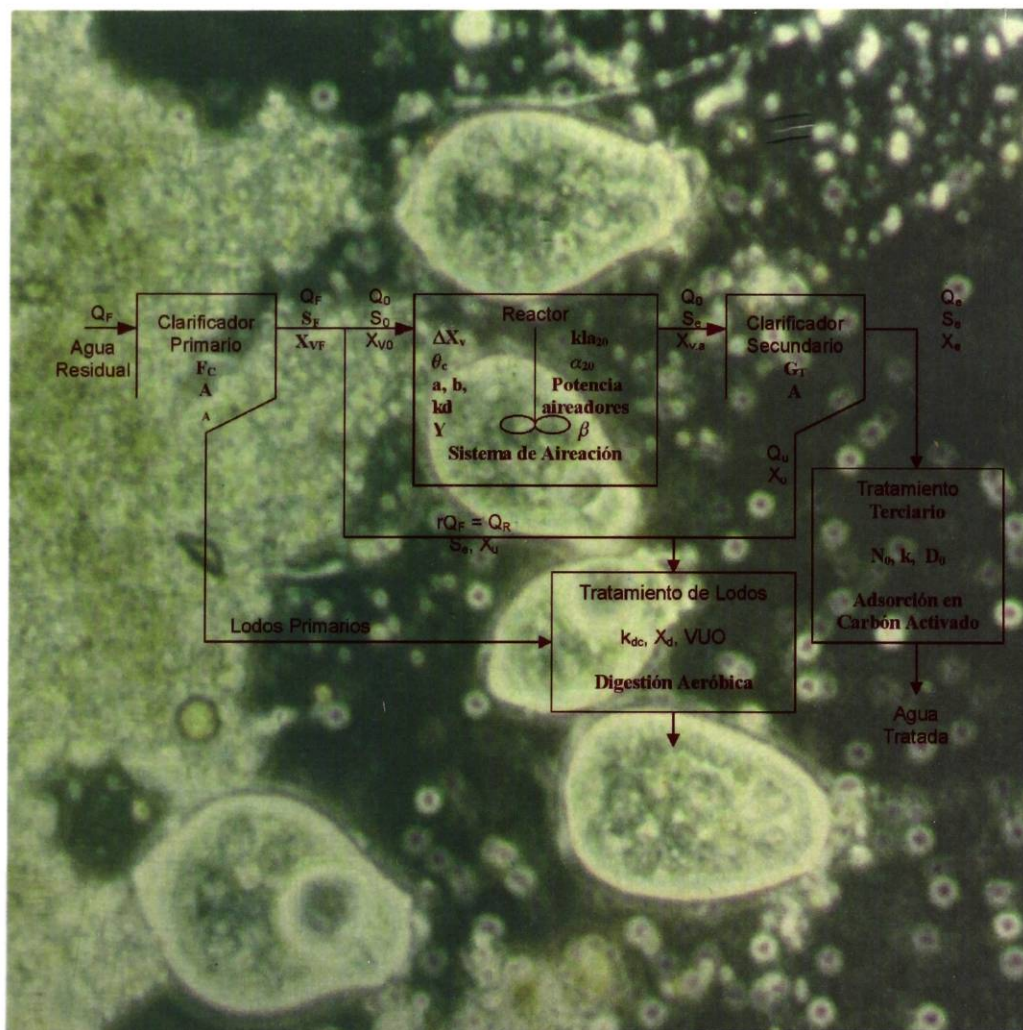


Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

Sergio A. Martínez Delgadillo





SERGIO A. MARTÍNEZ DELGADILLO tiene una amplia experiencia en el campo del tratamiento de aguas. Es consultor tecnológico especialista y perito en protección ambiental. Actualmente es coordinador de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental y profesor-investigador titular en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Ha asesorado a diferentes industrias para la optimización y diseño de sus sistemas de tratamiento de aguas residuales e impartido varios cursos relacionados con el diseño de plantas para el mismo fin. Tiene varias publicaciones en este campo, así como diversos trabajos relacionados con el tratamiento de residuos líquidos mediante métodos electroquímicos. El doctor Martínez patentó un proceso electroquímico para la remoción de cromo hexavalente de aguas residuales.

PARÁMETROS DE DISEÑO DE SISTEMAS
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

COLECCIÓN

Libros de Texto y Manuales de Práctica

SERIE

Material de apoyo a la docencia

(Teoría y prácticas de laboratorio; problemarios)

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

Métodos experimentales

Sergio A. Martínez Delgadillo



2893627

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Rector General

José Luis Gázquez Mateos

Secretario General

Edmundo Jacobo Molina

UNIDAD AZCAPOTZALCO

Rectora

Mtra. Mónica de la Garza Malo

Secretario

Lic. Guillermo Ejea Mendoza

Coordinador de Extensión Universitaria

Lic. Enrique López Aguilar

Jefa de la Sección Editorial

Silvia Aboytes Perete

Portada:

Virginia Flores/Sans Serif Editores

Composición tipográfica, diseño, producción y cuidado editorial
Sans Serif Editores, telfax 674 60 91

Primera edición 1999

ISBN: 970-654-243-4

© Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco
Av. San Pablo núm. 180
México, 02200, D.F.

Impreso en México
Printed in Mexico

INTRODUCCIÓN

EN EL DISEÑO de plantas para tratar aguas residuales es común que los propios ingenieros sean los que las diseñen, apoyándose sólo en la información escrita de los especialistas. Esta práctica, aunque es muy empleada, no por ello es correcta, ya que los valores de los parámetros consultados no son sino promedios de estudios efectuados en otros países, en apariencia semejantes a las establecidas en nuestro país pero con procesos de producción diferentes; en otros casos ni siquiera se cuenta con los valores necesarios para determinado tipo de aguas residuales puesto que los desconocen (por ejemplo para la industria de las tortillas).

Por todo ello es necesario enseñar a los estudiantes e ingenieros la metodología para obtener los parámetros básicos al diseñar diferentes procesos unitarios de tratamiento de aguas residuales de cualquier tipo, partiendo de estudios piloto y de los efectuados en el laboratorio. De aquí que se presente este conjunto de procedimientos experimentales.

Es importante señalar por qué se privilegia la parte experimental: tanto la teoría como los principios de los procesos se encuentran ampliamente explicados en los libros que aparecen en la bibliografía incluida en cada una de las prácticas, elaboradas de acuerdo con los programas de Operaciones Unitarias, Procesos Físicoquímicos y Procesos Biológicos en la Ingeniería Ambiental, lo mismo que de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales y Tratamiento de Residuos Líquidos Industriales.

Los métodos experimentales que aquí se presentan se clasifican en:

- 1) Tratamiento primario
 - Coagulación y floculación
 - Sedimentación discreta
 - Sedimentación floculenta
 - Sedimentación zonal

Introducción

2) Tratamiento secundario

- Aireación en sistemas biológicos
- Determinación de parámetros biocinéticos
- Métodos para controlar sistemas de lodos activados

3) Tratamiento terciario

- Adsorción en carbón activado

4) Tratamiento de lodos

- Digestión aerobia de lodos

Además, en cada práctica se describe brevemente el procedimiento experimental que se debe seguir. Se incluye también la sección de registro donde mediante preguntas se conduce al estudiante a la elaboración de un informe, haciéndolo que consulte y revise diferentes libros, esto con la finalidad de integrar lo experimental con lo teórico.

Con el objeto de que el estudiante tenga una idea más clara sobre el trabajo experimental que se realizará, se incluyen diagramas y fotografías de los diferentes equipos utilizados durante las prácticas.

Para que el estudiante aproveche al máximo las prácticas, se sugiere que reafirme su conocimiento sobre la parte teórica y el manejo de técnicas de análisis de aguas residuales.

S.A.M.D.

CAPÍTULO I

COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

GENERALIDADES

LA COAGULACIÓN Y LA FLOCULACIÓN son métodos que se emplean para remover de las aguas residuales la materia coloidal y la suspendida (tamaño de 1.0 nm a 0.1 nm). La estabilidad de la materia suspendida se debe a la repulsión entre partículas inducida por el alto potencial zeta (-15 a -20 mv). Esta materia no sedimenta fácilmente y no puede ser removida por métodos físicos convencionales.

Durante la coagulación se desestabilizan los coloides debido a que disminuye el potencial zeta de las partículas mediante la adición de coagulantes. Esta desestabilización se produce por el contacto que se establece entre las partículas suspendidas (coloidales) y los microflóculos de carga positiva de hierro o de aluminio. El punto óptimo para la coagulación es cuando el potencial zeta alcanza su más bajo nivel, o punto isoelectrico, que es cuando las fuerzas de Van der Waals prevalecen. La floculación hace que se formen conglomerados de partículas coloidales de mayor tamaño cuando se establecen puentes químicos entre ellas; de esta manera forman estructuras fácilmente sedimentables que pueden removerse mediante sedimentación, flotación o filtración.

Cuando a la muestra que se va a sedimentar se adiciona un coagulante en una dosis menor a la óptima, no se forman flóculos o, si se forman, son tan pequeños que le dan a la muestra una apariencia turbia. Si es al contrario, o sea, si el coagulante que se le añade es excesivo, se forma un flóculo muy denso pero frágil y esponjoso que se puede romper al agitar, lo que dificulta la sedimentación. Un buen flóculo es de apariencia pesada y compacta, además de que inmediatamente después de haberle agregado el coagulante y agitarlo comienza a sedimentarse.

Las sustancias coagulantes de mayor uso son las sales de aluminio (sulfatos) y de hierro (cloruros y sulfatos). En ocasiones, para mejorar el proceso, se requieren sustancias conocidas como *ayuda coagulante*.

Método experimental 1. Prueba de jarras

La prueba de jarras se ha utilizado para evaluar el proceso de coagulación y floculación. Es importante señalar que cuando las pruebas se desarrollan cuidadosamente, se pueden obtener resultados confiables para diseñar, evaluar y optimizar el funcionamiento de una planta.

Durante el desarrollo de la prueba de jarras, se tienen que tomar en cuenta factores tales como: temperatura de la experimentación, fuerza del coagulante, cantidad del coagulante, pH, método de adición del coagulante, secuencia y tiempo de adición de los reactivos, duración e intensidad del mezclado rápido y lento, método de muestreo, entre otras. Es importante definir el término gradiente de velocidad media G , ya que mide la intensidad de mezclado en el mezclado rápido y en la floculación, es decir, es el trabajo suministrado al fluido por unidad de tiempo y por unidad de volumen, y se define según la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}} = \text{segundos}^{-1}$$

donde:

W = Función de disipación o suministro de potencia por unidad de volumen
 μ = Viscosidad absoluta del líquido

Para la prueba de jarras se tienen la figura I.2 y la foto I.1 (Hudson, 1981), donde se relaciona G en función de las revoluciones por minuto (rpm) de las paletas de la cuba (véase figura I.1) del equipo de pruebas de jarras.

Algunos de los factores que deben considerarse en la selección del coagulante son:

- a) Calidad del agua a tratar
- b) pH de la muestra a tratar
- c) pH óptimo del coagulante
- d) Dosis
- e) Volumen de los lodos generados
- f) Velocidad de sedimentación de los lodos
- g) Eficiencia de remoción de contaminantes

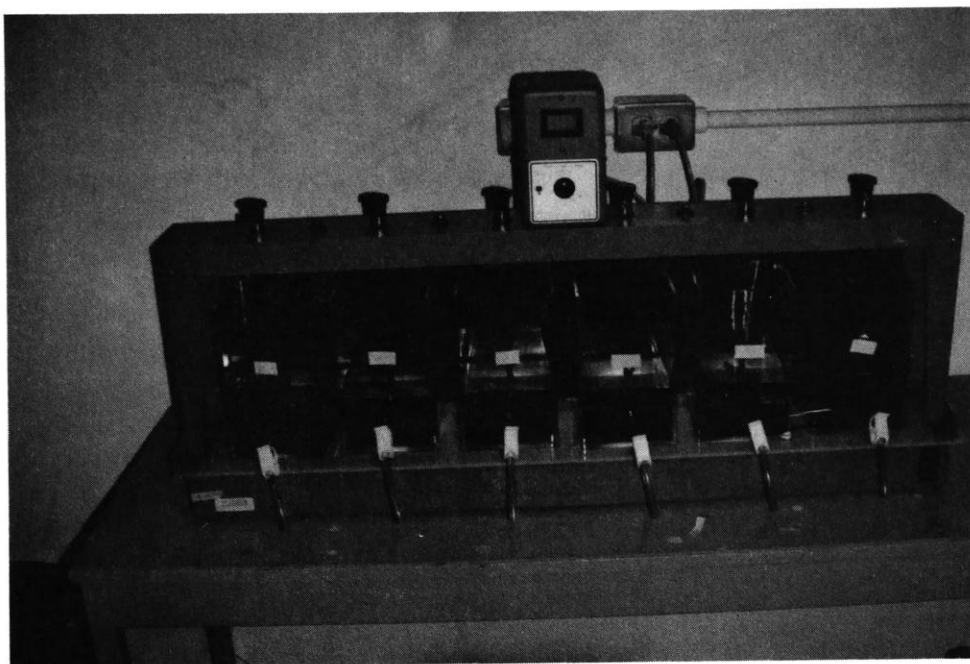


Foto I.1. Equipo de pruebas de jarras

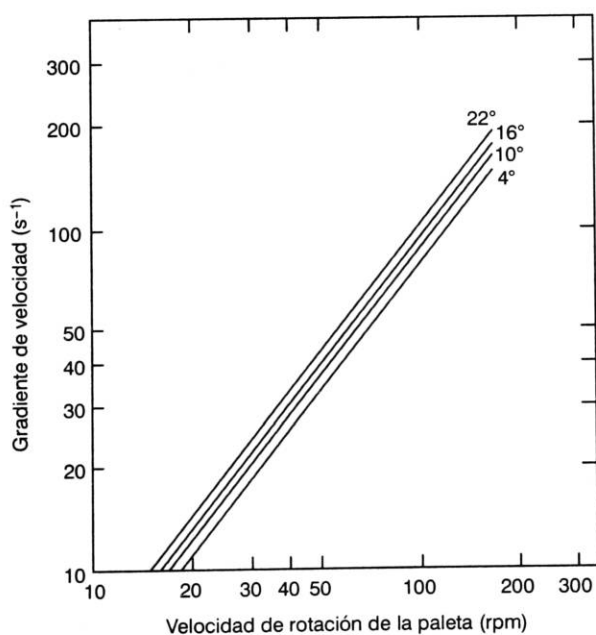


Figura I.1. Gráfica del gradiente de velocidad en función de la velocidad de rotación de la paleta

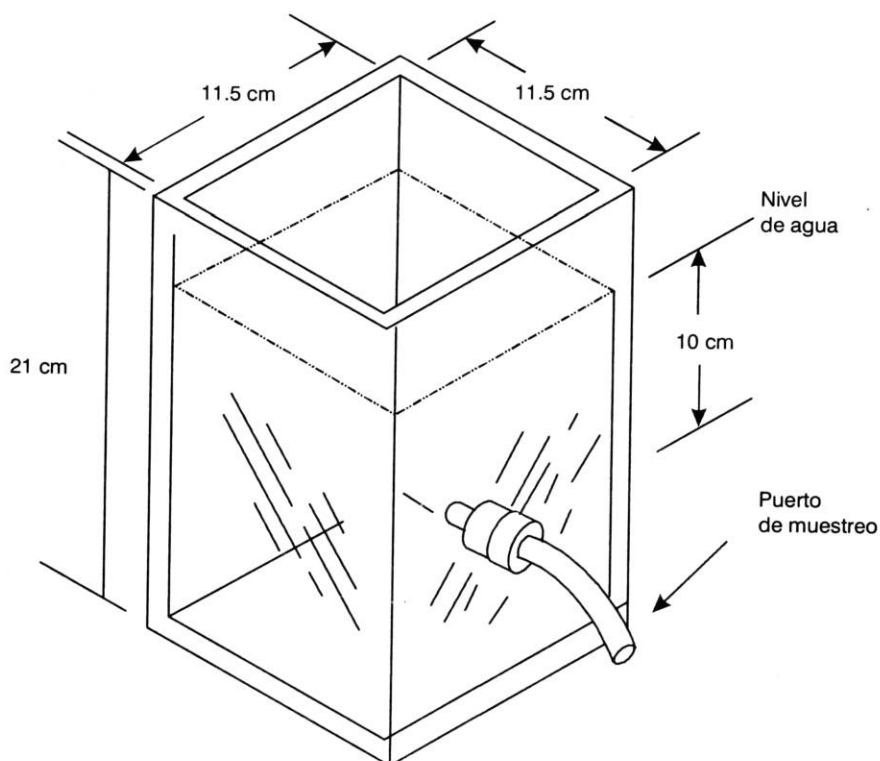


Figura I.2. Cuba de dos litros, de acrílico, del equipo de prueba de jarras

OBJETIVO

Emplear el procedimiento adecuado para determinar tanto el pH como la dosis óptima de diferentes coagulantes para remover contaminantes y partículas suspendidas en aguas residuales mediante pruebas de jarras.

EQUIPO Y MATERIALES

- Crisoles gooch
- Material de vidrio (pipeta, bureta, vasos de precipitados y matraces, entre otros)
- Cronómetros
- Filtros para sólidos suspendidos
- Bomba de vacío

Coagulación y floculación

Turbidímetro
Potenciómetro
Estufa
Balanza analítica
Equipo de pruebas de jarras

Reactivos

Sulfato de aluminio (solución de 50 g/L)
Cloruro férrico (solución de 50 g/L)
Hidróxido de sodio
Dicromato de potasio
Sulfato de plata
Sulfato ferroso amoniacal
Ferroina
Sulfato mercúrico
Ácido sulfúrico

PROCEDIMIENTO

Para determinar el pH óptimo

1. Caracterización de la muestra: medir sólidos suspendidos, turbidez, DQO y pH.
2. Colocar en un vaso de precipitados con agitación 200 mL de muestra. Adicionar la solución 50 g/L de coagulante (Al o Fe) de 1 en 1 mL hasta observar buena formación de flóculos. Tomar esta concentración de coagulante.
3. En cada una de las cubas del equipo para prueba de jarras, coloque 2 L de agua residual. Adicionar ácido sulfúrico 1M o hidróxido de sodio 1M para ajustar el pH de las muestras en un intervalo de 4 a 9, incrementando una unidad, es decir, las muestras tendrán un pH de 4, 5, 6, 7, 8 y 9.
4. Adiciónales a las muestras el coagulante para alcanzar la concentración que se obtuvo en el punto dos (concentración constante).
5. Mezcle rápido durante dos minutos a rpm máxima, después, durante 15 minutos, mezcle lento a 10-20 rpm. Tome el tiempo en el que se forman los flóculos.
6. Espere 20 minutos para que se sedimente y luego determine el sobrenadante, el pH, los sólidos suspendidos, la DQO y la turbidez de cada muestra.

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

7. Construya una gráfica de cada parámetro (sólidos, DQO y turbidez), en función del pH.

Para determinar la dosis de coagulantes

1. Prepare seis muestras de 2 L de agua residual y ajuste todas al pH óptimo que se obtuvo en la prueba anterior.

2. Para esta prueba use de 25% a 200% de la dosis de coagulante utilizada para la determinación del pH óptimo; pruebe seis dosis diferentes.

3. Mezcle rápido durante dos minutos a rpm máxima, después mezcle lento durante 15 minutos a 10-20 rpm. Tome el tiempo en el que se forman los flóculos.

Si va a adicionar polielectrólitos:

- Cationicos: se agregan durante la fase de mezcla rápida.
- Aniónicos: se añaden en la etapa de mezcla lenta.
- No-iónicos: se adicionan en la etapa de mezcla lenta.

4. Deje sedimentar durante 20 minutos y determine en el sobrenadante los sólidos suspendidos, la DQO y la turbidez de cada muestra.

5. Elabore una gráfica de sólidos, de DQO y de turbidez en función de la dosis de coagulante.

Propiedades de sedimentación y cantidad de lodos

1. Prepare 1.5 L de agua residual con pH y dosis óptima.

2. Mezcle rápidamente durante 2 minutos a rpm máxima (coagulación); después mezcle lentamente durante 15 minutos a 10-20 rpm y tome el tiempo en el que se formen los flóculos (floculación).

3. Pase con cuidado a una probeta de 1 000 ml para evitar que los flóculos se rompan.

4. Mida la altura de la interfase a diferentes tiempos hasta la estabilización. Elabore la gráfica de la variación de la altura en función del tiempo para obtener la velocidad de sedimentación.

5. Deje sedimentar durante 20 minutos y mida el volumen de los lodos. Elimine con cuidado el sobrenadante para no perder los lodos; mida la humedad y la concentración de los sólidos suspendidos.

Coagulación y floculación

Curva de distribución de velocidades de sedimentación

1. Prepare 2.0 L de agua residual con pH y dosis óptima en la cuba del equipo de pruebas de jarras.
2. Mezcle rápidamente durante 2 minutos a rpm máxima (coagulación); mezcle lentamente durante 15 minutos a 10-20 rpm y tome el tiempo en el que se formen los flóculos (floculación).
3. Al finalizar el tiempo de agitación lenta se detiene la agitación y se comienza a medir el tiempo para tomar muestras, del puerto de muestreo, a los 1, 2, 4, 8 y 16 minutos a una altura de 10 cm abajo del nivel del agua. Las muestras tomadas a estos tiempos corresponderán a una velocidad de sedimentación de 10, 5, 2.5, 1.25 y 0.625 cm/min.
4. Mida la turbidez a cada muestra tomada y calcule el porcentaje de turbidez residual, ésta se obtiene dividiendo la turbidez de cada muestra entre la turbidez de la muestra sin tratamiento, multiplicada por cien.

REPORTE DE LA PRÁCTICA

1. ¿Qué finalidad tiene el mezclado rápido?
2. ¿Qué finalidad tiene el mezclado lento?
3. Explique la función de cada tipo de polielectrólitos, cite algunos ejemplos junto con sus aplicaciones.
4. ¿Por qué se adicionan los polielectrólitos catiónicos en la fase de mezclado rápido, lo mismo que los aniónicos y no-iónicos en la fase de mezclado lento?
5. Haga una gráfica de DQO residual, de sólidos suspendidos residuales y de turbidez, en función del pH.
6. Haga una gráfica de DQO residual, de sólidos suspendidos residuales y de turbidez, en función de la dosis de coagulante.
7. Obtenga la curva de distribución de velocidades graficando en un papel log-log el porcentaje de turbidez residual en función de la velocidad de sedimentación, expresada en cm/min y en función de la carga hidráulica, en $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$. Explique las gráficas.
8. ¿Cuál es el pH y la dosis óptimos para los tipos de coagulantes probados?
9. De los coagulantes usados, ¿cuál recomendaría usted y por qué?

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, C., D. Ford y W. Eckenfelder, *Development of Design and Operational Criteria for Wastewater Treatment*, Enviro Press, 1981.
- APMA-ANWA-WPCF, *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, 178a. ed., Díaz de Santos, 1992.
- Association of Environmental Engineering Professors, *Environmental Engineering Unit Operations and Unit Processes Laboratory Manual*, John T. O'Connor editor, 1972.
- Eckenfelder, W., *Industrial Water Pollution Control*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1989.
- Eckenfelder, W. y D. L. Ford, *Industrial Water Pollution Control, Experimental Procedure for Process Design*, Pemberton Press, 1970.
- Hudson, H., *Water Clarification Processes. Design and Evaluation*, Van Nostrand Reinhold, 1981.
- Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering Treatment. Disposal and Reuse*, 3a. ed., Nueva York, McGraw-Hill, 1991.
- Ramalho, R. S., *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté, 1991.

CAPÍTULO II

SEDIMENTACIÓN

GENERALIDADES

EN ESTA SECCIÓN SE DESCRIBEN prácticas de los diferentes tipos de sedimentación; como se trata de temas afines, la bibliografía es la misma, por lo que se cita al final.

La sedimentación es un proceso que se utiliza para clarificar el agua. Durante el proceso se separan los sólidos en suspensión mediante fuerzas gravitacionales; en una planta convencional, para tratar aguas residuales mediante lodos activados, la sedimentación se aplica en tres partes:

- en los desarenadores (sedimentación discreta)
- en los clarificadores primarios (sedimentación floculenta)
- en los sedimentadores secundarios de lodos biológicos colocados después del reactor aireado (sedimentación zonal)

Hay tres tipos de sedimentación, de acuerdo con la naturaleza de las partículas sólidas que se encuentran en la suspensión:

Sedimentación discreta. En esta sedimentación las partículas mantienen su tamaño, forma y densidad durante el proceso, por lo tanto la velocidad de su sedimentación es constante.

Sedimentación floculenta. Para este caso, debido a la coalescencia, el diámetro efectivo de las partículas aumenta por lo que cambia tanto la gravedad específica como la velocidad de sedimentación.

Sedimentación zonal. Este tipo de sedimentación se presenta con lodos biológicos o químicos cuando los sólidos suspendidos exceden concentraciones de 500 mg/L.

Método experimental 2. Sedimentación discreta

OBJETIVO

A partir de los resultados experimentales, obtener los parámetros de diseño de desarenadores para partículas cuyo tipo de sedimentación es discreta.

EQUIPO Y MATERIALES

Probetas de 1 000 ml
Cronómetros
Crisoles gooch
Material de vidrio (pipeta, bureta, vasos de precipitados, matraces)
Filtros para sólidos suspendidos
Bomba de vacío
Tubería de vidrio
Estufa
Balanza analítica

PROCEDIMIENTO

1. Llene una probeta de 1 000 ml con la muestra que contiene las partículas discretas (por ejemplo arena). Pruebe con concentraciones de arena de 100, 250, 500 y 750 mg/L.
2. Mezcle durante un minuto para homogeneizar; deje reposar para permitir la sedimentación.
3. Tome muestras a diferentes intervalos (cada minuto), a una altura predeterminada y constante (20 cm) de la superficie del líquido en la probeta.
4. Analice los sólidos suspendidos totales de las muestras tomadas en diferentes tiempos.
5. Haga lo mismo para las diferentes concentraciones especificadas en el primer punto de esta práctica, es decir, 100, 250, 500 y 750 mg/L.

CÁLCULOS

1. Elabore el cuadro II.1 para cada concentración de sólidos suspendidos:

Sedimentación

CUADRO II.1. Resultados experimentales obtenidos

Tiempo (min)	Sólidos suspendidos (mg/L)	Velocidad de sedimentación (cm/min)	Sólidos suspendidos residuales (%)
0.0	500	—	100
1.0	486.5	20	97.3
—	—	—	—
—	—	—	—
hasta 20	—	1	—

Cálculo de la velocidad de sedimentación

La velocidad de sedimentación (V) para cada tiempo se obtiene dividiendo la distancia ($D = 20$ cm) entre el tiempo de sedimentación (primera columna del cuadro II.1)

$$V = \frac{D}{t}$$

Porcentaje de sólidos residuales (% SR):

$$\%SR = \frac{St}{So} \times 100$$

donde:

St = Concentración de sólidos al tiempo t

So = Concentración de sólidos iniciales ($t = 0$)

2. Elabore la gráfica de la fracción de sólidos residuales (cuarta columna del cuadro II.1) contra la velocidad de sedimentación (tercera columna). Su gráfica debe ser similar a la de la figura II.1.

3. De la figura obtenida experimentalmente seleccione una velocidad de sedimentación (V_0) y calcule el total de sólidos suspendidos removidos (R) a la velocidad seleccionada, según la siguiente ecuación:

$$R = (1 - C_0) + \frac{1}{V_0} \int_0^{C_0} V dC$$

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

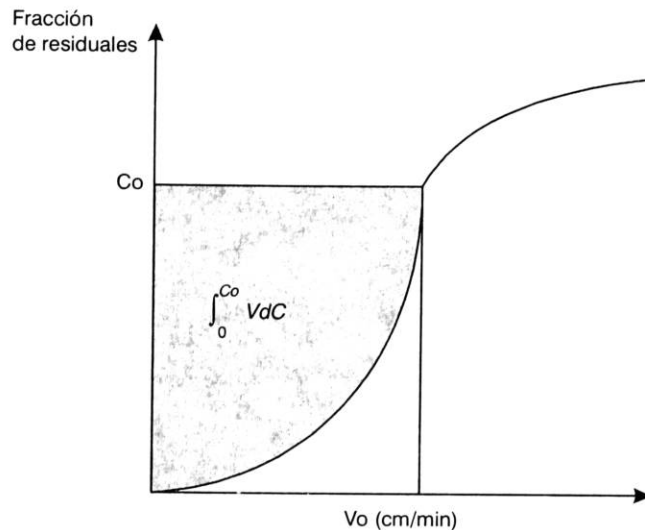


Figura II.1. Ejemplo de la gráfica de porcentajes de sólidos residuales en función de velocidad de sedimentación, obtenida de datos experimentales

donde:

C_o = Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor o igual a V_o

V_o = Factor de carga *overflow rate* (flujo (Q)/área (A))

V = Velocidad de sedimentación

El valor de la integral $\int_0^{C_o} V dC$ puede calcularse gráficamente con cualquier método (por ejemplo con la regla del trapecio).

4. Calcule el factor de carga ($Q/A = m^3/m^2d$) para la velocidad seleccionada.

5. Haga lo mismo que en el punto 3, pero ahora seleccione diferentes velocidades de sedimentación.

6. Obtenga la gráfica del porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales para diferentes factores de carga.

REPORTE DE LA PRÁCTICA

1. Para las diferentes concentraciones de sólidos, especificadas en el primer punto del procedimiento, reporte los cálculos y las gráficas de:

Sedimentación

- porcentaje de sólidos residuales en función de la velocidad de sedimentación
 - porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales en función del factor de carga
2. Analice y saque sus conclusiones sobre los resultados y las gráficas obtenidas.

Método experimental 3. Sedimentación floculenta

OBJETIVO

Obtener los parámetros de diseño de sedimentadores primarios para partículas con sedimentación floculenta, a partir de resultados experimentales.

EQUIPO Y MATERIALES

Probetas de 1 000 ml
Cronómetros
Crisoles gooch
Material de vidrio (pipeta, bureta, vasos de precipitados, matraces)
Filtros para sólidos suspendidos
Bomba de vacío
Tubería de vidrio
Estufa
Balanza analítica
Columna de sedimentación

PROCEDIMIENTO

1. Prepare 70 L de muestra ajustando a las condiciones óptimas de pH y de la dosis de coagulante* para obtener una clarificación óptima de la muestra. Homogenice mediante agitación.
2. Tome una muestra para conocer la concentración de sólidos suspendidos al tiempo cero.
3. Adicione la muestra a la columna de sedimentación (figura II.2) hasta la marca.

* En caso de no contar con el pH y la dosis óptima de coagulante, efectúe la prueba de jarras (descrita en la práctica de coagulación y floculación).

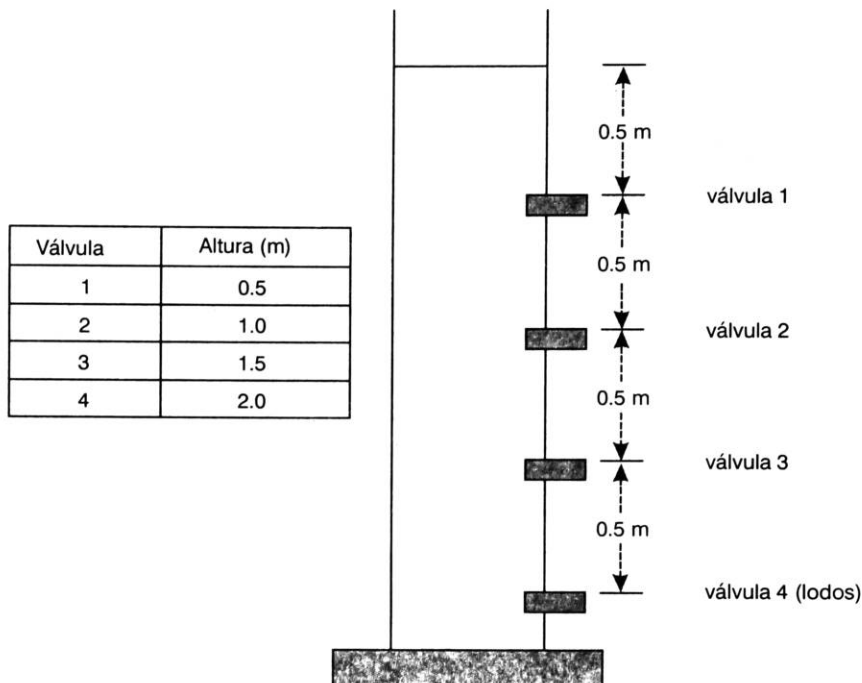


Figura II.2. Columna para pruebas de sedimentación floculenta

4. Tome al mismo tiempo muestras de las cuatro válvulas de la columna a los 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 minutos.

5. Analice los sólidos suspendidos totales de cada una de las muestras tomadas.

6. Al terminar habrá obtenido los sólidos suspendidos residuales para los tiempos especificados en el punto 4, a cada altura de la columna, lo mismo que los sólidos suspendidos totales en los lodos.

7. Al finalizar la prueba, lave la columna de sedimentación con agua, detergente y esponja suave para evitar que se raye.

CÁLCULOS

1. Calcule de la siguiente forma la fracción de sólidos suspendidos totales residuales (X_0) en cada punto de muestreo:

$$X_0 = \frac{\text{Sólidos suspendidos totales (SST)}}{\text{Sólidos suspendidos totales al inicio (SST o)}}$$

Sedimentación

y en porcentaje:

$$Y = \frac{SST}{SST_0} \times 100$$

2. Para calcular la fracción de los sólidos suspendidos totales removidos en cada punto de muestreo y en porcentaje, tenemos:

$$\text{Fracción de SST removidos} = 1 - X_0$$

en porcentaje:

$$\text{SST removidos} = 100 - Y = 100 - \frac{SST}{SST_0} \times 100$$

3. Elabore para cada altura (0.5, 1.0 y 1.5m) el siguiente cuadro

Tiempo (min)	SST residuales (mg/L)	SST residuales (%)	SST removidos (%)
5			
10			
—			
—			

Con los datos de la tabla elabore para cada altura una figura de porcentaje de sólidos suspendidos removidos en función del tiempo. Con base en esta figura, construya otra figura de profundidad en función del tiempo a diferentes porcentajes de sólidos suspendidos removidos.

4. Obtenga la remoción de sólidos suspendidos total para la altura de 1.5 m (válvula 3) utilizando los tiempos obtenidos para esta altura. Utilice los datos del cuadro anterior, de la gráfica del punto 3 y de la siguiente ecuación:

$$\text{Remoción total} = (1 - X_0) + \int_0^{x_0} \frac{h}{H} dx$$

donde:

h = Profundidad de sedimentación media

H = Altura de sedimentación (en este caso 1.5 m)

REPORTE DE LA PRÁCTICA

1. Para las tres diferentes alturas de la columna obtenga la curva de variación del porcentaje de sólidos removidos en función del tiempo.
2. Basándose en la curva obtenida en el punto anterior, II.2, dibuje una gráfica de la altura de la columna en función del tiempo para diferentes porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales.
3. Haga una gráfica de remoción total en función del factor de carga ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$).
4. Elabore una gráfica de remoción total en función del tiempo de sedimentación.
5. Para los lodos (de los datos obtenidos de la válvula 4), dibuje una gráfica de los porcentajes de sólidos, en función del tiempo de sedimentación.
6. Con los datos experimentales obtenidos, diseñe un sedimentador primario para tratar el agua residual con una concentración de sólidos suspendidos igual a la que contenía la muestra de agua residual que trabajó en esta práctica; su caudal es de $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$ y se desea remover el 60% de los sólidos suspendidos. Aplique un factor de seguridad de 1.5. Por otra parte calcule la cantidad de sólidos que se separaron (kg/d) ya que se les debe dar algún tratamiento. También se sabe que en la planta algunas veces se tendrán picos de flujo 1.5 veces mayores a los del diseño; en ese caso, ¿cuál será la eficiencia de separación del sedimentador?

Método experimental 4. Sedimentación zonal

OBJETIVO

Obtener los parámetros para diseñar sedimentadores secundarios de partículas que presentan un tipo de sedimentación zonal, a partir de resultados experimentales.

EQUIPO Y MATERIALES

Probetas de 1 000 ml
Cronómetros
Crisoles gooch
Material de vidrio (pipetas, bureta, vasos de precipitados, matraces)

PROCEDIMIENTO

1. Coloque los lodos con cierta concentración prefijada de sólidos suspendidos en una probeta de 1 000 ml.
2. Mezcle para homogeneizar la muestra.
3. Detenga el mezclado ($t = 0$) y observe cómo descende la interface de lodos a diferentes intervalos (cada minuto), hasta que ya no se observe ninguna variación.
4. Repita todos los puntos anteriores para las diferentes concentraciones de sólidos suspendidos (1 000 mg/L, 4 000 mg/L, 8 000 mg/L, 12 000 mg/L, 16 000 mg/L, 20 000 mg/L).
5. Para obtener la velocidad de sedimentación zonal (VSZ) de cada concentración de sólidos suspendidos elabore por separado la figura II.3.
6. Relacione gráficamente la velocidad de sedimentación zonal (VSZ) con la concentración de sólidos suspendidos.
7. Obtenga la curva de sedimentación por lote. Calcule el flux de sólidos G_B (kg/h m²) y haga la gráfica contra concentración de sólidos suspendidos.

$$G_B = X_i * V_i$$

donde:

X_i = Concentración de sólidos suspendidos (kg/m³)

V_i = Velocidad de sedimentación (m/h)

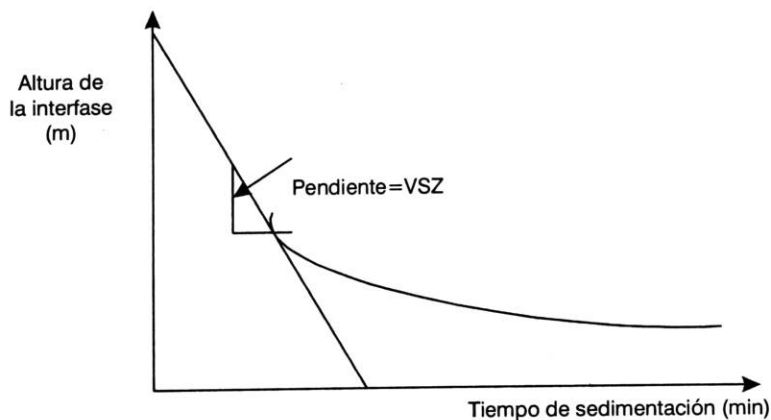


Figura II.3. Variación de la altura de la interfase en función del tiempo de sedimentación para obtener la velocidad de sedimentación zonal (vsz)

8. De la gráfica que se obtuvo en el punto anterior determine el flux de sólidos totales G_T (kg/h m²) para la concentración requerida de sólidos en los fondos del sedimentador (X_u).

9. Calcule con la G_T el área para espesamiento (A_e), según la siguiente ecuación:

$$A_e = M/G_T$$

donde:

$$M = Q_o X_o$$

Q_o = Caudal de agua que entra al sedimentador (m³/h)

X_o = Concentración de sólidos en el caudal de entrada (kg/m³)

REPORTE DE LA PRÁCTICA

1. Elabore las diferentes gráficas de resultados.

2. Diseñe un sedimentador para un agua tratada que sale del biorreactor de lodos activados con las siguientes características:

- flujo (Q_o) = 5 000 m³/d
- concentración de sólidos suspendidos (X_o) = 3 000 mg/L
- concentración de sólidos suspendidos en el agua clarificada

$$(X_e) = 10 \text{ mg/L}$$

3. Calcule el sedimentador para las siguientes concentraciones de lodos (X_u):

- a) $X_u = 13\,000 \text{ mg/L}$
- b) $X_u = 9\,000 \text{ mg/L}$

Para ambos casos obtenga:

1. El área de compactación y el área de clarificación.
2. ¿Cuál de las áreas define el diseño en cada caso?
3. Los flujos del agua clarificada a la salida del sedimentador (Q_e) y el flujo de los fondos del sedimentador (Q_u).

Sedimentación

4. Las dimensiones del sedimentador (volumen, altura, diámetro y área), suponiendo un tiempo de residencia de dos horas.

5. Compare los resultados del ejercicio anterior y enseguida explique las diferencias.

BIBLIOGRAFÍA

Adams, C., D. L. Ford y W. Eckerfelder, *Development of Design and Operational Criteria for Wastewater Treatment*, Enviro Press, 1981.

Association of Environmental Engineering Professors, *Environmental Engineering Unit Operations and Unit Processes Laboratory Manual*, John T. O, Connor ed., 1972.

APHA-AWWA-WPCF, *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, 17a. ed, Díaz de Santos editorial, 1992.

Eckerfelder W., *Industrial Water Pollution Control*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1989.

Eckerfelder W. y D. L. Ford, *Industrial Water Pollution Control. Experimental Procedure for Process Design*, Pemberton Press, 1970.

Ramalho, R. S., *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté, 1991.

CAPÍTULO III

AIREACIÓN

GENERALIDADES

LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS AEROBIOS requieren el suministro de oxígeno para que los microorganismos oxiden la materia orgánica hasta CO_2 y H_2O depurando las aguas residuales. El oxígeno se transfiere al seno del agua residual mediante aireadores mecánicos, difusores y turbinas; equipos cuya eficiencia se evalúa mediante el coeficiente de transferencia de oxígeno (Kla) en diferentes pruebas, como la de reaireación de agua de la llave (de las más usadas) y la del método dinámico o régimen transitorio, que se lleva a cabo en un reactor biológico aireado con microorganismos y el agua residual que se va a tratar.

Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno (Kla) por el método del sulfito

Esta prueba consiste en eliminar el oxígeno disuelto (mediante nitrógeno o bisulfito) de un volumen conocido de agua de la llave y después reairearlo incrementando paulatinamente la concentración del oxígeno disuelto desde concentraciones de $0.0 \text{ mg O}_2/\text{L}$ hasta valores cercanos a la saturación. La velocidad de transferencia del oxígeno puede expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{dc}{dt} = Kla(Cs - C_L) \quad (\text{III.1})$$

donde:

$$\frac{dc}{dt} = \text{Velocidad de transferencia de oxígeno (mg O}_2/\text{Lh)}$$

Kla = Coeficiente de transferencia de O_2 (h^{-1})

C_S = Concentración de saturación de O_2 (mg O_2 /L)

C_L = Concentración de O_2 en el líquido (mg O_2 /L)

t = Tiempo (h)

integrando y suponiendo que el Kla no depende del tiempo, tenemos

$$\ln(C_S - C_L) = -Kla \cdot t + cte \quad (III.2)$$

que es la ecuación de una recta, como se ve en la figura III.1

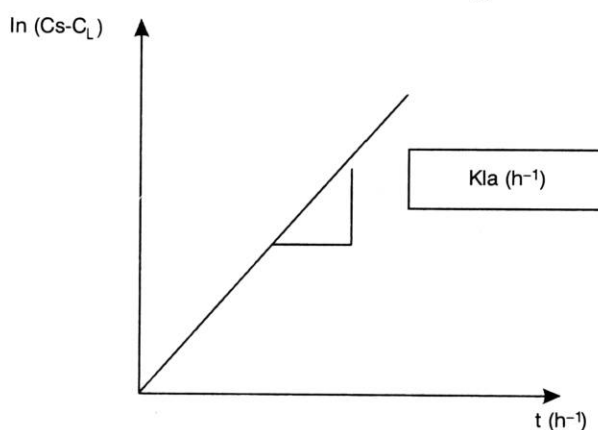


Figura III.1. Para obtener el coeficiente de transferencia de oxígeno (Kla)

Al hacer la gráfica en papel semilogarítmico, con $\log_{10}$, reorganizando tenemos:

$$Kla = -(\text{pendiente}) = - \frac{2.303 \log_{10} \frac{(C_S - C_{L1})}{C_S - C_{L2}}}{t_2 - t_1} \quad (III.3)$$

donde:

C_{L1} = Concentración de O_2 al tiempo t_1 (mg O_2 /L)

C_{L2} = Concentración de O_2 al tiempo t_2 (mg O_2 /L)

*Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno (Kla)
por el método dinámico*

La prueba se realiza en un reactor aireado de lodos activados, alimentado con agua residual; para esto se suspende la aireación en el sistema permitiendo que por el consumo de los microorganismos la concentración de oxígeno disuelto disminuya y así podamos evaluar la velocidad con la que se utiliza o consume el oxígeno (VUO), ya que mide la caída en la concentración de O_2 disuelto. Después de alcanzar concentraciones de oxígeno disuelto cercanas a 0.0 mg/L, se restablece la aireación y se mide el incremento en la concentración de O_2 disuelto en función del tiempo (figura III.2).

La variación del oxígeno disuelto en el sistema es función del oxígeno transferido por la aireación menos el oxígeno que consume por los microorganismos (VUO), o sea:

$$\frac{dc}{dt} = KLa(Csr - C_L) - VUO \quad (III.4)$$

donde:

Csr = Concentración de saturación de O_2 (mg O_2 /L) en el agua residual.

VUO = Velocidad de utilización o consumo de oxígeno (mg O_2 /L h).

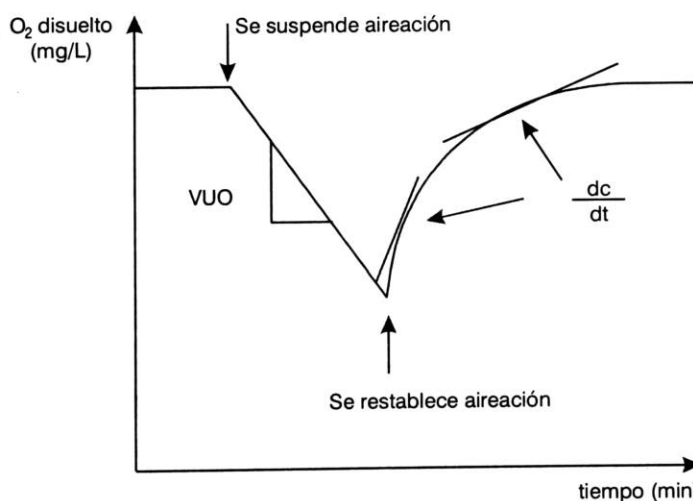


Figura III.2. Variación de la concentración de oxígeno disuelto en el reactor de lodos activados cuando se suspende y restablece la aireación

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

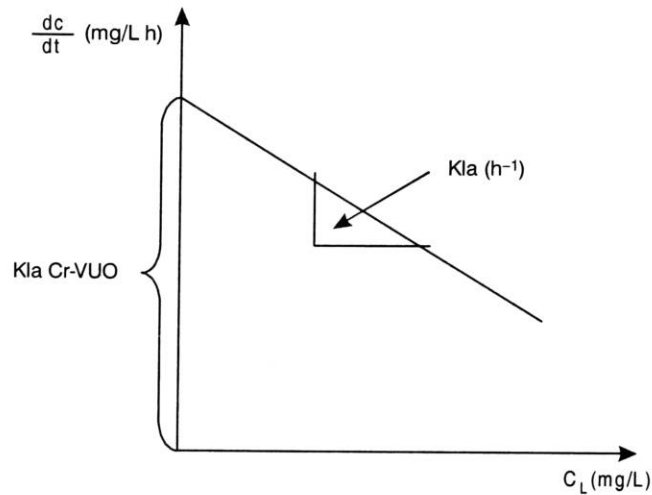


Figura III.3. Para obtener el Kla con agua residual en un sistema de lodos activados

Al arreglar la ecuación III.4 tenemos:

$$\frac{dc}{dt} = (Kla C_{sr} - v_{UO}) - Kla C_L \quad (III.5)$$

ecuación de una recta que se obtiene al graficar $\frac{dc}{dt}$ en función de C_L (figura III.3).

Método experimental 5

OBJETIVO

Enseñar al alumno a evaluar los sistemas de aireación utilizados para el tratamiento biológico de aguas residuales.

Permitirle que conozca los diferentes factores (nivel de potencia, temperatura, tipo de turbina, entre otros) que afectan la eficiencia de transferencia de oxígeno en los sistemas aireados.

EQUIPO Y MATERIALES

Medidor de oxígeno disuelto con electrodo
Rotámetro

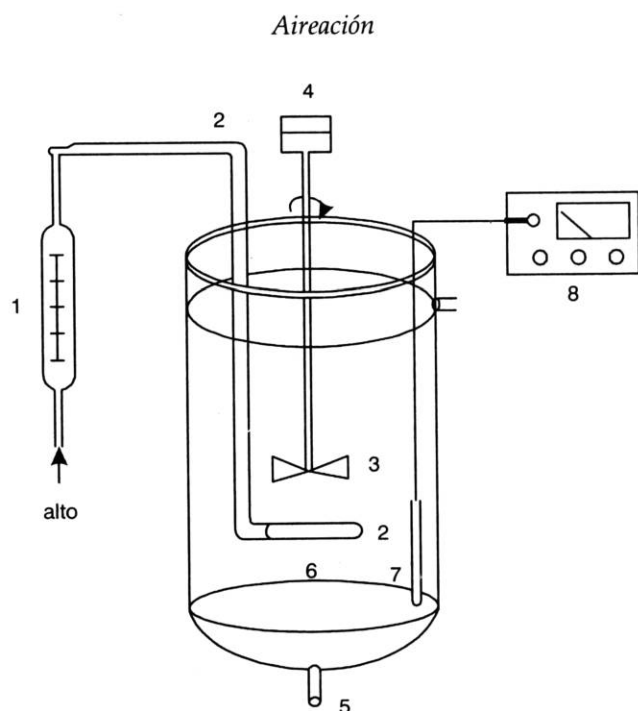


Figura III.4. Equipo semipiloto para pruebas de aireación en aguas residuales

Variac
Cronómetro
Difusor de aire
Turbinas
Multímetro

Reactivos

Bisulfito de sodio (Na_2SO_3)
Cloruro de cobalto ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

2893627

Equipo de aireación

La figura III.4 muestra un sistema de aireación (6) que trabaja con un volumen de operación de 30 litros y tiene un difusor de aire (2) adaptado; el flujo de aire puede controlarse con el rotámetro (1) y con un motor (4) de velocidad controlada y variable que mueve una flecha con impulsor (3) desmontable. El equipo cuenta con dos tipos de impulsores (fotografía III.2), y un medidor de oxígeno disuelto (8) con electrodo (7).

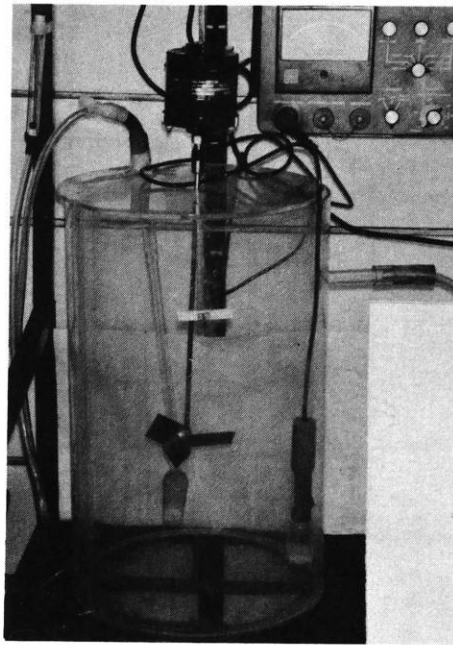


Foto III.1. Equipo semipiloto para pruebas de aireación en aguas residuales

El recipiente (6) dispone de una válvula (5) para descarga. La transparencia del recipiente es una ventaja, ya que permite ver lo que está pasando en el sistema (fotografía III.1).

PROCEDIMIENTO

Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La) por el método del sulfito

1. Verifique que la válvula de descarga (5) se encuentre cerrada para poder cargar el reactor (6) ya sea con agua de la llave o agua residual (aproximadamente 30 litros), según la que se le pida.
2. Introduzca el electrodo al agua residual del reactor biológico procurando que esté cerca del fondo del reactor. Revise que el cable del electrodo no se enrede en la turbina.
3. Conecte el aire con mangueras de hule al difusor (2) y regule el flujo con el rotámetro (1) a la cantidad deseada.
4. Encienda el motor (4), regulándolo para obtener la velocidad deseada;

Aireación

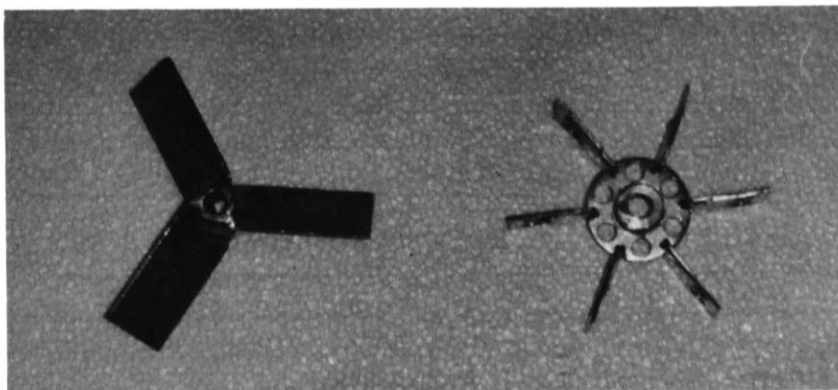
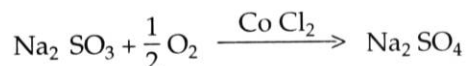


Foto III.2. Impulsores del equipo semipiloto para pruebas de aireación en aguas residuales

verifique la concentración de saturación de oxígeno disuelto con el medidor (8) y la temperatura del líquido.

5. Después de obtener las condiciones de flujo de aire y agitación, desconecte los equipos y agregue los reactivos del método del bisulfito en las siguientes proporciones para desoxigenar el agua:

Desoxigenación:



Relación estequiométrica

$$\frac{\text{Na}_2\text{SO}_3}{\frac{1}{2}\text{O}_2} = \frac{126}{16} = 7.9$$

es decir, por cada mg O_2 disuelto/L añada 7.9 mg de Na_2SO_4 /L más un exceso del 20%. El CoCl_2 se agrega para mantener una concentración mínima de 1.5 mg/L de Co^{2+} .

6. Agite lentamente para homogeneizar.

7. Verifique que la concentración de oxígeno disuelto baje hasta 0.0 mg/L.

8. Inicie el proceso de aireación y mida el incremento en la concentración de O_2 disuelto durante ciertos intervalos (por ejemplo cada dos minutos),

hasta conseguir la saturación; tome las lecturas para obtener el siguiente cuadro:

Tiempo (min)	C_L (O_2 disuelto mg/L)	$C_s - C_L$
0		
2		
4		
–		

9. Elabore una gráfica de $\log (C_s - C_L)$ en función del tiempo, para obtener el Kla (ecuación III.3).

10. Corrija el Kla a la temperatura de 20 °C, según la siguiente ecuación:

$$Kla_T = Kla_{20} \times (1.024^{T-20})$$

donde:

Kla_T = Kla a la temperatura de la prueba T

Kla_{20} = Kla a la temperatura de 20°C

T = Temperatura de la prueba (°C)

11. Obtenga también el Kla_{20} con agua residual (repita todo el procedimiento pero ahora utilizando agua residual).

12. Obtenga los siguientes parámetros con los resultados tanto de agua de la llave como de agua residual.

$$\beta = \frac{\text{Concentración de saturación de } O_2 \text{ en el agua residual (mg } O_2/L)}{\text{Concentración de saturación de } O_2 \text{ en el agua de la llave (mg } O_2/L)}$$

$$\alpha_{20} = \frac{Kla_{20} \text{ en el agua residual}}{Kla_{20} \text{ en el agua de la llave}}$$

13. Calcule la capacidad de oxigenación (CO) para ambos casos.

$$CO = Kla_{20} \cdot C_s \cdot V = (\text{kg } O_2/h)$$

donde:

Aireación

V = Volumen del tanque (L)

Cs = Concentración de saturación de O₂ (mg O₂/L)

Es importante hacer notar que la Cs depende del tipo de aireación, por lo tanto:

- Para los aireadores de superficie se toma la Cs en la superficie del tanque, y se le denota como C_{ss} (concentración de saturación de O₂ en la superficie); de ahí que:

$$CO = KLa_{20} \cdot C_{ss} \cdot V$$

- Para la aireación mediante difusores la Cs se obtiene a la altura media del tanque y se denota como C_{sm} (concentración de saturación de O₂ a la altura media del tanque); en consecuencia:

$$CO = KLa_{20} \cdot C_{sm} \cdot V$$

la C_{sm} se obtiene de la siguiente manera:

$$C_{sm} = C_{ss} \left(\frac{P_b}{20.66} + 0.5 \right)$$

P_b es la presión (kg/cm²) a la profundidad donde se inyecta el aire y está dada por:

$$b = \text{presión atmosférica (kg/cm}^2\text{)} + (d/10.33) \times 1.033 \text{ (kg/cm}^2\text{)} + \text{pérdidas de carga (kg/cm}^2\text{)}$$

d = profundidad del punto de inyección de aire (m)

14. Calcule la eficiencia de transferencia de oxígeno (TE) para ambos casos (residual y de la llave), según la siguiente ecuación:

$$TE = \frac{\text{capacidad de oxigenación (CO)}}{\text{potencia}} = \frac{\text{kg O}_2}{\text{h HP}}$$

15. Repita todo pero con diferentes niveles de potencia (HP/m³) y distintos tipos de turbina, y aumentando las rpm del agitador.

16. Para evaluar la potencia hay que medir tanto el amperaje como el voltaje con un multímetro, además de utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{HP} = \frac{\text{tensión en línea (volts)} \times \text{corriente (amperes)} \times \text{factor potencia} \times \text{rendimiento motor}}{\text{rendimiento reductor}}$$

donde:

$$\text{factor potencia} = [\cos(\text{FP})] \times (3)^{0.5} \times \frac{1}{746}$$

Para el cálculo de potencia use los siguientes valores supuestos:

$$\cos(\text{FP}) = 0.85$$

$$\text{rendimiento del motor (90\%)} = 0.9$$

$$\text{rendimiento del reductor (90\%)} = 0.9$$

Método experimental 5a. Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno (Kla) por el método dinámico

1. En este método la medición del coeficiente de transferencia de oxígeno se evalúa en un reactor aireado con lodos biológicos, por lo que, el arranque del reactor se hace basándose en lo especificado más adelante en el método experimental 7.

2. Una vez que el sistema de lodos activados se encuentra trabajando, se para el suministro de aire e inmediatamente se procede a tomar las lecturas de la caída de oxígeno disuelto en el medidor (8) (figura III.4), en diferentes intervalos. El procedimiento continúa hasta llegar a concentraciones de O_2 cercanas a cero mg/L, anotando los datos.

3. Después de llegar a valores de 0.0 mg de O_2 /L en el reactor, se restablece la aireación ajustando el flujo de aire con el rotámetro (1) (figura III.4) a las condiciones en las que operaba el reactor antes de la prueba; se siguen tomando datos del incremento de oxígeno disuelto en diferentes tiempos, hasta restablecer la concentración de O_2 disuelto en el reactor biológico a las condiciones previas a la prueba.

4. Se elaboran las gráficas con los datos obtenidos (tienen que ser muy similares a la de la figura III.2) para conocer la VUO y la pendiente de los datos cuando se suspende la aireación.

5. Para obtener el Kla es preciso evaluar la pendiente de la tangente $\left(\frac{dc}{dt}\right)$ en diferentes puntos de la curva de oxígeno disuelto cuando se restablece la aireación; esto se puede hacer gráficamente.

6. Para obtener el K_{la} en el agua residual se elabora el gráfico de la figura III.3.

Es importante señalar que el coeficiente de transferencia de oxígeno, obtenido mediante el método dinámico, es el K_{la} en el agua residual, por lo que junto con el K_{la} en el agua limpia, calculado por el método del sulfito, también se utilizan para evaluar α_{20} .

REPORTE DE LA PRÁCTICA

1. Elabore un cuadro y las gráficas con los resultados con los que se obtuvieron todos los K_{la} (tanto en el caso del agua residual como del agua de la llave), según sus respectivos métodos y las diferentes turbinas que se utilizaron.

2. Analice y haga las gráficas de:

- a) α_{20} en función del nivel de potencia.
- b) La eficiencia de transferencia de oxígeno (TE) en función de los diferentes niveles de potencia.

3. Compare los resultados obtenidos en cada uno de los métodos.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, C., D. Ford y W. Eckenfelder, *Development of Design and Operational Criteria for Wastewater Treatment*, Enviro Press, 1981.
- APHA-AWWA-WPCF, *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, 17a. ed., Díaz de Santos, 1992.
- Association of Environmental Engineering Professors, *Environmental Engineering Unit Operation and Unit Processes Laboratory Manual*, John T. O'Connor (ed.), 1972.
- Eckenfelder, W., *Industrial Water Pollution Control*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1989.
- Eckenfelder, W. y D. Ford, *Industrial Water Pollution Control, Experimental Procedure for Process Design*, Pemberton Press, 1970.
- Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering Treatment. Disposal and Reuse*, 3a. ed., Nueva York, McGraw-Hill, 1991.
- Ramalho, R. S., *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté, 1991.

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS BIOCINÉTICOS

GENERALIDADES

PARA DISEÑAR LOS SISTEMAS AEROBIOS de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados es preciso haber obtenido primero los parámetros biocinéticos, para conocer el comportamiento de los lodos activados en determinada agua residual. Estos parámetros muestran, por ejemplo, los requerimientos de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica presente por medio de los lodos biológicos; indican los kilogramos de lodos producidos por la oxidación de la materia orgánica contaminante y las constantes en la velocidad de remoción de contaminantes, entre otros como los tiempos de residencia en el biorreactor, el volumen del biorreactor, los requerimientos de oxígeno, el sistema de aireación y la recirculación de lodos al biorreactor.

Los microorganismos degradan la materia orgánica soluble en el agua residual siguiendo una cinética específica. La materia orgánica soluble puede ser expresada como demanda de la bioquímica de oxígeno (DBO) soluble, aunque otras veces se expresa como demanda química de oxígeno (DQO) soluble.

De los modelos más comunes de cinética de remoción de DBO soluble destacan el de *primer orden*, el de *orden variable* o *monod* y el de *Grau*. Los datos experimentales que se obtengan deben ajustarse a un modelo de cinética de remoción, que bien puede ser de los antes señalados o tendrá que probarse con algunos de los que aparecen en la bibliografía; aunque todavía hay un tercer camino que es el de buscar un modelo nuevo.

Los parámetros cinéticos relacionados con la degradación o remoción de contaminantes (sustrato), que se obtendrán de manera experimental, dependerán del modelo cinético.

Para el modelo cinético de primer orden se obtendrá la k , que es la

constante específica de velocidad de remoción de sustrato ($d^{-1} \times L/mg$); para el de orden variable o monod habrá que evaluar dos constantes, K_s , la de afinidad (mg/L) y la $q_{máx.}$, de velocidad específica máxima de consumo de sustrato (h^{-1}); trataremos ambos modelos en este texto.

Los parámetros biocinéticos se obtienen basándose en la suposición de que el reactor está completamente mezclado y no hay limitaciones en cuanto a la actividad de los lodos activados por oxígeno o algún nutriente (fósforo o nitrógeno). Por otra parte, los parámetros se definen de la siguiente manera:

- k = Constante específica de velocidad de remoción de sustrato ($d^{-1} \times L/mg$); para el modelo cinético de primer orden.
- K_s = Constante de afinidad (mg/L); modelo cinético de orden variable o monod.
- $q_{máx.}$ = Constante de velocidad específica máxima de consumo de sustrato (h^{-1}); modelo cinético de orden variable o monod.
- Y (rendimiento) = Producción de lodo biológico/kg de DBO removida ($kg\ SSV/kg\ DBO_r$).
- a = kg de O_2 (en la oxidación de sustrato)/ kg de DBO removida.
- b = kg de O_2 (para respiración endógena)/ $día\ kg\ SSV$ en el reactor.
- kd (constante de decaimiento o muerte) = kg de SSV (oxidados por respiración endógena)/ $día\ kg\ SSV$ en el reactor.

Propiedades de los lodos

Los lodos biológicos deben sedimentar adecuadamente a fin de tener una buena clarificación del agua residual tratada, por lo que es necesario evaluar las características de sedimentación de los lodos con los siguientes parámetros:

- a) Velocidad de sedimentación zonal (VSZ).
- b) Índice volumétrico de lodos (IVL).

Ambos parámetros se conjugan con la relación alimento/microorganismo (A/M), que se expresa de la siguiente manera:

$$(A/M) = \frac{S_o}{X_{va} \cdot th} = (d^{-1}) \quad (IV.1)$$

Determinación de parámetros biocinéticos

donde:

S_o = Concentración de DBO o DQO a la entrada al reactor (mg/L)

X_{va} = Concentración de ssv en el reactor (mg/L)

th = Tiempo de residencia hidráulico (d) = V/Q_o

Q_o = Flujo de agua residual de entrada al biorreactor (litros/d)

Ecuaciones para obtener parámetros biocinéticos

Para obtener las constantes de remoción de materia orgánica (sustrato):

- k (cinética de primer orden)

$$q = \frac{S_o - S_e}{X_{va} \cdot th} = k S_e \quad (IV.2)$$

La ecuación IV.2 es una recta con pendiente k (figura IV.1), donde

q = Velocidad específica de consumo de sustrato (d^{-1})

S_e = Concentración de DBO o DQO en el reactor (mg/L)

En caso de que en el agua residual haya materia no biodegradable, ésta puede detectarse mediante la DQO y la ecuación IV.2, que se transformará en ecuación IV.3; de esta manera se obtiene una gráfica del tipo de la figura IV.2.

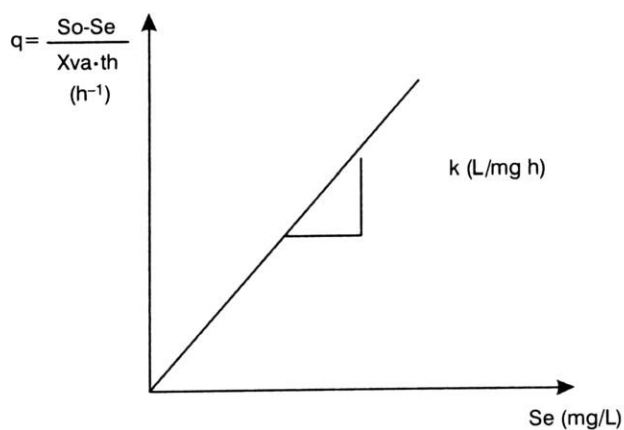


Figura IV.1. Para obtener la constante específica de remoción de sustrato

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

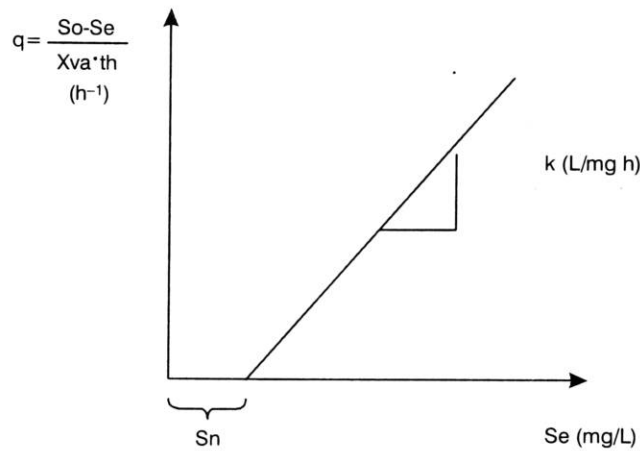


Figura IV. 2. Para obtener la constante específica de remoción de sustrato cuando hay materia orgánica no biodegradable (S_n)

$$q = \frac{S_o - S_e}{X_{va} \cdot th} = k (S_e - S_n) \quad (\text{IV.3})$$

donde:

S_n = Concentración de DQO (material no biodegradable en mg/L)

- K_s y $q_{\text{máx.}}$ (modelo cinético de orden variable o monod): en este caso se representa con la ecuación IV.2a:

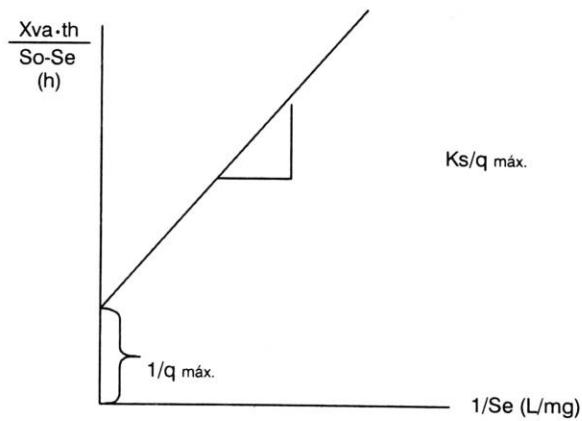


Figura IV.3. Para obtener las constantes de afinidad (K_s) y máxima de remoción de sustrato ($q_{\text{máx.c}}$)

Determinación de parámetros biocinéticos

$$q = \frac{S_o - S_e}{X_{va} \cdot th} = q_{m\acute{a}x.} \frac{S_e}{K_s + S_e} \quad (IV.2a)$$

Al arreglar la ecuación IV.2a para obtenerla de una forma lineal se toma el inverso:

$$\frac{X_{va} \cdot th}{S_o - S_e} = \frac{K_s}{q_{m\acute{a}x.}} \frac{1}{S_e} + \frac{1}{q_{m\acute{a}x.}} \quad (IV.2b)$$

Al graficar $1/q$ en función del inverso del sustrato ($1/S_e$), con pendiente $K_s/q_{m\acute{a}x.}$ y ordenada al origen $1/q_{m\acute{a}x.}$ (figura IV.3):

En caso de que haya materia biodegradable (S_n) la ecuación IV.2a se transforma en la siguiente ecuación:

$$q = \frac{S_o - S_e}{X_{va} \cdot th} = q_{m\acute{a}x.} \frac{S_e - S_n}{K_s + (S_e - S_n)} \quad (IV.3a)$$

Por otra parte la ecuación IV.2b se transforma en:

$$\frac{X_{va} \cdot th}{S_o - S_e} = \frac{K_s}{q_{m\acute{a}x.}} \frac{1}{(S_e - S_n)} + \frac{1}{q_{m\acute{a}x.}} \quad (IV.3b)$$

a) Para obtener Y y kd

$$\mu = \frac{1}{\theta_c} = Yq - kd \quad (IV.4)$$

$$\mu = \frac{\Delta X_v / V}{X_{va}} = \frac{1}{\theta_c} \quad (IV.5)$$

donde:

μ = Velocidad específica de crecimiento (d^{-1})

ΔX_v = Producción neta de lodos (kg/d)

V = Volumen total de cámara (L)

θ_c = Edad de lodos (d^{-1})

La edad de los lodos (θ_c) es igual al tiempo hidráulico th cuando no hay recirculación en el reactor, por lo tanto el cálculo de Y y kd , se puede hacer en un sistema con recirculación o sin ella; de ahí que para el primer caso la ecuación IV.4 queda:

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

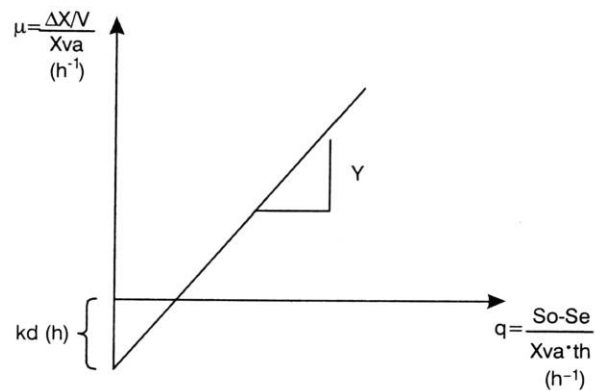


Figura IV.4. Para obtener el Y (rendimiento) y k_d (constante de decaimiento o muerte)

$$\mu = \frac{1}{th} = Yq - k_d \quad (\text{IV.4a})$$

donde:

$$th = \frac{V}{Q_0}$$

Q_0 = flujo de entrada al reactor (L/h)

Para obtener a y b se tiene la ecuación IV.6 y al graficar RO_2 en función de q se obtiene la figura IV.5; al graficar μ en función de q se obtiene la figura IV.4.

$$RO_2 = a q + b \quad (\text{IV.6})$$

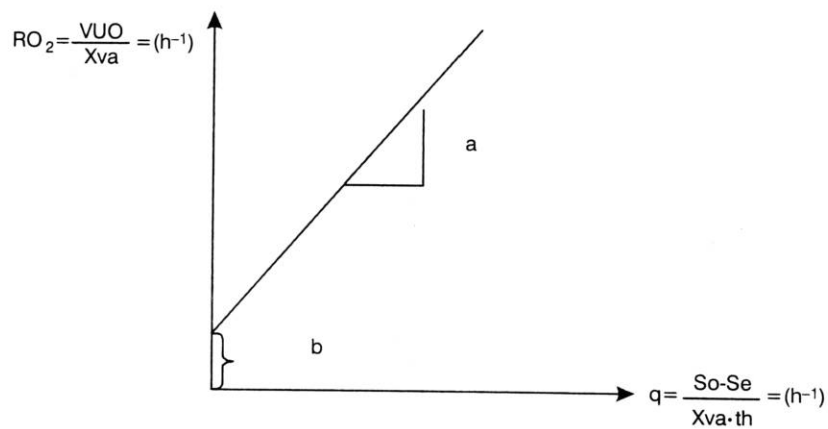


Figura IV.5. Cálculo de a y b

Determinación de parámetros biocinéticos

donde:

RO_2 = Velocidad específica de consumo de oxígeno (kg O_2 /h kg SSV)

$RO_2 = VUO / X_{va}$

VUO = Velocidad de utilización de oxígeno (mg O_2 /L min)

Método experimental 6

OBJETIVO

Obtener los parámetros biocinéticos para diseñar sistemas aireados de tratamiento de aguas residuales mediante sistemas biológicos.

EQUIPO Y MATERIALES

Medidor de oxígeno disuelto con electrodo

Bombas peristálticas

Microscopio

Porta y cubreobjetos

Bomba de vacío

Parrillas con agitador magnético

Crisoles gooch

Filtros para crisol gooch

Matraces erlenmeyer de 250 ml

Probetas de 100 ml

Mangueras de hule y conexiones

Desecador

Tubos con rosca de 15 ml

Buretas

Soporte universal

Reactivos

Reactivos para DQO

Biorreactor para obtener parámetros biocinéticos

El equipo para obtener parámetros biocinéticos es un sistema que trabaja ininterrumpidamente y consta de cuatro cámaras iguales de acrílico transparente (figura IV.6), que permiten una buena visión de lo que ocurre durante el proceso. Se divide en dos zonas: una aireada, donde se lleva a cabo la remoción de contaminantes, con siete litros de capacidad, y otra de sedimentación, donde se separan los lodos del agua tratada (clarificación) con un volumen de operación de cuatro litros.

Ambas zonas las divide una mampara de acrílico movable (M), separada del fondo (0.5 cm) para permitir que de la zona aireada pase el agua residual tratada a la zona de sedimentación. La aireación se efectúa mediante difusores (1) inmersos en el agua residual de la zona de aireación.

Las cámaras cuentan con tubo de alimentación (2) por el que se suministra el agua residual a la zona de aireación; además de un tubo para muestreo (3). En la zona de sedimentación hay un tubo (4) por donde se derrama el agua tratada y abandona el sistema para mantener el volumen de operación constante durante las pruebas.

Las cuatro cámaras permiten manejar distintos tiempos de residencia.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Arranque y equilibrio del sistema

1. Ajuste los flujos (mediante bombas dosificadoras) para los diferentes tiempos de residencia basándose en el siguiente cuadro:

<i>Biorreactor (cámara)</i>	<i>$Q_0 = \text{flujo}$ (L/h)</i>	<i>$t_h = \text{tiempo}$ residencia (h)</i>
1	3.50	2
2	2.33	3
3	1.75	4
4	1.40	5

2. Cargue las cámaras con agua residual problema, por ejemplo agua doméstica (aproximadamente 11 litros) obtenida del reactor aireado de alguna planta de tratamiento de aguas residuales en operación. Esto permitirá ahorrar tiempo ya que contiene lodos activados por lo que no será necesario adaptarlos.

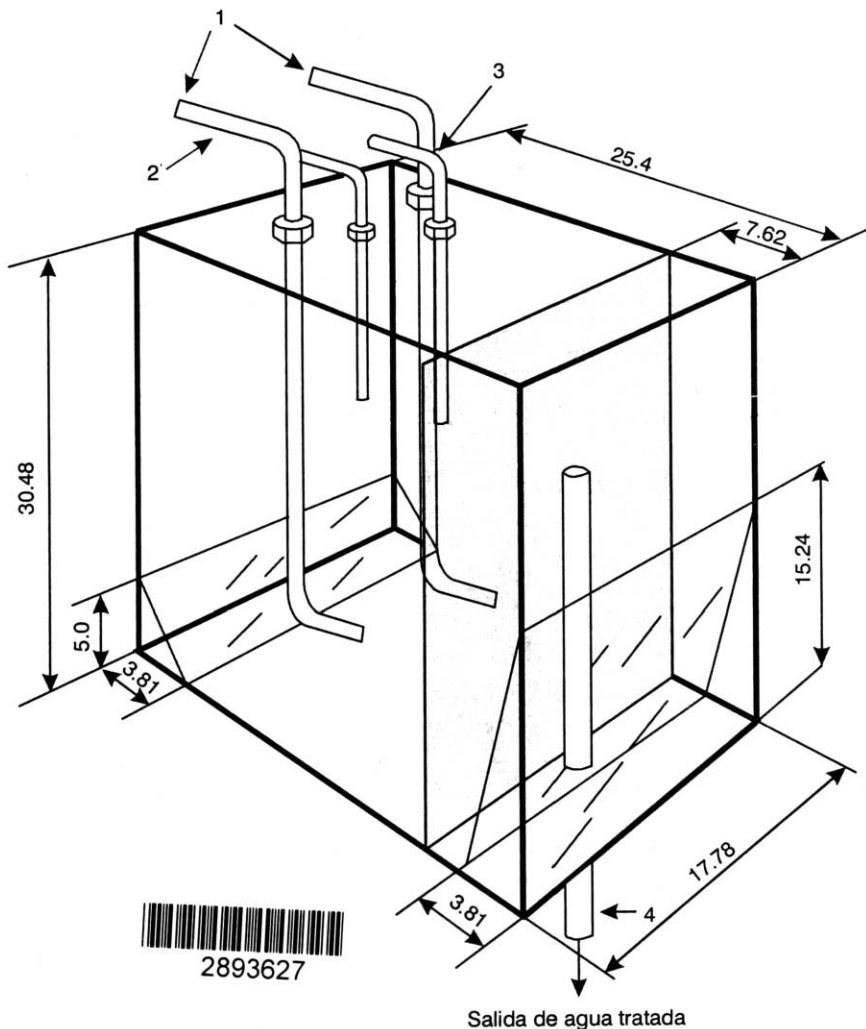


Figura IV.6. Biorreactor para la obtención de los parámetros biocinéticos utilizado en el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados (proceso continuo)

3. Conecte el aire con mangueras de hule a los difusores (1) hasta obtener una concentración de oxígeno disuelto en el reactor, superior a 3 mg/L.

4. Conecte las mangueras de las bombas dosificadoras con los flujos ajustados, según el punto 1, al tubo (2) de alimentación del reactor (asegúrese de que el agua que se va a tratar esté entrando en el sistema) y a la salida del sistema (tubo 4) para poder descargar el agua tratada en el drenaje.

5. Efectúe el muestreo en la zona aireada mediante sifón.

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

6. Muestree el agua residual tratada a la salida del tubo (4) de la zona de sedimentación.

NOTA: Para alcanzar las condiciones de equilibrio es necesario operar los biorreactores de dos a cuatro semanas, durante ese periodo deben hacerse los análisis que indicamos en el siguiente cuadro, siguiendo la periodicidad especificada hasta alcanzar el equilibrio.

Cuadro del programa de muestreo

<i>Análisis</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Agua residual a</i>	<i>Licor mezclado b</i>	<i>Efluente c</i>
DQO, DBO o COT (muestras compuestas mezclada y sin mezclar)	tres veces a la semana	X		X
pH	diario	X	X	X
Sólidos (SST, SSV), VSZ e IVL	tres veces a la semana		X	X
Oxígeno disuelto	diario		X	
VUO	tres veces a la semana		X	
Observación microscópica	una a la semana		X	

a) Muestra tomada del agua residual sin tratar (entrada al biorreactor).

b) Muestra tomada del biorreactor.

c) Muestra de la salida de la cámara (tubo 4).

7. Cuando se terminen las pruebas es necesario lavar el equipo con agua y jabón. No use fibras para tallar las paredes de las cámaras ya que se pueden rayar y disminuyen la visibilidad dentro del reactor: use sólo esponjas.

Otros parámetros

Para medir la (VUO) y obtener la (RO₂)

- Coloque una barra magnética dentro de la botella de DBO.
- Llene completamente la botella con la muestra.
- Introduzca el electrodo de oxígeno disuelto derramando parte de la muestra para evitar que se queden burbujas de aire.

Determinación de parámetros biocinéticos

- Agite suavemente para mantener homogéneo el contenido.
- Registre la caída de la concentración de oxígeno en intervalos de 30 segundos a un minuto.
- Haga la gráfica de la variación de concentración de oxígeno (mg/L) según el tiempo. Se obtendrá una recta cuya pendiente es la (VUO) (mg O₂/L min). De ser necesario elimine los primeros puntos obtenidos ya que corresponden al aire atrapado en el agua.
- Para obtener la RO₂ se divide la VUO entre la concentración de SSV en la muestra (Xva).

Para medir la velocidad de sedimentación zonal (VSZ)

La VSZ se obtiene siguiendo el procedimiento expresado en la práctica de sedimentación zonal.

Para medir el índice volumétrico de lodos (IVL)

El índice volumétrico de lodos es el volumen en ml, que ocupa un gramo de sólidos suspendidos totales en la muestra, expresados como peso seco, después de sedimentar durante 30 minutos en una probeta de 1 000 ml.

Ejemplo: a una muestra se le determinaron 2 500 mg/L (2.5 g) de sólidos suspendidos totales. Se colocó la muestra en una probeta de 1 000 ml y se dejó sedimentar durante 30 minutos, después de ese tiempo se observó que los sólidos sedimentados ocuparon un volumen de 250 ml; por lo tanto:

$$IVL = 250 \text{ ml} / 2.5 \text{ g} = 100 \text{ ml/g}.$$

Para obtener la ΔX_v

Para determinar los kg de lodos producidos por día hay que levantar la mampara móvil (M), luego agitar todo el contenido de la cámara para homogeneizarlo, tomar la muestra y determinar los sólidos suspendidos volátiles ($t = 0$). Después de haber tomado la muestra se regresa la mampara (M) a su posición original; al día siguiente, luego de 24 horas, se repite el proceso.

La concentración de SSV de cada muestra se multiplica por el volumen total de la cámara para obtener los kg de SSV, al tiempo cero ($t = 0$ h), y lo

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

mismo al $t = 24$ h. Al calcular la diferencia entre los kg de SSV al $t = 24$ h menos los kg de SSV al $t = 0$ h, dividida entre un día (24 h), obtenemos los kg de SSV/d que se produjeron; es decir, la ΔX_v .

Estado estacionario del sistema

Las condiciones de estado estacionario se alcanzan cuando:

- a) La velocidad de utilización de oxígeno (VUO) se mantiene sin variación.
- b) La DBO del efluente, muestra tomada a la salida del biorreactor (tubo 4), también se estabiliza.

Para obtener los parámetros biocinéticos

Con los resultados de los análisis obtenidos elabore los siguientes cuadros:

CUADRO IV.1. Resultados de los análisis de laboratorio para un volumen de reactor aireado de 7.0 litros

Biorreactor núm.	DBO del afluente (mg/L)	DBO del efluente (mg/L)	Concentra- ción de SSV (mg/L)	Flujo Q_0 (L/h)	VUO (mg/L min)	Producción de lodos (g/d)	IVL (ml/g)
1				3.5			
2				2.33			
3				1.75			
4				1.4			

CUADRO IV.2. Parámetros de las ecuaciones

Biorreactor núm.	$T_h = V/Q_0$ (h)	q (h^{-1}) ec. IV.2	μ (h^{-1}) ec. IV.4	RO_2 Ec. IV.6	A/M (d^{-1}) ec. IV.1
1					
2					
3					
4					

Para obtener los parámetros biocinéticos se utilizan datos del cuadro IV.2; como las ecuaciones (IV.2 o IV.3, IV.2b, IV.4 y IV.6) son rectas, se grafica lo siguiente:

a) Para obtener k . Tomando como base la ecuación (IV.2 o IV.3), grafique q en función de la concentración de DBO o DQO en el reactor (Se); la pendiente es k (figura IV.1).

En caso de que exista materia orgánica no biodegradable y se determine mediante la técnica de demanda química de oxígeno, tendremos una curva como en la figura IV.2.

b) Parámetros K_s y $q_{m\acute{a}x}$. En caso de que la remoción de la DBO sea de orden variable, al graficar los datos de $1/q$ en función del inverso de la DBO a la salida del reactor ($1/Se$), el resultado será una recta en la que se pueden evaluar los parámetros K_s y $q_{m\acute{a}x}$, como se muestra en la figura IV.3.

c) Para obtener kd y Y . Con la ecuación IV.4 se grafica la velocidad específica de crecimiento μ en función de q ; la pendiente es Y y la ordenada al origen kd (figura IV.4).

- Con recirculación de lodos biológicos. Al utilizar un sistema con recirculación es necesario calcular ΔXv , junto con la velocidad específica de crecimiento μ .
- Sin recirculación de lodos biológicos. Cuando se opera el reactor sin recirculación no es necesario calcular ΔXv , ya que la velocidad específica de crecimiento, μ , es el inverso del tiempo de residencia (th), en este caso igual a la edad de lodos (θ_c), y sustituyendo ese valor directamente en la ecuación IV.4a. Para trabajar un sistema de tratamiento de aguas residuales sin recirculación puede hacerse eliminando la mampara (M), pero es necesario tomar en cuenta que en ese caso el volumen del reactor será de once litros, por lo que los flujos (Q_0) se tendrán que cambiar apoyándose en el siguiente cuadro:

CUADRO IV.3. Flujos para un reactor de 11 litros de volumen de operación sin recirculación

Biorreactor (núm.)	DBO del afluente (mg/L)	DBO del efluente (mg/L)	Concen- tración de SSV (mg/L)	Flujo Q_0 (L/h)	VUO (mg/L min)	th o edad de lodos (h)	$\mu = 1/th$ (1/h)
1				5.5		2	0.5
2				3.66		3	0.33
3				2.75		4	0.25
4				2.2		5	0.2

d) Para obtener a y b . De acuerdo con la ecuación IV.6 graficamos la velocidad específica de consumo de oxígeno RO_2 en función de q ; la pendiente es a y la ordenada al origen b (figura IV.5).

REPORTE DE LA PRÁCTICA

1. Cálculos y cuadros IV.1, IV.2 y IV.3 de resultados experimentales obtenidos.
2. Grafique todos los resultados con los que obtuvo los parámetros biocinéticos; si es posible saque los parámetros biocinéticos con y sin recirculación de lodos biológicos para que los compare.
3. Con los parámetros biocinéticos obtenidos compare los que se le proporcionan en la bibliografía para el tipo de agua residual de trabajo.
4. Analice y saque sus conclusiones.

BIBLIOGRAFÍA

- Eckenfelder, W., *Water Pollution Control, Experimental Procedure for Process Design*, Pemberton Press, 1970.
- Ramalho, R. S., *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté, 1991.
- WPCF, AWWA, APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17a. ed., Apha Washington, 1989.
- Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, and Reuse*. 3a. ed., McGraw-Hill, 1991.

CAPÍTULO V

MÉTODOS PARA CONTROLAR SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS

GENERALIDADES

LOS PROCESOS DE LODOS ACTIVADOS Y LAGUNAS AIREADAS son los más utilizados para el tratamiento de aguas residuales. La principal diferencia entre los dos es la recirculación de lodos biológicos en el biorreactor aireado; en el caso de las lagunas aireadas no hay recirculación de lodos, mientras que en el sistema de lodos activados sí la hay, lo que permite mantener altas concentraciones de lodos biológicos (ssv) en el biorreactor y, como consecuencia, hacer que los tiempos de residencia, los tamaños de los reactores y las áreas de construcción sean menores que cuando se utilizan lagunas aireadas.

El diseño de estos sistemas aerobios para tratar las aguas residuales se hace basándose en los parámetros biocinéticos que, como ya vimos, se obtienen de manera experimental con el agua residual problema; no se recomienda utilizar para diseño los datos de parámetros biocinéticos que aparecen en la bibliografía.

Las condiciones para operar estos sistemas deben estar controladas a fin de mantenerlas dentro de ciertos límites y así obtener un buen nivel de eficiencia para remover los contaminantes. De los métodos de control más utilizados destacan:

1. El mantenimiento constante de los sólidos suspendidos volátiles (ssv) en el biorreactor aireado.
2. El mantenimiento constante de la relación alimento-microorganismo (A/M).
3. El mantenimiento constante de la edad de lodos (θ_c).

El primer método tiene la limitante de que se ignora la relación A/M, lo

que puede provocar ineficiencias en la operación del sistema. Los otros métodos son los más utilizados.

Método experimental 7

OBJETIVO

Aplicar los métodos para controlar la operación de procesos aerobios de tratamiento de aguas residuales en un sistema piloto de lodos activados, utilizando la variación de la edad de lodos (θ_c) y la relación alimento-microorganismo (A/M).

EQUIPO Y MATERIALES

- Rotámetro
- Bombas peristálticas
- Crisoles gooch y filtros
- Medidor de oxígeno disuelto
- Cronómetro
- Material de vidrio (pipetas, buretas, probetas)
- Microscopio
- Portas y cubreobjetos
- Agitadores magnéticos

Reactivos

Reactivos para análisis de (DBO) y (DQO).

Equipo de lodos activados

El equipo está formado por dos recipientes de acrílico transparente (foto V.1) que permite ver lo que está pasando en el sistema.

La figura V.1 muestra el reactor biológico (5) que trabaja con un volumen de operación de 30 litros y tiene adaptado un difusor de aire (2), y un motor (3) de velocidad controlada y variable, que mueve una flecha con turbina (4) desmontable, un orificio de salida (6) del agua tratada y una válvula (13) que



Foto V.1. Equipo semipiloto de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales

sirve para muestreo y purga. La alimentación se realiza por medio de una bomba dosificadora (1) que puede ajustarse para manejar diferentes flujos (L/h), por lo tanto diferentes tiempos de residencia hidráulicos en el reactor aireado.

El agua tratada que sale del reactor mediante el tubo de salida (6) entra al sedimentador (7) con una capacidad de 20 litros de volumen de operación; el sedimentador cuenta con un motor de velocidad controlada y variable que hace girar unas aspas (10) ubicadas en el fondo para concentrar los lodos.

A los lodos se les recircula del fondo del sedimentador mediante la bomba de recirculación (12). Se purga el exceso de lodos a través de la válvula de descarga (11); el agua clarificada y tratada sale por el tubo de salida del efluente (9) hacia el drenaje.

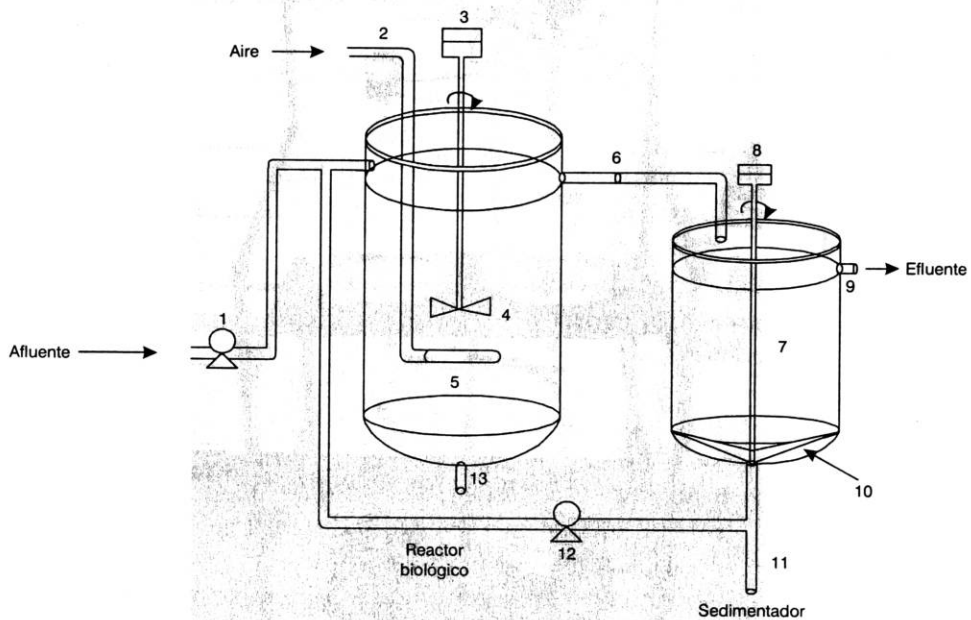


Figura V.1. Equipo semipiloto de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Arranque del reactor de lodos activados

1. Ajuste el flujo de alimentación que se desea utilizando la bomba dosificadora (1) y el flujo de lodos que se harán recircular con la bomba de recirculación (12).

2. Verifique que las válvulas de descarga (13 y 11) estén cerradas y proceda a cargar el reactor (5) y el sedimentador (7) con agua residual doméstica (aproximadamente 30 y 20 litros, respectivamente), obtenida del reactor aireado de alguna planta de tratamiento de aguas residuales en operación; como esa agua ya tiene los lodos activados, ya no será necesario desarrollarlos, lo que permitirá ahorrar tiempo.

3. Conecte el aire con mangueras de hule al difusor (2) y abra; ponga en

operación el motor (3) regulándolo para obtener la velocidad deseada. Se recomienda mantener la concentración de oxígeno disuelto en el reactor entre 1.5 y 2 mg/L. Utilice el medidor de oxígeno disuelto introduciendo el electrodo en el agua residual de reactor biológico; procure que esté cerca del fondo del reactor. Revise que el cable del electrodo no se enrede en la turbina.

4. Confirme que el agua que se va a tratar entre al reactor (5) y luego salga por el tubo de salida (6); asimismo revise que el agua entre primero al sedimentador (7) y después salga por el tubo de salida (9).

Compruebe que haya recirculación de lodos en el reactor (5) mediante la bomba (12), previamente ajustada al flujo que se desea. Las aspas (10) del sedimentador deben girar a una velocidad de aproximadamente 0.3 m/min para evitar que el lodo se expanda, ajustándola con el regulador de velocidad del motor (8).

Variación de la edad de lodos (θ_c)

Después del arranque del equipo, según lo especificado, ya puede proceder a ajustar el flujo de alimentación inicial (Q_F) a 6 litros/hora a fin de mantener un tiempo de residencia hidráulico (th) de cinco horas, con un flujo de reciclo de lodos (Q_r) de 1.8 L/h ($r = Q_r/Q_F = 0.3$). Cada que empiece cada una de las pruebas es necesario dejar que el sistema opere durante un periodo de 3 a 4 tiempos de residencia (15 a 20 horas) para alcanzar el equilibrio. Los flujos de desecho de lodos (Q_w) que se manejarán en cada prueba son los siguientes:

<i>Prueba núm.</i>	Q_w (L/d)
1	0
2	0.35
3	0.70
4	1.40

Variación de la relación alimento-microorganismo (A/M)

Ajuste el flujo de alimentación inicial (Q_F) a seis litros/hora para mantener un tiempo de residencia hidráulico (th) de cinco horas, con un flujo de desecho de lodos (Q_w) de 1.4 L/d. Al comienzo de cada una de las pruebas

deje que el sistema opere durante un periodo de 3 a 4 tiempos de residencia (15 a 20 horas) para alcanzar el equilibrio. Pruebe ahora cuatro relaciones de reciclo de lodos (r) fijando los flujos de reciclo (Q_r) en cada prueba, según el cuadro siguiente:

Prueba núm.	r (Q_r/Q_F)	Q_r (L/h)
1	0	0
2	0.15	0.9
3	0.3	1.8
4	0.6	3.6

Mediciones

Cuando alcance el equilibrio del sistema según criterios especificados en el método experimental 6 efectúe las siguientes determinaciones en todas las pruebas:

Análisis 3 y 5	Agua residual inicial	Licor mezclado	Efluente	Corriente de reciclo (Q_r)
DQO, DBO o COT	X		X	
pH	X	X	X	
Sólidos (SST, SSV), VSZ e IVL		X	X	X (sólo sólidos)
Oxígeno disuelto		X		
Observación microscópica		X		X

Además de las determinaciones anteriores evalúe los siguientes parámetros:

- relación alimento-microorganismo (A/M)
- velocidad específica de consumo de oxígeno (RO_2)
- edad de lodos (θ_c)

La edad de lodos (θ_c) se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\theta_c = \frac{X_{va} \cdot V}{Q_w \cdot X_u + Q_e \cdot X_e}$$

donde:

X_{va} = Concentración de ssv en el reactor (mg/L)

X_u = Concentración de ssv en el flujo de reciclaje (mg/L)

X_e = Concentración de ssv en el efluente final (mg/L)

Q_w = Flujo de desecho (litros/d)

Q_e = Flujo de efluente tratado (litros/d)

V = Volumen del reactor (litros)

REPORTE DE LA PRÁCTICA

1. Para conocer la variación de la edad de lodos y de la relación (A/M), registre los resultados de todos los análisis. Analícelos y determine las condiciones en las que opera mejor el sistema y explique por qué.

2. Haga la gráfica de DQO del agua tratada de la relación A/M y de la concentración de SSV en el reactor aireado, según la edad de los lodos para la variación de la relación A/M. Analícelas.

3. Haga las gráficas de IVL y VUO en función de la edad de los lodos para la variación de la relación A/M. Analícelas.

BIBLIOGRAFÍA

Eckenfelder, W., *Water Pollution Control, Experimental Procedure for Process Design*, Pemberton Press, 1970.

Práctica de este texto: Determinación experimental de los parámetros biocinéticos utilizados para diseñar sistemas aerobios de tratamiento de aguas residuales.

Ramalho, R. S., *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté, 1991.

WPCF, AWWA, APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17a. ed., Apha Washington, 1985.

CAPÍTULO VI

ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVADO

GENERALIDADES

LA ADSORCIÓN ES UN PROCESO EN EL QUE SE ACUMULA un soluto en una superficie o en la interface de un sólido; generalmente se explica en términos de tensión superficial o energía por unidad de área. Dentro de la fase sólida, las moléculas están sujetas a fuerzas balanceadas hacia todas las direcciones, mientras que en la superficie sus fuerzas no están balanceadas lo que provoca que otras moléculas puedan ser atrapadas en la superficie de la fase sólida. Al sólido (por ejemplo carbón activado), se le llama adsorbente; de ahí que al soluto que se va a adsorber se le denomine adsorbato.

La forma correcta para diseñar sistemas de adsorción en carbón consiste en utilizar columnas semipiloto en condiciones similares a las de operación real. El diseño se basa en las ecuaciones desarrolladas por Bohart y Adam. Las columnas de adsorción se utilizan para remover de las aguas residuales sustancias que no se remueven durante el tratamiento biológico o con sólidos u otros compuestos; como detergentes no biodegradables, por ejemplo.

Expresión para el tiempo de servicio de la columna

Siguiendo la ecuación de Bohart y Adam (t):

$$t = (N_0 / C_0 V) D - \ln [(C_0 - C_e) - 1] / K C_0 \quad (\text{VI.1})$$

donde:

N_0 = Capacidad de adsorción (kg de soluto/m³ de carbón)

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

C_o = Concentración de soluto en el afluente (kg/m^3)

C_e = Concentración de soluto permisible en el efluente (kg/m^3)

V = Velocidad lineal (m/h)

D = Altura del lecho de carbón (m)

K = Constante de velocidad ($\text{m}^3/\text{kg de carbón h}$)

OBJETIVO

Conocer y aplicar el procedimiento semipiloto que permite obtener los parámetros de diseño de las columnas de adsorción con carbón activado para tratar aguas residuales.

EQUIPO Y MATERIALES

Bombas peristálticas

Cronómetro

Espectrofotómetro

Material de vidrio (vasos de precipitados, buretas, pipetas, etcétera)

Reactivos

Solución patrón de detergente ABS

Azul de metileno

Ácido sulfúrico

Hidróxido de sodio

Fenolftaleína

Mezcla crómica (para lavar el material)

Equipo de adsorción en carbón activado

La figura VI.1 muestra el equipo de adsorción en carbón activado junto con sus dimensiones: columnas de acrílico transparente, conectadas en cascada (foto VI.1), para trabajar en continuo. Cada columna tiene una válvula en la parte inferior (puerto de muestreo) para poder tomar la muestra. El equipo también cuenta con una bomba dosificadora de flujo variable para regular el caudal ($\text{L}/\text{min m}^2$) y por la que se alimentan las columnas en su parte superior. Las columnas están cargadas con carbón activado granular (80 ma-

Adsorción en carbón activado

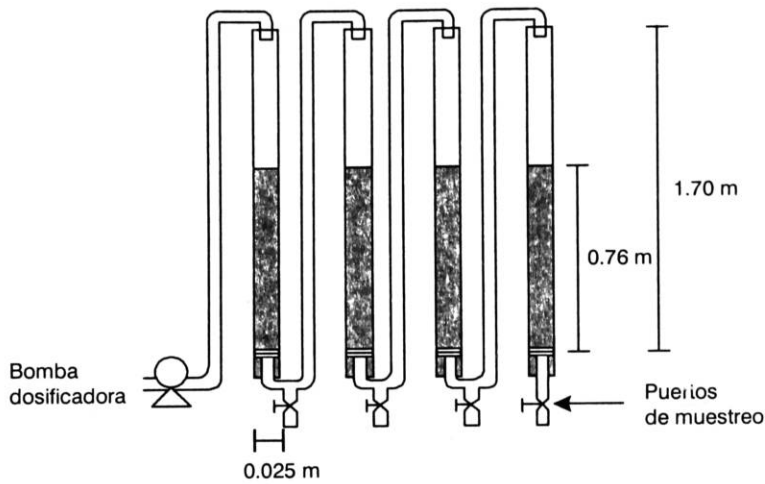


Figura VI.1. Diagrama de columnas semipiloto para adsorción con carbón activado (proceso continuo)

llas); su profundidad de lecho es de 0.76 m, lo que permite obtener resultados del proceso desde diferentes profundidades. La parte inferior de la columna es de fibra de vidrio (5 mm de espesor) con lo que se evita la pérdida del carbón activado.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Determinación de los parámetros N_0 y K

1. Prepare la solución de detergentes (ABS) de mg/L. Para analizar su concentración utilice la técnica del SAAM.

2. En un sistema de columnas de diferentes alturas de lecho de carbón activado (D) use los caudales que aparecen en el recuadro ($L/min\ m^2$). Calcule el flujo de alimentación (ml/min) tomando en cuenta que el diámetro de las columnas es de 0.0254 m.

Prueba núm.	Caudal ($L/min\ m^2$)	Flujo (ml/min)
1	101	
2	203	
3	407	

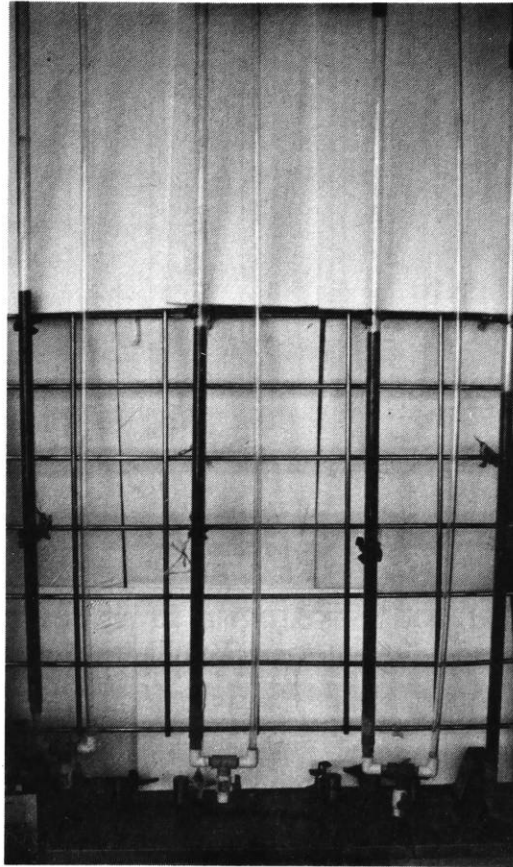


Foto VI.1. Columnas semipiloto para adsorción con carbón activado (proceso continuo)

Comience la corrida experimental alimentando la primera columna por la parte superior con la solución de detergente.

3. Para cada prueba registre los tiempos en los que la concentración del ABS alcanza su nivel permisible ($C_e = 0.5 \text{ mg/L}$ en el efluente de cada una de las columnas; es decir, a la columna 1 le corresponde el tiempo t_1 , a la columna 2, t_2 y a la columna 3, t_3 .

4. Suspenda la prueba cuando en la última columna se alcance la C_e ; registre el tiempo.

5. Para los diferentes caudales y alturas del lecho de carbón (D), haga el siguiente cuadro de datos experimentales obtenidos.

Adsorción en carbón activado

Prueba núm.	Caudal (L/min m ²)	Altura del lecho (m)	Velocidad lineal (V) (m/h)	Tiempo (t) (h)	Volumen tratado acumulado (L)*
1	101	D1 = 0.76 D2 = 1.52 D3 = 2.28			
2	203	D1 = 1.00 D2 = 2.00 D3 = 3.00			
3	407	D1 = 2.00 D2 = 3.00 D3 = 4.00			

* El volumen acumulado se obtiene multiplicando el caudal por el área transversal de la columna y por el tiempo

6. Dibuje la gráfica del tiempo (t) en función del caudal para obtener N_o y K de acuerdo con la ecuación VI.1.

7. Obtenga la altura crítica (D_o) mediante la siguiente ecuación:

$$D_o = (V/N_o K) \ln[(C_o - C_e) - 1] \quad (2)$$

REPORTE DE LA PRÁCTICA

1. Dibuje las gráficas para obtener N_o y K .
2. Elabore las tablas de resultados de N_o , K y D_o , según cada caudal usado.
3. Defina D_o .
4. Haga las gráficas de N_o , K y D_o en función de cada caudal usado.
5. Explique cómo se usan para diseñar los parámetros experimentales obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Eckenfelder, W., *Water Pollution Control, Experimental Procedure for Process Design*, Pemberton Press, 1970.
- Normas oficiales mexicanas en materia de protección ambiental, México, *Diario Oficial de la Federación*, 1993.
- Ramallo, R. S., *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté, 1991.
- WPCF, AWWA, APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17a. ed., Apha Washington, 1985.

CAPÍTULO VII

DIGESTIÓN AEROBIA DE LODOS

GENERALIDADES

DURANTE LOS TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES, primarios y secundarios, se generan grandes cantidades de lodo que deben tratarse para luego disponerlos. Algunos de estos tratamientos son la digestión aerobia y la anaerobia; gracias a ellas se disminuye el contenido de compuestos orgánicos, y se les estabiliza; al estabilizarlos se reducen los olores molestos, la cantidad y el volumen de sólidos, lo mismo que los microorganismos patógenos de los lodos.

Después de la digestión, los lodos pueden disponerse en la tierra o incinerarse. La digestión, aerobia o anaerobia, tiene como principal objetivo reducir la masa de lodos; en este caso la remoción de la DBO soluble no es importante. En la digestión aerobia la reducción de la materia orgánica resulta de la oxidación de los compuestos orgánicos bacterianos ($C_5 H_7 NO_2$) a compuestos volátiles (CO_2 , NH_3 , H_2O).

La digestión aerobia de lodos es más rápida que la anaerobia, por lo que los volúmenes de los reactores son menores que cuando se usa la digestión anaerobia; no obstante los requerimientos de energía para la aireación, puede ser un factor importante para seleccionar el tratamiento.

Para diseñar los sistemas de digestión aerobia de lodos se utiliza un sistema discontinuo que permite obtener la velocidad de la reducción de sólidos suspendidos volátiles SSV y los requerimientos de oxígeno ($kg O_2/h$).

La velocidad de reducción de los SSV sigue una cinética de primer orden.

Para obtener la constante de velocidad (k_{dc}) en un sistema discontinuo

Cuando se van a obtener estos parámetros se utiliza la siguiente ecuación:

$$\ln [(X_e - X_n)/(X_o - X_n)] = -k_{dc} t \quad (VII.1)$$

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

donde:

X_e = Concentración de ssv totales en el efluente (mg/L)

X_o = Concentración de ssv totales en el afluente (mg/L)

X_n = Concentración de ssv no degradables (mg/L)

t = Tiempo (h)

Cuando se hace la gráfica de forma semilogarítmica, la concentración de SSV biodegradables que quedan en el tiempo t , en función del tiempo de aireación, da una recta con pendiente k_{dc} .

La constante k_{dc} depende de la temperatura de operación, por lo que es necesario corregirla basándose en la siguiente ecuación:

$$k_{dcT} = K_{dc20} \Theta^{T-20} \quad (\text{VII.2})$$

donde:

k_{dcT} = Constante a la temperatura T de operación (1/d)

k_{dc20} = Constante a 20° C (1/d)

T = Temperatura de operación (°C)

Sistema continuo

El tiempo de residencia (t) en un reactor de digestión aerobia continuo se obtiene con la siguiente ecuación:

$$t = (X_o - X_e) / k_{dc} (X_e - X_n) \quad (\text{VII.3})$$

Requerimientos de oxígeno en un sistema discontinuo

Los requerimientos totales de oxígeno (kg O₂/h) para la digestión aeróbica de lodos en un sistema discontinuo, se obtiene con base en el área bajo la curva que se produce al graficar la VUO (mg O₂/Lh) en función del tiempo de tratamiento. Esta área se obtiene según la siguiente integral:

$$\text{Consumo total de O}_2(\text{mgO}_2/\text{L}) = \int_0^t (\text{VUO}) dt \quad (\text{VII.4})$$

Digestión aerobia de lodos

La velocidad media de consumo de oxígeno para el tiempo de tratamiento t , está dada por:

Velocidad de consumo de O_2 (mg O_2 /L h) reactor discontinuo

$$= \frac{1}{t-0} \int_0^t (V_{UO}) dt = \frac{1}{t} \int_0^t (V_{UO}) dt \quad (VII.5)$$

Sistema continuo

Los requerimientos de oxígeno en un sistema continuo están dados por:

Velocidad de consumo de O_2 (mg O_2 /L h) reactor continuo

$$= \left(\frac{1}{t} \int_0^t (V_{UO}) dt \right) \frac{[(Xd)_0 - (Xd)_e]_{\text{continuo}}}{[(Xd)_0 - (Xd)_e]_{\text{discontinuo}}} \quad (VII.6)$$

donde:

$$(X_d)_0 = X_o - X_n$$

$$(X_d)_e = X_e - X_n$$

Método experimental 9

OBJETIVO

Conocer y aplicar el procedimiento semipiloto que permite obtener los parámetros con los que se diseña un sistema de digestión aerobio para el tratamiento de lodos.

EQUIPO Y MATERIALES

Rotámetro

Medidor de oxígeno disuelto

Cronómetro

Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

Crises gouch y filtros
Bomba de vacío
Estufa
Balanza analítica
Material de vidrio
Botellas winckler

Biorreactor aireado sistema por lote

En esta práctica se utiliza un equipo similar al que usamos en el método experimental 7 de este manual.

Ya que la digestión de lodos es un sistema por lote, sólo se utiliza el biorreactor aireado de 30 litros.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para obtener la constante de velocidad (k_{dc})

1. De la corriente de fondos de un sedimentador secundario de una planta de lodos activados en operación, tome una muestra de agua con lodos (50 litros).
2. Cargue el biorreactor (30 litros) con el agua que se va a tratar con lodos; comience la aireación y la prueba. Tome una muestra en el tiempo cero para determinar la concentración de SSV (mg/L) y la VUO (mgO₂/L h).
3. Tome una muestra cada 12 horas y determine el SSV y la VUO.
4. Deje correr la prueba hasta que la concentración de SSV se mantenga casi constante.
5. Con los resultados que obtenga experimentalmente de SSV totales grafique la variación de esa concentración (mg/L) en función del tiempo (d) para obtener la cantidad de SSV no biodegradables (X_n).
6. Para cada tiempo determine los SSV biodegradados, restando los SSV totales menos los SSV no biodegradables (X_n).
7. Dibuje una gráfica semilogarítmica de SSV biodegradados en función del tiempo; apóyese en la ecuación VII.1. La pendiente es k_{dc} .

Digestión aerobia de lodos

Requerimientos de oxígeno

1. Haga la gráfica de la VUO ($\text{mgO}_2/\text{L h}$) en función del tiempo (d).
2. Obtenga el área bajo la curva (consumo total de O_2 , ecuación VII.4), para el tiempo seleccionado.
3. Determine el valor medio de la velocidad de consumo de oxígeno para el reactor discontinuo, según la ecuación VII.5.

REPORTE DE LA PRÁCTICA

1. Elabore las gráficas y los resultados de k_{dc} , corregida para 20°C , lo mismo que para 15 y 30°C .
2. Para tratar los lodos y reducir los SSV en 85%, calcule:
 - a) Los tiempos de tratamiento en un sistema discontinuo y de residencia en un sistema continuo; considere una temperatura de invierno de 15°C . Analice los resultados.
 - b) Calcule el volumen de un digestor aerobio para tratar $200\text{ m}^3/\text{día}$.
3. Determine los requerimientos de O_2 ($\text{Kg}/\text{día}$) para el reactor continuo del inciso b del punto anterior.

BIBLIOGRAFÍA

- Eckenfelder, W., *Water Pollution Control, Experimental Procedure for Process Design*, Pemberton Press, 1970.
- Ramalho, R. S., *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté, 1991.
- WCPF, AWWA, APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17a. ed., Apha Washington, 1985.

ÍNDICE

<i>Introducción</i>	7
<i>Capítulo I. Coagulación y floculación</i>	9
Generalidades	9
Método experimental 1. Prueba de jarras	10
Objetivo	12
Equipo y materiales	12
Procedimiento	13
Reporte de la práctica	15
Bibliografía	16
<i>Capítulo II. Sedimentación</i>	17
Generalidades	17
Método experimental 2. Sedimentación discreta	18
Objetivo	18
Equipo y materiales	18
Procedimiento	18
Cálculos	18
Reporte de la práctica	20
Método experimental 3. Sedimentación floculenta	21
Objetivo	21
Equipo y materiales	21
Procedimiento	21
Cálculos	22
Reporte de la práctica	24
Método experimental 4. Sedimentación zonal	24
Objetivo	24
Equipo y materiales	24
Procedimiento	25

Índice

Reporte de la práctica	26
Bibliografía	27
<i>Capítulo III. Aireación</i>	29
Generalidades	29
Método experimental 5	32
Objetivo	32
Equipo y materiales	32
Procedimiento	34
Método experimental 5a. Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno (K _{la}) por el método dinámico	38
Reporte de la práctica	39
Bibliografía	39
<i>Capítulo IV. Determinación de parámetros biocinéticos</i>	41
Generalidades	41
Método experimental 6	47
Objetivo	47
Equipo y materiales	47
Procedimiento experimental	48
Reporte de la práctica	54
Bibliografía	54
<i>Capítulo V. Métodos para controlar sistemas de lodos activados</i>	55
Generalidades	55
Método experimental 7	56
Objetivo	56
Equipo y materiales	56
Procedimiento experimental	58
Reporte de la práctica	61
Bibliografía	61
<i>Capítulo VI. Adsorción en carbón activado</i>	63
Generalidades	63
Expresión para el tiempo de servicio de la columna	63
Objetivo	64
Equipo y materiales	64
Procedimiento experimental	65
Reporte de la práctica	67
Bibliografía	67

Índice

<i>Capítulo VII. Digestión aerobia de lodos</i>	69
Generalidades	69
Método experimental 9	71
Objetivo	71
Equipo y materiales	71
Procedimiento experimental	72
Reporte de la práctica	73
Bibliografía	73

*Parámetros de diseño de sistemas
de tratamiento de aguas residuales*

se terminó de imprimir en marzo de 1999
en los talleres de Sans Serif Editores, S.A. de C.V.,
Ajusco 61 bis, col. Portales, 03300 México, D.F.
El tiro consta de 1 000 ejemplares más sobrantes
para reposición.

La composición tipográfica, la formación, la producción
y el cuidado editorial estuvieron a cargo
de Sans Serif Editores,
telfax 674 60 91.

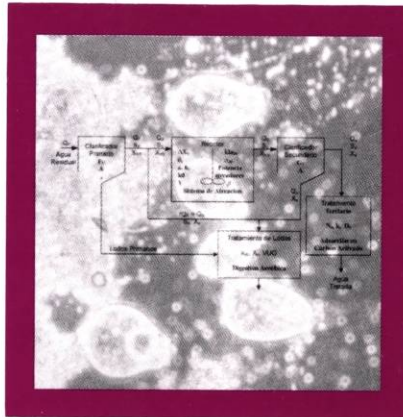
2893627

Otros títulos en esta colección

- Patrick Staelens, *El trabajo de los menores*
Luis Rodríguez, *El diseño preindustrial*
José Dolores Juárez Cervantes, *Sistemas de distribución de energía eléctrica*
Rafael Quintero, *Electrónica física*
Adalberto Cantú Chapa, *Análisis de diseño con diodos y transistores*
Mariem Henaine-Abed, *Planeación y control de la producción*
José Vega Luna y Gerardo Salgado Guzmán, *Prácticas de laboratorio de sistemas digitales*
Ana Lilia Laureano, *Programación orientada a objetos: un enfoque con tipos abstractos*
Juan González Márquez, *Introducción al derecho bancario mexicano*
Violeta Múgica y José de Jesús Figueroa, *Contaminación ambiental, causas y control*
Fernando Toledo Toledo, *Métodos computacionales para el análisis de sistemas de potencia*
Raymundo López Callejas, Juan Ramón Morales Gómez, Mabel Vaca Mier, Araceli Lara Valdivia y David Sandoval Cardoso, *Problemario de mecánica de fluidos*
Tomás David Navarrete González y José Ángel Rocha Martínez, *Colección de problemas resueltos para el curso de energías mecánica y eléctrica*
Rafael López Bracho, María Paula Ortuño Sánchez, Felipe Carrillo Romero y María Teresa Rodríguez Martínez, *Paquete computacional "Optimización en redes (versión 2.0) para Windows*.
Vicente Yuri Plata Garnica, *Principios de microelectrónica*

UAM
TD745
M3.74

2893627
Martínez Delgadillo, Serg
Parametros de diseños de



Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Métodos experimentales ofrece a los estudiantes e ingenieros relacionados con el tratamiento de aguas residuales los procedimientos y técnicas para obtener los parámetros básicos para el diseño de diferentes procesos unitarios de tratamiento de aguas residuales, a partir de estudios piloto y de laboratorio. A diferencia de otras publicaciones de este campo, en la presente se privilegia la parte experimental y se describen detalladamente los procedimientos experimentales y los equipos utilizados. En cada tema se exponen de manera sintética la teoría y los principios esenciales de los diferentes procesos. El texto contiene nueve métodos experimentales ubicados en los diferentes niveles de tratamiento de aguas residuales –primario, secundario y terciario–, e incluye asimismo un tema relacionado con el tratamiento de lodos. También se incluyen diagramas y fotografías de los diferentes equipos empleados, con el objetivo de proporcionar al lector una mejor idea del trabajo experimental que realizará.

