aplicables para purificar agua y tratar aguas residuales, en la tabla 2 se presenta una relación de las mismas en concordancia con el mecanismo de transferencia predominante. Así mismo, en las tablas 3 y 4 se presentan relaciones de operaciones unitarias que se aplican para tratamiento de emisiones contaminantes del aire y tratamiento de desechos sólidos respectivamente.

Además en las figuras 1,2,3,4,5 y 6 se presentan ejemplos específicos de aplicación de operaciones unitarias en el tratamiento de agua, sólidos y gases.

Así, en la figura 1 se presenta el diagrama de flujo general de una planta de tratamiento para agua potable que incluye tres alternativas de captación que son agua de río, de lago ó bien subterráneas; entre las operaciones unitarias comunes, se observa el mezclado para dispersar uniformemente los reactivos en el seno del líquido; la floculación y precipitación que inducen la formación de agregados de mayor tamaño, derivados de una reacción química; la sedimentación que separa del agua los sólidos de mayor tamaño formados previamente; la filtración que elimina los sólidos de menor tamaño; y, finalmente, la desinfección para asegurar la calidad bacteriológica del agua. Las operaciones previas dependen de la fuente de suministro, así para el agua de río se requiere eliminar sólidos arrastrados por la corriente mediante sedimentación; para el agua de lagos es necesario remover material sólido arrastrado del fondo del lago por medio de cribado; y por último, para el agua subterránea es necesario en ocasiones eliminar gases disueltos, como el bióxido de carbono por medio de aireación.

En la figura 2 se observa el diagrama de una planta convencional de lodos activados que implica operaciones como sedimentación primaria y secundaria, desinfección, oxidación biológica que involucra el metabolismo de materia orgánica soluble por microorganismos y la digestión de lodos que induce su estabilización mediante metabolización de materia orgánica residual en forma aeróbica o anaeróbica.

En la figura 3 se observan operaciones unitarias aplicables para concentrar y estabilizar lodos primarios y secundarios de procesos de lodos activados o floculación química. Así, por ejemplo, se observa que un lodo primario puede sujetarse a flotación primariamente; luego ser llevado a digestión aeróbica o anaeróbica junto con lodos secundarios, previamente concentrados por centrifugación; posteriormente, el producto de la digestión puede ser secado con aire caliente para finalmente sujetarse a incineración.

En la figura 4 se presenta el diagrama de flujo para una planta de tratamiento convencional para tratamiento fisicoquímico de un efluente proveniente de un proceso de lodos activados. En este caso el agua se sujeta a mezclado, floculación y sedimentación; posteriormente, mediante adsorción se le remueven sustancias como detergentes; finalmente se filtra y desinfecta para ser reutilizada; por su parte, los lodos provenientes de sedimentación son espesados e incinerados para recuperar reactivos en caso dado.

En la figura 5 se aprecia el diagrama de flujo para eliminar humos, polvos y gases. Los dos primeros contaminantes, comprendidos genéricamente dentro del término "partículas", pueden removerse por medio de sedimentación que elimina partículas de polvo de tamaño igual o mayor a 40 micras o bien por separación centrífuga, la cual remueve partículas iguales o mayores a 10 micras; después de la separación centrífuga se puede aplicar filtración para remover partículas de hasta 0.1 micras, o bien precipitación electrostática que permite colectar partículas de 0.2 a 0.5 micras, o también el lavado húmedo, que se basa en la transferencia de sólidos contenidos en fase gaseosa a una fase líquida. Respecto a gases como el ácido sulfhídrico, mecaptanos, amoníaco, ácido clorhídrico, éstos se eliminan mediante absorción, adsorción o incineración.

La figura 6 contiene el diagrama de flujo para el tratamiento de basura doméstica y de hospitales. Incluye el cribado para separación de material reciclable y operaciones como composteo, deshidratación, incineración, pirólisis y digestión; ésta última puede ser aeróbica o anaeróbica como sucede en los rellenos sanitarios.

TABLA 1. INTERRELACION TEORIA-PRACTICA Y RESULTADOS ESPERADOS.

TEMA DE TEORIA	SESION PRACTICA	RESULTADOS ESPERADOS
1- Introducción. Procesos y Operaciones Unitarias - Ingeniería de los Reactores.	0- Introducción	Situar el curso de laboratorios. Exponer el desarrollo y criterio de calificación
	1- Cinética de reacción	Determinar la cinética de reacción de la hidrólisis del acetato de etilo, en sistemas intermitente y continuo
	2- Flujo en reactores	Estudiar el flujo no ideal, induciendo diferentes condiciones de mezclado. Detectar cortos circuitos. Analizar flujo pistón.
2- Transferencia de gases	3- Transferencia de oxígeno	Estudiar la transferencia de oxígeno en agua y los factores físicos y químicos que influyen sobre la capacidad de oxigenación
3- Transferencia de iones.	4- Influencia del mezclado	Determinar la influencia del mezclado sobre la efectividad del proceso de floculación, cuando se tienen diferentes gradientes hidráulicos y velocidades de mezclado.
	5- Adsorción	Estudiar la adsorción de solutos en diferentes adsorbentes, bajo condiciones intermitentes y continuas.
	6- Intercambio iónico	Determinar la capacidad de intercambio de una resina y el coeficiente de transferencia de masa global, bajo condiciones de flujo continuo.
4- Transferencia de sólidos	7- Sedimentación	Estudiar la sedimentación de partículas discretas y floculentas.
	8- Flotación	Ilustrar y estudiar la flotación de sólidos suspendidos con aire, utilizando los tres tipos de flotación.
	9- Filtración	Estudiar estratigrafía de lechos filtrantes y la hidráulica de la filtración y lavado.
5- Procesos Preventivos	10- Desinfección	Determinar la efectividad del proceso de desinfección con cloro en la eliminación de bacterias coliformes, comparar el poder germicida del cloro con el de otros desinfectantes.

TABLA 2 OPERACIONES UNITARIAS PARA PURIFICACION
DE AGUA Y TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

- 1.- Transferencia de movimiento
 - . Mezclado
 - . Floculación
- 2.- Transferencia de sólidos
 - . Cribado
 - . Sedimentación
 - . Flotación
 - . Filtración
- 3.- Transferencia de gases
 - . Aireación
 - . Absorción
- 4.- Transferencia de iones
 - . Coagulación química
 - . Precipitación química
 - . Intercambio iónico
 - . Adsorción
- 5.- Transferencia molecular y de nutrientes
 - . Contacto interfásial
 - . Oxidación biológica
 - . Procesos fotosintéticos
 - . Desinfección.
- 6.- Concentración y estabilización de sólidos
 - . Espesamiento
 - . Centrifugación
 - . Acondicionamiento químico
 - . Elutriación (Lexiviación)
 - . Flotación biológica
 - . Secado
 - . Digestión de lodos
 - . Combustión seca y húmeda
- 7.- Operaciones varias
 - . Control de crecimiento biológico
 - . Fluoración
 - . Separación de espuma
 - . Extracción con solventes
 - . Oxidación química
- 8.- Transferencia de calor
- 9.- Evaporación y/o destilación
- 10.- Procesos de conversión de agua salina
 - . Osmosis inversa
 - . Electrodiálisis
 - . Congelación

**TABLA 3. OPERACIONES UNITARIAS PARA EL TRATAMIENTO
DE EMISIONES CONTAMINANTES DEL AIRE**

- . Separación Browniana
- . Sedimentación
- . Separación inercial
- . Colección centrífuga
- . Filtración
- . Adsorción
- . Absorción
- . Incineración
- . Precipitación electrostática

**TABLA 4. OPERACIONES UNITARIAS PARA EL TRATAMIENTO
DE DESECHOS SOLIDOS**

- . Digestión
- . Pirólisis
- . Incineración
- . Deshidratación

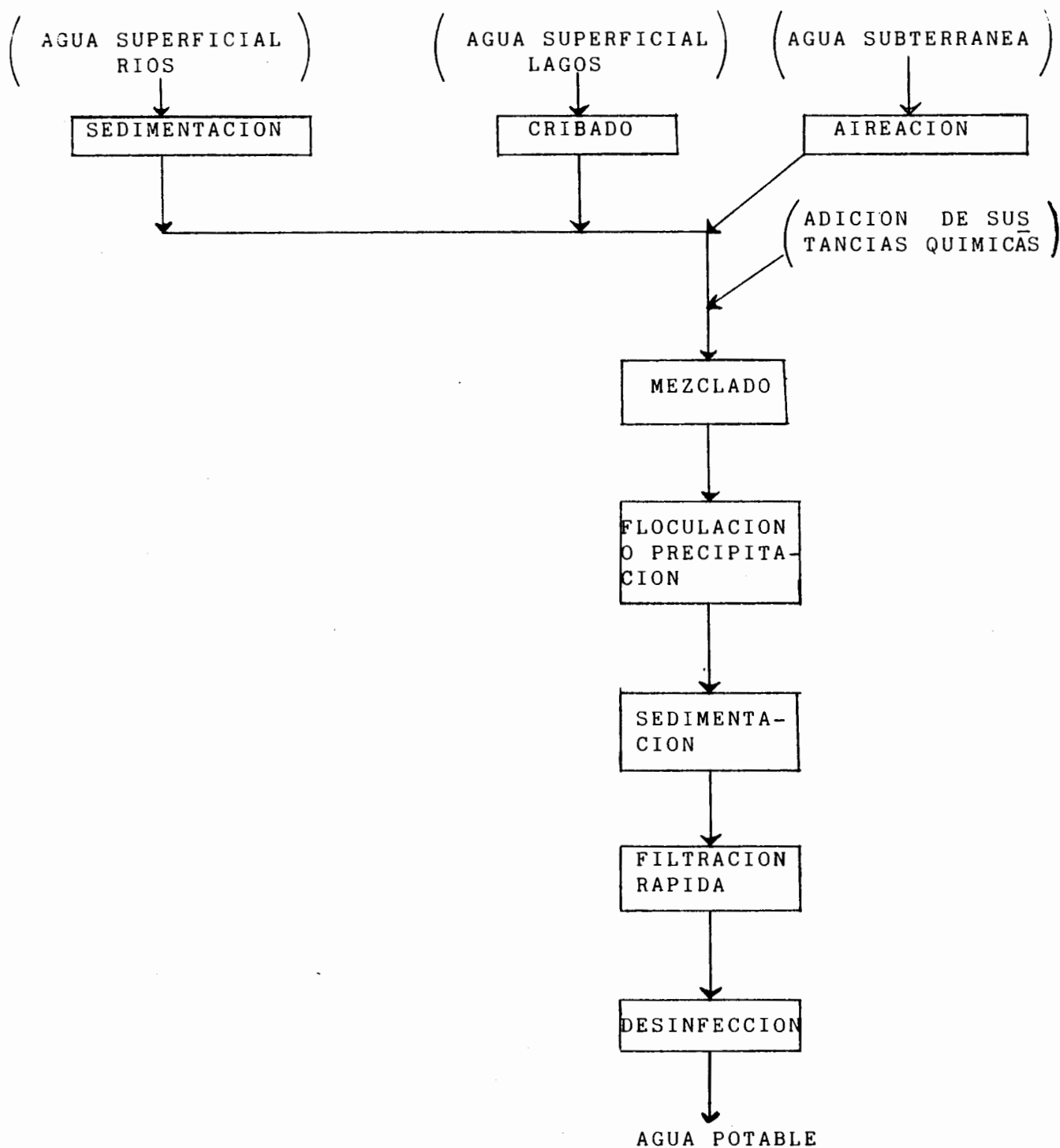


FIGURA 1. DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL PARA AGUA POTABLE.

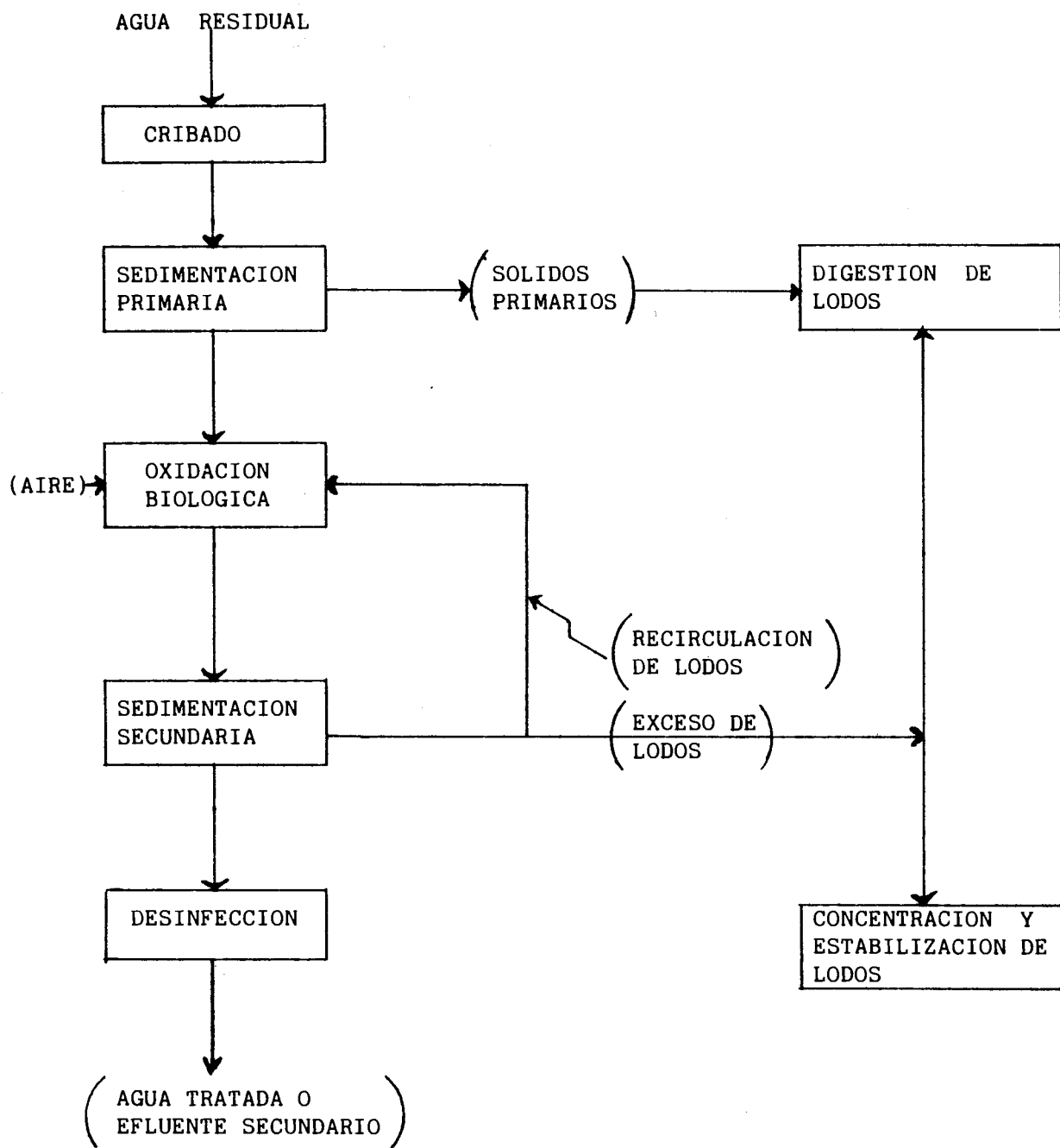


FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO EN UNA PLANTA CONVENCIONAL DE LODOS ACTIVADOS.

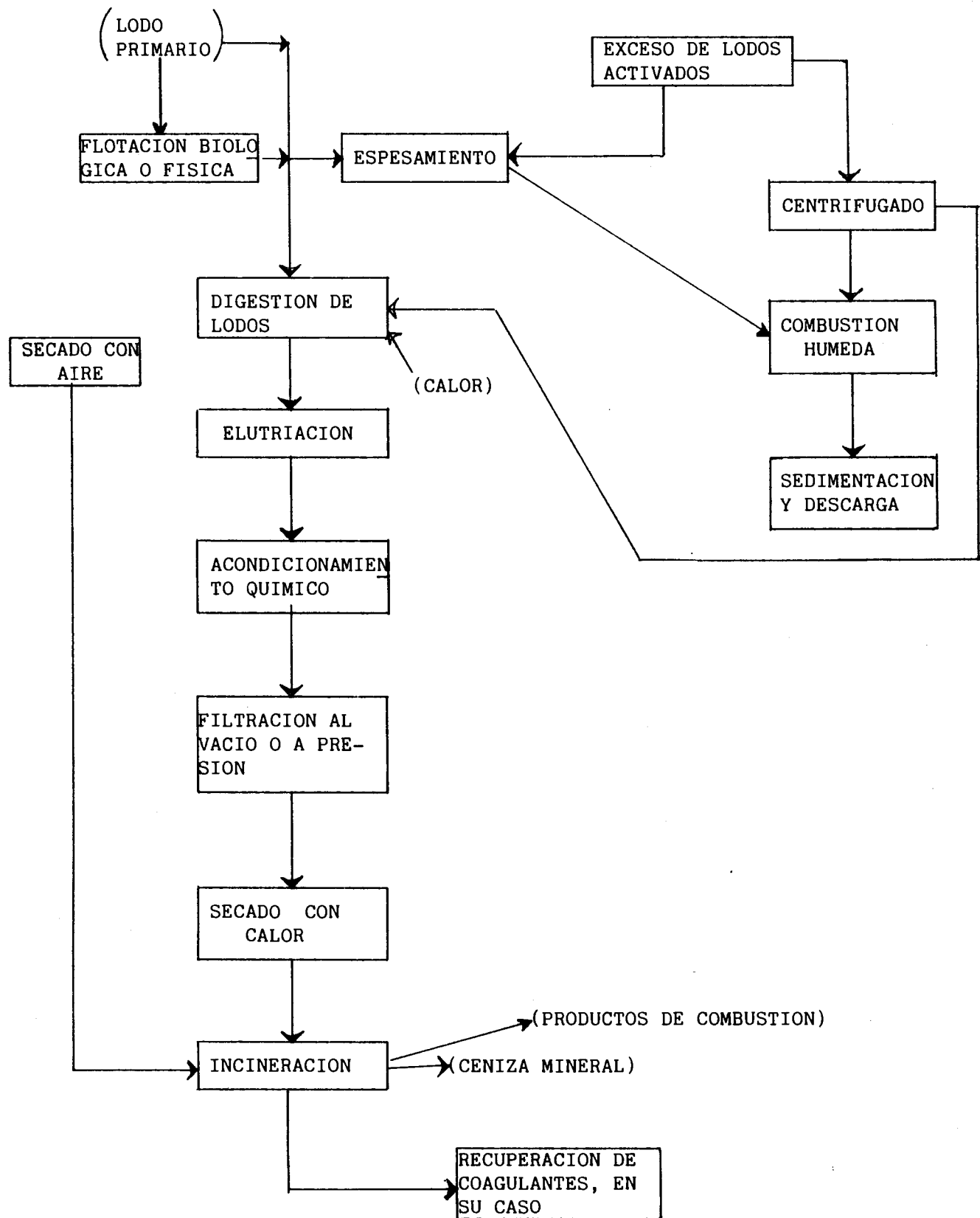


FIGURA 3. ALGUNAS OPERACIONES PARA CONCENTRACION DE SOLIDOS Y ESTABILIZACION

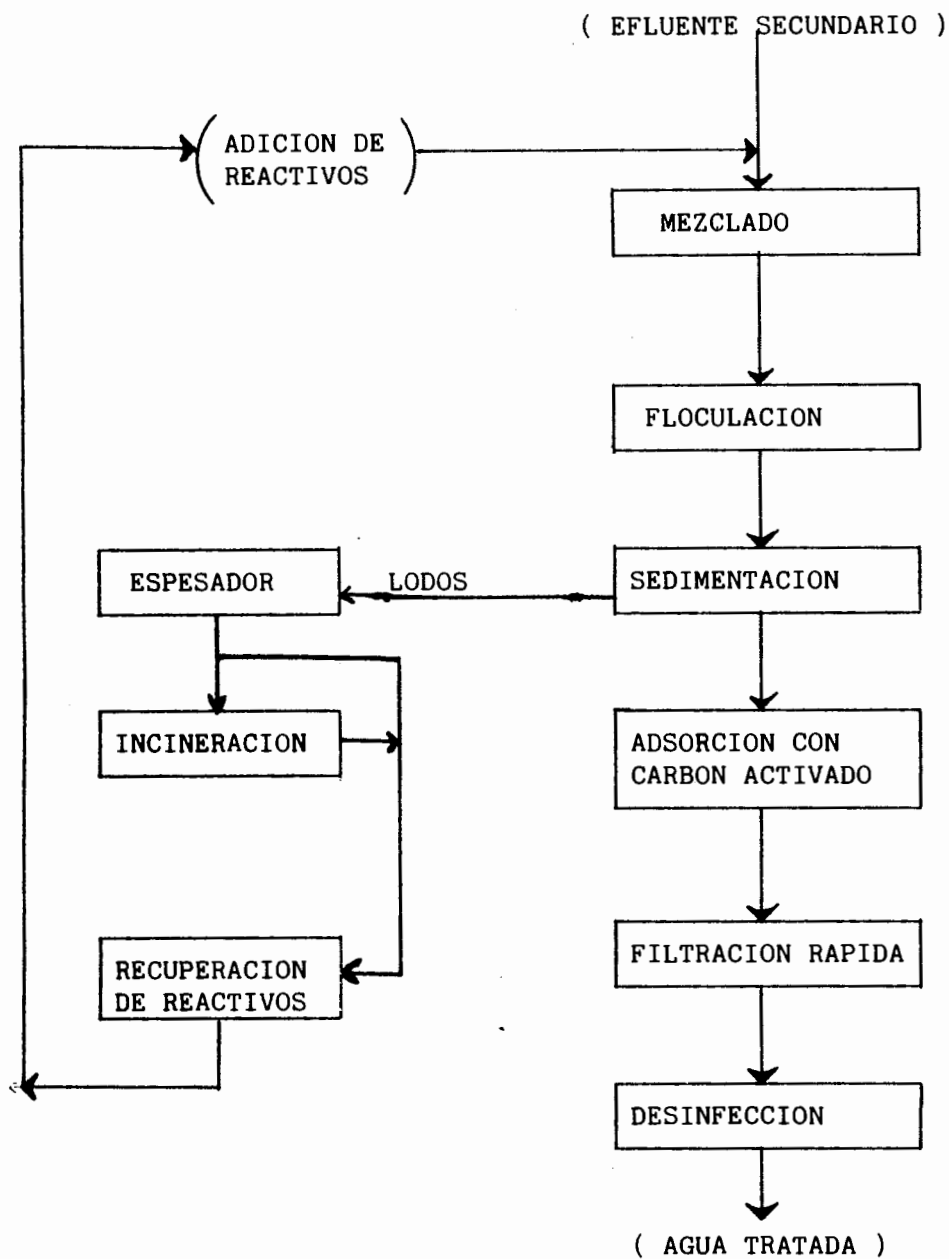


FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA PLANTA PARA TRATAMIENTO FISICOQUIMICO DE EFLUENTE SECUNDARIO

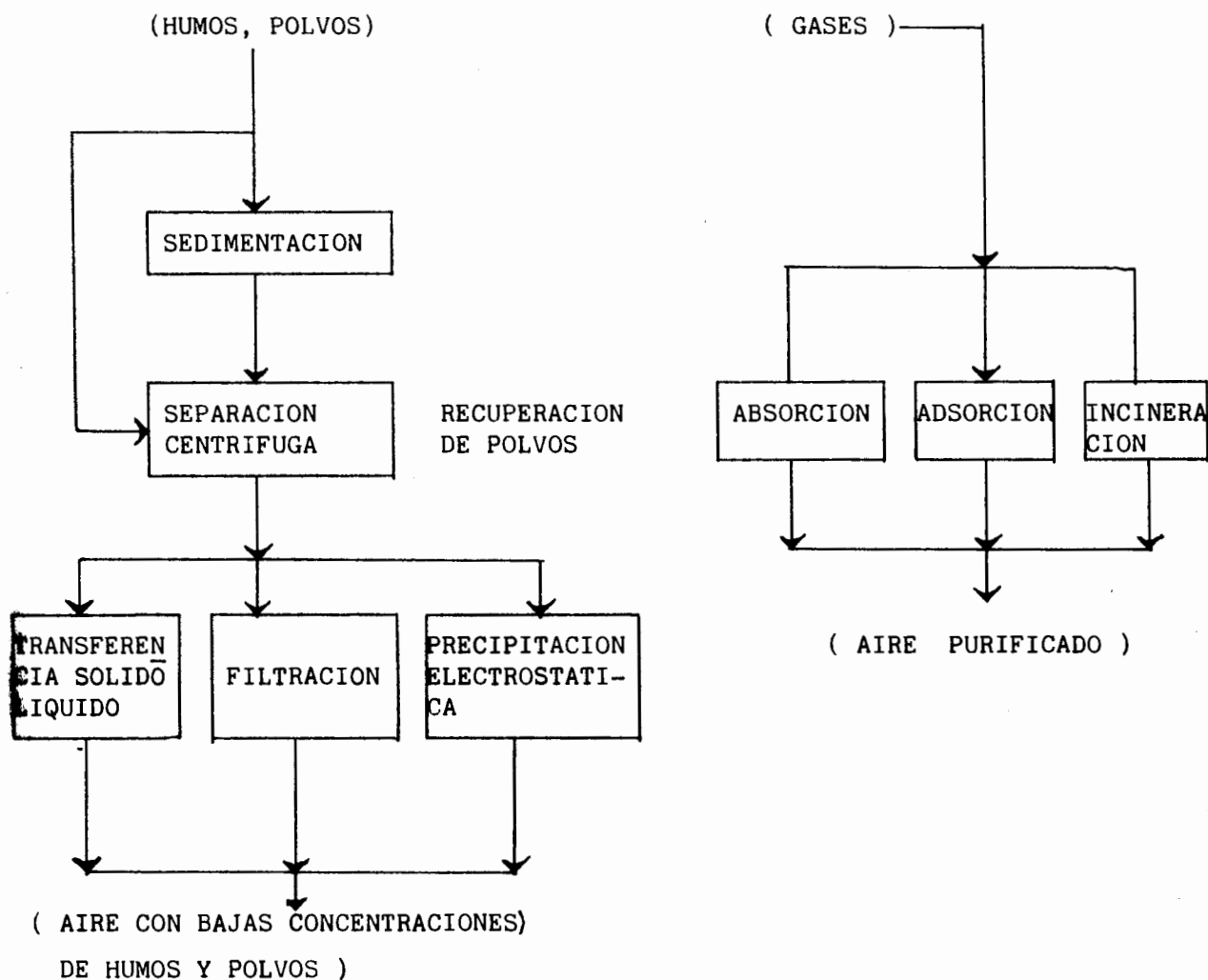


FIGURA 5. DIAGRAMA DE FLUJO PARA TRATAMIENTO DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS EMITIDOS POR FUENTES DE HUMO, POLVO Y GASES.

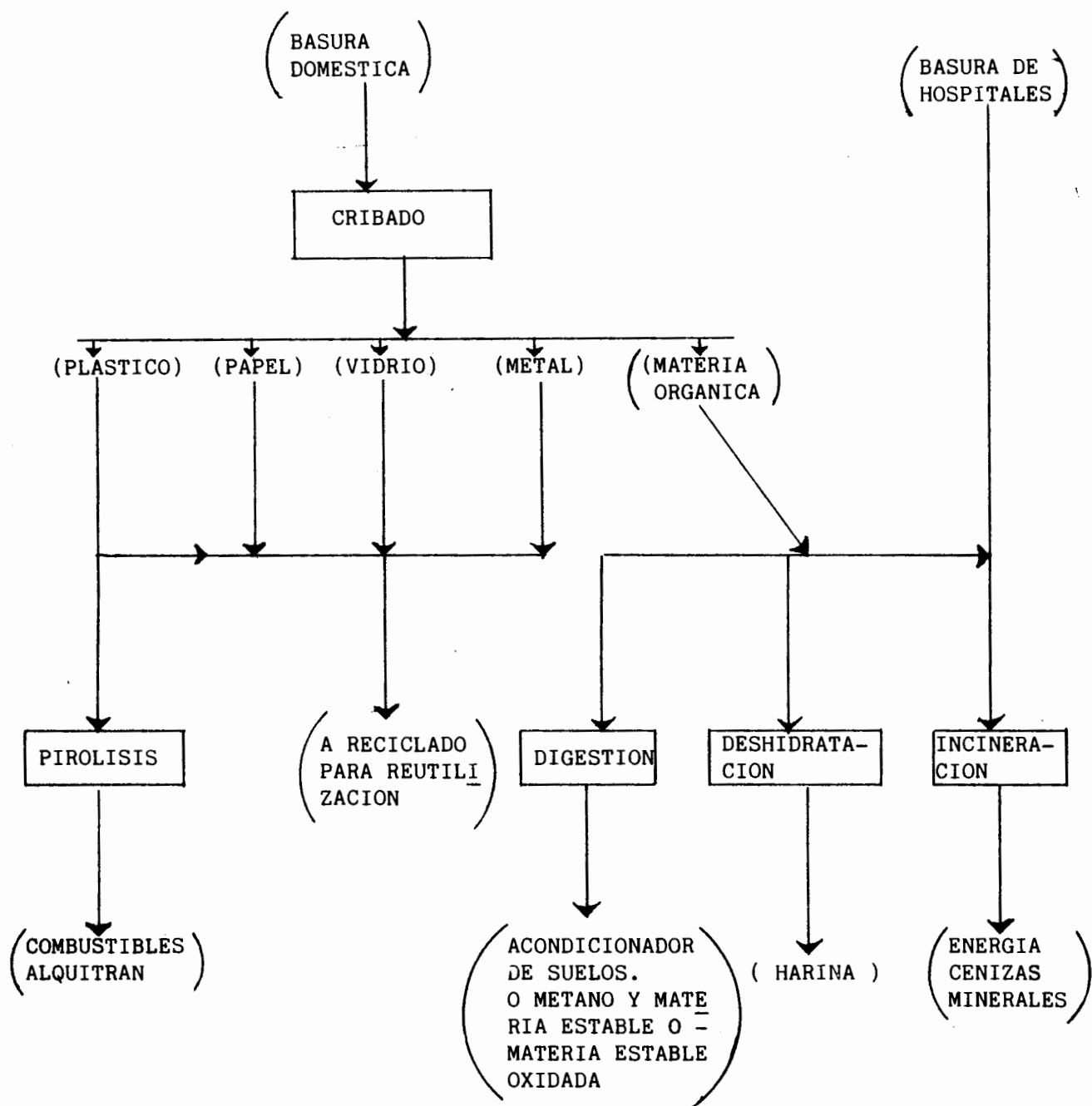


FIGURA 6. DIAGRAMA PARA EL TRATAMIENTO DE BASURA



PRACTICA NO. 1 CINETICA DE REACCION

1.1. GENERALIDADES SOBRE TEORIA

1.1.1. Introducci3n

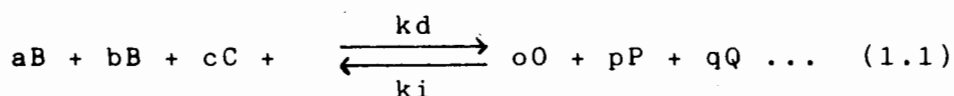
La cin3tica de reacci3n estudia la velocidad de transformaci3n de especies qu3micas y establece las funciones que describen la variaci3n de las concentraciones de reactivos y productos respecto al tiempo, bajo condiciones conocidas de los factores siguientes: r3gimen de flujo, temperatura, presi3n, l3mites de interfase, presencia de sustancias interferentes y cantidad relativa de sustancias reaccionantes.

El conocimiento de la cin3tica de reacci3n permite dise1nar reactores para llevar a efecto combinaciones qu3micas en fase l3quida, s3lida o gaseosa, en condiciones de temperatura constante (isot3rmica) o variable (adiab3tica) y bajo presi3n o volumen constante.

En el caso de la Ingeniería Ambiental el conocimiento de la cinética de reacción es fundamental para el diseño de procesos de tratamiento, principalmente en lo que respecta a los procesos biológicos de tratamiento, que involucran reacciones bioquímicas; así como en el campo del tratamiento de desechos sólidos orgánicos.

1.1.2. Ley de acción de masas

La ley de acción de masas establece que la velocidad de reacción varía directamente proporcional con el producto de las concentraciones de reactivos e inversamente con el de productos. Así, considerando la ecuación química siguiente:



Las expresiones para las velocidades de reacción hacia la derecha e izquierda serán respectivamente:

$$r_d = k_d (A)^a (B)^b (C)^c \dots \quad (1.2)$$

$$r_i = k_i (O)^o (P)^p (Q)^q \dots \quad (1.3)$$

Donde:

k_d, k_i	Coeficientes específicos de reacción hacia derecha e izquierda respectivamente.
$(A), (B), (C), \dots$	Concentraciones de reactivos (ML^{-3})
$(O), (P), (Q), \dots$	Concentraciones de productos (ML^{-3})
$a, b, c, \dots$	Número de moléculas de reactivos que intervienen en la reacción.
$o, p, q, \dots$	Número de moléculas de productos generados por la reacción.

La influencia de la temperatura en la velocidad de reacción obedece la Ley de Arrhenius, que se puede expresar en la forma siguiente:

$$k_{T_1} = k_{T_2} \theta^{(T_2 - T_1)} \quad (1.4)$$

Donde:

k_{T_2} , k_{T_1} Coeficientes específicos de reacción a las temperaturas T_2 y T_1 , respectivamente.

θ Coeficiente que depende de propiedades termodinámicas, el cual es sensiblemente constante para variaciones pequeñas de temperatura, del orden de 10° C .

1.1.3. Evaluación de resultados experimentales.

Los datos experimentales obtenidos en el laboratorio relativos a la variación de concentración respecto al tiempo son procesados matemáticamente a fin de obtener la función de velocidad de reacción relacionada.

Generalmente, los datos cumplen con algún modelo matemático, en cuyo caso únicamente se verificará la bondad del ajuste a la ecuación diferencial o integral correspondiente. En la tabla 1.1 se presentan ejemplos de modelos matemáticos.

1.1.4. Reactores ideales

Los tipos de reactores ideales incluyen: el intermitente completamente mezclado, el continuo completamente mezclado y el de flujo pistón.

Cuando las reacciones se efectúan en condiciones de presión, temperatura, volumen constante y régimen de flujo permanente, el dimensionamiento del reactor se hará considerando fundamentalmente el balance de masa, cuya expresión general es la siguiente:

$$\text{Masa entra} = \text{Masa que sale} + \text{Masa que desaparece} + \text{Masa que se acumula} \quad (1.5)$$

Las expresiones de balance de materia para los reactores ideales se muestran en la figura 1.1.

1.2. OBJETIVO

Determinar la velocidad de reacción de la hidrólisis del acetato de etilo (anexo 1.1) en sistemas intermitente y continuo.

1.3. PROCEDIMIENTO

1.3.1. Experimento 1. Hidrólisis del acetato de etilo, cuando $a \neq b$ y condiciones intermitentes.

- 1.3.1.1. Vierta 980 ml. de agua destilada en un matraz aforado de 1000 ml.
- 1.3.1.2. Introduzca una cápsula imantada.
- 1.3.1.3. Agregue 10 ml. de hidróxido de sodio 1N y 0.5 ml. de acetato de etilo. Afore a 1 litro.
- 1.3.1.4. Mezcle utilizando un agitador magnético.
- 1.3.1.5. Tome muestras de 10 ml. a los 3, 5, 9, 12, 15, 20, 30 y 40 minutos.
- 1.3.1.6. Inmediatamente después de cada muestreo, determine la concentración de hidróxido de sodio, titulando con ácido 0.01 N y utilizando como indicador fenoltaleína.
- 1.3.1.7. Determine el coeficiente específico de reacción (anexo 1.2.).

1.3.2. Experimento 2. Hidrólisis del acetato de etilo, cuando $a \neq b$ y condiciones intermitentes.

- 1.3.2.1. Proceda al igual que con los pasos 1.3.1.1. y 1.3.1.2.

1.3.2.2. Vierta 10 ml. de hidróxido de sodio 1N y 1 ml. de acetato de etilo.

1.3.2.3. Proceda al igual que con los pasos 1.3.1.4 a 1.3.1.7.

1.3.3. Experimento 3. Hidrólisis del acetato de etilo cuando a $\neq$ b y condiciones de flujo continuo en reactores con mezcla.

1.3.3.1. Utilice el dispositivo como el que se muestra en la figura 1.2.

1.3.3.2. Calibre los dosificadores de reactivos, tal que se tenga aproximadamente lo siguiente:

DISPOSITIVO	TIEMPO DE RETENCION MIN.	FLUJO (ml/min)	
		SOLUCIONES	TOTAL
1	10	25	50
2	20	12.50	25
3	30	8.30	16.6
4	40	6.25	12.5

1.3.3.3. Durante el período de calibración mantenga un volumen de 1000 ml. en el reactor. Dicho volumen se compone de 500 ml. de solución de hidróxido de sodio 0.01 N y de 500 ml. de solución de acetato de etilo (0.05 ml/l).

1.3.3.4. Cuando el tiempo sea igual al de retención correspondiente, tome muestras cada cinco minutos, determinando inmediatamente la concentración de hidróxido de sodio.

1.3.3.5. Considere realizado el experimento cuando la conversión sea máxima.

1.3.3.6. Obtenga el coeficiente específicos de reacción, graficando $(a - X^*) (b - X^*)$ VS X^* (anexo 1.2.).

6

1.3.4. Hidrólisis del acetato de etilo, cuando a $\neq$ b y condiciones de flujo pistón en reactor tubular.

1.3.4.1. Utilice un dispositivo como el que se muestra en la figura 1.3.

- 1.3.4.2. Dosifique las soluciones de hidróxido de sodio y acetato de etilo con flujos iguales y de tal forma que el tiempo de retención total sea de 20 minutos.
- 1.3.4.3. Después de 20 minutos tome muestras de cada una de las tomas y determine la concentración de hidróxido de sodio.
- 1.3.4.4. Cuando la concentración en cada toma sea sensiblemente constante considere finalizando el experimento.
- 1.3.4.5. Obtenga el coeficiente específico de reacción (anexo 1.2).

1.4. EQUIPOS Y REACTIVOS

1.4.1. Equipo

- Vidriería.
- Dispositivos según figura 1.2.
- Un dispositivo según figura 1.3.
- Dos agitadores magnéticos.

1.4.2. Reactivos

- Acetato de etilo.
- Hidróxido de sodio.

1.5. RESULTADOS

1.5.1. Experimento I - Hidrólisis del acetato de etilo cuando $a \neq b$ y condiciones intermitentes.

t min	V_2 ml	$C_b = b - X$ moles/l	X moles/l	$C_a = a - X$ moles/l	$\frac{1}{a-b} \cdot \frac{b(a-X)}{a(b-X)} \left(\frac{1}{\text{moles}} \right)$
3					
5					
9					
15					
20					
30					
40					
50					

t , Tiempo.
 V_2 , Volumen de ácido.
 C_b , Concentración de hidróxido de sodio respecto al tiempo.
 x , Conversión.
 C_a , Concentración de acetato de etilo respecto al tiempo.
 a , moles/l iniciales de acetato de etilo.
 b , moles/l iniciales de NaOH

1.5.2 Experimento II - Hidrólisis de etilo cuando $a \neq b$ y condiciones intermitentes.

$\frac{t}{\text{min}}$	$\frac{V_2}{\text{ml}}$	moles/l		$\frac{(a - X)}{\text{moles/l}}$	$\left(\frac{1}{a-X} - \frac{1}{a-1}\right)$ moles/l
		C_b	X		
3					
5					
9					
15					
20					
30					
40					
50					

1.5.3. Experimento III - Hidrólisis del acetato de etilo cuando $a \neq b$ y condiciones de flujo continuo.

Tiempo de Operación min.	$b - C_b = X \text{ (moles/l)}$			
	$\theta =$	$\theta =$	$\theta =$	$\theta =$
t = 0				
$\theta + 5$				
$\theta + 10$				
$\theta + 15$				
$\theta + 20$				
$\theta + 25$				
$\theta + 30$				

θ min.	X^* mol/l	X^*/θ mol/l/min	$a-X^*$ mol/l	$b-X^*$ mol/l	$(a-X^*)(b-X^*)$ (mol/l) ²

X*, Conversión a régimen establecido.

a = mol/l de acetato de etilo.

b = mol/l de NaOH

Tiempo de Operación min.	$b - \frac{C}{b} = X_i \text{ (mol/l)}$					
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	Efluente
t = 0						
t + 5						
t + 10						
t + 15						
t + 20						
t + 25						
t + 30						

Acetato de etilo a = $\frac{\text{mol}}{1}$

Hidróxido de sodio b = $\frac{\text{mol}}{1}$

1.5.3. Experimento IV - Hidrolisis del acetato de etilo, cuando $a \neq b$ y condiciones de flujo pistón.

Toma	Tiempo de retención θ_i (min)	$(a - X_{i\max})$ mol/l	$(b - X_{i\max})$ mol/l	$\frac{-1}{b-a}$	$\frac{b(a - X_{i\max})}{a(b - X_{i\max})}$
1					
2					
3					
4					
5					
Efluente					

ORDEN	REACCION	ECUACION DE VELOCIDAD	FORMA INTEGRADA
IRREVERSIBLES			
Cero	$A \xrightarrow{k_0} P$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_0$	$C_A = C_{Ao} - k_0 t$
Primer	$A \xrightarrow{k_1} P$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A$	$\ln \frac{C_A}{C_{Ao}} = -k_1 t$
Segundo(I)	$A+B \xrightarrow{k_2} P$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_2 C_A^2$	$(\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{Ao}}) = k_2 t$
Segundo(II)	$A+B \xrightarrow{k_2} P$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_2 C_A C_B$	$\frac{1}{C_{Bo} - C_{Ao}} \ln \frac{C_B C_{Ao}}{C_{Bo} C_A} = k_2 t$
REVERSIBLES			
Primer	$A \xrightleftharpoons[k_1^-]{k_1^+} B$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_1^+ C_A - k_1^- C_B$	$\frac{C_A - E}{C_{Ao} - E} = \text{Exp}(-\frac{k_1^+ (K+1)t}{K})$
Segundo	$A+B \xrightleftharpoons[k_2^-]{k_2^+} C+D$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_2^+ C_A C_B - k_2^- C_C C_D$	$W = q \frac{1}{2} t$

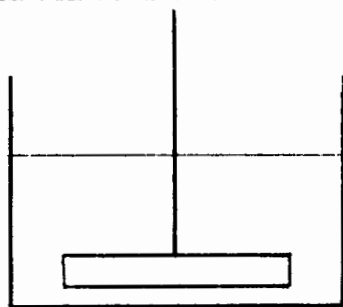
SIMBOLOGIA:

$C_{Ao}, C_{Bo}, C_{Co}, C_{Do}$	; Concentraciones iniciales de las sustancias A, B, C y D respectivamente.
C_A, C_B, C_C, C_D	; Concentraciones dependientes del tiempo para las sustancias A, B, C y D.
P	; Productos.
$K_0, k_1, k_2, k_1^-, k_2^-$	; Coeficientes específicos de reacción para reacciones de orden cero, primero, segundo y reversibles de primer y segundo orden respectivamente.
$K = \frac{k_1^+}{k_1^-}, K = \frac{k_2^+}{k_2^-}$	; Constantes de equilibrio para reacciones reversibles de primer y segundo orden respectivamente.
t	; Tiempo de reacción.
$E = \frac{C_{Bo} - C_{Ao}}{K + 1}$	; $W = \ln \frac{XZ (C_{Ao} - C_A) (Y - q \frac{1}{2}) + 1}{XZ (C_{Ao} - C_A) (Y + q \frac{1}{2}) + 1}$
	$X = K_2 C_{Ao} C_{Bo} + \frac{1}{K^-} (C_{Co} - C_{Do})$; $Z = k_2 - \frac{k_1^+}{K^-}$
	$-Y = k_2 (C_{Ao} + C_{Bo}) + \frac{1}{K^-} (C_{Co} + C_{Do})$; $q = Y^2 - 4 X^2$

TABLA 1.1.--

EJEMPLOS DE MODELOS MATEMATICOS

REACTOR INTERMITENTE



r : velocidad de reacción ($\text{ML}^{-3} \text{t}^{-1}$)

V ; volumen (L^3)

C ; concentración dependiente del tiempo (ML^{-3})

a ; concentración inicial (ML^{-3})

X ; conversión (ML^{-3}) = $a - C$

$\frac{dC}{dt}$; acumulación ($\text{ML}^{-3} \text{t}^{-1}$)

Balance de materia:

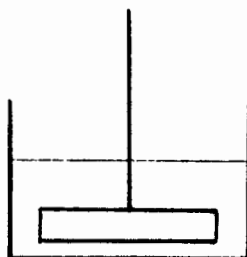
$$0 = 0 - rV + V \frac{dC}{dt} \Rightarrow \frac{dC}{r} = dt = \int_{C_0}^C \frac{dC}{r} = \int_0^t dt$$

$$\tau = \int_{C_0}^C \frac{dC}{r}$$

REACTOR CONTINUO CON MEZCLA

Q ; Flujo ($\text{L}^3 \text{t}^{-1}$)

C_0 ; Concentración inicial (ML^{-3})



Q

C ; Concentración a régimen permanente, dependiente del tiempo de retención

(ML^{-3})

$\theta = \frac{V}{Q}$; Tiempo de retención (t)

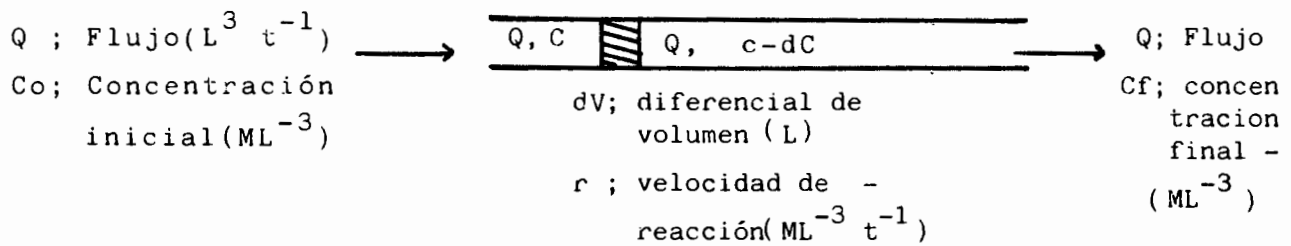
FIGURA 1.1.- BALANCE DE MATERIA PARA REACTORES IDEALES (1a. PARTE).

Balance de materia

$$Q C_o = Q C + r V + 0 \quad \Rightarrow \quad r V = Q (C_o - C) = Q X$$

$$\therefore \quad V = \frac{Q}{r} X \quad ; \quad \theta = \frac{X}{r}$$

REACTOR DE FLUJO PISTON



Balance de materia;

$$Q C = Q (C - dC) + r dV \quad \Rightarrow \quad Q dC = r dV = Q \int_{C_o}^C \frac{dC}{r} = \int_0^V dV$$

$$\frac{V}{Q} = \theta = \int_{C_o}^{C_f} \frac{dC}{r}$$

FIGURA 1.1.- BALANCE DE MATERIA PARA REACTORES IDEALES (2a. PARTE).

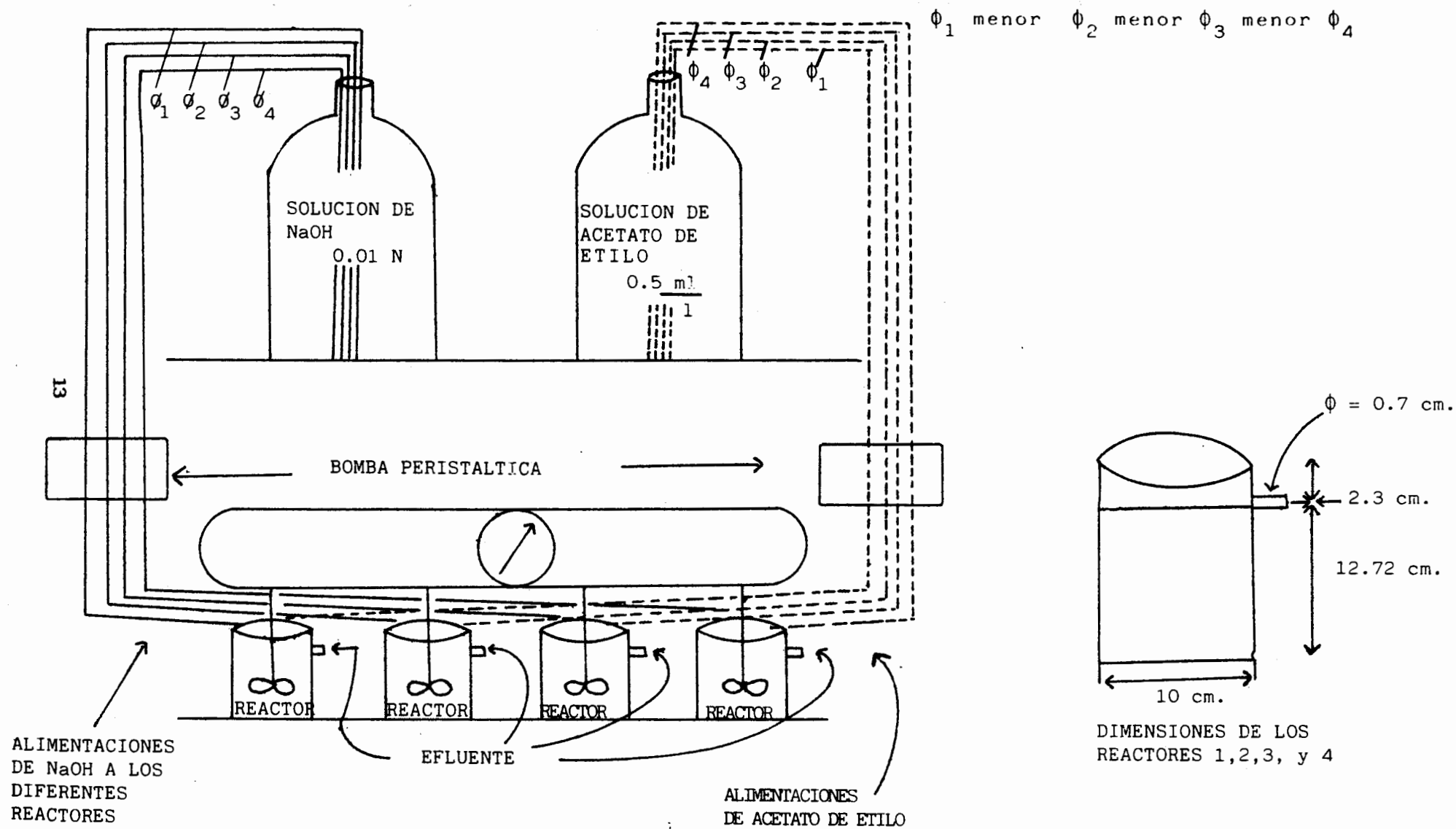


FIGURA 1.2. DISPOSITIVO PARA FLUJO CONTINUO CON MEZCLA

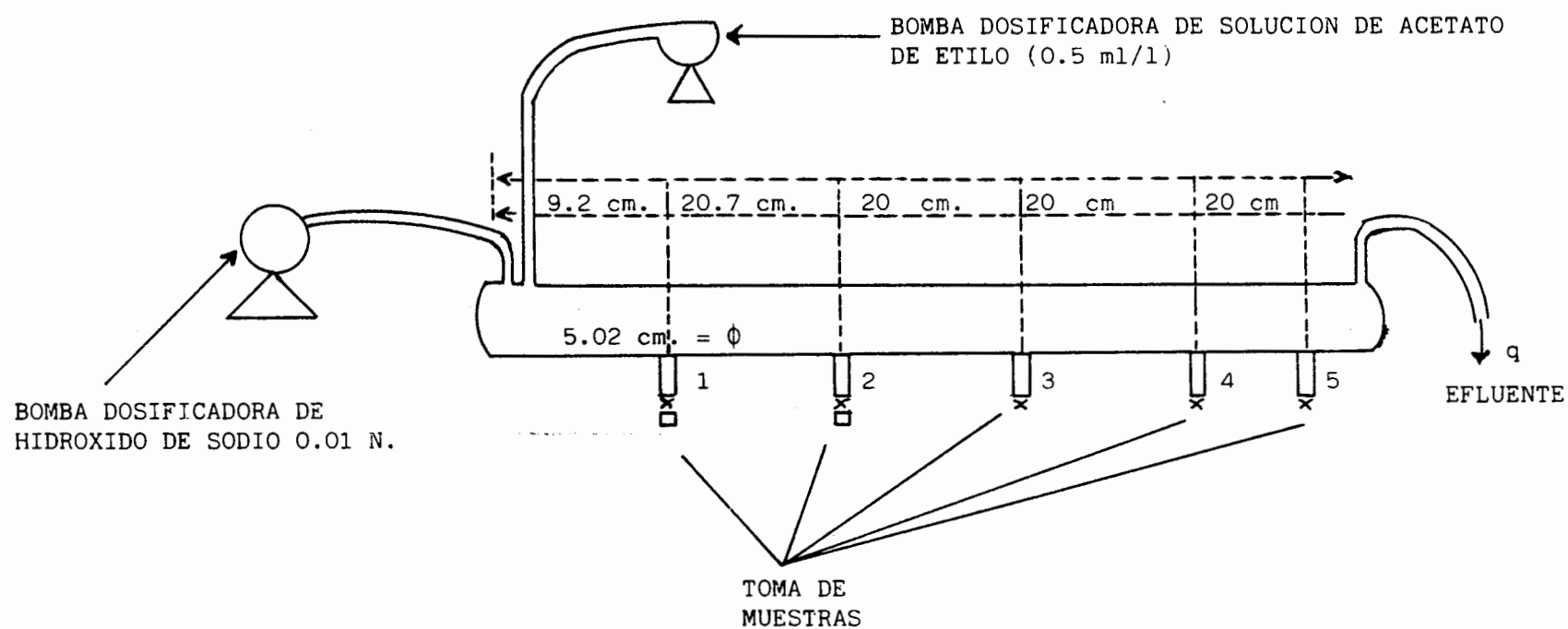
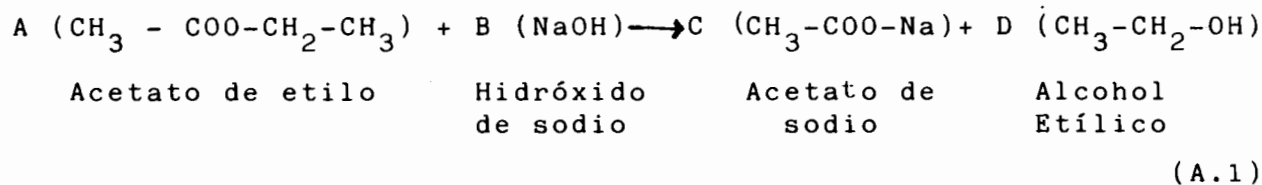


FIGURA 1.3.- DISPOSITIVO PARA FLUJO PISTON, EN REACTOR TUBULAR

ANEXO 1.1 HIDROLISIS DEL ACETATO DE ETILO

Se efectúa una reacción irreversible de segundo grado, por tanto:



La expresión de velocidad de reacción es:

$$- \frac{dCA}{dt} = r = k C_A C_B = k (a-x) (b-x) \quad (A.2)$$

donde:

$$- \frac{dCA}{dt} = r, \quad \text{Velocidad de reacción}$$

k , Coeficiente específico de reacción

CA , CB , Concentraciones dependientes del tiempo de reacción para el acetato de etilo e hidróxido de sodio, respectivamente.

a , b , Concentraciones iniciales del acetato de etilo e hidróxido de sodio respectivamente.

X , Conversión.

Integrando la ecuación A.2, se obtienen las ecuaciones siguientes

$$\text{Cuando } a = b \quad \frac{1}{a-x} - \frac{1}{a} = kt \quad (A.3)$$

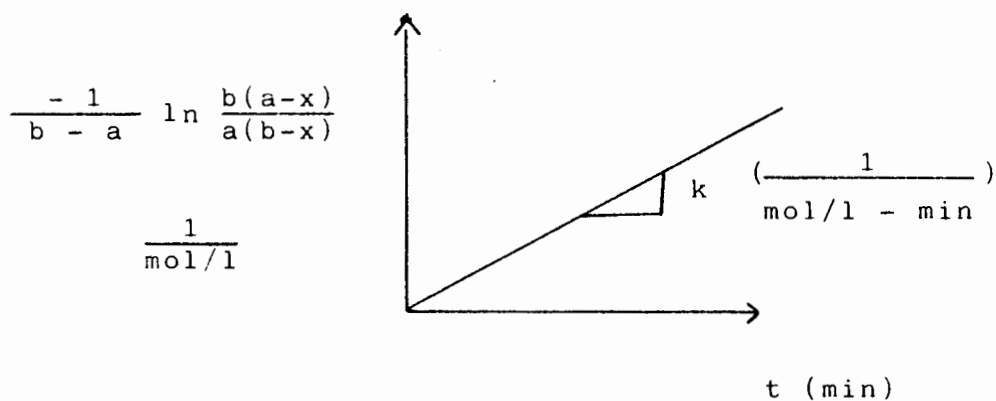
$$a \neq b \quad \frac{-1}{b-a} \ln \frac{b(a-x)}{a(b-x)} = kt \quad (A.4)$$

Las ecuaciones integradas A.3 y A.4 corresponden a condiciones intermitentes.

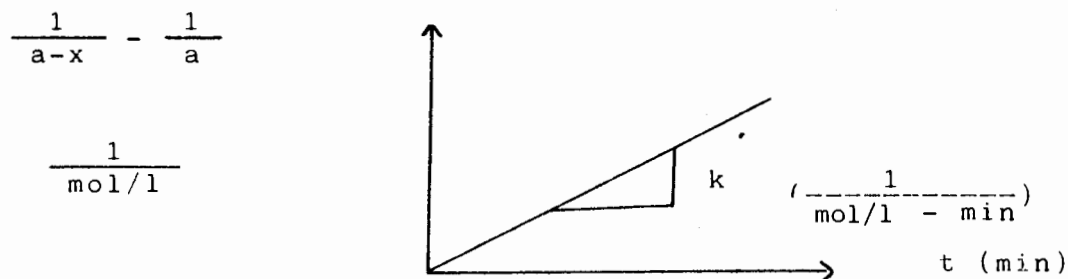
ANEXO 1.2 OBTENCION DEL COEFICIENTE ESPECIFICO DE REACCION

Para determinar el coeficiente específico de reacción, grafique como se esquematiza a continuación, según el caso.

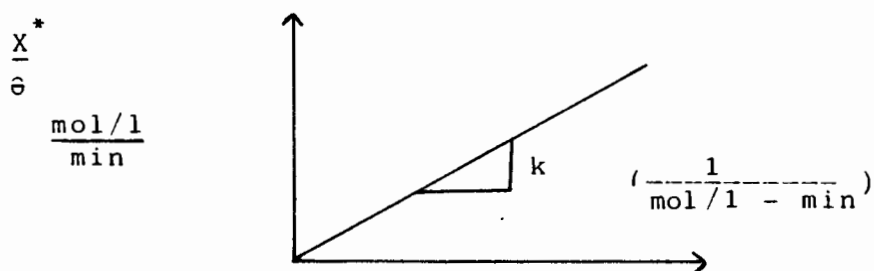
Experimento 1. - Hidrolisis del acetato de etilo, cuando $a \neq b$ y condiciones intermitentes.



Experimento 2. - Hidrólisis del acetato de etilo, cuando $a \neq b$ y condiciones intermitentes



Experimento 3. - Hidrolisis de acetato de etilo, cuando $a \neq b$ y condiciones de flujo continuo en reactores con mezcla.

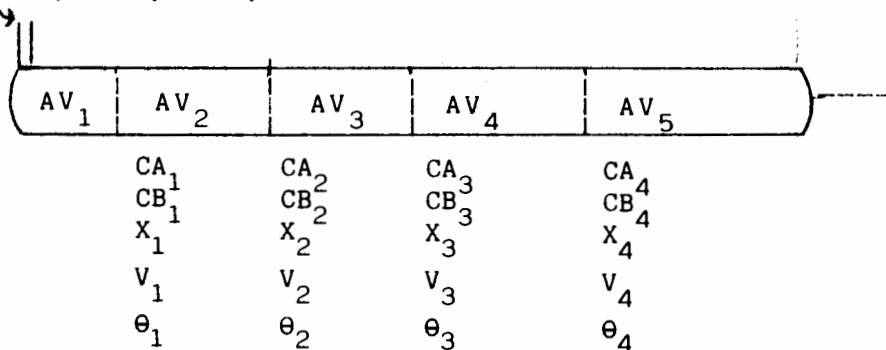


NOTA: X^* es la conversión a régimen permanente.

Experimento 4. - Hidrólisis del acetato de etilo cuando $a \neq b$ y condiciones de flujo pistón en reactortubular.

$$Q = q_A + q_e$$

$$q_A, C_{Ao}, C_{Bo}, q_B$$



$$\begin{aligned} CA_5 &= CA_f \\ CB_5 &= CB_f \\ X_5 &= X_f \\ V_5 &= V_T \\ \theta_5 &= \theta_T \end{aligned}$$

EXPERIMENTO 4 (cont.)

$$V_1 = AV_1$$

$$V_1 = AV_1 + AV_2 = V_1 + AV_2$$

$$V_3 = V_2 + AV_3$$

$$V_4 = V_3 + AV_4$$

$$V_5 = V_4 + AV_5 = V_5$$

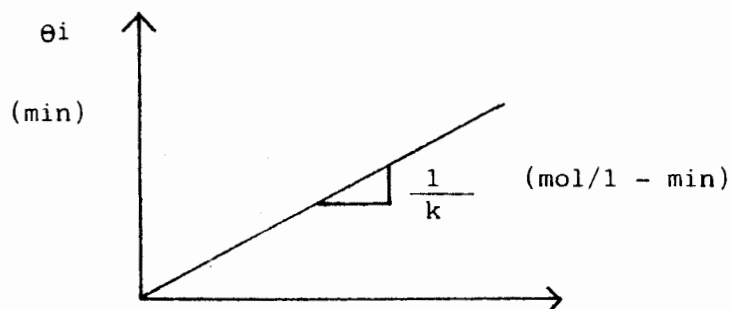
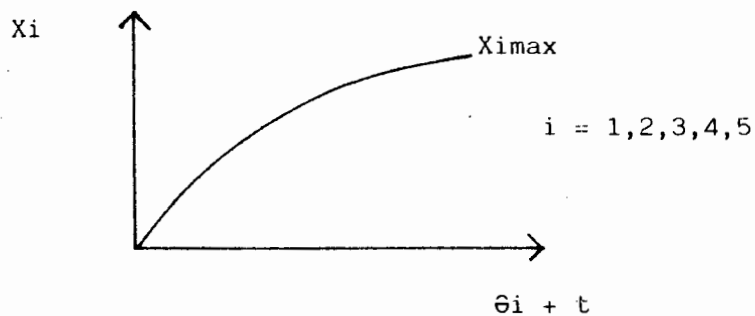
$$\theta_1 = V_1/Q$$

$$\theta_2 = V_2/Q$$

$$\theta_3 = V_3/Q$$

$$\theta_4 = V_4/Q$$

$$\theta_5 = V_5/Q$$



$$= \frac{1}{b-a} \ln \frac{b(a-X_{\text{imax}})}{a(b-X_{\text{imax}})} \left(\frac{1}{\text{mol.l}} \right)$$

PRACTICA No. 2 FLUJO EN REACTORES

2.1. INTRODUCCION

En la práctica anterior se mencionó que existen tres tipos de reactores ideales: el intermitente completamente mezclado, el continuo completamente mezclado y el de flujo pistón.

En la realidad, el flujo en los reactores prototipo y piloto no cumple con condiciones de idealidad, debido a que no todas las partículas o moléculas del fluido o solución reaccionante permanecen el mismo tiempo en el reactor o intervienen en la reacción que se desea efectuar (figura 2.1).

Teóricamente las partículas deberían permanecer en el reactor el tiempo denominado de retención, el cual se define mediante la ecuación siguiente:

$$\bar{t}_a = \frac{V}{Q}$$

(2.1)

donde:

$\bar{t}_a$,	Tiempo de retención teórico	$[t]$
V ,	Volumen del reactor	$[L^3]$
Q ,	Gasto influente	$[L^3 t^{-1}]$

La distribución del tiempo de retención del fluido (E) cumple la condición de normalización (figura 2.2) siguiente:

$$\int_0^{\infty} E \, dt = 1. \quad (2.2)$$

En este caso $E dt$ es la fracción del material que sale del reactor entre los tiempos t y $t + dt$.

Los métodos experimentales para determinar la distribución del tiempo de retención se basan en técnicas de estímulo-respuesta.

El estímulo se obtiene mediante la adición de un trazador en el influente del reactor y la respuesta se haya representada por la presencia del trazador en la salida o efluente del reactor.

Los trazadores utilizados son sustancias inertes de fácil detección, tales como el cloruro de sodio, colorantes y radioisótopos.

Cuando el trazador se alimenta continuamente, se obtiene la curva "F" y cuando se hace instantáneamente, la curva "C". Las formas de estas curvas se observan en la figura 2.3.

Para caracterizar la distribución se recurre a determinar el valor medio y la variancia.

Así, el valor medio de la curva C es:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (2.3 \, a)$$

O bien para valores discretos:

$$\bar{t} \approx \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (2.3 \text{ b})$$

La variancia se determina mediante:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} - \bar{t}^2 \quad (2.4 \text{ a})$$

O bien

$$\sigma^2 \approx \frac{\sum (t_i - \bar{t})^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - \bar{t}^2 \quad (2.4 \text{ b})$$

Otra forma de caracterizar la distribución del tiempo de retención es aplicando los modelos de dispersión.

Así, la distribución en tiempo y espacio de un trazador soluble en un solvente estacionario depende solamente del transporte molecular que puede ser descrito por la Ley de Fick, cuya expresión en una sola dimensión es:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.5)$$

Donde D es el coeficiente de difusión molecular. En forma análoga se puede considerar que la dispersión en un fluido sujeto a mezcla, se describe mediante:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

Donde D es el coeficiente de dispersión longitudinal que caracteriza el grado de mezclado durante el flujo.

La expresión para el balance de materia se describe mediante la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{D}{UL} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.7)$$

donde:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta}, \quad \text{Variación de la concentración respecto a } \theta$$

$$\theta = \frac{t}{t_a} = \frac{tU}{L}, \quad \text{Relación entre tiempo - tiempo de retención}$$

$$\left(\theta = \frac{t}{V/Q} = \frac{t}{L \cdot A/U \cdot A} = \frac{tU}{L} \right)$$

$$z = \frac{X}{L}$$

L, Longitud del reactor.

V, Velocidad.

$\frac{D}{UL} = \frac{1}{Pe}$ Número de dispersión.

Pe, Número de Peclet.

Cuando $D/UL \rightarrow 0$, la dispersión es despreciable, como en el caso de flujo pistón ideal. Y cuando $D/UL \rightarrow \infty$, se tiene dispersión muy alta, tal como sucede en el flujo completamente mezclado.

Las soluciones de la ecuación 2.7 dependen del grado de dispersión que ocurra en el reactor. Para dispersiones de pequeña magnitud, la solución es:

$$C_{\theta} = \frac{C}{C_{\max}} = \frac{1}{2 \sqrt{\pi (D/UL)}} \exp \left[- \frac{(1-\theta)^2}{4 (D/UL)} \right] \quad (2.8)$$

La ecuación anterior representa una familia de curvas normales con media y variancia de:

$$\theta = \frac{\bar{t}}{\bar{t}_a} = 1 \quad y \quad (2.9)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = 2 \left(\frac{DU}{L} \right) \quad o$$

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left(\frac{DL}{U^3} \right) \quad (2.10)$$

La figura 2.4 muestra relaciones para determinar D/UL , teniendo la curva experimental.

Para dispersiones de gran magnitud, según se tenga cambios en el patrón de flujo entre las fronteras definidas por la entrada y salida del trazador se considera flujo no disturbado o viceversa (fig. 2.5)

En flujo no disturbado la solución a la ecuación 2.7 es:

$$C_e = \frac{1}{2 \sqrt{\pi \theta} (D/UL)} \exp \left[- \frac{(1-\theta)^2}{4 \theta (D/UL)} \right] \quad (2.11)$$

con media y variancia de:

$$\theta = \frac{\bar{t}}{\bar{t}_a} = 1 + 2 \frac{D}{UL} \quad y \quad (2.12)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}_a^2} = 2 \frac{D}{UL} + 8 \left(\frac{D}{UL} \right)^2 \quad (2.13)$$

En el flujo disturbado la solución es calculada mediante métodos numéricos. En este caso la media y variancia son determinadas por:

$$\theta = \frac{\bar{t}}{\bar{t}_a} = 1 \quad y \quad (2.14)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}_a^2} = 2 \frac{D}{UL} - 2 \left(\frac{D}{UL} \right)^2 (1 - e^{-UL/D}) \quad (2.15)$$

En la figura 2.6 se muestran familias de curvas C características.

También para caracterizar el régimen de flujo, se recurre a modelos hidráulicos matemáticos que permiten definir la existencia de cortos circuitos y zonas estacionarias en el reactor o el grado de discrepancia entre flujos completamente mezclado y pistón. Así para obtener la ecuación que describe el comportamiento de un trazador en algún reactor bajo régimen completamente mezclado, se sigue el método mostrado en la figura 2.7.

Una variación del régimen completamente mezclado involucra la existencia de zonas estacionarias en el reactor y la ocurrencia de cortos circuitos. En este caso el diagrama de flujo y las ecuaciones serán las mostradas en la figura 2.8. Otro caso de condiciones intermedias de mezclado es la combinación de flujo completamente mezclado, seguido de flujo pistón, tal como se muestra en la figura 2.9.

2.2. OBJETIVO

Estudiar el flujo no ideal bajo diferentes condiciones de mezclado.

2.3 EXPERIMENTO

- 2.3.1. Determine el volumen de los reactores (figura 2.10)
- 2.3.2. Calibre las bombas dosificadoras, para obtener tiempo de retención teórico en cada reactor de alrededor de 30 minutos. Regule mezclado.
- 2.3.3. Agregue en forma instantánea cloruro de sodio disuelto en 250 ml. de agua. La cantidad del mismo se calculará mediante la relación siguiente: $\text{miligramos de NaCl} = 300 \times \text{volumen del reactor en litros.}$

2.3.4. Tome muestras de 20 ml. a los 0,1,2,3,4,5,10,15,20,25,30, 40,50,60,75,90,105,120,135 y 150 minutos.

2.3.5. Determine la concentración de cloruros a cada muestra.

2.3.6. Para cada caso, grafique $tvsc$ y $\theta = \frac{t}{t_a}$ vs $C_\theta = \frac{C}{C_{max}}$

2.3.7. Obtenga la media y la variancia de la curva C, mediante:

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad y \quad \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - \bar{t}^2$$

2.3.8. Calcule la media y la variancia de la curva C mediante

$$\theta = \frac{\bar{t}}{t_a} \quad y \quad \sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_a^2}$$

2.3.9. Obtenga el número de dispersión D/UL

2.3.10. Determine para cada caso qué porción del reactor se encuentra completamente mezclada (a) y qué cantidad del influente se incorpora directamente al efluente (1-b). O bien la existencia de combinaciones de régimen de flujo.

Método

2.3.10.1. Grafique en papel semilogarítmico $\frac{t_x}{t_a}$ vs $\frac{C_x}{C_{max}}$

donde:

t_x , Tiempo igual o mayor al correspondiente a C_{max}

C_x , Concentración igual o menor a la máxima.

2.3.10.2. Obtenga la pendiente y la ordenada al origen.

2.4. EQUIPO Y REACTIVOS

2.4.1. Equipo

- Vidriería
- Dispositivos según figura 2.10

- Garrafón.

2.4.2. Reactivos

- Los necesarios para determinar cloruros.
- Cloruro de sodio.

2.5 RESULTADOS

SECCION DEL REACTOR	MEZCLADO	VOLUMEN l	FLUJO	TIEMPO DE RETENCION TEORICO (min)	DOSIS DE NaCl mg
R 1) Circular	Alto				
R 2) Rectangular	Medio				
R 3) Circular	Bajo				

TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE NaCl (mg/l)		
	REACTOR (R.1)	REACTOR (R.2)	REACTOR (R.3)
0			
1			
2			
3			
4			
5			
10			
15			
20			
25			
30			
40			
50			
60			
75			
90			
105			
120			
135			
150			

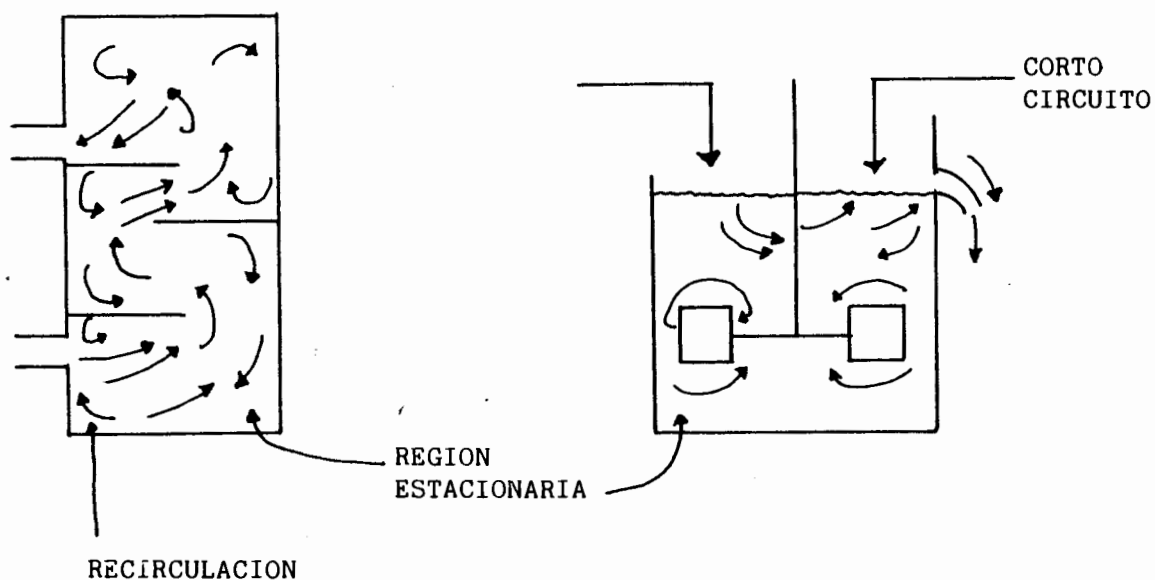


FIGURA 2.1- CONDICIONES DE FLUJO NO IDEAL

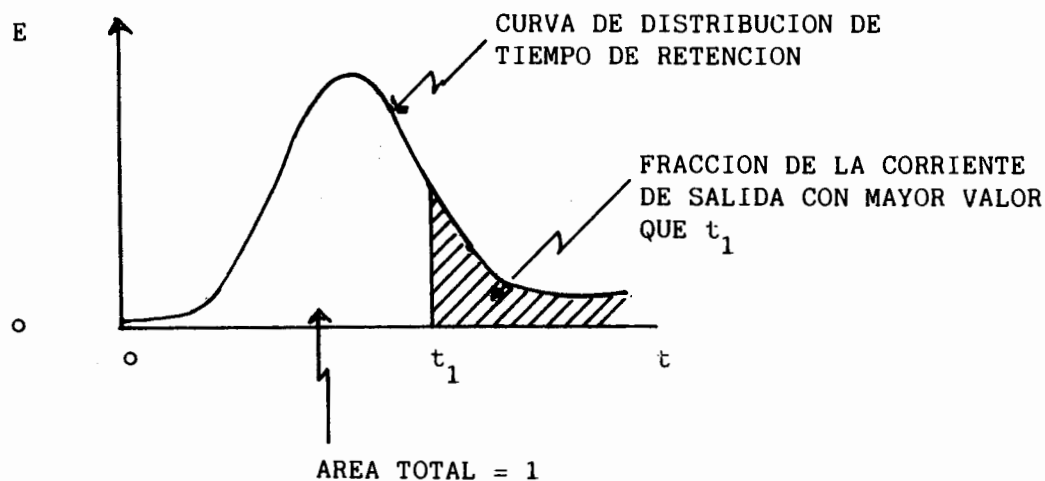


FIGURA 2.2.- DISTRIBUCION DEL TIEMPO DE RETENCION

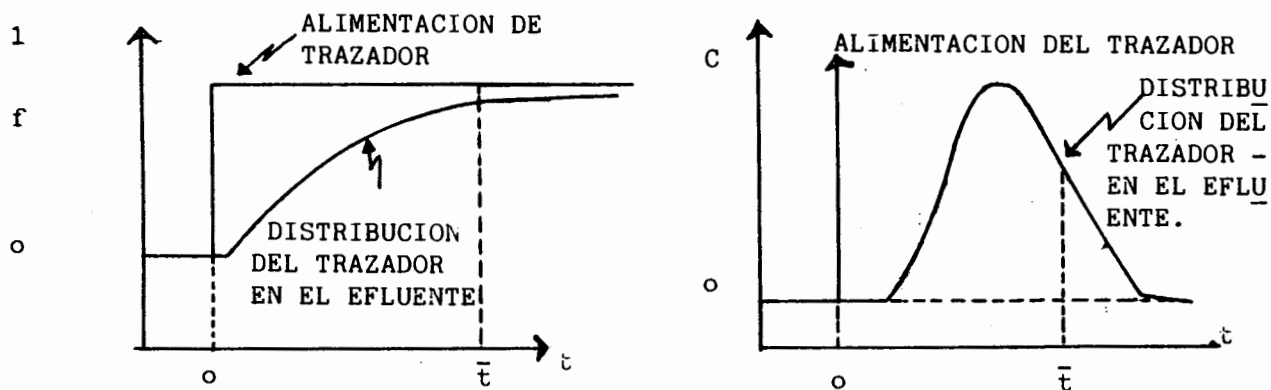


FIGURA 2.3.- CURVAS F Y C

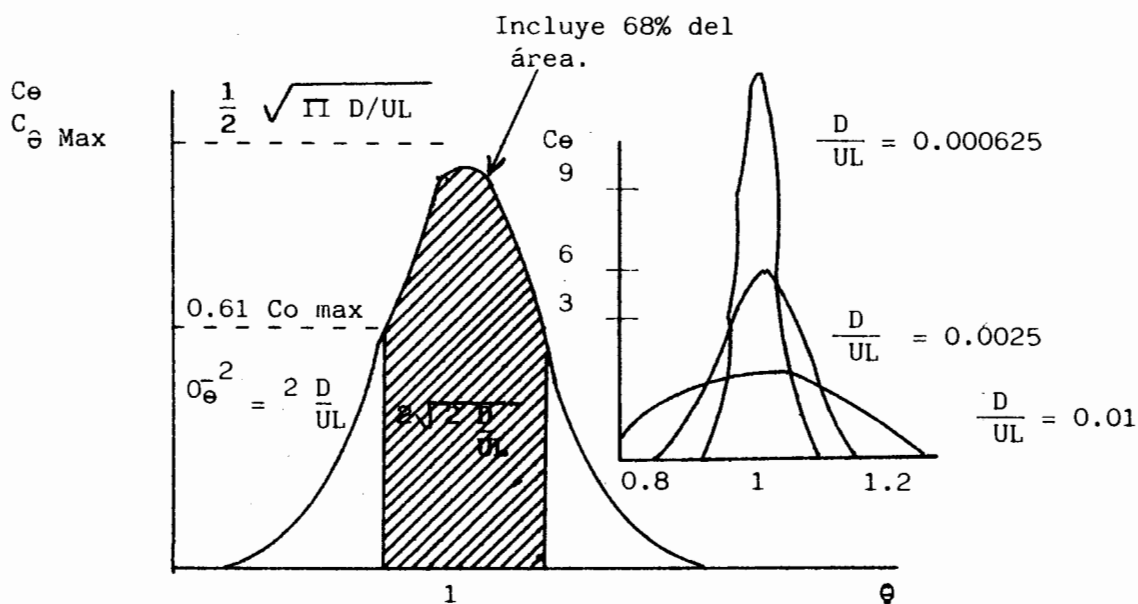


FIGURA 2.4.- RELACIONES DE D/UL Y LA CURVA θ VS. C_θ

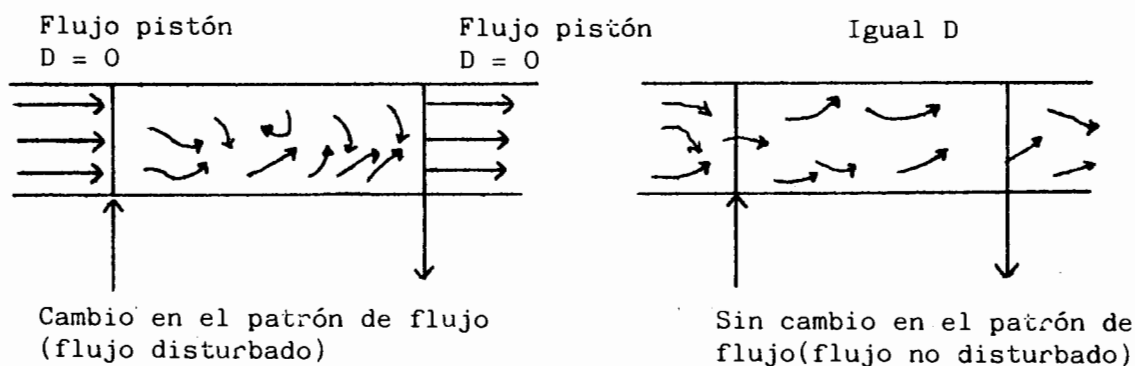


FIGURA 2.5.- PATRONES DE FLUJO EN REACTORES.

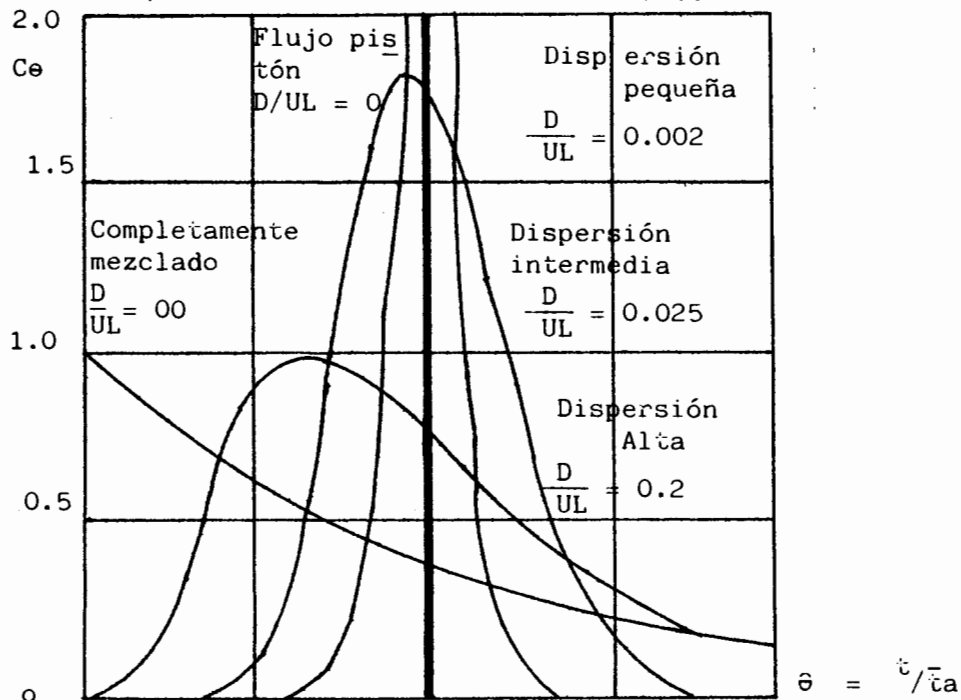
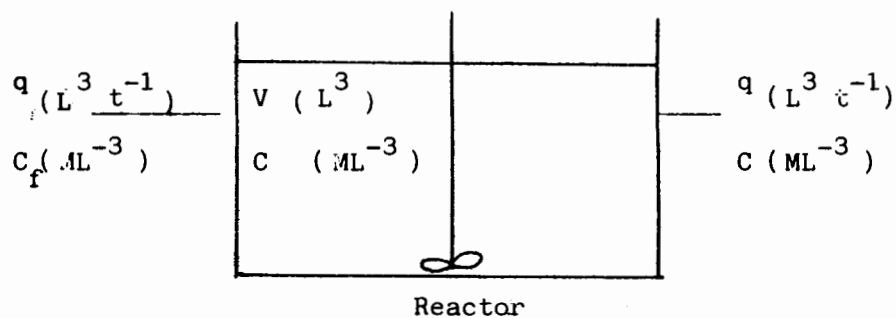


FIGURA 2.6.- CURVAS BAJO FLUJO DISTURBADO.



Balance de material en dt

$$qC_f dt - qCdt = VdC$$

Si $C_f = 0$ entonces :

$$\frac{dC}{dt} + \frac{qC}{V} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{dC}{C} = -\frac{q}{V} dt$$

Integrando para $(0, C_0)$ y (t, C) se obtiene:

$$-\ln \frac{C}{C_0} = \frac{qt}{V} \quad \text{ó} \quad \frac{C}{C_0} = e^{-qt/V}$$

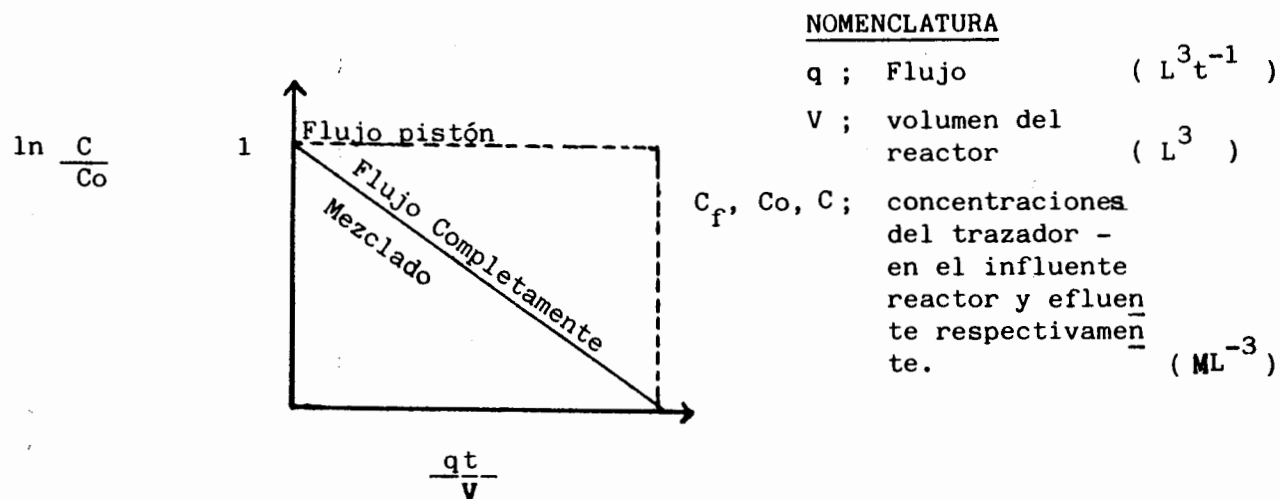
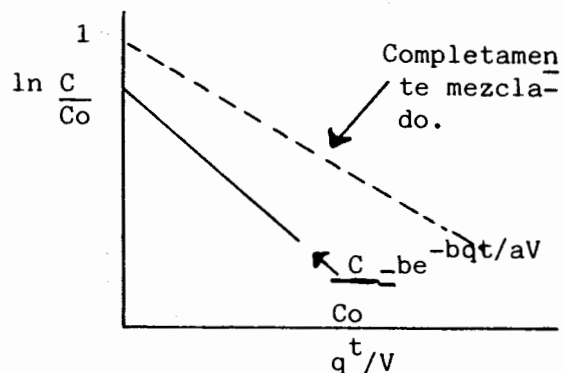
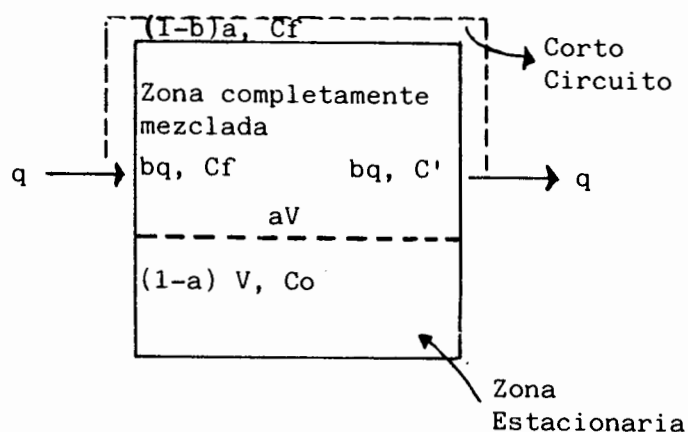


FIGURA 2.7.- ANALISIS HIDRAULICO DEL SISTEMA COMPLETAMENTE MEZCLADO.



Balance de materia

$$bqC_f dt - (1-b) qC_f dt - bqC dt = aV dC'$$

$$C_f = 0 \text{ y } C' = \frac{C}{b} \therefore - \frac{bdqt}{av} = \frac{dC}{bC}$$

integrando:

$$- \int_{Co}^{C/b} \frac{dC}{C} = - \ln \frac{C}{b} - \ln Co = \frac{bqt}{av}$$

$$\text{o sea: } \ln \frac{C}{Co} = \left(\ln b - \frac{bqt}{av} \right)$$

$$\boxed{\frac{C}{Co} = be^{-bqt/av}}$$

Nomenclatura:

a ; porción del reactor en régimen completamente mezclado

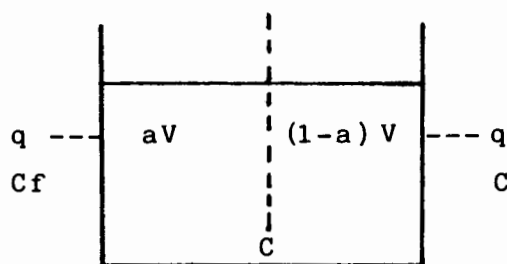
b ; parte del influente que entra a la zona completamente mezclada

V ; volumen

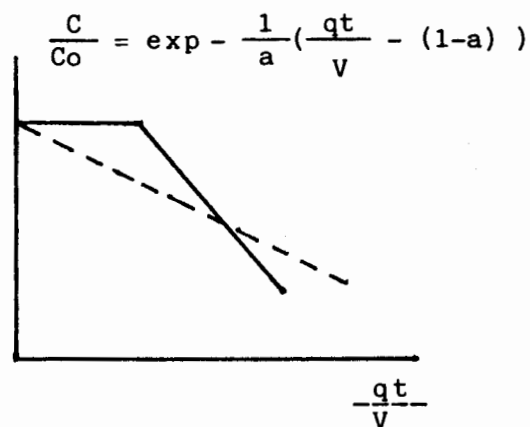
q ; flujo

Cf, Co, C', C; concentraciones del trazador, en la entrada, zona estacionaria, zona completamente mezclada y salida respectivamente.

FIGURA 2.8.- ANALISIS HIDRAULICO DEL CORTO CIRCUITO Y ZONAS ESTACIONARIAS.



$$\ln \frac{C}{C_0}$$



Balance de materia

A- Porción completamente mezclada

$$qC_f - qC' = aV \frac{dC'}{dt} \quad (A.1)$$

$$\text{como } C_f = 0 \text{ entonces } -qC' = \frac{aV dC'}{dt} \quad (A.2)$$

$$y \frac{dC'}{C'} = - \frac{q}{aV} dt \quad (A.3)$$

integrando entre (0, C₀) y (t, C') se tiene :

$$\ln \frac{C'}{C_0} = - \frac{qt}{aV}$$

B- Porción flujo pistón

$$qC'' = q(C'' - dC'') - r(1-a) dV \quad (B.1)$$

$$-r = - \frac{dC''}{dt} = k C'' \quad (B.2)$$

$$\therefore q dC'' = k C'' (1-a) dV \quad (B.3)$$

$$y \frac{dC''}{C''} = k_1 (1-a) dV \quad (B.4)$$

integrando entre (aV, C') y (V, C) se tiene:

$$\ln \frac{C}{C'} = kV (1-a) (1-a) \quad (B.5)$$

FIGURA 2.9:- FLUJO COMPLETAMENTE MEZCLADO SEGUIDO DE FLUJO PISTON (1a. Parte)

C - Total

De A.3 se tiene que:

$$\ln C = \ln C_0 - \frac{qt}{aV} \quad (C.1)$$

sustituyendo C.1 en B.5, se obtiene

$$\ln \frac{C}{C_0} = k V (1-a) (1-a) - \frac{qt}{aV} \quad (C.2)$$

como $V = qt$ C.2 se transforma en

$$\ln \frac{C}{C_0} = kt (1-a)^2 - \frac{t}{aV} \quad (C.3)$$

cuando $C = C_0$ implica que

$$k = \frac{1}{aV (1-a)} \quad (C.4)$$

sustituyendo C.4 en C.2 tenemos la expresión de balance total siguiente:

$$\ln \frac{C}{C_0} = - \frac{1}{a} \left(\frac{qt}{V} - (1-a) \right)$$

(C.5)

o bien

$$\frac{C}{C_0} = \exp - \frac{1}{a} \left(-\frac{qt}{V} - (1-a) \right)$$

(C.6)

FIGURA 2.9.- FLUJO COMPLETAMENTE MEZCLADO SEGUIDO DE FLUJO PISTON(2ª Parte).

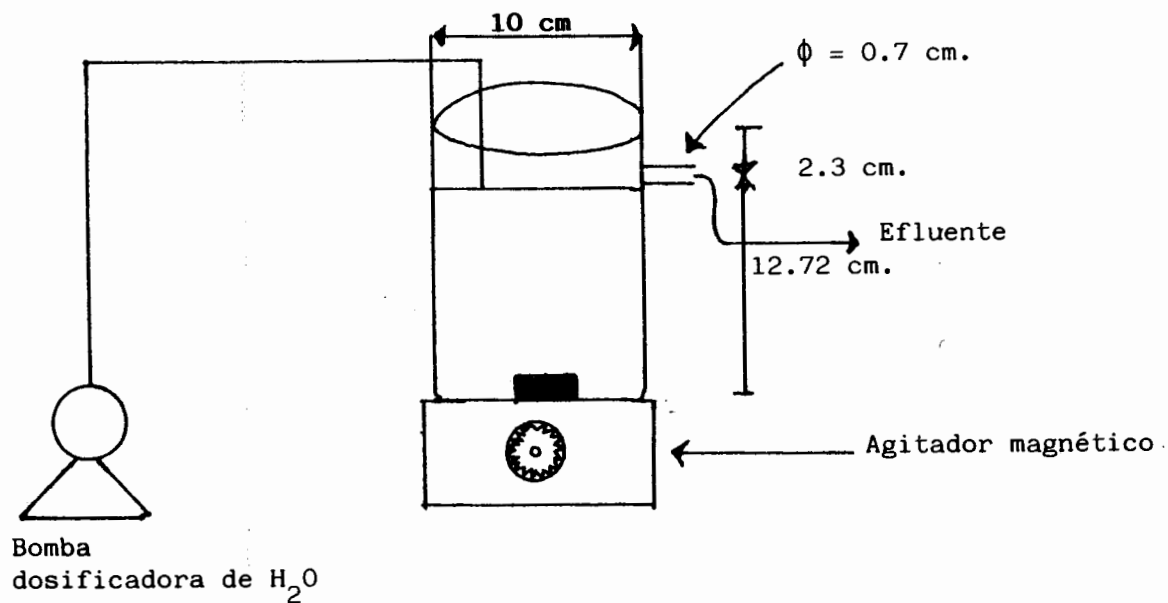


FIGURA 2.10-a REACTOR CON MEZCLADO ALTO

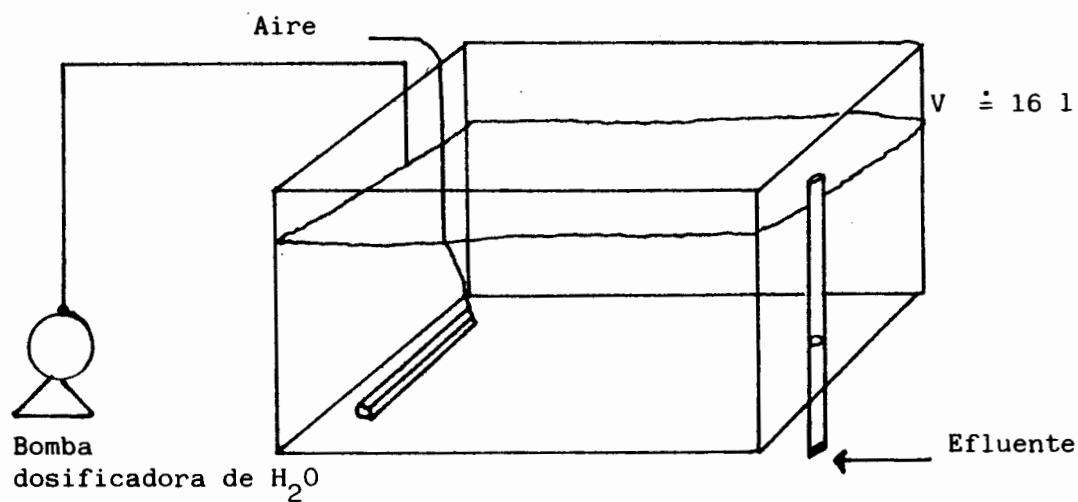


FIGURA 1.10-b REACTOR CON MEZCLADO MEDIO

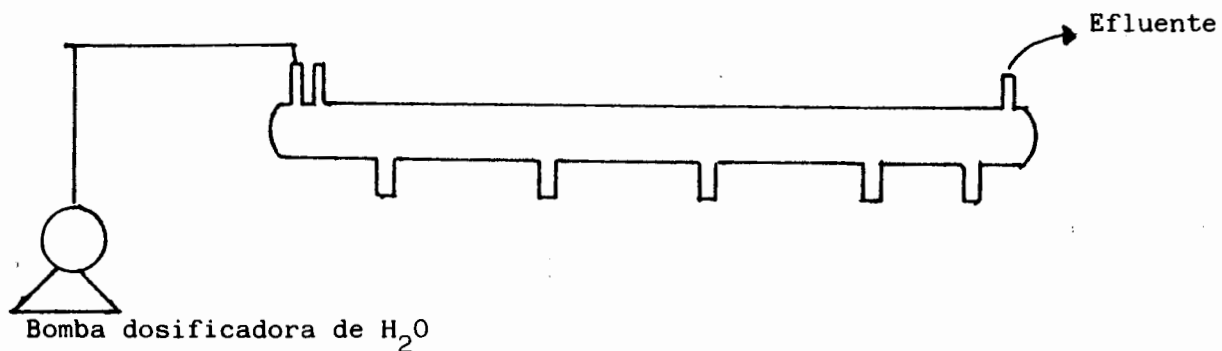


FIGURA 2.10-c REACTOR CON MEZCLA BAJA

FIGURA 2.10.- REACTORES PARA EXPERIMENTACION

PRACTICA No. 3 TRANSFERENCIA DE GASES

3.1. GENERALIDADES

En sistemas constituidos por fases líquidas y gaseosas, la transferencia de gases se realiza en cuatro etapas, tal como se ilustra en la figura 3.1. Cuando predomina la transferencia de la fase gaseosa a la fase líquida, el proceso se denomina absorción y desorción en caso contrario.

Para gases poco solubles la concentración de equilibrio se comporta conforme a la Ley de Henry, cuya expresión es la siguiente:

$$C = K_H \bar{P} \quad (3.1.)$$

donde:

- C = Concentración de equilibrio (mg/l)
- K_H = Constante de proporcionalidad (mg/l/atm)
- $\bar{P}$ = Presión parcial del gas (atm)

La velocidad de transferencia de gases se representa mediante la ecuación:

$$\frac{dc}{dt} = K_L a (C^* - C) \quad (3.2)$$

donde:

C^*, C , Concentraciones del gas en el líquido, bajo condiciones de saturación y al tiempo t respectivamente (mg/l).

$K_L a$, Coeficiente de transferencia del gas en el líquido. (min^{-1}).

Integrando la ecuación (2) para $(0, C_0)$ y (t, C) se obtiene:

$$\ln \frac{C^* - C}{C^* - C_0} = K_L a t \quad (3.3)$$

El coeficiente de transferencia de masa $K_L a$ es característico del sistema gas-líquido. Es decir, depende de propiedades fisicoquímicas del gas y del líquido, así como de la temperatura y flujo de gas, etc.

Para relacionar dos sistemas gas-líquido con características de temperatura, presión, flujo de gas y volumen de líquido iguales, pero composición de líquidos diferentes, se utilizan los coeficientes α y β , definidos mediante las ecuaciones siguientes:

$$\alpha = \frac{K_L a (1)}{K_L a (2)} \quad \beta = \frac{C_1^*}{C_2^*}$$

y entonces la transferencia de masa del sistema 2 es:

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_2 = \alpha K_L a (1) (\beta C_1^* - C_2) \quad (3.4)$$

La ecuación (3.4) es importante en la selección de equipo de transferencia de gases, el cual se haya especificado para un sistema gas-líquido particular. Así, por ejemplo, en la selección de aeradores para suministro de oxígeno, se parte de especificaciones de transferencia de oxígeno en agua destilada a 20°C y 760 mm Hg,

que son corregidas con los coeficientes α y β , obteniéndose las condiciones necesarias de transferencia para lograr el nivel de oxígeno deseado en tratamientos de agua residual.

3.2. OBJETIVOS

Estudiar la transferencia de oxígeno en agua y los factores físicos y químicos que influyen sobre la capacidad de oxigenación.

3.3. PROCEDIMIENTO

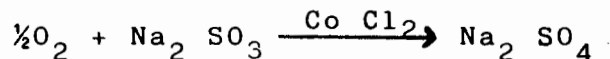
3.3.1. Experimento 1 - Determinación del coeficiente de transferencia de oxígeno (figura 3.2).

3.3.1.1. Coeficiente del agua destilada

3.3.1.1.1. Vierta agua destilada en el tanque de aereación. Determine la temperatura.

3.3.1.1.2. Determine el oxígeno disuelto utilizando el medidor de oxígeno y una botella adecuada.

3.3.1.1.3. Agregue 8 mg. de sulfito de sodio y 2 mg. de cloruro de cobalto por cada miligramo de oxígeno disuelto. Se efectúa la reacción siguiente:



3.3.1.1.4. Ajuste el flujo de aire a 100 ml/min.

3.3.1.1.5. Determine el oxígeno disuelto a los tiempos 0,2,4,6, 10,15,20,25 y 30 minutos.

3.3.1.1.6. Grafique t vs $\ln \frac{C^* - C}{C^* - C_0}$ para obtener $K_L a$.

NOTA: La concentración de saturación C^* se obtendrá procediendo de la forma siguiente: airear durante 1.5 horas 1 litro de agua destilada y determinación del oxígeno disuelto al término del tiempo mencionado.

3.3.1.2. Coeficiente de solución de cloruro de sodio.

3.3.1.2.1. Agregue 50 g. de cloruro de sodio por litro de agua destilada utilizada en el experimento 3.3.1.1. determinación del coeficiente del agua destilada.

3.3.1.2.2. Proceda igual que con los pasos 3.3.1.1.1. a 3.3.1.1.6.

3.3.2. Experimento 2 - Efecto del flujo de aire en la transferencia de oxígeno (figura 3.3.)

3.3.2.1. Desoxigene 10 litros de agua destilada agregando 8 mg. de sulfito de sodio y 2 mg. de cloruro de cobalto por cada mg. de oxígeno disuelto.

3.3.2.2. Vierta 6 veces 900 ml. del agua desoxigenada en vasos de precipitado de un litro.

3.3.2.3. En forma cualitativa o cuantitativa, ajuste el flujo de aire suministrado, de tal forma que $q_1 < q_2 < q_3 < q_4 < q_5 < q_6$.

3.3.2.4. A los 0, 5, 15 y 30 minutos, tome muestras para determinar oxígeno utilizando botellas para oxígeno disuelto de 300 ml. Después de cada medición de oxígeno disuelto, retorne el volumen muestreado cuidadosamente a fin de evitar aireación.

3.3.2.5. Determine el coeficiente de transferencia de oxígeno para cada condición de flujo.

3.3.3. Experimento 3 - Efecto del mezclado en la transferencia de oxígeno (figura 3.4.).

3.3.3.1. Coloque 500, 600, 700, 800, 900 y 1000 ml. del agua desoxigenada en el paso 3.3.2.1. en vasos de precipitado de 1000 ml.

3.3.3.2. Coloque los vasos en el aparato mezclador.

3.3.3.3. Mezcle a 100 rpm.

3.3.3.4. Determine oxígeno disuelto a los 0, 5, 15 y 30 minutos utilizando botellas de oxígeno disuelto (300 ml.). Des-

pués de cada medición, retorne el volumen muestreado cuidadosamente.

- 3.3.3.5. Determine el coeficiente de transferencia de oxígeno para cada caso.

3.4. GUIA PARA EVALUAR RESULTADOS

- 3.4.1. El efecto de la composición de las soluciones experimentadas (agua destilada y solución sintética), sobre la transferencia de oxígeno es determinada obteniendo los coeficientes α y β , donde:

$$\alpha = \frac{K_L a (2) \text{ (solución sintética)}}{K_L a (1) \text{ (agua destilada)}}$$

$$\beta = \frac{C_2^* \text{ (solución sintética)}}{C_1^* \text{ (agua destilada)}}$$

- 3.4.2. Comparando los coeficientes de transferencia de oxígeno obtenidos con el experimento 2, se verá el efecto del flujo de aire sobre el proceso de aireación.
- 3.4.3. Con el experimento 3 se tendrán diferentes gradientes de velocidad para las mismas condiciones de potencia de mezclado, ya que se varía el volumen en cada vaso y por tanto,

$$G_1 > G_2 > G_3 > G_4 > G_5 > G_6 \quad \text{ya que } V_1 < V_2 < V_3 < V_4$$

$$< V_5 < V_6$$

$$\text{donde: } G = \sqrt{\frac{P}{NV}} \quad \text{y} \quad P = \frac{k}{g_c} n^3 D^5$$

y se espera mayor oxigenación a medida que el gradiente de velocidad sea de mayor magnitud.

3.5. PREGUNTAS

- 3.5.1. Cómo considera que influye la temperatura sobre el coeficiente de oxígeno.
- 3.5.2. Investigue aplicaciones del coeficiente de transferencia de oxígeno.

3.6. EQUIPOS Y REACTIVOS

3.6.1. Equipo

- | | |
|---|--|
| - Rotámetro, soporte y pinzas para bureta | 2 |
| - Reactor de 10 litros | 2 |
| - Vasos de precipitado de 1 litro | 12 |
| - Vasos de precipitado de 250 ml. | 12 |
| - Difusores de aire | Para 2 reactores y cuando menos para 6 vasos de precipitado. |
| - Aparato prueba de jarras | 1 |
| - Polarógrafo para medir oxígeno disuelto | 1 |

Reactivos

- | | |
|--|---------|
| - Agua destilada | 20 lts. |
| - Solución sintética (50 g NaCl/l) | 10 lts. |
| - Sulfito de sodio + cloruro de cobalto
8 mg/ml de Na_2SO_3 | 1 lt. |
| 2 mg/ml de CoCl_2 | |

3.7. RESULTADOS

3.7.1. Experimento 1.

3.7.1.1. Coeficiente del agua destilada

Tiempo min.	Co ₂ (mg/l)	C* - C	$\ln \frac{C^* - C}{C^* - C_0}$
0			
2			
4			
6			
10			
15			
20			
25			
30			
35			

T = °C

C* = _____ mg/l

C* - Co = _____ mg/l

3.7.1.2. Coeficiente de solución de cloruro de sodio

Tiempo min.	Co ₂ (mg/l)	C* - C	$\ln \frac{C^* - C}{C^* - C_0}$
0			
2			
4			
6			
10			
15			
20			
25			
30			

3.7.2 Experimento 2.

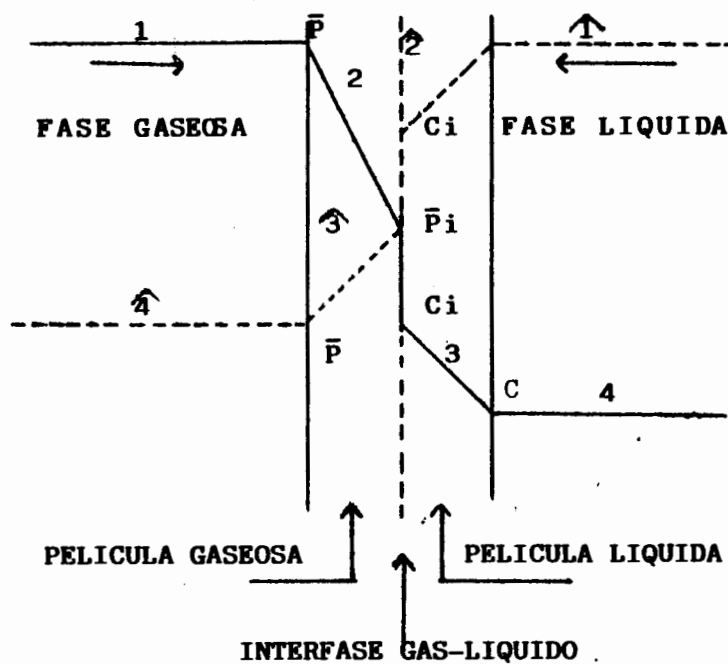
Flujode aire ml/min Tiempo min.	Concentración de oxígeno disuelto mg/l					
	$q_1 =$	$q_2 =$	$q_3 =$	$q_4 =$	$q_5 =$	$q_6 =$
0						
5						
15						
30						

$C^* =$ _____ mg/l

3.7.3 Experimento 3.

Volumen ml. Tiempo min.	Concentración de oxígeno disuelto mg/l					
	500	600	700	800	900	1000
0						
5						
15						
30						

$C^* =$ _____ mg/l



$\bar{P}$; Presión parcial del gas (atm).

$\bar{P}_i$; Presión parcial del gas en la interfase (atm).

C ; Concentración del gas en la fase líquida (mg/l).

C_i ; Concentración del gas en la interfase (mg/l).

1 ; Etapa del proceso de absorción.

$\hat{1}$; Etapa del proceso de desorción.

FIGURA 3.1.- REPRESENTACION DEL MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE GASES.

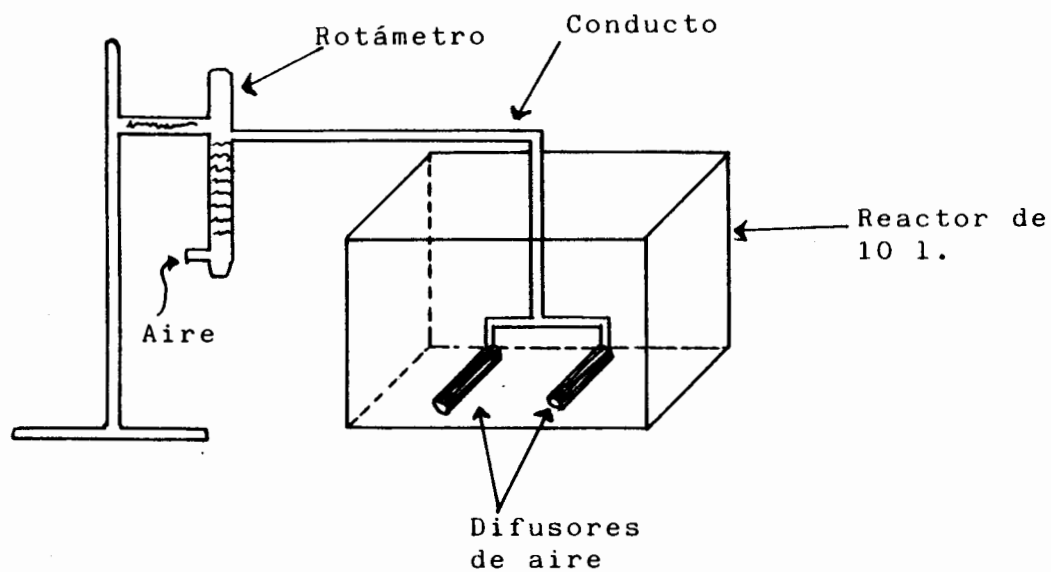


FIGURA 3.2.- DISPOSITIVO EXPERIMENTO 1

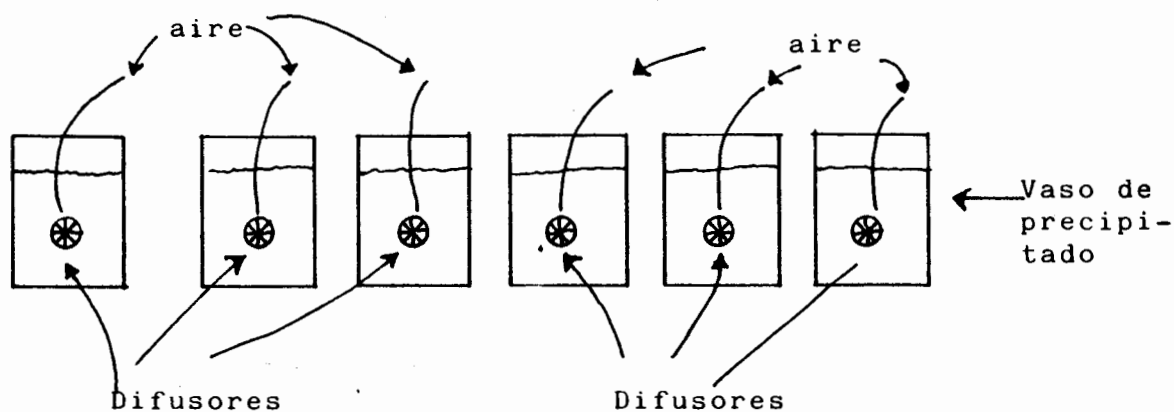


FIGURA 3.3.- DISPOSITIVO EXPERIMENTO 2

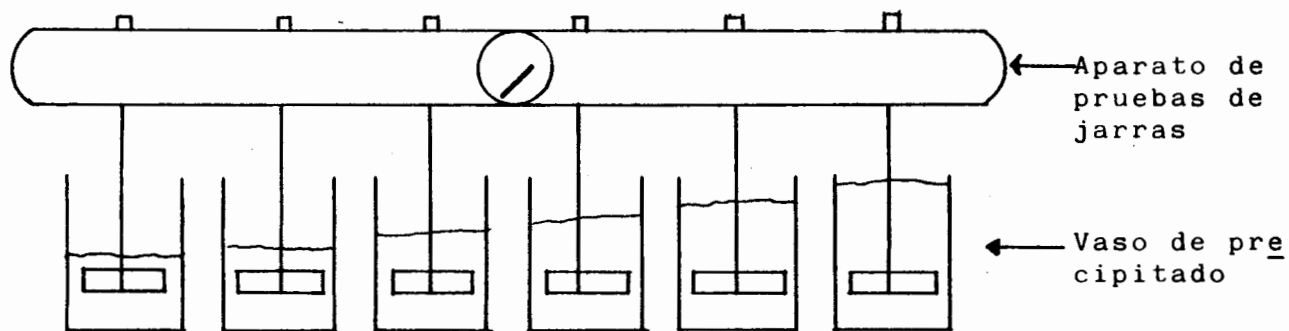


FIGURA 3.4.- DISPOSITIVO EXPERIMENTO 3

PRACTICA No. 4 INFLUENCIA DEL MEZCLADO SOBRE EL PROCESO DE FLOCULACION

4.1. GENERALIDADES

La coagulación y floculación son procesos importantes en el campo de tratamiento del agua, cuyo objetivo es la adecuación de la calidad del agua de la fuente al uso. Dichos procesos son aplicados para remover partículas coloidales orgánicas y/o inorgánicas causantes de la turbiedad o color en las aguas naturales. Se entiende por coagulación la desestabilización de las partículas coloidales mediante procesos de naturaleza física y química, que permiten su precipitación. La floculación induce la formación de conglomerados sedimentables de partículas coloidales al establecerse puentes químicos haciendo propicia la atracción eléctrica entre las partículas.

Las sustancias coagulantes de mayor uso son las sales de aluminio (sulfato) y de hierro (cloruro, sulfato). En ocasiones se requiere la adición de sustancias conocidas como "ayuda coagulantes" para mejorar el proceso.

Los factores a considerar en el diseño de dispositivos floculadores son: a) calidad del agua a tratar; b) pH y dosis de coagulante y ayuda coagulante que permitan lograr máxima eficiencia de remoción de partículas y/o mejor economía del proceso; c) hidráulica de la floculación; d) tiempo de retención para mezclas rápida y lenta; e) potencia para agitación.

4.2. OBJETIVO

Determinar la efectividad del proceso de floculación en la remoción de partículas suspendidas bajo condiciones diferentes de mezclado y tiempos de retención.

4.3. ECUACIONES

4.3.1. Gradiente hidráulico:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

P, Potencia $[\text{g} - \text{cm/s}]$

μ , Viscosidad $[\text{g/cm} - \text{s}]$

V, Volumen $[\text{cm}^3]$

4.3.2. Potencia:

$$1) \quad P = F D v = C_D F_I v = C_D \rho A v^3$$

$$2) \quad v = v_i - v_f = \frac{(1-k) 2 \pi r n}{60} = \frac{6.28}{60} (1-k) r n = 0.1 (1-k) r n$$

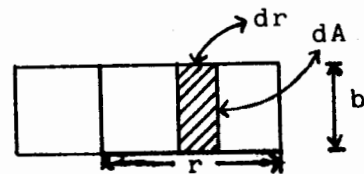
$$v_i = k v_i \quad (\text{cm/s})$$

$$v_i = 2 \pi r n / 60 \quad (\text{cm/s})$$

$$3) \quad P = C_D \frac{\rho}{2} A (0.1)^3 \left[(1-k) r n \right]^3 =$$

$$= 11.48 \times 10^{-4} C_D \left[(1-k) n \right]^3 r^3 A$$

$$4) \quad r^3 A = \int_0^r r^3 dA = b \int_0^r r^3 dr = \frac{1}{4} b r^4$$



Paleta

$$5) \quad P = 2.88 \times 10^{-4} C_D \frac{\rho}{2} \left[(1-k) n \right]^3 b r^4$$

$$\left[\frac{g - \text{cm}^3}{s^3} \right]$$

$$6) \quad P = 2.94 \times 10^{-7} C_D \frac{\rho}{2} \left[(1-k) n \right]^3 b r^4$$

$$\left[\frac{g - \text{cm}^3}{s} \right]$$

SIMBOLOGIA:

P ,	Potencia
F _o ,	Fuerza de arrastre
F _I ,	Fuerza de impulsión
v,	Velocidad relativa del fluido
vi, vf,	Velocidad del impulsor y fluido respectivamente
n,	Velocidad de rotación
k = vf/vi	
C _D ;	Coefficiente de arrastre
A,	Area de contacto paleta-impulsor
b,	Ancho paleta
r,	Radio paleta

4.3.3. Régimen de flujo:

$$\text{No. de Reynolds } Re = \frac{D^2 n \rho}{\mu}$$

4.4. CALCULOS

4.4.1. Datos:

$$\begin{aligned} S &= 1 \text{ g/cm}^3 \\ \mu &= 1.31 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2\text{-s} \\ D &= 7.62 \text{ cm} \\ b &= 2.54 \text{ cm} \end{aligned}$$

De literatura:

$$\begin{aligned} CD &= 1.80 \\ k &= 0.25 \quad \left\{ \text{Paletas} \right\} \\ v_i, &10 \text{ a } 100 \text{ cm/s} \\ G, &20 - 75 \text{ s}^{-1} \\ T_R, &15 - 30 \text{ min} \end{aligned}$$

4.4.2. Ecuaciones simplificadas

$$\begin{aligned} - \text{ Velocidad de impulsión } v_i &= \frac{6.28}{60} = 0.1 \text{ n cm/s} \\ - \text{ Potencia } P &= 2.94 \times 10^{-7} (1.8) (1) (0.75)^3 (2.54)(7.62/2)n^3 \\ P &= 11.94 \times 10^{-7} \text{ n}^3 \text{ g - cm/s} \\ - \text{ Gradiente hidráulico } G &= \sqrt{981 P / 1.31 \times 10^{-2} V} \\ G &= \sqrt{74900 P / V} \text{ s}^{-1} \\ - \text{ Número de Reynolds } Re &= \frac{(7.62)^2 (1) n}{(60)(1.31 \times 10^{-2})} = 74 \text{ n} \end{aligned}$$

4.4.3. Cálculos

<u>n rpm</u>	<u>v_i cm/s</u>	<u>(P $\frac{g}{cm^3}$ -cm/s)</u>	<u>Re</u>
10	1.05	0.120	740
20	2.09	0.956	1480
30	3.14	3.220	2220
40	4.19	7.640	2960
50	5.23	14.920	3700
60	6.28	25.790	4440
80	8.37	61.130	5920
100	10.47	119.400	7400

GRADIENTE HIDRAULICO G en S⁻¹

<u>V_{cm}³</u>	<u>n=10</u>	<u>n=20</u>	<u>n=30</u>	<u>n=40</u>	<u>n=50</u>	<u>n=60</u>	<u>n=80</u>	<u>n=100</u>
500	4.24	11.96	21.92	33.83	47.23	62.15	92.74	135.74
600	3.87	10.92	20.08	30.89	43.13	59.57	87.40	122.04
700	3.58	10.11	18.53	28.60	40.02	52.54	80.89	113.02
800	3.35	9.46	17.54	26.74	37.34	49.14	75.24	105.73
900	3.21	8.92	16.40	25.22	35.21	46.30	71.28	99.64
1000	3.00	8.46	15.56	23.93	33.28	43.95	67.60	94.57

4.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.5.1. Dosis Optima de Coagulante

4.5.1.1.- Vierta sendos litros de la solución problema en 6 vasos de precipitado.

4.5.1.2.- Agregue solución de sulfato de aluminio para tener lo siguiente:

Vaso :	1	2	3	4	5	6
Dosis mg/l:	20	30	40	60	80	100

4.5.1.3.- Agite a 100 rpm durante 1 minuto y a 60 rpm durante 15 minutos.

4.5.1.4.- Permita sedimentación 5 min. y determine turbiedad.

4.5.1.5.- Determine la turbiedad inicial.

4.5.1.6.- Obtenga la dosis óptima.

4.5.2.- Influencia del mezclado

4.5.2.1.- Agregue solución problema tal que se tenga lo siguiente:

Vaso	1	2	3	4	5	6
Volumen ml	750	800	850	9000	950	1000

4.5.2.2.- Dosifique sulfato de aluminio 1 ml = 10 mg a dosis óptima,

4.5.2.3.- Agite a 100 rpm durante un minuto y a 60 rpm 15 minutos.

4.5.2.4.- Permita sedimentación 5 min.

4.5.2.5.- Determine turbiedad residual.

4.5.2.6.- Grafique gradiente hidráulico contra % de remoción.

4.5.3.- Influencia del tiempo de retención.

4.5.3.1.- Adicione 1000 ml. a cada uno de seis vasos de precipitado de un litro.

4.5.3.2.- Proceda igual que con 4.5.2.2.

4.5.3.3.- Agite a 100 rpm durante 1 minuto y posteriormente a 60 rpm.

4.5.3.4.- A los 5,10,15,20,25 y 30 min. retire cada vez uno de los vasos.

4.5.3.5.- Permita en cada caso la sedimentación durante 5 minutos, después de la cual se tomará la turbiedad residual.

4.5.3.6.- Grafique tiempo de retención contra % de remoción.

4.6. EQUIPO Y REACTIVOS

4.6.1.- Equipo

- . Aparatos de prueba de jarras. 2
- . Vasos de precipitado de 1 lts. 12
- . Buretas de 50 ml. 2
- . Probetas de 1 lts. 2
- . Matraz aforado de 1 lts. 2

4.6.2.- Reactivos

- . Solución de sulfato de aluminio.
- . 1 ml. = 10 mg. (1 lts).
- . Solución experimental 20 lts.
20 g de caolín + 10 g de leche en polvo + 10 g de Na_2CO_3 + 10 g de CaCl_2

4.7.- RESULTADOS

4.7.1.- Dosis óptima

VASO	1	2	3	4	5	6
DOSIS mg/l	20	30	40	60	80	100
TURBIEDAD (UNT)						

4.7.2.- Influencia del mezclado

VOLUMEN ml.	GRADIENTE S-1	TURBIEDAD RESIDUAL (UNT)	% DE REMOCION DE TURBIEDAD
750	51.0		
800	49.0		
850	47.5		
900	46.0		
950	45.0		
1000	44.0		

To= _____ UNT

θ = 15 min.

n = 60 rpm.

4.7.3.- Influencia del tiempo de retención

TIEMPO DE RETENCION	TURBIEDAD RESIDUAL (UNT)	% DE REMOCION DE TURBIEDAD
5 min		
10 min		
15 min		
20 min		
25 min		
30 min		

$$G = 44 \text{ S}^{-1}$$

$$n = 60 \text{ rpm.}$$

$$V = 1000 \text{ ml.}$$

PRACTICA NO. 5 ADSORCION

5.1.- Generalidades

La adsorción es la operación unitaria en la cual sustancias disueltas en fases líquidas o gaseosa son removidas por partículas sólidas adsorbentes, las cuales son dispersadas en la solución o se encuentran formando el empaque de columnas para filtración.

En Ingeniería Ambiental la adsorción es utilizada para remover diversos contaminantes, entre los que se cuenta materia orgánica soluble, color, detergentes, fenoles, pesticidas y metales pesados. Los materiales adsorbentes, comúnmente utilizados son el carbón activado, la gel de sílica y diversas arcillas como la caolinita o la mormorinolita.

Para dimensionamiento de dispositivos de adsorción se requiere conocer: (a) las condiciones de transferencia de masa a régimen de flujo intermitente o continuo, (b) las variaciones de concentración del soluto en el líquido o gas a tratar, (c) la dimensión de las

partículas del material adsorbente y su capacidad de adsorción, (e) la influencia de la temperatura y pH sobre la transferencia de masa.

Considerando la siguiente reacción y régimen de flujo intermitente:



donde:

S ; Solute

A ; Adsorbente

S-A ; Complejo soluto-adsorbente.

La velocidad de transferencia será una función de las concentraciones del soluto y/o adsorbente, pudiendo tener alguna de las siguientes expresiones:

$$\frac{d(S-A)}{dt} = k_1 (S) \quad (5.2)$$

$$\frac{d(S-A)}{dt} = k_1 (S) - k_2 (S-A) \quad (5.3)$$

$$\frac{d(S-A)}{dt} = k_1 (S) (A) \quad (5.4)$$

$$\frac{d(S-A)}{dt} = k_1 (S) (A) - k_2 (S-A) \quad (5.5)$$

La determinación experimental de los coeficientes permite establecer la cinética de la transferencia de masa en el proceso de adsorción.

En el equilibrio la cinética de la transferencia de masa es descrita mediante ecuaciones empíricas, conocidas como isothermas de adsorción, entre las cuales se cuentan las siguientes:

a) Isotherma de Brunawer, Emmett y Teller (BET)

$$q_e = \frac{BCQ^\circ}{(C_s - C) [1 + (B-1)(C/C_s)]} \quad (5.6)$$

b) Langmuir

$$q_e = \frac{Q^\circ bC}{(1+bC)} \quad (5.7)$$

c) Freundlich

$$q_e = KC^n \quad (5.8)$$

donde:

q_e ; miligramos de soluto adsorbidos por unidades de peso del adsorbente, en equilibrio con C.

Q^0 ; miligramos de soluto adsorbidos por unidad de peso del adsorbente, cuando el soluto forma una capa monomolecular sobre la superficie de sólido.

C_s ; Concentración de saturación del soluto (mg/l)

C ; Concentración del soluto en equilibrio con q_e (mg/l)

B, k, n ; Constantes.

Las formas linealizadas de las ecuaciones 5.6, 5.7 y 5.8 se representan gráficamente en la figura 5.1.

Cuando el fluido es alimentado continuamente a una columna empacada con material adsorbente la variación de la concentración en el efluente respecto al tiempo sigue un comportamiento similar al mostrado en la figura 5.2

El punto de ruptura marca el límite del cual las variaciones de la concentración efluente son de mayor magnitud al transcurrir el tiempo y, finalmente, llegan al punto de agotamiento de la capacidad de adsorción del material empacado.

La determinación del coeficiente de transferencia de masa (k_a) para torres empacadas se efectúa experimentalmente, bajo condiciones controladas de altura de empaque (Z), área transversal de flujo (A), masa de solvente por unidad de tiempo y área, tiempo (t) y volumen acumulado del efluente por unidad de área (w); la expresión que define el coeficiente de transferencia de masa es:

$$k_a = \frac{F/A}{Z} \int_{C_r}^{C_a} \frac{dC}{C - C_e} \quad (5.9)$$

donde:

k_a	; Coeficiente de transferencia de masa,	$[M t^{-1} L^{-3}]$
F	; Masa de solvente por unidad de tiempo,	$[M t^{-1}]$
A	; Area transversal de flujo	$[L^2]$
Z	; Altura de empaque	$[L]$
C	; Masa de soluto/vol. de solventes en el tiempo	$[M/V]$
C_e	; Masa de soluto/vol. de solvente, en equilibrio con la masa adsorbida	$[M/V]$
C_r, C_a	; Concentraciones de ruptura y agotamiento respectivamente.	

Las concentraciones de ruptura y agotamiento son determinadas también experimentalmente permitiendo así definir la curva de operación que se muestra en la figura 5.3.

5.2. OBJETIVO

Estudiar la adsorción de azul de metileno con gel de sílica y determinar parámetros de diseño para adsorción a régimen de flujo intermitente y continuo.

5.3. PROCEDIMIENTO

5.3.1- CINETICA DE ADSORCION

5.3.1.1- En vaso de precipitado de 1 lt. coloque sílica gel de diferente tamaño según lo siguiente:

VASO	MALLA		RANGO DE TAMAÑO (mm)
	Pasa	Retiene	
1	16	30	0.59 - 1.19
2	40	50	0.297 - 0.42
3	50	70	0.210 - 0.297

- 5.3.1.2.- Introduzca una cápsula imantada a cada uno de los vasos, agregue 1 lt. de solución de azul de metileno con 32 mg/l de concentración, mezcle utilizando un agitador magnético. Procure que el grado de agitación sea lo más similar posible.
- 5.3.1.3.- Tome muestras de 10 ml. a los 5,10,15,20,25,30,45,60,75, y 90 minutos.
- 5.3.1.4.- Determine el porciento de transmitancia para posteriormente, usando la curva de calibración*, obtener la concentración de azul de metileno. Retorne el volumen tomado una vez haya determinado el % de transmitancia.
- 5.3.1.5.- Compruebe el ajuste de los resultados al modelo matemático siguiente:

$$\frac{dq}{dt} = kq \quad (1)$$

donde: $q = (C_o - C)/A$; mg/l de soluto transferidas por g/l de gel de sílice.

C_o, C ; Concentraciones de azul de metileno al tiempo 0 y t respectivamente mg/l.

A_c ; Concentración de gel de sílice g/l

Como $q = (C_o - C)/A_c$ entonces

$$\frac{dq}{dt} = - \frac{1}{A_c} \frac{dC}{dt} = kq = k \frac{C_o - C}{A_c}$$

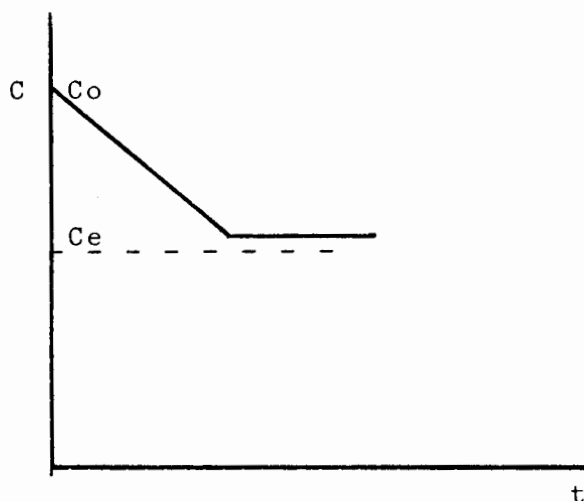
* La curva de calibración se obtiene graficando en papel semilogarítmico de 2 ciclos las concentraciones en mg/l (32,16,8, 3.2, 1.6, 0.8, 0.4 y 0.16) contra % de transmitancia a 690 micrómetros.

Realizando transformaciones e integrando se tiene:

$$\int_C^{C_e} \frac{dc}{C_0 - C} = k \int_0^t t$$

$$\ln \frac{C_0 - C_e}{C_0 - C} = kt \quad (3)$$

En la figura 3, C_e es la concentración de equilibrio, la cual se puede obtener como se muestra en el diagrama siguiente:



5.3.1.5.- ¿Qué influencia tiene el tamaño de la gel de sílice sobre la adsorción?.

5.3.2.- EQUILIBRIO DE ADSORCION

5.3.2.1.- Pese 0.5, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 y 0.7 g. de gel de sílice, del tamaño comprendido entre 0.59 y 1.19 mm.

5.3.2.2.- Vierta las cantidades anteriores en botellas para oxígeno disuelto y agregue 100 ml. de azul de metileno de concentración igual a 32 mg/l.

5.3.2.3.- Mezcle las soluciones durante 48 horas, al término de las cuales se determinará la concentración residual de azul de metileno.

5.3.2.4.- Determine las ecuaciones de Freundlich, Lagmuir y BET. (Es conveniente ajustar la curva Ac vs Ce).

5.3.2.5.- Grafique q_e vs C_e .

5.3.3.- ADSORCION A FLUJO CONTINUO

5.3.3.1.- Pese gel de sílice (tamaño de 0.59 a 1.19 mm.) en cantidad suficiente para empacar la columna. El dispositivo experimental se esquematiza en la figura 5.4.

5.3.3.2.- Empaque la columna. Calibre la bomba peristáltica para tener una carga hidráulica de 25 ml/min/cm².

5.3.3.3.- Dosifique la solución de azul de metileno con 32 mg/l de concentración.

5.3.3.4.- Obtenga la concentración de azul de metileno a los tiempos siguientes: 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90, 105 y 120 minutos.

5.3.3.5.- Grafique tiempo contra concentración de azul de metileno y obtenga las concentraciones de ruptura y agotamiento.

5.3.3.6.- Grafique la línea de operación en el mismo papel en el que graficó la curva de equilibrio (paso 5.3.2.5).

5.3.3.7.- Determine el coeficiente de transferencia de masa.

5.4.- EQUIPO Y REACTIVOS

5.4.1.- Equipo

- 3 agitadores magnéticos.
- Agitador para mezcla continua.
- Cribador y cribas números 16,30,40,50 y 70.
- Espectronic 20.
- Vidriería.
- Bomba peristáltica.
- Balanza analítica.

5.4.2.- Reactivos

- 10 litros de solución de azul de metileno, con 32 mg/l de concentración.
- Sílica gel (100 g)

5.5. RESULTADOS

5.5.1.- CINETICA DE ADSORCION

RANGO (mm) Tiempo (min)	CONCENTRACION DE A. M. (mg/l)		
	0.59 - 1.19	0.297 - 0.42	0.210 - 0.297
0			
5			
10			
15			
20			
25			
30			
45			
60			
75			
90			

5.5.2.- EQUILIBRIO DE ADSORCION

Gel de Sílice		CONCENTRACIONES DE A.M. (mg/l)
g	g/l	
0.05	0.5	
0.10	0.1	
0.20	2.0	
0.30	3.0	
0.40	4.0	
0.50	5.0	
0.60	6.0	
0.70	7.0	

Cs = 42 g/l

5.5.3.- ADSORCION A FLUJO CONTINUO

TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE A. M. (mg/l)
0	
2	
5	
10	
15	
20	
25	
30	
45	
60	
75	
90	
105	
120	

Sílica gel

V = 10 ml.

h = 10 cm.

$\rho_{\text{aparente}} = \text{g/cm}^3$

masa = g

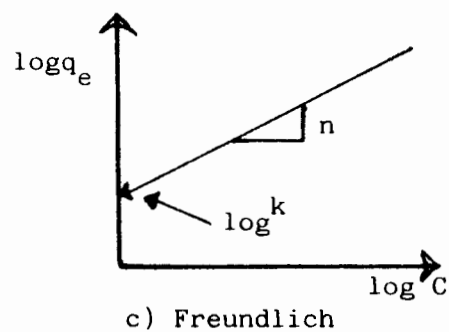
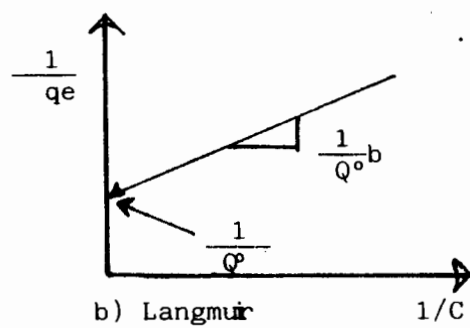
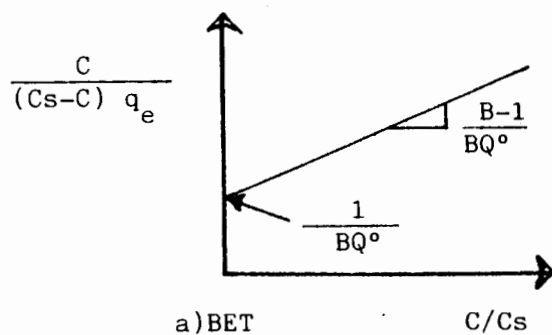


FIGURA 5.1.- ISOTERMAS DE ADSORCION MAS COMUNES.

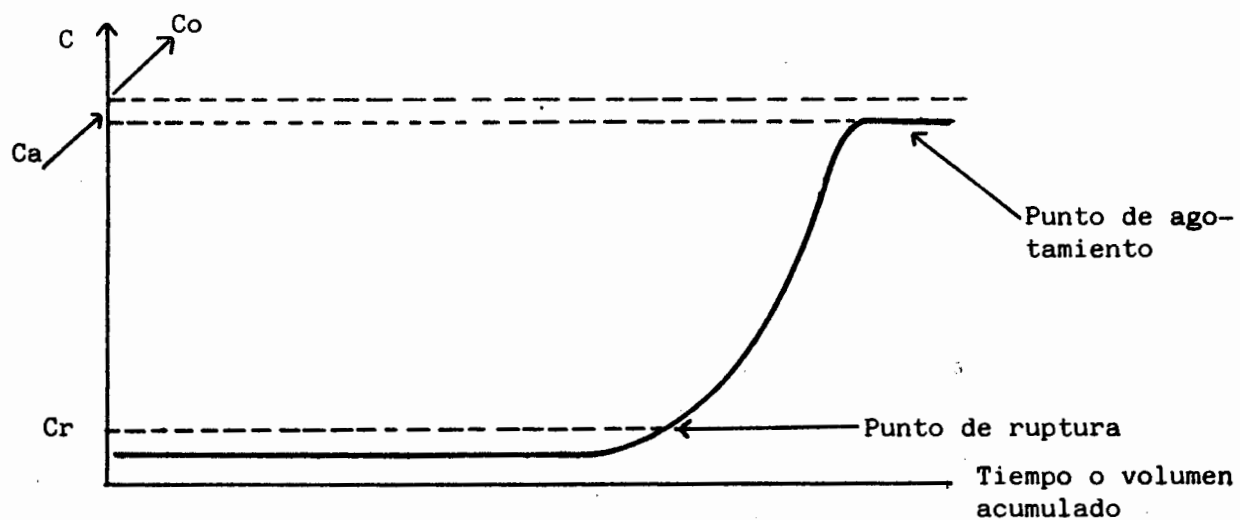


FIGURA 5.2.- VARIACION DE LA CONCENTRACION DEL SOLUTO EN EL TIEMPO. ADSORCION A FLUJO CONTINUO.

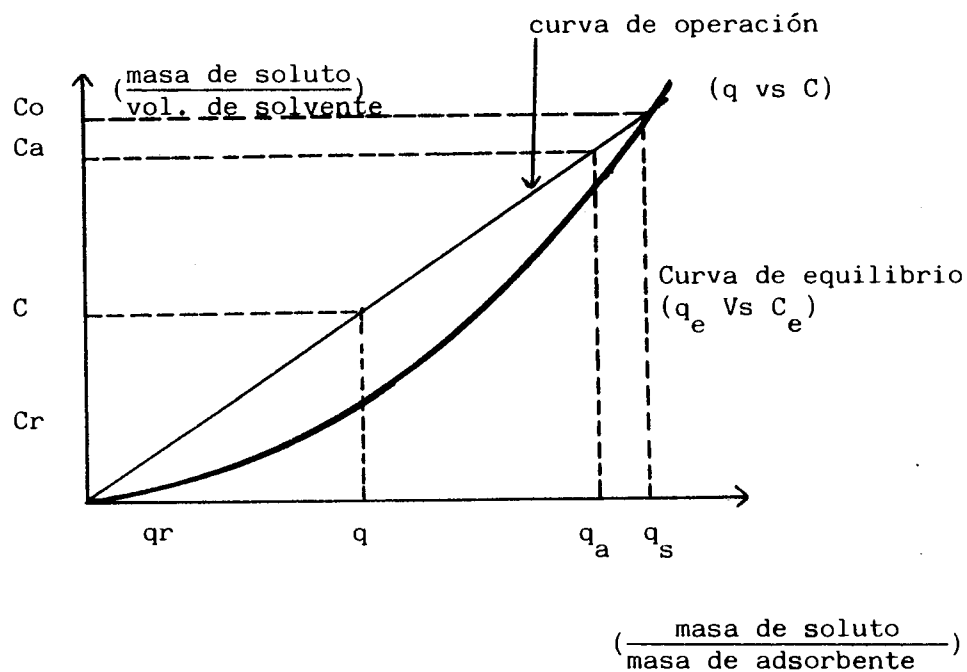
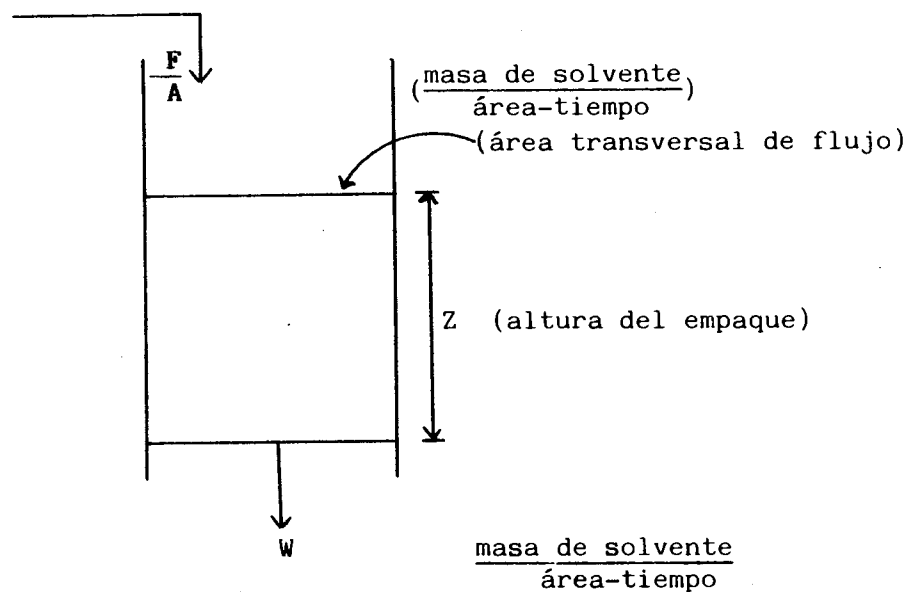


FIGURA 5.3.- CURVAS DE EQUILIBRIO Y OPERACION, EN ADSORCION A FLUJO CONTINUO.

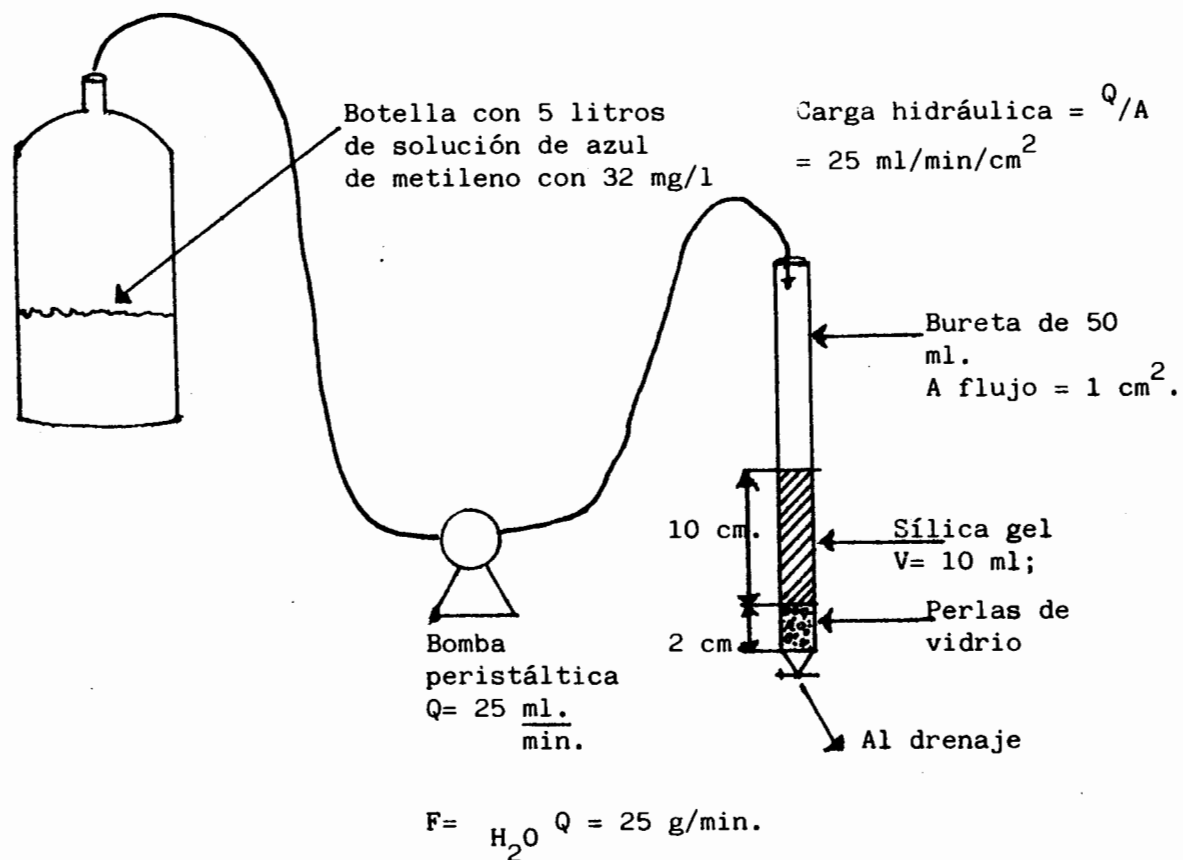


FIGURA 5.4.- DISPOSITIVO PARA EL EXPERIMENTO, DE ADSORCION A FLUJO CONTINUO

PRACTICA NO. 6 INTERCAMBIO IONICO

6.1.- GENERALIDADES

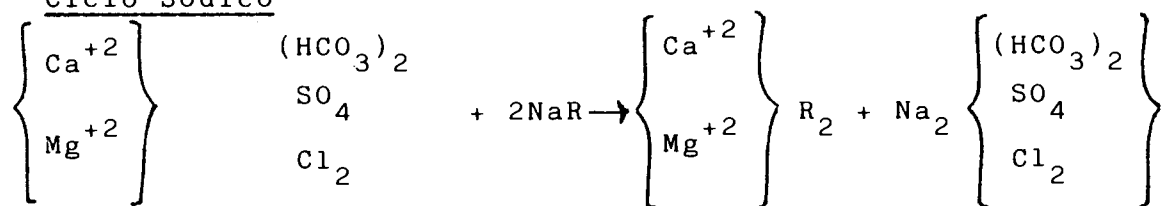
El proceso de intercambio iónico tiene por objeto la remoción de iones contenidos en soluciones líquidas, como son los casos de aguas naturales y efluentes de tratamientos para potabilización o reuso.

Los materiales de intercambio más utilizados para el tratamiento de agua son las resinas sintéticas, aunque existen otros materiales con propiedades intercambiadoras como son arcillas, humus, celulosa, proteínas, carbón activado, coque, lignina y óxidos metálicos.

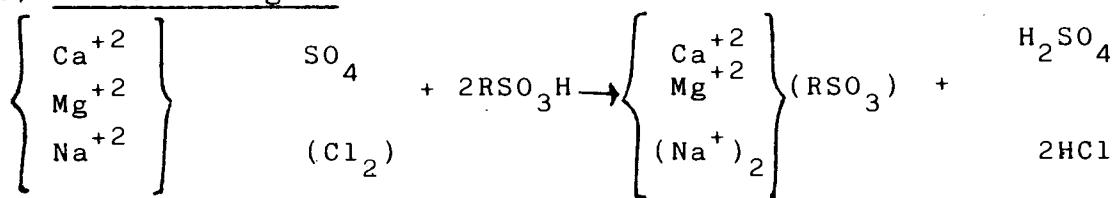
Los tipos más usados de intercambiadores son los catiónicos y los aniónicos; los primeros intercambian cationes de calcio, magnesio, manganeso, hierro, plomo, cromo, etc.; y los segundos, aniones como cloruros, nitratos, fosfatos, sulfatos y carbonatos. Algunas reacciones que se efectúan en el intercambio iónico se presentan a con

tinuación: Intercambio catiónico

a) Ciclo Sódico

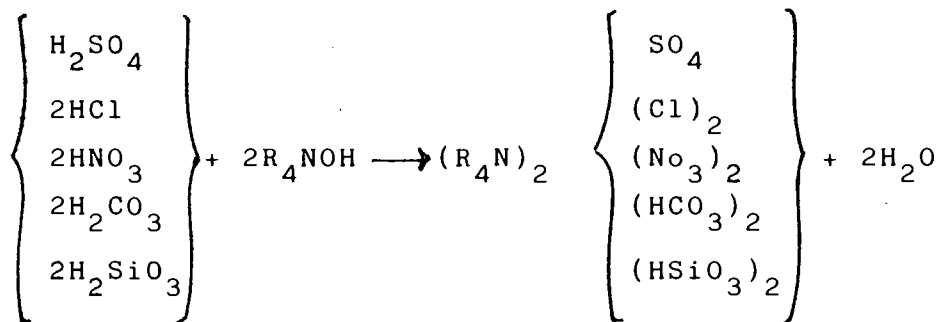


b) Ciclo Hidrógeno

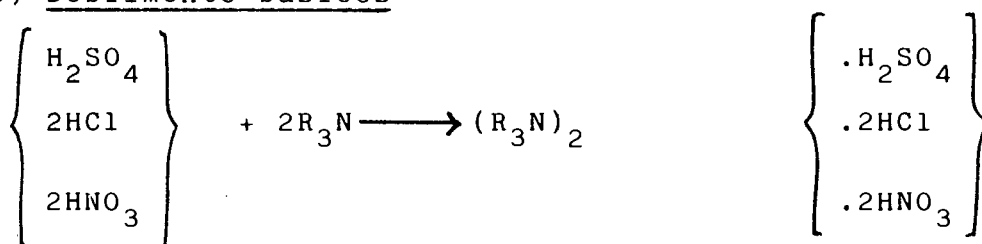


Intercambio Aniónico

a) Fuertemente básicos



b) Débilmente básicos

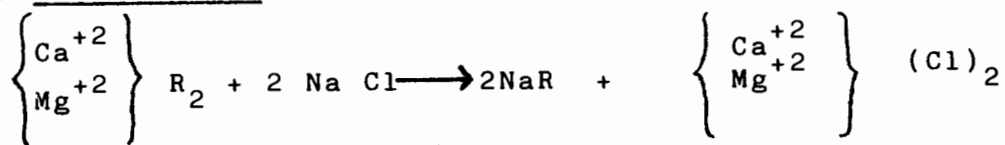


Sal hidratada del intercambiador.

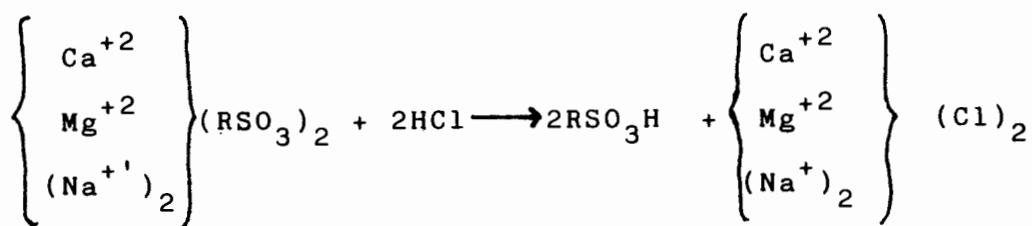
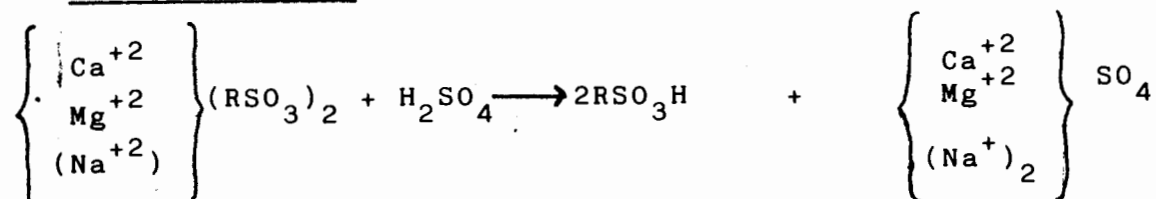
Una vez que la capacidad del intercambio ha sido agotada, es necesario regenerar el material intercambiador, aplicando sustancias específicas según sea el caso. Las reacciones que se efectúan en la regeneración son:

Intercambio Catiónico

a) Ciclo Sódico

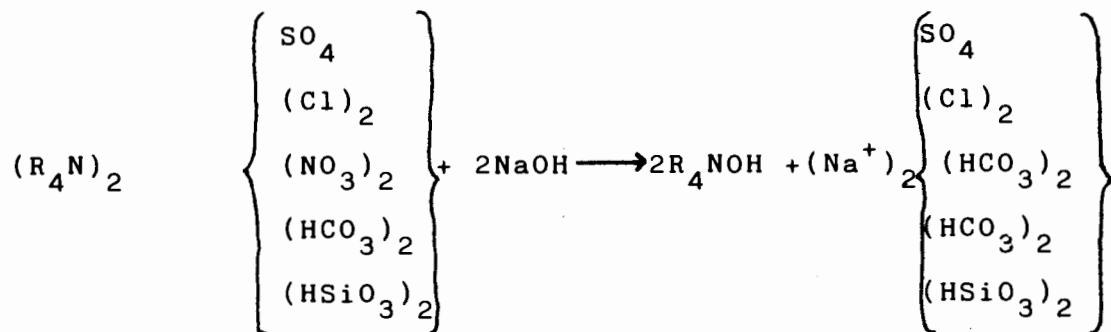


b) Ciclo hidrógeno

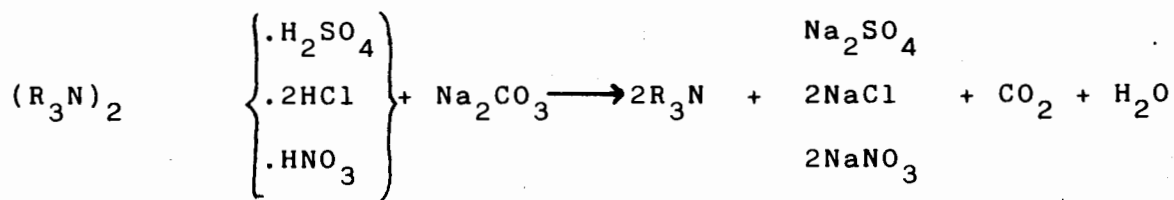


Intercambio Aniónico

a) Fuertemente básico



b) Débilmente básico



Para el diseño de equipo de intercambio iónico se deben considerar los factores siguientes: a) velocidad de flujo, b) calidad del agua influente, c) calidad del agua requerida, en el efluen-

te, d) capacidad de intercambio, e) características hidráulicas, f) período de operación hasta regeneración, g) tipo de operación: manual o automática, h) número de unidades de intercambio para hacer flexible la operación, i) dosis de sustancia regenerante.

La capacidad de intercambio, y en consecuencia de regeneración, dependen del tipo y propiedades físicas del material intercambiador; así en las tablas 6.1 y 6.2 se dan características para intercambiadores catiónicos utilizados en el ablandamiento del agua.

La velocidad de intercambio iónico depende de: a) difusión de los iones del seno del líquido a la superficie del intercambiador, b) difusión de los iones en el sólido hasta los sitios de intercambio, c) intercambio de los iones, d) difusión de los iones intercambiados a través del sólido, e) difusión de los iones intercambiados del sólidos al seno del líquido.

Para reactores de tipo intermitente la velocidad de decremento de C se puede expresar mediante:

$$-\frac{dC}{dt} = k_f \frac{a^0}{V} (C - C_e) \quad (6.1)$$

donde:

k_f ; coeficiente de transferencia

$$[M t^{-1} L^{-2}]$$

a^0 ; área de transferencia de masa

$$[L^2]$$

V; volumen de solución en el reactor

$$[L^3]$$

C; concentración dependiente del tiempo

$$[M L^{-3}]$$

C_e ; concentración de equilibrio

$$[M L^{-3}]$$

Para columnas empacadas se considera la ecuación siguiente:

$$Q \frac{dC}{dm} = \frac{k^0 \alpha}{\rho_p C_0} (C - C_e) \quad (6.2)$$

Q	; Flujo	$[L^3 t^{-1}]$
Co	; Concentración influente	$[ML^{-3}]$
C	; Concentración de solución	$[ML^{-3}]$
Ce	; Concentración de equilibrio	$[ML^{-3}]$
m	; Masa de resina en la columna	$[M]$
k°	; Coeficiente de transferencia global	$[Mt^{-1}L^{-2}]$
α	; Area superficial de la resina por unidad de volumen de empaque	$[L^3/L^2] = [L^{-1}]$
ρ_p	; Densidad de la resina empacada	$[ML^{-3}]$

Las formas integradas de las ecuaciones 6.1 y 6.2 son respectivamente las siguientes:

$$\ln \frac{Co - Ce}{C - Ce} = \frac{kfa}{V} t \quad (6.3)$$

$$m = \frac{\rho_p Co Q}{k^\circ \alpha} \int_{C_1}^{C_2} \frac{dC}{(C - Ce)} \quad (6.4)$$

6.2.- OBJETIVOS

Determinar los coeficientes de transferencia de masa en el intercambio iónico, para sistemas intermitente y continuo. Regenerar la resina utilizada.

6.3.- PROCEDIMIENTO

6.3.1.- Curva de Equilibrio

6.3.1.1.- Ponga 1,3,5,10,15, y 20 g de resina catiónica ciclo so dio en vasos de precipitado de 1000 ml.

6.3.1.2.- Agregue 1000 ml. de solución de ión calcio (Ca^{+2}) con

una concentración cercana a 15 meq/l (300 mg/l de Ca^{+2} ó bien 833 mg/l de CaCl_2).

6.3.1.3.- Mezcle a 100 rpm durante 90 minutos. Utilice el aparato para prueba de jarras.

6.3.1.4.- Permita sedimentación.

6.3.1.5.- Tome los volúmenes de muestra que se indican a continuación.

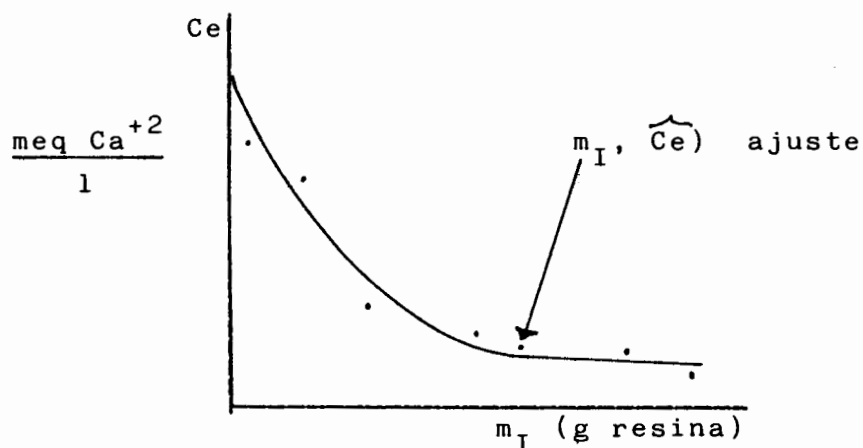
g de resina	1	3	5	10	15	20
vol. muestra ml.	5	5	10	10	25	25

6.3.1.6.- A cada muestra de 25 ml. o alicuota diluida a 25 ml. agregue 2 ml. de NaOH N y 0.2 g de murexida ; enseguida titule con EDTA (0.01N) el cambio de coloración es rosa a púrpura; calcule los meq Ca^{+2} /l mediante:

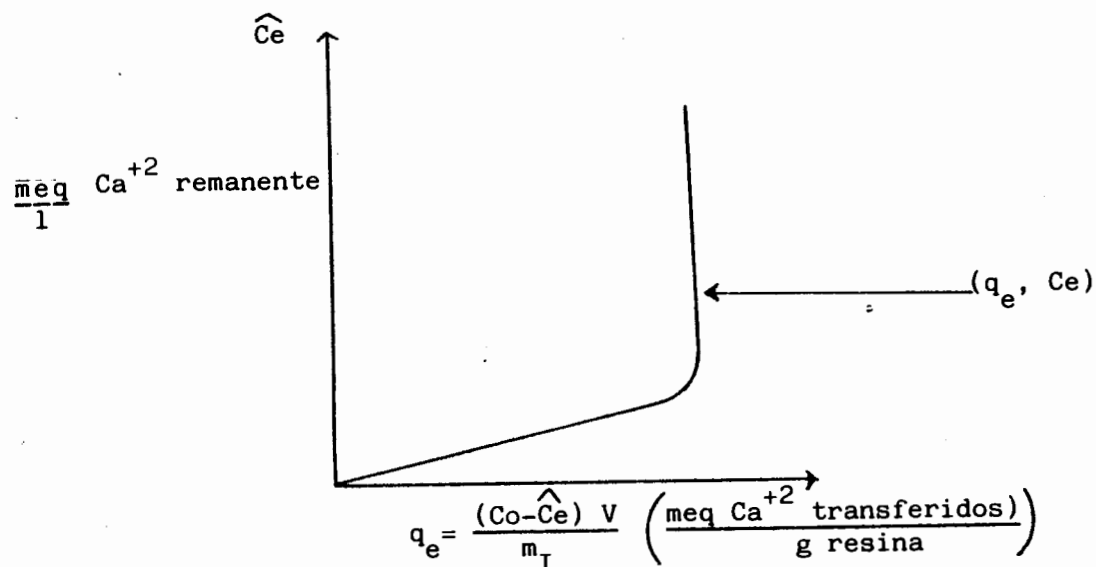
$$\frac{\text{meq } \text{Ca}^{+2}}{1} = \frac{(VN) \text{ EDTA} \times 1000}{\text{Vol. muestra}}$$

6.3.1.7.- Verifique la concentración de Ca^{+2} inicial.

6.3.1.8.- Grafique masa de resina contra concentración de equilibrio. Realice el ajuste necesario, por ejemplo:



6.3.1.9.- Con los datos ajustados, obtenga la curva de equilibrio, la cual será similar a la siguiente:



6.3.2.- Sistema intermitente

6.3.2.1-A un vaso de precipitado, conteniendo 1000 ml. de solución de Ca^{+2} de 15 meq/l, agregue 5 g. de resina.

6.3.2.2-Utilizando un agitador magnético, mezcle aproximadamente a 100 rpm.

6.3.2.3-Tome muestras a los tiempos y con los volúmenes que se señalan en la tabla siguiente:

Tiempo min.	5	10	15	20	30	45	60
Vol. muestra ml.	5	5	5	10	10	25	25

6.3.2.4.- Determine Ca^{+2} según método descrito en el paso 6.3.1.6

6.3.2.5.- Obtenga $k_{fa}^\circ = \frac{V}{t} \ln \frac{C_o - C_e}{C - C_e}$

6.3.3.- Sistema continuo

6.3.3.1.- Coloque 5 g. de resina en una bureta en donde previa -

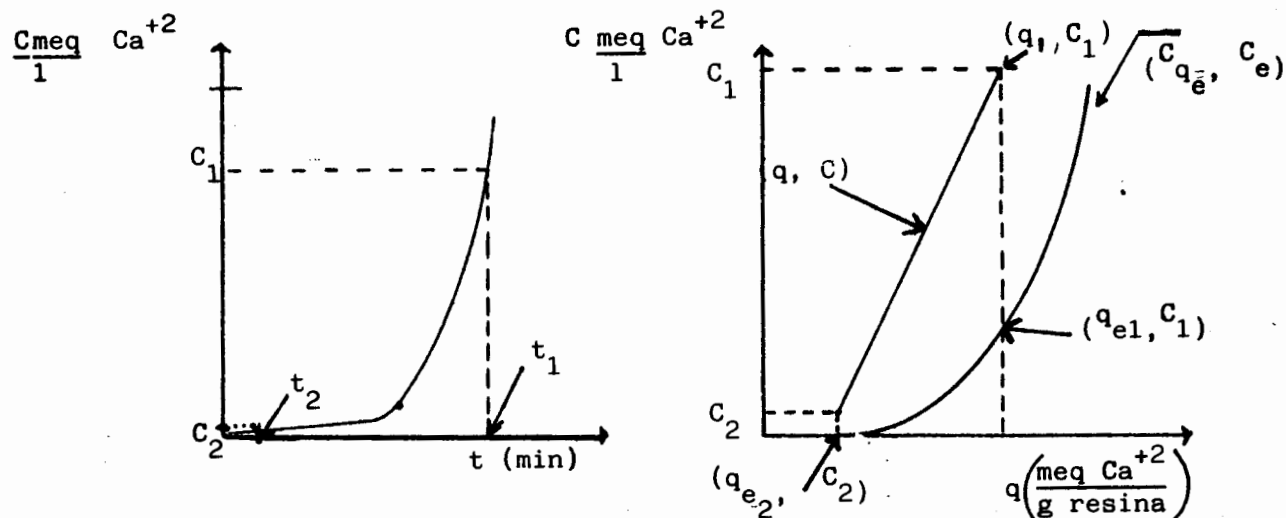
mente se hayan introducido perlas de vidrio.

6.3.3.2.- Expela el aire de la resina, inyectando agua destilada a contracorriente.

6.3.3.3.- Alimente la solución de Ca^{+2} (15 meq/l) con una carga de aproximadamente 20 ml/min/cm².

6.3.3.4.- A diferentes tiempos (P.ej. 5,10,15,20,25,30,35,40,45, 50,55,60 min. etc.) determine la concentración de Ca^{+2} hasta llegar a la concentración de agotamiento, de magnitud similar a C_0 .

6.3.3.5.- Obtenga las gráficas t vs C y q vs C_e en adición a q_e vs C_e , como se muestra a continuación:



$$q_1 = \frac{(C_1 - C_2) A t_1}{m}$$

$$q_2 = \frac{(C_2 Q A t_2)}{m}$$

$C_0 = 15 \text{ meq l.}$

C_1 = Concentración efluente, correspondiente al agotamiento de la capacidad de intercambio, con valor cercano a C_0 .

C_2 = Concentración efluente al inicio de la operación, con valor cercano a cero.

$$Q = 20 \text{ ml/min/cm}^2.$$

$$A = \pi r^2$$

t = tiempo en min.

$$6.3.3.6.- \text{ Obtenga } k_{\infty}^{\circ} = \frac{g_p \cdot C_o Q}{m} \int_{C_1}^{C_2} \frac{dC}{C - C_e} ;$$

considere $g_p = 0.81 \text{ g/cm}^3$.

6.3.4.- Regeneración de la resina

6.3.4.1.- Sistema intermitente.

6.3.4.1.1- Filtre al vacío el contenido del vaso de precipitado utilizado en el procedimiento 6.3.2.

6.3.4.1.2- Lave con agua destilada.

6.3.4.1.3- Coloque nuevamente la resina en el vaso de precipitado.

6.3.4.1.4- Agregue 1 litro de solución de NaCl con una concentración de 5.0 g/l y agite a 100 rpm, durante 30 minutos

6.3.4.1.5- Determine la concentración de Ca^{+2} .

6.3.4.1.6- Calcule la eficiencia de regeneración de acuerdo con:

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia} &= \frac{\text{meq/l liberados en la regeneracion (100)}}{\text{meq/l transferidos en el intercambio}} \\ &= \frac{C_R (100)}{C_o - C} \end{aligned}$$

6.3.4.2.- Sistema continuo

6.3.4.2.1- Alimente la solución de NaCl con una concentración de 5.0 g/l a 20 ml/min/cm^2 , durante 30 minutos.

6.3.4.2.3.- Calcule la eficiencia de regeneración de acuerdo con:

$$Ef = \frac{100(C_1 - C_2)AQ t_1 - C_{RQ} t_{RA} 100}{(C_1 - C_2) QAt_1}$$

$$Ef = \left[100 - \frac{3000 CR}{(C_1 - C_2) t_1} \right]$$

6.4.- EQUIPO Y REACTIVOS

6.4.1.- Equipo

- . 7 vasos de precipitado de 1 lt.
- . Aparato para prueba de jarras.
- . Agitador magnético.
- . Garrafón de 18 ó 20 lt.
- . Perlas de vidrio.
- . Matraces Erlenmeyer
- . Buretas
- . Bomba dosificadora
- . Embudo Buckner

6.4.2.- Reactivos

- . Para determinar Ca^{+2}
- . 18 ó 20 lts. de solución de Ca^{+2} (0.83 g/l de $CaCl_2$)
- . 3 litros de solución de NaCl (2.0 g/l)
- . 100 g Resina catiónica ciclo sódico.

6.5.- RESULTADOS

6.5.1.- Curva de Equilibrio

m(g resina)	meq/l Ca^{+2}
1	
3	
5	
10	
15	
20	

6.5.2.- Sistema Intermitente

Tiempo (min)	meq/l Ca^{+2}
5	
10	
15	
20	
30	
45	
60	

6.5.3.- Sistema Continuo

Tiempo (min)	meq/l Ca^{+2}
5	
10	
15	
20	
25	

Tiempo (min)	meq/l Ca^{+2}
30	
35	
40	
45	
50	

Tiempo (min)	meq/l Ca^{+2}
55	
60	

6.5.4.- Regeneración de resina

Sistema	C_R meq/l Ca^{+2}
Intermitente	
Continuo	

<u>MATERIAL</u>	<u>CAPACIDAD DE</u> <u>INTERCAMBIO</u> <u>NOMINAL</u> meq CaCO_3 /l	<u>DOSIS REGENERATIVA DE NaCl</u>	
		<u>VOLUMETRICA</u> mg de NaCl ml de intercambiador	<u>EFFECTIVA</u> mg de NaCl meq de CaCO_3 removido
. Greensand	130	20	160
. Greensand procesada	250	40	160
. Zeolita sintética silicosa	500	80	160
. Resina de Poliesti- reno	1470	200	160
. Resina de Poliesti- reno.	1010	80	90

TABLA 6.1.- CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE MATERIALES CATIONICOS.

<u>PARAMETRO</u>	<u>VALORES</u>
. Densidad aparente (g/cm^3)	0.72 - 0.88
. Densidad real (g/cm^3)	0.77 - 0.85
. Contenido de humedad (%)	42 - 48
. Porosidad (cm^3/cm^3)	0.40
. Rango de tamaños (mm)	0.30 - 1.19
(mallas)	50 - 16
. Tamaño efectivo (mm)*	0.45 - 0.55
. Coeficiente de uniformidad **	< 1.7
. Porcentaje de finos (partículas de tamaño menor a 0.30 mm (50 mallas)	< 1.0

* El tamaño ó diámetro efectivo es la dimensión correspondiente a las aberturas de la criba que deja pasar el 10% en peso de resina intercambiadora.

** El coeficiente de uniformidad se define mediante la relación siguiente:

$$Cu = \frac{\text{Tamaño del tamiz que deja pasar el 60\%}}{\text{Tamaño del tamiz que deja pasar el 10\%}}$$

TABLA 6.2.- PROPIEDADES FISICAS DE INTERCAMBIADORES DE POLIESTIRENO.

PRACTICA NO. 7 SEDIMENTACION

7.1.- GENERALIDADES

La sedimentación es un proceso ampliamente utilizado en la clarificación de agua que involucra la remoción de sólidos suspendidos mediante la acción de la gravedad.

Existen cuatro tipos de sedimentación: clase I, clase II, sedimentación por zonas y sedimentación con compresión.

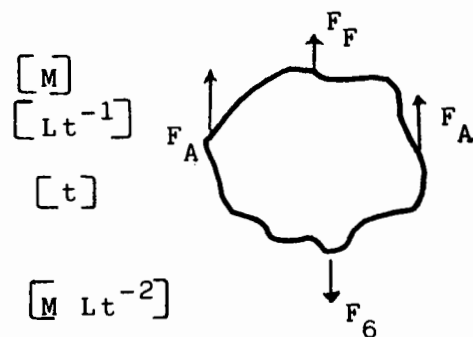
En la sedimentación de clase I, las partículas son de naturaleza discreta, esto es, no cambian de forma, tamaño, ni densidad en el transcurso del proceso.

Para obtener la ecuación que describe el comportamiento de partículas discretas se realiza el balance de fuerzas siguientes:

$$m \frac{dvs}{dt} = F_G - F_F - F_A \quad (7.1)$$

donde: m ; masa de la partícula
 v ; velocidad de partícula
 t ; tiempo

F_G, F_F, F_A ; fuerzas de gravedad, flotación y arrastre respectivamente.



La fuerza de la gravedad está dada por:

$$F_G = \rho_s V_p g \quad (7.2)$$

donde: ρ_s ; densidad de la partícula $[ML^{-3}]$
 V_p ; volumen de la partícula $[L^3]$
 g ; 9.81 m/s^2 aceleración debida a la gravedad



La fuerza de flotación es:

$$F_F = \rho_l V_p g \quad (7.3)$$

donde: ρ_l ; densidad del líquido $[ML^{-3}]$
 V_p ; volumen de la partícula $[L^3]$
 g ; 9.81 m/s^2 aceleración debida a la gravedad

La fuerza de arrastre o fricción es función de la rugosidad, tamaño, forma y velocidad de la partícula y de la densidad y viscosidad del líquido.

La expresión para determinarla es:

$$F_A = \frac{C_D A_p \rho_l v_1^2}{2} \quad (7.4)$$

donde: C_D ; coeficiente de arrastre
 A_p ; área proyectada en la dirección del flujo $[L^2]$

Sustituyendo las ecuaciones 7.2, 7.3, y 7.4 en la ecuación 7.1 se obtiene:

$$m \frac{dv}{dt} = g(\rho_s - \rho_l) V_p - \frac{C_D A_p \rho_l v_s^2}{2} \quad (7.5)$$

Después de un período inicial de transición $dv_s/dt = 0$ y $v_s = \text{cte}$ por tanto, la velocidad terminal es:

$$v_t = \sqrt{\left[\frac{2g(\rho_s - \rho_l)}{C_D \rho_l} \right] \left[\frac{V_p}{A_p} \right]} \quad (7.6)$$

El coeficiente de arrastre es función del número de Reynolds ($Re = d_p \rho_l v_s / \mu$) así para flujo laminar ($Re < 1$) se tiene:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (7.7)$$

Para flujo de transición (Re entre 1 y 1000):

$$C_D = \frac{18.5}{Re^{0.6}} \quad (7.8)$$

Para flujo turbulento ($Re > 1000$):

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re^{1/2}} + 0.34 \quad (7.9)$$

La velocidad terminal también es igual a:

$$v_t = \frac{h}{\bar{t}} = \frac{h}{V/Q} = \frac{h}{h \cdot A/Q} = \frac{Q}{A} \quad (7.10)$$

donde: h ; profundidad efectiva del tanque de sedimentación $\left[\frac{L}{t} \right]$
 t ; tiempo de retención $\left[\frac{L^3}{L^2 t} \right]$
 Q ; Flujo $\left[\frac{L^3}{L^2} \right]$
 A ; Area transversal del tanque $\left[L^2 \right]$

En el proceso de sedimentación las partículas discretas con velocidad igual o mayor a la terminal (v_t) son removidas completamente y aquellas otras partículas con velocidad menor a v_t , se remueven de acuerdo a la proporción v_s/v_t .

El porcentaje de remoción es:

$$R^o = (1 - f_t) + \int_0^{f_t} \frac{v_s}{v_t} df \quad (7.11)$$

donde: f_t ; fracción de partículas con velocidad mayor o igual a v_t

La curva que se obtiene en la sedimentación de partículas discretas se ilustra en la figura 7.1

La sedimentación de clase II involucra la remoción de partículas floculentas de suspensiones diluidas tal como sucede en el tratamiento primario de aguas residuales.

La evaluación de las características de sedimentación de partículas floculentas implica determinar experimentalmente la remoción de sólidos suspendidos en una columna cilíndrica similar a la que se muestra esquemáticamente en la figura 7.2

Posteriormente se construyen las curvas de isorremoción, según se muestra en la figura 7.3

La eficiencia de remoción es entonces calculada. En efecto, supóngase que $v_o = h_5/t_2$ es la velocidad superficial del sedimentador. Así, las partículas con velocidad mayor o igual a v_o son removidas completamente y las que tienen velocidad menor son removidas de acuerdo a la proporción v/v_o .

La ecuación para determinar la remoción es:

$$R^o = R_c^o + \frac{h_a}{t_2 v_o} (R_d^o - R_e^o) + \frac{h_b}{t_{ov_o}} (R_e^o - R_d^o) \quad (7.12)$$

donde:

R^o ;	Eficiencia de remoción en %.
$R_a^o, R_b^o, R_c^o, R_d^o, R_e^o$;	Eficiencia de remoción para las curvas de isorremoción (%).
t_2 ;	tiempo de retención del sedimentador (min).
$h_a/t_2, h_b/t_2$;	velocidades de sedimentación promedio para los sólidos remanentes entre las curvas con % R_c^o a R_d^o y R_d^o a R_e^o respectivamente.

La sedimentación por zonas ocurre cuando los agregados de partículas floculentas forman una sola masa que sedimenta mostrando

diferente interfase sólido-líquido en el transcurso del proceso. Este tipo de sedimentación es característico de suspensiones con centradas de sólidos floculentos procedentes de tratamiento de coagulación-floculación, o bien de los tanques de aireación en el proceso de lodos activados.

La interfase sólido-líquido puede observarse efectuando ensayos en probetas de 1000 ml. La curva obtenida será similar a la mostrada en la figura 7.4

El área superficial requerida para la sedimentación es:

$$A = \frac{Q}{V_s} = \frac{Q t_u}{h_o} \quad (7.13)$$

donde:

Q ; flujo $[L^3 t^{-1}]$
 Vs ; Velocidad de la interfase en la
 porción A B $[L t^{-1}]$
 A ; área $[L^2]$
 tu ; tiempo de retención necesario para llegar a
 la concentración de espesamiento (Cu) deseado

Para calcular tu se sigue el procedimiento siguiente: 1) Se obtiene la altura hu según la ecuación: $h_u = (C_{ho}/C_u)$, 2) Gráficamente (figura 7.5) se obtiene tu, que corresponde al punto de intersección entre la línea horizontal que pasa por hu y la línea tangente al punto C_c el cual se obtiene bisectando el ángulo formado por la intersección de las líneas tangentes a la curva tiempo vs altura.

La zona de compresión ocurre cuando las partículas se acumulan en el fondo del tanque de sedimentación, formando una masa que se consolida lentamente.

La ecuación que describe este tipo de sedimentación es:

$$- \frac{dh_z}{dt} = k (h_z - h_{z\infty}) \quad (7.14)$$

donde: h_z ; altura del lodo $[L]$
 h_{z∞} ; altura del lodo al tiempo = ∞ $[L]$

k ; constante de la ecuación de 1er. orden
Integrando 7.14 se obtiene:

$$\int_{h_{zo}}^{h_z} \frac{dh_z}{(h_z - h_{z\infty})} = \int_0^t -Kt \quad (7.15)$$

$$\ln \left[\frac{h_z - h_{z\infty}}{h_{zo} - h_{z\infty}} \right] = -kt \quad (7.16)$$

$$h_z - h_{z\infty} = (h_{zo} - h_{z\infty}) e^{-kt} \quad (7.17)$$

$$h_z - h_{zo} = (h_{z\infty} - h_{zo}) (1 - e^{-kt}) \quad (7.18)$$

Para obtener k y $h_{z\infty}$ los datos experimentales son procesados en igual forma que para obtener el coeficiente de biodegradabilidad y la DBO en la prueba de la demanda bioquímica de oxígeno.

En cuanto a las dimensiones de tanques para sedimentación se tiene lo anotado en la tabla 1.

De acuerdo con las propiedades de los sólidos suspendidos, los factores de carga superficial y los tiempos de retención necesarios son aproximadamente los que se presentan en la tabla 7.2.

7.2.- OBJETIVO;

Ejemplificar la obtención de parámetros para el diseño de sedimentadores.

7.3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

7.3.1.- SEDIMENTACION CLASE II

7.3.1.1.- Agregue 8 litros de agua destilada conteniendo las cantidades y sustancias que se indican a continuación

a) 20 g. de caolín, b) 10 g. de leche en polvo, c) 10 g. de carbonato de sodio, d) 10 g. de cloruro de calcio y e) sulfato de aluminio, en cantidad tal que corresponda a la dosis óptima obtenida en la práctica 4

7.3.1.2.- Inyecte aire para favorecer la floculación y mantener los sólidos en suspensión.

7.3.1.3.- Agregue agua destilada hasta completar 18 lts.

7.3.1.4.- Una vez se perciba una buena floculación, tome muestras de 100 ml. de cada una de las tomas para preparar una muestra compuesta a la que se le determinará la concentración inicial de sólidos suspendidos de acuerdo al procedimiento 7.3.3. y para usarla en el procedimiento 7.3.4.

7.3.1.5.- Suspnda la inyección de aire y colecte, a los 5,10,20, 40 y 60, muestras de 20 ml. de cada una de las tomas para determinar sólidos suspendidos (procedimiento 7.3.3 ó 7.3.4)

7.3.1.6.- Calcule el porciento de remoción según la ecuación siguiente:

$$R_i = \frac{C_o - C_i}{C_o} \cdot 100$$

donde:

R_i ; porciento de remoción para la altura h_i

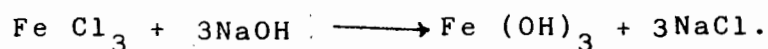
C_o ; concentración inicial de sólidos suspendidos (mg/l) al tiempo t .

7.3.1.7.- Trace las curvas de isorremoción según la figura 7.3

7.3.2.- SEDIMENTACION POR ZONAS

7.3.2.1.- Prepare en probetas de un litro tres suspensiones concentradas de 1000, 4000 y 8000 mg/l de hidróxido de

fierro. Considere la reacción siguiente:



7.3.2.2.- Invierta las probetas para inducir la mezcla.

7.3.2.3.- Inmediatamente después de colocar las probetas en su posición normal registre la altura de la interfase sólido-líquido, a los tiempos 0,2,5,10,15,20,25 y 30 minutos.

7.3.2.4.- Grafique la curva tiempo vs. altura de la interfase sólido-líquido, según la figura 7.4; para cada concentración inicial.

7.3.3.- DETERMINACION DE SOLIDOS

7.3.3.1.- Sólidos totales. - Pese una cápsula de porcelana previamente puesta a peso constante (P_1). Tome una muestra de 20 ml. y evapore el agua utilizando vapor. Coloque la cápsula en la estufa a 103-105°C hasta desecación total. Saque la cápsula y colóquela en el desecador hasta enfriamiento. Pese la cápsula y obtenga el peso de sólidos (P_2), obtenga la concentración $\left[ST = (P_2 - P_1) 1000/VM \text{ (mg/l)}\right]$.

7.3.3.2.- Sólidos suspendidos. - Pese un filtro Gooch previamente puesto a peso constante (P_3). Tome una muestra de 20 ml. y filtre al vacío. Ponga el filtro en la estufa hasta desecación total; sáquelo de la estufa y colóquelo en el desecador hasta enfriamiento. Pese (P_4). Obtenga la concentración $SS = (P_4 - P_3) 1000/VM \text{ (mg/l)}$

7.3.3.3.- Sólidos disueltos. - Calcule según: $SD = ST - SS. \text{ (mg/l)}$

7.3.4.- DETERMINACION ALTERNATIVA DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

7.3.4.1.- La muestra compuesta procedente del paso 7.3.1.4, una vez se le hayan determinado sólidos totales, suspendidos y disueltos, se le efectúan diluciones que tendrán concentraciones conocidas de sólidos.

7.3.4.2.- Para cada dilución se obtendrá la turbiedad correspondiente.

7.3.4.3.- Se graficará turbiedad contra concentración de sólidos suspendidos, esto es la curva de calibración.

7.4.- EQUIPO Y REACTIVOS

7.4.1.- Equipo

- . columna para sedimentación.
- . cápsulas de porcelana.
- . filtros Gooch.
- . cronómetro.
- . vidriería.

7.4.2.- Reactivos

- . caolín.
- . sulfato de aluminio.
- . leche en polvo.
- . carbonato de sodio.
- . cloruro de calcio.
- . cloruro férrico.
- . hidróxido de sodio.

7.5.- RESULTADOS

7.5.1.- SEDIMENTACION CLASE II

Tiempo min.	Concentración de sólidos suspendidos *				
	h1=	h2=	h3=	h4=	h5=
0					
5					
10					
20					
40					
60					

$$\frac{* (P_2 - P_1) 1000}{\text{Vol. muestra}}$$

7.5.2.- SEDIMENTACION POR ZONAS

Tiempo en min	Altura de la interfase (cm)		
	Co1=	Co2=	Co3=
0			
2			
5			
10			
15			
20			
25			
30			

7.6.- PROBLEMAS

- A.- Utilizando los datos generados en la sedimentación clase II, determine el porcentaje de remoción de sólidos a los 30 y 60 minutos.
- B.- Considere que flóculos similares a los experimentados en la sedimentación por zonas son removidos en tres di

ferentes sedimentadores que tienen concentraciones de Co_1 , Co_2 , y Co_3 . La concentración de espesamiento deseada es de 10000 mg/l. Calcule h_u , el flujo superficial, el área superficial para clarificación y el tamaño del tanque para un flujo de $4000 \text{ m}^3/\text{día}$ y para cada caso de concentración inicial.

<u>TIPO</u>	<u>PROFUNDIDAD</u>	<u>DIAMETRO</u>	<u>RELACION</u>		<u>TIEMPO</u>
	<u>(m)</u>	<u>(m)</u>	<u>LARGO-ANCHO</u>	<u>PENDIENTE %</u>	<u>DE RE-</u> <u>TENCION</u> <u>min</u>
Circular	2 - 4.0	10 - 60		7 - 8	90 -180
Rectangular	2 - 4.0		3:1 - 5:1		90 -180

TABLA 7.1.- DIMENSIONES TÍPICAS DE TANQUES SEDIMENTADORES.

<u>NATURALEZA DEL SOLIDO</u>	<u>GRAVEDAD ESPECIFICA</u>	<u>VELOCIDAD DE SEDIMENTACION</u>	<u>CARGA SUPERFICIAL</u> <u>(m³/d/m²)</u>	<u>TIEMPO DE RE-</u> <u>TENCION(hr)</u>
. Arena limo, arcilla	2.65	7×10^{-3}	5.95	12.3
. Flóculo de hidróxido de aluminio o hierro	1.002	8.3×10^{-2}	73.33	10.0
. Precipitado de carbonato de calcio	1.20	4.2×10^{-2}	<36.67	>2
. Orgánicos en sedimentación primaria	1.001	4.2×10^{-2}	<36.67	>2
. Orgánicos provenientes de lodos activados	1.005	2.0×10^{-5}	48.90	>0.5

TABLA 7.2.- CARGAS SUPERFICIALES Y TIEMPOS DE RETENCION PARA ALGUNAS SUSPENSIONES TÍPICAS.

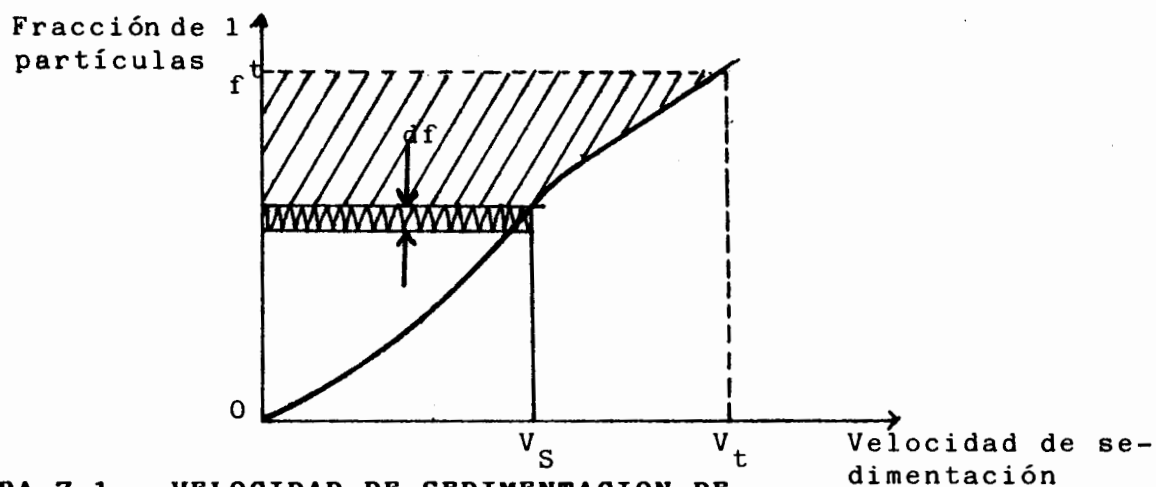


FIGURA 7.1.- VELOCIDAD DE SEDIMENTACION DE PARTICULAS DISCRETAS

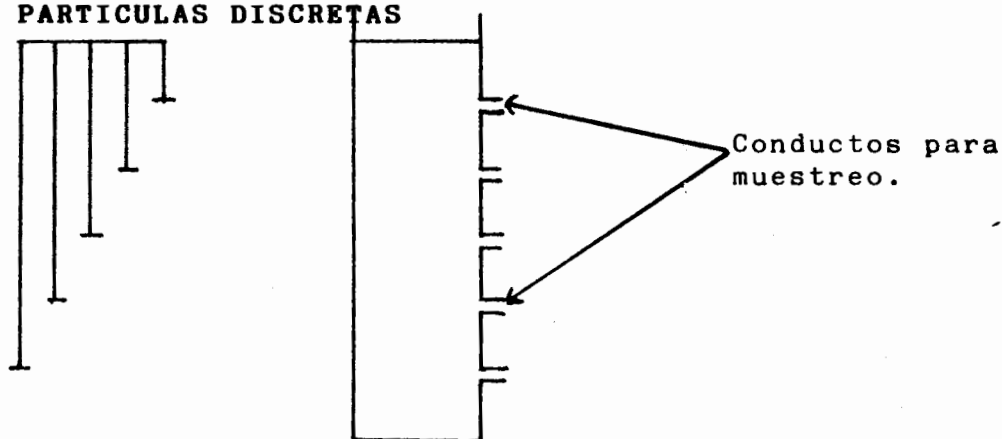


FIGURA 7.2.- COLUMNA PARA DETERMINAR REMOCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

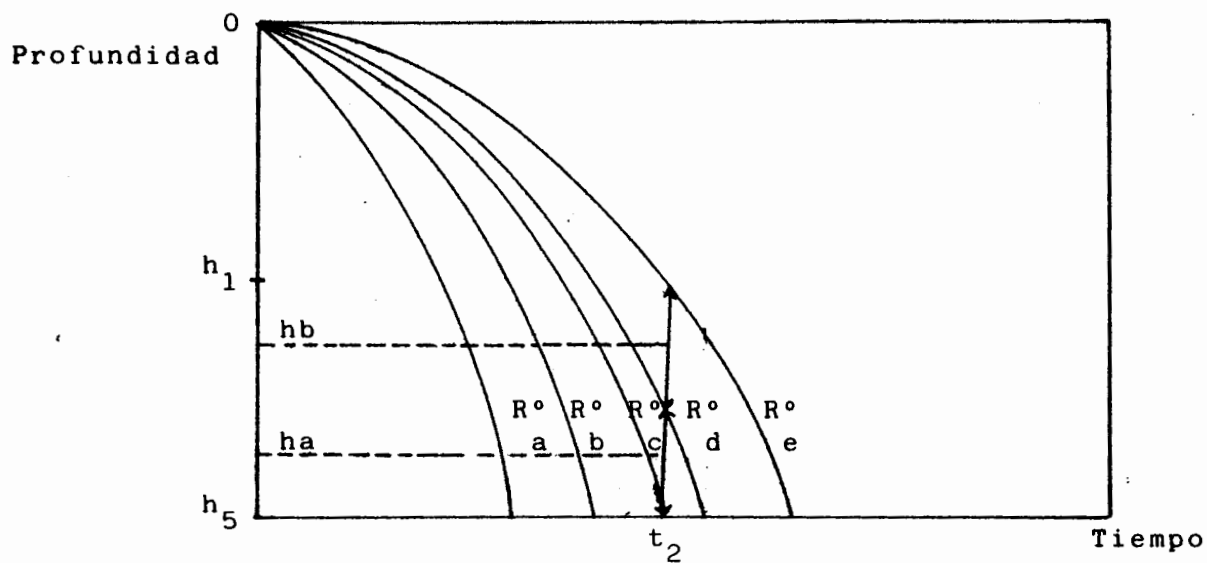


FIGURA 7.3.- REMOCION DE PARTICULAS FLOCULENTAS

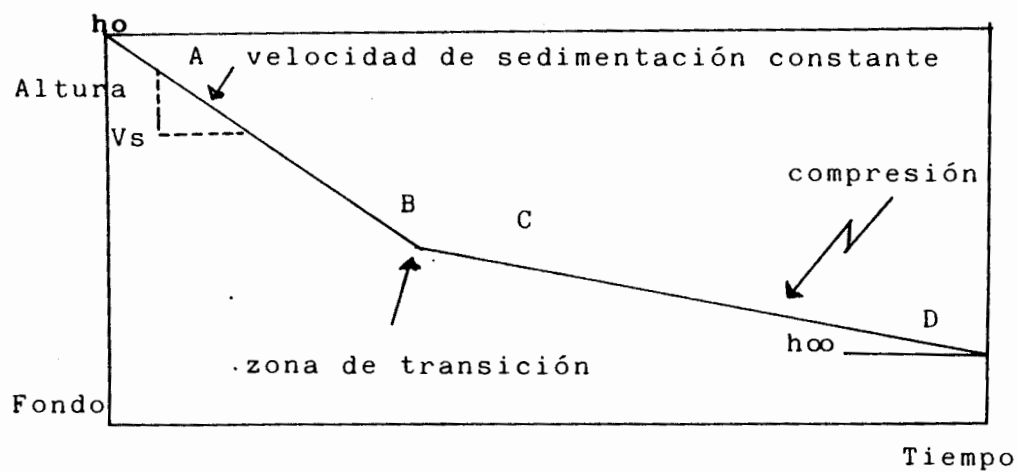


FIGURA 7.4.- ALTURA DE LA INTERFASE SOLIDO-LIQUIDO, EN LA SEDIMENTACION POR ZONAS

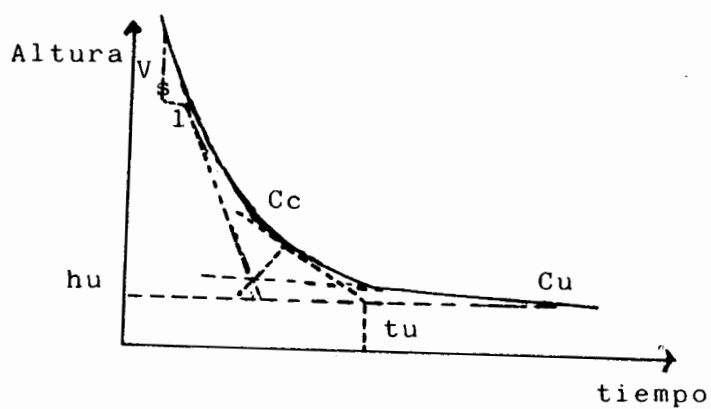


FIGURA 7.5.- ALTURA DE INTERFASE RESPECTO AL TIEMPO

PRACTICA NO. 8 FLOTACION

8.1.- GENERALIDADES

La flotación es utilizada para separar partículas sólidas ó líquidas de una fase líquida. El transporte de las partículas se induce inyectando gases, los cuales forman burbujas pequeñas que, al entrar en contacto con las partículas, las elevan del seno del líquido a la superficie del mismo. La propiedad más importante para la flotación de partículas es la adherencia pues de ella depende la permanencia del contacto entre el gas y las partículas.

En ingeniería ambiental la flotación es utilizada para remover sólidos suspendidos, grasas, aceites y detergentes en el tratamiento de agua residual; en estos casos, el gas inductor de la flotación más utilizado es el aire.

Existen tres tipos de flotación (figura 8.1): a) gasificación a

presión atmosférica, b) flotación con gases disueltos presurizados y c) flotación al vacío.

En la gasificación a presión atmosférica, el gas es inyectado directamente al líquido, a través de difusores o medios porosos que permiten la formación de burbujas cuyo tamaño es del orden de 1000 micras

La flotación con gases disueltos presurizados comprende dos etapas. En la primera, el gas es inyectado a una presión superior a la atmosférica, multiplicándose así la solubilidad del fluido. Y en la segunda etapa el gas es liberado al modificarse las condiciones de presión arrastrando consigo las partículas de sólidos o líquidos.

La flotación al vacío se logra saturando el líquido con el gas a presión atmosférica, y posteriormente liberando el gas al ejercer vacío.

Para el diseño de dispositivos de flotación, los principales parámetros son:

a) suministro del gas, b) tiempo de retención, c) concentraciones de partículas en el efluente, d) presión, e) relación gas-partículas.

8.2.- OBJETIVOS

Determinar parámetros de diseño para la flotación de sólidos suspendidos con aire presurizado, visualizar la efectividad de los tres tipos de flotación en la remoción de sólidos suspendidos, y comparar la efectividad de la flotación con el proceso de sedimentación.

8.3.- PROCEDIMIENTO

8.3.1.- Flotación a presión atmosférica

Utilizando el dispositivo que se muestra en la figura 8.2, efectúe la flotación a presión atmosférica. El vo-

lumen a manejar será de 1 litro de suspensión, a la cual se le inyectará aire con un flujo relativamente bajo durante 15 minutos. Inmediatamente antes de suspender el suministro de aire, se tomará una muestra del fondo del vaso, para determinar sólidos totales.

8.3.2.- Flotación con aire presurizado

8.3.2.1.- Agregue 500 ml. de suspensión al cilindro de flotación fig. 8.3.

8.3.2.2.- A la cámara de presurización se le agrega agua destilada hasta un volumen igual a 75% de la capacidad total, y se inyecta aire comprimido hasta una presión entre 20 y 50 psig (1 atm = 1.0332 kg/cm² = 14.7 psi).

8.3.2.3.- Agite la cámara de presurización durante 10 minutos para favorecer la saturación del agua con aire.

8.3.2.4.- Inyecte 500 ml. de agua destilada presurizada al cilindro de flotación.

8.3.2.5.- Registre la velocidad de ascenso de la interfase sólido-líquido respecto al tiempo.

8.3.2.6.- Después de 15 minutos de tiempo de retención tome muestras para analizar sólidos totales, tanto en el agua clarificada como en el lodo flotado.

8.3.2.7.- Repita los pasos 8.3.2.1. a 8.3.2.6, para condiciones diferentes de presión.

8.3.2.8.- Calcule la relación aire-sólidos según:

$$\frac{A}{S} = \frac{1.3 \times aR (fP - P_{atm})}{S_a}$$

donde: X_a ; Solubilidad del aire en condiciones atmosféricas (cm³ /litro).

R ; Volumen presurizado ($R = 0.5$ l).

P ; Presión absoluta de presurización = P manométrica +
Patmosférica (atm).

Q ; Volumen de suspensión, litros = 0.5

Sa ; Concentración de sólidos suspendidos en el influente
(mg/l).

A ; Masa de aire inyectada (mg).

S ; Masa de sólido presentes (mg).

f ; Fracción de saturación (en condiciones de laboratorio f = 1).

8.3.2.9.- Grafique concentración de sólidos en el líquido clarificado y concentración en el lodo flotado contra relación A/S.

8.3.3.- Flotación al vacío

Usando el dispositivo que se presenta en la figura 8.4 b, realice la flotación al vacío. Para ello vierta al matraz, 750 ml. de suspensión saturada con aire; posteriormente, ejerza vacío succionado con una bomba de vacío; después de 15 minutos, tome una muestra de 20 a 50 ml. del líquido que está en el fondo del matraz; determine sólidos totales.

8.3.4.- Sedimentación por zonas

8.3.4.1.- Agregue un litro de suspensión a una probeta.

8.3.4.2.- Invierta la probeta a objeto de ejercer mezcla.

8.3.4.3.- Registre la altura de la interfase sólido-líquido respecto a los tiempos 0,2,5,10,15,20,25 y 30 minutos.

8.3.4.4.- Grafique la curva tiempo vs altura de la interfase sólido-líquido.

8.3.4.5.- Compare la efectividad del proceso de floculación contra el de sedimentación, considerando que se lleva a efecto un proceso continuo con flujo de 4000 metros

cúbicos por día.

8.4.- EQUIPO Y SUSTANCIAS

8.4.1.- Equipo

- . El adecuado para conformar los dispositivos que se muestran en las figuras 8.2, 8.3 y 8.4 b.
- . 10 cápsulas de porcelana a peso constante.

8.4.2.- Reactivos

- . Suspensión experimental, equivalente a la que se forma en los tanques de aireación del proceso de lodos activados.

8.5.- RESULTADOS

8.5.1.- Flotación con aire presurizado

Presión de compresión atm.	Relación aire* sólidos A/S	Concentración en líquido mg/	Concentración en el lodo mg/

$$\frac{A}{S} = \frac{1.3 \times aR (P_{man})}{Q S_a} ; \quad R = 0.5 \text{ l} \quad S_a = \text{-----} \text{ mg/l}$$

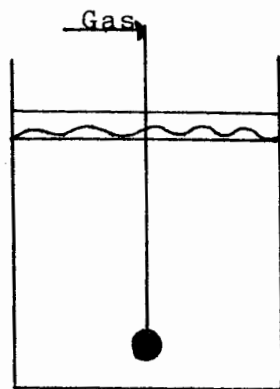
$$Q = 0.5 \text{ l}$$

8.5.2.- Flotación a presión atmosférica y al vacío

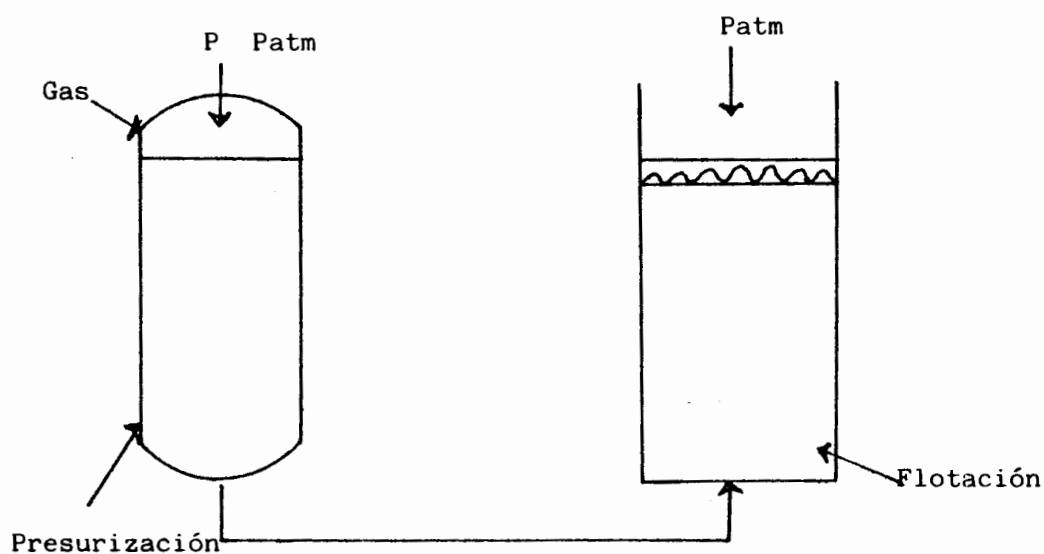
Tipo de flotación	Concentración de sólidos mg/l
Presión atmosférica	
Al vacío	

8.5.3.- Sedimentación por zonas

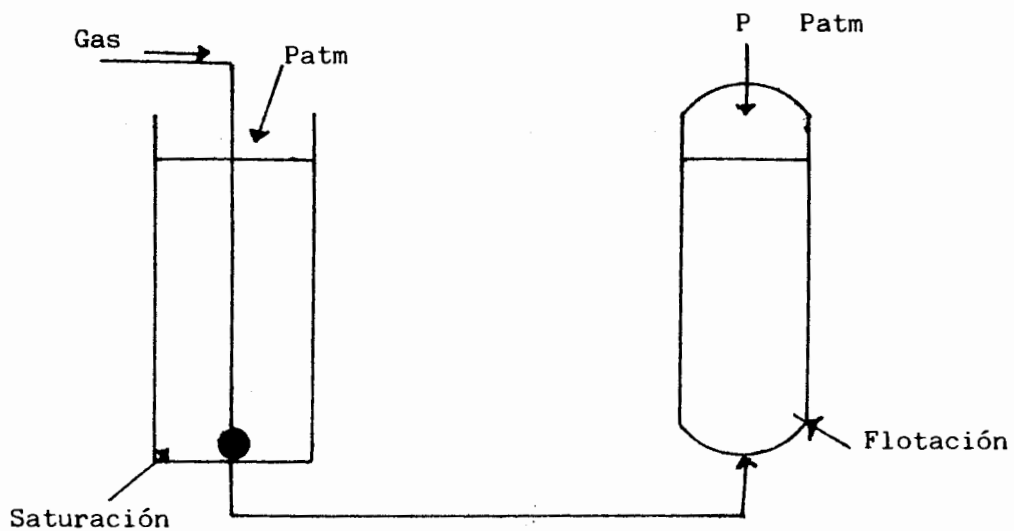
Tiempo (min)	0	2	5	10	15	20	25	30
Altura de la interfase (cm)								



8.1. a) GASIFICACION A PRESION ATMOSFERICA



8.1. b) FLOTACION CON GASES PRESURIZADOS



8.1. c) FLOTACION AL VACIO

FIGURA 8.1.- PROCESOS DE FLOTACION

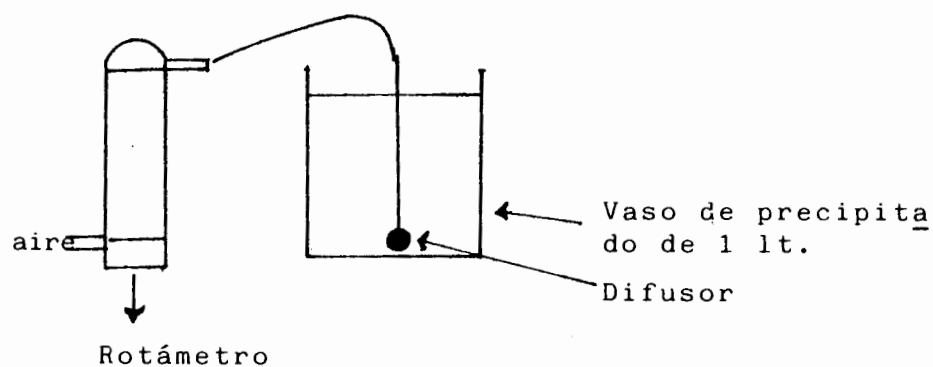


FIGURA 8.2.- FLOTACION A PRESION ATMOSFERICA

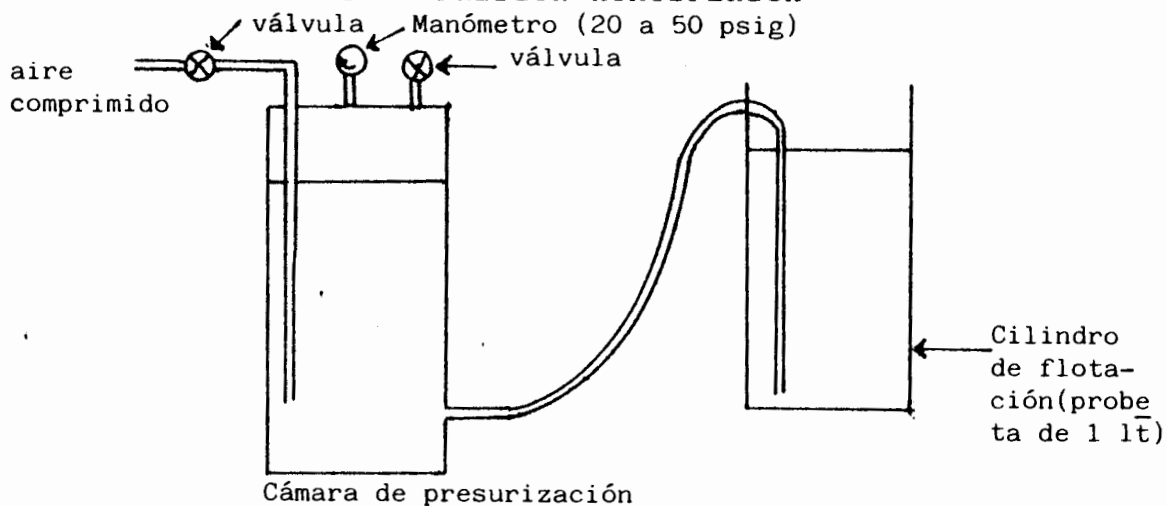


FIGURA 8.3.- FLOTACION CON AIRE PRESURIZADO

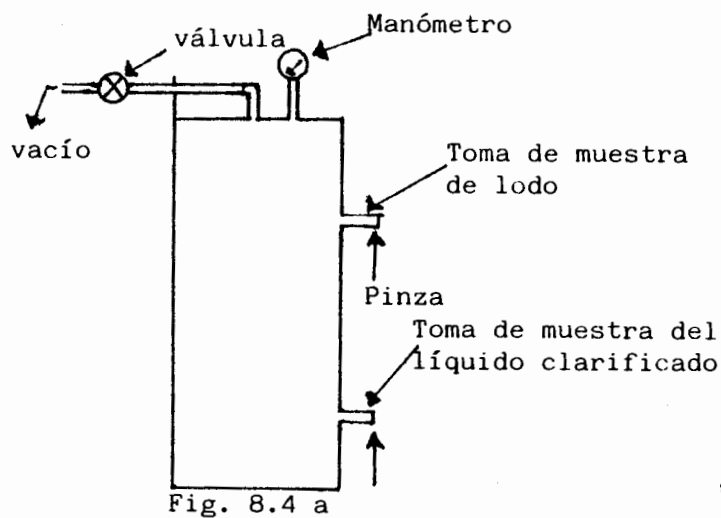


Fig. 8.4 a

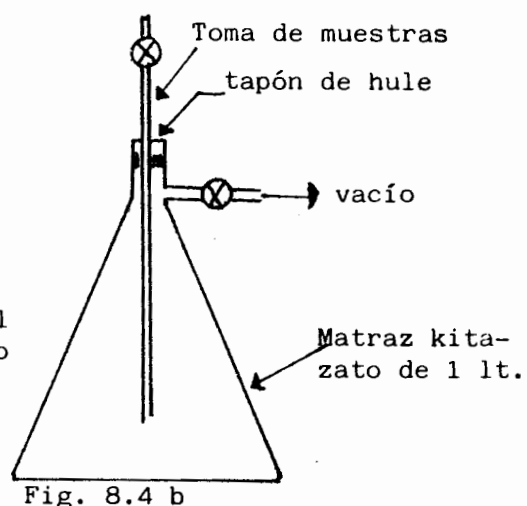


Fig. 8.4 b

FIGURA 8.4.- FLOTACION AL VACIO

PRACTICA NO. 9 FILTRACION

9.1.- GENERALIDADES

La filtración es la separación de sólidos de líquidos, mediante el paso a través de un material poroso. Es un proceso comúnmente utilizado en el tratamiento de agua para potabilizarla, y en el tratamiento terciario de agua residual.

Antiguamente se utilizaban los filtros lentos de arena, que posteriormente fueron desplazados parcialmente por los filtros rápidos de arena o bien los de lecho múltiple, como son los de arena-antracita. Algunas características de los filtros anteriormente mencionados se anotan en la tabla siguiente 9.1.

En la operación de los filtros, la pérdida de carga a través del lecho filtrante y la calidad del agua efluente determinan la necesidad de lavado. En efecto, a medida que se filtran mayores cantidades de agua, las partículas de impurezas inicialmente contenidas en la misma se van acumulando en el lecho filtrante, inducien

do que la pérdida de carga y la calidad del agua lleguen a valores que se definen como terminales.

La pérdida de carga terminal se obtiene cuando parte del lecho filtrante y su sistema de drenaje inferior se encuentran bajo vacío parcial o carga negativa.

La calidad del agua terminal no necesariamente ocurre al mismo tiempo que la pérdida de carga terminal y se define como la calidad del agua requerida, por el uso al que se destine el agua tratada, en función de los criterios existentes al respecto.

Bajo condiciones de flujo laminar, como es el caso de la filtración de agua, la ecuación de Kozeny rige la resistencia a través del medio filtrante cuando éste se encuentra limpio y se filtra agua también limpia. La expresión de dicha ecuación es:

$$h/l = \frac{k}{g} \frac{\mu}{\rho} \frac{(1-f)^2}{f^3} \left(\frac{A}{V}\right)^2 v \quad (9.1)$$

donde:

h	; pérdida de carga	[L]
K	; coeficiente de Kozeny adimensional de valor cercano a 5, bajo las condiciones de filtración de agua.	
g	; 9.81 m/seg ² .	
μ	; viscosidad del agua	[M/L.t]
ρ	; densidad del agua	[Ml ⁻³]
f	; porosidad del lecho filtrante	[L ³ /L ³]
A	; área superficial de los granos del lecho filtrante.	[L ²]
V	; volumen de los granos del lecho filtrante	[L ³]
v	; velocidad del fluido	[L/t]

dado que el radio hidráulico es:

$$r = \frac{f}{1-f} \frac{V}{A} = \frac{f}{1-f} \frac{\psi d}{6} \quad (9.2)$$

donde:

ψ ; esfericidad $= \frac{d_o}{d} = \sqrt{v_s/v_o}$; d_o = diámetro de una esfera de volumen equivalente al de una partícula de tamaño d ; v_s y v_o velocidades de sedimentación de la partícula y esfera de volumen equivalente.

Así la ecuación 1 se transforma en

$$\frac{h}{1} = \frac{k}{g} \frac{\mu}{g} \frac{(1-f)^2}{f^3} \left(\frac{6}{\psi d} \right)^2 v \quad (9.3)$$

o bien

$$\frac{h}{1} = \frac{k}{g} \frac{\mu}{g} \frac{(1-f)^2}{f^3} \left(\frac{s}{d} \right)^2 v \quad (9.4)$$

Para lechos estratificados, la pérdida de carga es la suma de las pérdidas de carga en las capas de diferentes tamaños del lecho filtrante. En este caso la ecuación para la pérdida de carga se obtiene por medio de la ecuación propuesta por Fair y Hatch, cuya expresión es:

$$\frac{h}{1} = \frac{k}{g} \frac{\mu}{g} \frac{(1-f)^2}{f^3} \left(\frac{6}{\psi} \right)^2 v \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{100 d_i^2} \quad (9.5)$$

donde:

$\frac{P_i}{100}$; peso fraccional de partículas con diámetro d_i

d_i ; diámetro promedio para el estrato i

Para lechos no estratificados $\frac{A}{V} = \frac{6}{\psi} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{100 d_i}$ y por

tanto: $\frac{h}{1} = \frac{k}{g} \frac{\mu}{g} \frac{(1-f)^2}{f^3} \left(\frac{6}{\psi} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{100 d_i} \right)^2 \quad (9.6)$

En la operación del lavado, el lecho sufre una expansión aumentando su porosidad, pero el régimen de flujo se mantiene en el rango

"laminar" y, por tanto, también es aplicable la ecuación (9.1) para describir la resistencia al lavado. La expresión modificada de la ecuación mencionada es:

$$\frac{h}{l_e} = \frac{k_e}{g} \frac{\mu}{g} \frac{(1-f_e)^2}{f_e^3} \left(\frac{6}{\psi} \frac{1}{d} \right)^2 = \frac{S_e g}{g} (1-f_e) \quad (9.7)$$

donde: h ; pérdida de carga a través del lecho expandido
 l_e ; longitud del lecho expandido
 k_e ; coeficiente de Kozeny, como función de l_e
 v ; velocidad del lavado.

[L]
[L]

9.2.- OBJETIVOS

Estudiar la hidráulica de la filtración y del lavado, y visualizar en forma rápida, la operación de un filtro.

9.3.- PROCEDIMIENTO

9.3.1.- Cribado del medio filtrante

9.3.1.1.- Crie el medio filtrante, utilizando tamices de diferente tamaño de abertura.

9.3.1.2.- Pese las fracciones separadas y grafique tamaño contra por ciento en peso acumulado.

9.3.1.3.- Obtenga el tamaño efectivo (E), el cual corresponde al tamiz virtual que dejaría pasar el 10% del medio filtrante.

9.3.1.4.- Calcule el coeficiente de uniformidad (U) el cual se define mediante:

$$U = \frac{\text{Tamaño de abertura que dejaría pasar el 60\%}}{\text{Tamaño de abertura que dejaría pasar el 10\%}}$$

9.3.1.5.- Obtenga el porcentaje necesario de cada estrato para tener un lecho filtrante con un tamaño efectivo y un coeficiente de uniformidad que se especificarán durante la práctica.

9.3.2.- DETERMINACION DE PROPIEDADES DEL MEDIO FILTRANTE

9.3.2.1.- Porosidad (para cada estrato)

9.3.2.1.1.- En una probeta de 100 ml. coloque 50 ml. de material filtrante perfectamente compactado.

9.3.2.1.2.- En otra probeta agregue 50 ml. de agua.

9.3.2.1.3.- Vierta el agua sobre el material filtrante, hasta que la lente de agua coincida con la superficie del material.

9.3.2.1.4.- Mida el volumen agregado de agua el cual corresponda al volumen de huecos o vacíos.

9.3.2.1.5.- Obtenga la porosidad $f_i = \text{vol. huecos} / 50 \text{ ml.}$

9.3.2.2.- Densidad (para cada estrato)

9.3.2.2.1.- Coloque 5 g. del medio filtrante en una probeta de 10 ml., compacte y mida el volumen ocupado (V_{ai}).

9.3.2.2.2.- Viértalos en una probeta de 10 ml. que contenga 5 ml. de agua destilada.

9.3.2.2.3.- Determine el volumen desplazado (ΔV_i).

9.3.2.2.4.- Obtenga la densidad aparente ($\rho_{a1} = \frac{5}{V_{ai}}$) y la densidad real ($\rho_{ri} = 5 / \Delta V_i$)

9.3.2.3.- Esfericidad (para cada estrato)

9.3.2.3.1.- Determine el número de partículas contenidas en 0.5 ml. y el volumen promedio de una partícula (V_{si}).

9.3.2.3.2.- Agregue 10 partículas a una probeta conteniendo 1000 ml. de agua. La probeta debe ser marcada previamente a una cierta altura (h_p).

9.3.2.3.3.- Obtenga la velocidad de sedimentación promedio mediante la ecuación siguiente:

$$V_s = \frac{h_{p1} - h_{p2}}{t_o - t}$$

donde:

h_{p1} ; altura correspondiente al volumen de 1000 ml.

h_{p2} ; altura marcada en la probeta (cm).

t_o ; tiempo en el que se adicionan las 10 partículas.

t ; tiempo en el que las partículas llegan a la marca.

9.3.2.3.4.- Obtenga V_o , es decir la velocidad de sedimentación en cm/s, de partículas esféricas con diámetro d_o y volumen equivalente al de partículas con diámetro d_i , mediante el procedimiento siguiente:

a) Obtenga $d_o = \sqrt{\frac{6 V_s}{\pi}}$

b) Determine V_o mediante la ley de Stokes, cuya expresión es:

$$V_o \approx \left(-\frac{g}{18} \right) \left[\frac{S_s - 1}{\eta} \right] d_o^2$$

donde: V_o ; velocidad de sedimentación cm/s

$g = 981$ cm/s

S_s = peso específico relativo de la partícula del medio filtrante.

η ; viscosidad cinemática $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$

d_o ; diámetro cm.

c) Verifique si el número de Reynolds $\frac{d_o V_o}{\eta}$ es menor de 1 en cuyo caso el valor de V_o es correcto.

d) Si el número de Reynolds es mayor de 1, calcule:

$$X = \left[\frac{g (S_s - 1)}{\eta^2} \right]^{1/3} d_o$$

105

- e) De la gráfica 25.3 del Fair y Geyer, versión en español, obtenga con X el valor de Y, el cual es:

$$Y = \frac{V_o}{[g (S_s - 1) \nabla]^{1/3}}$$

donde: $V_o = Y [g (S_s - 1) \nabla]^{1/3}$

- f) Calcule el valor de esfericidad aplicando la ecuación siguiente:

$$\psi = \sqrt{\frac{V_s}{V_o}}$$

9.3.3.- HIDRAULICA DE LA FILTRACION

- 9.3.3.1.- Empaque la columna con gravilla hasta la primera toma de presión.
- 9.3.3.2.- Agregue el medio filtrante de tal forma que las partículas de mayor tamaño y densidad queden por debajo de las de menor tamaño y densidad. El medio filtrante deberá encontrarse entre dos tomas de presión.
- 9.3.3.3.- Filtre agua de la red de distribución para 6 velocidades de filtrado comprendidas entre 0.04 y 0.244 cm/s.
- 9.3.3.4.- Obtenga el coeficiente de la ecuación de Fair-Hatch graficando:

$$\left(\frac{h}{1}\right) \text{ vs } \left[\frac{\nu}{g} \frac{(1-f)^2}{f^3} \left(\frac{6}{\psi}\right)^2 \sum_{i=1}^n (p_i/100 d_i^2) \right]$$

donde: h ; pérdida de carga (cm).

1 ; longitud del lecho filtrante (cm).

ν ; viscosidad cinemática del agua cm/s².

g ; 981 cm/s².

f ; porosidad promedio del medio filtrante

ψ ; esfericidad promedio del filtro

Pi ; porciento en peso de partículas de tamaño promedio igual a di.

v ; velocidad de filtración (cm/s).

9.3.3.5.- Compare los resultados de pérdida de carga, obtenidos experimentalmente, contra los teóricos que calcule aplicando las ecuaciones de Karman-Kozeny y Rose, las cuales son:

a) Karman - Kozeny

$$h = \left(\frac{1-f}{f^3}\right) \left(\frac{1}{\psi}\right) \left(\frac{1}{g}\right) \left(\sum_{i=1}^n f_i \frac{\Delta L_i}{d_i}\right) v^2$$

donde: $\Delta L_i = \frac{m_i}{\rho_{s,i}}$; espesor del estrato de tamaño promedio igual a di.

f_i ; coeficiente de fricción del estrato i, que se expresa por:

$$f_i = 150 \left(\frac{1-f}{Re_i} \right) + 1.75$$

$$Re_i = \frac{\psi_i d_i v}{\nu} \quad (\text{Nº Reynolds})$$

b) Rose

$$h = \left(\frac{1.067}{g \psi f^4} \right) \left(\sum_{i=1}^n C_{Di} \frac{\Delta L_i}{d_i} \right) v^2$$

$$C_{Di} = \frac{24}{Re_i} + \frac{3}{\sqrt{Re_i}} + 0.34 \quad (\text{Coeficiente de arrastre}).$$

9.3.4.- HIDRAULICA DEL LAVADO

9.3.4.1.- Aumente gradualmente el flujo de lavado hasta que el lecho filtrante empiece a fluidificarse.

9.3.4.2.- Obtenga la longitud del lecho expandido (L_e), la pérdida de carga y el flujo de fluidificación.

9.3.4.3.- Compare el resultado experimental de longitud del lecho expandido contra el calculado aplicando métodos de Fair Hatch:

$$(a) \quad L_e = L (1-f) \sum_{i=1}^n \left[\frac{P_i}{100 (1-f_{ei})} \right]$$

donde: L_e, L ; longitud el lecho expandido y sin expandir respectivamente (cm).

P_i ; porciento en peso de las partículas con tamaño d_i .

f ; porosidad promedio del filtro antes de ser expandido cm^3/cm^3 .

f_{ei} ; porosidad del medio expandido, con tamaño d_i , el valor $\frac{1}{1-f_{ei}}$ es función de $\frac{f_{ei}}{1-f_{ei}} = \frac{k^*}{g} \frac{\mu}{\rho_s - \rho} \left(\frac{6}{\psi d_i} \right)^2 v$

y se puede obtener de la tabla

27.5 del Fair y Geyer, versión en español.

Y (b) Aplicando el método de Amirtharajah determine longitud del lecho expandido. La secuencia del cálculo es la siguiente:

1) Determine la velocidad mínima de fluidificación, mediante:

$$v_f = \frac{36.77 (d_{60})^{1.82} [S_l (S_m - S_l)]^{0.94} (\text{cm/cm})}{\mu^{0.88}}$$

* $k = 4$, cuando el lecho comienza a fluidificarse

donde: d_{60} ; tamaño del medio filtrante, correspondiente al tamiz ideal que dejaría pasar el 60% de la arena en mm.

S_l ; gravedad específica del agua $[(g/cm^3)/(g/cm^3)]$

S_m ; gravedad específica del medio filtrante.

μ ; viscosidad absoluta del agua en centipoise.

2) Cálculo del N° de Reynolds correspondiente a v_f , mediante:

$$Re_f = \frac{(d_{60}) S_l v_f}{600 \mu} \quad \left(\begin{array}{l} S_l, \text{ en } g/cm^3 \\ d_{60}, \text{ en mm.} \\ v_f, \text{ en cm/mm.} \\ \mu, \text{ en g/cms} \end{array} \right)$$

3) Si el número de Reynolds es mayor a 10 se multiplicará el valor de v_f por un factor de corrección, el cual es:

$$K_R = 1.775 Re_f^{-0.272}$$

4) Obtención de la velocidad de sedimentación no interferida (v_s) de una partícula hipotética promedio, mediante $V_s = 8.45 v_f$

5) Cálculo del N° de Reynolds para la partícula hipotética, aplicando:

$$Re_o = S_l d_{60} v_s / 600 \mu$$

6) Cálculo del coeficiente de expansión con:

$$ne = 4.45 Re_o^{-0.1}$$

7) Cálculo de la constante del sistema (K_e) por medio de:

$$K_e = \frac{v_f}{(f)^{ne}} \quad (\text{cm/min}) \quad \left(f; \text{porosidad del lecho no expandido} \right)$$

8) Cálculo de la porosidad del lecho expandido (f_e) por medio de:

$$f_e = \left(\frac{v}{K_e} \right)^{1/ne}$$

donde: v; velocidad del lavado determinada experimentalmente (cm/min).

9) Obtenga la longitud del lecho expandido mediante:

$$L_e = L \frac{(1-f)}{(1-f_e)}$$

9.3.5.- OPERACION DEL FILTRO

9.3.5.1.- Filtre la suspensión experimental.

9.3.5.2.- A diferentes tiempos, determine la turbiedad del agua tratada y la pérdida de carga.

9.3.5.3.- Cuando se presente vacío parcial o carga negativa, suspenda la filtración.

9.3.5.4.- Lave el filtro a velocidad de fluidificación (paso 9.3.4.2).

9.3.5.5.- Registre la turbiedad del efluente a diferentes tiempos

9.3.5.6.- Cuando la turbiedad corresponda con la del agua de lavado, detenga el proceso.

9.4.- EQUIPO Y REACTIVOS

- . Arena o antracita.
- . Suspensión experimental.
- . Vidriería
- . Columna para filtración.
- . Turbidímetro.

9.5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

9.5.1.- CRIBADO DEL MEDIO FILTRANTE

9.5.1.1.- Estratigrafía

No. de Malla		Tamaño (mm)		Peso del material que pasa	%	
Pasa	Retiene	Rango	Promedio		Parcial	Acumulado

9.5.1.2.- Medio filtrante a preparar

Tamaño efectivo =

Coefficiente de uniformidad =

Nº Malla		Tamaño (mm)		% Requerido Pi	mi = $\frac{mtPi}{100}$
Pasa	Retiene	Rango	Promedio		

$$S_a = \sum S_{ai} P_i / 100$$

$$\phi_c = 2r =$$

$$A = \pi r^2$$

$$l =$$

$$V_c = A l =$$

$$m_t = \sum a V_c =$$

$$=$$

9.5.2.- PROPIEDADES DEL MEDIO FILTRANTE

Tamaño promedio di (mm)	Porosidad fi	Densidad $\frac{g}{cm^3}$		Vsi cm ³	vsi	doi	Re	voi	ψ_i
		ρ_{ai}	ρ_{ri}						

Promedios

9.5.3.- HIDRAULICA DE FILTRACION

Velocidad de la filtración v (cm/s)	Flujo $Q = v \cdot A$ cm ³ /min	Pérdida de carga (cm)

9.5.4.- HIDRAULICA DEL LAVADO

Le = cm.

v = cm/s

Δh = cm

Q = cm³/min

9.5.5. OPERACION DEL FILTRO

9.5.5.1- Filtración

Tiempo min	Turbiedad UNT	Δh (cm)

9.5.5.2.- Lavado

Tiempo min.	Turbiedad UNT

<u>CONCEPTO</u>	<u>RAPIDO CON LECHO</u> <u>MIXTO(arena-antracita)</u>	<u>RAPIDA CON LECHO</u> <u>DE ARENA</u>	<u>LENTO DE</u> <u>ARENA</u>
.Carga superficial ($m^3/m^2/día$)	235 - 590	87.5 - 157	7 - 14
.Velocidad de flujo (cm/seg.)	0.272 - 0.683	0.101 - 0.203	0.0081 - 0.0612
. Profundidad del lecho filtrante (cm)	30 - 45 grava 45 - 60 antracita 15 - 30 arena	30 - 45 grava 60 - 75 arena	30 grava 90 - 110 arena
.Pérdida de carga (m)	0.20 - 2.7	0.30 - 2.7	0.16 - 1.2
.Tiempo entre lavados (hr.)	12 - 48	24 - 72	480 - 1440
.Cantidad de agua para lavado (% del agua fil- trada)	1 - 3	1 - 6	0.2 - 0.6
.Tratamiento previo	Coagulación, flocula- ción y sedimentación	Coagulación, flocula- ción y sedimentación	Ninguno o aireación

**TABLA 9.1.- ASPECTOS CARACTERISTICOS DE FILTROS
PARA TRATAMIENTO DE AGUA.**

PRACTICA NO 10 DESINFECCION

10.1.- GENERALIDADES

La desinfección tiene por objeto la eliminación de bacterias patógenas del agua, para evitar enfermedades al ser humano y a la fauna acuática y terrestre.

El desinfectante de mayor uso es el cloro y sus derivados como el hipoclorito de sodio, aunque existen otros desinfectantes que incluyen al bromo, iodo, fluor, permanganato de potasio, cloruro de cobre, ozono, calor y radiaciones ultravioleta.

Las bacterias de tipo coliforme son buenos indicadores de la presencia de organismos patógenos, ya que reúne las características siguientes: a) son más resistentes a la desinfección que los patógenos, b) se encuentran presentes junto con los patógenos y en mayor número, c) son detectables y cuantificables con procedimientos de análisis sencillos y bastante precisos, d) no presentan crecimiento posterior en el medio ambiente, después de la desinfección,

e) la presencia de otras bacterias no inhibe su crecimiento, f) no son patógenos al ser humano.

La eficiencia de la desinfección depende del tipo y dosis del desinfectante, tiempo de contacto, pH, temperatura, concentración y tipo de bacterias y calidad del agua sujeta a desinfección.

Uno de los modelos, que describe la eficiencia de remoción de bacterias en función del tiempo de contacto y residual del desinfectante es el de Collins, cuya expresión es:

$$\frac{Y}{Y_0} = (1 + 0.23 Ct)^{-3} \quad (10.1)$$

donde:

Y : NMP al final del proceso de desinfección, org/100 ml.

Y₀: NMP antes de la desinfección org/100 ml.

C : Concentración de cloro residual mg/l

t : tiempo de contacto min.

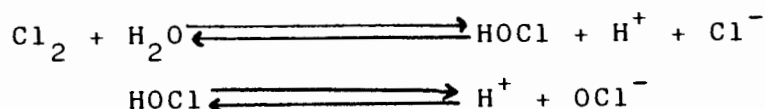
NMP; número más probable de bacterias coliformes.

Cuando se utiliza cloro como desinfectante es importante determinar la demanda del mismo, el cual es la diferencia entre la cantidad de cloro aplicada a una muestra de agua y la cantidad de cloro libre, combinado o total disponible al final del proceso de la desinfección. La demanda de cloro de cualquier tipo de agua varía con la cantidad de cloro aplicada, tiempo de contacto, pH y temperatura; y es causada por sustancias reductoras inorgánicas y orgánicas. Entre las primeras se tiene a los iones, ferroso, manganeso, nitrito, sulfuro, sulfito y amonio. Y entre las segundas, los fenoles y orgánicos aromáticos que forman derivados clorados.

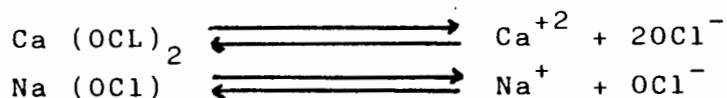
Cuando se desinfectan efluentes de tratamientos secundarios de agua residual, la demanda de cloro se debe principalmente a la presencia de compuestos amoniacales, que propician la formación de cloraminas, cuya destrucción se logra hasta llegar al punto denominado de quiebre, a partir del cual existe una cantidad residual de cloro libre. La curva de la cloración al punto de quiebre presenta la forma de la mostrada en la figura 10.1

Para la desinfección con cloro, éste se puede aplicar en forma gaseosa o bien como hipoclorito de sodio ó calcio. Las reacciones que se presentan son las siguientes:

1.- Hidrólisis de Cl_2



2.- Ionización de hipocloritos



3.- Formación de ácido hipocloroso



En cuanto a la influencia del pH, en la figura 10.2 se presenta la distribución porcentual del ácido hipocloroso y el ion hipoclorito en función del pH.

10.2.- OBJETIVOS

Determinar la efectividad del proceso de desinfección con cloro para la eliminación de bacterias coliformes. Comparar el poder germicida del Cl_2 con el de otro (s) desinfectante(s), y obtener la remoción de bacterias, en un tratamiento de agua convencional.

10.3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

10.3.1.- Efectividad del proceso de desinfección

10.3.1.1.- Con dosis variable

10.3.1.1.1.- Agregue 0.5, 10, 15, 25 y 40 mg. de la solución de Cl_2 (1 ml = 1 mg. Cl_2).

10.3.1.1.2.- Complete un litro con el agua por desinfectar (A).

10.3.1.1.3.- Coloque los 6 vasos de precipitado en el aparato mezclador y agite a 15 rpm. durante 20 minutos.

10.3.1.1.4.- Tome una muestra de 100 ml. de cada vaso. Declórela vertiéndola en una botella de OD previamente esterilizada que contenga 0.5 ml. de solución de sulfito de sodio (1 ml. = 100 mg.) y proceda con la técnica para determinación de bacterias.

10.3.1.1.5.- Tome otra muestra de 200 a 500 ml. para determinar cloro residual según procedimiento.

10.3.1.1.6.- Obtenga el porciento de remoción de bacterias coliformes y grafique dosis de cloro contra dicho porciento 10.3.4.

10.3.1.2.- Con tiempos de contacto diferentes

10.3.1.2.1.- Agregue 20 mg. de la solución de Cl_2 en cada uno de seis vasos de precipitado de 1 litro.

10.3.1.2.2.- Complete a un litro y coloque los vasos en el aparato mezclador para agitar a 15 rpm.

10.3.1.2.3.- Tome muestras de acuerdo a lo indicado en la tabla siguiente:

<u>VASO</u>	<u>TIEMPO min</u>	<u>VOLUMEN DE MUESTRAS</u>	
		<u>100 ml*</u>	<u>200-500 ml**</u>
1	5	+	+
2	10	+	+
3	15	+	+
4	20	+	+
5	30	+	+
6	40	+	+

* Para proceder según paso 10.3.1.1.4

** Para proceder según paso 10.3.1.1.5

10.3.1.2.4.- Verifique la validez del modelo matemático de Collins, graficando Ct contra $(\frac{Y_0}{y})^{1/3}$

10.3.2.- Comparación de poder germicida

10.3.2.1.- Agregue 0 , 5 y 25 mg. de solución de Iodo (1 ml= 1 mg I_2) y complete a un litro con el agua problema.

10.3.2.2.- Agite a 15 rpm. durante 20 minutos.

10.3.2.3.- Tome muestras de 100 ml. viértalos en botellas de OD previamente esterilizadas que contengan 2 ml. de tiosulfato 0.01N, para eliminar el I_2 .

10.3.2.4.- Proceda con la técnica para determinar coliformes.

10.3.2.5.- Compare los resultados con los obtenidos en la desinfección con Cl_2 (procedimiento 10.3.1)

10.3.3.- Eficiencia de remoción en tratamiento convencional

10.3.3.1.- Tome una muestra del agua problema (B) para determinar bacterias coliformes (procedimiento 10.3.5).

10.3.3.2.- Agregue 6 ml. de sulfato de aluminio (1 ml = 10 mg) y complete a un litro con el agua problema.

10.3.3.3.- Agite a 15 rpm. durante 20 minutos.

10.3.3.4.- Tome una muestra de 100 ml. para bacterias.

10.3.3.5.- Permita la sedimentación durante 20 minutos.

10.3.3.6.- Decante el sobrenadante y tome una muestra de 100 ml. para bacterias.

10.3.3.7.- Filtre la solución decantada, utilizando arena como medio filtrante, tome una muestra del agua filtrada para bacterias.

10.3.3.8.- Transfiera 588 ml. del agua filtrada a un vaso de precipitado de un litro conteniendo 12 ml. de la solución de Cl_2 , para obtener una concentración de 20 mg/l.

10.3.3.9.- En otro vaso agregue 20 mg. de Cl_2 y complete a un litro con el agua problema.

10.3.3.10- Mezcle el contenido de los 2 vasos a 15 rpm. durante 20 minutos.

10.3.3.11- Proceda con los pasos 10.3.1.1.4 y 10.3.1.1.5

10.3.3.12- Obtenga el porcentaje de remoción para cada paso y evalúe resultados.

10.3.4.- Determinación de cloro residual (método idométrico)

10.3.4.1.- A la muestra de 200 a 500 ml. agregue 5 ml. de ácido acético y 1 g. de ioduro de potasio.

10.3.4.2.- Titule con tiosulfato de sodio 0.01N. Cuando la solución adquiera color pajizo, agregue la solución indicadora de almidón y prosiga hasta desaparición de color.

10.3.4.3.- Cálculos: $\text{mg/l Cl}_2 = \frac{V.N \times 35450}{\text{ml. de muestra}}$

V : volumen de tiosulfato

N : normalidad tiosulfato.

10.3.5.1.- Determinación de coliformes totales

10.3.5.1.- Conteo en placa

10.3.5.1.1.- Agite el frasco que contenga la muestra y tome el volumen necesario para siembra directa o efectuar las diluciones convenientes.

10.3.5.1.2.- En caso de efectuar diluciones coloque 1 ml. de cada una en sendas cajas de Petri y vierta encima agar nutritivo previamente enfriado a una temperatura entre 43 y 45°C.

10.3.5.1.3.- Homogenice, deje solidificar e incube a 20 ó 35°C

10.3.5.1.4.- Efectúe observaciones a las 24 y 48 horas.

10.3.5.2.1.- Se agita como en el paso 10.3.5.1.

10.3.5.2.2.- Siembre 1 ml. de muestra o dilución en cada uno de tres tubos conteniendo caldo lactosado.

10.3.5.2.3.- Incube a 35°C.

10.3.5.2.4.- Observe la formación de gas a las 48 horas.

10.3.5.2.5.- Determine el número más probable, consultando las tablas del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

10.4.- EQUIPO Y REACTIVOS

10.4.1.- Equipo

(I.1) 2 aparatos para pruebas de jarras.

(I.2) 12 vasos de precipitado.

(I.3) 200 tubos de ensaye con tapón para análisis bacteriológicos.

(I.4) 144 tubos de ensaye pequeños para detección de gas en los tubos de fermentación.

(I.5) En vez I.3 y I.3, 48 cajas petri y 48 tubos para agua de dilución

(I.6) 15 botellas de OD esterilizadas.

(I.7) 12 pipetas de 1 ml. esterilizadas.

10.4.2.- Reactivos

- I.1.- Tiosulfato de sodio 0.01N.
almidón
- I.2.- Sulfito de sodio 1 ml. = 100 mg.
- I.3.- Sulfato de aluminio 1 ml. = 10 mg.
- I.4.- 1500 ml. de caldo lactosado ó 1000 ml. de gelosa
agar.
- I.5.- 500 ml. de agua para dilución.
- I.6.- Solución Cl_2 (ml. = 1 mg.) y solución de I_2 (ml.
= 1 mg.).

10.4.3.- Agua problema

- A - 800 ml. de agua negra en 18 l de agua destilada
- B - 200 ml. de agua negra en 5 l de agua destilada + 10
g. de Caolín + 1 g. de CaCl_2 + 1 g. de NaCO_3 .

10.5 RESULTADOS

10.5.1.- Efectividad del proceso de desinfección

10.5.1.1.- Con dosis variable

Dosis de cloro mg/l	Cl ₂ residual mg/l	org/100 ml.
0		
5		
10		
15		
25		
40		

t contacto = 20 min.

rpm = 15

10.5.1.2.- Con tiempos de contacto diferentes

Tiempo de contacto (min)	Cl ₂ residual mg/l	org/100 ml.
5		
10		
15		
20		
30		
40		

Dosis de cloro = 20 mg/l

rpm = 15

10.5.2.- Comparación del poder germicida

Dosis de I ₂ mg/l	org/100 ml.
0	
15	
25	

tiempo de contaco = 20 min.

rpm = 15

10.5.3.- Eficiencia de remoción en tratamiento convencional

TRATAMIENTO	org/100 ml.
1 - Ninguno	
2 - Coagulación	
3 - 2 + Sedimentación	
4 - 3 + Filtración	
5 - 4 + Desinfección	
6 Agua cruda + Desinfección	

Dosis de Cl_2 = 20 mg/l

Tiempo de contacto - 20 min para 5 y 6

rpm = 15

10.5.3.4.- Análisis Bacteriológicos

EXPERIMENTO	CANTIDAD	CUENTA EN PLACA O NUMERO DE POSITIVOS							Tiempo lec. hr.
		10' ml.	10° ml.	10 ⁻¹ ml.	10 ⁻² ml.	10 ⁻³ ml.	10 ⁻⁴ ml.	10 ⁻⁵ ml.	
I-Efectividad I.1 Dosis variable	0 mg/l Cl ₂	-	-					-	
	5 "	-					-	-	
	10 "	-					-	-	
	15 "	-					-	-	
	25 "					-	-	-	
	40 "					-	-	-	
I.2 Tiempo de con- tacto diferen- te	5 min.	-					-	-	
	10 "	-					-	-	
	15 "	-					-	-	
	20 "					-	-	-	
	30 "					-	-	-	
	40 "					-	-	-	
II-Poder germici- da	0 mg/l I ₂	-	-					-	
	5 "	-					-	-	
	25 "					-	-	-	
III-Remoción en - tratamiento - convencional	1	-	-					-	
	2	-	-					-	
	3	-	-					-	
	4	-	-					-	
	5	-					-	-	
	6	-	-					-	

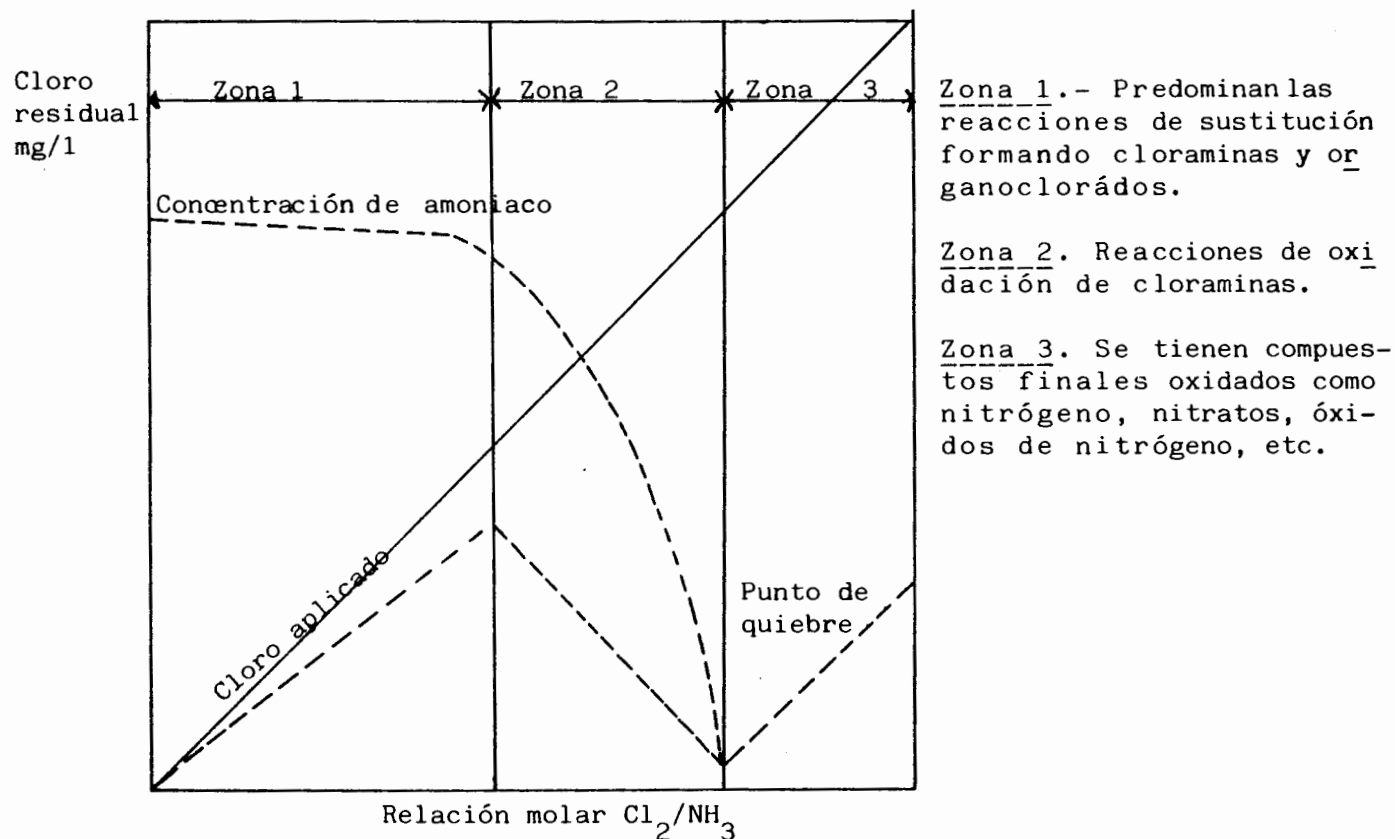


FIGURA 10.1.- CURVA DE LA CLORACION A PUNTO DE QUIEBRE.

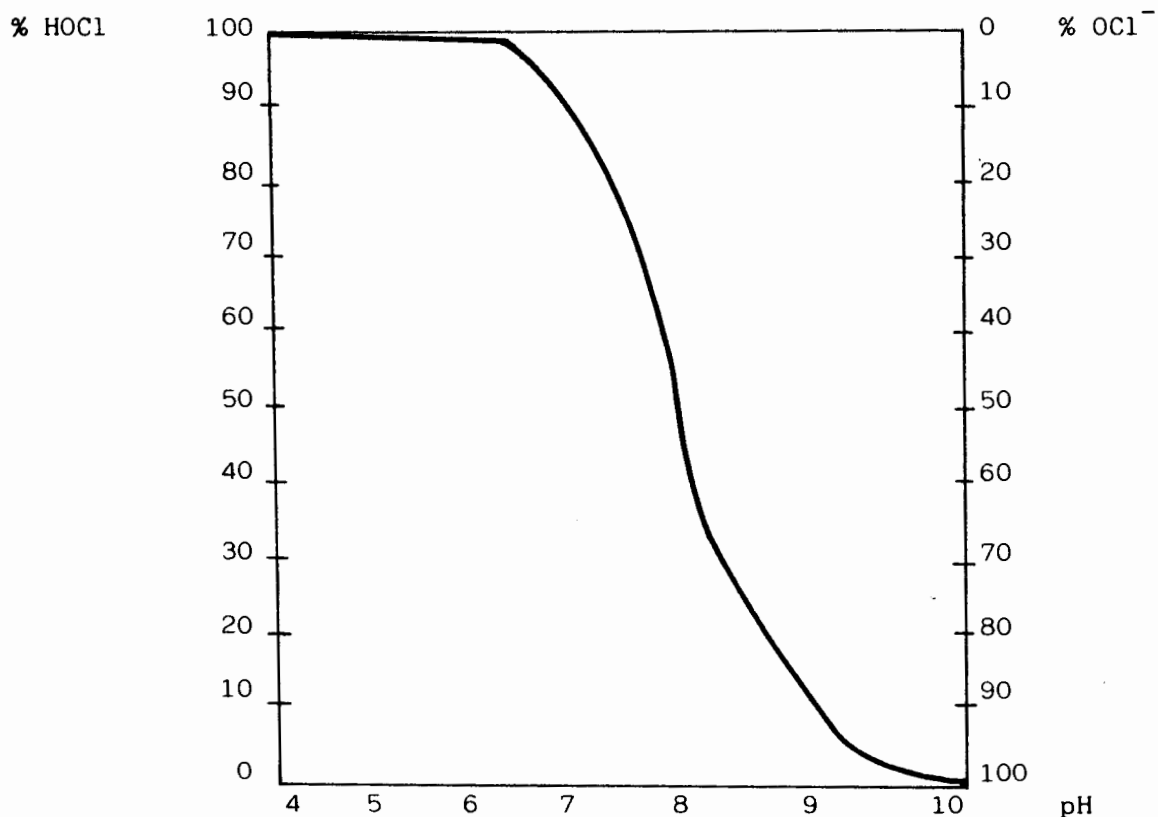


FIGURA 10.2.- DISTRIBUCION DEL HOCl Y OCl^- RESPECTO AL pH.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Walas Stanley M., Cinética de Reacciones Químicas, Ed. Aguilar, 1965.
- 2.- Levenspiel, Octave. Chemical Reaction Engineering, Ed. Weley. 1972.
- 3.- Mc Cabe Warren L., Unit Operations of Chemical Engineering, Ed. Mc Graw - Hill, 1976.
- 4.- Rich L. G., Unit Operations of Sanitary Engineering, Ed. Wiley, 1961.
- 5.- Rich L. G., Unit Processes of Sanitary Engineering, Ed. Wiley, 1963.
- 6.- Eckenfelder W. W., Jr., Laboratory and Desing Procedures for Wastewater Tratment Processes, Center for Research in Water Resources, Technical Report EHE-10-6802, CRWR-31, Austin Texas December 1968.

Este libro se terminó de
imprimir en IMPROSA en el
mes de octubre de 1985,
siendo Jefe de la DEPFI,
el Dr. Gabriel Echávez;
y de la Sección Editorial,
la Lic. Eugenia M. de Li-
zalde.

Tiraje: 100 ejs.

F/DEPFI/D-61/1985/EJ.3



711484