



SEP

SES

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE AGUAS RESIDUALES
MUNICIPALES MEDIANTE RESPIROMETRÍA EN UN REACTOR
BATCH A 25°C”**

**TITULACIÓN INTEGRAL
TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA:
LETICIA MARTÍNEZ MEDINA
No. CONTROL:
12281037**

**ASESOR:
DR. NICOLÁS FLORES ÁLAMO**

**CO-ASESORA:
DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN**



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Metepec, Edo. de México, 30 / agosto / 2019.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA
D.I.Q.B-340-860/2019

ING. MIGUEL ÁNGEL TERRAZAS MAGAÑA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
PRESENTE

Por este medio le informo a usted, que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral:

Nombre de la Egresada	LETICIA MARTÍNEZ MEDINA
Carrera	INGENIERÍA QUÍMICA
No. de Control	12281037
Nombre del Proyecto	"ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES MEDIANTE RESPIROMETRÍA EN UN REACTOR BATHC A 25° C"
Producto	TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE

Educación, integridad y ciencia

M. en C. MARÍA FERNANDA MÁRQUEZ QUINTANA
JEFA DEL DEPARTAMENTO

DR. NICOLÁS FLORES
ÁLAMO

ASESOR

DRA. MARÍA DEL
CARMEN CARREÑO DE
LEÓN
CO-ASESORA

M. en C. HILDA
PATRICIA MEDINA
CABALLERO
REVISORA

M. en C. MARÍA
CLAUDIA DELGADO
HERNÁNDEZ
REVISORA



MFMQ/stt



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx





EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano

Metepec, Edo. De México, 15 / noviembre / 2019.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ASUNTO: Se Autoriza Impresión de Trabajo Profesional

C. LETICIA MARTINEZ MEDINA
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA QUÍMICA.

PRESENTE

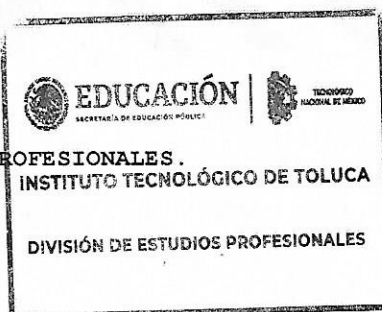
De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica, dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó, con respecto a su trabajo profesional en la **OPCIÓN TITULACION INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL**, con el tema denominado: **"BIODEGRADABILIDAD DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES MEDIANTE RESPIROMETRIA EN UN REACTOR BATCH A 25°C"** La División de Estudios Profesionales concede su autorización para que proceda la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

"Educación, integridad y ciencia"

ING. MIGUEL ANGEL TERRAZAS MAGAÑA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES.
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

MATM*mpjl*
C.c.p. Expediente



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7206
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



Número de registro: RPrIL-072
Fecha de inicio: 2017-04-10
Término de la certificación:
2021-04-10



ISO 9001:2015
CERTIFIED

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a mi amado Dios, por siempre sostenerme con su brazo de amor y misericordia a lo largo de mi camino, por ser la luz en mi vida y ser el protector de mis sueños, anhelos y metas. Gracias Padre, por hacerme una mujer sabia y digna de ti, por llenarme de fortaleza en los tiempos difíciles y por darme el regalo de culminar esta etapa.

Agradezco a mis padres Ricardo y Leticia, por estar a mi lado en cada paso de mi vida, infinitas gracias por su gran amor y apoyo incondicional. Por los valores inculcados, por darme la oportunidad de tener una excelente educación y por ser un ejemplo excepcional de vida.

A mi hermano, César, por amarme y apoyarme en cada etapa recorrida para llegar hasta este punto; aun por encima de su mal carácter.

Gracias Abi, Adri, Anel, Angie, Fany y Vero, por ser las mejores amigas y cómplices en esta aventura, gracias por todos los momentos que pasamos juntas, cada uno de ellos inolvidables. Por su cariño, apoyo y motivación. Gracias por cada una de las enseñanzas. Simplemente gracias por estar ahí siempre, con ustedes esta travesía ha sido increíble.

Inmensamente gracias a mi mejor amigo Vladimir Sánchez por ser mi soporte, por seguir a mi lado y por lograr más en mí de lo que cualquier otra persona pudo lograr en su momento.

Especialmente agradezco a cada uno de los profesores del Instituto Tecnológico de Toluca, son un pilar fundamental en mi formación académica.

Principalmente gracias al Doctor Nicolás Flores Álamo y a la Doctora Carmen Carreño de León, por su dedicación y apoyo en el presente trabajo; gracias por formar parte de la culminación de mi etapa académica. Son seres humanos grandiosos.

Dedicado única y especialmente a Camila Martínez Garfias, porque me motiva a ser mejor persona cada día y convertirme en su mejor ejemplo de vida, fortaleza y feminidad.

Con amor, Leti♥

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es determinar la biodegradabilidad de las aguas residuales provenientes de Metepec y municipios aledaños; que son descargadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de dicho municipio. La determinación de los parámetros de biodegradabilidad se basó en la técnica respirométrica, se eligió esta técnica porque está directamente relacionada con dos procesos bioquímicos importantes que deben ser controlados en una planta de tratamiento de aguas residuales: el crecimiento de biomasa y consumo de sustrato.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en dos etapas; en la primera se llevó a cabo la caracterización de aguas residuales: determinación de DQO, SST, SSV y SSF. En la segunda etapa se realizó el estudio de la biodegradabilidad de las aguas residuales mediante los parámetros: a) cinética de respiración del lodo activado (r_{O_2}) y b) cinética del crecimiento de biomasa (X_H).

El uso de diferentes sustratos fue necesario para comparar el crecimiento de los microorganismos y evaluar cómo afectan los sustratos el comportamiento de las cinéticas; con ello determinar si la fuente de carbono natural (agua residual) es suficiente para obtener crecimientos prolongados y mayor cantidad de lodo activado (biomasa) y concluir como es la biodegradabilidad de las aguas residuales de Metepec.

El resultado obtenido de DQO, indicó que la degradación de la materia orgánica e inorgánica se llevó a cabo al 97%, en el agua residual de estudio.

Los resultados de las cinéticas usando agua residual, fueron los siguientes: $r_{O_2}=0.1003\text{mg/L}\cdot\text{d}$, $\mu_{H\text{máx}}=49.7711\text{ d}^{-1}$, $X_{H0}=2.4062\text{ mg/L}$ y $X_H=18.7217\text{ mg/L}$, obtenidos en un periodo de crecimiento máximo de una hora; datos que en comparación con los resultados usando otros sustratos, se pueden considerar óptimos ya que se tienen crecimientos prolongados en un tiempo considerable.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. FUNDAMENTOS.....	3
2.1. Aguas residuales	3
2.2. Clasificación de las aguas residuales	3
2.3. Métodos de tratamiento de aguas residuales	3
2.4. Lodos	4
2.5. Clasificación de los lodos.....	4
2.5. Tratamiento biológico mediante lodos activados	5
2.7. Sustrato	5
2.8. Principio de los procesos biológicos	5
2.9. Metabolismo de los microorganismos en los procesos biológicos.....	7
2.9.1. Reacciones biológicas en lodos activados	7
2.9.2. Crecimiento de los microorganismos	8
a. Crecimiento en términos de número de microorganismos	8
b. Crecimiento en términos de masa bacteriana (biomasa)	9
2.9.3. Relación sustrato/biomasa (S/X).....	10
2.10. Oxígeno disuelto	11
2.11. Técnica respirométrica.....	11
2.12. Biodegradabilidad de las aguas residuales.....	12
2.13. Indicadores de contaminación	13
2.13.1. Demanda Teórica de Oxígeno (DTO)	13
2.13.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	14
2.13.3. Contenido de sólidos.....	14
2.14. Reactor batch	14
2.15. Principio de medición de la cinética de respiración del lodo activado.....	15
2.16. Principio de medición de la cinética del crecimiento de biomasa	16
3. MÉTODO.....	21
3.1. Cinética de respiración del lodo activado.....	23
3.1.1. Desarrollo de la técnica.....	23
3.2. Cinética del crecimiento de biomasa	23

3.2.1. Desarrollo de la técnica.....	24
4. RESULTADOS	25
4.1. Caracterización de lodos activados y aguas residuales	25
4.1.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos (SS)	25
4.1.2. Optimización de la relación sustrato/biomasa:S/X	26
4.2. Estudio de la biodegradabilidad.....	26
4.2.1. Cinética de respiración del lodo activado	26
a) Empleando agua residual como sustrato	26
b) Empleando acetato de sodio a 0.1M como sustrato	28
c) Empleando acetato de sodio a 0.259M como sustrato.....	29
d) Empleando acetato de sodio a 0.3M como sustrato	30
4.2.2. Cinética del crecimiento de biomasa.....	31
a) Empleando agua residual como sustrato	31
b) Empleando acetato de sodio a 0.1M como sustrato	32
c) Empleando acetato de sodio a 0.259M como sustrato.....	33
d) Empleando acetato de sodio a 0.3M como sustrato	35
5. CONCLUSIONES.....	38
6. REFERENCIAS	39
ANEXO A: Cinética de Respiración del Lodo Activado	43
ANEXO B: Cinética de Crecimiento de Biomasa.....	51

1. INTRODUCCIÓN

La gran cantidad de agua residual que generan todas las actividades del hombre, está muy lejos de recibir un tratamiento adecuado, por lo que grandes volúmenes de agua residual, se desechan y contaminan lagos, lagunas y océanos, afectando nuestros ecosistemas y arrecifes a lo largo de todas las costas de nuestro país, sin darnos cuenta de las consecuencias futuras que puede ocasionar esto (ECORED, 2008).

Hoy en día el tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados es uno de los métodos más aplicados en las plantas de tratamiento, debido a que se lleva a cabo mediante procesos biológicos en los cuales la materia orgánica y los nutrientes disueltos son utilizados como alimento por los microorganismos presentes en los lodos encargándose al mismo tiempo de acelerar la degradación de las aguas residuales, además cabe destacar que existen microorganismos que se desarrollan en medios aerobios, anaerobios o anóxicos. Asimismo cuando los microorganismos han crecido lo suficiente logran formar flóculos, los cuales se conjuntan entre sí y pueden ser fácilmente separados por medios físicos como: filtración, centrifugación o sedimentación por gravedad; este último es el más usado debido a su bajo costo ya que los flóculos sedimentados pueden ser decantados de forma viable del agua residual.

El oxígeno es un factor de gran importancia en el proceso biológico de lodos activados ya que la mayor parte de microorganismos existentes en los lodos son aerobios y sin la presencia de oxígeno morirían drásticamente. En una planta de tratamiento de aguas residuales normalmente se suministra oxígeno a los microorganismos a través de aireadores. En la actualidad mediante respirometría se mide la velocidad de consumo de oxígeno de los microorganismos en lodos activados, esta metodología permite determinar las cinéticas de crecimiento de los microorganismos y consumo del sustrato fácilmente biodegradable. Los primeros en usar la técnica respirométrica fueron Jenkins en 1960 y Montgomery en 1967, teniendo como base sus propios estudios experimentales sobre la cuantificación del consumo de oxígeno disuelto en sistemas de lodos activados (Andreottola *et al.*, 2005).

La técnica respirométrica es la base para una serie de protocolos de caracterización de aguas residuales como la determinación de la biodegradabilidad, cuya propiedad es el objetivo de estudio de la presente tesis que se centra en determinar con qué facilidad se degrada la materia orgánica presente en el agua residual mediante el crecimiento y alimentación de los

microorganismos encontrados en la biomasa del lodo activado utilizando agua residual y acetato de sodio a diferentes concentraciones como sustrato, en un reactor isotérmico tipo batch a una temperatura de 25°C.

El agua residual y los lodos activados de estudio provienen de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ubicada en Metepec, Estado de México; estas muestras se tomaron de la entrada y salida del primer tanque de aireación, respectivamente. La PTAR está conformada por dos trenes de tratamiento, la cual fue diseñada y construida por ECORED. Trata 100 litros por segundo de agua residual y genera agua tratada de muy alta calidad, que da servicio a la cabecera Municipal de Metepec y diversas dependencias federales y estatales de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SEDAGRO), (ECORED, 2008).

2. FUNDAMENTOS

2.1. Aguas residuales

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2003) lo define como las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

2.2. Clasificación de las aguas residuales

De acuerdo a su procedencia las aguas residuales pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Domésticas: son aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, entre otros). Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas; también consisten en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.
- Industriales: son líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas, dependiendo del tipo de industria.
- Infiltración y caudal adicionales: las aguas de infiltración penetran en el sistema de alcantarillado a través de los empalmes de las tuberías, paredes de las tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza. Hay también aguas pluviales, que son descargadas por medio de varias fuentes, como canales, drenajes y colectores de aguas de lluvias.
- Pluviales: son agua de lluvia y se descargan grandes cantidades sobre el suelo. Parte de esta es drenada y otra escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas y otros residuos que pueden estar sobre el suelo (Merli & Ricciuti, 2009).

2.3. Métodos de tratamiento de aguas residuales

El principal objetivo del tratamiento del agua residual es producir un efluente que pueda ser descargado sin causar daños al medio ambiente. Los contaminantes del agua residual pueden ser eliminados por uno de los siguientes métodos:

- Físicos: tratamiento en el cual se llevan a cabo cambios a través de la aplicación de fuerzas físicas. Las unidades típicas incluyen cribado, mezclado, adsorción, desorción, transferencia de gas, flotación, sedimentación y filtración.

- Químicos: operaciones en las cuales la remoción o tratamiento de los contaminantes se realiza mediante la adición de reactivos que llevan a cabo diferentes reacciones químicas. La precipitación química, el ajuste del pH, la coagulación y la desinfección son los principales.
- Biológicos: la remoción de los contaminantes se realiza a través de la oxidación biológica de la materia orgánica. El principal uso del tratamiento biológico es la remoción de los compuestos orgánicos biodegradables. El ejemplo más conocido es el de lodos activados.

En muchos casos, se combinan varios procesos dependiendo de la calidad del agua residual que se va a tratar y de las características que deba tener el agua tratada al final del tren de tratamiento (Moeller & Tomasini, 2004).

2.4. Lodos

Son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización (SEMARNAT, 2003).

2.5. Clasificación de los lodos

Menéndez y Pérez (2007) sugieren clasificar los lodos de acuerdo con su facilidad de sedimentación:

- Lodos floculentos: en condiciones óptimas del proceso, el lodo activado forma buenos flóculos de fácil sedimentación. La formación de buenos flóculos no es necesariamente una condición para una alta eficiencia en la remoción de los compuestos orgánicos solubles presentes en un agua residual. Sin embargo, cuando se desea tener un lodo denso para su recirculación, y un efluente claro, se requiere que el lodo activado forme buenos flóculos.
- Lodos no floculentos: en ocasiones hay condiciones de trabajo bajo las cuales los microorganismos que constituyen el lodo no forman aglomeraciones, y por tanto, no se logran flóculos sedimentables. Las bacterias permanecen dispersas y mantienen su individualidad. Las diferentes causas por las que un lodo puede ser no floculento pueden encontrarse en los parámetros de operación del proceso, y en las características de las aguas residuales tratadas. Es comúnmente conocido que cuando existe una baja edad del lodo (menor de tres días) o alta carga, el lodo que se forma es propenso a presentar características de un cultivo disperso no floculento. Como consecuencia de esta dispersión

se produce un aumento en el índice volumétrico de lodo (IVL), en la medida en que la edad del lodo disminuye a partir de determinado valor.

- Lodos abultados: el abultamiento de los lodos trae como consecuencia malas propiedades de sedimentación. Desde un punto de vista eminentemente práctico, las características de sedimentación y espesamiento de los lodos activados se expresan en términos del IVL.

2.5. Tratamiento biológico mediante lodos activados

Bajo la denominación de lodo activado se incluye un conjunto de procedimientos de tratamiento en los que se destaca, como elemento común, el íntimo contacto del agua residual con una masa biológica preformada y en suspensión, en un tanque aireado. Esta biomasa está constituida por un cultivo mixto de microorganismos que forma, junto con otras sustancias orgánicas e inorgánicas un conglomerado floculento. Mediante este proceso los compuestos orgánicos contenidos en las aguas residuales son utilizados como sustratos (Menéndez & Pérez, 2007); a la mezcla de este lodo con agua residual se le llama licor mezclado (Noyola *et al.*, 2013).

2.7. Sustrato

Teniendo en cuenta que los compuestos orgánicos contenidos en el agua residual sirven como fuente de energía a los microorganismos, son denominados sustratos. Los sustratos se clasifican como exógenos (fuera de la célula bacteriana) y endógenos (en el interior de la célula bacteriana).

Cuando el sustrato exógeno se agota, los microorganismos oxidan el sustrato endógeno. En una primera etapa estos sustratos endógenos sirven como material de reserva y cuando se agota, comienza la oxidación de las proteínas. Si los microorganismos constituyentes de la biomasa se mantienen durante un cierto tiempo sin sustrato exógeno, muchos de ellos morirán. La masa remanente puede llegar a contener menos del 10 % en peso de organismos vivos, y será relativamente estable a la descomposición posterior. Este fenómeno es utilizado en la práctica para la estabilización aerobia de los lodos (Menéndez & Pérez, 2007).

2.8. Principio de los procesos biológicos

Un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales es un sistema en el cual se mantiene un cultivo de microorganismos (biomasa) que se alimenta de las impurezas del agua residual (sustrato o alimento), como se muestra en Figura 2.1. Estas impurezas son la materia orgánica biodegradable, el amonio, nitratos, fosfatos y otros contaminantes a menor concentración (Merli & Ricciuti, 2009).

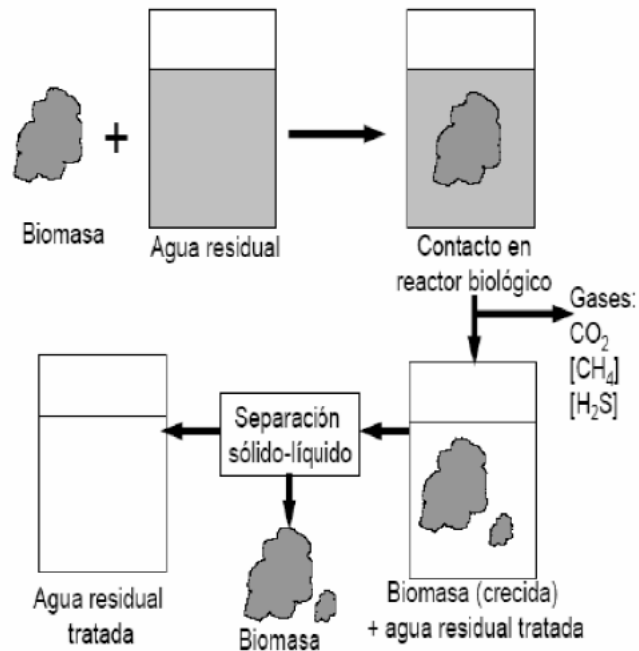


Figura 2.1. Esquema elemental de un proceso biológico de tratamiento (Merli & Ricciuti, 2009)

Así mismo, los procesos biológicos son clasificados de la siguiente manera: (a) aerobios, (b) anaerobios, (c) anóxicos y (c) la combinación de los anteriores. Esta clasificación se hace con respecto a las condiciones de crecimiento a las que someten los microorganismos.

Los microorganismos presentes en los procesos biológicos utilizan la materia orgánica coloidal y disuelta como alimento para llevar a cabo todas sus funciones metabólicas, como crecimiento y reproducción, generando como productos finales, varios tipos de gases y materia inorgánica y más células (biomasa). Ya que la gravedad específica de la biomasa es ligeramente mayor que la del agua, éstas pueden removerse por sedimentación.

Para asegurar el crecimiento de los microorganismos, se les debe permitir un tiempo de permanencia en el sistema lo suficiente para que se reproduzcan. Este período depende de la tasa de crecimiento, la cual está directamente relacionada con la velocidad a la que metabolizan o utilizan el sustrato (Moeller & Tomasini, 2004).

Este proceso y sus variantes o modificaciones son los más frecuentemente utilizados en grandes instalaciones. El agua residual previamente sedimentada y el lodo de recirculación se alimentan en la entrada de un tanque de aireación, donde son mezclados por medio de difusores o de aireadores mecánicos para propiciar la degradación de la materia. Tienen eficiencias de 85 al 95% (SEMARNAT, 2010).

La biomasa y el agua residual se ponen en contacto en un reactor biológico donde se llevan a cabo las reacciones biológicas que más adelante se describirán. A partir del crecimiento de la biomasa se realizarán y analizarán las curvas de crecimiento de los microorganismos que son los encargados de degradar la materia orgánica que se encuentra en las aguas residuales alimentándose de esta y se determinarán los parámetros cinéticos.

2.9. Metabolismo de los microorganismos en los procesos biológicos

Los microorganismos requieren de una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células así como de nutrientes inorgánicos para sus diferentes funciones.

El metabolismo es la combinación de un conjunto de transformaciones bioquímicas necesarias para la síntesis celular (anabolismo) y la producción de energía (catabolismo) que ocurren a través de procesos enzimáticos. De hecho, los diferentes microorganismos pueden ser clasificados a partir de la forma en que obtienen el carbono y la energía.

En el tratamiento biológico de aguas residuales la energía está presente inicialmente en los compuestos orgánicos carbonosos y nitrosos. Esta se convierte en otras formas con las consecuentes pérdidas de energía. La energía carbonosa es asimilada por los organismos heterótrofos, quienes descomponen los compuestos proteicos en sus constituyentes carbonosos y nitrosos. El amonio obtenido es utilizado a su vez como fuente de energía por las bacterias nitrificantes (Menéndez & Pérez, 2007).

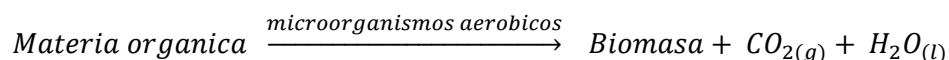
El metabolismo de los microorganismos presentes en lodos activos depende del medio en el que se desarrollen y a continuación se presentan tres puntos de gran importancia que afectan significativamente el comportamiento de estos microorganismos.

2.9.1. Reacciones biológicas en lodos activados

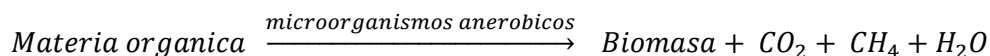
Las reacciones más importantes que se dan en el proceso biológico de lodos activados son aerobias, anaerobias o fotosintéticas.

De acuerdo a Merli & Ricciuti (2009) la estequiometría de las reacciones involucradas en los distintos tipos de tratamiento es altamente influenciada por las especies de microorganismos presentes, los compuestos existentes y las condiciones ambientales impuestas sobre el proceso. Las reacciones típicas son las siguientes:

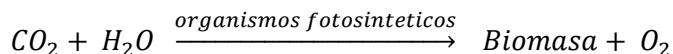
Reacción biológica aerobia:



Reacción biológica anaerobia:



Reacción biológica fotosintética:



El estudio de la biodegradabilidad de la presente investigación se realizó mediante respirometría por lo tanto las condiciones de trabajo para un sistema de lodos activados son aeróbicas; por lo que a partir de este punto solo se trataran ecuaciones y fórmulas para sistemas aeróbicos.

2.9.2. Crecimiento de los microorganismos

Moeller y Tomasini en su estudio sobre “Microbiología de Lodos Activados” (2004) describen las maneras de como se produce el crecimiento de los microorganismos en lodos activados. Argumentan que los microorganismos constituyen en mayor proporción la biomasa de los lodos activados (95%). Estos organismos unicelulares crecen en el agua residual consumiendo la materia orgánica biodegradable tales como las proteínas, carbohidratos, lípidos y otros compuestos. La manera más común para la reproducción de los microorganismos es por fisión binaria, donde la célula original se convierte en dos organismos nuevos. El tiempo requerido para cada división, conocido como tiempo de generación o de duplicación, puede variar desde menos de 20 minutos hasta varios días. Existen limitaciones ambientales que frenan la duplicación como disponibilidad del sustrato, concentración de nutrientes, o incluso, el tamaño del sistema.

De acuerdo con lo descrito por los autores existen dos maneras de expresar el crecimiento de los microorganismos: (a) en términos de número de microorganismos y (b) en términos de masa bacteriana (biomasa).

a. Crecimiento en términos de número de microorganismos

El patrón general de crecimiento de los microorganismos en un cultivo discontinuo se muestra en la Figura 2.2. inicialmente se inocula un número pequeño de organismos en un volumen fijo de medio de cultivo, y el número viable de organismos se registra como una función del tiempo. El patrón de crecimiento, basado en el número de células, tiene cuatro fases:

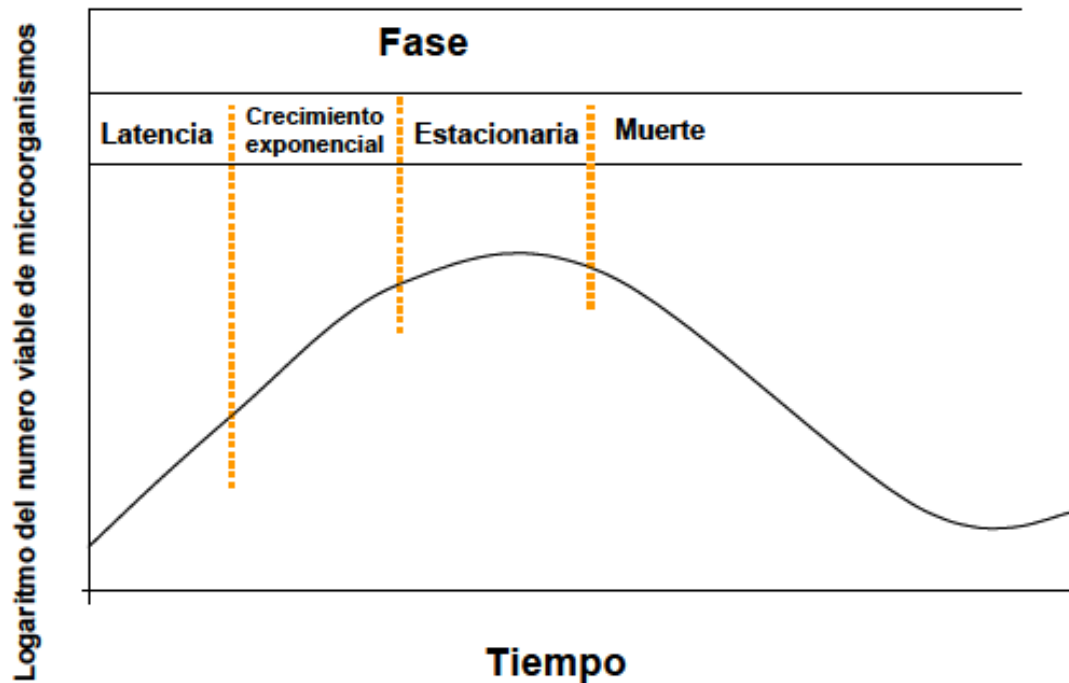


Figura 2.2. Curva característica de crecimiento en términos de número de microorganismos

- Fase de latencia: se inicia al agregar un inóculo a un medio de cultivo, y representa el tiempo que requieren los organismos para aclimatarse a su nuevo ambiente y empezar a dividirse.
- Fase exponencial: durante este periodo las células se dividen a cierta tasa determinada en función de su tiempo de generación y su habilidad para procesar el alimento.
- Fase estacionaria: aquí la población permanece estacionaria. Las causas que explican este fenómeno son: (a) las células agotaron el sustrato o los nutrientes necesarios para su crecimiento y (b) el crecimiento de células nuevas se compensa con el número de células muertas.
- Fase de muerte exponencial: durante esta fase, la tasa de mortalidad de los microorganismos excede la producción de células nuevas. La tasa de mortalidad generalmente es una función de la población inversa de la fase de crecimiento exponencial.

b. Crecimiento en términos de masa bacteriana (biomasa)

El patrón de crecimiento, en términos de masa de microorganismos se presenta en la Figura 2.3. y puede describirse así:

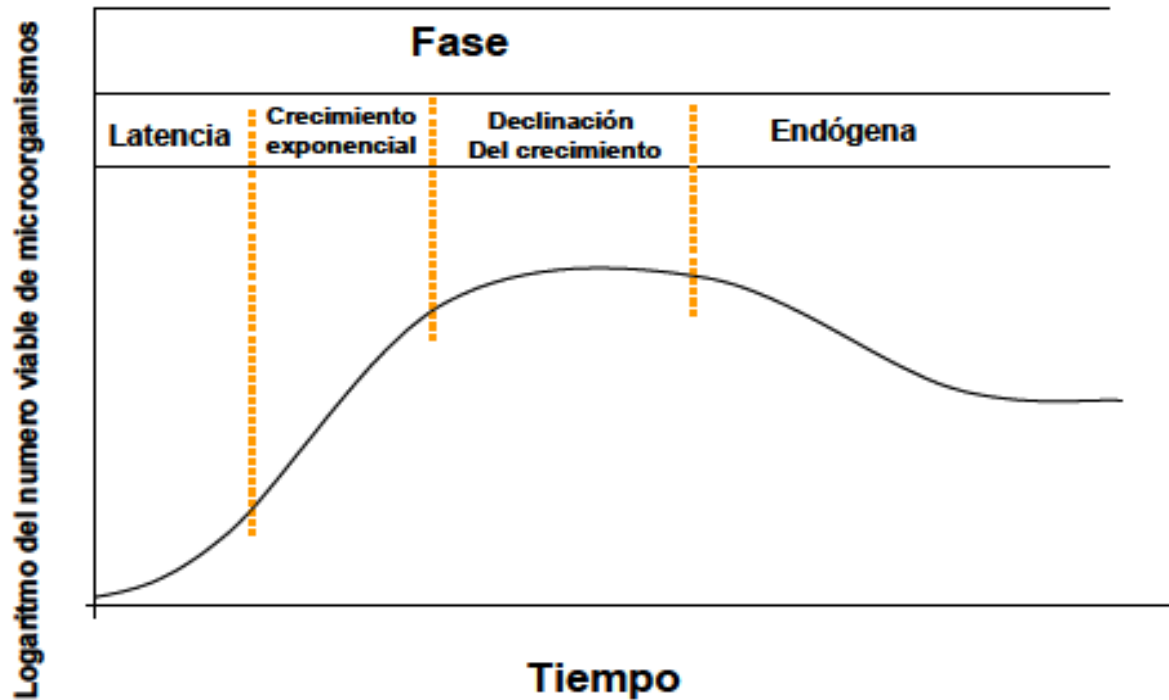


Figura 2.3. Curva característica de crecimiento en términos de biomasa

- Fase de latencia: de nuevo, las bacterias requieren de tiempo para aclimatarse a su ambiente nutricional. La fase de latencia en términos de masa bacteriana no es tan larga como su fase correspondiente en términos de números de microorganismos porque la masa empieza a incrementarse después de que tiene lugar la división celular.
- Fase de crecimiento exponencial: existe siempre un exceso en la cantidad de alimento que rodea a los microorganismos, y la velocidad del metabolismo y crecimiento es sólo una función de la habilidad del microorganismo para procesar el sustrato.
- Fase de declinación del crecimiento: la velocidad de incremento de la masa bacteriana disminuye debido a la limitación en el suministro de alimento.
- Fase endógena: los microorganismos son forzados a metabolizar su protoplasma sin que haya reemplazo, debido a que la concentración de alimento disponible se encuentra al mínimo. Durante esta fase puede ocurrir el fenómeno conocido como lisis, en el cual los nutrientes que quedan en las células muertas se difunden hacia el exterior para suministrar alimento a las células vivas restantes.

2.9.3. Relación sustrato/biomasa (S/X)

Comúnmente para los procesos de lodos activados se utiliza la relación alimento/microorganismos (F/M) o también conocida como sustrato/biomasa (S/X).

Kappeler & Gujer (1992) indican que S/X es una relación proporcional a DQO/SSV , dado que DQO representa una medida de la concentración del sustrato y SSV simula la concentración de la biomasa.

2.10. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es la concentración de oxígeno libre que se encuentra presente en el agua, dependiendo dicha concentración de la temperatura, presión, salinidad y otros parámetros (SEGOB, 1980).

La cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua (OD) depende significativamente de la temperatura. El agua más fría puede guardar más oxígeno que el agua caliente (Peña, 2007).

De acuerdo a lo anteriormente citado se optó por definir la temperatura de trabajo a 25°C ya que según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2018) es una condición normalizada para estudios del medio ambiente.

El oxígeno disuelto (OD) es un parámetro que puede indicar cuán contaminada está determinada agua, además es parte fundamental para observar cómo se están alimentando los microorganismos con respecto a la determinación de la velocidad de respiración.

2.11. Técnica respirométrica

Respirometría es la medida e interpretación de la velocidad de respiración del lodo activado. La tasa de respiración es la cantidad de oxígeno por unidad de volumen y tiempo en que es consumido por los microorganismos (Spanjers *et al.*, 1996). En conclusión se puede expresar la respirometría mediante la siguiente ecuación:

RESPIROMETRÍA = velocidad de respiración del lodo activado

$$RESPIROMETRÍA = \frac{O_2 \text{ consumen los micoorganismos}}{V * t}$$

La respirometría está directamente relacionada con dos procesos bioquímicos importantes que deben ser controlados en una planta de tratamiento de aguas residuales: el crecimiento de biomasa y consumo de sustrato.

Existe una fuerte relación entre la tasa de respiración y la concentración de oxígeno disuelto (OD) en lodo activado. Debido a que la concentración de OD se puede medir de manera

relativamente fácil y confiable, se ha usado con frecuencia en control del proceso de lodos activados (Spanjers *et al.*, 1996).

Los procesos de lodos activados son el sistema de tratamiento más aplicado debido a la eficiencia en la eliminación de material orgánico en comparación con otros procesos de tratamiento (Flores *et al.*, 2008) que en conjunto con la respirometría forman una técnica extensamente usada para la caracterización de aguas residuales; ambos métodos constituyen un procedimiento bien establecido para evaluar el estado de la actividad microbiana y para la calibración de modelos cinéticos microbianos (Marsili & Tabani, 2002).

La medición de OD en pruebas con lodos activados implica la determinación de velocidad a la que la biomasa absorbe el OD disuelto en el agua residual.

En teoría, todos los parámetros y componentes involucrados en las relaciones funcionales que están vinculadas directa o indirectamente con el balance de oxígeno, se pueden evaluar mediante la técnica de respirometría (Espinosa *et al.*, 2012).

2.12. Biodegradabilidad de las aguas residuales

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2015) define el término biodegradable como la sustancia o el compuesto químico que puede degradarse por acción biológica.

La purificación biológica puede ser aplicada efectivamente solo en aquellos casos en los que el agua residual contenga compuestos orgánicos biodegradables.

Los compuestos orgánicos solubles presentes en aguas residuales pueden ser clasificados en cuatro grandes grupos de acuerdo con su condición de degradación biológica y toxicidad:

- compuestos biológicamente degradables y no tóxicos (sacáridos, aminoácidos, ácidos grasos);
- compuestos biológicamente degradables, pero tóxicos a altas concentraciones (fenol, formaldehído);
- compuestos no degradables biológicamente y no tóxicos (ácido húmico, ácidos lignosulfónicos, colorantes azo); y
- compuestos no degradables biológicamente y tóxicos a bajas concentraciones (pesticidas, DDT).

Un agua residual en la que todos sus constituyentes son biodegradables no tóxicos o solamente tóxicos a altas concentraciones tiene una relación DBO_5/DQO en el intervalo de 0.55-0.70. Esta relación es un buen indicador de la posibilidad del tratamiento biológico de un agua residual dada. Mientras más baja es esta relación, mayor será la proporción de compuestos no degradables en el agua residual. Si la relación es 0.2 ó menor, se está en presencia de un agua residual constituida, fundamentalmente, por compuestos no degradables por medios biológicos, en este caso, la purificación biológica sola no es suficiente (Menéndez & Pérez, 2007).

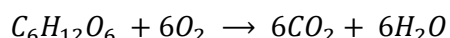
2.13. Indicadores de contaminación

La caracterización del agua residual y lodos activados (licor mixto) provenientes de la PTAR de Metepec es de gran importancia para el estudio de la biodegradabilidad ya que los resultados obtenidos son considerados como indicadores de que tan contaminado está el efluente y dan pauta para comprender su estado e incluso sus posibles tratamientos.

2.13.1. Demanda Teórica de Oxígeno (DTO)

La Demanda Teórica de Oxígeno (DTO) es la cuantificación estequiométrica del oxígeno requerido para oxidar completamente un determinado compuesto a partir de su fórmula química. DTO es la cantidad teórica de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de un desecho hasta dióxido de carbono y agua (Raffo & Ruiz, 2014).

Para una solución de 500 mg/L de lactosa, la ecuación de oxidación completa es:



El valor de DTO, se determina cuando 180 g de lactosa consumen 192 g de oxígeno (6 moles de O_2 por 36 g/mol del peso molecular de O_2); por lo tanto en una solución de 500 mg/L se tiene:

$$DTO \left(\frac{mg}{L} \right) = \left(\frac{192 g}{180 g} \right) \left(500 \frac{mg}{L} \right) = 533.33 \frac{mg}{L}$$

El valor de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) depende significativamente de la composición del agua, el mejor método para determinar la DQO es aquel que arroja valores iguales o cercanos a la DTO, actualmente este método es el estándar del dicromato y en este procedimiento se basa la NMX-AA-030-2-SCFI-2011.

El grado en el cual los resultados de prueba se aproximan al valor teórico depende principalmente de qué tan completa es la oxidación.

2.13.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Generalmente el nivel de contaminación de las aguas residuales no se mide a partir del conocimiento de la concentración de los distintos constituyentes de un agua residual que pueden ser considerados contaminantes, sino determinando parámetros globales como son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO).

Cualquier compuesto orgánico teóricamente puede ser oxidado hasta la obtención final de productos estables como H_2O , CO_2 , NH_3 y SO_4^{2-} . La cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación se denomina demanda teórica de oxígeno (DTO). La demanda química de oxígeno brinda una medida más real de la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación de los compuestos orgánicos a CO_2 y H_2O . Un método aceptable para determinar la DQO es aquel que arroja valores iguales o cercanos a la DTO. Actualmente el método estándar para esta determinación es el del dicromato.

Durante la prueba de la DQO se determinan tanto los compuestos degradables como los no degradables biológicamente. También se incluyen aquellos compuestos inorgánicos reductores que pueden ser oxidados por el dicromato en medio ácido, como es el caso común del anión cloruro (Menéndez & Pérez, 2007).

2.13.3. Contenido de sólidos

El conocimiento del contenido de sólidos totales de un agua residual aporta valiosa información sobre sus características, lo cual permite conocer de forma general su naturaleza y si requieren de algún tratamiento en particular que facilite su remoción y posterior degradación en medida de lo posible (Menéndez & Pérez, 2007).

2.14. Reactor batch

El tratamiento aeróbico de las aguas residuales mediante lodo activado es un proceso común, pero las características de muchas descargas industriales a menudo causan problemas operacionales en los sistemas de flujo continuo. Por lo tanto, se pueden considerar los procesos discontinuos como la secuenciación de reactores discontinuos (SBR) porque, en términos de inversión, costos de operación, estabilidad del proceso y confiabilidad de la operación, podrían ser mejores que los procesos de lodos activados continuos convencionales. Los beneficios de los SBR se han demostrado para la eliminación de

nutrientes, el control de bacterias filamentosas y la eliminación de compuestos orgánicos específicos presentes en las aguas residuales industriales (Buitrón *et al.*, 2008).

Además para la determinación de los parámetros cinéticos es más conveniente realizarlo mediante la medición de la velocidad de respiración de los lodos activados por pruebas en lotes.

2.15. Principio de medición de la cinética de respiración del lodo activado

Balance molar en un reactor tipo batch:

$$\text{entradas} - \text{salidas} + \text{generación} = \text{acumulación} \quad (2.1)$$

De acuerdo con Spanjers *et al.*, (1996) los principios basados en la medición de la concentración de OD en la fase líquida lleva al siguiente balance de masa de OD:

$$Q_{in}C_{L,in} - Q_{out}C_L + V_L K_L a_L (C_L^o - C_L) - V_L r = \frac{d}{dt}(V_L C_L) \quad (2.2)$$

Donde:

C_L = concentración del OD en la fase líquida

C_L^o = concentración de saturación del OD

$C_{L,in}$ = concentración del OD en la fase líquida que ingresa al sistema

$K_L a_L$ = coeficiente de transferencia de masa de oxígeno (basado en el volumen del líquido)

Q_{in} = velocidad de flujo del líquido que ingresa al sistema

Q_{out} = velocidad de flujo del líquido que sale del sistema

r = tasa de respiración de la biomasa en el líquido

V_L = volumen de la fase líquida

Tratandose de un reactor batch no hay entradas ni salidas, entonces la ecuación 2.1 queda de la siguiente manera:

$$\text{generación} = \text{acumulación} \quad (2.3)$$

Aplicando este balance a la ecuación de Spanjers *et al.*, (1996), queda:

$$V_L K_L a_L (C_L^o - C_L) - V_L r = \frac{d}{dt}(V_L C_L) \quad (2.4)$$

Como es fase líquida el V_L se puede considerar constante y la ecuación anterior se reduce a:

$$\begin{aligned} K_L a_L (C_L^o - C_L) - r &= \frac{dC_L}{dt} \\ -\frac{dC_L}{dt} &= r - K_L a_L (C_L^o - C_L) \end{aligned} \quad (2.5)$$

De acuerdo a Standard Methods (American Public Health Association, 1999) la ecuación 2.5 se puede simplificar de la siguiente manera:

$$-\frac{dC_L}{dt} = r \quad (2.6)$$

Resolviendo la ecuación anterior mediante el método integral:

$$\begin{aligned} - \int_{C_{L0}}^{C_L} dC_L &= r \int_0^t dt \\ -[C_L - C_{L0}] &= r * t \\ C_{L0} - C_L &= r * t \end{aligned} \quad (2.7)$$

Por lo tanto la ecuación 2.7 es la cinética para determinar la velocidad de consumo de oxígeno (r_{O_2}) o velocidad de respiración de la biomasa (r).

Linealizando la ecuación 2.7, se tiene una ecuación de la recta con ordenada al origen en cero:

$$\begin{aligned} y &= m * x \\ C_{L0} - C_L &= r_{O_2} * t \end{aligned}$$

Siendo:

$$\begin{aligned} y &= C_{L0} - C_L (mg/L) \\ m &= r_{O_2} (mg/L * min) \\ x &= t (minutos) \end{aligned}$$

De acuerdo con lo establecido, el consumo de oxígeno se determinó a través de la pendiente del tramo descendente de la curva de concentración de O_2 en función del tiempo.

2.16. Principio de medición de la cinética del crecimiento de biomasa

Las ecuaciones para determinar la cinética de crecimiento están basadas en las ecuaciones desarrolladas por Kappeler & Gujer que usaron en su respectiva investigación (1992).

Para el presente estudio, el crecimiento de microorganismos se encuentra expresado en términos de producción de biomasa, los resultados obtenidos siguen el patrón de la denominada curva de crecimiento que comprende cuatro fases: fase de latencia o de adaptación, fase de crecimiento exponencial o logarítmico, fase estacionaria y fase de muerte. La Figura 2.3. describe gráficamente este comportamiento. Para cada una de estas fases existe una ecuación que representa su comportamiento.

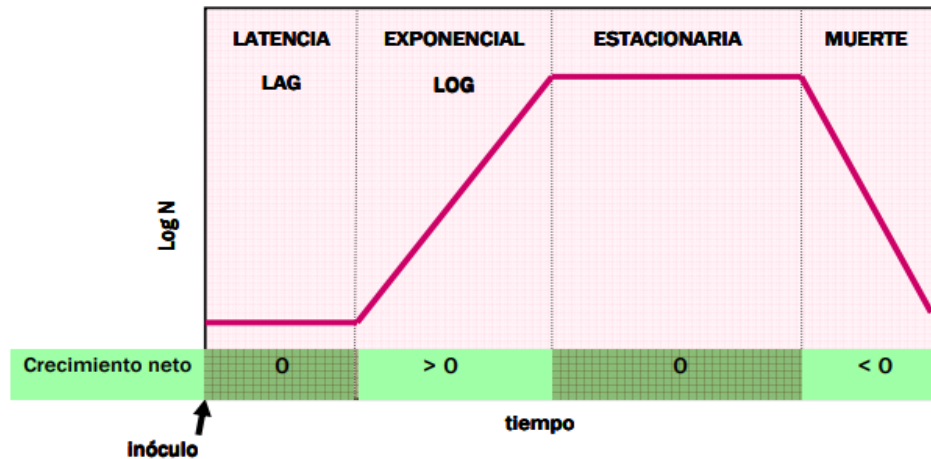


Figura 2.3. Curva de crecimiento microbiano

Fase de latencia y fase de crecimiento exponencial: de acuerdo al principio de la metabolización de los microorganismos presentes en los lodos activados, cuando la biomasa se pone en contacto con el sustrato en el biorreactor en presencia de aire, los microorganismos se dividen a cierta velocidad, definida en función de su tiempo de generación (t_g) y su habilidad para procesar el alimento. La ecuación que define este compartamiento es la “ecuación cinética general de crecimiento”:

$$\frac{dX_H}{dt} = \mu_H * X_H \quad (2.8)$$

Donde:

X_H = concentración de la biomasa heterotrófica

t = tiempo de generación

μ_H = tasa constante de crecimiento heterotrófico

Menéndez & Pérez (2007) dicen que a partir de la ecuación 2.8 puede determinarse que μ_H solo depende del tiempo de generación de microorganismos. Sin embargo, esta conclusión es válida solamente para altas concentraciones de sustrato. Deducen que para bajas concentraciones de sustrato, se hace dependiente del mismo de acuerdo con la bien conocida ecuación de Jacques Monod:

$$\mu_H = \mu_{Hm\acute{a}x} \frac{S}{K_S + S} \quad (2.9)$$

Donde:

$\mu_{Hm\acute{a}x}$ = tasa máxima de crecimiento heterotrófico

S = concentración del sustrato limitante

K_S = constante de saturación

Sustituyendo la ecuación 2.9 en 2.8, se obtiene:

$$\frac{dX_H}{dt} = \left(\mu_{Hm\acute{a}x} \frac{S}{K_S + S} \right) X_H \quad (2.10)$$

De la ecuaci3n anterior se puede deducir que la velocidad crecimiento de los microorganismos est1 en funci3n de su propia concentraci3n, del tiempo y de la concentraci3n del sustrato. Sin embargo, Men3ndez & P3rez (2007) especifican que cuando el sustrato se encuentra en condiciones lo suficientemente altas como para que su variaci3n no afecte la velocidad de crecimiento, la ecuaci3n anterior se transforma a:

$$\frac{dX_H}{dt} = \mu_{Hm\acute{a}x} * X_H \quad (2.11)$$

Por lo tanto, la ecuaci3n anterior indica que la velocidad de crecimiento de la biomasa en un instante dado es solo funci3n de la concentraci3n de microorganismos multiplicado por la tasa m1xima de crecimiento heterotr3fico.

Resolviendo la ecuaci3n 2.11 por el m3todo integral queda de la siguiente manera:

$$\int_{X_{H0}}^{X_H} \frac{dX_H}{X_H} = \mu_{Hm\acute{a}x} \int_0^t dt$$

$$\ln X_H \Big|_{X_{H0}}^{X_H} = \mu_{Hm\acute{a}x} * t$$

$$\ln X_H - \ln X_{H0} = \mu_{Hm\acute{a}x} * t$$

$$\ln X_H = \mu_{Hm\acute{a}x} * t + \ln X_{H0}$$

$$X_H = X_{H0} e^{\mu_{Hm\acute{a}x} * t} \quad (2.12)$$

La ecuaci3n anterior es la cin3tica que respresenta la fase de crecimiento de la biomasa. Para poder calcular la concentraci3n de la biomasa (X_H) en el tiempo t , es necesario conocer otros par1metros, tales son: $\mu_{Hm\acute{a}x}$ y X_{H0} . El c1lculo de estos parameros se realiza mediante las siguientes ecuaciones:

$$\mu_{Hm\acute{a}x} \approx 1.05 (\mu_{Hm\acute{a}x} - b'_H) \quad (2.13)$$

$$X_{H0} = \frac{r_{O2}(t0)}{\left(\frac{1-Y_H}{Y_H} \right) \mu_{Hm\acute{a}x} - (1-f_p) b'_H} \quad (2.14)$$

Donde:

X_{H0} = concentración de la biomasa heterotrófica en el agua residual

b'_H = coeficiente de respiración endógena¹

Y_H = fracción de biomasa que se transforma en productos inertes igual a 0.67

f_p = coeficiente de rendimiento heterotrófico igual a 0.08

El cálculo de $\mu_{Hmáx}$ y X_{H0} requiere el conocimiento de $r_{O2}(t_0)$ y $\mu_{Hmáx} - b'_H$ y para conocer el valor de estos se hace uso de la “*velocidad de respiración del lodo activado (r_{O2})*”

El crecimiento de r_{O2} sigue una tendencia exponencial ($y = a * e^{b*t}$) hasta el punto en que se agota el sustrato, momento donde se da una caída repentina de la respiración. Las constantes a y b proporcionan respectivamente los valores de: r_{O2} en el tiempo cero y la diferencia $\mu_{Hmáx} - b'_H$.

$$y = a * e^{bt}$$
$$r_{O2}(t) = r_{O2}(t_0) * e^{(\mu_{Hmáx} - b'_H)t} \quad 2.15$$

Conociendo el valor de estas constantes (a y b) obtenidas mediante el método gráfico e implementando las ecuaciones descritas por Kappeler & Gujer (1992), finalmente se puede calcular el valor para $\mu_{Hmáx}$ y X_{H0} .

Fase estacionaria: la descripción matemática del comportamiento de los microorganismo es la siguiente:

$$\frac{dX_H}{dt} = 0 \quad (2.16)$$

La ecuación 2.15 expresa que no hay crecimiento de los microorganismos en un instante determinado y esto se debe a que los microorganismos agotaron el sustrato necesario para su crecimiento.

Fase de muerte exponencial: durante esta fase la tasa de microorganismos muertos excede la producción de nuevos microorganismos, la siguiente ecuación representa este comportamiento:

$$\frac{dX_H}{dt} = -K * X_H$$
$$\int_{X_{H0}}^{X_H} \frac{dX_H}{X_H} = -K \int_0^t dt$$

¹ $b'_H = 0.21 \text{ día}^{-1}$. Valor tomado de Vázquez Mejía *et al.*, 2013.

$$\ln X_H |_{X_{H0}}^{X_H} = -K * t$$

$$\ln X_H - \ln X_{H0} = -K * t$$

$$\ln X_H = -K * t + \ln X_{H0}$$

$$X_H = X_{H0} e^{-K*t} \quad (2.17)$$

Siendo K la constante de velocidad de muerte específica, se obtiene de la siguiente deducción:

$$K = \frac{\ln 2}{t_g}$$

$$t_g = \frac{\ln 2}{\mu_{m\acute{a}x}}$$

Por lo tanto:

$$K = \mu_{m\acute{a}x}$$

3. MÉTODO

De acuerdo al esquema de la Figura 3.1. las pruebas experimentales para el Estudio de la Biodegradabilidad de Aguas Residuales Municipales Mediante Respirometría en un Reactor Batch a 25°C , se llevaron a cabo en dos etapas:

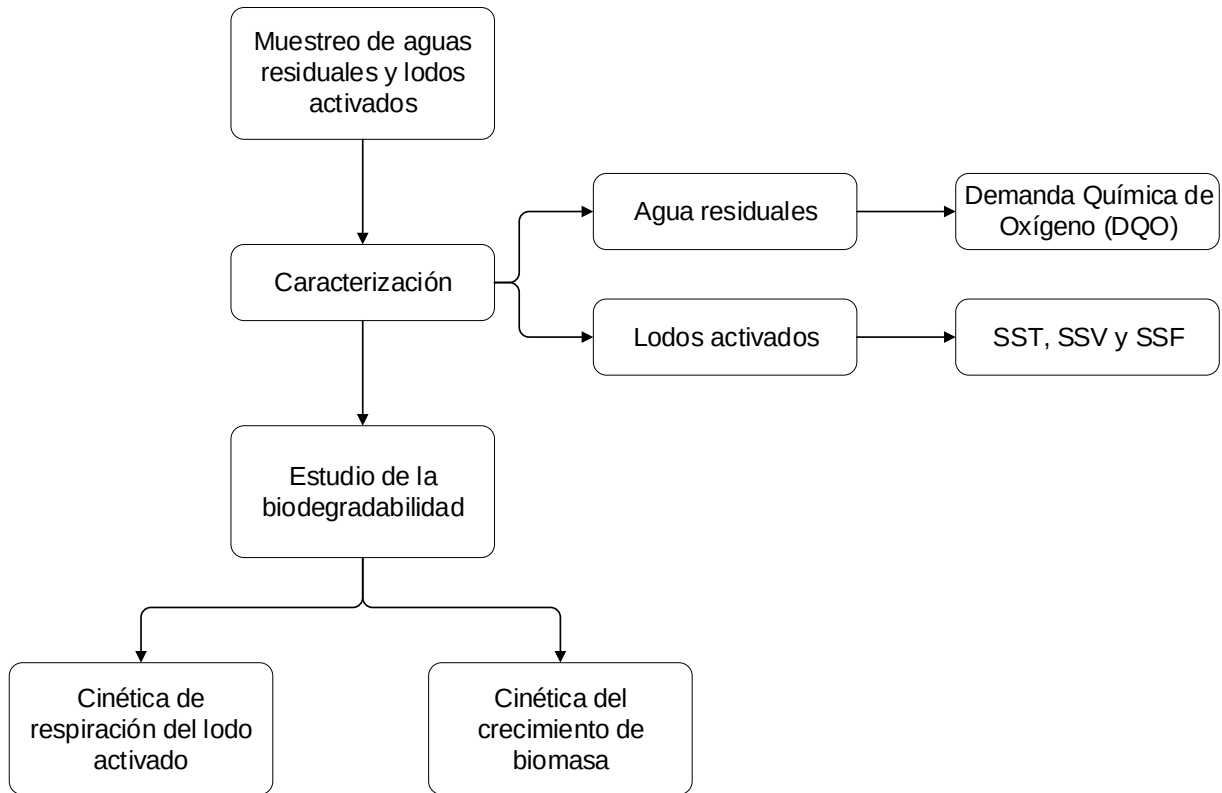


Figura 3.1. Esquema del método

En la primera etapa se realizó el muestreo y las pruebas de caracterización de aguas residuales y lodos activados de la PTAR de Metepec.

Las pruebas de caracterización se basaron en la metodología establecida en las siguientes Normas Mexicanas:

- a. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), mediante la NMX-AA-030-2-SCFI-2011.
- b. Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) y Sólidos Suspendidos Fijos (SSF); mediante la NMX-AA-034-SCFI-2015.

La realización de la segunda etapa es el estudio de la biodegradabilidad de las aguas residuales mediante la determinación de dos cinéticas fundamentales:

1. Cinética de respiración del lodo activado; y
2. Cinética de crecimiento de biomasa

El equipo utilizado estuvo formado por tres biorreactores isotérmicos tipo batch a escala laboratorio que cumplieron la función de respirómetros, cada biorreactor estaba integrado con los siguientes materiales:

- vaso de precipitado de 1 L enchaquetado con un serpentín (manguera);
- equipo 2095 bath & circulator de la marca Forma Scientific para recircular agua dentro del serpentín a 25°C;
- equipo parrilla múltiple de agitación LAB-LINE® MULTI-MAGNESTIR No. 1278 de la marca LAB-LINE INSTRUMENTS, Inc;
- aireador (constituido por una bomba y difusor de aire); y
- medidores de oxígeno disuelto, se usó el equipo HACH sensION 156.

Las pruebas experimentales para determinar las dos cinéticas se realizaron con dos tipos de sustrato:

- a. agua residual; y
- b. acetato de sodio.

La metodología a implementar para la presente etapa se basó en pruebas experimentales desarrolladas por otros investigadores.

Antes de iniciar las corridas de prueba fue necesario preparar cada uno de los reactores de acuerdo con las condiciones de trabajo establecidas: (a) temperatura constante de 25°C, (b) agitación constante de 120 rpm y (c) relación óptima sustrato/biomasa (S/X) de 6/1. Estas condiciones de trabajo fueron establecidas para las pruebas y obtención de las dos cinéticas de estudio.

A continuación se describe como se desarrollaron cada una de las técnicas para la determinación de las cinéticas.

3.1. Cinética de respiración del lodo activado

Se realizaron tres corridas a las condiciones mencionadas anteriormente, siguiendo la metodología de Espinosa *et al.*, (2012) y la determinación de la velocidad de consumo de oxígeno se basó en las ecuaciones del *principio de medición de la concentración de OD en la fase líquida* desarrolladas por Spanjers *et al.*, (1996), ecuaciones descritas en el apartado de fundamentos.

3.1.1. Desarrollo de la técnica

La operación de los respirómetros, para la determinación de esta cinética, se llevó a cabo siguiendo los puntos mencionados a continuación:

- a. Se adicionó a cada reactor lodo activado y sustrato (prueba con siembra), teniendo en cuenta la relación S/X:6/1;
- b. Se homogeneizó con agitación constante hasta alcanzar la temperatura deseada;
- c. El sensor de oxígeno, limpio y calibrado, se colocó dentro del biorreactor para determinar continuamente la concentración de OD durante toda la prueba;
- d. El aireador una vez limpio, se colocó dentro del biorreactor para comenzar a suministrar aire a los microorganismos presentes en el lodo activado;
- e. Se midió la concentración de OD antes de comenzar a airear, valor para $t=0$;
- f. Se aireó el contenido del biorreactor hasta obtener una concentración máxima de OD igual a 4 mg/L, una vez alcanzada esta concentración se procedió a cortar la aireación permitiendo la disminución (consumo) de OD hasta 3 mg/L, al llegar a esta concentración mínima establecida se reinició el proceso de aireación;
- g. El consumo de oxígeno se determinó a través de la pendiente del tramo descendente donde se cortó la aireación; y
- h. Estos ciclos de aireación consumo de oxígeno se repitieron durante aproximadamente una hora, para obtener los respirogramas completos $r_{O_2}: f(t)$, velocidad de consumo de oxígeno ($r_{O_2} [=]$ mg/L*minutos) en función del tiempo ($t [=]$ minutos).

3.2. Cinética del crecimiento de biomasa

Los datos obtenidos de las tres pruebas experimentales a las condiciones experimentales mencionadas anteriormente, para la determinación de esta cinética son de gran importancia ya que con ellos se calculan otros parámetros fundamentales para el estudio de la biodegradabilidad de las aguas residuales. Estos parámetros, adicionales a la cinética del

crecimiento de la biomasa, son: (a) tasa máxima de crecimiento heterotrófico ($\mu_{Hm\acute{a}x}$) y (b) concentración inicial de la biomasa heterotrófica en el agua residual (X_{H0}).

3.2.1. Desarrollo de la técnica

Para la obtención de esta cinética los respirómetros se operaron de la siguiente manera:

- a. Se adicionó a cada reactor lodo activado y la mezcla de dos tipos de sustratos: (a) agua residual y (b) acetato de sodio, la adición de los sustratos se realizó teniendo en cuenta la relación S/X:6/1; entonces la cantidad de cada sustrato que se agregó fue en una relación 3:3=1:1;
- b. Se homogeneizó con agitación constante hasta alcanzar la temperatura deseada;
- c. El sensor de oxígeno, limpio y calibrado, se colocó dentro del biorreactor para determinar continuamente la concentración de OD durante toda la prueba;
- d. El aireador una vez limpio, se colocó dentro del biorreactor para comenzar a suministrar aire a los microorganismos presentes en el lodo activado;
- e. Se midió la concentración de OD antes de comenzar a airear y es el valor para $t=0$;
- f. Se comenzó a suministrar aire a cada uno de los reactores hasta alcanzar una concentración constante de consumo de oxígeno máximo;
- g. Durante la prueba la aireación nunca fue interrumpida; y
- h. El tiempo de la prueba depende del crecimiento de los microorganismos, del sustrato, de la calidad del lodo activado y del agua residual, por lo tanto no se puede establecer un tiempo determinado de duración de la prueba para la determinación de esta cinética.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización de lodos activados y aguas residuales

La primera etapa de las pruebas experimentales constó de la caracterización de aguas residuales y lodos activados de la PTAR de Metepec. Los resultados de los parámetros determinados se muestran a continuación.

4.1.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos (SS)

Los resultados obtenidos de la caracterización son parámetros que indican la contaminación del efluente y ayudará a comprender el estado en el que se encuentran los lodos activados y agua residual. En la Tabla 4.1. y Tabla 4.2. se muestran los datos calculados de la caracterización, la hora de la toma de muestra fue aproximadamente a las 10:00 a.m. del mes de mayo. El influente del tanque de aireación y lodos activados (licor mixto) se extrajeron de la entrada y salida del primer tanque de aireación (biorreactor), respectivamente.

Tabla 4.1. Resultados de caracterización del influente

DTO (mg/L)	DQO (mg/L)
533.33	517.86

De acuerdo a los resultados obtenidos de DQO se deduce que la oxidación de la materia orgánica e inorgánica, presente en el agua residual de estudio, se lleva a cabo al 97%.

Tabla 4.2. Resultados de caracterización del licor mixto

SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)
182.67	86.67	96.00

El control y conocimiento de los sólidos es de vital importancia ya que afecta directamente el desempeño de la planta, la capacidad del proceso e incluso el costo total de operación. La finalidad de medir los sólidos suspendidos es tener un control en la cuantificación de la biomasa, siendo esta, el parámetro de control más importante en los procesos de lodos activados. Por otra parte, conocer la cantidad de sólidos suspendidos presentes en el agua residual brinda una idea sobre la eficiencia en la remoción de la materia orgánica.

4.1.2. Optimización de la relación sustrato/biomasa:S/X

Conforme a lo establecido por Kappeler & Gujer (1992) sobre este parámetro, la relación óptima de S/X para las pruebas realizadas en este estudio fue:

$$\frac{S}{X} = \frac{DQO}{SSVLM} = \frac{517.8571 \text{ mg/L}}{86.6667 \text{ mg/L}}$$
$$\frac{S}{X} \approx \frac{6}{1}$$

Por lo tanto la relación óptima es de 6:1 para el agua residual y lodos activados de la PTAR de Metepec, respectivamente.

4.2. Estudio de la biodegradabilidad

En el apartado de Anexos se encuentran los datos obtenidos de cada prueba experimental para la determinación de las tres cinéticas. A partir de estos datos se realizaron las gráficas mostradas a continuación.

4.2.1. Cinética de respiración del lodo activado

La determinación de la cinética de respiración del lodo activado se obtuvo sustituyendo en la ecuación 2.7 los datos adquiridos de la medición de OD a lo largo de cada corrida. De acuerdo a esta ecuación los datos representan una línea recta y el valor de la pendiente es el resultado de la velocidad de respiración del lodo activado. A continuación se presentan los resultados para esta cinética, obtenidos de cada prueba usando el sustrato establecido.

a) Empleando agua residual como sustrato

En la Figura 4.1 se observa que en un lapso de una hora se repitieron cuatro ciclos de aireación, la curva de decaimiento representa un ciclo de aireación.

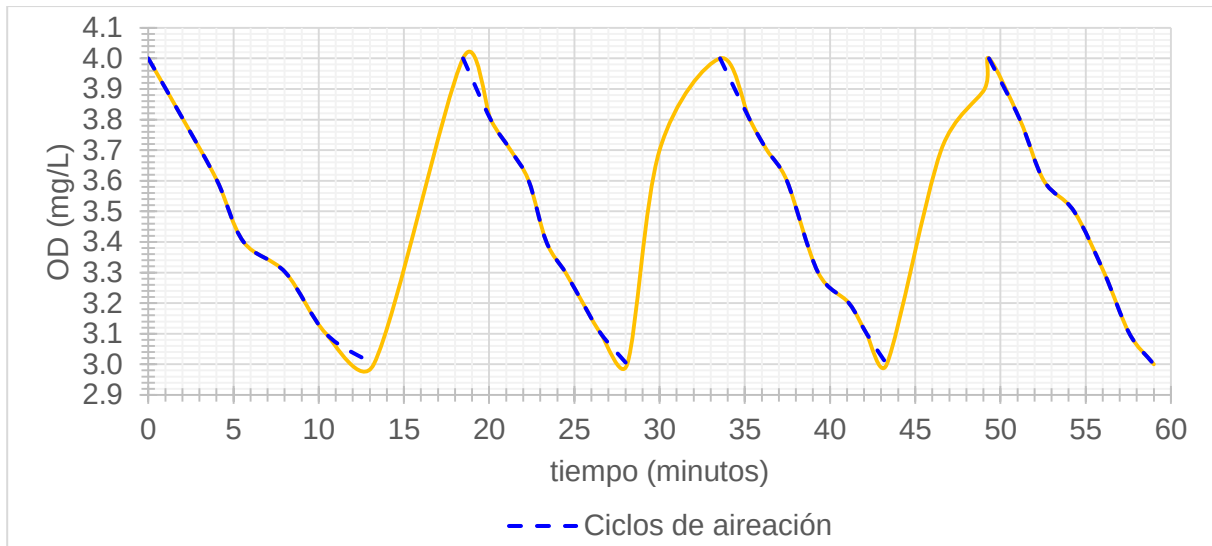


Figura 4.1. Ciclos de aireación del lodo activado con agua residual

Los datos obtenidos de la medición de la concentración de OD fueron sustituidos en la ecuación 2.7 y después se linealizaron para encontrar el valor de la pendiente mediante el método gráfico que proporciona el valor para r_{O_2} , en la Figura 4.2 se muestran los resultados de las cinéticas de respiración del lodo activado.

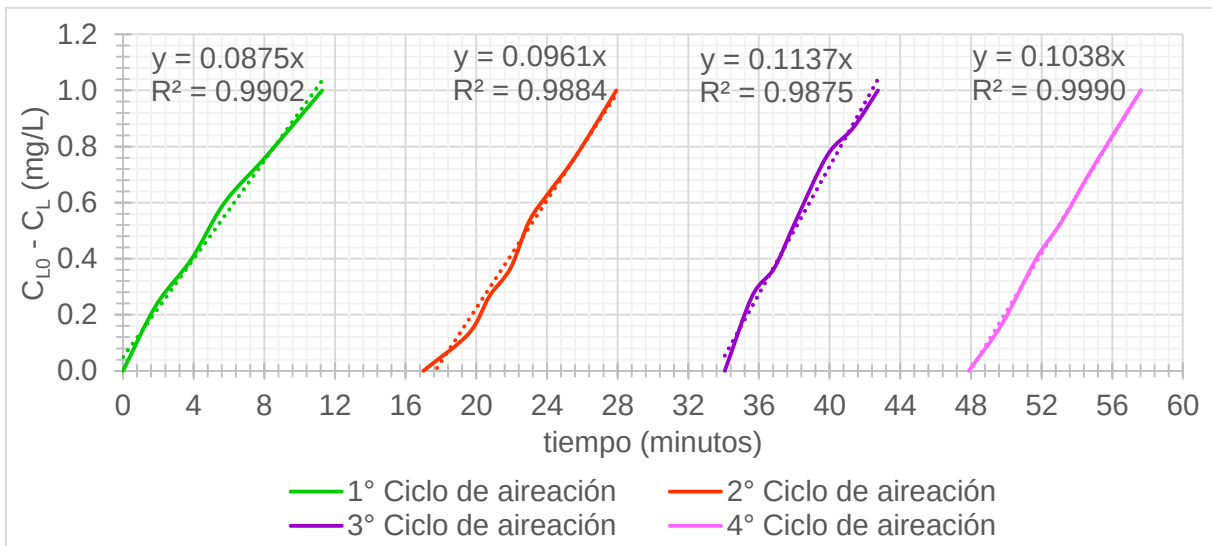


Figura 4.2. Cinéticas de respiración del lodo activado con agua residual

Promediando los valores calculados de r_{O_2} (pendientes de las rectas) se obtuvo un resultado final igual a 0.1003 mg/L*min de oxígeno consumido por los microorganismos.

b) Empleando acetato de sodio a 0.1M como sustrato

Para este caso se observó que en un lapso de aproximadamente 40 minutos se repitieron tres ciclos de aireación en cada reactor. En la Figura 4.3 se observan los ciclos obtenidos en esta corrida.

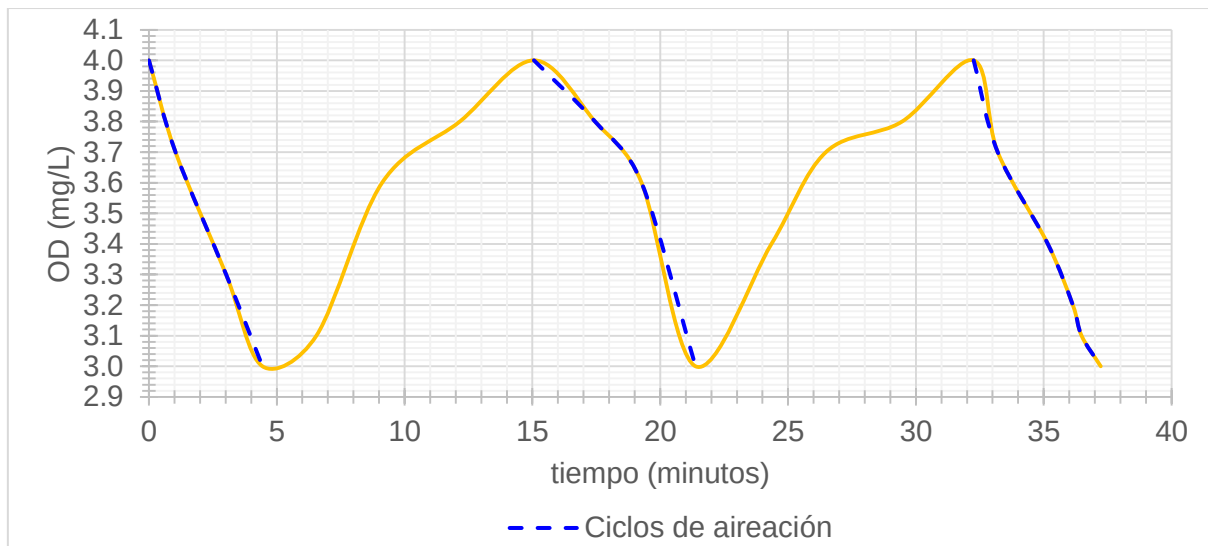


Figura 4.3. Ciclos de aireación del lodo activado con acetato de sodio a 0.1M

Los resultados de las cinéticas de respiración del lodo activado calculadas de los tres ciclos de respiración se muestran en la Figura 4.4 siendo la pendiente el valor para r_{O_2} .

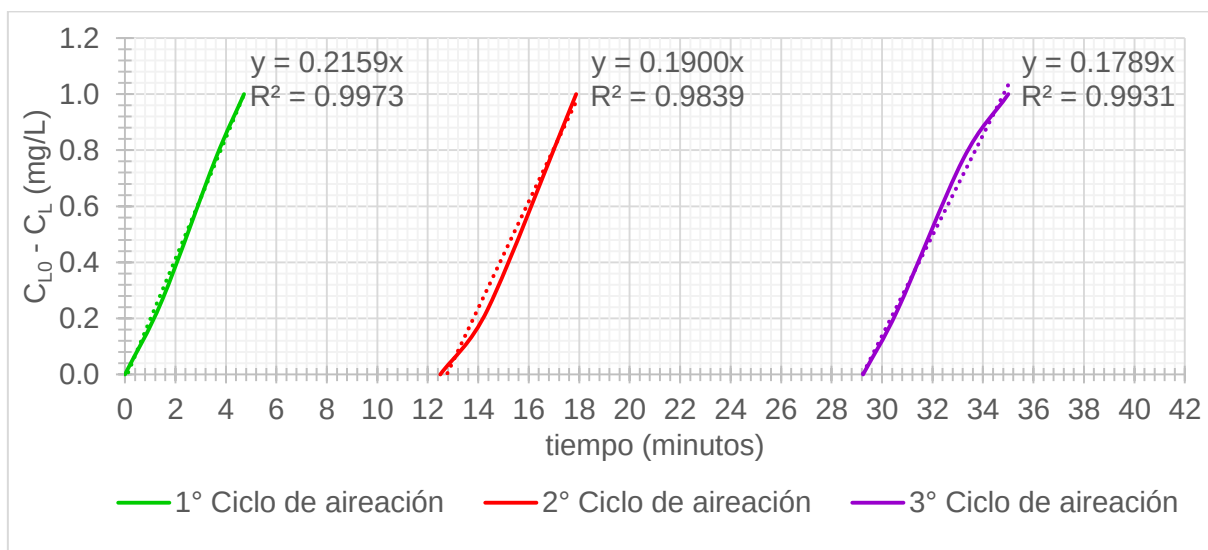


Figura 4.4. Cinéticas de respiración del lodo activado con acetato de sodio a 0.1M

El promedio de los valores de las tres pendientes, mostrados en la figura anterior proporciona que r_{O_2} es igual a 0.1952 mg/L*min de oxígeno consumido por los microorganismos.

c) Empleando acetato de sodio a 0.259M como sustrato

El tiempo de duración de esta prueba fue aproximadamente de 40 minutos, similar al caso anterior, sin embargo en este periodo se llevaron a cabo cinco ciclos de aireación. En la Figura 4.5 se puede observar los ciclos usando acetato de sodio a 0.259M como sustrato.

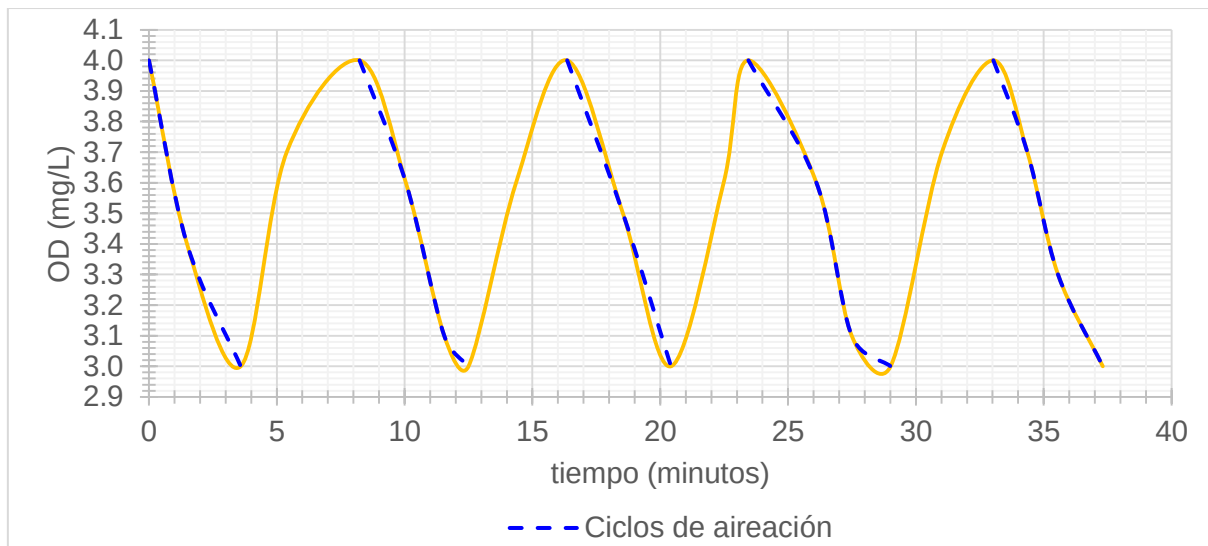


Figura 4.5. Ciclos de aireación del lodo activado con acetato de sodio a 0.259M

En la siguiente Figura 4.6 se muestran los resultados obtenidos de las cinéticas de respiración del lodo activado.

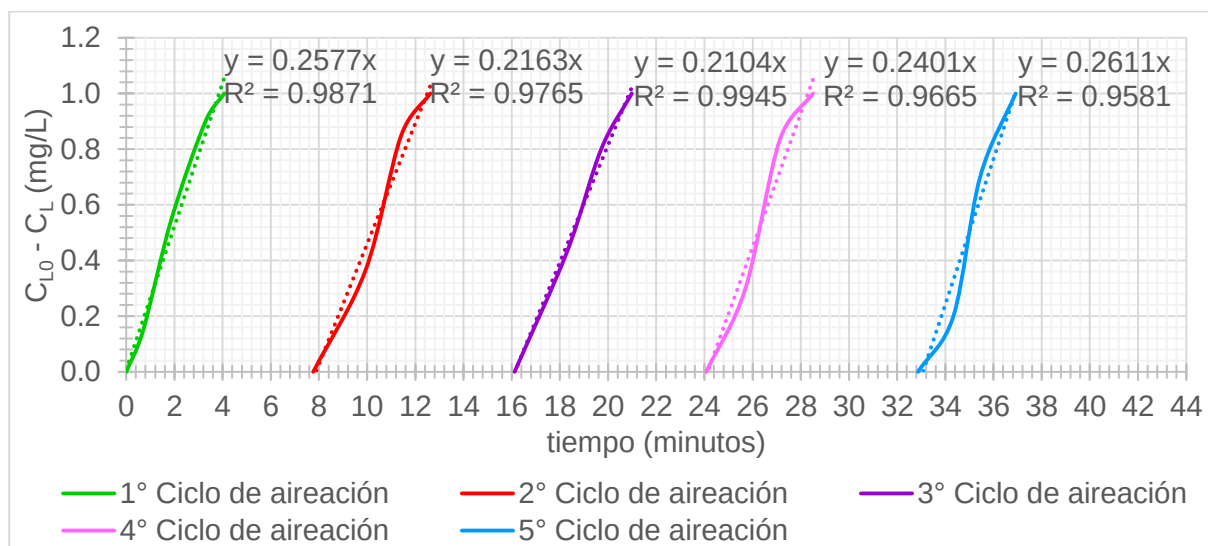


Figura 4.6. Cinéticas de respiración del lodo activado con acetato de sodio a 0.259M

Se observa que en presencia de acetato de sodio a 0.259M, r_{O_2} es igual a 0.2371 mg/L*min de oxígeno consumido por los microorganismos; dato obtenido del promedio de las pendientes de las rectas.

d) Empleando acetato de sodio a 0.3M como sustrato

La duración de la prueba para la determinación de este parámetro fue de aproximadamente 40 minutos; tiempo en el cual se observaron cuatro ciclos de aireación, en la Figura 4.7 se observan los ciclos de trabajo.

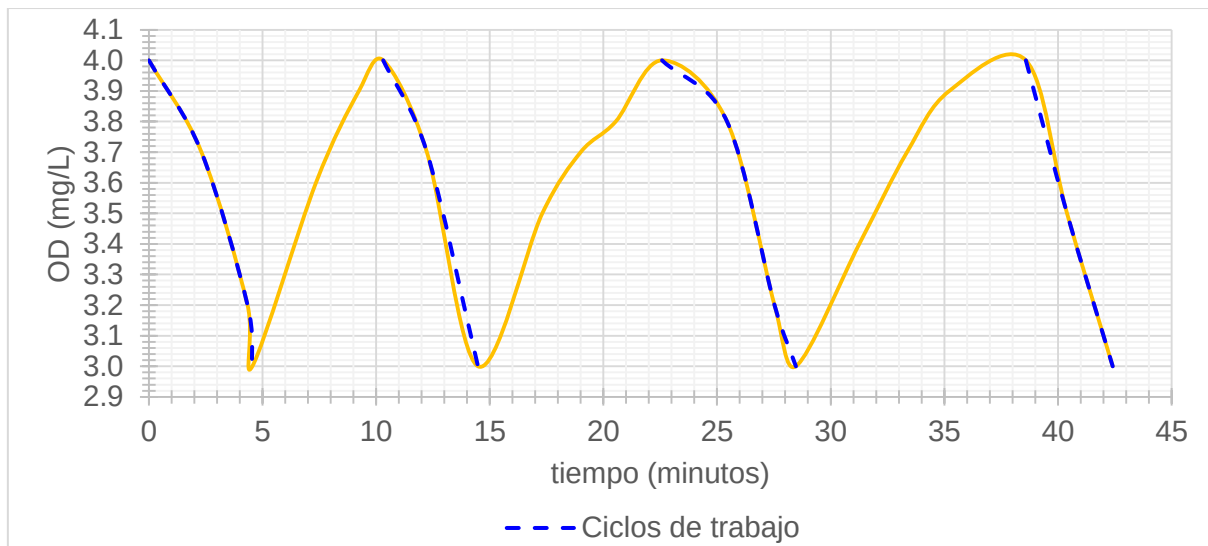


Figura 4.7. Ciclos de aireación del lodo activado con acetato de sodio a 0.3M

Los resultados obtenidos de la cinética de r_{O_2} se muestran en la siguiente Figura 4.8, siendo la pendiente el valor para la cinética.

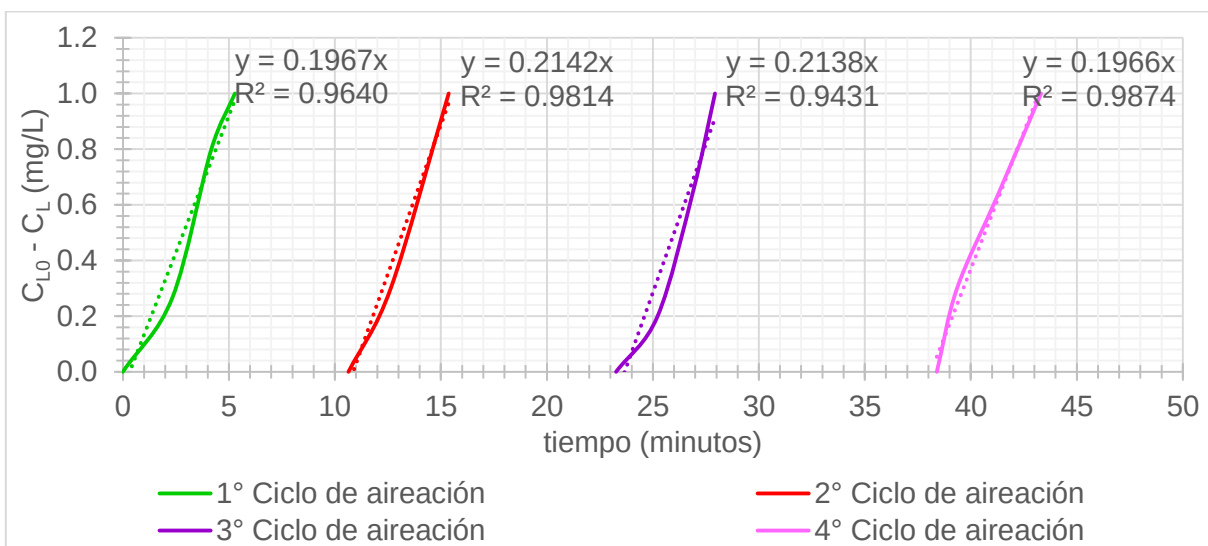


Figura 4.8. Cinéticas de respiración del lodo activado con acetato de sodio a 0.3M

De acuerdo a las pruebas realizadas, la velocidad de respiración del lodo en presencia de acetato de sodio a 0.3M es de 0.2053 mg/L*min

4.2.2. Cinética del crecimiento de biomasa

De acuerdo con el principio de medición establecido para la determinación de esta cinética, primero se debe calcular el valor para $\mu_{Hm\acute{a}x}$ y X_{H0} ; en la metodología se explicó cómo se determinan cada uno de estos parámetros. En el apartado de Anexos se encuentran los datos utilizados para obtener $\mu_{Hm\acute{a}x}$ y X_{H0} , donde el crecimiento de r_{O2} tiende a ser exponencial, dicho crecimiento lo representa la ecuación:

$$y = a * e^{b*t}$$

Hasta el punto en que se agota el sustrato, donde se da una caída repentina de la respiración. Las constantes a y b proporcionan respectivamente los valores de: r_{O2} en el tiempo cero y la diferencia $\mu_{Hm\acute{a}x} - b'_H$, quedando:

$$r_{O2} = r_{O2}(t_0) * e^{(\mu_{Hm\acute{a}x} - b'_H)*t}$$

A continuación se representan en las figuras siguientes las corridas para determinar el crecimiento de los microorganismos, así mismo se observan los valores obtenidos para las constantes de la ecuación de crecimiento exponencial.

a) Empleando agua residual como sustrato

Sustituyendo las constantes $a = 58.52$ y $b = 47.401$ obtenidas del método gráfico, mostrado en la Figura 4.9.; en las ecuaciones 2.13 y 2.14 se obtuvieron los siguientes valores:

$$\mu_{Hm\acute{a}x} = 49.771 \text{ d}^{-1}$$

$$X_{H0} = 2.406 \text{ mg/L}$$

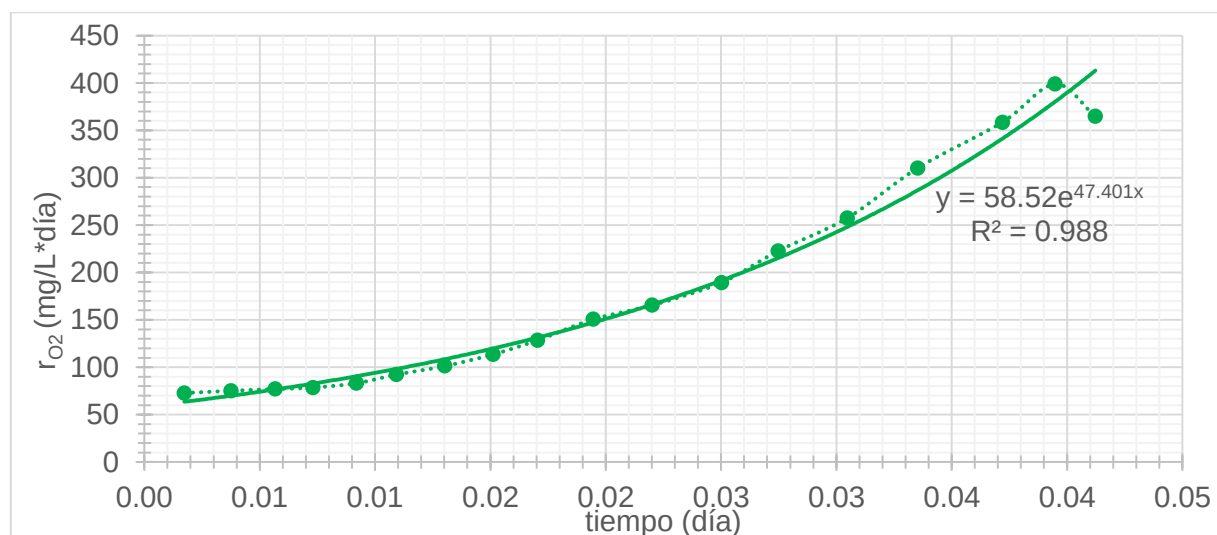


Figura 4.9. Respirograma para la obtención de $\mu_{Hm\acute{a}x}$ y X_{H0} usando agua residual

Para la obtención de “cinética de crecimiento de biomasa” se sustituyeron los valores de las constantes anteriores, en las ecuaciones 2.12, 2.16 y 2.17; obteniendo la Figura 4.10.

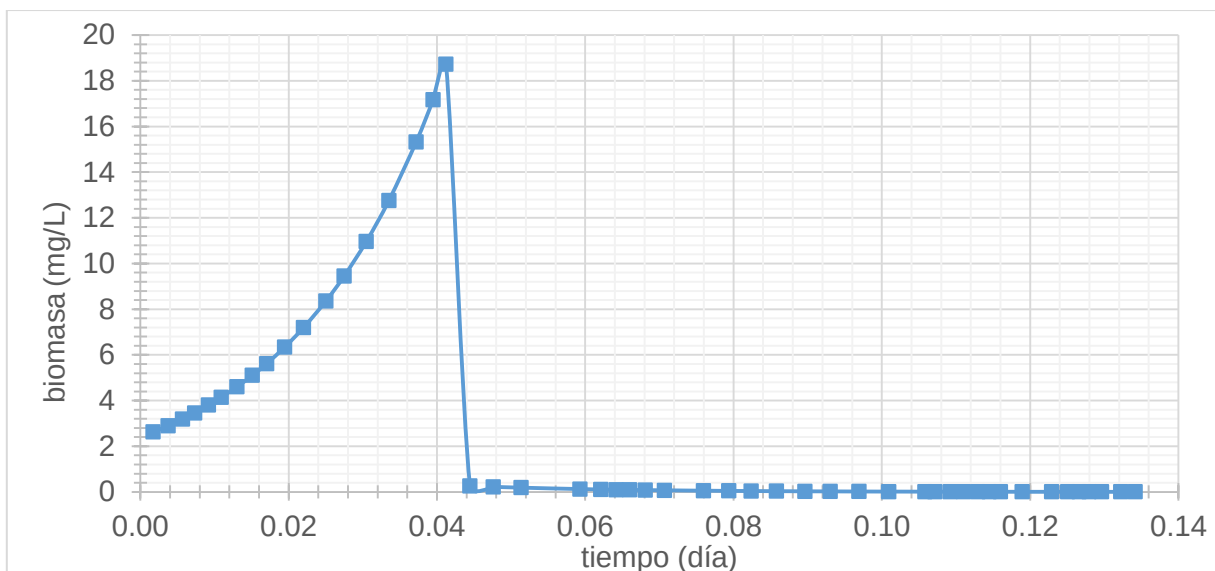


Figura 4.10. Cinética de crecimiento de biomasa con agua residual

A partir de la Figura 4.10. se puede observar que los microorganismos crecen en 0.04 día, después de ese lapso se da el decaimiento; llegando a un crecimiento máximo de biomasa de 18.722 mg/L.

b) Empleando acetato de sodio a 0.1M como sustrato

Sustituyendo las constantes $a=315.13$ y $b=116.51$ obtenidas del método gráfico, mostrado en la Figura 4.11.; en las ecuaciones 2.13 y 2.14 se obtuvieron los siguientes valores:

$$\mu_{H\text{m}\acute{a}x} = 122.336 \text{ d}^{-1}$$

$$X_{H0} = 5.247 \text{ mg/L}$$

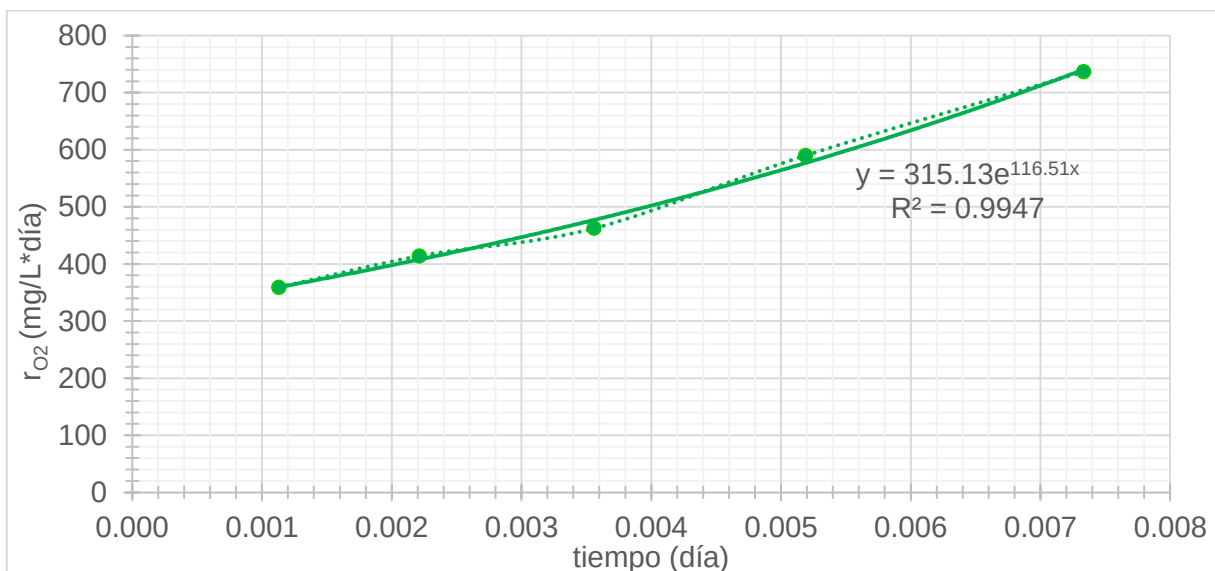


Figura 4.11. Respirograma para la obtención de $\mu_{H\text{m}\acute{a}x}$ y X_{H0} usando acetato de sodio a 0.1M

Para la obtención de “cinética de crecimiento de biomasa” se sustituyeron los valores de las constantes anteriores, en las ecuaciones 2.12, 2.16 y 2.17; obteniendo los datos graficados en la Figura 4.12.

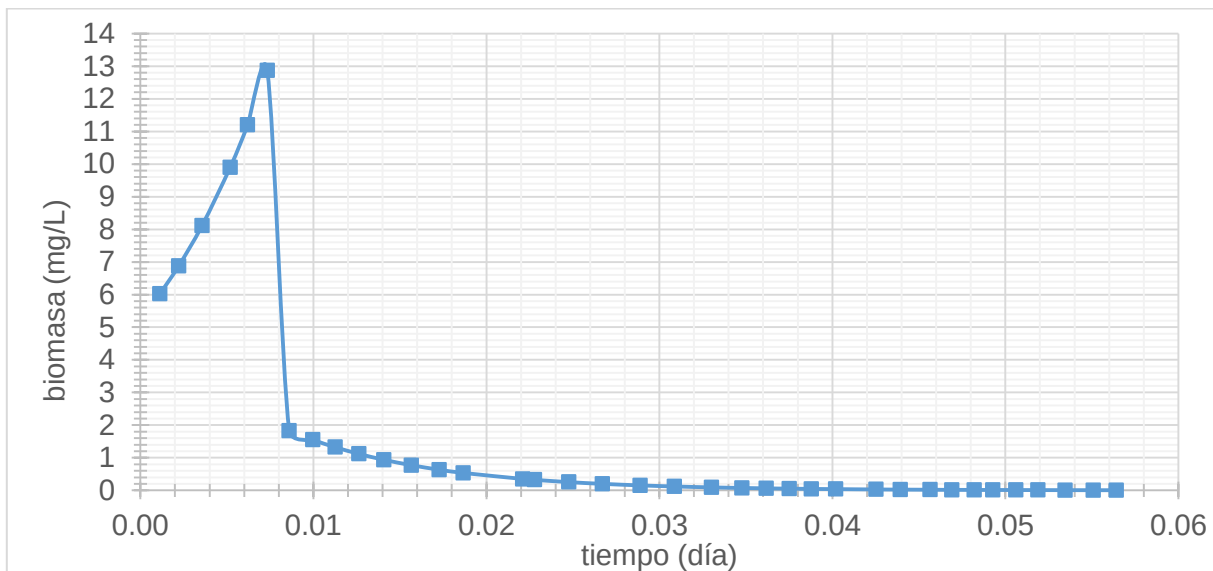


Figura 4.12. Cinética de crecimiento de biomasa con acetato de sodio a 0.1M

De la Figura 4.12. se observa que el tiempo de crecimiento de los microorganismos es muy corto y después de ese lapso se da el decaimiento; llegando a un crecimiento máximo de biomasa de 12.868 mg/L, una concentración menor de la que se obtuvo usando agua residual como sustrato.

c) Empleando acetato de sodio a 0.259M como sustrato

Sustituyendo las constantes $a=284.72$ y $b=169.04$ obtenidas del método gráfico, mostrado en la Figura 4.13.; en las ecuaciones 2.13 y 2.14 se obtuvieron los siguientes valores:

$$\mu_{Hm\acute{a}x}= 177.492 \text{ d}^{-1}$$

$$X_{H0}= 3.264 \text{ mg/L}$$

Para la obtención de “cinética de crecimiento de biomasa” se sustituyeron los valores de las constantes anteriores, en las ecuaciones 2.12, 2.16 y 2.17; obteniendo los datos graficados en la Figura 4.14.

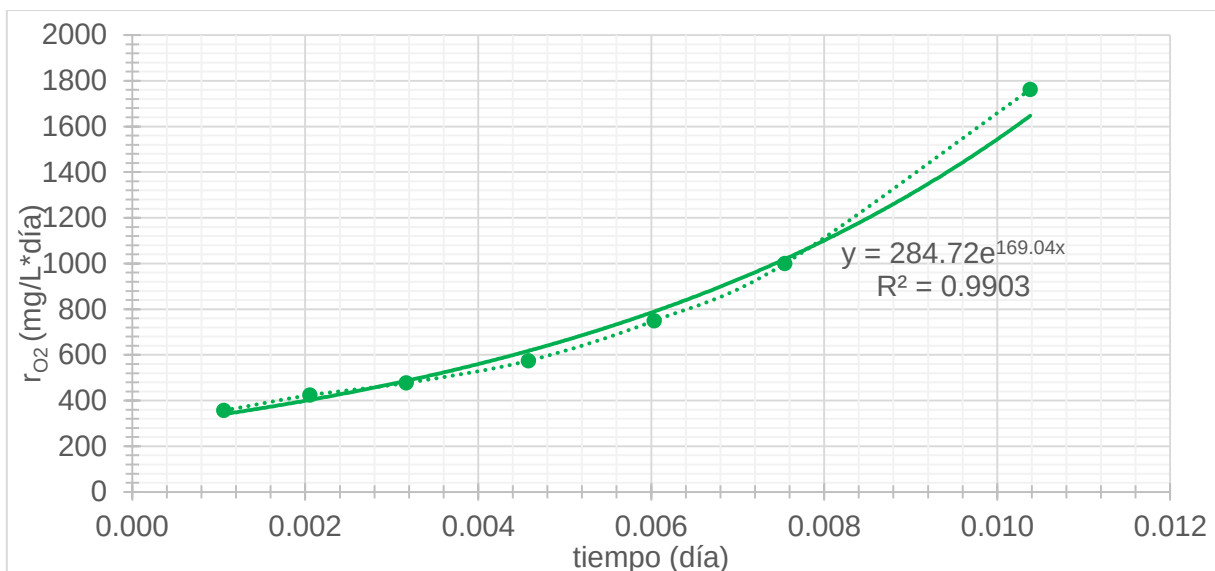


Figura 4.13. Respirograma para la obtención de $\mu_{H_{máx}}$ y X_{H0} usando acetato de sodio a 0.259M

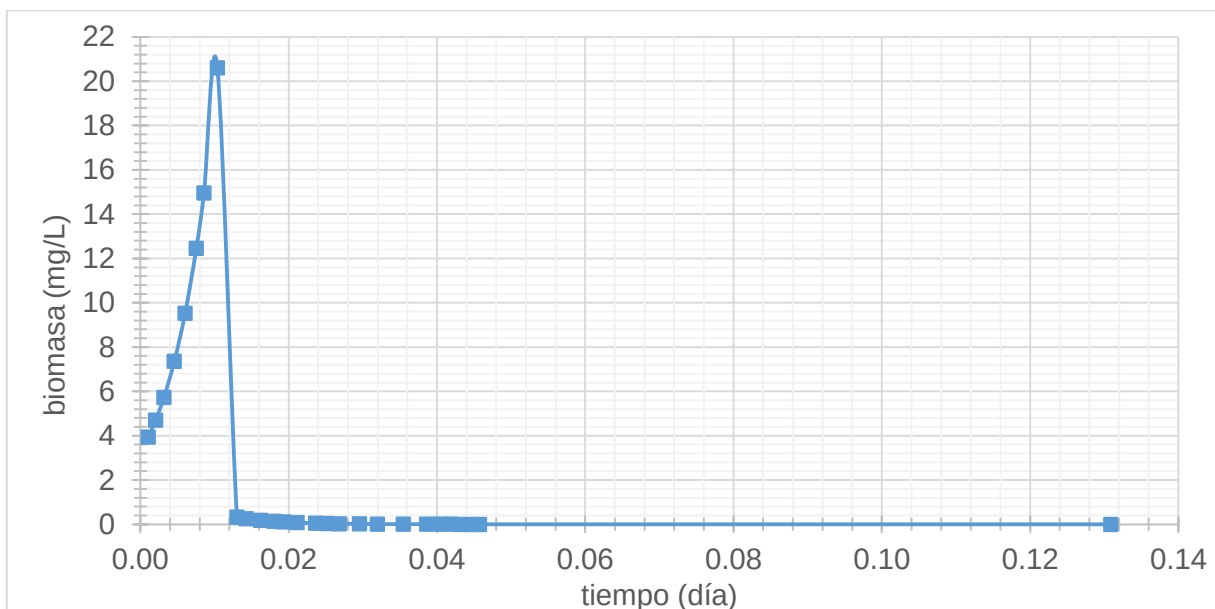


Figura 4.14. Cinética de crecimiento de biomasa con acetato de sodio a 0.259M

En la Figura 4.14. se observa que el tiempo de crecimiento de los microorganismos, en comparación con el tiempo de crecimiento usando agua residual como sustrato, es corto y después de ese lapso se da el decaimiento; llegando a un crecimiento máximo de biomasa de 20.605 mg/L , una concentración mayor que usando agua residual. Por lo que se puede concluir que a pesar de que el tiempo de generación de microorganismos es mayor en agua residual, con una alta concentración de acetato de sodio se puede producir una mayor cantidad de biomasa en menor tiempo.

d) Empleando acetato de sodio a 0.3M como sustrato

Sustituyendo las constantes $a=79.931$ y $b=63.749$ obtenidas del método gráfico, mostrado en la Figura 4.15.; en las ecuaciones 2.13 y 2.14 se obtuvieron los siguientes valores:

$$\mu_{Hm\acute{a}x} = 66.937 \text{ d}^{-1}$$

$$X_{H0} = 2.439 \text{ mg/L}$$

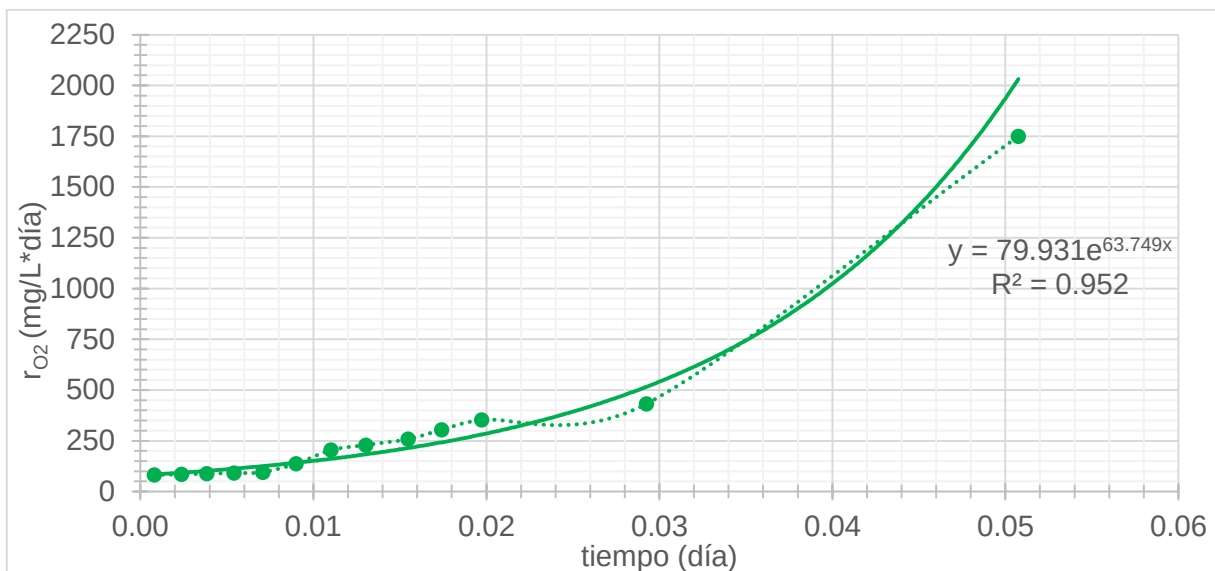


Figura 4.15. Respirograma para la obtención de $\mu_{Hm\acute{a}x}$ y X_{H0} usando acetato de sodio a 0.3M

Para la obtención de “cinética de crecimiento de biomasa” se sustituyeron los valores de las constantes anteriores, en las ecuaciones 2.12, 2.16 y 2.17; obteniendo los datos graficados en la Figura 4.16.

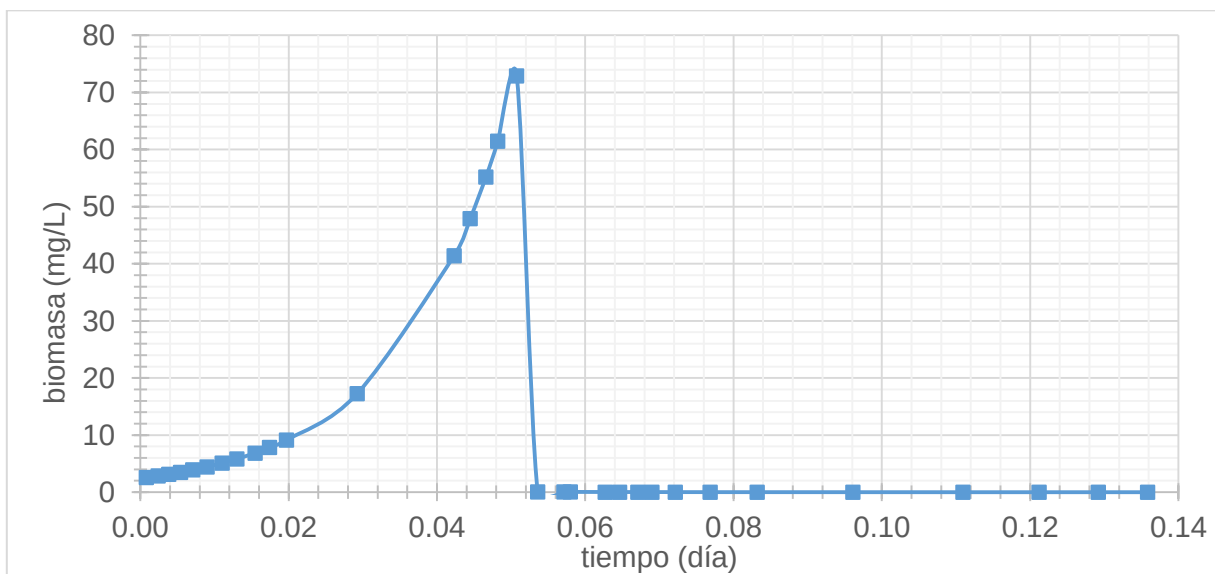


Figura 4.16. Cinética de crecimiento de biomasa con acetato de sodio a 0.3M

De la Figura 4.16 se observa que el crecimiento de los microorganismos duró aproximadamente 0.05 día y después de ese lapso se da el decaimiento; llegando a un crecimiento máximo de biomasa de 72.891 mg/L. La concentración máxima de microorganismos producidos usando acetato de sodio a 0.3M es mayor que usando cualquiera de los tres sustratos anteriores; sin embargo los valores para $\mu_{Hm\acute{a}x}= 66.9365$ obtenidos con acetato de sodio a 0.3M son similares que los obtenidos usando agua residual como sustrato, $\mu_{Hm\acute{a}x}= 49.7711$; se concluye que esto se debe a que la cantidad de microorganismos mueren a la misma velocidad que se producen nuevos.

Finalmente en la Tabla 4.2. se resumen los datos finales obtenidos y en la Figura 4.17 se muestra una comparativa de las cinéticas de crecimiento de biomasa usando los cuatro diferentes sustratos.

Tabla 4.2. Resultados finales del Estudio de la Biodegradabilidad

Sustrato	Agua residual	Acetato de sodio 0.1M	Acetato de sodio 0.259M	Acetato de sodio 0.3M
r_{O_2} (mg/L*min)	0.1003	0.1952	0.2371	0.2053
$\mu_{Hm\acute{a}x}$ (día ⁻¹)	49.7711	122.3355	177.4920	66.9365
$X_{Hm\acute{a}x}$ (mg/L)	18.7217	12.8680	20.6047	72.8914

En la Tabla 4.2. se puede observar que los resultados de las cinéticas óptimas son las obtenidas usando acetato de sodio a 0.259M que en comparación con lo reportado por Espinosa *et al.*, (2012) en su respectivo estudio, coincide con lo obtenido en el presente; ya que usando la misma concentración de acetato de sodio tienen crecimientos de microorganismos más prolongados. En la Figura 4.17 se puede observar que efectivamente se tiene un crecimiento más prolongado usando acetato de sodio a 0.259M teniendo así una concentración máxima de biomasa de 20.6047 mg/L, sin embargo usando agua residual se obtiene 18.7217 mg/L concentración máxima de biomasa; los valores no estan muy alejados entre si por lo tanto usando agua residual como sustrato se tiene un rendimiento de biodegradabilidad bueno.

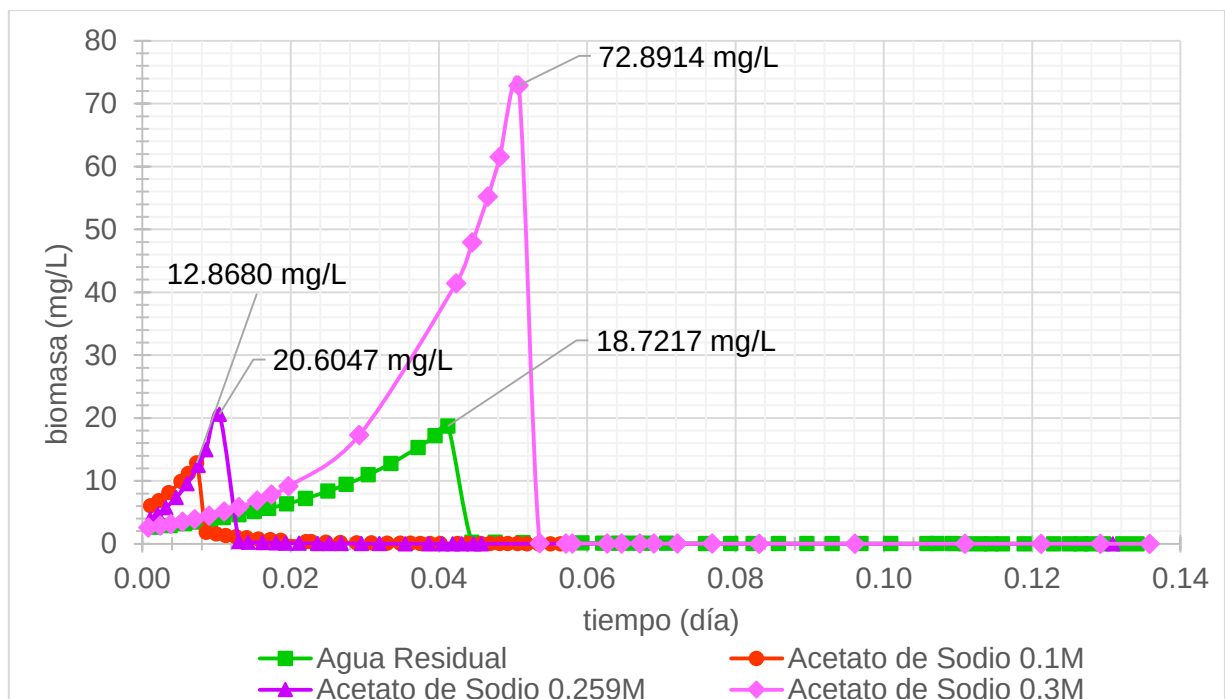


Figura 4.17. Cinéticas de crecimiento de biomasa con diferentes sustratos

5. CONCLUSIONES

La concentración máxima de biomasa usando agua residual y acetato de sodio a 0.1M no difieren en gran medida; sin embargo el tiempo para alcanzar casi la misma concentración es muy variable.

Utilizando agua residual la biomasa alcanza una concentración máxima de 18.7217 mg/L en 60 minutos, mientras que con acetato de sodio a 0.259M se alcanza una concentración de biomasa de 20.6047 mg/L en 15 minutos; por lo tanto se demuestra que con acetato de sodio a 0.259M se obtiene un 10% más de crecimiento que con agua residual en menor tiempo.

Con acetato de sodio a 0.3M en un tiempo aproximado de 70 minutos se observó un crecimiento de biomasa superior, que usando cualquiera de los otros sustratos; sin embargo el valor de $\mu_{Hmáx}$ es bajo y por lo que no es tan viable para el tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados, y como se mencionó esta condición se debe a que la cantidad de microorganismos mueren a la misma velocidad que se reproducen.

El agua residual, de la PTAR de Metepec, como sustrato tiene el suficiente contenido de materia orgánica para que los microorganismos se alimenten y se reproduzcan; no es necesario agregar una fuente de carbono (acetato de sodio), para tener crecimientos más prolongados.

6. REFERENCIAS

- Andreottola, G., de Oliveira, E. L., Foladori, P., Dallago, L., Peterlini, R., & Cadonna, M. (2005). "Método respirométrico para o monitoramento de processos biológicos". *Eng. Sanit. Ambient.*, 10(1), 14-23. doi:10.1590/S1413-41522005000100003
- Buitrón, G., Canziani, R., Torrijos, M., Gutiérrez, S., & Moreno-Andrade, I. (Febrero de 2008). Experiments for modelling the biodegradation of wastewater in sequencing batch reactors. *Taylor&Francis Group*, 14(1), 3-15.
- Chen, Y., Lin, C.-J., Jones, G., Fu, S., & Zhan, H. (2009). "Enhancing biodegradation of wastewater by microbial consortia with fractional factorial design". *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 248-953. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.06.100
- ECORED. (2008). "PTAR Metepec". Recuperado el 03 de Abril de 2018, de Tecnología para el Desarrollo Sustentable: http://www.ecored.com.mx/portalesp/pagina/z_2_Planta_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales__Metepec.php
- ECORED. (2008). "Tratamiento de aguas residuales". Recuperado el 03 de Abril de 2018, de Tecnología para el Desarrollo Sustentable: http://www.ecored.com.mx/portalesp/pagina/z_5_Tratamiento_de_Aguas_Residuales.php
- EPA. (3 de agosto de 2018). Recuperado el 13 de agosto de 2018, de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos: <https://espanol.epa.gov/>
- Espinosa-Rodríguez, M., Flores-Álamo, N., Esparza-Soto, M., & Fall, C. (agosto de 2012). "Efecto de la temperatura en la tasa de crecimiento y decaimiento heterotrófico en el rango de 20-32°C en un proceso de lodos activados". *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 11(2), 309-321. Recuperado el 13 de junio de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382012000200010

- Flores, A., Loaiza, N., & Fall, C. (2008). "AQUASIM as a presimulation tool of tracer tests at full scale WWTP". *1st IWA National Young Water Professionals Conference Mexico City*, 179-184.
- Kappeler, J., & Gujer, W. (1992). "Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modelling". *Water Science and Technology*, 25(6), 125-139. Recuperado el 12 de Octubre de 2018
- Marsili-Libelli, S., & Tabani, F. (marzo de 2002). "Accuracy analysis of a respirometer for activated sludge dynamic modelling". *WATER RESEARCH*, 36(5), 1181-1192. doi:10.1016/S0043-1354(01)00339-6
- Menéndez Gutiérrez, C., & Pérez Olmo, J. (2007). *"Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales"*. Editorial Universitaria. Recuperado el 10 de Octubre de 2018
- Merli, G., & Ricciuti, N. (2009). *"Microbiología de las aguas residuales-Aplicación de biosólidos en suelos"* (primera ed.). (F. R. Blanca, Ed.) Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional. Recuperado el 18 de junio de 2018
- Moeller, G., & Tomasini Ortiz, A. C. (2004). *"Microbiología de lodos activados"*. Recuperado el 18 de junio de 2018, de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/5Microbiologiadelodosactivados.pdf>
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J., & Güereca, L. (2013). *"Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas"* (Primera ed.). México: UNAM.
- Peña Pulla, E. (2007). *Calidad del Agua*. Trabajo de investigación, Escuela Superior Politecnica del Litoral, Auditoria y Control de Gestión, Guayaquil. Recuperado el 23 de junio de 2018, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6162/5/Investigacion.pdf>

- Raffo Lecca, E., & Ruiz Lizama, E. (03 de Abril de 2014). "Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno". *Industrial Data*, 17(1), 71-80. Recuperado el 29 de Enero de 2019, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81640855010>
- SEGOB. (14 de mayo de 1980). "*Norma Oficial Mexicana NOM-AA-12-1980, Aguas.- Determinación de Oxígeno Disuelto*". Recuperado el 23 de junio de 2018, de Secretaría de Gobernación: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4856698&fecha=15/07/1980
- SEMARNAT. (15 de agosto de 2003). "*NOM-004-SEMARNAT-2002-Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.*". Recuperado el 10 de octubre de 2018, de Secretaría de Gobernación: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003
- SEMARNAT. (23 de abril de 2003). *NOM-001-SEMARNAT-1996. "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales"*. Recuperado el 18 de junio de 2018, de SEMARNAT: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsrr/DO2470.pdf>
- SEMARNAT. (2010). "*Glosario-SEMARNAT*". Recuperado el 11 de Octubre de 2018, de Compendio de Estadísticas Ambientales 2010: http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlet8434.html
- SEMARNAT. (07 de Diciembre de 2015). "*Glosario de educación ambiental*". Recuperado el 11 de Octubre de 2018, de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/glosario-de-educacion-ambiental>

- Spanjers, H., Vanrolleghem, P., Olsson, G., & Dold, P. (1996). Respirometry in control of the activated sludge process. *Water Science and Technology*, 34(3-4), 117-126. doi:10.2166/wst.1996.0424
- Vázquez Mejía, G., Ortega Aguilar, R., Esparza Soto, M., & Fall, C. (Abril-Junio de 2013). "Fraccionamiento de DQO del agua residual de Toluca por el protocolo STOWA". *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(2), 21-35.

ANEXO A: Cinética de Respiración del Lodo Activado

A.1. Agua Residual

Tabla A.1. Ciclos de trabajo de la respiración del lodo activado con agua residual

tiempo (minutos)	OD (mg/L)	% Saturación
0.00	4.0	62.0
2.05	3.8	59.8
4.04	3.6	57.4
5.59	3.4	54.9
8.05	3.3	52.5
10.43	3.1	49.8
13.23	3.0	48.2
18.47	4.0	64.3
20.09	3.8	62.2
21.26	3.7	59.9
22.32	3.6	58.2
23.36	3.4	56.5
24.48	3.3	54.6
25.50	3.2	52.9
26.56	3.1	51.3
28.10	3.0	49.3
30.00	3.7	61.5
33.55	4.0	65.9
35.29	3.8	63.0
36.30	3.7	61.5
37.47	3.6	59.2
39.30	3.3	55.4
41.11	3.2	52.5
42.15	3.1	51.0
43.33	3.0	48.9
46.52	3.7	61.7
49.07	3.9	64.2
49.33	4.0	65.3
51.14	3.8	63.7
52.55	3.6	60.4
54.32	3.5	58.3
56.08	3.3	54.7
57.57	3.1	51.7
59.00	3.0	50.6

Tabla A.2. Datos para la obtención de la cinética de respiración del lodo activado con agua residual

tiempo (minutos)	OD (mg/L)	% Saturación	$C_{L0} - C_L$ (mg/L)
0.00	4.00	62.03	0.0000
1.87	3.77	59.67	0.2333
3.90	3.60	56.90	0.4000
5.75	3.40	54.40	0.6000
8.13	3.23	51.77	0.7667
11.28	3.00	48.47	1.0000

17.01	4.00	64.10	0.0000
19.58	3.87	63.03	0.1333
20.75	3.73	60.83	0.2667
21.94	3.63	59.10	0.3667
22.99	3.47	57.33	0.5333
24.08	3.37	55.53	0.6333
25.28	3.27	53.67	0.7333
26.32	3.17	51.97	0.8333
27.93	3.00	49.40	1.0000

34.07	4.00	65.73	0.0000
35.62	3.73	62.27	0.2667
36.87	3.63	60.10	0.3667
38.08	3.47	57.60	0.5333
39.85	3.23	54.47	0.7667
41.34	3.13	51.87	0.8667
42.74	3.00	49.43	1.0000

47.88	4.00	66.20	0.0000
49.76	3.83	64.03	0.1667
51.70	3.60	60.00	0.4000
53.15	3.47	57.50	0.5333
54.98	3.27	54.43	0.7333
57.63	3.00	49.90	1.0000

$m = r_{O_2}$	r^2
$m = 0.0875$	0.9902
$m = 0.0961$	0.9884
$m = 0.1137$	0.9875
$m = 0.1038$	0.9990
$r_{O_2} = 0.1003$	

A.2. Acetato de Sodio a 0.1M

Tabla A.3. Ciclos de trabajo de la respiración del lodo activado con acetato de sodio a 0.1M

tiempo (minutos)	OD (mg/L)	% Saturación
0.00	4.0	62.7
1.04	3.7	58.8
3.02	3.3	51.9
4.44	3.0	46.5
6.55	3.1	49.6
9.12	3.6	56.4
12.16	3.8	59.7
15.06	4.0	60.0
17.45	3.8	59.9
19.27	3.6	57.5
21.38	3.0	47.3
24.35	3.4	54.3
26.48	3.7	59.0
29.46	3.8	60.6
32.26	4.0	61.2
33.20	3.7	59.5
35.16	3.4	55.1
36.14	3.2	51.5
36.48	3.1	49.3
37.23	3.0	47.0

Tabla A.4. Datos para la obtención de la cinética de respiración del lodo activado con acetato de sodio a 0.1M

tiempo (minutos)	OD (mg/L)	% Saturación	$C_{L0} - C_L$ (mg/L)
0.00	4.00	63.23	0.00
1.48	3.73	59.20	0.27
3.58	3.23	51.17	0.77
4.72	3.00	46.20	1.00

12.50	4.00	61.83	0.00
14.38	3.77	59.60	0.23
17.88	3.00	47.37	1.00

29.25	4.00	62.30	0.00
30.63	3.77	60.77	0.23
33.21	3.23	51.80	0.77
35.00	3.00	47.33	1.00

$m = r_{O_2}$	r^2
$m = 0.2159$	0.9973
$m = 0.1900$	0.9839
$m = 0.1798$	0.9931
$r_{O_2} = 0.1952$	

A.3. Acetato de Sodio a 0.259M

Tabla A.5. Ciclos de trabajo de la respiración del lodo activado con acetato de sodio a 0.259M

tiempo (minutos)	OD (mg/L)	% Saturación
0.00	4.0	59.3
1.49	3.4	52.5
3.59	3.0	45.5
5.39	3.7	59.7
8.24	4.0	61.0
10.05	3.6	55.6
11.55	3.1	48.1
12.50	3.0	45.6
14.36	3.6	55.6
16.36	4.0	62.6
18.54	3.5	55.8
20.42	3.0	47.8
22.48	3.6	57.9
23.45	4.0	63.0
26.11	3.6	57.8
27.49	3.1	50.2
29.01	3.0	47.3
31.02	3.7	60.1
33.03	4.0	65.6
34.36	3.7	58.8
35.56	3.3	52.6
37.31	3.0	47.2

Tabla A.6. Datos para la obtención de la cinética de respiración del lodo activado con acetato de sodio a 0.259M

tiempo (minutos)	OD (mg/L)	% Saturación	$C_{L0} - C_L$ (mg/L)
0.00	4.00	59.97	0.00
0.71	3.85	58.85	0.15
1.88	3.45	52.90	0.55
3.29	3.10	47.10	0.90
4.07	3.00	45.37	1.00

7.76	4.00	61.37	0.00
9.94	3.63	56.20	0.37
11.42	3.15	48.80	0.85
12.62	3.00	45.60	1.00

16.12	4.00	62.73	0.00
18.31	3.57	56.53	0.43
19.72	3.20	50.40	0.80
20.99	3.00	47.70	1.00

24.08	4.00	63.43	0.00
25.71	3.70	59.55	0.30
27.13	3.17	50.83	0.83
28.51	3.00	47.23	1.00

32.87	4.0	64.3	0.0
34.34	3.8	61.5	0.2
35.45	3.3	53.3	0.7
36.92	3.0	46.9	1.0

$m = r_{O_2}$	r^2
$m = 0.2577$	0.9871
$m = 0.2163$	0.9765
$m = 0.2104$	0.9945
$m = 0.2401$	0.9665
$m = 0.2611$	0.9581
$r_{O_2} = 0.2371$	

A.4. Acetato de Sodio a 0.3M

Tabla A.7. Ciclos de trabajo de la respiración del lodo activado con acetato de sodio a 0.3M

tiempo (minutos)	OD (mg/L)	% Saturación
0.00	4.0	63.5
1.59	3.9	62.4
3.59	3.3	53.3
5.30	3.0	47.0
6.51	3.2	50.9
8.47	3.5	56.1
11.12	4.0	64.1
12.49	3.7	60.0
15.55	3.2	51.5
16.45	3.0	48.4
18.23	3.2	50.1
21.45	3.8	61.7
24.01	4.0	64.1
25.01	3.8	62.0
27.16	3.0	49.4
30.14	3.3	54.2
32.20	3.4	56.6
34.20	3.5	57.6
37.58	3.7	59.9
39.45	4.0	64.9
42.27	3.4	56.1
45.39	3.0	49.6

Tabla A.8. Datos para la obtención de la cinética de respiración del lodo activado con acetato de sodio a 0.3M

tiempo (minutos)	OD (mg/L)	% Saturación	$C_{L0} - C_L$ (mg/L)
0.00	4.00	63.80	0.00
2.34	3.73	60.03	0.27
4.17	3.20	51.13	0.80
5.29	3.00	48.20	1.00

10.64	4.00	64.17	0.00
12.64	3.70	60.07	0.30
15.37	3.00	49.00	1.00

23.27	4.00	64.27	0.00
25.23	3.80	62.50	0.20
26.91	3.35	54.75	0.65
27.93	3.00	48.20	1.00

38.40	4.00	65.17	0.00
39.35	3.70	60.00	0.30
41.26	3.37	55.53	0.63
43.31	3.00	48.80	1.00

$m = r_{O_2}$	r^2
$m = 0.1967$	0.9640
$m = 0.2142$	0.9814
$m = 0.2138$	0.9431
$m = 0.1966$	0.9874
$r_{O_2} = 0.2053$	

ANEXO B: Cinética de Crecimiento de Biomasa

B.1. Agua Residual

Tabla B.1. Datos para la obtención de $\mu_{Hm\acute{a}x}$ y X_{H0} con agua residual

tiempo (día)	OD (mg/L)	% Saturación	r_{O_2} (mg/L*día)
0.0017	4.1667	68.8667	72.7777
0.0038	4.1333	67.9667	75.1417
0.0057	4.0333	66.2000	77.0659
0.0073	3.8000	62.1667	78.5456
0.0092	3.7000	60.6333	83.1120
0.0109	3.7000	60.3000	92.1931
0.0130	3.7000	60.3000	101.2658
0.0151	3.6667	59.5333	113.5749
0.0170	3.6667	58.5000	128.4718
0.0195	3.7333	59.8333	150.6007
0.0220	3.6667	58.5667	165.4064
0.0250	3.6333	57.6000	189.3275
0.0275	3.6000	57.1000	222.7550
0.0305	3.5333	56.1333	257.5797
0.0335	3.4333	54.0000	310.1988
0.0372	3.2000	50.3667	358.5223
0.0395	2.6667	41.8333	398.7342
0.0412	1.8000	28.0000	364.8834

Tabla B.2. Datos para la obtención de la cinética de crecimiento de biomasa con agua residual

tiempo (día)	OD (mg/L)	% Saturación	X _H (mg/L)				
0.0017	1.80	28.00	2.6233	0.1130	2.20	36.37	0.0087
0.0038	2.67	41.83	2.9017	0.1145	1.97	32.67	0.0081
0.0057	3.20	50.37	3.1910	0.1160	1.80	29.80	0.0075
0.0073	3.43	54.00	3.4616	0.1189	1.53	25.60	0.0065
0.0092	3.53	56.13	3.8013	0.1229	1.33	22.17	0.0053
0.0109	3.60	57.10	4.1443	0.1251	0.80	13.83	0.0048
0.0130	3.63	57.60	4.6020	0.1266	0.67	11.00	0.0044
0.0151	3.67	58.57	5.1054	0.1280	0.53	8.73	0.0041
0.0170	3.73	59.83	5.6198	0.1297	0.40	6.30	0.0038
0.0195	3.67	58.50	6.3380	0.1322	0.10	1.47	0.0033
0.0220	3.67	59.53	7.1966	0.1342	0.10	1.07	0.0030
0.0250	3.70	60.30	8.3575				
0.0275	3.70	60.30	9.4469				
0.0305	3.70	60.63	10.9695				
0.0335	3.80	62.17	12.7647				
0.0372	4.03	66.20	15.3239				
0.0395	4.13	67.97	17.1682				
0.0412	4.17	68.87	18.7217				
0.0445	4.13	68.40	0.2632				
0.0476	4.10	67.90	0.2252				
0.0514	4.13	68.13	0.1868				
0.0593	4.07	67.07	0.1259				
0.0621	4.10	68.33	0.1094				
0.0642	4.07	67.30	0.0988				
0.0660	4.10	67.93	0.0902				
0.0681	4.07	67.70	0.0812				
0.0707	4.07	67.07	0.0713				
0.0760	4.07	67.57	0.0549				
0.0794	4.07	67.43	0.0464				
0.0824	4.00	66.37	0.0399				
0.0858	3.93	65.23	0.0337				
0.0897	3.83	63.57	0.0278				
0.0930	3.73	62.00	0.0235				
0.0969	3.60	59.93	0.0193				
0.1009	3.50	58.03	0.0158				
0.1058	3.30	54.37	0.0124				
0.1071	3.13	51.77	0.0116				
0.1092	2.87	47.83	0.0105				
0.1110	2.63	43.70	0.0096				

B.2. Acetato de Sodio a 0.1M

Tabla B.3. Datos para la obtención de $\mu_{H_{m\acute{a}x}}$ y X_{H_0} con acetato de sodio a 0.1M

tiempo (día)	OD (mg/L)	% Saturación	r_{O_2} (mg/L*día)
0.0011	4.0000	62.9667	359.0909
0.0022	3.9333	61.7333	413.9785
0.0036	3.7667	59.1000	462.3853
0.0052	3.4667	54.3333	589.9666
0.0073	2.2000	34.1333	736.8421

Tabla B.4. Datos para la obtención de la cinética de crecimiento de biomasa con acetato de sodio a 0.1M

tiempo (día)	OD (mg/L)	% Saturación	X_H (mg/L)				
0.0011	2.20	34.13	6.0253	0.0456	3.60	60.23	0.0197
0.0022	3.00	46.40	6.8772	0.0469	3.60	60.33	0.0169
0.0036	3.47	54.33	8.1098	0.0482	3.60	60.07	0.0144
0.0052	3.77	59.10	9.9006	0.0493	3.60	60.27	0.0127
0.0062	3.93	61.73	11.2021	0.0506	3.60	60.63	0.0108
0.0073	4.00	62.97	12.8680	0.0519	3.60	60.47	0.0092
0.0086	3.93	62.83	1.8317	0.0535	3.60	60.43	0.0076
0.0100	3.93	62.70	1.5492	0.0551	3.60	60.67	0.0062
0.0113	3.90	63.33	1.3238	0.0564	3.60	60.63	0.0053
0.0126	3.90	63.40	1.1183				
0.0141	3.90	63.27	0.9387				
0.0157	3.83	62.73	0.7723				
0.0173	3.77	61.97	0.6348				
0.0187	3.77	62.50	0.5347				
0.0221	3.77	62.93	0.3516				
0.0228	3.67	61.20	0.3230				
0.0248	3.63	61.00	0.2538				
0.0267	3.63	61.20	0.2001				
0.0289	3.60	60.93	0.1530				
0.0309	3.57	60.43	0.1201				
0.0330	3.60	60.33	0.0925				
0.0348	3.60	60.40	0.0745				
0.0362	3.57	60.30	0.0628				
0.0375	3.60	60.37	0.0534				
0.0388	3.60	60.60	0.0456				
0.0402	3.60	60.43	0.0385				
0.0425	3.57	60.40	0.0289				
0.0439	3.60	60.77	0.0243				

B.3. Acetato de Sodio a 0.259M

Tabla B.5. Datos para la obtención de $\mu_{H_{m\acute{a}x}}$ y X_{H_0} con acetato de sodio a 0.259M

tiempo (día)	OD (mg/L)	% Saturación	r_{O_2} (mg/L*día)
0.0011	4.1667	66.8333	356.4220
0.0021	4.1000	64.8667	423.6535
0.0032	4.0667	64.3333	477.1221
0.0046	3.9333	62.1000	574.3590
0.0060	3.9000	60.7667	749.4802
0.0075	3.6333	56.6333	1000.0000
0.0104	2.3333	36.4000	1761.7978

Tabla B.6. Datos para la obtención de la cinética de crecimiento de biomasa con acetato de sodio a 0.259M

tiempo (día)	OD (mg/L)	% Saturación	X_H (mg/L)
0.0011	2.33	36.40	3.9394
0.0021	3.20	48.37	4.7006
0.0032	3.63	56.63	5.7261
0.0046	3.90	60.77	7.3600
0.0060	3.93	62.10	9.5284
0.0075	4.07	64.33	12.4560
0.0086	4.10	64.87	14.9571
0.0104	4.17	66.83	20.6047
0.0130	4.13	67.80	0.3236
0.0143	4.07	65.90	0.2599
0.0162	4.07	65.10	0.1841
0.0180	3.97	64.97	0.1328
0.0193	3.97	65.07	0.1060
0.0212	3.93	64.33	0.0764
0.0236	3.90	63.93	0.0492
0.0252	3.90	64.13	0.0373
0.0268	3.90	64.33	0.0278
0.0296	3.90	64.07	0.0172
0.0320	3.87	64.30	0.0112
0.0355	3.80	63.53	0.0060
0.0386	3.83	63.67	0.0034
0.0405	3.80	63.63	0.0025
0.0419	3.83	63.80	0.0019
0.0431	3.83	63.40	0.0016

0.0447	3.83	64.13	0.0012
0.0457	3.83	63.97	0.0010
0.1309	3.73	63.03	0.0000000003

B.4. Acetato de Sodio a 0.3M

Tabla B.7. Datos para la obtención de $\mu_{Hm\acute{a}x}$ y X_{H0} con acetato de sodio a 0.3M

tiempo (día)	OD (mg/L)	% Saturación	r_{O_2} (mg/L*día)
0.0008	4.3000	68.7333	82.0903
0.0024	4.2333	68.2000	85.0328
0.0038	4.2333	67.9000	87.9783
0.0054	4.2000	67.9000	91.4102
0.0071	4.1667	67.3667	95.3185
0.0090	4.1667	67.6667	137.8244
0.0110	4.1667	67.3000	204.4412
0.0130	4.1333	67.1000	229.5082
0.0155	4.1333	67.4333	258.5809
0.0174	4.1000	65.9667	304.4591
0.0197	4.0333	65.8667	353.6269
0.0293	4.0333	65.3000	432.8753
0.0508	1.5333	24.1333	1750.0000

Tabla B.8. Datos para la obtención de la cinética de crecimiento de biomasa con acetato de sodio a 0.3M

tiempo (día)	OD (mg/L)	% Saturación	X_H (mg/L)				
0.0008	1.53	24.13	2.5729	0.0572	4.27	69.00	0.0532
0.0024	2.87	45.90	2.8610	0.0580	4.17	67.20	0.0502
0.0038	3.50	56.10	3.1531	0.0627	4.17	67.47	0.0367
0.0054	3.77	60.80	3.5022	0.0646	4.23	68.00	0.0322
0.0071	3.93	63.60	3.9149	0.0671	4.20	67.77	0.0273
0.0090	4.03	65.30	4.4572	0.0690	4.23	67.80	0.0241
0.0110	4.03	65.87	5.1022	0.0721	4.23	67.83	0.0195
0.0130	4.10	65.97	5.8331	0.0768	4.23	67.50	0.0142
0.0155	4.13	67.43	6.8682	0.0832	4.23	67.00	0.0093
0.0174	4.13	67.10	7.8309	0.0961	4.13	65.73	0.0039
0.0197	4.17	67.30	9.1342	0.1109	4.13	66.20	0.0015
0.0293	4.17	67.67	17.2932	0.1212	3.90	63.37	0.0007
0.0423	4.17	67.37	41.4230	0.1292	3.90	63.50	0.0004
0.0445	4.20	67.90	47.9109	0.1359	3.90	63.25	0.0003
0.0466	4.23	67.90	55.1946				
0.0482	4.23	68.20	61.4928				
0.0508	4.30	68.73	72.8914				
0.0536	4.27	68.53	0.0675				