

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD DEL CLORURO
DE VINILO, EL TOLUENO Y EL CLORURO DE ETILENO
MEDIANTE UN PROCESO DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO
DE EFLUENTES POR LODOS ACTIVADOS EN UN REACTOR
BIOLÓGICO DE CONTROL AUTOMATIZADO**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Márquez P., Daniela C.
Para optar al Título de Ingeniero Químico

Caracas, Junio de 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD DEL CLORURO DE VINILO, EL TOLUENO Y EL CLORURO DE ETILENO MEDIANTE UN PROCESO DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE EFLUENTES POR LODOS ACTIVADOS EN UN REACTOR BIOLÓGICO DE CONTROL AUTOMATIZADO

Tutor académico: Ing. Francisco Yanez

Tutor industrial: Lic. Fernando Camacho

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Márquez P., Daniela
Para optar al Título de Ingeniero Químico

Caracas, Junio de 2005

Cancun, 15 de Junio de 2005.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Daniela C. Márquez P., titulado:

“Evaluación de la Biodegradabilidad del Cloruro de Vinilo, el Tolueno y el Cloruro de Etileno mediante un proceso de tratamiento biológico de efluentes por Lodos Activados en un reactor biológico de control automatizado”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Alincé Ramos

(Jurado)



Prof. Jose F. Fernández

(Jurado)



Prof. Francisco Yáñez

(Tutor Académico)



Lic. Fernando Camacho

(Tutor Industrial)

Dedicatoria a:

*A Dios, porque me dió la oportunidad a través de mis padres de
nacer, crecer y realizar todo lo que he logrado hasta ahora, para que
me permita seguir en este camino lleno de luz, esperanza y prosperidad.*

A mi abuela Julieta siempre serás mi ejemplo a seguir.

*Necesitamos de hombres robustos y fuertes acostumbrados a la
indecencia y a las fatigas, de hombres que abracen la causa y la
carrera con entusiasmo, de hombres que vean identificada su causa con
la causa pública, y para quienes el valor de la muerte sea poco menos
que el de la vida”.*

Simón Bolívar

*“Hay hombres que luchan un día, y son buenos,
Hay hombres que luchan un año, y son mejores,
Pero, hay hombres que luchan toda una vida, esos son los
imprescindibles”*

Bertold Brecht

Agradecimientos

Es difícil agradecer a todas las personas que de alguna u otra manera colaboraron y estuvieron conmigo en estos años de estudio porque seguramente olvidaré a algunos que no son menos importantes y a los que pido disculpas antes de comenzar.

Primeramente y de manera muy especial a mi abuela Julieta, quien desde mis primeros años de vida estuvo allí, enseñándome muchas cosas y brindándome su apoyo y cariño en todos los momentos de mi vida, abuela eres mi ejemplo a seguir y este logro te lo dedico enteramente a ti. Te amo muchísimo.

A mis padres y hermanos, quienes estuvieron conmigo en todas las facetas de mi vida y fueron los que me ayudaron con sus palabras y enseñanzas a ser lo que soy y a lograr lo que tengo en este momento, de todo corazón gracias, los quiero mucho.

A Johanna, mi mejor amiga, quien estuvo conmigo en las buenas y en las malas en gran parte de mi vida, gracias por estar conmigo siempre, nunca dejarás de ser como una hermana para mí, te quiero mucho.

A mis amigas del colegio Bermery, Sugue y Nosle, siempre estuvieron allí pendientes de mí (intermitentemente pero allí), gracias por apoyarme siempre sin esperar algo a cambio. Ustedes saben que las quiero.

A Adri y Nuny, mis primeras amigas de la uni, ustedes desde el principio de la carrera estuvieron conmigo ayudándome y brindándome un apoyo incondicional cuando lo necesitaba, en los momentos buenos y en los malos, nunca voy a olvidar todo lo que hicieron por mí y este logro también es de ustedes, las quiero.

A mis amig@s Xení, Gaby, Rosa, Katty, la negra, Nadi, Barbara, Karina, María, Neisy Andreina, Nina, Rey y Miguel. Ustedes desde que los conocí estuvieron conmigo, en las rumbas, en los estudios, en los momentos de rabia, en las peleas y cuando tenía ganas de llorar o reír. Siempre serán mis amigos y nunca olvidaré todos los momentos compartidos con ustedes, son demasiado especiales, los quiero a todos.

Maritsel, Rafael y Víctor, por ser mis compañeros de grupo en casi todos los proyectos y porque junto a ustedes aprendí muchas cosas, a pesar de las peleas (menos contigo Rafa) y que todo lo dejábamos para última hora siempre todo nos salió muy bien. Gracias por ser mis compañeros y amigos, los quiero mucho.

A mis amigos de la universidad: Jean Carlos, Malena, Fabi, Rafito, Sabrinota, Yesenia, Ini, Víctor y Kari, Pedro, Jessi, Jaime, María del mar, Leo, Paola, Sabrinita, Juan, Meche y Desiree, Jennifer, Mileidy, Rosarmy, Mayaya, Verónica, Andrea, Rosanna, con los que compartí rumbas (parroquia y discovery), viajes y estudios; y que me brindaron mucho apoyo moral para culminar este trabajo. A ti también Fefa

aunque te conozco desde hace poco, sé que eres una buena persona y estuviste en la última parte de esta tesis animándome a terminar. Gracias a todos, los quiero y los aprecio de todo corazón.

Al combo: Chris, Luchi, Chuzmi, Nathy, Vanessa y Alexandra, por haber compartido conmigo los 2 últimos semestres de mi carrera y por haberme brindado su amistad, apoyo y confianza. Gracias por estar conmigo en la realización de este trabajo y por animarme en los momentos cuando me encontraba triste y obstinada.

A Fernando Camacho, mi tutor industrial, quien me brindó su apoyo técnico y sus conocimientos durante la realización de este trabajo. Por estar pendiente de mí y porque cuando iba a su oficina siempre me atendía así estuviera ocupado. Luego de tantos inconvenientes, por fin lo logramos, muchas gracias.

A Yeyo, por ser mi tutor y brindarme sus conocimientos y ayuda en los momentos que lo necesitaba, gracias por todo.

A Leudith, por brindarme su amistad y confianza, estuviste detrás de mí durante los últimos dos meses para que terminara de realizar la tesis, pues ya por fin lo logré, gracias por estar allí en los momentos que necesitaba hablar con alguien, eres muy especial para mí.

A mis amigos de Intevap: Ernesto (el feo), Jenny (la fea), Junior, Frepy, Española, Geral, Benja, Caliche, Julio, Kryve; y a Marifrançis (no eres de Intevap pero esto también va para ti), que de alguna u otra forma estuvieron pendientes de mí en la realización de este trabajo y que con sus palabras siempre me dieron mucho ánimo para continuar, los quiero mucho muchachos.

A la U.C.V., en especial a la escuela de Ingeniería Química y a sus profesores y empleados por darme la enseñanza y ayudarme en todo lo que estuvo en sus manos. Gracias a Iraida, al doctorísimo Luis García, a Jhonny Vasquez, a Carlos Morales, a Wadou, a Mary Luz, a José Francisco y a Berenice. Gracias los aprecio mucho.

A las personas de Intevap que me ayudaron en todo momento en la parte técnica de este Trabajo, a José Marcano, Aniuska del laboratorio de Tratabilidad de Efluentes y Exmirna del Laboratorio de Biotecnología. A Eddy Rincón, Pedro Perdomo y Oscar Sánchez de El Tablazo, por su ayuda y apoyo prestado, todos ustedes fueron una parte clave en la realización de este Trabajo.

Por último a todas las personas que compartieron conmigo durante toda la carrera, que pusieron un granito de arena para ayudarme con este logro y por razones de memoria no están nombrados aquí, y además a todos los que nombré anteriormente...

MUCHISIMAS GRACIAS...

Márquez P., Daniela C.

EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD DEL CLORURO DE VINILO, EL TOLUENO Y EL CLORURO DE ETILENO MEDIANTE UN PROCESO DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE EFLUENTES POR LODOS ACTIVADOS EN UN REACTOR BIOLÓGICO DE CONTROL AUTOMATIZADO

Tutor Académico: Ing. Francisco Yanez. Tutor Industrial: Lic. Fernando Camacho.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2005, 120 p.

Palabras Claves: Biodegradación, aclimatación, contaminantes, reactores biológicos, lodos activados.

Resumen. El presente trabajo busca como objetivo principal estudiar la biodegradación del Monocloruro de vinilo (MVC), Cloruro de etileno (EDC) y el Tolueno, que son compuestos comunes en algunos procesos industriales y cuya presencia puede afectar la efectividad del tratamiento biológico de los efluentes industriales que los contengan.

Para llevar a cabo la evaluación, se determinó la respuesta del proceso biológico a la presencia de estos compuestos en pruebas a escala laboratorio con biomasa previamente aclimatada a los mismos. Con esta finalidad se determinó la evolución de la actividad degradativa, reproductiva y respiratoria de un cultivo mixto de microorganismos; así como también se evaluó el efecto de la concentración de los compuestos sobre la actividad respiratoria de los mismos y adicionalmente se estudió la evolución de la reacción de oxidación biológica, mediante la actividad degradativa y reproductiva, llevada a cabo en un reactor biológico aerobio discontinuo. El estudio contempló dos fases: una con un agua sintetizada en el laboratorio que contiene como fuente de materia orgánica glucosa y los compuestos en estudio, y la otra, con una muestra de efluente proveniente de la industria.

Los resultados obtenidos muestran que el proceso de aclimatación al agua sintética es muy eficaz ya que se obtuvo un porcentaje de remoción de materia orgánica de 95%, la actividad reproductiva de los microorganismos fue la esperada para un cultivo discontinuo en donde se obtuvo la fase de latencia y de crecimiento exponencial, y la actividad respiratoria fue incrementándose a medida que transcurría el proceso de aclimatación.

Para el proceso de aclimatación a la muestra de efluente proveniente de la industria, en primer lugar se realizó la caracterización del agua, determinándose los siguientes parámetros: conductividad (919 $\mu\text{s}/\text{cm}$), demanda bioquímica de oxígeno (100mg/L), demanda química de oxígeno (319 mg/L) y sólidos entre otros. Los resultados de la etapa de aclimatación del efluente establecieron una alta biodegradación, la remoción fue de 92%. El comportamiento de la curva de crecimiento celular, se correspondió con el patrón de crecimiento indicado en la bibliografía, en donde se muestran claramente las fases de latencia, crecimiento exponencial, estacionaria y de muerte exponencial.

En los resultados de la actividad respiratoria de los microorganismos, se obtuvo que la velocidad de consumo aumentaba con el aumento de la concentración, lo cual indica que existe tendencia a la biodegradación de estos compuestos y que la actividad respiratoria de los microorganismos no se ve inhibida por la presencia de los mismos.

Los resultados arrojados por las pruebas en el reactor demostraron la biodegradabilidad del agua sintética con EDC, evidenciada por un porcentaje de biodegradación del compuesto de 92,5%. El MVC no fue visto por el sistema de tratamiento ya que éste por sus propiedades fisicoquímicas a condiciones normales no se mantiene en el líquido sino que pasa fácilmente a la fase gaseosa. El porcentaje de biodegradación del tolueno fue de 92,5%, en la prueba con el agua sintética, mostrando una biodegradación alta, realizada en 10 minutos de prueba, lo cual sobreestima los resultados esperados para este compuesto. En cuanto a los resultados en la prueba con el efluente, arrojaron nuevamente que el MVC no se encontraba en el líquido al inicio del ensayo, el porcentaje de masa degradada de EDC fue de 94% y la del tolueno de 98%, en este caso el tolueno presentó una biodegradación mayor a 10 minutos lo cual era de esperarse por lo encontrado en la literatura especializada.

Finalmente, se recomienda realizar este estudio en condiciones continuas con cada uno de los compuestos (EDC, MVC y tolueno), realizar un tratamiento previo de los efluentes que contengan MVC para evitar su descarga al ambiente y tomar las medidas necesarias en la captación de muestras en los compuestos que sean muy volátiles como el tolueno.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
3. OBJETIVOS.....	5
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
1. TRATAMIENTO DE EFLUENTES	7
2. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE EFLUENTES	8
2.1. Microorganismos	9
2.2. Tratamiento Aeróbico	12
3. BIODEGRADACIÓN.....	14
4. PARÁMETROS PARA CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS	19
4.1. Parámetros Físicos	19
4.1.1. Sólidos	19
4.1.2. Conductividad.....	21
4.2. Parámetros Químicos	21
4.2.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	23
4.2.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	23
4.2.4. Nitrógeno amoniacal	25
4.2.5. Nitrógeno Orgánico	25
4.2.6. Fósforo.....	26
4.2.7. Compuestos Orgánicos.....	26
CAPITULO III. METODOLOGÍA	28
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	28
2. FAMILIARIZACIÓN Y MANEJO DE LOS EQUIPOS.....	28
3. MÉTODO EXPERIMENTAL	29
3.1. Preparación del Agua o Efluente a tratar	29
3.2. Aclimatación de los Microorganismos	31
3.3. Pruebas de Consumo de Oxígeno en presencia de Contaminantes.....	34
3.4. Pruebas en el Reactor Biológico BIOSTAT [®] E.....	36

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....	71
CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES	75
CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
CAPÍTULO VIII. APÉNDICES.....	78
APÉNDICE A. Información de los compuestos.....	78
APÉNDICE B. Métodos Analíticos	84
APÉNDICE C. Resultados del Proceso de Aclimatación	95
APÉNDICE D. Resultados de las pruebas de Consumo de Oxígeno.....	99
APÉNDICE E. Resultados de los ensayos en el Reactor Biológico.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Características de las tecnologías más utilizadas de tratamiento biológico de aguas.....	14
Tabla N°2. Contaminación del agua de acuerdo a los valores de oxígeno disuelto. ...	22
Tabla N°3. Sales para preparar el agua sintética.....	30
Tabla N°4. Concentraciones para las pruebas de consumo de oxígeno en presencia de contaminantes.....	35
Tabla N° 5. Valores de las variables a controlar en cada uno de los ensayos.....	40
Tabla N°6. Concentraciones de Tolueno, Cloruro de Vinilo y Cloruro de Etileno empleadas en cada uno de los ensayos con agua sintética.....	42
Tabla N°7. Concentraciones de Tolueno, Cloruro de Vinilo y Cloruro de Etileno empleadas en el ensayo con efluente industrial.	44
Tabla N°8. Caracterización de la muestra de efluente industrial.....	51
Tabla N°9. Variación de la masa de EDC en el transcurso del ensayo.....	63
Tabla N°10. Variación de la masa de tolueno en el transcurso del ensayo.....	67
Tabla N°11. Concentraciones de los compuestos en la prueba de biodegradación con la muestra de efluente industrial.	68
Tabla N°12. Variación de la masa de EDC y tolueno en el transcurso del ensayo.....	69
Tabla N°13. Variación de la Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo. 95	
Tabla N°14. Variación de los sólidos suspendidos volátiles en función del tiempo. .95	
Tabla N°15. Consumo de oxígeno de las muestras tomadas en el recipiente de aclimatación al agua sintética.....	96
Tabla N°16. Variación de la Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo. 97	
Tabla N°17. Variación de los sólidos suspendidos volátiles en función del tiempo. .97	
Tabla N°18. Consumo de oxígeno de las muestras tomadas en el recipiente de aclimatación al efluente.....	98
Tabla N°19. Datos experimentales obtenidos en las pruebas de consumo de oxígeno para el cloruro de etileno.....	99
Tabla N°20. Valores de la velocidad de consumo para el cloruro de etileno.	101
Tabla N°21. Datos experimentales obtenidos en las pruebas de consumo de oxígeno para el cloruro de vinilo.	102
Tabla N°22. Valores de las pendientes de las rectas tangentes a las curvas de consumo de oxígeno para el cloruro de vinilo.	104
Tabla N°23. Datos experimentales obtenidos en las pruebas de consumo de oxígeno para el tolueno.	105

Tabla N°24. Valores de las pendientes de las rectas tangentes a las curvas de consumo de oxígeno para el tolueno.....	107
Tabla N°25. Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo para la prueba control (blanco) en el reactor biológico.....	108
Tabla N°26. Concentración de nutrientes dentro del reactor biológico para la prueba control (blanco) en el reactor biológico.....	108
Tabla N°27. Parámetros controlados en el reactor biológico para la prueba control (blanco) en el reactor biológico.....	108
Tabla N°28. Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo para el ensayo con EDC a 20 ppm.....	109
Tabla N°29. Sólidos Suspendidos Volátiles en función del tiempo para el ensayo con EDC a 20 ppm.....	109
Tabla N°30. Concentración de nutrientes dentro del reactor biológico en el ensayo con EDC a 20 ppm.....	109
Tabla N°31. Parámetros controlados en el reactor biológico durante el ensayo con EDC a 20 ppm.....	110
Tabla N°32. Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo para el ensayo con tolueno a 70 ppm.....	110
Tabla N°34. Concentración de nutrientes dentro del reactor biológico en el ensayo con tolueno a 70 ppm.....	110
Tabla N°35. Parámetros controlados en el reactor biológico durante el ensayo con tolueno a 70 ppm.....	111
Tabla N°36. Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo para el ensayo con el efluente.....	111
Tabla N°37. Sólidos Suspendidos Volátiles en función del tiempo para el ensayo con el efluente.....	111
Tabla N°38. Concentración de nutrientes dentro del reactor biológico en el ensayo con el efluente.....	112
Tabla N°39. Parámetros controlados en el reactor biológico durante el ensayo con el efluente.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1. Curva característica de sistema bacteriano en términos del número de microorganismos.....	11
Figura N°2. Recipiente de Aclimatación.....	32
Figura N°3. Diagrama del Reactor Biológico BIOSTAT®E.....	36
Figura N°4. Evolución de la actividad degradativa de la biomasa como una función del tiempo de aclimatación al agua sintética.....	46
Figura N°5. Evolución de la actividad reproductiva de la biomasa como una función del tiempo de aclimatación al agua sintética.....	48
Figura N°6. Evolución de la actividad respiratoria de los microorganismos mediante la variación del oxígeno disuelto en el tiempo en la aclimatación al agua sintética... 50	50
Figura N°7. Evolución de la actividad degradativa de la biomasa como una función del tiempo de aclimatación al efluente.....	53
Figura N°8. Evolución de la actividad reproductiva de la biomasa como una función del tiempo de aclimatación al efluente.....	54
Figura N°9. Evolución de la actividad respiratoria de los microorganismos mediante la variación del oxígeno disuelto en el tiempo en la aclimatación al efluente.....	56
Figura N°10. Comparación de la actividad degradativa de los microorganismos entre la aclimatación al agua sintética y al efluente.....	57
Figura N°11. Variación de la velocidad de consumo en función de la concentración del cloruro de etileno.....	59
Figura N°12. Variación de la velocidad de consumo en función de la concentración de MVC.....	60
Figura N°13. Variación de la velocidad de consumo en función de la concentración de tolueno.....	60
Figura N°14. Variación de la DQO en función del tiempo para el ensayo en el reactor con agua sintética y cloruro de etileno.....	62
Figura N°15. Variación de los SSV en la prueba de EDC con agua sintética.....	64
Figura N°16. Variación de la DQO en la prueba de tolueno con agua sintética.....	66
Figura N°17. Variación de la DQO en la prueba en el reactor con el efluente.....	68
Figura N° 19. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 0 ppm (blanco inicial) 100	100
Figura N°20. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 5 ppm.....	100
Figura N°21. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 10 ppm.....	100
Figura N°22. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 20 ppm.....	100

Figura N°23. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 30 ppm.....	100
Figura N°24. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 50 ppm.....	100
Figura N°25. Consumo de oxígeno para los ensayos de cloruro de etileno a 0 ppm (blanco final).....	101
Figura N°26. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 0 ppm (blanco inicial) ..	103
Figura N°27. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 4 ppm.	103
Figura N°28. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 8 ppm	103
Figura N°29. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 10 ppm.	103
Figura N°30. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 16 ppm	103
Figura N°31. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 32 ppm.	103
Figura N°32. Consumo de oxígeno para los ensayos de cloruro de etileno a 0 ppm (blanco final).....	104
Figura N°33. Consumo de oxígeno del tolueno a 0 ppm (blanco inicial).....	106
Figura N°34. Consumo de oxígeno del tolueno a 30 ppm.	106
Figura N°35. Consumo de oxígeno del tolueno a 50 ppm.	106
Figura N°36. Consumo de oxígeno del tolueno a 70 ppm.	106
Figura N°37. Consumo de oxígeno del tolueno a 85 ppm.	106
Figura N°38. Consumo de oxígeno del tolueno a 100 ppm.	106
Figura N°39. Consumo de oxígeno para los ensayos de cloruro de etileno a 0 ppm (blanco final).....	107

INTRODUCCIÓN

En las industrias químicas, farmacéuticas, plásticas y petroquímicas, los procesos de producción son llevados a cabo para la obtención de diversos productos químicos. Cada uno de estos procesos generan una serie de efluentes que contienen grandes cargas de materia orgánica con altas concentraciones de contaminantes tóxicos, dentro de estos tóxicos se encuentran principalmente los hidrocarburos aromáticos y compuestos clorados que debido a su toxicidad resulta difícil el tratamiento biológico.

Si el material que debe ser eliminado es de naturaleza orgánica el tratamiento implica usualmente actividades de microorganismos que oxidan y convierten la materia orgánica esencialmente, en dióxido de carbono, agua y tejido celular, a este tipo de tratamiento se le denomina tratamiento biológico. Este proceso, a su vez, puede dividirse en anaeróbico y aeróbico, diferenciados específicamente por la ausencia o presencia de oxígeno en el sistema.

Para biodegradar sustancias tóxicas provenientes de una planta industrial, las cuales se definen como aquellos compuestos o grupos de compuestos que exhiben inhibición para los procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales, es importante aclimatar a las bacterias al desecho operando un incubador, aquí se ponen en contacto los microorganismos con los compuestos tóxicos, en comunidades microbianas aerobias los períodos de aclimatación pueden durar entre varias horas a varios días dependiendo de las características del agua residual y de las características iniciales del inóculo, de esta manera se obtienen microorganismos adaptados a la materia orgánica en particular que va a ser digerida.

El proceso de aclimatación resulta de la eliminación de las bacterias no eficaces y en la selección y multiplicación de aquellos organismos que tienen capacidad de digerir

materia orgánica que pueda ser realmente tóxica, además pueden existir transformaciones fisiológicas en el sistema metabólico de los microorganismos, es decir, alteraciones a nivel de regulación y producción enzimática, mutaciones, etc. Luego que el proceso de aclimatación es finalizado, las cepas bacterianas están preparadas para realizar la digestión de los compuestos orgánicos a evaluar.

Con este estudio se propone estudiar el efecto de algunos de estos compuestos orgánicos tóxicos, en este caso el cloruro de etileno, el cloruro de vinilo y el tolueno, sobre la actividad de las bacterias que componen la biomasa del proceso de tratamiento biológico y estudiar la biodegradabilidad de los mismos realizando para ello pruebas de degradación en el laboratorio con aplicación de microorganismos aclimatados a estos compuestos. Se incluirán ensayos en un reactor biológico de control automatizado a escala laboratorio, lo cual permitirá completar la evaluación del proceso de tratamiento por lodos activados en condiciones discontinuas.

CAPITULO I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa PDVSA se encarga de la exploración, producción y refinación de petróleo en Venezuela, además de producir una gran variedad de corrientes de productos que incluyen el gas natural para la industria del plástico, olefinas y diversos productos químicos. Los compuestos que se encuentran en la corriente de efluentes de cada uno de estos procesos son muy variados y en algunos casos se encuentran en altas concentraciones, estos compuestos deben ser eliminados o se debe reducir su concentración mediante un proceso de tratamiento específico.

Existen diversos métodos de tratamiento de efluentes, pero en la mayoría de los casos para los efluentes industriales se utiliza el proceso de tratamiento biológico, en donde se busca como objetivo principal eliminar o reducir la concentración de las compuestos definidos como tóxicos por medio de la acción metabólica de microorganismos.

Los compuestos definidos como tóxicos en general son los pertenecientes al grupo de los aromáticos, fenólicos y organoclorados. Estos grupos de compuestos orgánicos en la mayoría de los casos son resistentes a la biodegradación y a niveles altos de concentración son perjudiciales para los microorganismos que constituyen la biomasa del sistema. Estos contaminantes tóxicos al entrar al proceso de tratamiento pueden destruir a los microorganismos y de esta manera crear una deficiencia de bacterias lo cual provocaría un desequilibrio en el sistema y una interrupción en el proceso.

El presente proyecto tiene como finalidad evaluar la biodegradabilidad del Cloruro de Etileno (EDC) el cual es utilizado como materia prima para la obtención del Monocloruro de Vinilo (MVC), del MVC el cual es utilizado para la producción de

Policloruro de Vinilo (PVC) y se encuentra presente en la corriente de efluentes de este proceso; y del tolueno el cual forma parte de la corriente de efluentes provenientes de las plantas de Olefinas y de producción de diferentes tipos de plásticos (polietileno y polipropileno). Esta evaluación se realizará mediante un conjunto de pruebas de laboratorio que empezarán con un proceso de aclimatación, para luego realizar ensayos de consumo de oxígeno y por último pruebas en un reactor biológico de control automático donde se simulará un proceso de lodos activados en condiciones discontinuas.

2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Para la elaboración de este trabajo es necesario tomar en cuenta las investigaciones realizadas anteriormente sobre la biodegradación de los compuestos orgánicos a evaluar, de tal manera que se pueda tener un enfoque previo del estudio. Existen diversas investigaciones previas las cuales son consideradas en este proyecto, el contenido esencial de cada una de ellas se presenta a continuación:

- ◆ En 1997, Ven Chang, Bin Wu y Ying Yuan, estudiaron la degradación de una solución que contenía 100 mg/L de tolueno en un medio de cultivo que contenía *Pseudomonas sp D8*, el pH se mantuvo en 7,0 y el experimento se realizó a una temperatura de 30°C, como resultado obtuvieron una biodegradación rápida y eficiente en un espacio de tiempo entre 6 y 8 horas.
- ◆ En el año 2004, Hamed, Bayraktar y Mehmetoglu, en un sistema acuoso-orgánico evaluaron la degradabilidad del tolueno por las *Pseudomonas putida F1*, el experimento se realizó a 30°C y pH neutro. Ellos realizaron pruebas a diferentes concentraciones de tolueno y encontraron que la velocidad de biodegradación aumentaba a medida que se incrementaba la concentración de tolueno. Para una concentración de 1050 mg/L la velocidad de biodegradación fue de 105 mg/L*h y para una concentración de 2100 mg/L la velocidad fue de 175 mg/L*h.

- ◆ En 1996, Herbst y Wiesmann realizaron ensayos de degradación del EDC en un reactor fluidizado, al cual se le proporcionaba oxígeno por difusión a través de una membrana sintética, se obtuvo como resultado una alta concentración de bacterias y una tasa de degradación de 600 mg/L en una hora.
- ◆ Stucki, Thüer y Bentz (1992), estudiaron la degradación del EDC en un reactor biológico fijo de cristal en un rango de temperaturas entre 10 °C y 30°C y pH neutro, ellos obtuvieron como resultado una remoción del 80% de la concentración de alimentación del cloruro de etileno.
- ◆ Broholm, Ludvigsen, Feldthusen y Ostergaard (2005) realizaron estudios sobre la biodegradación aeróbica del cloruro de vinilo y obtuvieron como resultado la remoción del mismo por debajo de los límites de detección en un período entre 204 y 274 días.

3. OBJETIVOS

De acuerdo a lo expuesto en el planteamiento del problema se presentan los objetivos que se persiguen con la realización de este proyecto.

Objetivo General

Estudiar la biodegradabilidad del Cloruro de Etileno, Cloruro de Vinilo y el Tolueno, y su efecto sobre el sistema de tratamiento biológico de efluentes en un reactor biológico a escala laboratorio.

Objetivos Específicos

- ◆ Comprender el funcionamiento y manejo del reactor biológico de control automatizado a escala laboratorio y familiarizarse con el mismo.

- ◆ Evaluar el proceso de aclimatación de los microorganismos y estudiar su reproducción, actividad biológica y actividad respiratoria, determinando sólidos suspendidos volátiles, Demanda Química de Oxígeno y consumo de oxígeno.

- ◆ Evaluar el efecto del Cloruro de etileno, Cloruro de vinilo y el Tolueno a diferentes concentraciones en el consumo de oxígeno de los microorganismos.

- ◆ Evaluar la biodegradabilidad del Cloruro de Etileno, Cloruro de vinilo y Tolueno y su efecto en el tratamiento biológico de efluentes por lodos activados, controlando el pH, la temperatura y la cantidad de oxígeno disuelto en el sistema.

- ◆ Evaluar el proceso de tratamiento de efluentes por lodos activados en presencia de la mezcla del Cloruro de Etileno, Cloruro de vinilo y el Tolueno controlando el pH, la temperatura y la cantidad de oxígeno disuelto en el sistema.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A continuación se presentan los fundamentos en los cuales se basa este Trabajo de Investigación.

1. TRATAMIENTO DE EFLUENTES

Los efluentes industriales son un conjunto muy variado de residuos provenientes de los diferentes procesos de fabricación, producción y manejo industrial, y que para ser desechados deben ser tratados previamente de tal manera que cumplan con las especificaciones de calidad establecidas por el Ministerio del Ambiente y luego puedan ser descargados en los sistemas naturales tales como ríos, lagos, mares, etc.^[QUINTERO, 1990]

El tratamiento de efluentes se puede definir como la secuencia de procesos necesarios para eliminar o reducir la carga de materia orgánica e inorgánica presente en las aguas residuales, a fin de alcanzar en la misma un determinado grado de calidad que permita cumplir los requerimientos para su reuso o disposición. El tipo y el grado de tratamiento que debe aplicarse a un efluente depende de la composición fisicoquímica del agua y el destino que se le dará una vez tratada. Estos tratamientos pueden llevarse a cabo mediante diferentes métodos, los cuales se basan en procesos físicos, químicos o biológicos.^[QUINTERO, 1990]

Tipos de Tratamiento de Efluentes

Desde el punto de vista de la forma de tratamiento de los líquidos residuales industriales, los procedimientos para el tratamiento de efluentes pueden clasificarse en:

Mecánicos y físicos: Consiste en separar los contaminantes del agua aplicando predominantemente fuerzas físicas, los métodos más utilizados son: tamices, sedimentación, flotación y filtración.

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

Químicos: En este tratamiento cuando los efluentes vienen con sustancias tóxicas y bacterias, se emplean elementos y compuestos químicos que eliminan por precipitación, transformación en otros compuestos tolerables, cloración, neutralización, adsorción o combustión a los contaminantes.

Térmicos: Este tratamiento consiste principalmente en utilizar cambios de temperatura para eliminar los contaminantes de los efluentes, ya sea por calefacción, enfriamiento o evaporación.

Biológicos: Consiste en una degradación de la materia orgánica por medio de la acción de microorganismos o bacterias, los métodos mas utilizados son: lechos percoladores, discos rotatorios, lodos activados y lagunas de estabilización. [QUINTERO, 1990]

En particular en este proyecto se desarrollará el sistema de tratamiento biológico de efluentes, el cual es descrito a continuación.

2. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE EFLUENTES

Este tipo de tratamiento se aplica por lo general en tratamientos secundarios que consisten en la oxidación de la materia orgánica por medio de la actividad metabólica de microorganismos.

Los procesos biológicos se basan en la teoría de la bioquímica, la cual es una ciencia que estudia la biotransformación de sustancias químicas complejas; es decir, los cambios químicos en los compuestos provocados por los organismos vivos. Las reacciones pueden ser *intracelulares* o *extracelulares*. Las reacciones hidrolíticas (ruptura de los enlaces químicos por adición de agua) son generalmente extracelulares, y sólo pueden ser de esta manera, puesto que estas reacciones son usualmente necesarias para disminuir la complejidad de los compuestos orgánicos al punto en el que se puedan dializar por la pared celular; los requerimientos de energía de las reacciones hidrolíticas se consideran nulos. Las reacciones oxidativas son

[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

intracelulares y producen energía de acuerdo con la energía libre de la reacción particular que tenga lugar. [SAWYER, 2001]

Estas reacciones biológicas se producen por la acción de diferentes tipos de microorganismos y por ello es necesario conocer la clasificación, fuente de alimentación y las características biológicas de los mismos.

2.1. Microorganismos

2.1.1. Definición

Son diminutos seres vivos que individualmente no se pueden observar a simple vista si no por medio de un microscopio. Los microorganismos de especial interés para la Bioquímica incluyen hongos, bacterias, algas y protozoos. Todos los organismos necesitan para su crecimiento y desarrollo fuentes de carbono, oxígeno, nitrógeno, azufre, fósforo y agua; algunos requieren además vitaminas específicas. Las bacterias fotosintéticas necesitan fuentes específicas de protones, y las bacterias quimiosintéticas necesitan un sustrato oxidable.

Las reacciones bioquímicas ocurren normalmente a temperaturas entre 0 y 60 °C. Los microorganismos se clasifican según el rango óptimo de temperatura para su desarrollo en *psicrofílicos* (0-10)°C, *mesofílicos* (10-40)°C y *termofílicos* (>40°C).

Los organismos que sólo usan carbono inorgánico como fuente para formar materia orgánica se llaman *autótrofos*. Los organismos que necesitan compuestos sintetizados por otros organismos se llaman *heterótrofos* (que se alimentan de otros). Muchos organismos heterótrofos secretan enzimas que hidrolizan grandes moléculas tales como el almidón y la celulosa para obtener unidades más pequeñas que puedan entrar fácilmente en la célula. [SAWYER, 2001] Los organismos que se alimentan de materia orgánica en descomposición se llaman *saprófitos*.

[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

Entre los microorganismos de especial interés para la bioquímica nombrados anteriormente, las bacterias son las más deseables en los cultivos dentro de un proceso de tratamiento biológico y esto se debe a sus características de reproducción, metabolismo y acción biológica. Las bacterias son diminutos organismos unicelulares, cuyo tamaño oscila entre 0,5 y 20 μm , aunque algunas pueden ser más pequeñas y unas pocas superan los 100 μm de longitud. La pared celular es la que determina la forma de la bacteria; redonda u ovoide, con forma de varilla o espiral. Algunas bacterias pueden variar de forma en función de las condiciones de cultivo, a este fenómeno se llama *pleomorfismo*.^[PERRY, 2001]

Las bacterias se reproducen por fisión binaria, de manera sexual o por gemación. En general lo hacen por fisión binaria; en donde, la célula original se convierte en dos organismos nuevos. El tiempo requerido para cada división, conocido como *tiempo de generación* puede variar desde menos de 20 minutos hasta varios días.

2.1.2. Proceso de Aclimatación

Es importante tener en cuenta que antes de realizar cualquier proceso de degradación los microorganismos que conforman el lodo biológico deben pasar por un proceso previo de aclimatación, en el cual se ponen en contacto la materia orgánica a ser digerida y las bacterias, generalmente en un incubador, durante un período que puede durar entre varias horas o varios días, dependiendo de las características del agua residual y de las características iniciales del inóculo.^[BUITRÓN, 2004]

Este proceso se realiza con la finalidad de acostumbrar a los microorganismos al sustrato que van a digerir, ya que durante esta fase existe una selección y multiplicación de microorganismos especializados, además pueden existir transformaciones fisiológicas en el sistema metabólico de los mismos, es decir, alteraciones a nivel de regulación producción enzimática, mutaciones, etc.^[BUITRÓN, 2004] Los microorganismos que resultan de este proceso están preparados para degradar con mayor facilidad la materia orgánica con la cual fueron aclimatados.

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

2.1.3. Patrón de Crecimiento

Es importante estudiar el patrón general de crecimiento de las bacterias en un cultivo discontinuo, esto se muestra en la figura N°1, en donde inicialmente se inocula un número pequeño de organismos en un volumen fijo de medio de cultivo, y el número viable de microorganismos se registra como una función del tiempo, este patrón sigue la misma tendencia en términos tanto del número de microorganismos como de masa bacteriana. El patrón de crecimiento basado en el número de células, tiene cuatro fases más o menos distintas.

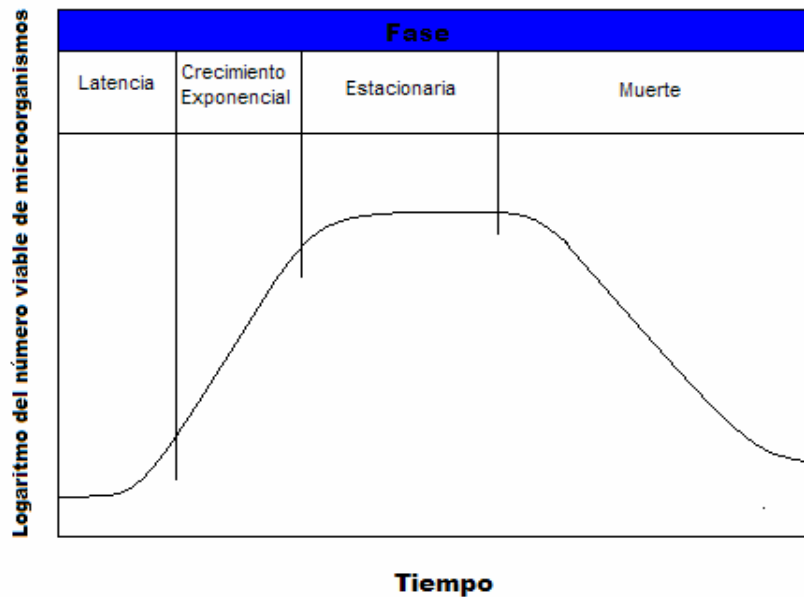


Figura N°1. Curva característica de sistema bacteriano en términos del número de microorganismos. [CRITES, 2001]

a) *Fase de latencia:* Se inicia al agregar un inoculado a un medio de cultivo, y representa el tiempo que requieren los organismos para aclimatarse a su nuevo ambiente y empezar a dividirse.

[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

b) *Fase Exponencial*: Durante este período las células se dividen a cierta tasa determinada por su tiempo generacional y su habilidad para procesar alimento (tasa constante de crecimiento porcentual).

c) *Fase Estacionaria*: Aquí la población permanece estacionaria. Las causas que explican este fenómeno son: a) las células agotaron al sustrato o los nutrientes necesarios para su crecimiento y b) el crecimiento de células nuevas se compensa con el número de células muertas.

d) *Fase de muerte exponencial*: Durante esta fase, la tasa de mortalidad de las bacterias excede la producción de células nuevas. La tasa de mortalidad generalmente es una función de las características ambientales en las que se encuentre el medio de cultivo. En algunos casos la fase de muerte exponencial es la inversa de la fase de crecimiento exponencial.^[CRITES, 2001]

Las bacterias pueden clasificarse a su vez en varios tipos, las bacterias *anaeróbicas* con las que pueden reproducirse y realizar la oxidación de la materia orgánica sin presencia de aire y las *aeróbicas* son las que necesitan oxígeno para poder desarrollarse y ejercer su actividad degradativa. Además existen un tipo de bacterias que pueden vivir tanto en la presencia de oxígeno como en su ausencia, estas se denominan bacterias *facultativas*.

El proceso de tratamiento biológico se clasifica a su vez en dos tipos de tratamiento: el anaeróbico y el aeróbico, pero particularmente en esta investigación se estudiará el proceso de tratamiento aeróbico el cual se describe a continuación.

2.2. Tratamiento Aeróbico

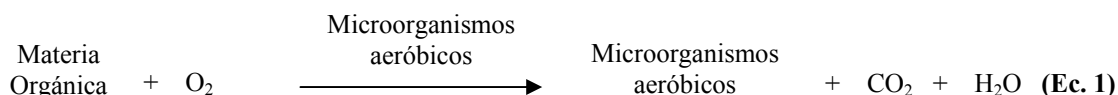
Este tipo de tratamiento secundario remueve la materia orgánica de las aguas residuales en presencia de aire. En el tratamiento aeróbico el crecimiento de los

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

microorganismos y su actividad degradativa crecen proporcionalmente a la tasa de aireación.

La reacción involucrada en este tipo de tratamiento es la presentada a continuación.^[SAWYER, 2001]



Entre los procesos aeróbicos existe una diversidad de tecnologías disponibles tales como:

2.2.1. Filtros percoladores: consisten en lechos de material de tamaño variable o sintético que por acción del tratamiento lleva adherido un limo formado por el material biológico a través del cual el efluente fluye.

2.2.2. Discos rotatorios: constituyen una modificación de los sistemas de filtración fija y consisten en discos rotantes que van montados en un eje horizontal.

2.2.3. Lagunas de estabilización: son sistemas de bajo costo que utilizan bacterias y algas para reducir los componentes orgánicos y eliminar los microorganismos patógenos.

2.2.4. Lodos activados: es un proceso que se lleva a cabo en un tanque, donde se mantiene una alta concentración de microorganismos (biomasa), los cuales se encuentran en suspensión mediante aireación; en este proceso se recirculan los lodos formados y los materiales solubles coloidales son transformados en CO₂, H₂O y células.

En la tabla N°1 se encuentran las ventajas y desventajas de algunos métodos de tratamiento biológico.

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

Tabla N°1. Características de las tecnologías más utilizadas de tratamiento biológico de aguas.^[1]

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Lagunas de oxidación	Económica	Producción de olores Conversión lenta de muchos químicos Tiempos de residencia grandes
Laguna Aireada	Económica Velocidad de oxidación más alta	Se requiere la remoción periódica de lodos
Lodos activados	Velocidad de oxidación alta Recicla biomasa Tiempo de residencia corto	Pérdida de eficiencia por cambios en el flujo y carga

Particularmente en este estudio se evaluó la biodegradación de compuestos orgánicos en un reactor biológico con lodos activados en condiciones discontinuas, para realizar estas pruebas es necesario conocer en que se basa la biodegradación.

3. BIODEGRADACIÓN

Es el proceso mediante el cual se realiza una degradación de la materia orgánica por medio de la actividad de microorganismos. La biodegradación de un contaminante se considera completa cuando sus carbonos son oxidados a CO₂ con la producción de agua. Debido a que los productos no son moléculas orgánicas, se dice que la reacción ha resultado en la mineralización del contaminante, estas reacciones de mineralización se consideran ideales para la salud y el ambiente.

Muchos contaminantes especialmente los orgánicos, pueden ser modificados por los organismos de tal forma que sus efectos negativos se reducen. Esta modificación de

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

los químicos orgánicos (*biorremediación*) generalmente resulta en productos que son termodinámicamente más estables que los productos químicos originarios. Estos contaminantes y desechos tienen efectos dañinos sobre los organismos vivos.^[SAWYER, 2001]

La introducción de un contaminante puede alterar la abundancia relativa y la actividad de varias clases de microorganismos que se presentan en condiciones naturales. Los microorganismos que están mejor preparados para existir en la presencia de contaminantes poseen una serie de rasgos que le confieren una ventaja selectiva como: tolerancia a un contaminante en particular, un medio de desintoxicar cuando éste entra al microambiente del organismo, y la capacidad de derivar beneficio del contaminante, como nutrientes y energía.^[SAWYER, 2001]

En el sistema de tratamiento biológico de efluentes, algunas veces, puede aplicarse la mezcla de efluentes industriales y aguas residuales domésticas, con lo cual se obtiene un aporte de materia orgánica fácilmente biodegradable, proveniente de los efluentes domésticos, que favorece la producción de microorganismos para la biodegradación de la materia orgánica de la mezcla de efluentes en el medio aeróbico.^[1]

Las condiciones ambientales también juegan un papel muy importante en la regulación de los procesos biológicos en general, y particularmente en la biodegradación por lodos activados, ya que la actividad biológica de las bacterias depende de ciertos factores entre los cuales se encuentran: el pH, la temperatura, el oxígeno, la concentración de nutrientes y la concentración del contaminantes.^[1]

La concentración de contaminantes es uno de los factores más importantes ya que influye significativamente en la actividad metabólica de las bacterias, a continuación se definen que tipos de contaminantes puede contener una corriente de aguas residuales.

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

Entre los contaminantes que puede contener una corriente en la que se descargan aguas negras, desperdicios industriales o agrícolas, se cuentan: [SAWYER, 2001]

- a) *Materia orgánica biodegradable*: La demanda de oxígeno para la descomposición de estos materiales se satisface con el oxígeno disuelto en el agua en que se descargaron. Este oxígeno, a su vez, es necesario para el mantenimiento de la fauna, por lo cual, la disminución del oxígeno disuelto establece condiciones anaeróbicas que afectan negativamente a las especies vivas del ecosistema.
- b) *Otros nutrientes (nitratos, amoníaco, fosfatos)*: Por ser el nitrógeno y el fósforo elementos esenciales para la vida, un exceso de ellos causa un proceso de nitrificación que intensifica la producción de algas que consumen nutrientes con una rapidez mayor que otras especies productivas y llevan el sistema a una rápida extinción.
- c) *Elementos tóxicos*: pequeñas concentraciones de plomo, cadmio y mercurio, que son letales.
- d) *Derivados del petróleo*: solventes y productos tóxicos.
- e) *Otros*: insecticidas, cloro, detergentes, etc.

Hay varias clases de compuestos que son resistentes a la biodegradación, la resistencia se evidencia a través de la acumulación bajo condiciones ambientales, la acumulación de una sustancia química indica que su tasa de descomposición es más baja que la de introducción.

Ciertas sustancias químicas que pasan al medio ambiente se descomponen poco a poco y son asimiladas por los procesos naturales. De esta manera cuando quedan diluidas dejan de plantear riesgos para el ambiente. Sin embargo hay dos clases de sustancias químicas que no se diluyen: [METCALF, 1996]

- a) *Metales pesados y sus compuestos*: Los metales pesados más peligrosos son el plomo, mercurio, arsénico, cadmio, estaño, cromo, zinc y cobre. Estos metales son

[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

muy usados en la industria y entran al ambiente donde quiera que los artículos en donde se encuentran se produzcan, se usen o se desechen. Estos metales pesados son de toxicidad extrema porque como iones o en ciertos compuestos son solubles en agua y el organismo los absorbe con facilidad, dentro del cuerpo tienden a combinarse con las enzimas e inhibir su funcionamiento.

b) Compuestos sintéticos no biodegradables: Los compuestos orgánicos sintéticos son la base de todos los plásticos, fibras y gomas sintéticas, barnices, solventes, pesticidas y cientos de otros productos. Dentro de estos compuestos entran principalmente el tolueno, benceno, xileno, etc. Estas sustancias son tóxicas porque son tan semejantes a los compuestos orgánicos naturales, que el cuerpo los asimila. En dosis altas producen envenenamiento, sin embargo, en dosis reducidas y en períodos prolongados tiene efectos mutagénicos, cancerígenos, teratogénicos, causan disfunciones renales y problemas físicos y neurológicos.

Los hidrocarburos halogenados también son compuestos muy peligrosos para la salud porque no son biodegradables y tienden a acumularse, los más comunes son los clorados tales como el monocloruro de vinilo, bifenilo policlorado, dicloroetano, tetraclorofenol carbono, etc.

Dentro de estos compuestos sintéticos se encuentran los estudiados en este proyecto y a continuación se presenta una breve descripción de las características de cada uno de ellos:

Cloruro de Etileno (EDC)

Su nombre comercial es 1,2 Dicloroetano, en condiciones normales es un líquido incoloro con olor parecido al del cloroformo y un sabor dulzón, su fórmula química es $\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{Cl}$. Es soluble en alcohol, acetona, benceno y éter. Se produce a partir del etileno mediante la cloración del mismo en presencia de cloruro férrico. Sus principales usos son: como materia prima en la obtención del cloruro de vinilo y otros

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

compuestos como el tricloroetano, etilenaminas, tricloroetileno y etilenglicol, además de usarse como disolvente de plaguicidas y como fumigante insecticida; también se utiliza como solvente de laboratorio, como agente de secado en colas y para la fusión de plásticos. En el apéndice A, se puede observar la hoja de seguridad donde aparecen las propiedades y las características más importantes de este contaminante.

Monocloruro de Vinilo (MVC)

El cloruro de vinilo también llamado monocloroetileno o cloroeteno, en condiciones normales es un gas incoloro que polimeriza bajo la acción de la luz, débilmente soluble en agua pero muy soluble en disolventes orgánicos, su fórmula química molecular es $\text{CH}_2=\text{CHCl}$. Se produce en grandes cantidades a partir del dicloruro de etileno. Sus principales usos son: como monómero en la fabricación de plásticos y resinas polivinílicas (PVC), como refrigerante e intermediario químico. Es muy inflamable y produce explosiones con facilidad, por lo que su manejo independientemente de sus riesgos tóxicos, requiere estrictos controles de seguridad. Este químico pertenece al grupo de hidrocarburos halogenados donde un residuo alquílico de dos carbonos es sustituido por un halógeno (Cl). Actualmente está prohibido su uso como refrigerante en artefactos domésticos y como propelente de aerosoles debido a su acción cancerígena. En el apéndice A, se puede observar la hoja de seguridad donde aparecen las propiedades y las características más importantes de este contaminante.^[2]

Tolueno

En condiciones normales es un líquido incoloro con un olor característico. Se encuentra en forma natural en el petróleo y en el árbol tolú. También se produce durante la manufactura de la gasolina y otros combustibles a partir de petróleo crudo y en la manufactura de coque a partir de carbón. Es utilizado en la fabricación de pinturas, diluyentes de pinturas, barniz para la uñas, lacas, adhesivos y gomas, en ciertos procesos de imprenta y en curtido de cueros. En el apéndice A se encuentra la

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

hoja de seguridad de este compuesto en donde aparecen las propiedades y características más importantes del mismo, así como también los efectos a la salud.

Cuando se realizan estudios de biodegradabilidad y evaluación de sistemas de tratamiento de efluentes es importante tener conocimiento de diversos parámetros que permiten caracterizar a los efluentes, estos parámetros se determinan para conocer el grado de contaminación de las aguas y para asegurar un buen grado de calidad en el tratamiento de las mismas.

4. PARÁMETROS PARA CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS

Estos parámetros se dividen principalmente en dos categorías: físicos y químicos.^[LÓPEZ, 1998]

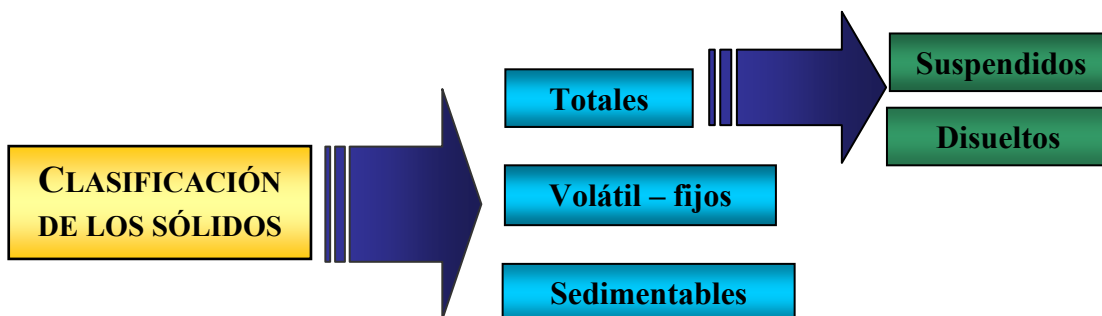
4.1. Parámetros Físicos

Estos se utilizan para analizar y cuantificar las características físicas de las aguas, los utilizados generalmente son los siguientes:

4.1.1. Sólidos

El carácter contaminante de las aguas se debe principalmente a la presencia de sólidos en las aguas. Los sólidos son un parámetro físico que da una idea de la naturaleza y grado de contaminación del líquido residual.^[LÓPEZ, 1998]

Los sólidos se pueden clasificar en varios tipos como se puede observar a continuación:



^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

4.1.1.1. *Sólidos Totales*^[LÓPEZ, 1998]

Son aquellos sólidos que permanecen después de la evaporación del líquido residual a 103 °C. Su valor da poca información sobre la naturaleza y el grado de contaminación del líquido residual.

Los sólidos totales se pueden clasificar de acuerdo a su diámetro: sólidos suspendidos aquellos con tamaño mayor a 0,45 µm; y los sólidos disueltos son aquellos con tamaño menor a 0,45 micras.

Para separar los sólidos suspendidos de los totales, se hace pasar el líquido residual por un papel de filtro de 0,45 micra, los sólidos retenidos en este papel de filtro constituyen los sólidos suspendidos, los sólidos que atraviesan el papel son los sólidos disueltos.

4.1.1.2. *Sólidos volátiles y sólidos fijos*^[LÓPEZ, 1998]

Con la finalidad de conocer la naturaleza orgánica e inorgánica de los sólidos se determinan los sólidos volátiles y fijos.

Cuando los sólidos totales se calientan a 550 °C la pérdida es conocida como sólidos volátiles, debido a que el material orgánico es volatilizado a esta temperatura. Los sólidos volátiles son indicadores de la materia carbonada contenida en las aguas residuales, por lo tanto, representan una fracción muy importante, susceptible a ser biodegradada en los sistemas de tratamiento biológico. Los sólidos volátiles se utilizan para el control y la eficiencia del sistema de tratamiento así como también para cuantificar la masa microbiana en el sistema biológico.

Los sólidos que permanecen a 550°C se conocen como sólidos fijos y son considerados de naturaleza inorgánica.

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

4.1.1.3. Sólidos sedimentables^[LÓPEZ, 1998]

Son aquellos que por su propio peso, sedimentan por gravedad. Se considera que los sólidos sedimentables son mayores de 10 micras. Se determina en un cono graduado de un litro en el cual se deja en reposo durante 30 minutos.

4.1.2. Conductividad

Es una medida de la capacidad del agua de conducir la corriente eléctrica, es un parámetro que está relacionado con la cantidad de iones presentes en el agua y los sólidos disueltos. Se conoce la conductividad midiendo la resistencia eléctrica de un circuito eléctrico. Son muy pocos los líquidos residuales que pueden ejercer un efecto tóxico por conductividad. Se estima que valores de conductividad mayores a 5000 μ /cm puede ejercer efectos tóxicos en el sistema de tratamiento biológico.^[LÓPEZ, 1998]

4.2. Parámetros Químicos

Son los que involucran los componentes y características químicas de las aguas, entre ellos se encuentran:

4.2.1. Oxígeno Disuelto (OD)

En los desechos líquidos el oxígeno disuelto es el factor que determina que los cambios biológicos sean producidos por organismos aeróbicos o anaerobios. El factor más importante que limita la capacidad de purificación de las aguas naturales es la baja solubilidad del oxígeno. En los procesos de tratamiento biológico aeróbico, la solubilidad limitada del oxígeno tiene gran importancia porque es un medio para controlar que la velocidad de aireación asegure el aporte de suficiente cantidad de aire para mantener las condiciones aeróbicas y evitar el uso excesivo de aire y energía y por tanto el costo de la aireación.^[METCALF, 1996]

Las determinaciones de oxígeno disuelto son la base del análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, por tanto, son el principio para las mediciones más

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

importantes que se usan para evaluar la magnitud de la contaminación de los desechos industriales.

Existen dos procedimientos para la medición del oxígeno disuelto, el más antiguo y que todavía es un procedimiento importante se realiza mediante una titulación de oxidación-reducción utilizando procedimientos yodométricos. El segundo es una adaptación especializada de la polarografía, en el cual se emplea un electrodo cubierto por una membrana, después de hacer la calibración con el método yodométrico. [SAWYER, 2001]

La utilidad y ventaja de una buena aireación en los sistemas de tratamiento biológico:

- La aireación elimina gases indeseables: H₂S, aminas, tioles, etc.
- Un sistema biológico bien aireado produce menos lodos y éste tiene mejor característica de sedimentación.
- Reduce la posibilidad de abultamiento del lodo.
- El oxígeno disuelto es vital para la vida de los microorganismos aeróbicos.

Los niveles de oxígeno en las aguas residuales es un indicativo del grado de contaminación de las mismas. En la tabla N°2 [LÓPEZ, 1998] que se presenta a continuación se pueden observar el grado de contaminación de las aguas de acuerdo a los valores de oxígeno disuelto en la misma.

Tabla N°2. Contaminación del agua de acuerdo a los valores de oxígeno disuelto.

VALORES DE O ₂ (mg/L)	GRADO DE CONTAMINACIÓN DE MATERIA BIODEGRADABLE
0	Muy alta
0-2	Alta
2-4	Moderada
4-6	Poca
> 6	Muy poca o ninguna

[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

4.2.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Se define como la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias durante la estabilización de la materia orgánica susceptible de descomposición en condiciones aeróbicas. Al decir susceptible se hace referencia a que la materia orgánica puede servir de alimento a las bacterias y que su oxidación genera energía. Esta prueba es una de las más importantes en las operaciones de control de contaminación de las corrientes.^[SAWYER, 2001]

La prueba de DBO es esencialmente un procedimiento de bioensayo que mide el oxígeno consumido por los organismos vivos al utilizar la materia orgánica de un residuo, en condiciones lo más semejantes posibles a las de la naturaleza. Para hacer que la prueba sea cuantitativa, las muestras se deben proteger del aire evitando la reaireación a medida que el nivel de oxígeno disuelto disminuye. Esta prueba se puede considerar como un procedimiento de oxidación húmeda en el que los organismos vivos son el medio para la oxidación de la materia orgánica a dióxido de carbono y agua.^[RADZIUL, 1976]

La prueba de la DBO se basa en las determinaciones del oxígeno disuelto, en consecuencia la precisión de los resultados esta influenciada en gran medida por el cuidado que se tenga en la medición de este último. Se puede medir de forma directa en unas pocas muestras, pero en general se requiere un procedimiento de dilución, y da una idea de la concentración de materia biodegradable y del grado de contaminación del líquido residual, también permite detectar la presencia de elementos tóxicos en el líquido residual.^[RADZIUL, 1976]

4.2.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es ampliamente usada como una forma de medir la concentración de la materia orgánica en los residuos domésticos e industriales. Esta prueba permite medir en un residuo la cantidad total de oxígeno que se requiere para la oxidación de la materia

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

orgánica a dióxido de carbono y agua por la acción de agentes oxidantes fuertes en condiciones ácida.^[SAWYER, 2001]

La principal ventaja de la DQO es el poco tiempo que se necesita para la evaluación y con frecuencia los datos de la DQO se pueden interpretar en términos de valores de DBO, después que se ha acumulado experiencia para establecer factores de correlación confiables.

Esta prueba se realiza generalmente con dicromato de potasio que es un agente oxidante muy potente en soluciones fuertemente ácidas y representa el oxígeno equivalente a la digestión ácida de la materia carbonada con dicromato de potasio durante 2 horas.

Conjuntamente con la prueba de DBO, la de la DQO es útil para indicar las condiciones tóxicas y la presencia de sustancias orgánicas biológicamente resistentes. En la determinación de la DQO existen dos interferencias:^[2]

a) *Presencia de Cloruros*

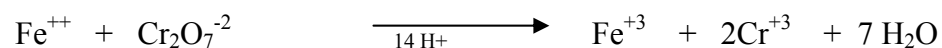
Si el cloruro no es acomplejado satisfactoriamente con HgSO₄, consumirá dicromato de potasio dando valores de DQO más altos.



Si se conoce la concentración de cloruro se puede corregir el DQO de acuerdo a la expresión: $\text{DQO} = \text{DQO}_{\text{exp}} - 0,23 [\text{Cl}^-]$

b) *Presencia de material fácilmente oxidable*

Un pequeño inconveniente en el análisis de la DQO es la presencia de compuestos o elementos inorgánicos fácilmente oxidables por el dicromato, por ejemplo el Fe⁺⁺, NO₂⁻, S⁻², etc.



^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

4.2.4. Nitrógeno amoniacal

Corresponde al nitrógeno que existe como ion amonio o hidróxido de amonio. En los métodos estándares esencialmente se incluyen cuatro métodos diferentes para determinar el nitrógeno amoniacal: electrodo selectivo, por adición directa de fenato, por destilación y por análisis volumétrico.^[SAWYER, 2001]

Uno de los métodos más utilizados es el del Electrodo Selectivo: El electrodo selectivo tiene una membrana hidrofóbica permeable a gas que permite separar la muestra de una solución interna de cloruro de amonio. El amoníaco disuelto (NH_3 y NH_4) pasa a NH_3 al elevar el pH de la muestra a 11 con una base fuerte, se difunde a través de la membrana y el pH de la solución interna cambia, lo cual es detectado por un electrodo de pH. El nivel de cloruro en la solución interna lo detecta un electrodo ión selectivo que sirve como electrodo de referencia. Las medidas potenciométricas se realizan con un medidor de pH de escala expandida en milivoltios o con un medidor del ión específico.^[COVENIN 7072, 1994]

4.2.5. Nitrógeno Orgánico

Las determinaciones de nitrógeno se hacen con frecuencia para controlar el grado de purificación obtenida con los tratamientos biológicos. Con el uso de la prueba de DBO se mide básicamente la presencia de materia carbonácea sin llegar a la nitrificación de los compuestos de nitrógeno.

La mayoría de los compuestos orgánicos que tienen nitrógeno son derivados del amoníaco y por tanto la oxidación de la parte orgánica libera el amoníaco, para que todo el nitrógeno orgánico se libere en forma de amoníaco es necesario la digestión completa de la materia orgánica y luego que ha sido liberado como nitrógeno amoniacal puede ser medido de manera similar al procedimiento descrito anteriormente para el nitrógeno amoniacal.^[SAWYER, 2001]

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

4.2.6. Fósforo

Conjuntamente con el nitrógeno, constituye el nutriente más importante para el crecimiento bacteriano. La clase de fósforo que se encuentra en los líquidos residuales se clasifica en: ortofosfatos y orgánico. El que se determinará en este estudio es el orgánico que se describe a continuación.

Fósforo Orgánico: Todos los organismos que participan en los procesos biológicos del tratamiento de las aguas residuales requieren fósforo para la reproducción y síntesis de nuevo tejido celular. Los lodos que contienen nitrógeno y fósforo en cantidades abundantes tienen un valor fertilizante. Para la medición del fósforo orgánico se requiere la destrucción de la materia orgánica para que el fósforo sea liberado como ion fosfato, la materia orgánica se puede destruir por el método de oxidación húmeda o de digestión.^[COVENIN 7151, 1993]

4.2.7. Compuestos Orgánicos

Para determinar las concentraciones de compuestos orgánicos en aguas se pueden utilizar diferentes métodos, pero cuando los compuestos son muy volátiles y poco solubles en agua se utilizan métodos un poco más específicos como lo es la cromatografía de gases para el caso del Tolueno; y la cromatografía de gas por Espacio Vapor para el caso del EDC y MVC.

El método de *Cromatografía de gas – Espacio Vapor* consiste en captar en un recipiente de vidrio un volumen determinado de muestra y sellarlo con un tapón de goma. El MVC y EDC son poco solubles en agua, formándose en el recipiente un equilibrio entre las fases líquidas y vapor, en donde la concentración de estos elementos permanecen inalterables a presión y temperaturas constantes. La muestra es inyectada a un cromatógrafo de gas produciéndose la separación de sus componentes mediante una columna capilar. Un detector de ionización a la llama es utilizado para la detección y su señal (área o picos) es integrada y calculada la concentración con factores de calibración. La calibración del sistema cromatográfico

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

es efectuada bajo unas condiciones de operación específicas, utilizando un estándar volumétrico preparado en el laboratorio (material de referencia), que contienen los componentes a ser analizados y de concentraciones conocidas.

^[1] www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.

^[2] www.pdvsa.tripod.com/id24m_m.htm

CAPITULO III. METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología llevada a cabo para cumplir cada uno de los objetivos planteados en el Trabajo Especial de Grado.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

En esta fase de la investigación se realizó una búsqueda de información en las diferentes fuentes tales como: libros, enciclopedias, revistas, investigaciones previas, internet y otros; y de esta manera se establecieron una serie de conocimientos previos necesarios para realizar la investigación.

Adicionalmente se realizó una revisión de los métodos y procedimientos que se deben llevar a cabo para determinar cada uno de los parámetros fisicoquímicos: consumo de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos volátiles, lo cual permitió familiarizarse con los ensayos y se establecieron a su vez las limitaciones e interferencias de los mismos.

2. FAMILIARIZACIÓN Y MANEJO DE LOS EQUIPOS

Antes de manejar cada uno de los equipos empleados para determinar los parámetros para realizar la investigación, fue necesario hacer una revisión de los manuales de cada equipo: reactor biológico, electrodo de oxígeno disuelto y pH, reactor de DQO, tituladores y otros.

Además de la revisión de los manuales, se realizaron pruebas de entrenamiento de los diferentes métodos con cada uno de los equipos nombrados anteriormente; lo cual permitió adquirir experiencia previa en la ejecución de cada uno de los procedimientos y minimizar los errores en la realización de los ensayos.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

La evaluación del efecto del Cloruro de Etileno, Cloruro de Vinilo y Tolueno se realizó a diferentes concentraciones mediante pruebas de degradación en un reactor biológico a escala laboratorio, con aplicación de microorganismos aclimatados, simulando un proceso de lodos activados en condiciones discontinuas. Para esto se elaboró un agua sintética en el laboratorio con datos suministrados por la empresa de caracterizaciones de efluentes previas y se realizó un proceso de aclimatación de los microorganismos al agua sintetizada.

Además se realizaron pruebas de biodegradación con una muestra de efluente petroquímico suministrada por la empresa y previamente se realizó un proceso de aclimatación de los microorganismos a este efluente.

El estudio se llevó a cabo a través de la determinación de ciertas propiedades fisicoquímicas de la evolución de la reacción de oxidación biológica, los ensayos de DQO, sólidos suspendidos volátiles y consumo de oxígeno se llevaron a cabo en el laboratorio, mientras que los restantes como nitrógeno total, fósforo total y la determinación de las concentraciones de cada compuesto fueron realizadas por el Laboratorio de Química Analítica de la empresa.

A continuación se presenta una descripción de los ensayos realizados y las condiciones a las que se llevaron a cabo los mismos.

3.1. Preparación del Agua o Efluente a tratar

3.1.1. Agua Sintética

Para la primera fase de las pruebas el efluente utilizado fue un agua sintética preparada en el laboratorio (antes de cada ensayo) con datos suministrados de caracterizaciones anteriores.

Para preparar el agua sintética se utilizó agua potable a la cual se le agregaron las siguientes sales grado analítico para alcanzar las concentraciones expuestas en la Tabla N°3 que se presenta a continuación:

Tabla N°3. Sales para preparar el agua sintética.

<i>NOMBRE DE LA SAL</i>	<i>FÓRMULA MOLECULAR</i>	<i>CONCENTRACIÓN EN EL AGUA SINTÉTICA (mg/L)</i>
Cloruro de Sodio	NaCl	1300
Bicarbonato de Sodio	NaHCO ₃	200
Sulfato de Calcio	CaSO ₄	100

Adicionalmente a esta agua se le agregaron los compuestos orgánicos y los nutrientes necesarios para la reproducción de los microorganismos y para que los mismos realicen su actividad degradativa. La cantidad de nutrientes que se agregaron al agua sintética vino dada de acuerdo a la concentración (en peso) de materia orgánica de la siguiente manera:

$$\text{DQO} : \text{Nitrógeno} : \text{Fósforo} \rightarrow 100 : 5 : 1$$

Esta relación teórica es ampliamente utilizada en los procesos de tratamiento biológico.

Como fuente de materia orgánica se agregó glucosa y como fuente de nutrientes cloruro de amonio y fosfato de sodio, además de los compuestos en estudio (EDC, MVC y tolueno); las concentraciones a utilizadas de estos compuestos fueron variables de acuerdo al ensayo realizado.

El cloruro de vinilo a diferencia de los otros compuestos en estudio se encontraba en estado gaseoso en condiciones normales, para realizar el estudio de este compuesto se

preparó previamente una solución madre del mismo burbujeando la muestra gaseosa en un envase con agua, y posteriormente se realizó un análisis de la concentración de la solución preparada.

3.1.2. Muestra de Efluente

La segunda fase de las pruebas de biodegradación se realizó con una muestra de efluentes industriales proporcionada por la empresa.

Inicialmente se realizó una caracterización de éste efluente determinando las siguientes propiedades: conductividad, pH, DQO, DBO, fósforo total, nitrógeno total, sólidos totales, sólidos suspendidos volátiles y concentración de cada uno de los compuestos orgánicos en estudio. Con la determinación de cada uno de estos parámetros se realizó un ajuste en el efluente, en cuanto a la concentración de nutrientes y de compuestos orgánicos, de tal manera de cumplir con los requisitos para cada una de las pruebas de biodegradación.

Los procedimientos detallados para cada una de las determinaciones dichas anteriormente se encuentran en el Apéndice B.

3.2. Aclimatación de los Microorganismos

Este procedimiento es muy importante en el estudio de biodegradación, ya que permite aclimatar a las bacterias al efluente a tratar adaptándolas a la materia orgánica en particular que va a ser digerida y de esta manera las mismas comiencen su proceso de reproducción.

Este procedimiento fue realizado tanto para el agua sintética como para la muestra de efluente suministrada. El lodo biológico utilizado en los ensayos fue tomado del reactor biológico de la planta de Tratamiento de Aguas de Intevap.

Tanto los nutrientes como la materia orgánica (agua sintética o efluente) fueron agregados al recipiente diariamente en las cantidades expuestas anteriormente.

3.2.1. Aclimatación con agua sintética

Para llevar a cabo este proceso de aclimatación, se puso en contacto el agua sintética con la biomasa durante 8 días.

El procedimiento de aclimatación se realizó colocando en un recipiente 1L de lodo o biomasa que contiene a los microorganismos, y 4L de agua sintética, a esta mezcla se le proporcionó oxígeno mediante difusores conectados a una fuente de aire, y de esta manera las bacterias se encontraban suspendidas en todo el recipiente y la mezcla estuvo completamente homogénea durante todo el proceso, como se muestra en la figura N°3.



Figura N°2. Recipiente de Aclimatación.

La concentración de materia orgánica y la concentración de microorganismos dentro del recipiente vino dada por la siguiente relación F/M (food/mass)=0,3; este valor relaciona la cantidad de materia orgánica con la cantidad de biomasa presente en el recipiente y es comúnmente utilizado en todos los procesos de tratamiento biológico.

Para evaluar la actividad reproductiva de los microorganismos en el recipiente de aclimatación se determinaron los sólidos suspendidos volátiles (SSV) dentro del mismo durante 8 días, para esto fueron tomadas 7 muestras de lodo del recipiente. Esto permitió establecer el crecimiento de la biomasa en función del tiempo.

En cuanto a la actividad degradativa de los microorganismos en el recipiente de aclimatación se determinó la Demanda Química de Oxígeno (DQO), esto se realizó durante 30 horas mediante la toma de 7 muestras del agua contenida en el recipiente.

Como último parámetro para evaluar el proceso de aclimatación de los microorganismos se realizaron 3 pruebas de consumo de oxígeno con la finalidad de obtener la evolución de la actividad respiratoria de las bacterias, con esto se obtuvo la variación de oxígeno disuelto en el tiempo.

Los procedimientos detallados para determinar cada uno de los parámetros mencionados anteriormente se encuentran en el apéndice B.

3.2.2. Aclimatación con el efluente

Este proceso de aclimatación fue realizado durante dos días, y se realizó colocando en un recipiente el efluente y el lodo biológico, a esta mezcla también le fue proporcionado aire de tal manera de mantener homogénea la mezcla y suspendida la biomasa en todo el recipiente.

Para evaluar la aclimatación de los microorganismos al efluente se realizaron las mismas pruebas que para el agua sintética (SSV, DQO y consumo de oxígeno). Tanto para los SSV como para la DQO se tomaron 7 muestras del recipiente de aclimatación durante 30 horas y se realizaron 3 pruebas de consumo de oxígeno para evaluar la actividad respiratoria de los microorganismos.

Luego de 20 horas de aclimatación aproximadamente, se tomó una muestra de lodo aclimatado para realizar las pruebas en el reactor biológico, de manera tal que el proceso de aclimatación continuara sin agregar mas sustrato, con la finalidad de estudiar el comportamiento del patrón de crecimiento celular cuando el sustrato es limitante.

3.3. Pruebas de Consumo de Oxígeno en presencia de Contaminantes

Con la finalidad de evaluar la actividad respiratoria de las bacterias en presencia del tolueno, cloruro de vinilo y cloruro de etileno, se realizaron pruebas de consumo de oxígeno en presencia de los mismos a diferentes concentraciones.

Se prepararon dos blancos por cada uno de los compuestos, estos fueron el punto de comparación para evaluar el efecto de los compuestos en las bacterias. Estas pruebas fueron realizadas con la muestra de efluente suministrada y las bacterias aclimatadas a la misma.

3.3.1. Preparación del blanco

Se tomaron 250ml de la mezcla del recipiente de aclimatación y se realizó la prueba de consumo de oxígeno, esto dió como resultado la variación del oxígeno disuelto con respecto al tiempo dentro del sistema sin la presencia de contaminantes. Para cada compuesto en estudio se realizaron dos blancos, uno al inicio y otro al final del ensayo con cada uno de los compuestos en estudio.

3.3.2. Ensayo con Cloruro de Etileno (EDC):

Se tomaron 250ml de la mezcla del recipiente de aclimatación, y se puso en contacto con una solución de cloruro de etileno a una concentración determinada.

Posteriormente se aplicó la prueba de consumo de oxígeno, y con esto se obtuvo la variación del oxígeno disuelto dentro del sistema con respecto al tiempo. Esta prueba se realizó a diferentes concentraciones de cloruro de etileno, las cuales se muestran en la Tabla N°4.

3.3.3. Ensayos con MVC y Tolueno:

Para estos dos compuestos se realizó el mismo procedimiento explicado para el EDC, pero con las soluciones de MVC y tolueno a diferentes concentraciones.

Las concentraciones utilizadas en la aplicación de la prueba de consumo con cada uno de estos compuestos fueron suministradas por la empresa y sus valores giran alrededor de los valores típicos de concentración que se permiten a la entrada de las plantas de tratamiento de efluentes, estos valores se presentan en la tabla N°4.

Tabla N°4. Concentraciones para las pruebas de consumo de oxígeno en presencia de contaminantes.

	1	2	3	4	5
EDC (ppm)	5	10	20	30	50
MVC (ppm)	4	8	10	16	32
Tolueno (ppm)	30	50	70	85	100

Para analizar con mayor facilidad la influencia de la concentración de los compuestos en la actividad respiratoria de los microorganismos, se determinó la pendiente de la recta tangente a las curvas de consumo, por los puntos obtenidos en los primeros segundos de cada prueba, para luego analizar la influencia de la concentración en el valor de las pendientes y con esto concluir si existe una tendencia de los microorganismos a degradar los compuestos a diferentes concentraciones.

Los resultados arrojados por estos ensayos permitieron evaluar el efecto de los compuestos orgánicos en estudio a diferentes concentraciones en la actividad respiratoria de las bacterias, así como también establecer un estimado de las concentraciones de cloruro de vinilo, cloruro de etileno y tolueno, que se utilizaron en los ensayos en el reactor biológico.

Estos ensayos también nos permitieron tener una idea clara acerca de la biodegradabilidad de cada uno de estos compuestos.

3.4. Pruebas en el Reactor Biológico BIOSTAT®E

En este equipo se llevó a cabo la reacción de oxidación biológica de los compuestos orgánicos en estudio mediante la actividad metabólica de los microorganismos provenientes del proceso de aclimatación explicado anteriormente, los ensayos se realizaron por cargas.

Antes de describir el procedimiento que se llevó a cabo en el reactor, es necesario realizar una descripción del equipo, de manera tal que se conozca como esta distribuido y el funcionamiento de todas sus partes.

3.4.1. Descripción del Equipo

El BIOSTAT®E es un reactor biológico de control automatizado y está diseñado como un fermentador de mesa compacta, las características o partes esenciales se describen brevemente a continuación y se pueden observar en el diagrama del reactor biológico representado en la figura N°4.

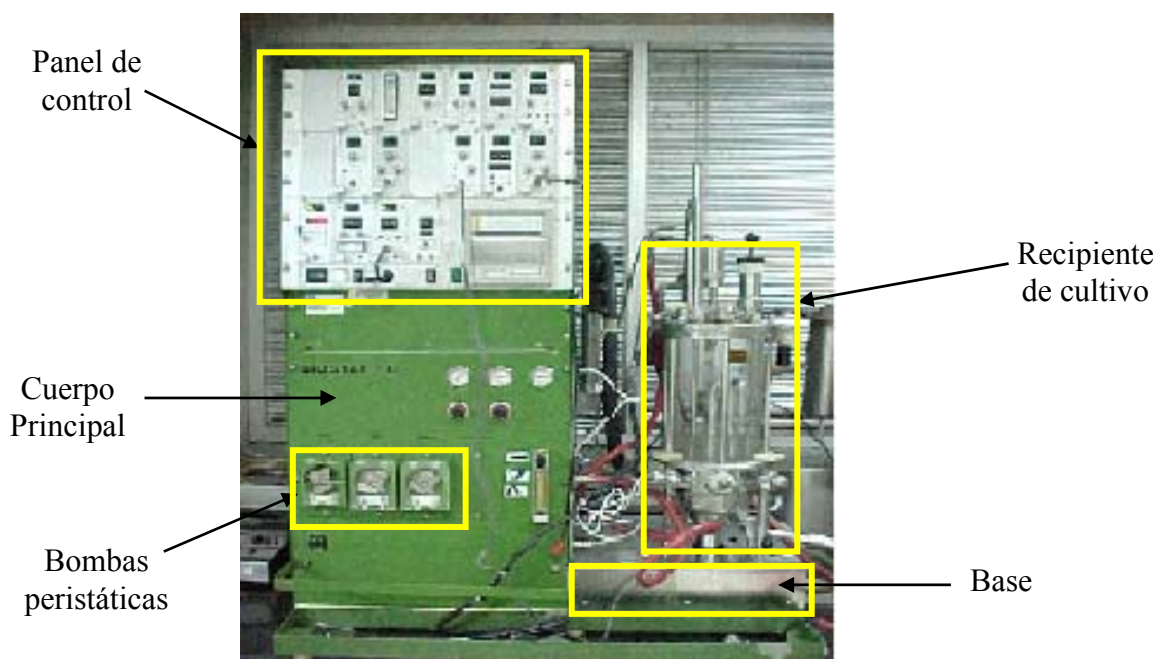


Figura N°3. Diagrama del Reactor Biológico BIOSTAT®E.

3.4.1.1. Cuerpo principal

Esta es una parte fundamental del equipo ya que en ella se encuentra toda la parte técnica y operacional del mismo. Los probadores y conexiones están situados en la parte exterior del cuerpo principal, así como los suplidores de electricidad, los módulos de medición y el sistema de control.

En la parte inferior del frente el cuerpo principal se encuentra provisto de cuatro puertos para bombas dosificadoras. Las primeras consisten en tres bombas peristálticas las cuales tienen como función suplir al recipiente de ácido, base y antiespumante respectivamente. El cuarto puerto está preparado para la instalación de una bomba dosificadora, la cual puede ser utilizada para suplir a la solución de nutrientes, substratos o cualquier tipo de sustancia la cual se requiera utilizar en la operación del equipo.

En la parte superior cuenta con módulos para la medición y el control del sistema los cuales están ubicados de forma coherente y funcional en el cuerpo principal, todos ellos conforman el panel de control del equipo. Las variables que pueden ser medidas y controladas por cada uno de ellos son: temperatura, presión, oxígeno disuelto, pH, velocidad, aireación y antiespumante.

Uno de los módulos es una pantalla digital donde se puede observar el valor de cada una de las variables del sistema y además tiene un sistema de registro de datos en papel los cuales registran desde el inicio de la prueba y hasta el final los valores de cada una de las variables en el tiempo.

En la parte lateral del cuerpo principal existen diferentes conexiones que sirven para suplir de aire, agua fría, agua caliente, gases y otros al recipiente de cultivo, de tal manera que se puedan controlar cada una de las variables dichas anteriormente.

3.4.1.2. Base

Es el lugar o la base en donde se coloca el recipiente de cultivo, este posee unas aberturas en donde calza el recipiente el cual encaja por medio de unos engranajes que posee la consola en su interior. Esta base es la utilizada para cualquiera de los tres tamaños de recipiente que posee el equipo.

3.4.1.3. Recipiente de Cultivo

Consiste en un recipiente de vidrio con una base, tapa, enrejado y conexiones de metal en donde se colocan cada uno de los instrumentos de medición, también posee un agitador y unos intercambiadores de calor en la parte interna, la parte de abajo tiene un tubo para salida de flujo por donde se toman las muestras. En la tapa posee una válvula de seguridad por presión y un agitador el cual está conectado con el cuerpo principal del equipo.

3.4.1.4. Accesorios

El equipo posee una serie de accesorios y equipos secundarios entre los cuales se encuentran: bombas peristálticas, mangueras, adaptadores, válvulas, medidor de temperatura y presión, electrodo de oxígeno disuelto, pH metro entre otros.

3.4.2. Puesta a punto del reactor

Antes de arrancar el equipo se deben realizar una serie de ajustes, de tal manera que el reactor esté completamente listo para operar, estos ajustes tienen que ver con la conexión y calibración de todos los accesorios o equipos complementarios que se utilizan para realizar la medición de cada uno de los parámetros en el proceso.

3.4.2.1. Electrodo de pH

Consiste en un electrodo de vidrio el cual esta separado en dos cámaras, en el interior contiene un electrodo de plata-cloruro de plata y una solución de cloruro de potasio saturado con cloruro de plata. En la cámara exterior tiene una solución de cloruro de

potasio la cual está en contacto con el medio de cultivo o la muestra dentro el reactor por medio de un diafragma.

El electrodo se introduce en una cámara cerrada a presión para poder ser instalado en la base del reactor, esta cámara posee un manómetro el cual mide la presión dentro de la misma, de tal manera que agregando un poco de aire se ajusta un pequeño exceso de presión de 0,2 o 0,3 bar dentro de la cámara en relación a la presión de operación del reactor.

Antes de realizar los ensayos se debe calibrar el electrodo, esto se hace con el ajuste del pH con soluciones buffer de pH 4 y 7. Luego de calibrar el electrodo conectarlo al reactor por la base del recipiente de cultivo y se ajusta el exceso de presión explicado anteriormente.

3.4.2.2. Electrodo de Oxígeno Disuelto

Consiste en un electrodo que posee el ánodo de plata y el cátodo de platino los cuales están separados del medio de cultivo por una membrana polimérica de gas permeable.

El ánodo y el cátodo están conectados conductivamente uno con el otro por un electrolito el cual está construido como una pequeña capa fina entre la membrana y el electrodo. El electrodo se conecta en la base del reactor enroscándolo en unos agujeros que este posee y se conecta con el cable en el panel de medición de oxígeno disuelto.

3.4.2.3. Termómetro de referencia

Consiste en un termómetro de platino el cual es conectado a la base del reactor de igual manera que los electrodos y posee un cable que se conecta en la parte lateral del cuerpo principal del equipo.

3.4.2.4. Otras conexiones

Existen otras conexiones del equipo, entre el recipiente de cultivo y el cuerpo principal las cuales se explican a continuación:

- En la tapa del reactor se conecta un sistema de mangueras con sus respectivas válvulas, por el cual se suministra y/o se retira el aire del recipiente de cultivo.
- En la consola se conectan las mangueras que suministran por medio de una bomba el agua fría y caliente al equipo para mantener la temperatura deseada.
- Se preparan las soluciones de ácido y base a utilizar en el equipo para mantener el pH dentro del recipiente de cultivo, se colocan las mangueras en las bombas peristálticas y se conectan directamente al recipiente por la tapa.

3.4.3. Operación del equipo

En este apartado se presentan las condiciones de operación del equipo y las características generales de la operación del equipo en cada uno de los ensayos a realizados:

El recipiente de cultivo que fue utilizado tiene una capacidad de 6 litros, en cada uno de los ensayos se controló el pH, la temperatura y el oxígeno disuelto (durante toda la prueba), el rango de control se presenta en la tabla N°5.

Tabla N° 5. Valores de las variables a controlar en cada uno de los ensayos.

<i>VARIABLE A CONTROLAR</i>	<i>RANGO DE CONTROL</i>
pH	7,5 – 8,5
Temperatura (°C)	27 – 30
Oxígeno Disuelto (ppm)	> 4

Los valores presentados son los óptimos para el tipo de microorganismos utilizados y permiten proporcionar a las bacterias las condiciones adecuadas para lograr su actividad biológica.

La velocidad de agitación en el reactor fue ajustada en 80 rpm y la aireación fue variando de tal manera que el oxígeno disuelto estuviera dentro del rango de control, de esta manera la mezcla dentro del reactor se encontraba completamente homogénea; es decir, que la toma de una pequeña muestra fue representativa de la concentración dentro de todo el recipiente de cultivo.

3.4.4. Procedimiento Experimental en el Reactor

A continuación se presenta el procedimiento experimental que se llevó a cabo para la realización de los ensayos en el reactor biológico de control automatizado. Este procedimiento se llevó a cabo en dos fases, la primera con el agua sintética y la segunda fase con la muestra de efluente industrial en donde se evaluó la biodegradación de la mezcla de los compuestos.

En cada uno de los ensayos se ajustaron las variables controladas y de operación en los valores dichos anteriormente en el apartado 3.4.3. de este capítulo.

Durante el transcurso del ensayo se registraron los valores de temperatura, pH y oxígeno disuelto; para llevar un control de cada uno de estos parámetros en el tiempo y poder asegurar que los mismos permanecieran dentro de los rangos especificados que generaran un ambiente adecuado para los microorganismos.

3.4.4.1. Ensayos de biodegradación con agua sintética

Este ensayo consistió en colocar en el reactor el agua sintética preparada previamente y el volumen de biomasa aclimatada necesario para que se cumpliera la relación $F/M=0,3$; donde la cantidad de materia orgánica estuvo dada por la concentración de glucosa y la concentración de compuestos (MVC, EDC y tolueno) que se estaba estudiando en cada uno de los ensayos.

Las concentraciones expuestas en la Tabla N°6 fueron proporcionadas por la empresa y responden a las concentraciones típicas permisibles a la entrada de las plantas de tratamiento de efluentes.

Tabla N° 6. Concentraciones de Tolueno, Cloruro de Vinilo y Cloruro de Etileno empleadas en cada uno de los ensayos con agua sintética.

<i>ENSAYO</i>	<i>TOLUENO (PPM)</i>	<i>MONOCLORURO DE VINILO (PPM)</i>	<i>CLORURO DE ETILENO (PPM)</i>
1	0	0	0
2	0	10	0
3	0	20	0
4	0	0	20
5	70	0	0

De acuerdo a las diferentes investigaciones realizadas anteriormente a ésta, que están expuestas en el capítulo I, en donde se describe el alto grado de biodegradabilidad del tolueno y del cloruro de etileno, se tomó la decisión de evaluar estos compuestos a una sola concentración. Estas concentraciones presentadas en la tabla N°6 se encuentran muy por encima de la concentración máxima permisible a la entrada en un reactor biológico de la mayoría de las plantas de tratamiento de estos efluentes.

El estudio de la evolución de la reacción biológica se llevó a cabo durante 30 horas aproximadamente. A los 10 minutos luego del inicio de cada ensayo se tomó una muestra inicial de la mezcla y se realizaron las siguientes determinaciones:

- Sólidos suspendidos volátiles
- Demanda Química de Oxígeno
- Nitrógeno Total
- Fósforo Total
- Concentración de compuestos orgánicos (MVC, EDC y tolueno)

El análisis de la concentración de orgánicos fueron realizados por el Laboratorio de Química Analítica de la empresa por el método de Cromatografía de gas - Espacio vapor.

La determinación de cada uno de estos parámetros permitieron establecer las condiciones iniciales de la mezcla antes de que se llevara a cabo la oxidación biológica. Los procedimientos detallados para la medición de cada uno de estos parámetros se encuentran ubicados en el apéndice B.

Durante el transcurso de cada uno de los ensayos se tomaron 6 muestras a las cuales se les realizaron las siguientes determinaciones:

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Estos dos parámetros en particular fueron los que permitieron observar la evolución de la reacción de oxidación biológica en el tiempo. El proceso de degradación de la materia orgánica vino dado por la variación de los valores de DQO y el crecimiento de la masa bacteriana por la variación de los sólidos suspendidos volátiles.

Con el fin de conocer las condiciones finales de la reacción de oxidación se tomó una muestra al final del ensayo y se determinaron las mismas propiedades que al inicio del mismo.

3.4.4.2. Ensayo de biodegradación con efluente

En general, los lineamientos utilizados para realizar las pruebas con el efluente industrial fueron los mismos que para el agua sintética.

De acuerdo a la caracterización obtenida del efluente, se agregó al mismo los nutrientes necesarios para alcanzar la relación con la materia orgánica en cada uno de los ensayos. Además, se ajustaron las concentraciones de los compuestos orgánicos en estudio para realizar la prueba. Estas concentraciones son las que se presentan en la tabla N° 7.

Tabla N° 7. Concentraciones de Tolueno, Cloruro de Vinilo y Cloruro de Etileno empleadas en el ensayo con efluente industrial.

<i>ENSAYO</i>	<i>TOLUENO (PPM)</i>	<i>MONOCLORURO DE VINILO (PPM)</i>	<i>CLORURO DE ETILENO (PPM)</i>
1	70	20	20

El tiempo de ejecución de esta prueba fue de 7 a 8 horas aproximadamente, y se tomaron 5 muestras de la mezcla para la determinación de cada uno de los parámetros involucrados en la reacción de oxidación.

Debido a que los compuestos orgánicos en estudio son altamente volátiles se colocaron a la salida de los vapores del reactor biológico una serie de cartuchos de carbón activado, de tal manera de cuantificar la concentración de cada uno de los compuestos que se van por medio del arrastre con el aire en cada uno de los ensayos.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en este Trabajo Especial de Grado, así como el análisis de los mismos. Los resultados serán presentados en tres secciones principales de acuerdo la estructura de la metodología: proceso de aclimatación, ensayos de consumo de oxígeno y ensayos en el reactor.

1. PROCESO DE ACLIMATACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS

Es muy importante tener en cuenta que el primer paso para biodegradar sustancias tóxicas en el tratamiento de aguas residuales es la aclimatación de los microorganismos a los efluentes. Cuando los microorganismos se ponen en contacto con compuestos tóxicos, en un ambiente favorable, la aclimatación a estos compuestos puede ocurrir.^[AELION, 1989]

En esta investigación se realizaron dos procesos de aclimatación de los microorganismos, la primera se realizó con el agua sintética la cual contenía glucosa como materia orgánica y la segunda fue con la muestra de efluente suministrada por la empresa.

Para realizar la evaluación de cada uno de los procesos de aclimatación se determinaron los SSV para indicar la cantidad de biomasa, la DQO que mide la cantidad de materia orgánica disuelta en el agua y el consumo de oxígeno para analizar la actividad respiratoria de los microorganismos.

1.1. Agua Sintética

Inicialmente, el recipiente de aclimatación se alimentó con agua residual sintética que contenía glucosa, como única fuente de carbono, y nutrientes; con el objeto de activar metabólicamente los microorganismos presentes en el lodo, este ensayo tuvo un tiempo de duración de 30 horas aproximadamente. Para evaluar el desarrollo

biológico de las bacterias se tomaron 7 muestras en el transcurso de la prueba y se realizaron determinaciones de DQO, SSV y consumo de oxígeno.

Los resultados obtenidos para evaluar la actividad degradativa de las bacterias representada por la DQO se presentan en la figura N°4, en donde se muestra la variación de la DQO en función del tiempo. Los datos experimentales que permiten obtener esta figura se encuentran ubicados en el capítulo VIII (Apéndice C).

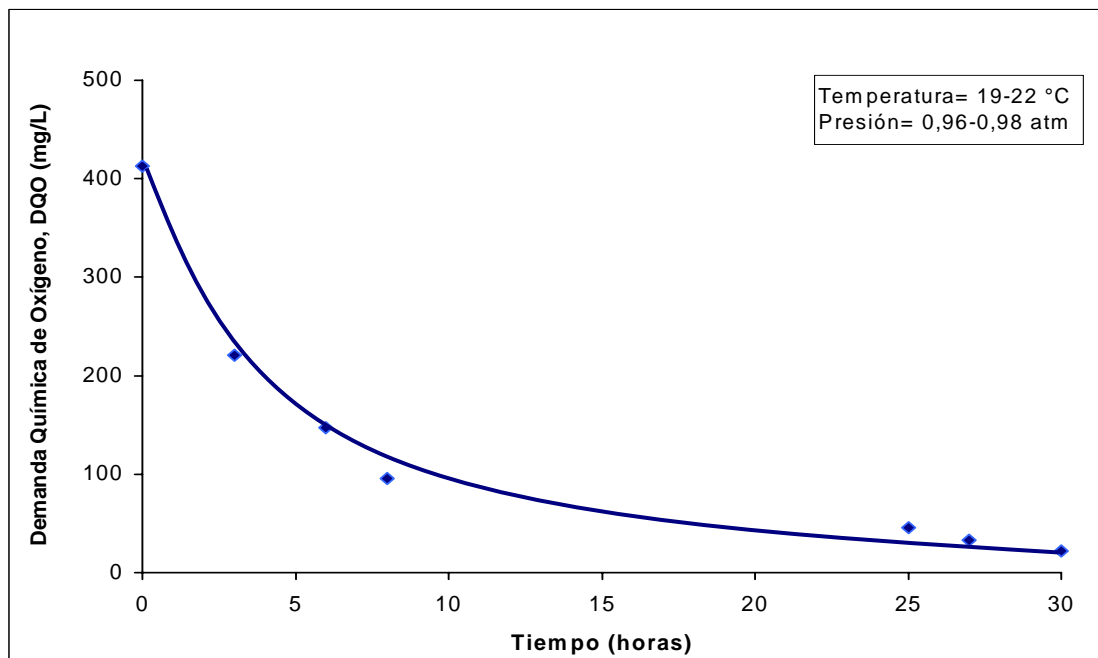


Figura N°4. Evolución de la actividad degradativa de la biomasa como una función del tiempo de aclimatación al agua sintética.

En la figura N°4 se puede observar que en las primeras 10 horas de prueba la concentración de materia orgánica disuelta en el líquido medida como DQO, fue decreciendo rápidamente, disminuyendo así aproximadamente 300 mg/L de la concentración inicial, el porcentaje de degradación en este intervalo de tiempo fue de 77%. Luego, para las siguientes horas el decrecimiento de la DQO fue muy lento, esto se puede interpretar debido a que en el recipiente se estaba agotando el sustrato.

En general los puntos experimentales obtenidos siguen una tendencia regular en la disminución de la materia orgánica, esto se puede explicar porque la fuente de materia orgánica en este ensayo fue la glucosa, y las enzimas requeridas para su degradación son más comunes que segregan las poblaciones bacterianas para su desarrollo en presencia de materia orgánica y corresponden a las rutas metabólicas comunes o esenciales.^[PERRY, 2001]

El porcentaje remoción de la materia orgánica durante el transcurso de toda la prueba fue de 95%, con este valor se evidencia el alto grado de biodegradabilidad durante esta etapa de aclimatación, esto permite concluir que el sustrato (glucosa) es fácilmente biodegradable por los microorganismos, lo cual es un comportamiento bien conocido a nivel técnico.

La actividad reproductiva de la biomasa se puede observar en términos de la variación de los sólidos suspendidos volátiles dentro del recipiente de aclimatación, ya que estos representan la biomasa que se desarrolla al consumir la materia carbonada contenida en las aguas residuales, por lo tanto, representan una fracción muy importante, para la evaluación y control del proceso de biodegradación en los sistemas de tratamiento biológico.^[LÓPEZ, 1998]

El estudio del crecimiento bacteriano se realizó durante 8 días, agregando diariamente al recipiente de aclimatación como fuente de sustrato glucosa, para mantener la relación F/M. En la figura N°5 se presentan los resultados obtenidos de SSV durante la realización de esta prueba, la tabla de datos que genera esta figura está situada en el capítulo VIII (Apéndice C).

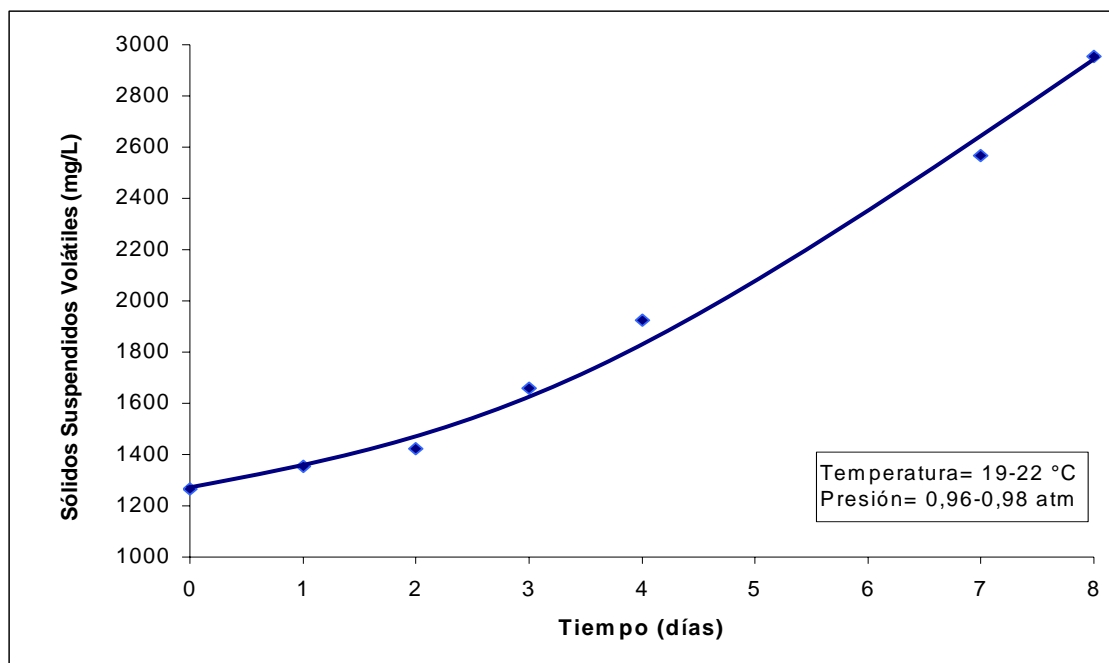


Figura N°5. Evolución de la actividad reproductiva de la biomasa como una función del tiempo de aclimatación al agua sintética.

Para la determinación de los sólidos suspendidos volátiles fueron tomadas 7 muestras del recipiente de aclimatación, en la figura N°5 se puede observar que a medida que transcurre el ensayo de aclimatación los valores de SSV siguen la tendencia del patrón de crecimiento general reportado en la bibliografía, el tiempo entre el día 0 y el día 2 se le llama *fase de latencia*, en donde luego de inocular un pequeño volumen de biomasa al recipiente, esta fase representa el tiempo necesario para que los organismos se aclimaten a las nuevas condiciones ambientales y comiencen a dividirse. [SAWYER, 2001]

En los días subsiguientes; es decir, desde el día 2 y hasta el día 8 los microorganismos entran en la *fase de crecimiento exponencial*, en donde las bacterias se dividen a una velocidad determinada (incrementando la masa bacteriana), que depende principalmente de la habilidad de los microorganismos para procesar alimento y de su tiempo generacional. [SAWYER, 2001]

La fase estacionaria y de muerte exponencial no se evidencian en los resultados expuestos en la figura N°5, esto se debe a que a diario se agregaba nuevamente glucosa al recipiente, lo cual permitió que la condición de crecimiento continuara, este es el objetivo de este proceso de aclimatación, ya que se quería incrementar la cantidad de bacterias para la posterior realización de los estudios experimentales con los compuestos orgánicos a evaluar.

El último de los parámetros para culminar la evaluación del proceso de aclimatación es la actividad respiratoria de los microorganismos, la cual es obtenida mediante la aplicación de la prueba de consumo de oxígeno, la cual consiste en medir la variación de oxígeno disuelto en un sistema cerrado que contiene una muestra de la mezcla del recipiente de aclimatación. Para realizar estas pruebas fueron tomadas 3 muestras del recipiente de aclimatación en días diferentes, y se obtuvieron 3 curvas de la actividad respiratoria de las bacterias, las cuales se pueden observar en la figura N°6 donde se representa la cantidad de oxígeno disuelto en el sistema como una función del tiempo.

La actividad respiratoria de los microorganismos, dan una idea del grado de aclimatación de los mismos a una fuente de materia orgánica, con las pruebas de consumo de oxígeno se asegura que los microorganismos se encuentren biológicamente activos para los ensayos posteriores; es decir, esta prueba permite dar a conocer si los microorganismos están aclimatados o no a un sustrato en particular.

En la figura N°6 se puede observar que a medida que transcurre el proceso de aclimatación el consumo de oxígeno en los microorganismos se va incrementando notablemente. En la muestra inicial tomada el primer día del ensayo, el oxígeno disuelto inicial fue de 4,04 mg/L para finalmente bajar hasta 2,09 mg/L en un tiempo de 11 minutos. Al cuarto día se tomó nuevamente una muestra del recipiente de aclimatación (muestra 2), en la cual el valor de oxígeno disuelto inicial fue de 3,42mg/L y luego de 7 minutos bajó a 1,57mg/L; y el último día del ensayo (muestra 3) el oxígeno disuelto inicial fue de 6,34 mg/L y luego de 6 minutos bajó a 0,1 mg/L.

Esto se presenta debido a que la variación del oxígeno disuelto en un sistema depende de la cantidad de bacterias y la cantidad de sustrato presente en el recipiente, en este caso la diferencia la genera la cantidad de microorganismos ya que a medida que transcurre la aclimatación el número de bacterias se va incrementando dentro del recipiente.

La curva de consumo de oxígeno proporcionada por la muestra 3 se puede decir que presento algunas variaciones no esperadas, porque a pesar de que el consumo de oxígeno fue mas rápido, el inicio de la curva pudo haber presentado un error experimental, ya que el valor de oxígeno disuelto debería haber sido menor, mas o menos del mismo orden que para las curvas anteriores.

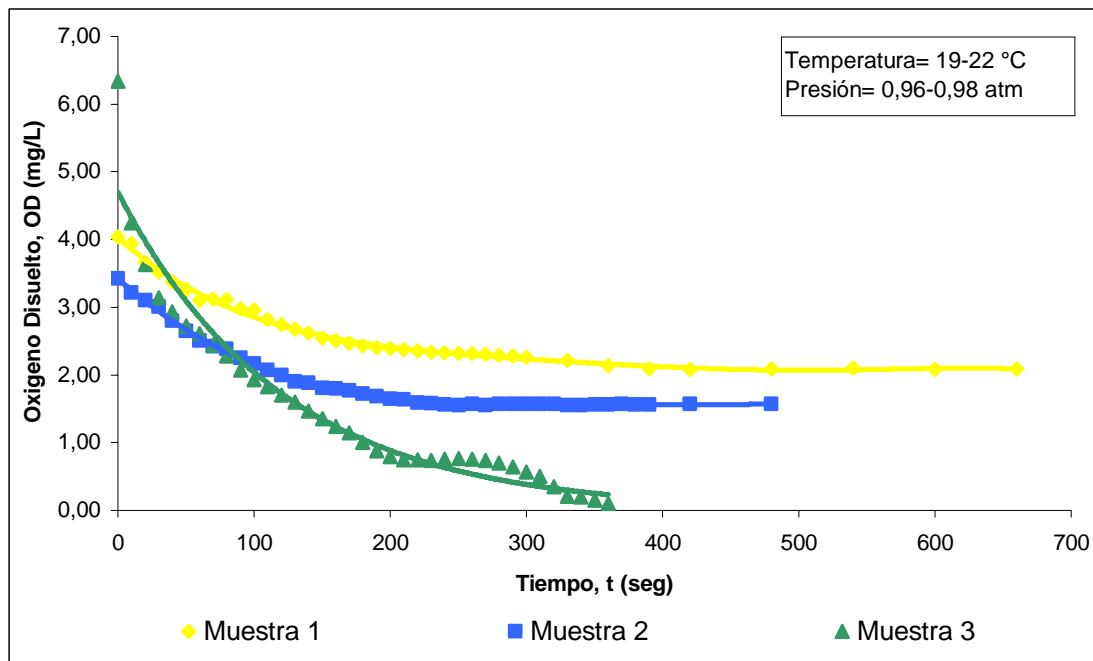


Figura N°6. Evolución de la actividad respiratoria de los microorganismos mediante la variación del oxígeno disuelto en el tiempo en la aclimatación al agua sintética.

En general se puede decir que el proceso de aclimatación de los microorganismos al agua sintética fue satisfactorio ya que se obtuvo un alto grado de biodegradación de la materia orgánica, el crecimiento bacteriano es semejante al expuesto en la bibliografía para un cultivo discontinuo y el consumo de oxígeno durante el proceso de aclimatación fue progresivo, ya que a medida que pasaban los días los microorganismos tenían un consumo de oxígeno más rápido.

La segunda fase del proceso de aclimatación fue realizada con una muestra de efluente proporcionada por la empresa, los resultados asociados a esta parte del ensayo se presentan a continuación.

1.2. Muestra de Efluente

Las determinaciones realizadas para la evaluación del proceso de aclimatación con la muestra de efluente son las mismas que para el ensayo con agua sintética. Pero antes de realizar cada uno de estos ensayos, se realizó una caracterización del efluente determinando algunas propiedades fisicoquímicas las cuales se muestran en la Tabla N°8.

Tabla N°8. Caracterización de la muestra de efluente industrial.

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	VALOR
pH	6,65
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	919
Demanda Química de Oxígeno, DQO (mg/L)	319
Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO (mg/L)	100
Fósforo Total, FT (mg/L)	3
Nitrógeno Total, NT (mg/L)	2
Sólidos Totales, ST (mg/L)	1143
Sólidos Suspendidos Volátiles, SSV (mg/L)	950

Esta caracterización se realizó con la finalidad de conocer los valores de los parámetros, de manera tal que se pudieran ajustar algunos valores de acuerdo a las condiciones que se llevara a cabo cada uno de los ensayos de biodegradación.

Debido a que la cantidad de nutrientes (FT y NT) contenida en el efluente era muy baja al momento de realizar el ensayo de aclimatación fue agregada una cantidad de nutrientes de manera tal que se cumpliera la relación en peso de DBO:N:P → 100:5:1.

Se agregó el efluente y el lodo biológico al recipiente de aclimatación, la duración de este ensayo fue de 30 horas, dentro de éste tiempo se realizó un monitoreo de cada uno de los parámetros necesarios para evaluar el progreso de la aclimatación (SSV, DQO y consumo de oxígeno). Durante este ensayo solo se agregó efluente y nutrientes al inicio de la prueba; es decir, que durante el transcurso de la prueba no se realizó ninguna alimentación adicional de materia orgánica y nutrientes al recipiente de aclimatación.

Los resultados que permiten observar la actividad degradativa de los microorganismos en el ensayo se representan por medio de las determinaciones de las muestras de DQO tomadas del recipiente de aclimatación, se tomaron 7 muestras y se obtuvo la gráfica representada en la figura N°7, donde se observa la variación de la cantidad de materia orgánica en función del tiempo dentro del recipiente de aclimatación, en general la tendencia de los puntos experimentales evidencian un decrecimiento de la DQO que se traduce como la degradación de la materia orgánica presente en el sistema.

Cada uno de los datos que generan la figura N°7, están tabulados en el capítulo VIII, apéndice C, ésta figura se presenta a continuación.

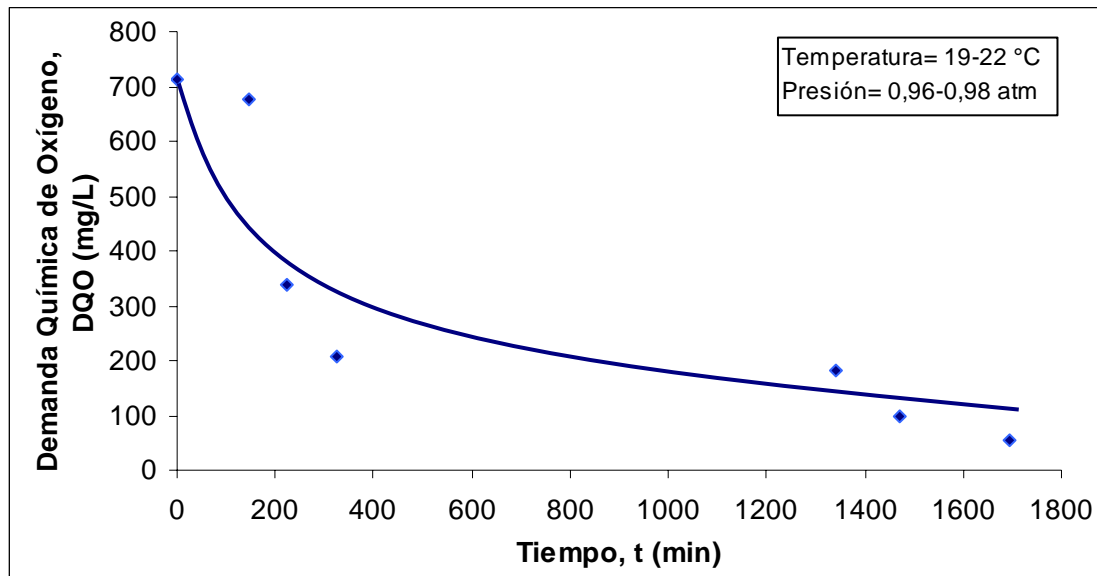


Figura N°7. Evolución de la actividad degradativa de la biomasa como una función del tiempo de aclimatación al efluente.

Entre 0-145 minutos no hay una variación notable de la DQO, esto se debe a que los microorganismos en ese período de tiempo no se han acostumbrado al nuevo sustrato, y por esto el descenso de la concentración de materia orgánica dentro del recipiente es un poco lento. Luego, entre 145-325 minutos si se nota una diferencia en la concentración de sustrato, ya que los microorganismos después de haberse acostumbrado al nuevo alimento comienzan su etapa de biodegradación de la materia orgánica. En los últimos intervalos de tiempo se observa una tendencia al decrecimiento de la concentración de sustrato pero muy leve en comparación a la anterior.

En éste proceso se obtuvo una remoción total del 92% de la materia orgánica inicial, esto nos indica el alto grado de biodegradabilidad de la muestra de efluente en estudio.

Para estudiar el comportamiento del crecimiento de la biomasa dentro del recipiente de aclimatación, se presenta la figura N°8 en la que se muestra la variación de los SSV en función del tiempo.

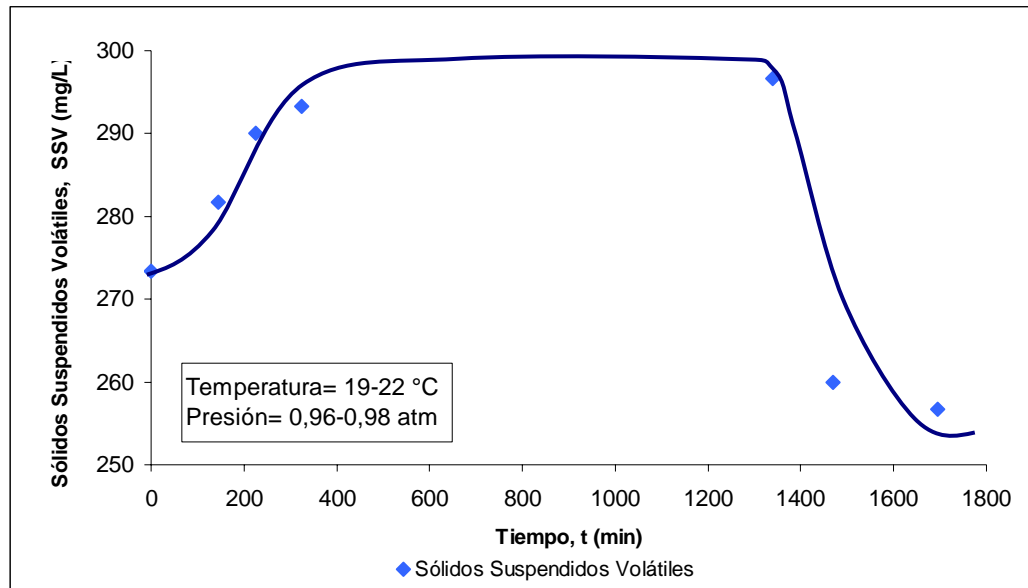


Figura N°8. Evolución de la actividad reproductiva de la biomasa como una función del tiempo de aclimatación al efluente.

Al igual que para el agua sintética, en la figura N°8 podemos notar que la tendencia de los datos obtenidos experimentalmente se asemejan al comportamiento reportado en la bibliografía de un cultivo discontinuo. [SAWYER, 2001]

La fase de latencia no se observa claramente, debido quizás a que los intervalos de tiempo utilizados en este estudio no permiten determinar pequeñas variaciones del contenido de SSV, lo cual también se relaciona con el corto lapso para que se produzca la división celular bacteriana. Se observa más bien desde el inicio del proceso de aclimatación que este entra directamente en una *fase de crecimiento exponencial* en el rango de 0-400 minutos, para después llegar a la *fase estacionaria* (en el rango de 400-1350 minutos aprox.) en donde la población permanece constante, debido seguramente a la falta de nutrientes y sustrato, por lo que la tasa de generación se iguala a la tasa de mortalidad de la biomasa. [SAWYER, 2001]

Por último, al final del ensayo la biomasa entra en una etapa de muerte exponencial en donde los microorganismos se ven obligados a metabolizar su propio protoplasma sin reposición del mismo, ya que la concentración de alimento se encuentra al mínimo. [METCALF, 1996]

Después de lo expuesto anteriormente se puede decir que el patrón de crecimiento de los cultivos mixtos de microorganismos en términos de la masa bacteriana generalmente sigue este comportamiento cuando no hay una alimentación continua en el recipiente de aclimatación.

En el estudio del consumo de oxígeno de los microorganismos mediante la medición del oxígeno disuelto, en un recipiente cerrado, de 3 muestras tomadas del recipiente de aclimatación durante las 30 horas de ensayo, arrojaron los resultados que se presentan en la figura N°10, en donde podemos observar el consumo al inicio del ensayo (muestra 1) el cual parte con una concentración de 8 mg/L y luego de 5 minutos una concentración de 3,1 mg/L.

Luego de 26 horas de aclimatación aproximadamente, se toma nuevamente una muestra del recipiente de aclimatación (muestra 2) y se realiza la prueba de consumo de oxígeno, en esta serie de datos obtenidos se puede observar que existe un desarrollo de la actividad respiratoria ya que el consumo fue más rápido que el medido inicialmente, esto se evidencia ya que el OD inicial para la muestra 2 fue de 6,7 mg/L y después de 5 minutos fue de 2,2.

La muestra 3 tomada al final del proceso de aclimatación al efluente como se nota en la figura N°9 sigue la misma tendencia que los datos obtenidos de consumo de oxígeno para la muestra 1. Esta tendencia presenta un efecto negativo en la actividad respiratoria de los microorganismos en comparación con la muestra 2, lo cual se debe principalmente a la escasez de la materia orgánica y a la disminución de

microorganismos dentro del recipiente como se evidencia en la figura N°9 en los últimos minutos del ensayo en donde la concentración de SSV se ve disminuida.

Los datos experimentales que conforman la figura N°9 están respaldados en el capítulo VIII (Apéndice C).

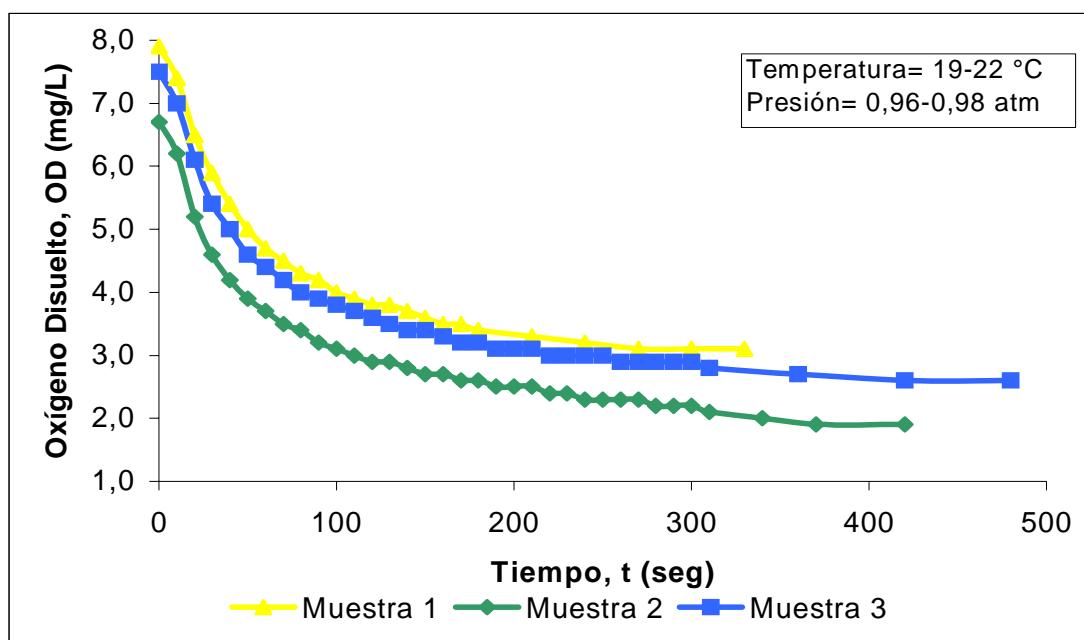


Figura N°9. Evolución de la actividad respiratoria de los microorganismos mediante la variación del oxígeno disuelto en el tiempo en la aclimatación al efluente.

De este proceso de aclimatación se tomó la biomasa para realizar las pruebas en el reactor con efluente, la misma fue tomada luego de realizar el consumo de oxígeno de la muestra 2, aproximadamente luego de 26 horas del inicio del proceso de aclimatación. Se extendió el proceso de aclimatación con la finalidad de estudiar el efecto en el cultivo cuando no existe un suministro continuo de materia orgánica en el mismo.

Ahora bien, se puede realizar una comparación de los resultados obtenidos en los dos procesos de aclimatación (agua sintética y efluente), uno de los parámetros más

importantes que se puede comparar es la DQO, ya que esta da una idea muy clara del grado de biodegradabilidad del sustrato utilizado para aclimatar.

En la figura N°10 podemos observar los datos obtenidos de DQO tanto para la aclimatación al agua sintética como para la aclimatación al efluente, en el mismo se puede notar que las tendencias de los datos experimentales son las mismas.

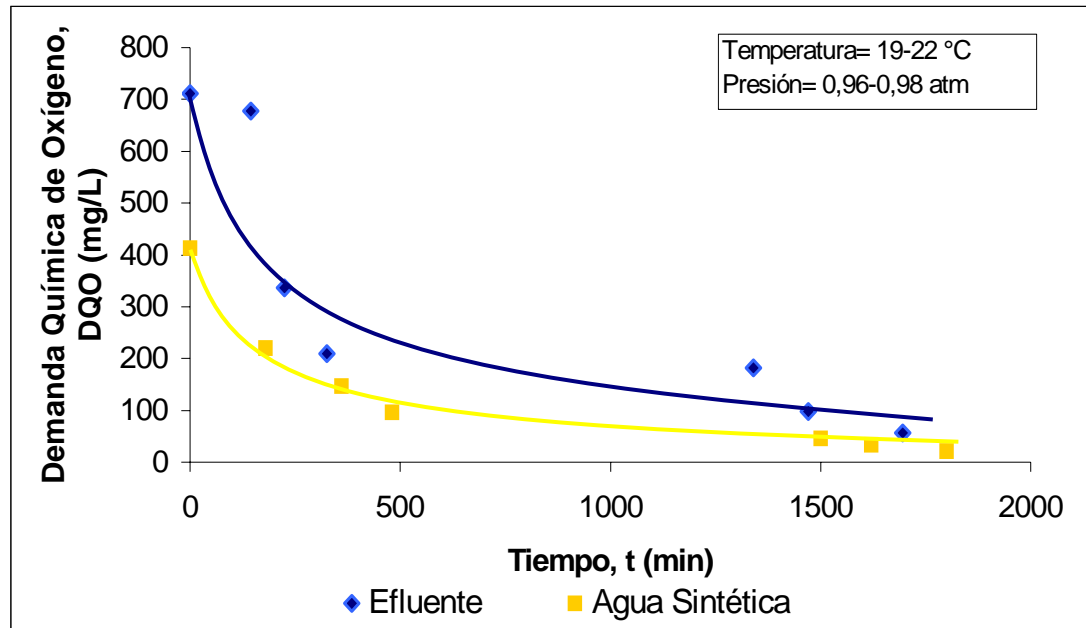


Figura N°10. Comparación de la actividad degradativa de los microorganismos entre la aclimatación al agua sintética y al efluente.

En la aclimatación al agua sintética los puntos obtenidos siguen una tendencia regular de disminución de la materia orgánica a medida que transcurre el ensayo, y el porcentaje de remoción orgánica es de 95%. Esto se evidencia la facilidad que poseen los microorganismos para digerir glucosa como fuente de sustrato.

En la aclimatación al efluente se nota una poca variación de la DQO entre el primer y segundo punto, lo cual se debe principalmente a que el efluente posee diferentes tipos de compuestos orgánicos mezclados y a diferentes concentraciones. Los

microorganismos tienen una cierta selectividad a la degradación de los compuestos y muestran preferencias nutricionales. Si están presentes sustratos mixtos, aquellos que están en las rutas metabólicas principales se consumen primero, mientras que los otros sustratos se consumen más tarde después que se hayan agotado los sustratos comunes.^[PERRY, 2001] Además cuando el lodo no está aclimatado, la concentración de alimentación de los compuestos orgánicos debe ser muy baja, ya que no está ocurriendo una biodegradación esto se puede notar en los primeros minutos de la aclimatación; y a medida que ocurre la aclimatación se puede obtener una mayor biodegradación de los compuestos lo cual se puede observar los minutos siguientes y hasta el final del ensayo en donde la tendencia de los valores experimentales de DQO tienden a disminuir de manera progresiva con la misma tendencia que los valores obtenidos para la aclimatación al agua sintética.

De hecho, se puede decir que el comportamiento de los microorganismos en la degradación fue aproximadamente el mismo, debido a la poca diferencia entre los porcentajes de remoción de materia orgánica, los cuales fueron de 95% y 92% para la aclimatación al agua sintética y al efluente respectivamente.

2. PRUEBAS DE CONSUMO DE OXÍGENO

En cada una de estas pruebas se evaluó la actividad respiratoria de los microorganismos aclimatados al efluente en contacto con los compuestos en estudio a diferentes concentraciones. Estos ensayos se realizaron con la finalidad de determinar la influencia de los compuestos en estudio sobre la actividad biológica de los microorganismos aclimatados. Así mismo, permite inferir la tendencia de estos compuestos a su biodegradación.

Con los datos experimentales obtenidos para cada uno de los compuestos se realizaron curvas de la variación del oxígeno disuelto en función del tiempo a diferentes concentraciones, tanto las curvas como los datos experimentales obtenidos se encuentran en el capítulo VIII (Apéndice D).

Los valores obtenidos de las pendientes se relacionan con la velocidad de consumo de oxígeno de los microorganismos, si el consumo es más rápido quiere decir que los microorganismos están degradando la materia orgánica con más rapidez consumiendo oxígeno para ello.

Los valores de las pendientes obtenidos variando la concentración de cloruro de etileno se presentan a continuación en la figura N°11.

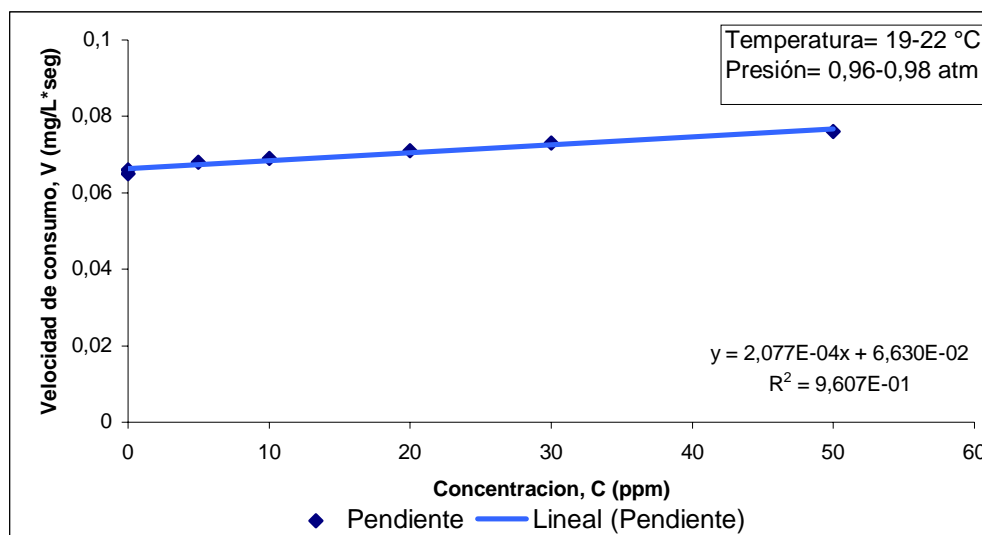


Figura N°11. Variación de la velocidad de consumo en función de la concentración del cloruro de etileno.

En la figura N°11 se puede observar que las pendientes de la recta tangente tienden a aumentar a medida que se aumenta la concentración de EDC en cada prueba, los datos se pueden ajustar linealmente de buena forma con un R^2 de 0.9607, esta tendencia creciente evidencia que con un aumento de la concentración de EDC la velocidad de consumo de oxígeno aumenta y por tanto se puede decir que existe una afinidad de los microorganismos a la biodegradación este compuesto.

El oxígeno disuelto en un sistema cerrado va disminuyendo a medida que los microorganismos lo van consumiendo por la digestión de la materia orgánica disponible, si la velocidad de consumo de oxígeno aumenta, esto quiere decir que los

microorganismos están consumiendo sustrato con más rapidez y en mayor cantidad en ese momento. [BUITRÓN, 2004]

El proceso previo de aclimatación influyó en gran parte en la obtención de estos resultados, ya que al final de un proceso de aclimatación resulta la eliminación de bacterias no eficaces y en la selección de aquellos organismos que tienen la capacidad de digerir la materia orgánica que pueda ser realmente tóxica. [KEMMER, 1989] Además, el tiempo de biodegradación disminuye cuando la aclimatación del consorcio de microorganismos es llevada a cabo, y la afinidad de los mismos a biodegradar el tóxico se incrementa.

En la figura N°12 y figura N°13, que se presentan a continuación, se muestran los resultados obtenidos para las pruebas de consumo de oxígeno con MVC y tolueno.

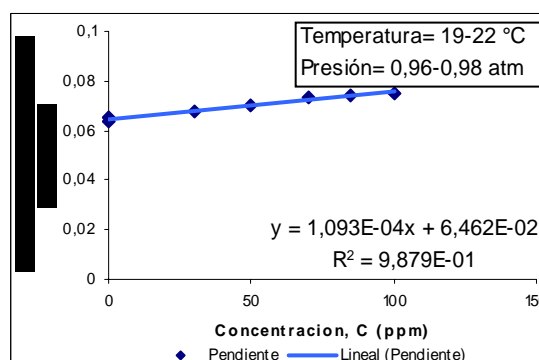
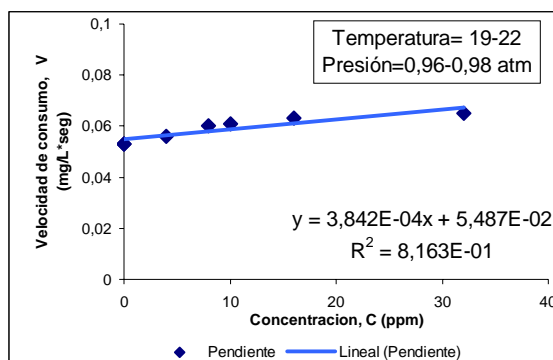


Figura N°12. Variación de la velocidad de consumo en función de la concentración de MVC.

Figura N°13. Variación de la velocidad de consumo en función de la concentración de tolueno.

Al igual que para el EDC, en las figuras anteriores se puede observar que en las pruebas de consumo de oxígeno con tolueno y con MVC, se obtuvo un incremento de la pendiente de la recta tangente a las curvas a medida que se aumentaba la concentración de los mismos.

En la figura N°12 se puede notar que la tendencia de la pendiente es creciente y se amolda a un ajuste lineal con una correlación de 0,8163, esto permite decir que el

consumo de oxígeno por los microorganismos es mayor a medida que se incrementa el valor de la concentración, y con esto se evidencia una biodegradación del MVC. Igualmente en la figura N°13 se puede realizar un ajuste lineal creciente, de los datos con una correlación de 0.9879, de aquí se puede decir que existe una degradación del tolueno por los microorganismos, por las razones expuestas anteriormente.

3. PRUEBAS EN EL REACTOR BIOLÓGICO

El objetivo principal de estos ensayos fue evaluar el progreso de la reacción de biodegradación con cada uno de los compuestos en forma individual. Para esta evaluación se determinaron los SSV que representan la cantidad de biomasa en el reactor y la DQO que representa la cantidad de materia orgánica disuelta en el agua. Estas determinaciones cubren todo el lapso de la prueba experimental.

En cada uno de los ensayos fue controlado el pH, la temperatura y el oxígeno disuelto de manera tal que los microorganismos se encontraran en un ambiente favorable para lograr su actividad biológica, y se garantizó la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo) requerida. Estos valores están ubicados en tablas que se encuentran en el capítulo VIII (apéndice E). En este bloque de resultados se analizará con los resultados obtenidos de manera individual para cada compuesto.

3.1. Cloruro de Etileno (EDC)

Esta prueba se realizó con el agua sintética y a ésta se le agregó la cantidad necesaria de una solución de cloruro de etileno para llegar a la concentración requerida del mismo para el ensayo, en este caso 20 ppm, y luego se aplicaron los microorganismos aclimatados al agua sintética. En el caso del blanco fue utilizada el agua sintética preparada en el laboratorio con glucosa como sustrato y los microorganismos aclimatados a la misma.

En la figura N°14 se observa que las dos curvas de biodegradación presentan tendencias similares, aunque en el comienzo del ensayo la DQO era mayor en la

prueba con EDC, debido a que este compuesto aporta al agua una gran cantidad de materia orgánica disuelta. Los porcentajes de remoción son 91% en el blanco y 84% para el EDC, la diferencia se debe principalmente a la facilidad que poseen los microorganismos para digerir la glucosa como sustrato como fue explicado anteriormente.

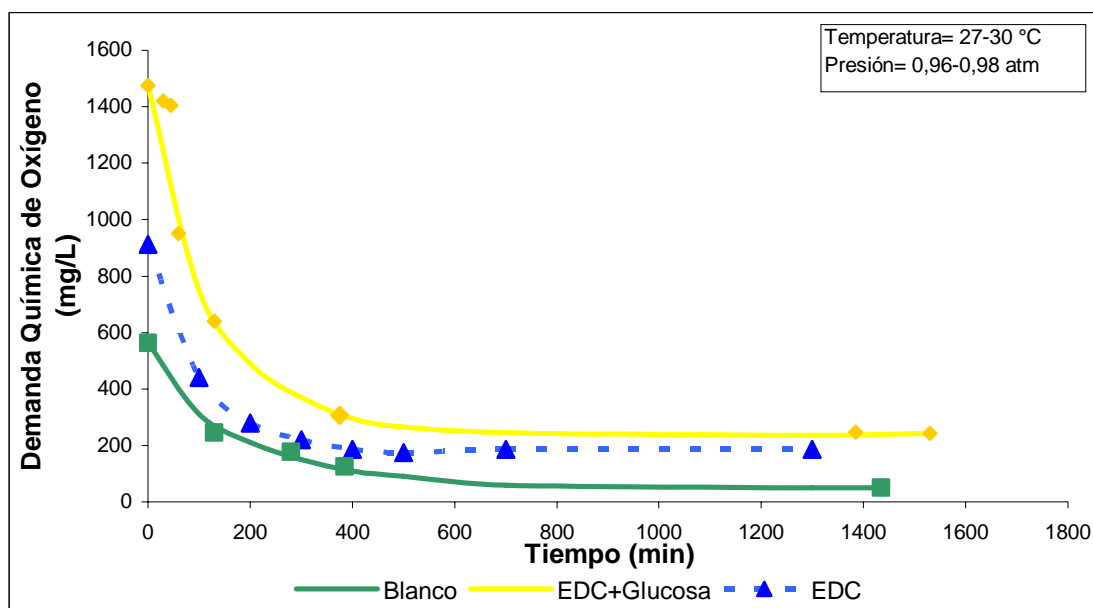


Figura N°14. Variación de la DQO en función del tiempo para el ensayo en el reactor con agua sintética y cloruro de etileno.

La curva punteada se obtuvo mediante la diferencia entre la curva del blanco y la de EDC con glucosa, la cual representa la aproximadamente la concentración de EDC disuelta en el líquido. Como se puede observar en la figura N°14 la concentración de EDC también tiende a disminuir en el transcurso de la prueba, el porcentaje de remoción es de 80%, con esto se puede decir que existe una tendencia a la biodegradación del EDC.

Esto se puede evidenciar con mayor certeza al observar los valores expuestos en la tabla N°9 en donde se muestra la variación de la masa del EDC durante el transcurso de la prueba.

Tabla N°9. Variación de la masa de EDC en el transcurso del ensayo.

Masa Inicial en el líquido, mi (mg)	Masa en el líquido a los 10 min, m ₁₀ (mg)	Masa Final en el líquido, mf (mg)	Masa en el cartucho de carbón, mc (mg)	Masa Biodegradada, mb (mg)
80	40	2	4	74

En la tabla N°9 se muestra que a los diez minutos luego de haberse iniciado la prueba la masa de EDC en el efluente es la mitad de la masa de EDC inicial alimentada al reactor, para luego obtenerse al final de la prueba una masa de EDC en el líquido de 2 mg; sin embargo, hay que tomar en cuenta que existe también una cantidad de EDC que es arrastrado por el aire, la cual fue recogida con un cartucho de carbón activado el cual contenía 4 mg de EDC.

Si se realiza un balance de masa de EDC dentro del reactor se obtiene la masa biodegradada, la cual es la diferencia entre la masa que entra al sistema (masa inicial en el líquido) y la masa que sale del sistema (en el aire y en el líquido). Según los resultados la masa biodegradada es de 74 mg lo cual representa una fracción importante de la masa alimentada al reactor biológico. Lo cual nos demuestra un alto grado de biodegradación del EDC, con un porcentaje de biodegradación de 92,5%.

Para observar el comportamiento reproductivo de la biomasa en esta prueba se presenta la figura N°15 en donde se muestran los resultados obtenidos de la variación de los SSV en el reactor en el desarrollo del ensayo.

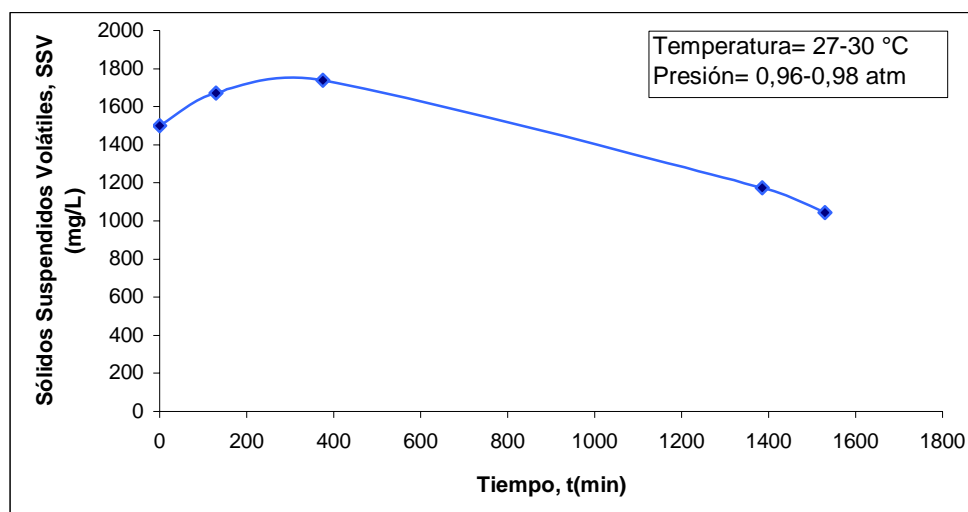


Figura N°15. Variación de los SSV en la prueba de EDC con agua sintética.

En la figura N°15 se puede notar que en los primeros 400 minutos de prueba la tendencia de los datos experimentales es de crecimiento, lo cual es lógico ya que existe un gran contenido de materia orgánica y los microorganismos en este tiempo empiezan a consumir sustrato y a reproducirse. Luego en los últimos minutos de la prueba se observa una pequeña disminución de los SSV y esto puede deberse a que el sustrato esté agotado como se nota en la figura N°14, en donde se ve que después de los 400 minutos la cantidad de materia orgánica disuelta en el agua expresada como DQO tiene una tendencia estabilizada hasta los últimos minutos de prueba.

Con este conjunto de resultados se puede decir que el EDC no presenta ningún tipo de efecto dañino sobre los microorganismos, sino por el contrario se observa que es biodegradado hasta bajas concentraciones, como era de esperarse de acuerdo a las investigaciones presentadas en la literatura especializada, expuestas en el capítulo I en los antecedentes de la investigación.

3.2. Monocloruro de Vinilo (MVC)

Para estudiar la biodegradación de este compuesto se realizaron varias pruebas a diferentes concentraciones, y en todos los ensayos se determinó la concentración

inicial (a los 10 minutos después de haber iniciado la prueba) y final de la prueba. Los resultados analíticos realizados por el laboratorio de la empresa, arrojaron que la concentración inicial de este compuesto en todos los casos era menor que 1 ppm.

Esto se puede explicar ya que de acuerdo a las propiedades físicas del cloruro de vinilo, como son el punto de ebullición (PE) de $-13,9^{\circ}\text{C}$ y la presión de vapor (PV) de 2548 mmHg a 20°C , se considera un compuesto orgánico extremadamente volátil. Los compuestos orgánicos volátiles pueden ser emitidos al ambiente por dos mecanismos: la volatilización y el arrastre por gas.^[METCALF, 1996]

Este compuesto en condiciones normales de presión y temperatura se encuentra en estado gaseoso, para la preparación de la solución de MVC se burbujeó el gas en agua destilada, ésta solución luego fue utilizada para la ejecución de cada uno de los ensayos; debido a la volatilidad de este compuesto la concentración en el líquido de esta solución pudo haber disminuido con el tiempo, y al tomar la muestra de líquido para agregarla al reactor seguramente era menor a la concentración deseada.

Luego, en el reactor biológico la solución es puesta en contacto directo con el aire en donde, sin duda alguna se dieron dos fenómenos, el de volatilización y el de arrastre por aire, de aquí se puede decir que una gran parte de la concentración agregada de MVC al reactor fue disminuida por estos dos fenómenos. Para que finalmente luego de 10 minutos de haber empezado la prueba la concentración de MVC en el líquido residual estuviera por debajo de los límites de detección (1 ppm). Con estos resultados se puede indicar que lo más probable es que el compuesto estuviera en concentraciones muy bajas en el reactor. En todo caso, ésta incertidumbre no permite cuantificar la extensión de la biodegradación en el reactor.

3.3. Tolueno

Esta prueba se realizó a una concentración de tolueno de 70 ppm en el agua sintética y aplicando los microorganismos aclimatados al agua, los primeros resultados

obtenidos se refieren a la variación de la DQO en función del tiempo que se muestra a continuación en la figura N°17. Los datos experimentales a partir de los cuales se realizó esta gráfica se encuentran en el capítulo VIII (apéndice E).

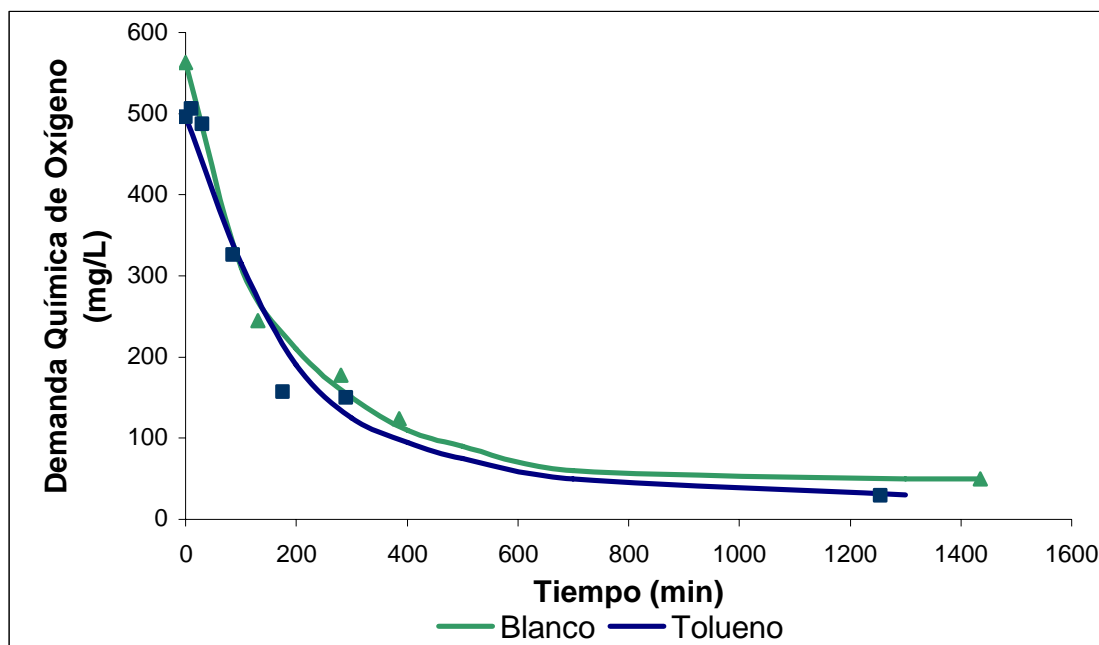


Figura N°16. Variación de la DQO en la prueba de tolueno con agua sintética.

En la figura N°16 se observa que las tendencias a la biodegradación por las dos curvas son similares, tanto que las curvas se superponen en algunos puntos. A medida que transcurre el ensayo la cantidad de materia orgánica disuelta en el agua se hace cada vez menor. Los porcentajes de remoción son 91% en el blanco y 94% para el tolueno, también se puede observar cierta similitud en los porcentajes de remoción. Este resultado evidencia una alta biodegradación del tolueno.

Los resultados obtenidos de la variación de masa dentro del sistema se presentan en la tabla N°10 que se presenta a continuación.

Tabla N°10. Variación de la masa de tolueno en el transcurso del ensayo.

Masa Inicial en el líquido, mi (mg)	Masa en el líquido a los 10 min, m ₁₀ (mg)	Masa Final en el líquido, mf (mg)	Masa en el cartucho de carbón, mc (mg)	Masa Biodegradada, mb (mg)
280	4	4	2	274

En la tabla N°10 se observa que luego de los 10 minutos de haber comenzado el ensayo la masa de tolueno bajó muy rápidamente hasta 4 mg, y luego se mantuvo así hasta el final del ensayo, para obtener una masa biodegradada de 274 mg a los 10 minutos de reacción, lo que representa un porcentaje de biodegradación de 98%, este resultado evidencia una alta biodegradación en muy poco tiempo, lo cual sobreestima los resultados esperados, ya que según las investigaciones reportadas en la bibliografía.^[HAMED, 2004]

Una de las limitaciones que se presentó en este estudio, fue que luego de haber realizado todas las pruebas experimentales, los resultados de los análisis realizados por el laboratorio de analítica fueron entregados, y debido a esto no se repitió la prueba en el reactor biológico con tolueno.

3.4. Efluente (mezcla de EDC, MVC y tolueno)

Esta prueba fue realizada con la muestra de efluente proporcionada por la empresa, la cual contenía la mezcla de los tres compuestos (MVC, EDC y tolueno), las concentraciones de los compuestos fue ajustada de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización. El tiempo del ensayo fue de 8 horas aproximadamente, y el lodo utilizado fue aclimatado previamente al efluente durante 20 horas aproximadamente.

Los resultados que se exponen en la tabla N°11 obedecen a las concentraciones iniciales y finales de cada uno de los compuestos en la realización de esta prueba.

Tabla N°11. Concentraciones de los compuestos en la prueba de biodegradación con la muestra de efluente industrial.

	Concentración Inicial (ppm)	Concentración Final (ppm)
Cloruro de Etileno (EDC)	11	<1
Cloruro de Vinilo (MVC)	<1	<1
Tolueno	14	<1

En la tabla N°11 se puede notar que nuevamente se obtienen que la concentración de MVC en el líquido al inicio de la prueba, se encuentra por debajo de 1 ppm, lo que permite comprobar que si existe la volatilización del mismo, a diferencia de las concentraciones de EDC y tolueno en donde se observa que inicialmente están presentes en el líquido, y que al final de la prueba, sus concentraciones se reducen hasta valores menores a 1 ppm.

Los resultados que se presentan a continuación involucran solamente al tolueno y al EDC debido a que por las razones anteriormente dichas el MVC no se encuentra presente en el sistema de reacción, o está en concentraciones muy pequeñas. En la figura N°17 se muestran los resultados obtenidos de la variación de la DQO en el reactor durante la prueba.

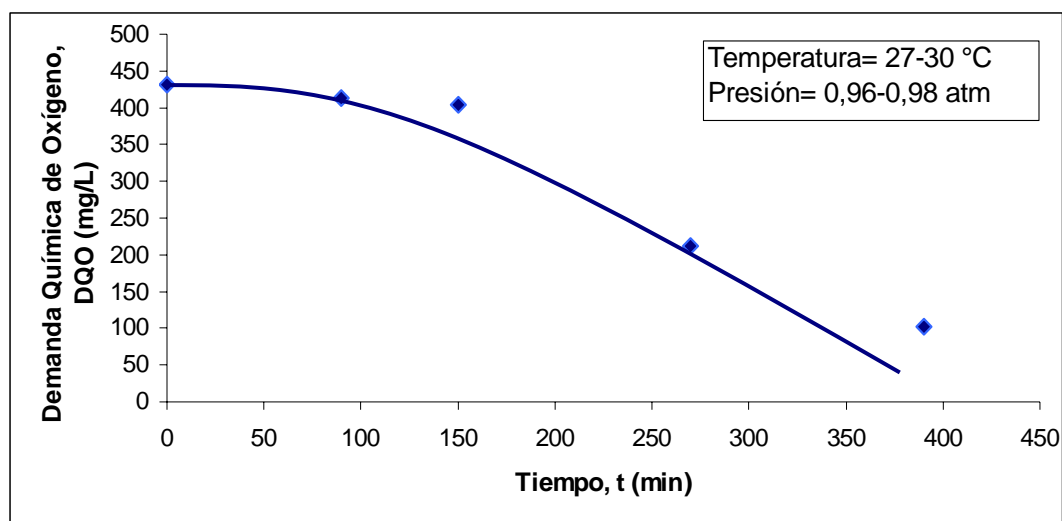


Figura N°17. Variación de la DQO en la prueba en el reactor con el efluente.

En la figura N°17 se puede observar una tendencia decreciente de la DQO en función del tiempo del ensayo. En esta figura se puede observar que entre los 0-150 minutos del ensayo hubo una disminución muy pequeña de la DQO desde 431 mg/L hasta 404 mg/L, para luego presentar un descenso hasta 194 mg/L, el retardo en la disminución de la DQO al comienzo del ensayo se debe a que la muestra de efluente, que incluye una mezcla de EDC y el tolueno, que pudieran presentar resistencia a la acción biológica de los microorganismos, no obstante, se observa que el porcentaje de biodegradación 76%, el cual evidencia una aceptada biodegradación de los compuestos presentes en el efluente.

Para respaldar estos resultados se pueden observar con mas detalle las variaciones en masa de EDC y tolueno el transcurso del ensayo se presenta la tabla N°12 a continuación.

Tabla N°12. Variación de la masa de EDC y tolueno en el transcurso del ensayo.

Compuesto	Masa Inicial en el líquido, mi (mg)	Masa en el líquido a los 10 min, m₁₀(mg)	Masa Final en el líquido, mf (mg)	Masa en el cartucho de carbón, mc (mg)	Masa Biodegradada, mb (mg)
EDC	100	55	5	1	94
TOLUENO	350	70	5	1	344

En la tabla N°12 se puede observar que la masa de EDC nuevamente se reduce a la mitad luego de los 10 minutos de haber comenzado el ensayo y para este mismo tiempo la masa de tolueno en el líquido es de 70 mg.

Para el EDC se evidencia nuevamente una alta biodegradación obteniéndose un valor de masa biodegradada de 94 mg, el porcentaje de biodegradación asociado fue de 94%.

A diferencia de los resultados obtenidos para el tolueno en la prueba con agua sintética, aquí se observa que la biodegradación de este compuesto no ocurre en los primeros 10 minutos de prueba, sino que es más lenta. Estos resultados reflejan las tendencias de biodegradación esperadas para este compuesto^[ECKENFELDEER, 1989], la masa biodegradada fue de 344 mg lo cual muestra una alta biodegradación (98%). En la prueba realizada con tolueno y agua sintética pudo haber existido algún error experimental, porque no era de esperar una reducción tan alta a los 10 minutos. Esta diferencia quizás ocurrió en el momento de captación de la muestra del reactor, ya que es muy importante que la muestra sea tomada relativamente rápido debido a la volatilidad de este compuesto, lo cual ocasionaría que la concentración de la muestra en el vial sea menor a la que realmente se encontraba en el reactor en ese momento.

La variación de los sólidos suspendidos volátiles en el sistema se puede observar en la figura N°18.

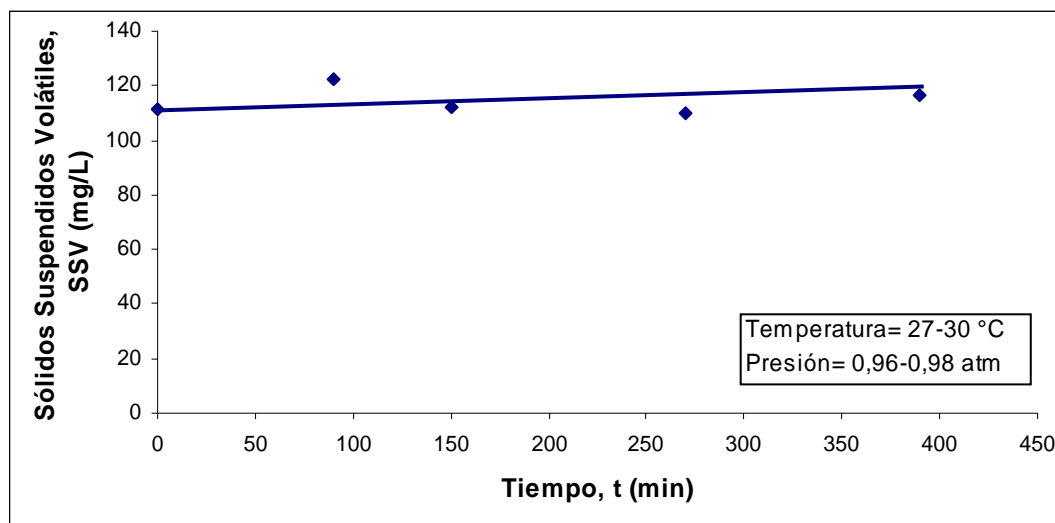


Figura N°18. Variación de los SSV en la prueba en el reactor con el efluente.

En la figura N°18 se observa que no hay una variación significativa de los SSV dentro del reactor durante el ensayo; se observa una tendencia pequeña al aumento de los sólidos, esto quizás fue por la poca cantidad de microorganismos presentes en el sistema al inicio del ensayo.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones del Trabajo Especial de Grado. Estas se presentan en tres bloques de igual manera que la discusión de resultados.

1. PROCESO DE ACLIMATACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS

1.1. Agua Sintética

- ☞ El procedimiento de aclimatación aplicado muestra una alta eficiencia de remoción de materia orgánica (glucosa) en la cual se obtuvo un 95%.
- ☞ El comportamiento del crecimiento de los microorganismos en el recipiente de aclimatación contempla las fases de latencia y luego de crecimiento exponencial, que se mantiene porque la aplicación del sustrato se continuó durante todo el lapso de la aclimatación. Este comportamiento se corresponde con lo señalado en la bibliografía.
- ☞ La actividad respiratoria de los microorganismos se incrementó a medida que transcurre el proceso de aclimatación; es decir, que la biomasa se aclimató perfectamente al sustrato (glucosa).

1.2. Muestra de Efluente

- ☞ La caracterización del efluente permitió establecer las carencias de nutrientes (nitrógeno y fósforo) que presentan esta agua con relación a la concentración de materia orgánica (DBO).
- ☞ El procedimiento de aclimatación aplicado, tal como con el agua sintética, resultó totalmente exitoso, tal como se demuestra por la alta eficiencia de remoción de materia orgánica (efluente) en la cual se obtuvo un 92%.
- ☞ El crecimiento celular presentó el comportamiento clásico “tipo campana”, que sucede cuando se suspende el suministro de sustrato después de alcanzar la fase exponencial de crecimiento, ya que en la evaluación del efluente se decidió ilustrar el comportamiento del crecimiento celular hasta la condición de escasez

de sustrato. La tendencia de los datos experimentales, permiten identificar claramente las fases de latencia, crecimiento exponencial, estacionaria y de muerte exponencial.

- ☞ El comportamiento de la disminución de la materia orgánica disuelta en el recipiente de aclimatación fue similar para el agua sintética como para el efluente, tal como se evidencia por los valores similares de remoción (95% y 92% respectivamente).
- ☞ Se comprobó que la actividad respiratoria de los microorganismos disminuye cuando se suspende el suministro de sustrato en el sistema.

2. PRUEBAS DE CONSUMO DE OXÍGENO

- ☞ Se demostró para cada uno de los compuestos orgánicos evaluados (MVC, EDC y Tolueno) que al incrementar sus concentraciones se acelera la actividad metabólica de la biomasa aclimatada, tal como se evidencia por el incremento de las pendientes de las rectas tangentes a las curvas de consumo de oxígeno de los microorganismos en la medida que se aumenta la concentración de los compuestos evaluados, evidenciando una afinidad de los microorganismos a la biodegradación de estos compuestos.

3. PRUEBAS EN EL REACTOR BIOLÓGICO

3.1. Cloruro de Etileno (EDC)

- ☞ Se demostró la biodegradabilidad del cloruro de etileno. El porcentaje de remoción fue de 84% en la prueba del EDC con agua sintética.
- ☞ La cantidad en masa de EDC en el agua va disminuyendo a medida que transcurre la reacción de oxidación biológica, lo que demuestra que no existe ningún efecto dañino del mismo sobre los microorganismos.
- ☞ La cantidad de microorganismos expresada como SSV tienden a aumentar un poco al inicio de la prueba de EDC en agua sintética, luego disminuye al final de la prueba en la medida que se consume el sustrato.(DQO)

3.2. Monocloruro de Vinilo (MVC)

- ☞ La biodegradación del MVC no fue posible evaluarla debido a que por sus propiedades físicoquímicas, éste compuesto no se mantiene en el agua, sino que pasa fácilmente y en poco tiempo a la fase gaseosa, ya sea por volatilización o por el arrastre con el aire dentro del reactor.

3.3. Tolueno

- ☞ Se obtuvo una biodegradación muy alta del tolueno en las pruebas con el agua sintética, con un porcentaje de remoción de la materia orgánica de 94%.
- ☞ La cantidad de masa biodegradada es de 274 mg, lo cual representa un porcentaje de masa biodegradada de 98%, esto parece una remoción demasiado elevada, respecto a los resultados esperados en cuanto a la biodegradación de este compuesto, de acuerdo con la literatura especializada.

☞ Efluente (mezcla de EDC, MVC y tolueno)

- ☞ La concentración de MVC inicialmente estuvo por debajo de 1 ppm lo cual evidencia que éste no se encontraba en el reactor, o estaba en una concentración muy baja.
- ☞ Se evidenció la biodegradación general del efluente con la mezcla de los compuestos orgánicos de prueba, obteniéndose un porcentaje de remoción de materia orgánica de 76%.
- ☞ La cantidad de masa de EDC biodegradada fue de 94 mg, con un porcentaje de biodegradación asociado de 94%, lo cual evidencia una alta biodegradación, ya no se obtuvo muchas pérdidas de masa.
- ☞ El porcentaje de biodegradación del tolueno fue del 98%, evidenciando una biodegradación alta y no se obtuvo mucha pérdida de masa por arrastre con aire.
- ☞ La biodegradación del tolueno en este ensayo fue más lenta que en la prueba de tolueno con agua sintética; es decir, la biodegradación se realizó en un tiempo mayor que 10 minutos, este resultado de biodegradación es el esperado por la

mayor diversidad de compuestos orgánicos, muchos de los cuales pueden presentar baja biodegradabilidad.

- ☞ La cantidad de microorganismos (SSV), tienen una tendencia constante durante el ensayo, esto se debe a la baja cantidad de microorganismos presentes al inicio del ensayo.

CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones que se generaron de la realización de este Trabajo Especial de Grado.

- ☞ En los procesos industriales donde se genere o utilice el cloruro de vinilo (MVC) se deben tomar acciones para evitar la emisión gaseosa del mismo al ambiente, ya que por sus propiedades fisicoquímicas este en condiciones normales no se mantiene en el líquido.

- ☞ Tomar las precauciones necesarias en las captaciones de las muestras en el reactor, debido a que por la volatilidad de los compuestos, la muestra puede cambiar de concentración.

- ☞ Estudiar la biodegradación del cloruro de etileno (EDC), cloruro de vinilo (MVC) y tolueno, mediante un sistema de tratamiento biológico por lodos activados en condiciones continuas.

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACS medio Ambiente. **“Plantas Depuradoras de Agua”**. Disponible en: http://www.acsmedioambiente.com/plantas_depuradoras.htm.
2. AELION, DOBBINS y PFAENDER. **“Adaptation of aquifer microbial communities to the biodegradation of xenobiotic compounds: influence substrate concentration and preexposure”**. Environmental Toxicology Chemical. Vol. 8, 1989, pp. 75-86.
3. BUITRÓN y MORENO. **“Evolución de la actividad de los microorganismos en los procesos de aclimatación y desaclimatación al 4-clorofenol”**. XVI Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, 2004.
4. CHANG, BIN WU y YING YUAN. **“Biodegradation of benzene, toluene and other aromatic compounds by Pseudomonas sp D8”**. Chemosphere, Vol. 5, No. 12, 1997, pp. 2807-2815.
5. CRITES, Ron y TCHOBANOGLIOUS, George. **“Tratamiento de Aguas residuales en pequeñas poblaciones”**. McGrawHill Interamericana. Editorial Nomos. Bogota-Colombia, 2001.
6. DE BUSSY, J.H. **“Materials and Technology Petroleum and organics Chemicals”**. Logman. Chicago, 1972.
7. ECKENFELDEER, Wesley. **“Industrial Water Pollution Control”**. 2da. Edición. McGrawHill. U.S.A., 1989.
8. HAMED, BAYRAKTAR, MEHMETOGLU, U., y MEHMETOGLU, T. **“The Biodegradation of benzene, toluene and phenol in a two-phase system”**. Biochemical Engineering Journal, Vol. 19, No. 2, 2004, pp. 137-146.
9. HERBST y WIESMANN. **“Kinetics and reaction engineering aspects of the biodegradation of dichloromethane and dichloroethane”**. Water Research. Vol. 30, No. 5, 1996, pp. 1069-1076.

10. Kemmer, F. N., McCallion, J., **“Manual del Agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones”**. Nalco Chemical Company, McGraw Hill, México, 1989.
11. LÓPEZ, Rafael. **“Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales”**. Alexis Oramas Consultores Técnicos, C.A., 1998.
12. Manual HACH Company. Cod Reactor. **“Demanda Química de Oxígeno”**. 1997.
13. Manual HACH Company. Model CO150 - Portable Conductimeter. **“Determinación de la conductividad”**. 2001.
14. METCALF & EDDY. **“Ingeniería de Aguas Residuales”**. 3^{ra} Edición. McGrawHill. México, 1996.
15. NORMA VENEZOLANA COVENIN 2461®. Aguas Naturales, Industriales y Residuales. **“Determinación de sólidos”**.
16. NORMA VENEZOLANA COVENIN 7072. Aguas Naturales, Industriales y Residuales. **“Determinación de Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Orgánico”**. 1994.
17. NORMA COVENIN 7151. Aguas Naturales, Industriales y Residuales. **“Determinación de Fósforo”**. 1993.
18. PERRY, Robert H. y GREEN, Don W. **“Manual del Ingeniero Químico”**. Volumen IV. 7^o Edición. McGrawHill. España, 2001.
19. QUINTERO, Rodolfo. **“Ingeniería Bioquímica. Teoría y Aplicaciones”**. Editorial Alhambra Mexicana. México, 1990.
20. RADZIUL y GUARINO. **“Operation of Wastewater Treatment Plant”**. Water Pollution Control Federation. USA, 1976.
21. RENDILES, Hernando. **“Salud Ocupacional en Venezuela”**. Disponible en: http://www.pdvsa.tripod.com/id24_m.htm.
22. SAWYER, McCARTY y PARKIN. **“Química para Ingeniería Ambiental”**. 4^{ta} Edición. McGrawHill. Colombia, 2001.

CAPÍTULO VIII. APÉNDICES

APÉNDICE A. INFORMACIÓN DE LOS COMPUESTOS

TOLUENO

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Nombre Comercial: Tolueno

Sinónimos: metil benceno, toluol, fenil metano, metilbenzol.

Formula Química: $C_6H_5CH_3$ ó C_7H_8 .

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

- Punto de Ebullición, 760 mmHg: 110.6 °C.
- Gravedad Especifica ($H_2O = 1$): 0.866 (20/4 °C, líquido).
- Presión de Vapor: 36.7 mmHg (30 °C), 55 mmHg (25 °C).
- Punto de Fusión: - 95°C
- Solubilidad en Agua (20°C): 0.5g/L
- Peso Molecular: 92.15
- Descripción: Líquido incoloro, volátil, no corrosivo, con olor aromático. Miscible en alcohol, éter, benzol, acetona, disulfuro de carbono, cloroformo, inflamable, irritante, higroscópico.

PROPIEDADES EXPLOSIVAS Y DE INFLAMACIÓN

- Punto de Ignición: 536 °C (997 °F).
- Punto de Inflamación: 4 °C (40 °F).
- Límites de Inflamabilidad en aire, % Vol: inferior: 1.27 / superior: 7.0

RIESGOS A LA SALUD

- Límite Máximo Permisible: 100 ppm (375 mg/m³).
- Rutas de Penetración al organismo: Inhalación, ingestión, contacto.

- Toxicología: Irritante, depresivo del SNC, lesión de hígado y riñones. Signos y síntomas: vapores irritan ojos, vías respiratorias. Conjuntivitis, quemaduras de córnea. Se absorbe rápidamente por piel causando sequedad y dermatitis. Inhalación: tos, bronquitis y neumonía química. Ingestión: vómito, diarrea. Narcótico e incoordinación a altas concentraciones.

MEDIDAS DE PROTECCIÓN

- Tipo de Protección Respiratoria: Para altas concentraciones respiración autónoma o semi-autónoma. En caso contrario máscara con filtro contra vapores orgánicos.
- Tipo de Ventilación: local por extracción.
- Tipo de Guantes de Protección: Guantes impermeables y resistentes a solventes orgánicos.
- Tipo de Lentes de Protección: Lentes de protección sin perforaciones laterales, bien ajustados a la cara con bandas de goma.
- Equipo de Protección Adicional: Capuchas, impermeabilizantes, votas de cuero. Crema protectora para las manos.
- Medidas de Precaución en el Manejo y Almacenamiento del Material: Producto muy inflamable. Almacene en lugar ventilado, sin fuentes de ignición, separado de oxidantes y ácidos.

CLORURO DE VINILO

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Nombre Comercial: Cloro Etileno

Sinónimos: Monómero de Cloruro de Vinilo, Cloruro de Polivinilo, Cloro Eteno.

Formula Química: $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

- Punto de Ebullición, 760 mmHg: $-13.9\text{ }^\circ\text{C}$.
- Gravedad Específica ($\text{H}_2\text{O} = 1$): 0.912 ($15/4\text{ }^\circ\text{C}$) 0.969 ($-13\text{ }^\circ\text{C}$).
- Presión de Vapor: 2548 mmHg ($20\text{ }^\circ\text{C}$), 760 mmHg ($13.8\text{ }^\circ\text{C}$).
- Punto de Fusión: $-160\text{ }^\circ\text{C}$.
- Solubilidad en Agua (25C): 1.1 g/L
- Peso Molecular: 62.50
- Descripción: Gas incoloro de olor dulzón. Inflamable. Usualmente se encuentra como líquido frío. El líquido es incoloro y emite vapores con olor a éter. Soluble en alcohol etílico, éter.

PROPIEDADES EXPLOSIVAS Y DE INFLAMACIÓN

- Punto de Ignición: $472.2\text{ }^\circ\text{C}$ ($882\text{ }^\circ\text{F}$).
- Punto de Inflamación: $-77.8\text{ }^\circ\text{C}$ ($-108\text{ }^\circ\text{F}$).
- Límites de Inflamabilidad en aire, % Vol: inferior 4 / superior 22

RIESGOS A LA SALUD

- Límite Máximo Permisible: 5 ppm (cancerígeno reconocido).
- Rutas de Penetración al organismo: Inhalación y contacto.
- Toxicología: Produce fuerte irritación de ojos, piel y membranas mucosas. Su inhalación causa irritación de los pulmones, dolor de cabeza, narcosis, inconsciencia. Provoca alteración sanguínea (anemia), pérdida de la sensibilidad en manos y pies (sistema nervioso central). Cancerígeno reconocido (cáncer de hígado).

MEDIDAS DE PROTECCIÓN

- Tipo de Protección Respiratoria: Máscaras con cartuchos químicos hasta 10 ppm y equipos de respiración autocontenida o suplida por aire para concentraciones > 10 ppm.
- Tipo de Ventilación: Local por extracción.
- Tipo de Guantes de Protección: Guantes impermeables y resistentes a producto químicos.
- Tipo de Lentes de Protección: Lentes monolentes, escudo facial.
- Equipo de Protección Adicional: Ropa fresca. Duchas de emergencia y fuentes lava ojos en las áreas de trabajo.
- Medidas de Precaución en el Manejo y Almacenamiento del Material: Almacene a temperatura ambiente.

CLORURO DE ETILENO

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Nombre Comercial: 1,2 Dicloroetano

Sinónimos: Dicloruro de etileno, EDC, dicloroetano simétrico.

Formula Química: $\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{Cl}$.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

- Punto de Ebullición, 760 mmHg: 83°C.
- Gravedad Específica ($\text{H}_2\text{O} = 1$): 1.256.
- Presión de Vapor: 87 mb (20 °C).
- Punto de Fusión: -35 °C.
- Solubilidad en Agua (19°C): 5 g/L
- Peso Molecular: 98.96
- Descripción: Líquido incoloro, aceitoso, olor parecido al cloroformo, sabor dulce. Inflamable, irritante, soluble en alcohol, acetona, benceno, éter.

PROPIEDADES EXPLOSIVAS Y DE INFLAMACIÓN

- Punto de Ignición: 413 °C (775 °F).
- Punto de Inflamación: 13 °C (55 °F).
- Límites de Inflamabilidad en aire, % Vol: inferior 6.2 / superior 15.9

RIESGOS A LA SALUD

- Límite Máximo Permisible: 10 ppm.
- Rutas de Penetración al organismo: Inhalación, ingestión y contacto.
- Toxicología: Irritante de mucosas, depresivo del sistema nervioso central, daños crónicos al hígado y riñones. Edema pulmonar, efecto narcótico, inconciencia.

MEDIDAS DE PROTECCIÓN

- Tipo de Protección Respiratoria: Máscaras con cartuchos químicos contra vapores orgánicos.
- Tipo de Ventilación: Local por extracción.
- Tipo de Guantes de Protección: Guantes impermeables y resistentes a solventes orgánicos.
- Tipo de Lentes de Protección: Lentes monolentes.
- Medidas de Precaución en el Manejo y Almacenamiento del Material: Almacene en recipientes de hierro, acero, vidrio opaco en sitio ventilado y fresco.

APÉNDICE B. MÉTODOS ANALÍTICOS

DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS

1.1. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES SECADOS A 103–105°C [COVENIN 2461, 1997]

Principio: Se hace pasar una muestra homogénea por un filtro de fibra de vidrio, y el residuo retenido en el mismo se seca en un horno a 103-105°C hasta peso constante. El aumento del peso del filtro representa los sólidos totales en suspensión.

Interferencias:

1. Se debe eliminar las partículas flotantes grandes o los aglomerados sumergidos de materiales no homogéneos presentes en la muestra, si se determina que su inclusión no es deseable en el resultado final.
2. Se debe dispersar, con un mezclador, la grasa y el aceite flotante, antes de extraer la muestra para asegurar la eliminación del material disuelto.
3. Tiempos de filtración prolongados, producto de la obstrucción del filtro, puede originar resultados erróneos, como consecuencia de la cantidad excesiva de sólidos retenidos en el medio filtrante.

Aparatos y materiales:

1. Horno de secado para operar a una temperatura de 103 a 105°C.
2. Desecador y bomba de vacío.
3. Balanza analítica con una precisión de $\pm 0,1$ mg.
4. Discos de filtrado de fibra de vidrio, sin aglutinante orgánico.
5. Equipo de filtración, apropiado según el tipo de filtro seleccionado.
6. Crisol de Gooch, de 25 a 40 ml de capacidad.
7. Soporte de filtro, adaptador para crisol de Gooch o embudo para filtro de membrana.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

8. Matraz de succión (kitasato), 500 ml de capacidad.

9. Manta de aluminio, 65 mm de diámetro.

Procedimiento:

1. Colocar el filtro en un crisol Gooch, aplicar vacío y lavar el filtro con tres porciones sucesivas de 20 ml de agua destilada. Continuar la succión hasta eliminar toda la traza de agua, descartar el agua de lavado.

2. Retirar el filtro del equipo de filtrado y trasladar hasta la manta de aluminio o acero inoxidable. Alternativamente, procédase a separar el crisol y la combinación de filtro, si se está utilizando un crisol Gooch.

3. Enfriar el filtro en un desecador por 30 minutos, pesar inmediatamente antes de usar.

4. Instalar el aparato de filtrado y el filtro para iniciar la succión. Para muestras no homogéneas, como es el caso de muestras de agua residual no tratadas, se debe utilizar un filtro ancho para permitir el filtrado de una muestra representativa.

5. Humedecer el filtro, con pequeñas cantidades de agua destilada, con la finalidad de ajustarlo.

6. Pasar un volumen medido de muestra homogenizada por un filtro de fibra de vidrio. Lavar con tres porciones sucesivas de 10 ml de agua destilada, permitiendo el drenaje completo del filtro entre los lavados; y continuar la succión durante 3 minutos, después de finalizada la filtración.

7. Separar con cuidado el filtro del aparato y trasladarlo a una manta de aluminio o acero inoxidable. Al mismo tiempo separar el crisol y la combinación de filtro del adaptador de crisol (en caso de utilizarse un crisol Goch).

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

8. Secar en el horno a 103 – 105°C, por espacio de una hora.
9. Enfriar en un desecador con la finalidad de equilibrar la temperatura; luego pesar.
10. Repetir los pasos 8 y 9 hasta obtener un peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor al 4% del peso previo.

Expresión de los resultados

Calcular los sólidos volátiles de la muestra de la siguiente manera:

$$\text{Sólidos suspendidos totales (mg/L)} = \frac{(A - B)}{C} \times 1000$$

Donde:

A = peso del filtro + residuo, (mg)

B = peso del filtro, (mg)

C = volumen de muestra, (ml)

Reportar la cantidad de sólidos suspendidos totales en unidades de mg/L.

1.2. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS FIJOS Y VOLÁTILES A 550°C [COVENIN 2461, 1997]

Principio: El residuo obtenido con el método descrito anteriormente para determinar sólidos totales en suspensión se calienta, a peso constante, a una temperatura de 550°C. Los sólidos remanentes representan los sólidos totales fijos o en suspensión, mientras que la pérdida de peso por ignición representa los sólidos volátiles.

Interferencias:

1. Errores en la determinación por pérdida de materia evaporable.
2. Errores considerables por la determinación de bajas concentraciones de sólidos volátiles en presencia de concentraciones elevadas de sólidos fijos.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

Aparatos y Materiales

En este ensayo se requieren los mismos aparatos que se utilizan en la determinación de sólidos suspendidos totales.

Procedimiento

1. Calentar el residuo producido por el método descrito para determinar sólidos suspendidos totales, a peso constante, en un horno o mufla a $550 \pm 50^\circ\text{C}$. Elevar la temperatura en el horno antes de introducir la muestra. Por lo general el tiempo estimado es de 15 a 20 minutos.
2. Enfriar la placa o el disco de filtro al aire hasta que haya disminuido el calor.
3. Transferir la placa o disco al desecador para proceder a enfriar en un ambiente seco, sin sobrecargar el desecador.
4. Tan pronto se hay enfriado, pesar la placa o disco.
5. Repetir los pasos del punto 1 hasta el punto 4 hasta obtener peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor al 4%.

Expresión de los resultados

Calcular los sólidos volátiles de la muestra de la siguiente manera:

$$\text{Sólidos volátiles (mg/L)} = \frac{(A - B)}{C} \times 1000$$

Donde:

A = peso del residuo + placa antes de la incineración (mg)

B = peso del residuo + placa después de la incineración (mg)

C = volumen de muestra (ml)

Reportar la cantidad de sólidos volátiles en unidades de mg/L.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)^[3]

Principio: Este método establece la determinación de la demanda química de oxígeno en aguas de desecho. Es una medida del oxígeno de los materiales presentes en el agua de desecho que es susceptible a ser oxidado por oxidantes químicos fuertes, en este caso dicromato de potasio.

Aparatos y materiales:

1. Reactor de DQO, marca HACH, modelo 45600.
2. Espectrofotómetro marca HACH Modelo DR/2010.
3. Pipeta de 2 ml.
4. Viales de reactivo para digestión, alto rango 0 a 1500 mg/L.

Procedimiento:

1. Homogeneizar 100 ml de muestra por 30 segundos, para muestras con grandes cantidades de sólidos se debe aumentar el tiempo de homogeneización.
2. Encender el reactor de DQO, precalentar a 150°C.
3. Pipetear 2 ml de la muestra en el vial. Tapar y mezclar invirtiendo varias veces el vial. Colocarlo en el reactor precalentado.
4. Preparar un blanco repitiendo el paso 3, sustituyendo la muestra con 2 ml de agua destilada, se debe correr un blanco con cada set de muestras.
5. Introducir los viales en el reactor y calentarlos por 2 horas. Al finalizar enfriar hasta 120°C o menos.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

6. Invertir varias veces cada vial mientras están calientes. Colocar en un rack hasta que se enfríen a temperatura ambiente.
7. Introducir el programa correspondiente para DQO en el espectrofotómetro. Presionar **4 3 5 ENTER**, en pantalla debe aparecer **Dial nm to 620**.
8. Rotar el dial de longitudes de onda hasta que aparezca 620 nm. Cuando se alcance la correcta longitud de onda aparecerá: **Zero Sample y mg/L COD HR**.
9. Ubicar el adaptador de viales de DQO en la celda del equipo con la marca hacia la derecha.
10. Limpiar el exterior del blanco con un paño o toalla y poner en el adaptador hacia al frente del instrumento. Colocar la cubierta sobre el adaptador.
11. Presionar **ZERO**. La pantalla mostrará: **Zeroing...** y luego: **0 mg/L COD HR**.
12. Con cada muestra repetir el paso 10 y presionar **READ**. La pantalla mostrará: **Reading...** y luego el resultado en mg/L de la DQO.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

CONSUMO DE OXÍGENO

Principio: El objetivo de este método es verificar que la biomasa se encuentra biológicamente activa, para ello se utiliza un electrodo de oxígeno disuelto el cual proporciona directamente la cantidad de oxígeno que hay en la muestra y se toman medidas de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.

Aparatos y materiales:

1. Fiola de 250 ml de capacidad.
2. Equipo de Oxígeno disuelto.
3. Pastilla de agitación
4. Plancha de agitación
5. Cronómetro

Procedimiento:

1. Agregar en la fiola el volumen de muestra de lodo a la cual se le desea realizar la prueba e introducir la pastilla de agitación dentro de la fiola.
2. Colocar el electrodo de oxígeno dentro de la fiola y tapar herméticamente.
3. Colocar la fiola en la plancha de agitación y encenderla.
4. Tomar valores de oxígeno disuelto en el tiempo hasta que el mismo se aproxime a cero.
5. La prueba finaliza cuando el valor del consumo de oxígeno llega a cero o cuando se repite varias veces (por los menos 3 veces) un mismo valor de oxígeno disuelto.
6. Apagar la plancha de agitación y destapar la fiola.
7. Retirar el electrodo de oxígeno disuelto y lavar con agua destilada y retirar la pastilla de agitación de la fiola con una varilla magnética.

Expresión de los resultados:

Se obtiene la variación de oxígeno disuelto en el sistema en función del tiempo.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

CONDUCTIVIDAD

Principio: Este método establece la determinación de la conductividad en muestras acuosas. Consiste en determinar la capacidad que tienen las soluciones acuosas de conducir una corriente eléctrica; la cual se relaciona con la concentración de iones presentes, su movilidad, balance y la temperatura de la medición. (NOTA A)

Aparatos y materiales:

1. Conductímetro portátil, modelo CO150 (HACH) (NOTA B).
2. Material de vidrio, limpio y seco.

Procedimiento:

1. Preparar el Conductímetro para la operación seleccionando el rango apropiado como se especifica en el manual de operación
2. Sumergir la sonda en un Beacker conteniendo la solución de muestra, subir y bajar la sonda para liberar las burbujas que se puedan formar en el entorno.(NOTA C)(NOTA D)
3. Asegúrese que el equipo se encuentre en el modo **COND**. Observar la lectura en la pantalla.
4. Lavar muy bien la sonda con agua destilada una vez que realice la medición (NOTA E).

Notas importantes del Método:

NOTA A: Este aparato mide los niveles de conductividad entre (0-199,9 μ S/cm)

NOTA B: Este aparato se fabricó siguiendo los criterios de diseño especificados por USEPA, método 120.1 y procedimiento equivalente a Standard Method 2510-B para aguas residuales.

NOTA C: Introducir la sonda hasta que el nivel del agua esté por encima de los agujeros. La Conductividad se puede determinar en cualquier muestra de agua que

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

esté libre de desperdicios y de residuos rápidamente sedimentables. La sonda sucia o la presencia de burbujas de aire producen falsos resultados.

NOTA D: El Conductímetro portátil CO150, Compensa automáticamente la desviación de temperatura de la muestra de 20 ó 25 °C, dependiendo de la temperatura fijada

NOTA E: Ante cualquier duda en lo referente al método o manejo del aparato, referirse al manual de instrucción del mismo.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

Principio: Este método establece la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas de desecho. Es una medida del oxígeno requerido para degradar la materia carbonácea y el utilizado para oxidar materiales inorgánicos tales como el hierro ferroso y sulfuros. (NOTA A)

Aparatos y materiales:

1. Equipo BODTrack™ con capacidad para 6 botellas.
2. Incubadora para DBO, capaz de mantener una temperatura fija de 20°C.
3. Botellas de 473 ml (1pinta), color ámbar.
4. Material de vidrio, limpio y seco.
5. Grasa de vacío.
6. Agitadores magnéticos (1 1/2').
7. Tope especial de goma.
8. Cápsulas de nutriente para DBO amortiguado.
9. Bolsitas de hidróxido de Litio. (NOTA B)

Procedimiento:

1. Homogeneizar y llevar la muestra a 20 +/- 2°C.
2. Usando un cilindro graduado, agregar el volumen correcto de muestra en una botella de muestra del BODTrack (ver tabla 1). (NOTA C)

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

Selección del volumen de muestra

Rango DBO (mg/L)	Volumen (ml)
0 - 35	420
0 - 70	355
0 - 350	160
0 - 700	95

3. Colocar un agitador magnético de 3,8 cm en cada botella.
4. Añadir el contenido de una cápsula de nutriente de DBO a cada botella para optimizar el crecimiento bacteriano.
5. Aplicar grasa de vacío al borde de cada botella y en el tope de cada sello de goma.
6. Colocar la tapa de goma en el cuello de cada botella.
7. Utilizando un embudo, agregar el contenido de una bolsita de hidróxido de litio a cada sello de goma. No dejar que caigan partículas en la muestra. Si esto sucede, descartar la misma y preparar otra fresca. (NOTA D)
8. Colocar las botellas en la plataforma del BODTrack. Conectar el tubo apropiado a la botella con la muestra y cerrar firmemente con la mano. Cada tubo se corresponde con el número de canal, el cuál se refleja en el panel de control.
9. Encender el equipo y asegurar que todos lo agitadores están rotando.
10. Para seleccionar la duración del análisis, presionar y mantener simultáneamente las teclas < y > hasta que aparezca el menú de tiempo. Presionar la tecla de canal **6** para activar el parámetro de duración. Usar la flechas para escoger 5, 7 o 10 días de análisis. Presionar **OFF** para salvar las selecciones y salir del menú.
11. Para comenzar el análisis, presionar el número del canal correspondiente a la botella escogida. (NOTA E)

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

12. Presionar la tecla **ON**. Un menú aparecerá para seleccionar el rango de DBO a escoger. Para el rango 0 - 350 mg/L, presionar la tecla >. Para el rango 0 - 700 mg/L presionar > por segunda vez. Para el rango 0 - 35 mg/L, presionar la tecla < Para el rango 0 - 70 mg/L presionar < por segunda vez.
13. Presionar y mantener la tecla **ON** para comenzar un test. Aparecerá un gráfico en la pantalla. Para cancelar la prueba, presionar **OFF**. (NOTA F)
14. Leer los resultados de DBO directamente de la pantalla presionando la tecla correspondiente a cada muestra.
15. Al finalizar la prueba, limpiar el material (botellas, agitadores y sellos de goma) con un cepillo y agua caliente con jabón. Enjuagar con agua destilada.

Notas importantes del Método:

NOTA A: También puede incluir el oxígeno consumido en la oxidación de formas reducidas de nitrógeno, a no ser que su oxidación se evite con un inhibidor.

NOTA B: El hidróxido de litio es fuertemente alcalino, cáustico e irrita la piel y los ojos. Observar prácticas de laboratorio apropiadas.

NOTA C: Si el DBO de la muestra se desconoce, se puede asumir que el efluente está normalmente en el rango 0 - 70 mg/L mientras que un afluente está usualmente en el rango 0 - 700 mg/L.

NOTA D: Por razones de seguridad se recomienda invertirlos pasos 6 y 7.

NOTA E: Cada canal (1 - 6) debe arrancarse individualmente.

NOTA F: El BODTrack se detendrá automáticamente después que el tiempo seleccionado se haya cumplido. Un canal puede detenerse manualmente apretando la tecla **OFF** por varios segundos. La pantalla cambiará de **RUN** a **END**.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

APÉNDICE C. RESULTADOS DEL PROCESO DE ACLIMATACIÓN

C.1. ACLIMATACIÓN AL AGUA SINTÉTICA

Tabla N°13. Variación de la Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo.

MUESTRA	TIEMPO, t (horas)	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO (mg/L)
1	0	413
2	3	221
3	6	147
4	8	96
5	25	46
6	27	33
7	30	22

Tabla N°14. Variación de los sólidos suspendidos volátiles en función del tiempo.

MUESTRA	TIEMPO, t (días)	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES, SSV (mg/L)
1	0	1265
2	1	1354
3	2	1422
4	3	1658
5	4	1925
6	7	2568
7	8	2954

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

Tabla N°15. Consumo de oxígeno de las muestras tomadas en el recipiente de aclimatación al agua sintética.

Tiempo, t (seg)	OXÍGENO DISUELTO		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	4,04	3,42	6,34
10	3,94	3,22	4,25
20	3,66	3,10	3,63
30	3,52	3,01	3,14
40	3,38	2,80	2,93
50	3,26	2,65	2,72
60	3,10	2,51	2,61
70	3,12	2,42	2,44
80	3,11	2,38	2,28
90	2,98	2,25	2,07
100	2,96	2,17	1,93
110	2,82	2,07	1,83
120	2,74	2,00	1,70
130	2,68	1,90	1,60
140	2,62	1,88	1,47
150	2,54	1,81	1,35
160	2,51	1,80	1,24
170	2,47	1,77	1,14
180	2,43	1,72	1,00
190	2,40	1,68	0,88
200	2,39	1,65	0,79
210	2,37	1,64	0,75
220	2,36	1,59	0,75
230	2,34	1,58	0,74
240	2,33	1,56	0,76
250	2,32	1,55	0,77
260	2,32	1,57	0,76
270	2,31	1,55	0,74
280	2,29	1,57	0,70
290	2,28	1,57	0,64
300	2,26	1,57	0,57
330	2,21	1,55	0,30
360	2,14	1,56	0,10
390	2,09	1,57	--
420	2,08	1,57	--
480	2,09	-	--
540	2,10	-	--
600	2,08	-	--
660	2,09	-	--

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

C.2. ACLIMATACIÓN AL EFLUENTE

Tabla N°16. Variación de la Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo.

MUESTRA	TIEMPO, t (horas)	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO (mg/L)
1	0	711
2	145	678
3	225	337
4	325	209
5	1340	182
6	1470	98
7	1695	56

Tabla N°17. Variación de los sólidos suspendidos volátiles en función del tiempo.

MUESTRA	TIEMPO, t (días)	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES, SSV (mg/L)
1	0	273,3
2	145	281,7
3	225	290,0
4	325	293,3
5	1340	296,7
6	1470	260,0
7	1695	256,7

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

Tabla N°18. Consumo de oxígeno de las muestras tomadas en el recipiente de aclimatación al efluente.

Tiempo, t (seg)	OXÍGENO DISUELTO, OD (mg/L)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	7,9	6,7	7,5
10	7,4	6,2	7,0
20	6,5	5,2	6,1
30	5,9	4,6	5,4
40	5,4	4,2	5,0
50	5,0	3,9	4,6
60	4,7	3,7	4,4
70	4,5	3,5	4,2
80	4,3	3,4	4,0
90	4,2	3,2	3,9
100	4,0	3,1	3,8
110	3,9	3,0	3,7
120	3,8	2,9	3,6
130	3,8	2,9	3,5
140	3,7	2,8	3,4
150	3,6	2,7	3,4
160	3,5	2,7	3,3
170	3,5	2,6	3,2
180	3,4	2,6	3,2
210	3,3	2,5	3,1
240	3,2	2,2	3,0
270	3,1	2,3	2,9
300	3,1	2,2	2,9
330	3,1	2,1	2,8
360	3,1	1,9	2,7
420	-	-	2,6
480	-	-	2,6

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

APÉNDICE D. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CONSUMO DE OXÍGENO

D.1. ENSAYO CON EL CLORURO DE ETILENO

Tabla N°19. Datos experimentales obtenidos en las pruebas de consumo de oxígeno para el cloruro de etileno.

Tiempo, t (seg)	Oxígeno Disuelto en el sistema, OD (mg/L)						
	Prueba 1 (5 ppm)	Prueba 1 (10 ppm)	Prueba 1 (20 ppm)	Prueba 1 (30 ppm)	Prueba 1 (50 ppm)	Blanco Inicial	Blanco Final
0	7.8	7.8	7.8	7.8	7.7	7.8	7.7
10	7.2	7.4	7.4	7.5	7.1	7.5	7.0
20	6.5	6.7	6.6	6.5	6.4	6.6	6.2
30	5.7	5.8	5.8	5.8	5.4	6.0	5.8
40	5.2	5.4	5.3	5.3	4.9	5.5	5.5
50	4.9	5.0	4.9	5.0	4.6	5.1	5.3
60	4.5	4.7	4.6	4.7	4.4	4.8	5.1
70	4.3	4.5	4.3	4.4	4.1	4.5	4.8
80	4.1	4.3	4.1	4.2	3.9	4.3	4.6
90	4.0	4.1	4.0	4.1	3.8	4.2	4.5
100	3.9	4.0	3.8	4.0	3.7	4.1	4.3
110	3.8	3.9	3.7	3.9	3.6	4.0	4.2
120	3.7	3.8	3.6	3.8	3.5	3.9	4.1
130	3.6	3.7	3.5	3.7	3.5	3.8	4.0
140	3.5	3.7	3.4	3.6	3.4	3.7	3.9
150	3.5	3.6	3.3	3.6	3.3	3.6	3.8
160	3.4	3.5	3.3	3.5	3.3	3.6	3.7
170	3.3	3.5	3.2	3.4	3.2	3.5	3.6
180	3.3	3.4	3.1	3.4	3.1	3.4	3.6
190	3.2	3.3	3.0	3.3	3.1	3.3	3.5
200	3.2	3.3	3.0	3.2	3.0	3.3	3.4
210	3.1	3.2	2.9	3.2	3.0	3.2	3.3
220	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	3.2	3.3
230	3.0	3.1	2.8	3.1	2.9	3.1	3.2
240	3.0	3.1	2.8	3.0	2.8	3.1	3.2
250	2.9	3.0	2.8	3.0	2.8	3.0	3.1
260	2.9	3.0	2.8	2.9	2.8	3.0	3.1
270	2.9	2.9	2.8	2.9	2.7	3.0	3.0
280	2.8	2.9	2.7	2.9	2.7	2.9	3.0
290	2.8	2.9	2.7	2.9	2.7	2.9	3.0
300	2.8	2.8	2.7	2.8	2.7	2.9	3.0
310	-	2.8	-	2.8	2.7	2.8	-
320	-	2.8	-	2.8	-	2.8	-
330	-	2.8	-	2.8	-	-	-
340	-	2.7	-	-	-	-	-
350	-	2.7	-	-	-	-	-
360	-	2.7	-	-	-	-	-

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

A continuación se presenta cada una de las curvas que generan los datos experimentales expuestos anteriormente en la tabla N°19.

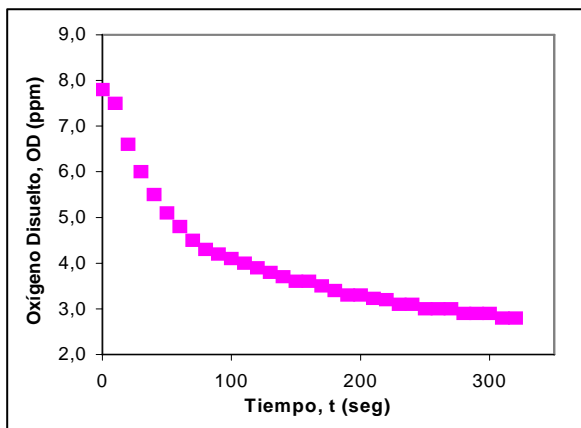


Figura N° 19. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 0 ppm (blanco inicial)

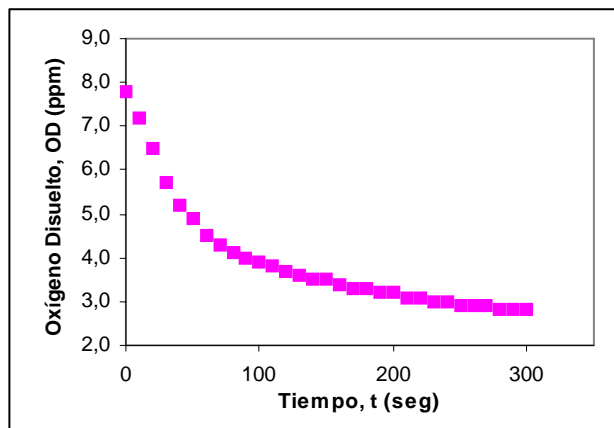


Figura N°20. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 5 ppm.

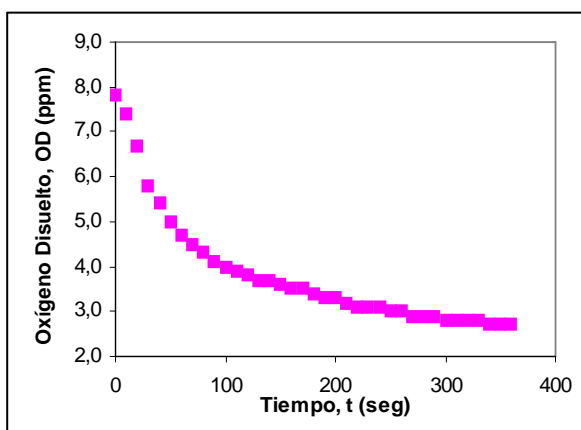


Figura N°21. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 10 ppm.

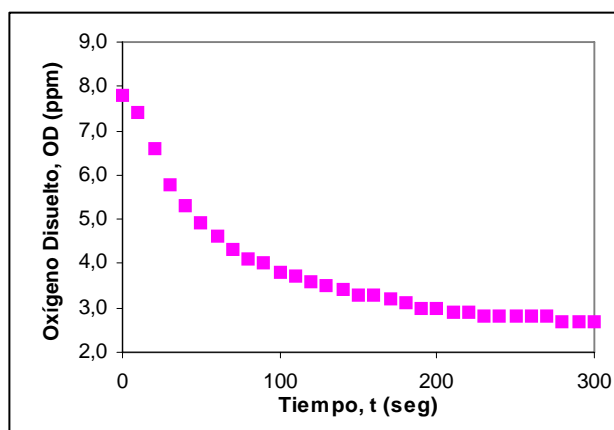


Figura N°22. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 20 ppm.

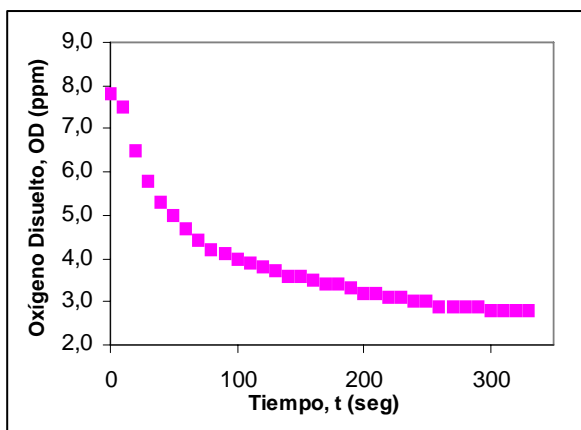


Figura N°23. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 30 ppm.

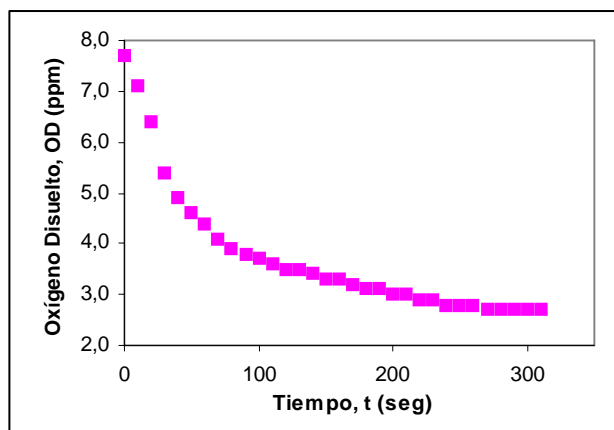


Figura N°24. Consumo de oxígeno del cloruro de etileno a 50 ppm.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

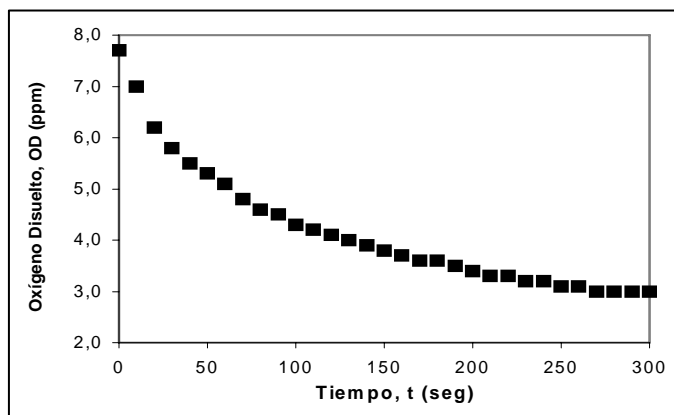


Figura N°25. Consumo de oxígeno para los ensayos de cloruro de etileno a 0 ppm (blanco final)

Tabla N°20. Valores de la velocidad de consumo para el cloruro de etileno.

Concentración de EDC, C (ppm)	Velocidad de Consumo, V (mg/L*seg)
0 (blanco inicial)	0.066
5	0.068
10	0.069
20	0.071
30	0.073
50	0.076
0 (blanco final)	0.065

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

D.2. ENSAYO CON CLORURO DE VINILO

Tabla N°21. Datos experimentales obtenidos en las pruebas de consumo de oxígeno para el cloruro de vinilo.

Tiempo, t (seg)	Oxígeno Disuelto en el sistema, OD (mg/L)						
	Prueba 1 (4 ppm)	Prueba 1 (8 ppm)	Prueba 1 (10 ppm)	Prueba 1 (16 ppm)	Prueba 1 (32 ppm)	Blanco Inicial	Blanco Final
0	7.7	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
10	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3	7.5	7.1
20	6.7	6.6	6.7	6.5	6.6	6.8	6.5
30	6.2	6.0	6.0	5.9	5.8	6.3	6.0
40	5.5	5.5	5.5	5.4	5.4	5.9	5.5
50	5.2	5.2	5.1	5.1	4.9	5.4	5.1
60	4.8	4.8	4.8	4.8	4.6	5.1	4.8
70	4.5	4.5	4.5	4.6	4.3	4.8	4.5
80	4.3	4.3	4.3	4.4	4.1	4.6	4.3
90	4.2	4.1	4.2	4.3	4.0	4.5	4.2
100	4.1	4.0	4.1	4.2	3.9	4.3	4.1
110	4.0	3.9	4.0	4.1	3.8	4.2	4.0
120	3.9	3.8	3.9	4.0	3.7	4.1	3.9
130	3.8	3.7	3.8	3.9	3.6	4.0	3.8
140	3.7	3.7	3.7	3.8	3.5	3.9	3.7
150	3.6	3.6	3.6	3.7	3.5	3.8	3.6
160	3.5	3.5	3.6	3.6	3.4	3.7	3.6
170	3.5	3.4	3.5	3.5	3.4	3.6	3.5
180	3.4	3.3	3.4	3.4	3.3	3.6	3.4
190	3.3	3.2	3.3	3.4	3.3	3.5	3.3
200	3.3	3.2	3.2	3.3	3.2	3.4	3.3
210	3.2	3.1	3.2	3.2	3.1	3.3	3.2
220	3.2	3.0	3.1	3.2	3.1	3.3	3.2
230	3.1	3.0	3.0	3.2	3.0	3.2	3.1
240	3.0	2.9	3.0	3.1	3.0	3.2	3.1
250	3.0	2.9	2.9	3.0	2.9	3.1	3.0
260	2.9	2.8	2.9	3.0	2.9	3.1	3.0
270	2.9	2.8	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0
280	2.8	2.7	2.8	2.9	2.8	3.0	2.9
290	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8	3.0	2.9
300	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8	3.0	2.9
310	-	-	-	2.8	-	-	2.8
320	-	-	-	-	-	-	2.8
330	-	-	-	-	-	-	2.8

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

A continuación se presenta cada una de las figuras que generan los datos experimentales expuestos anteriormente en la tabla N°21.

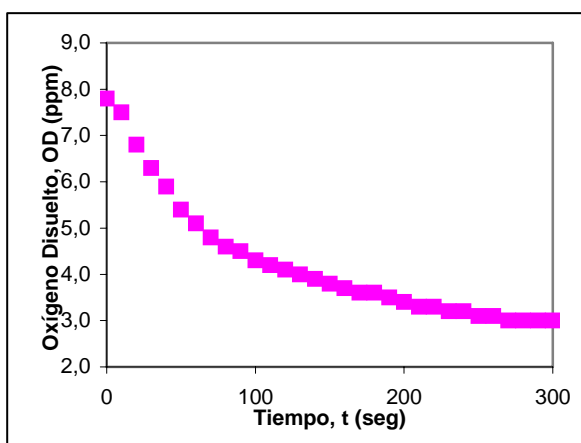


Figura N°26. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 0 ppm (blanco inicial)

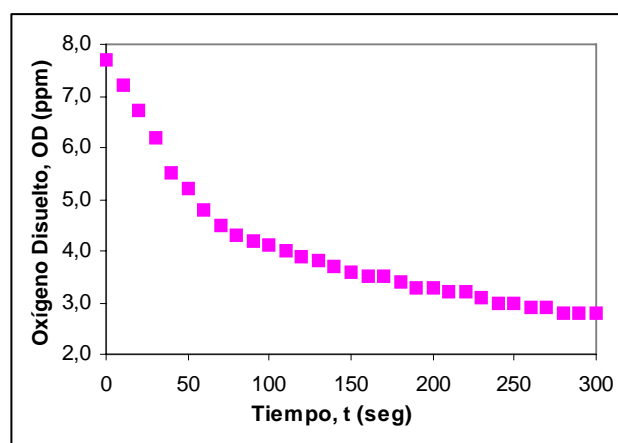


Figura N°27. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 4 ppm.

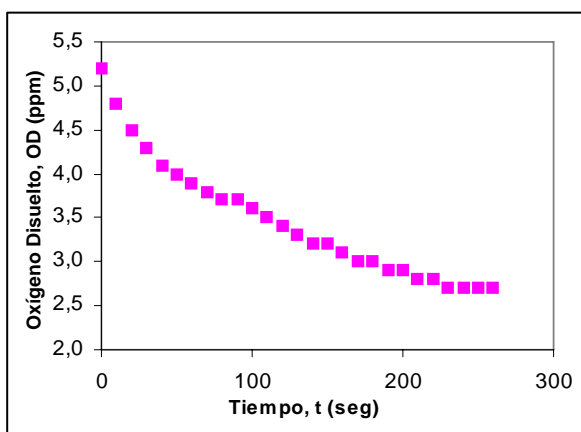


Figura N°28. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 8 ppm

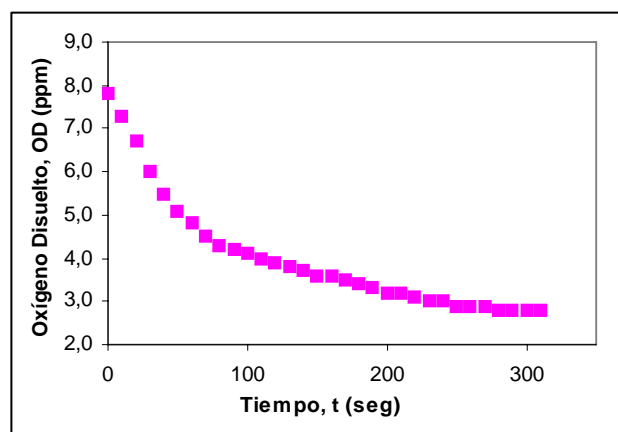


Figura N°29. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 10 ppm.

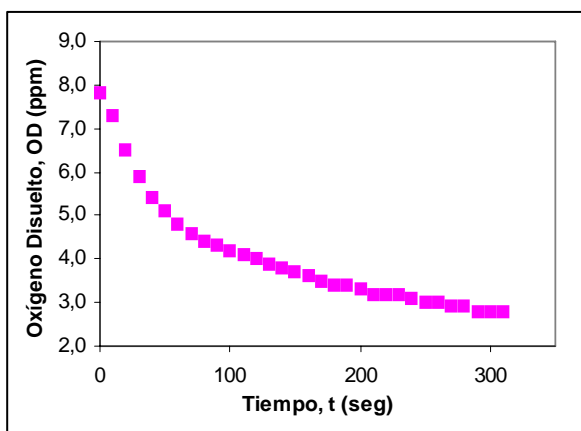


Figura N°30. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 16 ppm

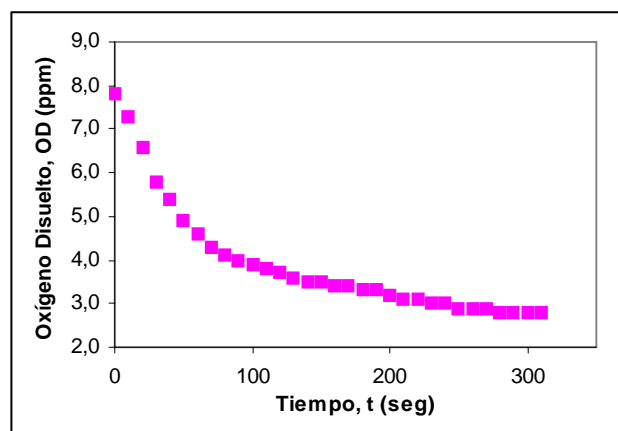


Figura N°31. Consumo de oxígeno del cloruro de vinilo a 32 ppm.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

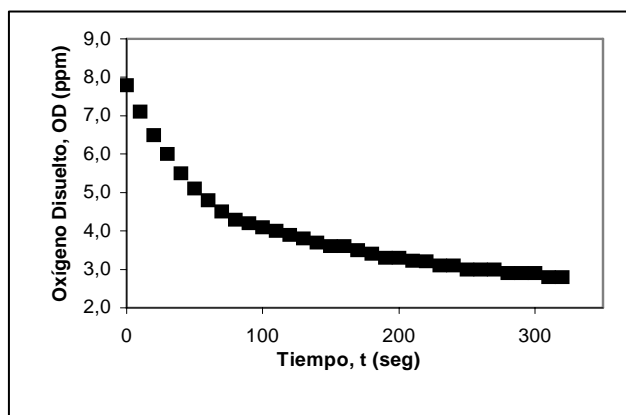


Figura N°32. Consumo de oxígeno para los ensayos de cloruro de etileno a 0 ppm (blanco final)

Tabla N°22. Valores de las pendientes de las rectas tangentes a las curvas de consumo de oxígeno para el cloruro de vinilo.

Concentración de MVC, C (ppm)	Velocidad de consumo, (mg/L*seg)
0 (blanco inicial)	0.053
4	0.056
8	0.060
10	0.061
16	0.063
32	0.065
0 (blanco final)	0.053

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

D.3. ENSAYO CON TOLUENO

Tabla N°23. Datos experimentales obtenidos en las pruebas de consumo de oxígeno para el tolueno.

Tiempo, t (seg)	Oxígeno Disuelto en el sistema, OD (mg/L)						
	Prueba 1 (30 ppm)	Prueba 1 (50 ppm)	Prueba 1 (70 ppm)	Prueba 1 (85 ppm)	Prueba 1 (100 ppm)	Blanco Inicial	Blanco Final
0	7.7	7.8	7.7	7.7	7.8	7.8	7.7
10	7.0	7.3	7.2	7.1	7.2	7.3	7.0
20	6.5	6.5	6.3	6.3	6.4	6.3	6.4
30	5.7	5.8	5.6	5.5	5.5	5.8	5.7
40	5.0	5.2	5.0	4.9	5.0	5.3	5.1
50	4.7	4.9	4.7	4.6	4.5	5.0	4.7
60	4.4	4.6	4.5	4.3	4.2	4.7	4.4
70	4.0	4.4	4.2	4.1	4.0	4.4	4.2
80	3.8	4.1	4.0	3.9	3.8	4.2	3.9
90	3.7	3.9	3.9	3.7	3.6	4.0	3.7
100	3.6	3.8	3.7	3.6	3.5	3.8	3.6
110	3.5	3.6	3.5	3.4	3.3	3.7	3.5
120	3.4	3.5	3.4	3.3	3.2	3.5	3.4
130	3.3	3.4	3.3	3.1	3.1	3.4	3.3
140	3.2	3.3	3.2	3.0	3.0	3.3	3.3
150	3.2	3.3	3.2	2.9	3.0	3.3	3.2
160	3.1	3.2	3.1	2.8	2.9	3.2	3.2
170	3.0	3.1	3.0	2.8	2.8	3.1	3.1
180	3.0	3.1	3.0	2.7	2.8	3.1	3.0
190	2.9	3.0	2.9	2.6	2.7	3.0	2.9
200	2.9	2.9	2.9	2.6	2.7	2.9	2.8
210	2.8	2.9	2.8	2.6	2.6	2.9	2.8
220	2.7	2.8	2.8	2.5	2.6	2.8	2.7
230	2.7	2.8	2.7	2.5	2.5	2.8	2.7
240	2.6	2.7	2.7	2.4	2.5	2.7	2.6
250	2.6	2.7	2.6	2.4	2.4	2.7	2.5
260	2.6	2.6	2.6	2.4	2.4	2.7	2.5
270	2.5	2.6	2.5	2.3	2.4	2.6	2.5
280	2.5	2.5	2.5	2.3	2.3	2.6	2.4
290	2.4	2.5	2.5	2.3	2.3	2.5	2.4
300	2.4	2.5	2.4	2.3	2.3	2.5	2.4
310	2.4	2.4	2.4	2.2	2.2	2.5	2.4
320	2.4	2.4	2.4	2.2	2.2	2.5	2.4
330	2.3	2.4	2.3	2.2	2.2	2.5	2.4
340	2.3	2.4	2.3	2.2	2.2	2.4	2.4
350	2.3	2.3	2.3	2.1	2.1	2.4	2.4
360	2.3	2.3	2.3	2.1	2.1	2.4	2.4

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

A continuación se presenta cada una de las figuras que generan los datos experimentales expuestos anteriormente en la tabla N°23.

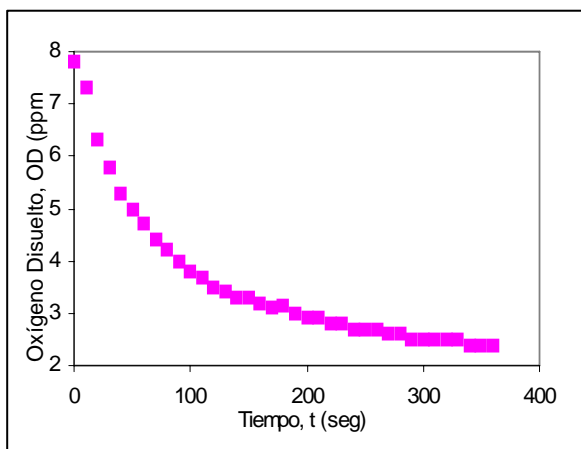


Figura N°33. Consumo de oxígeno del tolueno a 0 ppm (blanco inicial)

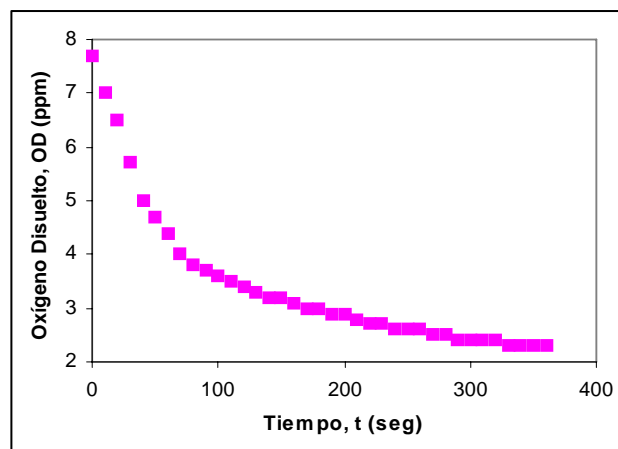


Figura N°34. Consumo de oxígeno del tolueno a 30 ppm.

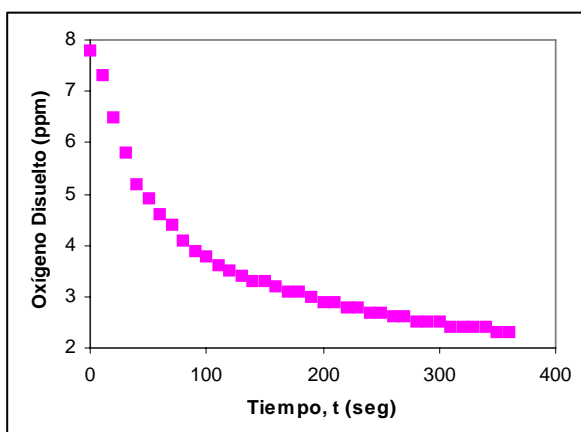


Figura N°35. Consumo de oxígeno del tolueno a 50 ppm.

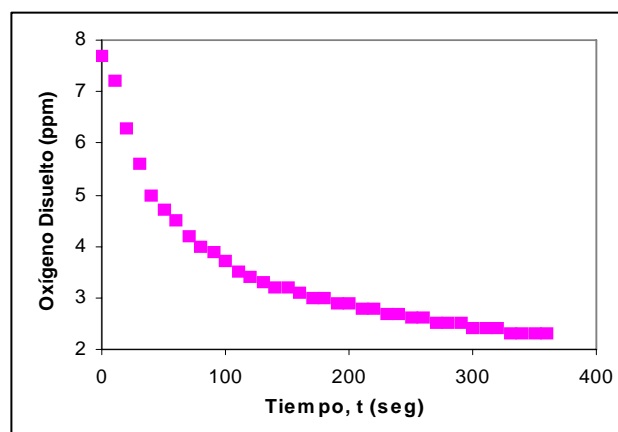


Figura N°36. Consumo de oxígeno del tolueno a 70 ppm.

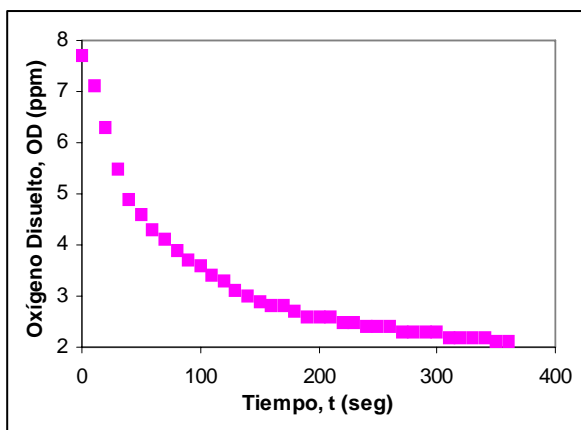


Figura N°37. Consumo de oxígeno del tolueno a 85 ppm.

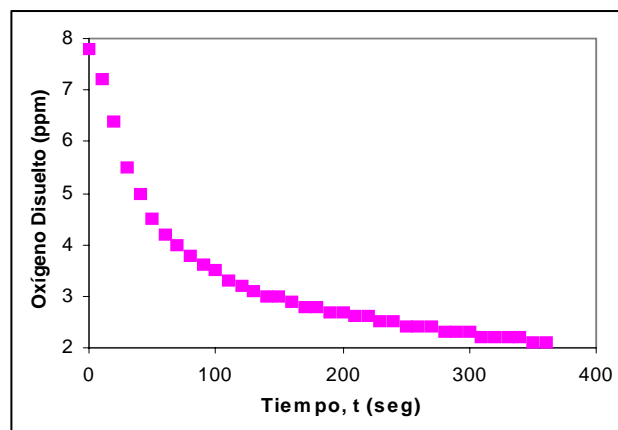


Figura N°38. Consumo de oxígeno del tolueno a 100 ppm.

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

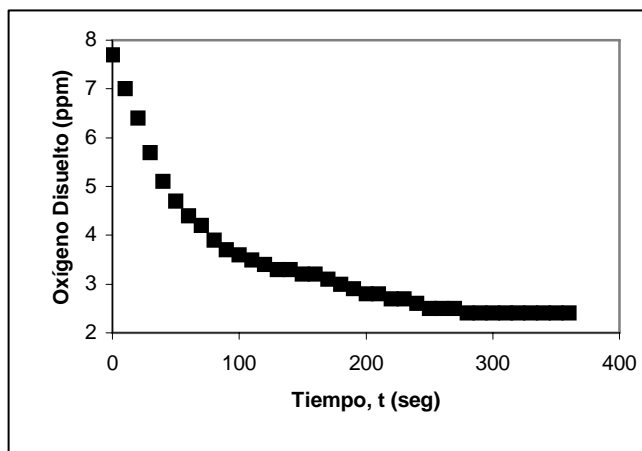


Figura N°39. Consumo de oxígeno para los ensayos de cloruro de etileno a 0 ppm (blanco final)

Tabla N°24. Valores de las pendientes de las rectas tangentes a las curvas de consumo de oxígeno para el tolueno.

Concentración de Tolueno, C (ppm)	Velocidad de consumo, V (mg/L*seg)
0 (blanco inicial)	0.065
30	0.068
50	0.070
70	0.073
85	0.074
100	0.075
0 (blanco final)	0.064

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

APÉNDICE E. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EN EL REACTOR BIOLÓGICO

E.1. PRUEBA CONTROL

Tabla N°25. Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo para la prueba control (blanco) en el reactor biológico.

Tiempo, t (min)	Demanda Química de Oxígeno, DQO (mg/L)
0	563
130	245
280	178
385	124
1435	50

Tabla N°26. Concentración de nutrientes dentro del reactor biológico para la prueba control (blanco) en el reactor biológico.

	Inicial	Final
Nitrógeno Total, NT (mg/L)	24	14
Fósforo Total, FT (mg/L)	14	9

Tabla N°27. Parámetros controlados en el reactor biológico para la prueba control (blanco) en el reactor biológico.

Tiempo, (min)	t	pH	Temperatura, T (°C)	Oxígeno Disuelto, OD (ppm)
0		8,3	27.7	4.58
10		8,2	28	4.73
80		8,2	28	4.99
140		8,2	28	4.90
290		8,1	28	4.61
350		8,1	28	4.64
395		8,2	28	4.89
410		8,2	28	4.73
1400		8,3	28	4.8
1445		8,3	28	4.56
1550		8,3	28	4.63

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

E.2. ENSAYO CON CLORURO DE ETILENO

Tabla N°28. Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo para el ensayo con EDC a 20 ppm.

Tiempo, t (min)	Demanda Química de Oxígeno, DQO (mg/L)
0	1475
30	1420
45	1405
60	950
130	640
375	307
1385	248
1530	242

Tabla N°29. Sólidos Suspendedos Volátiles en función del tiempo para el ensayo con EDC a 20 ppm.

Tiempo, t (min)	Sólidos Suspendedos Volátiles, SSV (mg/L)
0	1500
130	1670
375	1737.5
1385	1175
1530	1042.5

Tabla N°30. Concentración de nutrientes dentro del reactor biológico en el ensayo con EDC a 20 ppm.

	Inicial	Final
Nitrógeno Total, NT (mg/L)	26	19
Fósforo Total, FT (mg/L)	14	13

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

Tabla N°31. Parámetros controlados en el reactor biológico durante el ensayo con EDC a 20 ppm.

Tiempo, t (min)	pH	Temperatura, T (°C)	Oxígeno Disuelto, OD (ppm)
0	8,8	28	4.50
10	8,8	27,9	4.14
30	8,6	28,1	4.98
45	8,6	28	4.91
60	8,5	28	4.63
130	8,5	28	5.47
375	8,5	28	5.61
1385	8.8	28	5.47
1530	8.8	28	5.60

E.3. ENSAYO CON TOLUENO

Tabla N°32. Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo para el ensayo con tolueno a 70 ppm.

Tiempo, t (min)	Demanda Química de Oxígeno, DQO (mg/L)
0	496
10	506
30	487
85	326
175	157
290	150
1255	29

Tabla N°34. Concentración de nutrientes dentro del reactor biológico en el ensayo con tolueno a 70 ppm.

	Inicial	Final
Nitrógeno Total, NT (mg/L)	28	2
Fósforo Total, FT (mg/L)	8	3

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

Tabla N°35. Parámetros controlados en el reactor biológico durante el ensayo con tolueno a 70 ppm.

Tiempo, t (min)	pH	Temperatura, T (°C)	Oxígeno Disuelto, OD (ppm)
0	8,2	27,7	5,82
10	8,1	26,7	3,80
30	8,1	27,7	4,87
45	8,1	27,8	4,95
60	8,1	28,1	4,91
85	8,1	28	4,77
175	8,1	28	4,91
235	8,3	28,1	5,70
410	8,5	28,1	6,24
1255	8,3	28	5,82

E.4. ENSAYO CON EL EFLUENTE

Tabla N°36. Demanda Química de Oxígeno en función del tiempo para el ensayo con el efluente.

Tiempo, t (min)	Demanda Química de Oxígeno, DQO (mg/L)
0	431
90	413
150	404
270	212
390	102

Tabla N°37. Sólidos Suspendidos Volátiles en función del tiempo para el ensayo con el efluente.

Tiempo, t (min)	Sólidos Suspendidos Volátiles, SSV (mg/L)
0	111,3
90	122,5
150	112,5
270	110
390	116,2

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001

Tabla N°38. Concentración de nutrientes dentro del reactor biológico en el ensayo con el efluente.

	Inicial	Final
Nitrógeno Total, NT (mg/L)	124	98
Fósforo Total, FT (mg/L)	10	8

Tabla N°39. Parámetros controlados en el reactor biológico durante el ensayo con el efluente.

Tiempo, t (min)	pH	Temperatura, T (°C)	Oxígeno Disuelto, OD (ppm)
0	8,1	27,4	5,68
10	8,1	28,1	4,64
100	8,2	28,1	5,12
160	8,1	28	4,04
280	8	28	5,54

^[3]Manual HACH Company. COD Reactor, 1997

^[4]Manual HACH Company. Portable Conductimeter, 2001