

12



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Erika Batalla

Vázquez

FECHA: 5 de noviembre de 2002

FIRMA: Batalla

ELIMINACIÓN DE BENCENO Y NAFTALENO EN
COLUMNAS EMPACADAS CON CARBÓN ACTIVADO
COLONIZADO BIOLÓGICAMENTE

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA
P R E S E N T A:
ERIKA BATALLA VÁZQUEZ



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MÉXICO, D.F.

EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA

2002



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado:

Presidente	Prof. Rodolfo Torres Barrera
Vocal	Profa. Hilda Elizabeth Calderón Villagómez
Secretario	Prof. Alfonso Durán Moreno
1er. Suplente	Prof. José Sabino Sámano Castillo
2do. Suplente	Prof. Baldomero Pérez Gabriel

Sitio donde se desarrolló el tema:

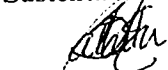
**Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental,
Lab. 301-E, Facultad de Química, UNAM**

Asesor del tema:



Dr. Alfonso Durán Moreno

Sustentante:



Erika Batalla Vázquez

Agradecimientos

A Dios: por guiarme día a día, por el camino de felicidad, por darme todo lo que he deseado pero sobre todo por demostrarme que puedo confiar en ti en todo momento. Gracias por permitirme llegar a cumplir uno de mis más grandes anhelos.

A mi mamá: por tu apoyo y amor incondicional, por tu confianza y por estar conmigo siempre, tu eres a quien más quiero en este universo y eres mi mayor motivación. Te quiero mucho mamita.

A mi papá: por darme libertad para elegir mi camino y por el respeto a mis decisiones. Te quiero mucho papito.

A mi familia: por creer en mi, por su cariño incondicional y por su gran apoyo. Los quiero mucho a todos.

A Angélica Monroy Palinas: por apoyarme , por darme ánimo con tus consejos pero sobre todo por preocuparte siempre por mi. TQM gordita.

A todos mis amigos: por estar cerca de mi en las buenas y en las malas, por todos los momentos que juntos hemos disfrutado. Especialmente quiero dar las gracias a Wendy Jiménez, Libertad García, Amadeo Vázquez, Arturo Mendoza, Víctor Hugo Macías, César González, Ivonne Vallados, Sergio Razo, Fabiola Angeles, Ángel Hernández, Eduardo Derbez, Miguel Ángel Palma, Javier Muñoz, Luis Aranda, Ma. Elena Hernández, José Alfredo Monroy, Ma. Carmen Gabrielli, Eduardo Vázquez, Idania Reyes, Roberto Rodríguez, Brenda Muñoz, Víctor Manuel Menéndez, Luis Alberto Corona, Ericka López, Sergio Eligio Sánchez, José Manuel Castañeda, Alejandro Lara, Abel Velázquez, Antonio Solis, Rodrigo Salazar, Manuel Suárez por su apoyo y cariño.

A la UNAAM y a la Facultad de Química:

por abrirme sus puertas y enseñarme en cada una de sus aulas los conocimientos necesarios para mi formación profesional, pero sobre todo por darme el orgullo de ser egresada de la Máxima Casa de Estudios.

¡ Goya, Goya... cachun cachun ra ra... cachun cachun ra ra... Goya...
UNIVERSIDAD!

Al Dr. Alfonso Durán Moreno: por su confianza, consejos, paciencia y apoyo, por su tiempo y dedicación, por creer en mi y contribuir a realizar una de mis metas, pero sobre todo por ser mi amigo.

A mis sinodales: por sus valiosos comentarios para el mejoramiento de este trabajo.

A mis profesores: por sus consejos, comentarios, pero sobre todo por compartir conmigo sus conocimientos. Mil Gracias!!! Especialmente a Manuel Vázquez Islas, Celestino Montiel Maldonado, Carlos Galdeano Bienzobas, Pablo Sandoval González, Mariano y Ricardo Pérez Camacho, Eduardo Marambio Dennett, Fernando Barragán Arroche, Mayo G. Martínez Kahn, José María García Saiz y Martín Rivera Toledo.

A DGAIPA por el financiamiento otorgado para la realización de este proyecto.

INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 OBJETIVOS.....	10
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS.....	11
2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS COMPUESTOS MODELO	11
2.2 CARACTERÍSTICAS TOXICOLÓGICAS	12
2.3 PROCESO DE BIODEGRADACIÓN	13
2.3.1. <i>Microorganismos biodegradadores.....</i>	<i>13</i>
2.3.2. <i>Rutas de biodegradación de compuestos orgánicos</i>	<i>14</i>
2.4 PROCESO DE ADSORCIÓN	16
2.4.1. <i>Mecanismo del proceso de adsorción.....</i>	<i>16</i>
2.4.2. <i>Factores que afectan la adsorción sobre carbón activado.....</i>	<i>18</i>
2.4.3. <i>Modelación de la adsorción en el equilibrio.....</i>	<i>20</i>
2.5 PROCESO DE ADSORCIÓN – BIODEGRADACIÓN	21
2.5.1. <i>Antecedentes del uso del CA en tratamiento de aguas.....</i>	<i>22</i>
2.5.2. <i>Definición de SCAAB.....</i>	<i>23</i>
2.5.3. <i>DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SCAAB.....</i>	<i>23</i>
2.6 MECANISMO DE ADSORCIÓN - BIODEGRADACIÓN SOBRE CARBÓN ACTIVADO ...	25
2.7 BENEFICIOS DE LOS SISTEMAS DONDE SE COMBINAN LA ADSORCIÓN Y LA BIODEGRADACIÓN	26
2.8 DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS DONDE SE COMBINAN LA ADSORCIÓN Y LA BIODEGRADACIÓN	27
2.9 APLICACIONES DE LOS SCAAB	28
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	30
3.1 MATERIAL Y REACTIVOS.....	30

3.2	CUANTIFICACIÓN DE COMPUESTOS EN SOLUCIÓN.....	32
3.3	ADSORCIÓN SOBRE CARBÓN ACTIVADO.....	33
3.4	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	34
3.5	INOCULACIÓN DE MICROORGANISMOS A CA.....	36
3.6	COLUMNAS EMPACADAS.....	37
3.7	PRESENCIA DE MICROORGANISMOS EN LOS EFLUENTES.....	42
3.8	AISLAMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS.....	42
CAPÍTULO 4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	44
4.2	COLUMNAS EMPACADAS CON CA.....	47
4.2.1.	<i>Resultados Columna Estéril.....</i>	<i>47</i>
4.2.2.	<i>Resultados Columna Abiótica.....</i>	<i>49</i>
4.2.3.	<i>Resultados Columna Biótica.....</i>	<i>51</i>
4.2.4.	<i>Presencia de microorganismos en los efluentes.....</i>	<i>53</i>
4.3	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS PROCESOS DE ADSORCIÓN.....	54
4.3.1.	<i>Costos de operación.....</i>	<i>55</i>
4.3.2.	<i>Costos de inversión.....</i>	<i>64</i>
4.3.3.	<i>Costos totales.....</i>	<i>65</i>
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES.....	66
CAPÍTULO 6.	BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXO 1.	TABLAS DE RESULTADOS.....	76
ANEXO 2.	EQUIPO.....	86

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1 Algunas propiedades fisicoquímicas del benceno y naftaleno	12
Tabla 2.2 Características toxicológicas	13
Tabla 2.3 Factores que afectan la adsorción sobre carbón activado	19
Tabla 3.1. Características del carbón activado empleado en este estudio	31
Tabla 3.2 Condiciones para el análisis de solutos por espectrofotometría UV.....	33
Tabla 3.3 Medio nutritivo para el cultivo de microorganismos (Ridgway y col., 1990)...	37
Tabla 4.1 Constantes de los modelos de adsorción de Freundlich y de Langmuir para el benceno y naftaleno.....	44
Tabla 4.2 Identificación de microorganismos.....	53
Tabla 4.3 Resumen de Resultados.....	54
Tabla 4.4 Tiempos y volúmenes de ruptura de las columnas de adsorción	55
Tabla 4.5 Resultados comparativos de las columnas de adsorción	60
Tabla 4.6 Tiempos y volúmenes de ruptura de las columnas de adsorción	61
Tabla 4.7 Costos por tratamiento. Reactivación o cambio de carbón	62
Tabla 4.8 Comparación de costos reactivación y cambio de carbón.....	63
Tabla 4.9 Costos totales para el tratamiento de agua	65

ÍNDICE FIGURAS

Figura 2.1 Mecanismo de biodegradación de benceno (Atlas y Cerniglia, 1995)	15
Figura 2.2 Etapas Iniciales de la biodegradación del naftaleno	16
Figura 2.4. Representación de las curvas de operación de sistemas de carbón activado funcionando en condiciones abióticas y bióticas (Durán-Moreno, 1997).....	24
Foto 3.1 Equipo de Cromatografía de Líquidos de alta resolución	32
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología experimental para las isotermas de adsorción	35
Foto 3.2 Fermentador	36
Figura 3.2 Diagrama de flujo de la metodología experimental para las columnas de adsorción	38
Foto 3.3 Sistema de columnas Biótica y Abiótica empacadas con CA	39
Foto 3.4 Sistema de columna estéril empacada con CA	40
Figura 3.3 Curva de Ruptura (Calderón de Anda y Velásquez, 2001)	41
Figura 3.4 Técnica utilizada para la identificación de microorganismos	43
Figura 4.1 Isoterma de adsorción de benceno linearizada según el modelo de Langmuir	46
Figura 4.2 Isoterma de adsorción de benceno linearizada según el modelo de Freundlich	46
Figura 4.3 Isoterma de adsorción de naftaleno linearizada según el modelo de Langmuir.....	46
Figura 4.4 Isoterma de adsorción de naftaleno linearizada según el modelo de Freundlich	46
Figura 4.5 Curva de operación de benceno. Columna Estéril	48
Figura 4.6 Curva de operación de naftaleno. Columna Estéril.....	48
Figura 4.7 Curva de operación de benceno. Columna Abiótica	50
Figura 4.8 Curva de operación de naftaleno. Columna Abiótica	50
Figura 4.9 Curva de operación de benceno. Columna Biótica	52
Figura. 4.10 Curva de operación de naftaleno. Columna Biótica	52

ABREVIATURAS

BAC	Siglas en inglés de carbón activado biológico (Biological Activated Carbon)
BAT	Siglas en inglés de mejor tecnología disponible (Best Available Technology)
BTEX	Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno
CA	Carbón activado
CAAB	Carbón activado asistidos biológicamente
CAG	Carbón activado granular
CAGB	Carbón activado asistido biológicamente
CAP	Carbón activado en polvo
CVP	Cuenta vaciado en placa
HPLC	Cromatografía de líquidos de alta resolución (por sus siglas en inglés)
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
Picactif NC60	Tipo de carbón activado
SCAAB	Sistemas de carbón activado asistidos biológicamente
SNC	Sistema Nervioso Central
SOC	Siglas en inglés de compuestos orgánicos sintéticos (synthetic organic compounds)

NOMENCLATURA

b	Constante de equilibrio de adsorción (adimensional)
C	Concentración de la materia orgánica a la salida del sistema (ppm)
Co	Concentración de la materia orgánica a la entrada del sistema (ppm)
C/Co	Relación de saturación (adimensional)
Ce	Concentración de soluto en la solución al equilibrio (ppm)
Co	Concentración inicial de soluto en solución al tiempo cero (ppm)
DL ₅₀	Dosis letal 50
ρ	Densidad (kg/L)
Kf	Constante experimental de Freundlich (mg/g) (L/mg) ^{1/nf}
M	Masa del carbón (kg)
nf	Constante experimental de Freundlich (adimensional)
qe	Concentración de soluto adsorbido al equilibrio (ppm)
qm	Capacidad máxima de adsorción (mg/g)
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
t	Tiempo (días, min)
trh	Tiempo de retención hidráulica (min)
Vp	Volumen percolado al punto de ruptura (mL)
UFC	Unidades formadoras de colonias

Capítulo 1. Introducción

El deterioro de la calidad de fuentes de abastecimiento de agua por compuestos tóxicos es cada día más importante, por lo que es necesario aplicar procesos de tratamiento más sofisticados para que la remoción de esos contaminantes a niveles aceptables.

El proceso de adsorción con CA es ampliamente utilizado en plantas de tratamiento de aguas residuales y naturales para reuso y potabilización respectivamente. El CA en granos, empleado cada vez más con respecto al tipo polvo debido a la posibilidad de regenerarlo por métodos químicos o térmicos, se aplica en columnas de adsorción. Las columnas de adsorción para el tratamiento de aguas residuales puede funcionar con flujo descendente o ascendente, siendo éste último el que permite mayor versatilidad en la operación de estos equipos debido a que ofrece la posibilidad de trabajar de manera continua incluso para extraer el carbón saturado.

La presencia de hidrocarburos en mantos freáticos se debe en la mayoría de los casos a una contaminación causada por descargas de aguas residuales industriales. Estos compuestos son tóxicos y cancerígenos por lo que generan graves problemas a la salud pública y al ambiente. Los fenoles representan un riesgo adicional cuando se encuentran en agua destinada al consumo humano porque pueden formar compuestos de adición durante los procesos de cloración en plantas de producción de agua potable.

Los hidrocarburos aromáticos como benceno y naftaleno son los que más frecuentemente se encuentran en aguas subterráneas contaminadas. Lo anterior se debe a la elevada solubilidad que presentan estos compuestos.

Cuando estos hidrocarburos y el fenol no son eliminados de las aguas residuales a niveles aceptables, por su elevada solubilidad en agua (más de 30 mg/L) tienden a acumularse en las aguas superficiales y/o subterráneas, generando un impacto negativo

en la calidad de las mismas sobre todo cuando se utilizan como una fuente de abastecimiento de agua potable.

Los niveles de contaminación en las aguas residuales generadas por la industria petrolera alcanzarán valores del orden, de 5 a 10 ppm de benceno (Razo y col, 2000). Por otra parte autores como Lesage y col. (1990); Eganhouse y col (1993); Voice y col. (1992); Corseuil y Weber (1994) y Mizari-Hiriart y col. (1997), indican que la contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos se debe principalmente a la presencia de benceno, tolueno y xileno, siendo éstos los principales componentes de las gasolinas y los más solubles de todos los hidrocarburos.

Para solucionar tal situación deben implementarse acciones tanto para eliminar el origen de dicho problema, tratando las aguas residuales, como para remediarlo poniendo en práctica la operación de plantas de producción de agua potable con tratamientos avanzados que eliminen convenientemente dichos contaminantes.

Los procesos biológicos convencionales en la mayoría de los casos son poco eficientes para eliminar hidrocarburos aromáticos a niveles aceptables a pesar de que éstos son relativamente biodegradables. (Corseuil y Weber, 1994; Ivancev-Tumbas y col., 1998; Rozkov y col., 1998). Por lo cual es necesario recurrir entonces a la implementación de procesos fisicoquímicos como la adsorción sobre carbón activado. En México, los límites máximos permisibles de contaminantes en agua potable se encuentran en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. En el año 2000 se propuso una modificación a dicha norma en la cual se incluyen límites máximos permisibles para hidrocarburos; en el caso del benceno el límite máximo permisible fue fijado igual a 10 µg/L, el naftaleno no se encuentra en la lista de los contaminantes normados.

Muchos compuestos orgánicos solubles y/o tóxicos como los hidrocarburos y fenoles pueden ser removidos eficientemente con carbón activado (CA) de las aguas industriales (Chiang y col., 1997). El CA es muy efectivo en el tratamiento de aguas residuales pero

su costo es alto. Lo anterior ha dado origen a numerosos trabajos de investigación enfocados a prolongar la vida útil de las columnas de adsorción. Dentro de ellos destacan los relacionados con la regeneración *in situ* por la acción de los microorganismos. Esta tecnología presenta importantes ventajas técnicas y económicas. Las unidades de carbón activado en las que se desarrolla una actividad biológica son una alternativa interesante ya sea para la depuración de efluentes industriales o para la producción de agua potable.

Los sistemas de carbón activado asistido biológicamente (SCAAB) también tienen desventajas que justifican la realización de un trabajo de investigación para demostrar fehacientemente su viabilidad técnica en la remoción de los compuestos orgánicos antes mencionados. Estas desventajas se refieren principalmente a la eventual interferencia sobre la transferencia de masa que puede aportar el desarrollo de una biopelícula sobre la superficie del carbón activado.

Algunos autores como Schultz y Keinath (1984), con base a estudios cinéticos de adsorción de fenol en carbón activado inoculado con microorganismos, refieren que la velocidad de transferencia de masa de éste a la superficie del carbón disminuye considerablemente. Esto implica que se limita la transferencia de masa a través de la biopelícula por una disminución significativa de la velocidad de remoción del sustrato por adsorción.

Así, se resume que en los SCAAB, la biomasa fija en la superficie del carbón activado puede tener dos influencias (una positiva y una negativa): 1) Permitir que el carbón activado remueva de la solución una cantidad mayor de solutos a la que se obtendría en condiciones abióticas, debido a la degradación de una fracción de los solutos en solución y, a una liberación de sitios de adsorción vía una biodegradación; 2) Disminuir la velocidad de adsorción de los solutos al ofrecer una resistencia adicional a la transferencia de solutos hacia los sitios de adsorción.

En este trabajo se postula que los SCAAB son una opción viable para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con hidrocarburos (benceno y naftaleno). Lo anterior se basa en las ventajas que ofrecen esta tecnología sobre sistemas biológicos convencionales (degradación de compuestos tóxicos) y sobre el proceso de adsorción sobre carbón activado (menores costos de operación por la extensión de la vida útil del carbón activado).

1.1 Objetivos

❖ Objetivo general

Establecer la influencia de la concentración de la biomasa fija en el carbón activado en el proceso de adsorción del benceno y naftaleno

❖ Objetivo particular

Comparar la adsorción de benceno y naftaleno mediante la realización de isotermas de adsorción

Operar tres columnas empacadas con CA, una estéril por adición de Ag_2SO_4 , otra donde se permite el libre desarrollo de la actividad biológica y una tercera donde la actividad biológica fue estimulada por la inoculación del CA

Capítulo 2. Fundamentos

Las aguas superficiales se contaminan con hidrocarburos debido a descargas directas, derrames, arrastre por lluvias, o por la atmósfera. Aunque el mayor problema de contaminación por hidrocarburos, principalmente aromáticos, se presenta en las aguas subterráneas. Éstos a pesar de ser volátiles son también muy solubles, lo cual evita su adsorción en suelos.

En el caso de la gasolina, se cuantifican los hidrocarburos monoaromáticos benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX). Algunos autores eligen solamente el benceno por ser el más tóxico. (Kostecki y Calabrese, 1992).

Razo y col. (2000) indican que las aguas residuales generadas en los procesos de refinación del petróleo, contienen cantidades significativas de compuestos orgánicos, principalmente los hidrocarburos monoaromáticos. En un estudio del análisis de aguas residuales provenientes de refinerías mexicanas, reporta concentraciones de hidrocarburos principalmente benceno, tolueno y fenol del orden de 5 mg/L.

En este trabajo se seleccionó estudiar la eliminación del benceno y del naftaleno por estar éstos predominantemente presentes en las formulaciones de combustibles fósiles, como gasolinas y diesel.

2.1 Características fisicoquímicas de los compuestos modelo

El benceno es la estructura fundamental de una amplia clase de sustancias, tanto de origen natural como sintético, conocidas como compuestos aromáticos. Estos compuestos, por su aromaticidad, presentan una reactividad química relativamente baja y son difícilmente biodegradables, lo cual es importante desde el punto de vista

ambiental. Algunos de los hidrocarburos aromáticos de interés ambiental son tolueno, xileno, etilbenceno, cumeno, naftaleno y benceno (Kosteky y Calabrese, 1992)

En la Tabla 2.1 se presentan algunas de las características fisicoquímicas del benceno y naftaleno. De estas características, es importante destacar los valores elevados de solubilidad de estos compuestos lo cual les confiere una alta probabilidad de encontrarse en cuerpos naturales de agua.

Tabla 2.1 Algunas propiedades fisicoquímicas del benceno y naftaleno (KOSTEKY Y CALABRESE, 1992)

COMPUESTO	PESO MOLECULAR (g/mol)	PUNTO DE EBULLICIÓN (°C)	PRESIÓN DE VAPOR (Pa)	SOLUBILIDAD EN AGUA (mg/L)	LOG COEFICIENTE DE PARTICIÓN
Benceno	78.1	80.1	12700	1780	2.15
Naftaleno	128.20	218.0	10.4	31.7	3.35

2.2 Características toxicológicas

En general, los destilados del petróleo tienen efectos tóxicos muy graves cuando son aspirados al árbol traqueobronquial. Son solventes de las grasas y alteran el sistema nervioso central (SNC) (Dreisbach, y Robertson, 1988). Los hidrocarburos aromáticos son más irritantes que los alifáticos, causan dermatitis y quemaduras severas. Si son aspirados causan edema pulmonar y neumonitis química. La inhalación a altas concentraciones puede causar irritación bronquial y edema pulmonar. Una vez que han sido adsorbidos y distribuidos en el sistema circulatorio deprimen el SNC provocando, temblores, reflejos hiperactivos y convulsiones. Por ejemplo, se han reportado

conjuntivitis y quemaduras de corneas a causa del benceno y de sus derivados arílicos. El naftaleno causa cataratas. (Bagchi y col, 1998).

El límite de exposición para la gasolina es de 300 ppm, para los destilados no aromáticos del petróleo es de 500 ppm en el aire, para el vapor de aceite mineral, 5 mg/m³ y para la nafta 400 ppm (Dreisbach, y Robertson, 1988; Conell y Miller, 1991). El benceno es tóxico por todas las rutas de adsorción. La DL₅₀ en humanos es de 20,000 ppm y ha sido reportada como fatal en 5-10 min. En la tabla 2.2 se muestran los niveles permisibles y características toxicológicas de los principales componentes de las gasolinas.

Tabla 2.2 Características toxicológicas

COMPUESTO	DL ₅₀ mg/kg	EFFECTOS TÓXICOS	REFERENCIAS
Benceno	710 a 1230	Leucemia depresión del sistema nervioso, irritación de las membranas mucosas	Dreisbach y Robertson, 1988. The Merck Index
Naftaleno	>2500	Hemólisis, debilidad, temblor, mareo, vómito dolor de cabeza, convulsiones	Dreisbach y Robertson, 1988. The Merck Index

2.3 Proceso de Biodegradación

2.3.1. Microorganismos biodegradadores

La biodegradación es una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados, donde se aprovecha el potencial de los microorganismos para mineralizar

o transformar contaminantes orgánicos en compuestos químicamente más sencillos. El proceso se basa en la capacidad metabólica de los microorganismos, los cuales se seleccionan de manera natural en presencia de los contaminantes y la actividad degradadora puede ser estimulada por adición de nutrientes básicos (Kosteky y Calabrese, 1992).

Un paso crítico en los métodos de biodegradación de los compuestos orgánicos es la selección adecuada de los microorganismos biodegradadores. El microorganismo ideal es el que degrada a los contaminantes orgánicos y no es patógeno para el hombre.

2.3.2. Rutas de biodegradación de compuestos orgánicos

Existe en la naturaleza una gran cantidad de microorganismos capaces de biodegradar una amplia variedad de hidrocarburos aromáticos, desde los más simples como el benceno, hasta los más complejos como los alquilbencenos y aromáticos polinucleares tales como el naftaleno, fenantreno y antraceno (Atlas y Cerniglia, 1995).

Los hidrocarburos monoaromáticos como benceno son oxidados hasta catecol en uno o varios pasos.

La ruta de biodegradación del benceno se describe en la figura 2.1.

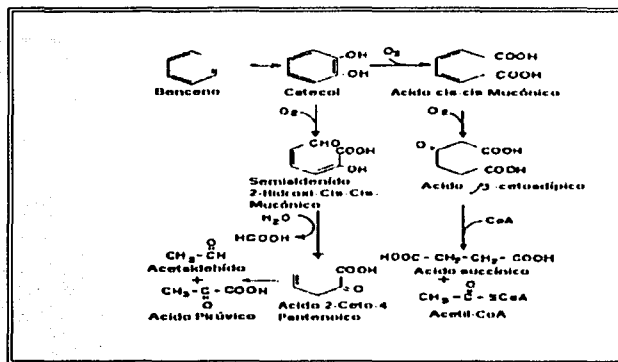


Figura 2.1 Mecanismo de biodegradación de benceno (Atlas y Cerniglia, 1995)

El anillo aromático dihidroxilado es fragmentado en posición "orto" resultando un ácido cis-cis mucónico. Éste es posteriormente metabolizado hasta ácido β-acetoadípico, el cual es transformado oxidativamente en ácido succínico y Acetil-Coenzima A, intermediarios del ciclo de Krebs. En forma alterna, el anillo del catecol puede ser abierto por la fragmentación en posiciones "orto" y "meta" dependiendo de la especie y el sustrato. Las dos rutas de biodegradación se presentan en la figura anterior. La ruta "orto" involucra la fragmentación del anillo entre los grupos hidróxilo, mientras que la ruta "meta" involucra la fragmentación del enlace localizado entre un átomo de carbono conteniendo un hidróxilo y otro átomo de carbono adyacente no hidroxilado. En el caso de los catecoles sustituidos se utiliza por lo general la ruta "meta", como se muestra en la figura anterior. La fragmentación en posición "meta" produce un semialdehído cis, cis-mucónico, generándose posteriormente ácido fórmico, pirúvico y acetaldehído.

Entre los hidrocarburos policíclicos más simples se encuentran el naftaleno, el mecanismo de biodegradación se presenta en la figura 2.2. El ataque enzimático inicial en los policíclicos no sustituidos, se lleva a cabo con la participación de enzimas del tipo de las dioxigenasas, las cuales catalizan reacciones análogas a las que se presentan en

el caso del benceno, el producto derivado de estas reacciones es el salicilato, el cual es degradado vía catecol.

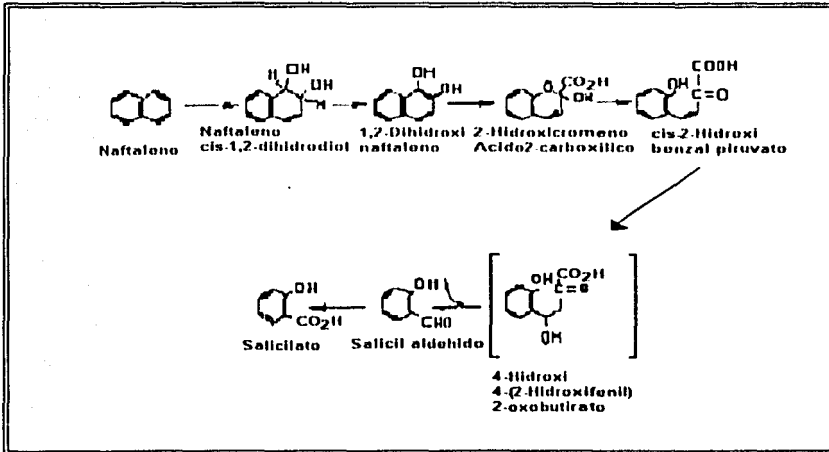


Figura 2.2 Etapas iniciales de la biodegradación del naftaleno

2.4 Proceso de Adsorción

2.4.1. Mecanismo del proceso de adsorción

El mecanismo de la adsorción ha sido descrito y representado por varios autores. Weber y Smith (1987) proponen que en la transferencia de un adsorbato de una fase líquida hacia un sitio de adsorción intervienen cuatro etapas cinéticas.

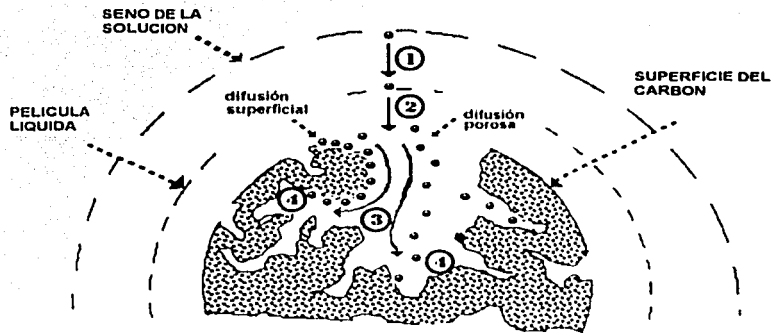


Figura 2.3 Mecanismo de la adsorción propuesto por Weber y Smith (1987).

1. Transferencia del adsorbato de la fase líquida externa hacia la fase líquida situada a proximidad de la superficie del material
2. Transferencia del adsorbato a través de la capa líquida hacia la superficie externa del adsorbente
3. Difusión del adsorbato hacia el interior de los poros del adsorbente bajo el efecto de un gradiente de concentración. La molécula puede difundirse de un sitio de adsorción hacia otro (difusión superficial) o difundirse de la fase líquida al interior del grano hacia un sitio de adsorción (difusión porosa)
4. Adsorción.

Así, el proceso de adsorción comprende 3 etapas de transferencia y una etapa de fijación sobre el material, la cual es la adsorción propiamente dicha. Puesto que estas tres etapas se efectúan en serie, la velocidad de adsorción está determinada por la etapa más lenta. La última etapa (adsorción) es extremadamente rápida con respecto a las otras 3 etapas por lo que su contribución a la cinética de adsorción es despreciable. En las unidades de adsorción, que éstas sean en régimen estático o dinámico, las condiciones hidrodinámicas del sistema son controladas para favorecer un contacto máximo entre la fase fluida y el adsorbente. Por lo anterior la etapa 1 del mecanismo de adsorción es rápida y por lo tanto no es considerada como la etapa limitante. En consecuencia, la cinética de adsorción de un soluto sobre la superficie de un material adsorbente esta determinada por la velocidad de transferencia del adsorbato hacia la capa externa líquida (etapa 2) y/o por la velocidad de difusión del adsorbato al interior de la partícula adsorbente.

2.4.2. Factores que afectan la adsorción sobre carbón activado

En la tabla siguiente se resumen los principales factores que afectan la adsorción sobre carbón activado (Silvera-Araúz,2001):

Tabla 2.3 Factores que afectan la adsorción sobre carbón activado

Naturaleza del adsorbato	La solubilidad del soluto influye en el control de equilibrio de adsorción. la regla de Lindelius nos dice que hay una dependencia inversa entre el grado de adsorción de un soluto y su solubilidad en el disolvente a partir del cual se lleva la adsorción (Weber, 1979)
Naturaleza del adsorbente	La estructura porosa y la distribución de los poros del carbón activado son los que determinan la velocidad y la capacidad de adsorción de los solutos
Tiempo de contacto	Se requiere tiempo de contacto para alcanzar el equilibrio de adsorción y maximizar la eficiencia de adsorción
Efecto del pH	Gobierna el grado de ionización de los compuestos ácidos o básicos. La capacidad de adsorción aumenta en condiciones de pH bajo con el cual se disminuye la solubilidad del adsorbato
Temperatura	Generalmente las reacciones de adsorción son exotérmicas, por lo que el grado de adsorción suele aumentar al disminuir la temperatura. Las variaciones pequeñas de temperatura no alteran el proceso de adsorción (Weber, 1979)
Área Específica	La capacidad de adsorción es proporcional al área de intercambio (la cual está determinada por el grado de activación del carbón)
Tamaño del Poro	La distribución correcta de los tamaños de los poros es necesaria para facilitar el proceso de adsorción proveyendo sitios de adsorción, poros finos y canales apropiados para el transporte del adsorbato
Velocidad de Adsorción	La difusión entre las partículas de carbones activados se compone principalmente por dos mecanismos: Uno es el transporte de las moléculas del adsorbato con la fase líquida en los poros. La difusión del poro se describe por medio del gradiente de la concentración. El otro mecanismo del transporte es la migración de moléculas fijadas por adsorción en la superficie del sólido (Suzuki, 1997)
Índice de yodo	Indica los miligramos de yodo que puede adsorber un gramo de carbón activado y es directamente proporcional al área superficial del carbón
Concentración del adsorbato	La capacidad de adsorción es proporcional a la concentración del adsorbato (concentraciones altas proveen fuerzas impulsoras de mayor magnitud para el proceso de adsorción)
Influencia del tamaño de la molécula	El peso molecular depende de la difusividad, a menor peso molecular un mayor coeficiente de difusión (m^2/S)

2.4.3. Modelación de la adsorción en el equilibrio

Cuando un adsorbente entra en contacto con una solución, la cantidad de soluto adsorbido aumenta en la superficie del adsorbente y disminuye en el solvente. Después de algún tiempo se alcanza un equilibrio dinámico de adsorción, esto sucede cuando el número de moléculas que dejan la superficie del adsorbente es igual al número de moléculas que la superficie adsorbe. El fenómeno de equilibrio es descrito por medio de una isoterma de adsorción, la cual relaciona la concentración al equilibrio del soluto en las dos fases a temperatura constante (Freeman, 1988; Weber, 1988; Tien, 1994).

En la práctica, las isotermas son realizadas experimentalmente relacionando la capacidad de adsorción (masa de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente) con la concentración de equilibrio de soluto que permanece en solución.

Diversos modelos matemáticos son aplicados para expresar esta relación. Las ecuaciones más simples son las de Langmuir y la de Freundlich.

La ecuación de Langmuir es derivada de las cinéticas de adsorción y desorción sobre una superficie uniforme. Este modelo supone que la adsorción máxima corresponde a una monocapa saturada de moléculas de soluto sobre la superficie del adsorbente, que la energía de adsorción es constante y que no existe migración de adsorbato en el plano de la superficie.

La ecuación de Langmuir es la siguiente:

$$q_e = \frac{q_m b}{1 + b C_e}$$

donde:

b = Constante de equilibrio de adsorción

C_e = Concentración de soluto en la solución al equilibrio

q_e = Concentración de soluto adsorbido al equilibrio

q_m = Capacidad máxima de adsorción

La ecuación de Freundlich se desarrolló sobre bases empíricas, se asume que la adsorción es de tipo físico, que no se verifica asociación de las moléculas después de su adsorción y que la superficie del adsorbente es heterogénea. De acuerdo a su desarrollo, la cantidad de soluto adsorbido aumentaría al infinito en relación directa con un aumento de la concentración en el líquido o de la presión en el caso de gases. Frecuentemente este modelo proporciona una descripción más satisfactoria de los datos experimentales, en un intervalo limitado de concentración de adsorbato (Suzuki, 1997).

La ecuación que describe este modelo es la siguiente:

$$q_e = k_F C_e^{1/n_F}$$

K_F : constante experimental de Freundlich $(\text{mg/g})(\text{L/mg})^{(1/n_F)}$

n_F : constante experimental de Freundlich (adimensional).

Recientemente se ha relacionado la constante K_F con la capacidad máxima de adsorción del carbón activado y a n_F con la fracción de sitios de adsorción que han sido ocupados por el adsorbato.

2.5 Proceso de Adsorción – Biodegradación

Los fundamentos presentados en esta sección han sido adaptados de los trabajos de Durán-Moreno (1997) y Silvera Araúz (2001).

El término carbón activado asistido biológicamente se aplica para designar a las unidades de carbón que presentan en la superficie una actividad microbiana, ya sea aerobia o anaerobia que ésta sea deliberadamente promovida o no. El crecimiento es porque la superficie del carbón activado tiene un gran número de cavidades y poros que proporcionan un soporte para el desarrollo de los microorganismos. Esta característica le confiere al carbón una velocidad de colonización muy grande.

Rice y col. (1982), fueron los primeros en proponer el término carbón activado biológico (BAC, por sus siglas en inglés) para designar los sistemas de tratamiento donde la actividad biológica (generalmente aerobia) es deliberadamente promovida en los lechos de carbón activado granular.

En el tratamiento del agua potable, una condición aerobia debe ser mantenida, así que el crecimiento de bacterias en la superficie activada del carbón tiene el efecto de la regeneración biológica del carbón activado así como la oxidación biológica de compuestos orgánicos.

2.5.1. Antecedentes del uso del CA en tratamiento de aguas

El uso del carbón activado en el tratamiento de aguas se remonta a varios siglos atrás; Weber (1984) hace mención de un manuscrito Sankrit (India, 200 A.C.) en el que se propone guardar el agua en recipientes de cobre, exponerla al sol y posteriormente pasarla a través de carbón para eliminar los malos olores y sabores del agua. Las primeras aplicaciones "modernas" del carbón activado se sitúan hacia el fin del siglo XVII cuando LOWITZ, en 1786 utilizó carbón para decolorar soluciones acuosas. (Cheremisinoff, 1985).

Actualmente, el tratamiento de agua con carbón activado es considerada una tecnología de nivel terciario y se considera la mejor tecnología disponible (Best Available

Technology, BAT) para la eliminación de compuestos orgánicos sintéticos (SOC, por sus siglas en inglés). (Davis y Cornwell, 1991)

2.5.2. Definición de SCAAB

La importante estructura porosa que presenta el carbón activado ofrece un área enorme para la fijación de compuestos orgánicos en sitios específicos. Asimismo, la rugosidad de la superficie representa un ambiente muy favorable para la fijación y desarrollo de microorganismos, quienes aprovechan como substratos los compuestos orgánicos en solución y los retenidos por adsorción (Jonge y col. 1996).

El objetivo de permitir el desarrollo de una actividad biológica en la superficie del carbón activado es prolongar la vida útil de los materiales adsorbentes, promoviendo el desarrollo controlado de la actividad biológica en la superficie de los mismos propiciando el llamado fenómeno de bio-regeneración (Craveiro de Sa y Malina, 1992).

Estos sistemas se han probado ampliamente para la depuración tanto de agua para consumo humano como de aguas residuales. Internacionalmente, estos sistemas son conocidos por sus siglas en inglés BAC (Biological Activated Carbon). Una correcta definición en español de estos sistemas podría ser "Sistemas de Carbón Activado Asistidos Biológicamente" quedando sus siglas como SCAAB (Durán-Moreno, 1997). La aplicación al nivel industrial de los SCAAB se inició en los ochentas.

2.5.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SCAAB

Las curvas de operación de los SCAAB se caracterizan por una eliminación relativamente constante de materia orgánica durante largos periodos. En la Figura 2.4, se han representado esquemáticamente las curvas de operación de dos sistemas de carbón activado, uno funcionando únicamente como material adsorbente (línea punteada) y el segundo combinando la adsorción y la biodegradación (línea continua). El eje de las

abscisas corresponde al tiempo de operación de los sistemas y el de las ordenadas representa la relación entre la concentración de la materia orgánica a la salida (C) y a la entrada de los sistemas (C_0). De esta Figura se observa que cuando el sistema elimina materia orgánica únicamente por adsorción, en el carbón activado se acumula progresivamente la materia orgánica hasta la saturación completa del carbón ($C/C_0=1$). En cambio, en un SCAAB, en función del tiempo de operación, las interacciones entre la adsorción y la biodegradación para la eliminación de la materia orgánica cambiarán progresivamente. En el primer intervalo de operación, el mecanismo dominante será la adsorción. Posteriormente, conforme la actividad biológica se desarrolle en la superficie del carbón activado, la biodegradación contribuirá significativamente en la eliminación de la materia orgánica biodegradable. Para periodos prolongados de funcionamiento, el mecanismo dominante de eliminación de compuestos disueltos será la biodegradación de manera que se establece un funcionamiento pseudo-estacionario en estos sistemas.

El desarrollo experimental de los SCAAB comenzó desde los años 70's para el tratamiento de aguas. Diversas publicaciones exponen hipótesis acerca de este fenómeno, lo cierto es que no todas son correctas, tal cual lo expusieron Xiaojian y col., (1991).

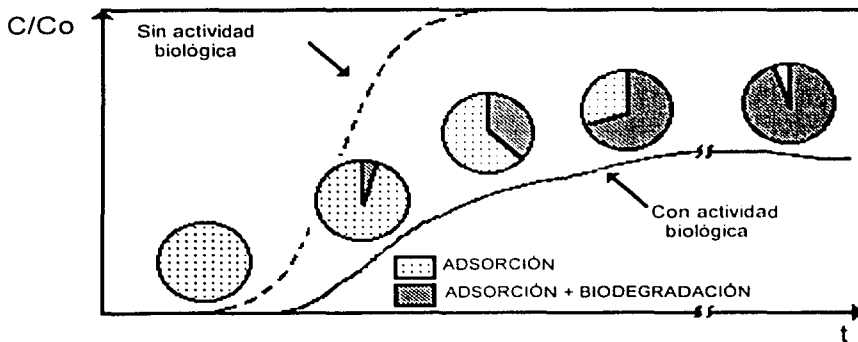


Figura 2.4. Representación de las curvas de operación de sistemas de carbón activado funcionando en condiciones abióticas y bióticas (Durán-Moreno, 1997)

2.6 Mecanismo de adsorción - biodegradación sobre carbón activado

Algunos autores proponen que la función del carbón activado es incrementar la superficie sólido-líquido, en la cual los microorganismos, enzimas y material orgánico son adsorbidos proporcionando un ambiente enriquecido para el metabolismo microbiano, que el carbón actúa como buffer, otros indican que ocasiona un efecto sinérgico aumentando la actividad biológica de los microorganismos logrando con esto una "biorregeneración" del carbón.

El termino "biorregeneración" se aplica para describir el proceso de *regeneración in situ* de los sitios de adsorción por la biodegradación de materia orgánica previamente adsorbida (Perrotti y Rodman, 1974). Cuantificar la extensión de la biorregeneración es incierta debido a que es difícil de medir experimentalmente, dado que la biodegradación, biorregeneración y adsorción ocurren simultáneamente (Lee y DiGiano, 1981).

La adsorción es un proceso transitorio que requiere la regeneración de adsorbentes cuando se satura la capacidad de adsorción. Cuando los adsorbidos deben ser recuperados, se considera la regeneración química. La regeneración termal de carbones activados gastados es el método más popular solicitado en los sistemas de tratamiento de aguas. El propósito de la regeneración es restaurar la capacidad del carbón activado sin perder la estructura activada del carbón. (Suzuki, 1997).

La biorregeneración de un carbón activado prolonga el tiempo de servicio de éste debido a que se liberan sitios de adsorción por la acción de microorganismos. Walker y Weatherley (1997), entre otros investigadores, han sugerido que el sistema de carbón activado asistido biológicamente puede ser regenerado "in situ" con la actividad biológica a través de una columna, efectivamente degradando las especies las cuales han sido adsorbidas por el carbón, (Rodman y col. 1970).

Los mecanismos de bio-regeneración que han sido propuestos postulan que las enzimas extracelulares de las bacterias se difunden dentro de las estructuras microporosas del carbón y degradan los adsorbatos en los sitios activos (Perrotti y Rodman, 1974); este tipo de regeneración puede extender la vida del carbón (Jahangir, 1994).

La regeneración biológica aumenta el potencial de uso del carbón activado y reduce los costos de operación del sistema (Servais y col., 1991). Beneficios de los sistemas donde se combinan la adsorción y la biodegradación.

2.7 Beneficios de los sistemas donde se combinan la adsorción y la biodegradación

La combinación de adsorción y biodegradación en un sólo sistema puede producir dos efectos sinérgicos. El primero, la biomasa se desarrolla más rápidamente en la superficie del carbón activado que en un sistema de biomasa suspendida. Segundo, a niveles de carga orgánica baja, se observan porcentajes de remoción altos. Esto es debido a que la adsorción de la superficie del carbón activado sirve para concentrar sustancias incluyendo substratos, nutrientes y oxígeno. Esta concentración promueve una colonización más rápida y permite que la degradación ocurra aún cuando la concentración de substrato en la fase líquida sea baja para soportar el crecimiento microbiano (Voice y col, 1992; Jonge, y col., 1996). Además en estos sistemas es posible remover compuestos orgánicos tóxicos.

La capacidad de biorregeneración incrementa el periodo de servicio de CAAB en comparación con el CAG. Proporciona estabilidad y confianza en la operación de los procesos de CAAB, actúa como un buffer, cuando la concentración del influente excede la capacidad metabólica de las bacterias.

La capacidad de adsorción del carbón sirve para mantener la calidad del efluente mientras, la capacidad de biodegradación del sistema es establecida (Voice, y col.,

1992). Los beneficios de la biorregeneración conducen a la renovación del potencial de adsorción disminuyendo las dosis de carbón requerido (Orshansky y Narkis, 1996).

La regeneración térmica del carbón activado incrementa los costos de tratamiento, en cambio la biorregeneración in situ extiende el tiempo de uso potencial de carbón activado y así, disminuye los costos del sistema de operación.

2.8 Desventajas de los sistemas donde se combinan la adsorción y la biodegradación

Aunque, los reportes anteriores presentan las claras ventajas de los sistemas CAAB sobre el sistema convencional de CAG, el sistema CAAB puede presentar las siguientes desventajas:

Incremento de las caídas de presión debido a la obstrucción por el crecimiento microbiano. Este problema es solucionado lavando con frecuencia para remover el exceso de biomasa.

Posible interferencia en la velocidad de adsorción de los compuestos en solución debido a la biopelícula que cubre la superficie del carbón (Zhao, y col., 1999).

La adición de carbón activado podría crear la inmovilización de bacterias patógenas. Esto es particularmente importante en el caso de la producción de agua potable, en donde la inmovilización de bacterias patógenas las protege de las sustancias usadas para la desinfección.

2.9 Aplicaciones de los SCAAB

En plantas de producción de agua potable, la primera aplicación del carbón activado tuvo lugar en Reading, Inglaterra en 1910. El carbón activado fue utilizado para eliminar el exceso de cloro del agua que había sido voluntariamente sobreclorada para oxidar la materia orgánica en ella. En el caso del tratamiento de aguas residuales, las primeras plantas utilizando CA fueron instaladas en Hamm, Alemania, en 1929 y en Michigan EEUUA, en 1930 (Weber,1979).

El carbón activado puede ser utilizado en polvo (CAP) o en granos (CAG) en función de varios criterios técnicos y económicos. Las instalaciones de CAP requieren de una inversión inicial menos importante que la de CAG, por el contrario éstas últimas requieren de costos de operación bajos debido principalmente a la posibilidad de regenerar el CAG mientras que el CAP no es reutilizado. Además los lechos de carbón activado permiten la fijación de microorganismos que contribuyen a mejorar la eficiencia del tratamiento lo que conlleva a una vida útil del carbón activado más prolongada.

El carbón activado granular es un medio efectivo en los procesos de producción de agua potable para remover contaminantes orgánicos presentes a concentración del nivel de trazas. Los principales compuestos que se eliminan son las sustancias que causan sabores y olores, y los compuestos orgánicos sintéticos (COS) que pueden ocasionar problemas a la salud. Estos compuestos pueden servir como substratos para el desarrollo microbiológico en las redes de agua potable (Scholz y Martin, 1997). Los SCAAB pueden suprimir este problema eliminando al máximo del agua la presencia de substratos orgánicos.

En diversas investigaciones, se ha encontrado que el CAG tiene una mayor selectividad por los compuestos cancerígenos entre los distintos compuestos que acarrea el agua. Es

tan fuerte esta selectividad por compuestos cancerígenos que aún cuando el CAG se ha saturado, sigue reteniendo los compuestos cancerígenos a la vez que deja escapar a otros compuestos peligrosos (John y col.,1988)

El tratamiento con carbón activado ha sido utilizado en diferentes posiciones en la secuencia de operación de plantas, algunas veces, es usado como un proceso primario para remover grandes cantidades de un contaminante o puede ser usado como una etapa final para mejorar la calidad del producto removiendo trazas de compuestos y como una operación de refinado, en tratamiento de aguas residuales como un proceso terciario avanzado.

En el caso del tratamiento de aguas residuales, los SCAAB han sido usados tanto en procesos aerobios como anaerobios. (Hanaki y col, 1997), lo aplicó para eliminar fenol de una solución sintética, en un reactor anaerobio de lecho fluidizado. Observó que aún después de variar la concentración de fenol 400 a 4000 mg/L durante 4 días, no se vio afectada la calidad del efluente y la producción de metano se mantuvo estable. Hanaki concluyó que el CAG actuó como un amortiguador de las variaciones de carga de fenol. Las técnicas más ampliamente utilizadas para remediarlo son la adsorción de la fase líquida usando carbón granular activado (GAC) y burbujeo por aire, simplemente transfiriendo los contaminantes de una fase a otra (McCarty,1983).

La combinación del carbón activado con procesos biológicos se presenta como una alternativa interesante para tratar aguas residuales altamente contaminadas. En estos casos intervienen dos mecanismos potenciales de eliminación de compuestos orgánicos: la adsorción y la biodegradación. Estos procesos al combinarse conjugan las ventajas de cada uno de ellos en la eliminación de compuestos orgánicos y neutralizan sus respectivos inconvenientes. Una adsorción de compuestos potencialmente tóxica para una biomasa permite una mayor flexibilidad en la operación de un proceso biológico, por otro lado, la economía de la operación de los procesos biológicos permite reducir los costos del uso del carbón activado.

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se encuentran detallados las características del sistema experimental y la metodología para determinar: (1) la adsorción de los compuestos orgánicos benceno y naftaleno sobre carbón activado y (2) la biodegradación de los compuestos por la técnica de consumo de oxígeno y por el método convencional de consumo de substrato y de producción de biomasa, finalmente se estudiará (3) el proceso simultáneo de la adsorción y de la biodegradación utilizando muestras de carbón activado inoculadas con diferentes concentraciones Iniciales de biomasa. Esta metodología es similar a la propuesta por varios autores (Le Cloirec, 1983; De Laat, 1988; Voice y col, 1992; Durán-Moreno, 1997; Orshansky y Narkis, 1996; Zhao y col., 1999).

El tratamiento del agua residual con carbón activado suele estar considerado como un proceso de pulimento de refinado de aguas (Metcalf y Eddy, 1996). El carbón activado se emplea para eliminar contaminantes, parte de la materia orgánica disuelta y como soporte biológico. Las pruebas de adsorción y de capacidad de adsorción son algunas de las pruebas más comunes en la caracterización del carbón activado (Julien y col, 1998). Las pruebas realizadas en este trabajo incluyen el estudio del carbón Picatif N60.

3.1 Material y Reactivos

Compuestos orgánicos. El benceno y el naftaleno son compuestos orgánicos persistentes y sospechosos de ser cancerígenos, por su solubilidad presentan una gran movilidad en los diversos sistemas ambientales. En esta investigación, los estudios se realizaron con soluciones acuosas preparadas con agua destilada adicionando el benceno a una concentración de 100 ppm y el naftaleno a 15 ppm en razón de su baja solubilidad (30 mg/L).

Carbón Activado. El carbón activado se puede clasificar de acuerdo a su procedencia en: carbones de origen animal también llamado carbón de hueso, carbones de origen vegetal y carbones de origen mineral. En este trabajo todos los ensayos se realizaron con el carbón activado de origen vegetal (cáscara de coco) Picactif NC60 fabricado por la compañía francesa PICA. Este tipo de carbón activado ya ha sido utilizado en trabajos anteriores relacionados con el estudio del proceso combinado de adsorción y de biodegradación (LeCloirec, 1983; Durán-Moreno, 1997). Las características de este carbón activado se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características del carbón activado empleado en este estudio

CARACTERÍSTICAS	PICACTIF NC60
Materia prima	Cáscara de coco
Aspecto	Granular
Granulometría	1.2 – 1.5 mm
Repartición porosa	macro 15 % meso 78% micro 7 %
Área específica	1200 m ² /g
Densidad específica	0.520 g/cm ³

El CAG de origen vegetal se utiliza para la recuperación de solventes orgánicos, para purificar el aire de los cuartos por recirculación a través de un lecho de carbón. El carbón de cáscara de coco se emplea para eliminar compuestos volátiles y solventes de bajo peso molecular en soluciones acuosas.

3.2 Cuantificación de compuestos en solución

La cuantificación de los solutos en solución se realizó por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, por sus siglas en inglés). En la foto 3.1 se presenta el equipo cromatográfico empleado para realizar el análisis.

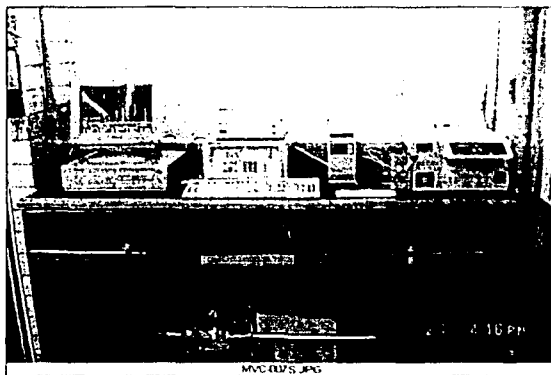


Foto 3.1 Equipo de Cromatografía de Líquidos de alta resolución

El cromatógrafo empleado es de marca Perkin-Elmer el cual está compuesto de un detector UV/Vis modelo 785A, una bomba binaria modelo 250. Los disolventes empleados fueron metanol grado HPLC de EM SCIENCE y agua ultrapura.

Para las determinaciones espectrofotométricas se utilizaron las longitudes de onda mostradas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Condiciones para el análisis de solutos por espectrofotometría UV

SOLUTO	COEFICIENTE DE EXTINCIÓN MOLAR ($\text{cm}^{-1} \text{M}^{-1}$)	INTERVALO DE CONCENTRACIONES (mg/L)	LONGITUD DE ONDA DE ANÁLISIS (λ , nm)
Benceno	215	5-100	254
Naftaleno	13300	1-15	254

Para las determinaciones en el equipo de HPLC, con base en los resultados de experimentos preliminares, se utilizaron las siguientes condiciones de análisis (Hernández-Rojas,2002):

- Fase móvil: 70:30 metanol/agua
- Fase estacionaria: Nucleosil C-18 de 5 μm , 15 cm x 0.46 cm d.i.
- Volumen de inyección: 20 μL
- Detección UV de 254 nm

Antes de su análisis, todas las soluciones se filtraron a presión en membranas de nylon de 0.45 μm .

3.3 Adsorción sobre carbón activado

En los sistemas de adsorción es importante el conocimiento tanto de las condiciones al equilibrio (isotermas) como de la cinética de adsorción del sistema adsorbato - adsorbente a estudiar. Para conocer la velocidad de adsorción se realiza la representación gráfica de los resultados experimentales de la concentración del soluto en la fase sólida en función del tiempo. Para conocer la capacidad de adsorción al equilibrio se realizaron experimentos con distintas dosis de carbón activado y se trazó la

concentración residual del soluto en la fase líquida contra la concentración correspondiente en la fase sólida adsorbente.

Las isotermas de adsorción se realizaron en frascos de 1000 mL mantenidos a una temperatura constante de 25 °C, y agitación de 150 rpm en una incubadora orbital.

3.4 Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción establecen la cantidad máxima de adsorbato susceptible de fijarse sobre un adsorbente a una temperatura determinada. Este dato permite calcular las dosis de carbón requeridas para eliminar una cantidad de contaminante de algún influente. Las isotermas se construyen con un mínimo de 5 puntos, donde cada punto representa un ensayo con una cantidad diferente de adsorbente. En este estudio se utilizaron dosis de carbón activado comprendidas entre 5 y 800 mg/L. Los ensayos se realizaron en frascos Winkler en donde se adicionaron 225 mL de una solución 100mg/L de benceno y 850mL de una solución de 15mg/L de naftaleno (N).

El seguimiento de la adsorción de los compuestos se realizó por medio de un balance de materia determinando la concentración inicial y al equilibrio del adsorbato en la fase líquida. La modelación del equilibrio de adsorción, en el caso de soluciones individuales, se representó con las ecuaciones de Langmuir y de Freundlich (Durán-Moreno, 1997).

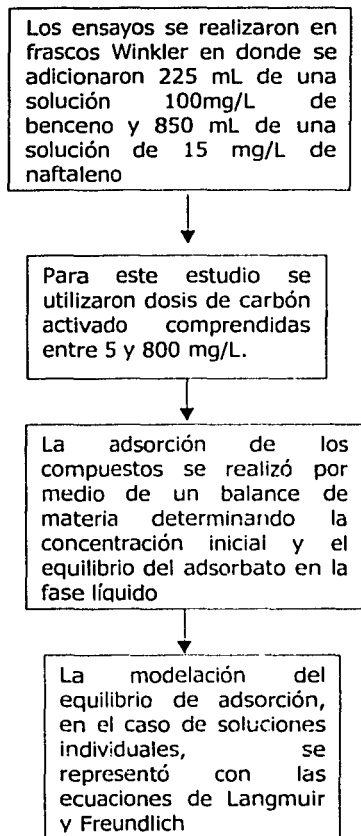


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología experimental para las isotermas de adsorción

3.5 Inoculación de microorganismos a CA

Se utilizó un consorcio microbiano proporcionado por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). Este consorcio de tipo aerobio heterótrofo proviene de la purga de un reactor fluidizado de flujo ascendente alimentado con gasolina, queroseno, diesel y aceites gastados. En este estudio, el consorcio microbiano se cultivó en un fermentador de 5 L de capacidad. Se adicionó como fuente de carbono una mezcla de benceno y naftaleno. El pH del medio se mantuvo constante a 7 por la adición de una solución tampón basada en fosfatos. La temperatura del medio se fijó a 28 °C (temperatura adecuada para el cultivo de microorganismos heterótrofos). El oxígeno disuelto en el medio se mantuvo a un valor superior de 2 mg/L por medio de un compresor portátil. La mezcla en el fermentador se homogenizó con un agitador de propela que gira a 150 rpm. La foto 3.2 muestra el fermentador utilizado para los experimentos realizados.

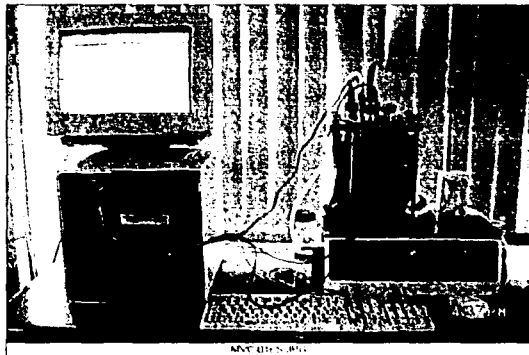


Foto 3.2 Fermentador

Solución nutritiva:

Para el cultivo de los microorganismos se empleó el medio reportado por (Ridgway y col., 1990) quienes utilizaron este medio para aislar bacterias de aguas subterráneas contaminadas con gasolina. La composición del medio se describe en la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Medio nutritivo para el cultivo de microorganismos (Ridgway y col., 1990)

INGREDIENTES	CANTIDAD
KH_2PO_4	1.36g
K_2HPO_4	1.42g
KNO_3	0.5g
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	2.38g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.05g
CaCl_2	0.01g
$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	3.53 mg
H_2O desionizada	1L

3.6 Columnas Empacadas

Se colocaron dos columnas de vidrio de 20 cm, mantenidas a una temperatura constante de 25°C empacadas con carbón activado y alimentadas a través de una bomba peristáltica de 8 canales.

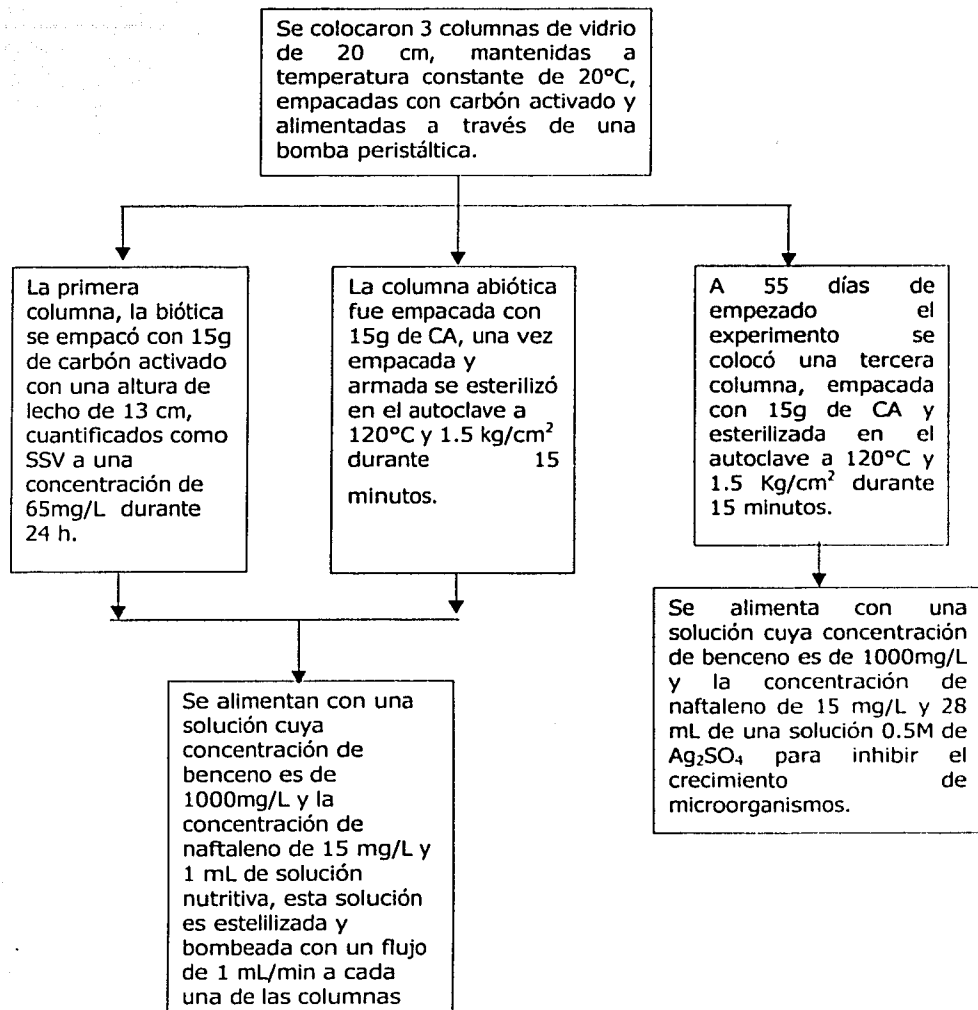


Figura 3.2 Diagrama de flujo de la metodología experimental para las columnas de adsorción

En la foto 3.3 se muestra el sistema de columnas diseñado para realizar los experimentos de las curvas de operación de CA en condiciones bióticas y abióticas:

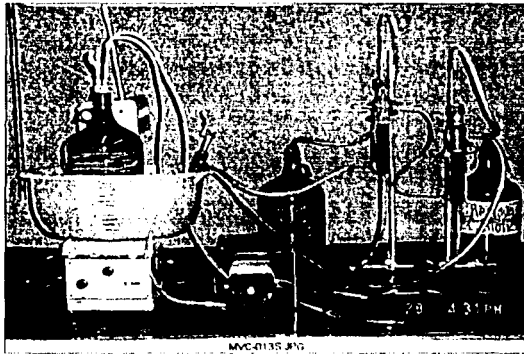


Foto 3.3 Sistema de columnas Biótica y Abiótica empacadas con CA

La primera de ellas biótica se empacó con 15 g de carbón activado con una altura de lecho de 13 cm, el CA previamente se puso en contacto con una solución de microorganismos, cuantificados como SSV a una concentración de 65 mg/L, durante 24 horas. Con esto se logró un equilibrio de adsorción entre el CA y los microorganismos (Durán-Moreno,1997).

La columna abiótica fue empacada con 15 g de CA, una vez empacada y armada se esterilizó en el autoclave a 120 °C y 1.5 kg/cm² durante 15 minutos.

Diariamente se preparó una solución de 3.5 L cuya concentración de benceno era de 100 mg/L y la concentración de naftaleno de 15mg/L, se adicionó también 1mL de la solución nutritiva. Esta solución era esterilizada y bombeada con un flujo de 1mL/min a

cada una de las columnas, este flujo estuvo calculado para tener en función de la altura del lecho un tiempo de retención de 15 minutos.

Al cabo de 45 días de operación de las columnas por medio de las pruebas microbiológicas se observó un crecimiento de microorganismos en las muestras tomadas de la columna abiótica, por lo que se decidió colocar una tercera columna empacada con 15 g de CA, una vez empacada y armada se esterilizó en el autoclave a 120°C y 1.5kg/cm² durante 15 minutos, diariamente se alimentaba con una solución de 1.8 L cuya concentración de benceno era de 100 mg/L y la concentración de naftaleno de 15 mg/L además 28 mL de una solución 0.05M de Ag₂SO₄ para inhibir el crecimiento de microorganismos, tal como lo recomienda De Laat (1988)

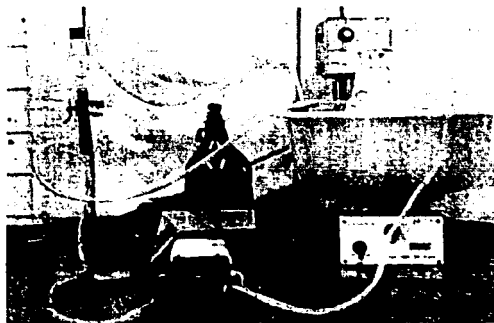


Foto 3.4 Sistema de columna estéril empacada con CA

Se espera poder obtener un comportamiento como el que se ve en la Figura 3.3:

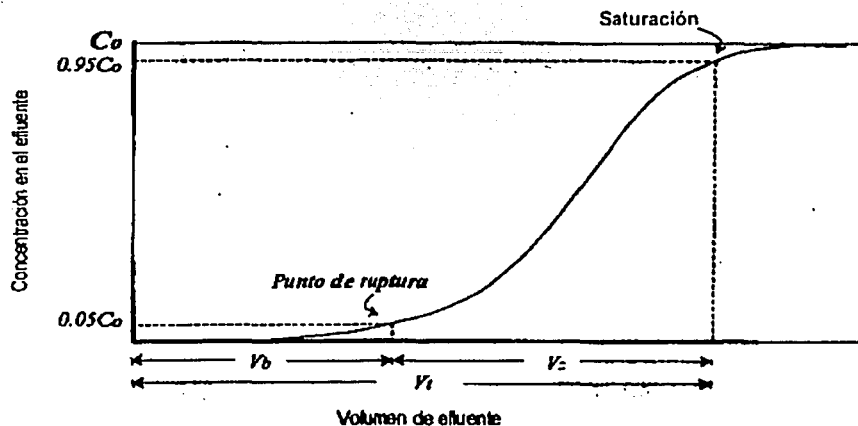


Figura 3.3 Curva de Ruptura (Calderón de Anda y Velásquez, 2001)

Una vez que la zona de adsorción llega al fondo de la columna, la concentración en el efluente se incrementa comenzando lo que se conoce como curva de ruptura.

La curva de ruptura para una columna, muestra la concentración de soluto en el efluente contra el volumen de influente recibido. Conforme la zona de adsorción va desapareciendo, la concentración se incrementa hasta llegar a C_0 ; entonces se dice que la columna está saturada.

Dependiendo del criterio, se establece una concentración límite permisible de efluente, C_a , que normalmente es considerada como $0.05 C_0$, y para esta concentración se tiene un volumen correspondiente de efluente, V_b .

Asimismo, la saturación se considera que ocurre a $0.95C_0$ y su correspondiente volumen de efluente, como se ve en la figura anterior es V_t .

3.7 Presencia de microorganismos en los efluentes

Para establecer el desarrollo del perfil microbiológico durante el tiempo de operación de las columnas se cuantificó los microorganismos como coliformes totales.

La cuantificación de los coliformes totales se realizó por la técnica de filtro de membrana, usándose como medio de cultivo Agar Endo. En lo que se refiere a la técnica del filtro de membrana, el grupo coliforme se define como el formado por las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gram negativas, no esporuladas y de forma alargada, que desarrollan una columna roja con brillo metálico en un medio tipo endo que contenga lactosa tras una incubación de 24 h a 35°C. En esta técnica todas las colonias rojas, rosadas, azules blancas e incoloras que no tienen brillo suelen ser consideradas como no coliformes.

Una vez esterilizado el medio de cultivo se vació en las cajas petri, se realizaron las diluciones en solución salina isotónica (NaCl 0.9%) de tal forma que en las placas se obtuviera un número de colonias entre 30 y 300. La inoculación se realizó de la siguiente manera: la solución de dilución fue filtrada a través de un filtro de membrana de tamaño de poro de 0.45µm soportadas en una unidad de filtración previamente esterilizada con luz UV. La membrana se retiró de la unidad de filtración y se colocó en la placa que contenía el Agar Endo. Las placas se incubaron a 35°C durante 24 h y se procedió a contar el número de colonias. El reporte de los resultados se realizó en colonias total/100 mL.

3.8 Aislamiento e identificación de microorganismos

El aislamiento de los microorganismos se realizó según la técnica descrita en el siguiente diagrama. Esta técnica ha sido utilizada por (Hernández-Rojas, 2002) para la identificación de microorganismos degradadores de hidrocarburos.

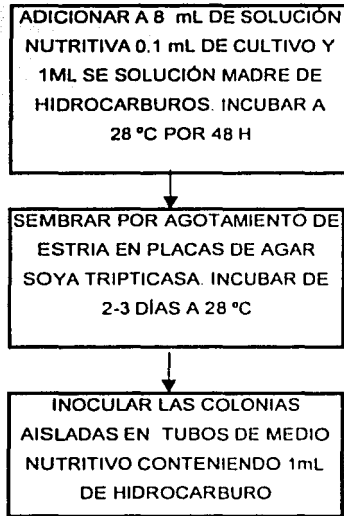


Figura 3.4 Técnica utilizada para la identificación de microorganismos

Se realizaron pruebas de identificación de los géneros de microorganismos aislados. Para las pruebas de identificación se realizó una tinción de Gram para establecer la morfología y pruebas bioquímicas (API), para determinar el género de los microorganismos biodegradadores (Hernández-Rojas, 2002)

Capítulo 4. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados correspondientes al estudio experimental para evaluar el proceso de adsorción-biodegradación. Así mismo, se presentan los resultados de la evaluación económica para este proceso.

4.1 Isotermas de adsorción

En esta etapa experimental, se realizaron ensayos, por duplicado, las isotermas de adsorción de cada compuesto individual sobre el carbón activado picactif NC60. Estos ensayos tuvieron por objetivo evaluar el proceso de adsorción, en condiciones abióticas, para la eliminación de los compuestos modelo en soluciones acuosas sintéticas. Con las isotermas, se evaluó la capacidad máxima de adsorción de cada soluto sobre el picactif NC60. Los datos experimentales de adsorción de benceno y naftaleno fueron representados con los modelos linealizados de Freundlich y de Langmuir. Los valores de las constantes obtenidas se presentan en la tabla 4.1 y las formas linealizadas de las isotermas de adsorción se presentan en las figuras 4.5 a 4.8. para dosis de carbón activado para la isoterma de benceno de 200-1000 mg/L en un volumen de 250 mL, y para el naftaleno dosis de carbón activado de 5-45 mg/L en un volumen de 850 mL.

Tabla 4.1 Constantes de los modelos de adsorción de Freundlich y de Langmuir para el benceno y naftaleno

COMPUESTO ORGÁNICO	MODELO DE FREUNDLICH			MODELO DE LANGMUIR		
	K_f (mg/g)(L/mg) ^{1/nf}	nf	R ²	qm (mg/g)	B	r ²
Benceno	30.1383	1.817	0.9567	333.33	0.0473	0.9627
Naftaleno	227.69	1.803	0.8369	909.09	0.344	0.8926

De acuerdo a los valores de los coeficientes de regresión (r^2), se observa que los resultados experimentales de adsorción son satisfactorios. Se obtiene un valor de coeficiente de correlación mayor de 0.9 para el benceno calculado con ambos modelos. Para el naftaleno se realizan las isothermas a una dosis de 5-45 mg CA y un volumen de solución de 850 mL. Para el naftaleno los valores de coeficiente de correlación fueron muy cercanos al 0.9. De tabla anterior se concluye que el naftaleno presenta una mayor afinidad de adsorción como lo indica su valor de K_f de 227.69 contra de 30.1389 del benceno. Estos resultados son congruentes de acuerdo a una mayor solubilidad del benceno, como lo indican Suzuki, (1997), Metcalf y Eddy, (1996), Fremman (1988). Este factor influye de manera importante en el proceso de adsorción. En soluciones acuosas la capacidad de adsorción disminuye conforme aumenta la solubilidad de los compuestos orgánicos. Por otro lado, a partir de los valores obtenidos de la ecuación de Langmuir se observa también una mayor capacidad de adsorción para el naftaleno como lo indica su valor de q_m de 909.09 mg/g contra el del benceno de 333.33mg/g. Se puede concluir que para la eliminación de estos compuestos de soluciones acuosas el carbón Picactif NC60 resulta viable.

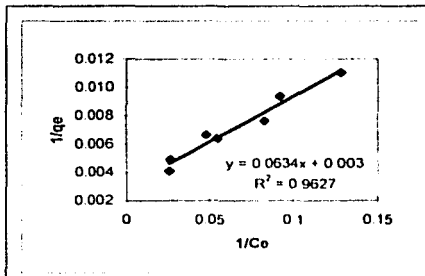


Figura 4.1 Isoterma de adsorción de benceno linearizada según el modelo de Langmuir

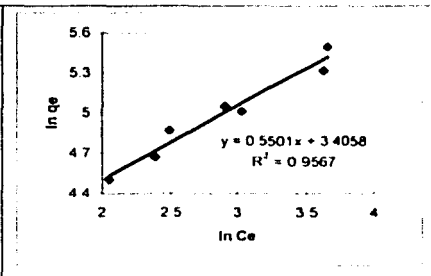


Figura 4.2 Isoterma de adsorción de benceno linearizada según el modelo de Freundlich

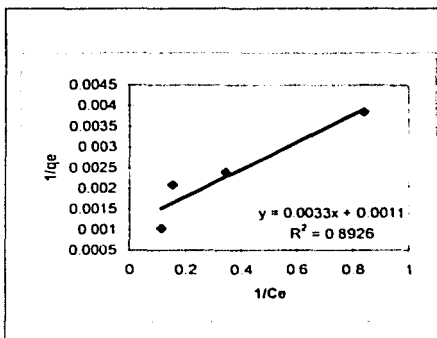


Figura 4.3 Isoterma de adsorción de naftaleno linearizada según el modelo de Langmuir

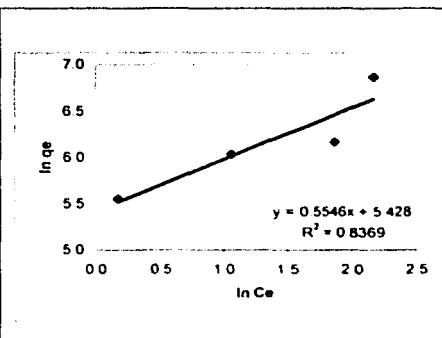


Figura 4.4 Isoterma de adsorción de naftaleno linearizada según el modelo de Freundlich

4.2 Columnas Empacadas con CA

En estos ensayos se utilizaron tres columnas de vidrio de 20 cm, cada columna se empacó con 15 g de carbón con una altura de lecho de 13 cm, y fueron alimentadas con una solución cuya concentración fue de 100mg/L de benceno y 15mg/L de naftaleno, a un flujo de 1mL/min, esto con la finalidad de tener un tiempo de retención de 15 minutos. Las condiciones a las que se trabajaron fueron abiótica y biótica, después de varios días de operación y de hacer pruebas de microbiología, se obtuvo que para las condiciones abióticas había un crecimiento de microorganismos, por lo que fue necesario colocar una tercera columna a la que se le agregó una solución 0.5M de Ag_2SO_4 para inhibir el desarrollo de microorganismos.

4.2.1. Resultados Columna Estéril

Esta etapa de la experimentación tuvo una duración de 55 días. En las figuras 4.5-4.6 se muestran las curvas de operación de la columna estéril, el volumen total percolado a través de la columna fue de 29.6 L, esta columna se alimentó con 3166 mg de benceno y 476.36 mg de naftaleno, de los cuales se adsorbieron 2981.98 mg y 471.39 mg respectivamente, es decir que se adsorbieron 198.79 mgB/gCA y 31.42 mgN/gCA. El volumen de ruptura de la columna calculado fue 22.84L con un tiempo de ruptura entre los días 39 y 41.

Por lo tanto se puede concluir que se obtuvieron resultados favorables en el agua tratada con sulfato de plata ya que no fue detectada la presencia de microorganismos. Considerando los 15 g de carbón se calculó teóricamente la cantidad que puede adsorber el carbón y se obtuvo para el benceno un valor de 4999.95mg así como para el naftaleno 13636.35mg.

De esto se puede observar que las cantidades adsorbidas de benceno y naftaleno son menores a la cantidad que se puede adsorber por gramo de carbón. Lo que significa que los resultados están aún por debajo del valor de q_m . Además se observa que el tiempo de ruptura de la columna concuerda con el tiempo calculado teóricamente, ya que se tiene que en alrededor de 34 días para el benceno y 632 días para el naftaleno, se alcanzaría el punto de inflexión de la curva de operación de la columna.

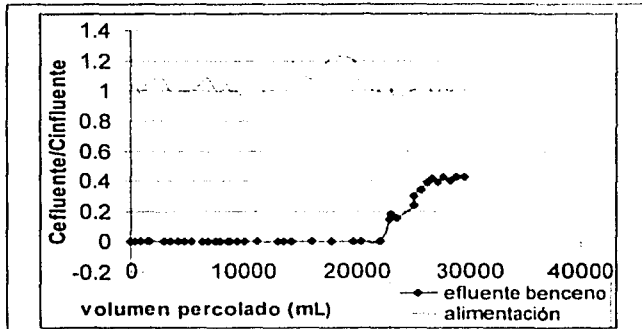


Figura 4.5 Curva de operación de benceno. Columna Estéril

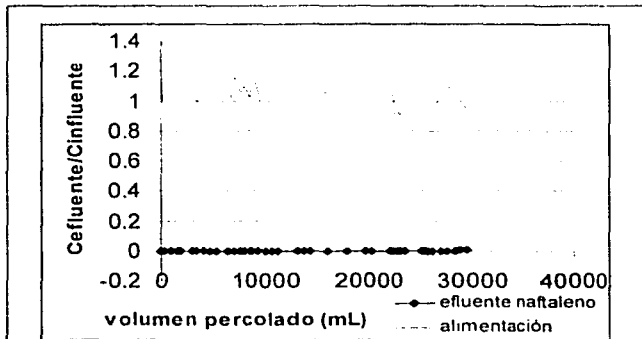


Figura 4.6 Curva de operación de naftaleno. Columna Estéril

4.2.2. Resultados Columna Abiótica

Esta etapa de la experimentación tuvo una duración de 100 días. En las figuras 4.7-4.8 se muestran las curvas de operación de la columna Abiótica, el volumen total percolado a través de la columna fue de 115.29 L, esta columna se alimentó con 12170.18 mg de benceno y 1801.85 mg de naftaleno, de los cuales se adsorbieron 10537.19 mg y 1763.91 mg respectivamente, es decir que se adsorbieron 702.47 mgB/gCA y 117.59 mgN/gCA. El volumen de ruptura calculado para la columna fue de 61.86 L con un tiempo de ruptura de 54 días. Es importante mencionar que en el efluente de esta columna se realizó periódicamente el conteo de coliformes totales, a partir del día 8 se detectó la presencia de coliformes razón por la cual se decidió colocar una tercera columna a la que se trató con Ag_2SO_4 para inhibir el crecimiento de microorganismos.

No obstante lo anterior, esta columna se continuó alimentando con la misma solución de benceno y naftaleno. Al final del experimento en el día 100 de operación, se encontró que la masa eliminada del primer compuesto fue mayor en 110% con respecto a la masa teórica calculada con las isoterms de adsorción. Esto se debió a la presencia de microorganismos en la columna, lo cual conllevó a alargar la vida de operación de la columna por el proceso de biodegradación de los compuestos adsorbidos y por la biorregeneración de los sitios activos del carbón.

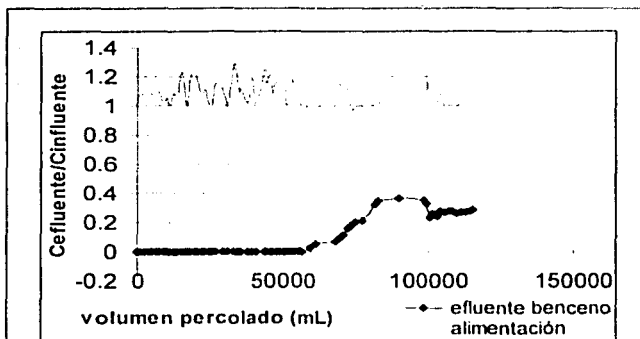


Figura 4.7 Curva de operación de benceno. Columna Abiótica

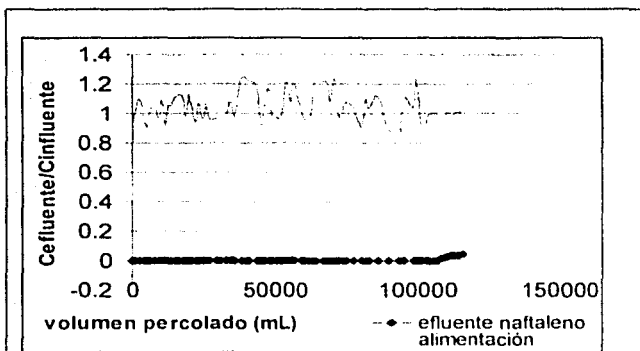


Figura 4.8 Curva de operación de naftaleno. Columna Abiótica

4.2.3. Resultados Columna Biótica

Esta etapa de la experimentación tuvo una duración de 100 días. En las figuras 4.9-4.10 se muestran las curvas de operación de la columna biótica, el volumen total percolado a través de la columna fue de 115.29 L, esta columna se alimentó con 12595.58 mg de benceno y 1786.31 mg de naftaleno, de los cuales se adsorbieron 11948.96 mg y 1786.31 mg respectivamente, es decir que se adsorbieron 796.59 mgB/gCA y 119.087 mgN/gCA. Mediante un proceso de integración gráfica, se calculó que el volumen de ruptura calculado para la columna fue de 88.42 L lo cual representa un tiempo de ruptura de 76 días.

De esta parte de la experimentación se puede concluir que la cantidad adsorbida de benceno es mayor que el valor de q_m , la cantidad adsorbida y el tiempo de fuga del naftaleno son menores al de las columnas estéril y abiótica pero esto indica que hay una mayor cantidad de compuestos eliminados, esto es debido a que los compuestos que son adsorbidos en el carbón son biodegradados por los microorganismos y a que se están regenerando los sitios de adsorción. También se pudo observar que hay una diferencia en los tiempos de ruptura entre la columna abiótica y biótica, esto se explica porque la columna biótica tiene una mayor concentración de microorganismos, posiblemente también se deba a que hubo adsorción de los compuestos en la biopelícula.

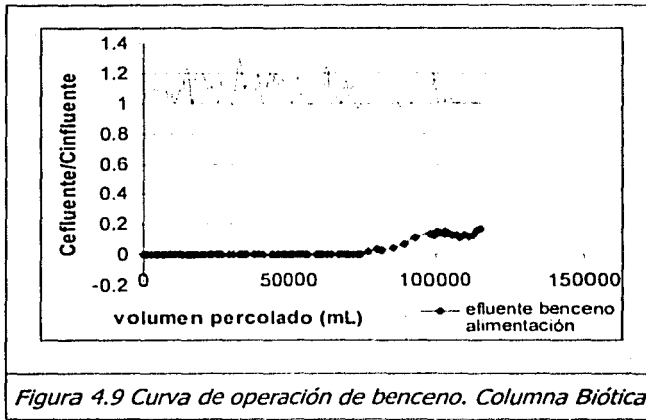


Figura 4.9 Curva de operación de benceno. Columna Biótica

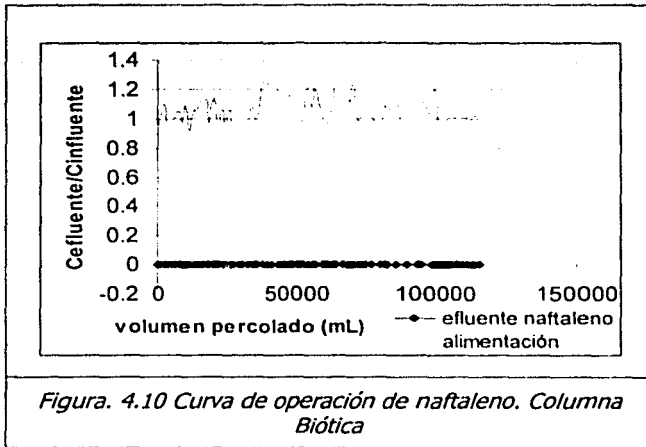


Figura. 4.10 Curva de operación de naftaleno. Columna Biótica

4.2.4. Presencia de microorganismos en los efluentes

Los resultados de la cuantificación de coliformes totales en ambas columnas presentan crecimiento de microorganismos, para la columna abiótica este crecimiento resulta ser desfavorable porque indica que no se logró mantener la columna en condiciones estériles como era lo deseado. En la columna abiótica se obtuvo un crecimiento incontable de microorganismos a partir del día 8 para la dilución de 10^{-3} . Para el día 63 había una concentración de 1×10^5 UFC, sin embargo al término de la experimentación la concentración de microorganismos de la columna fue de 80×10^6 UFC.

En el caso de la columna biótica se encontró un escenario comparable en el día 37 la concentración fue de 15×10^9 UFC, para el día 63 los conteos fueron del orden de 10^5 UFC y al momento de detener la columna fue de 205×10^8 UFC.

Para la columna estéril no se detectó crecimiento biológico en ningún momento e incluso al día 39 el conteo de UFC fue igual a cero. A continuación se muestra en la tabla 4.2 la identificación de microorganismos así como las características principales de los mismos.

Tabla 4.2 Identificación de microorganismos

BACTERIA	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES (Collins, 1989; Mossel y Moreno, 1984)
<i>Escherichia coli</i>	Es móvil del grupo de los coliformes, gram -, produce a 44°C ácido y gas de la lactosa, indol +, VP-, citrato-, KCN -, y malonato y gluconato-, algunas cepas son patógenas para el hombre y animales
<i>Enterobacter cloacae</i>	Es móvil del grupo de los coliformes, bacilo gram-, indol -, VP+, citrato+, KCN +, licua la gelatina-, MR-, se encuentra en aguas residuales
<i>Enterobacter sakazakii</i>	Bacilos pleomórficos, movilidad -,
<i>Alcaligenes xylosoxidans</i>	Bacilos largos, movilidad +, heterótrofos
<i>Pseudomona mendocina</i>	Bacilos rectos, gram -, heterótrofos
<i>Serratia marcescens</i>	Bacilo gram -, No es de origen fecal, no es patógena

En la tabla 4.3 se hizo un resumen de resultados de las columnas de adsorción en las diferentes condiciones estudiadas:

Tabla 4.3 Resumen de Resultados

	COLUMNA ESTÉRIL	COLUMNA ABIÓTICA	COLUMNA BIÓTICA
Periodo de Experimentación	55 días	100 días	100 días
Volumen total percolado	30 L	115 L	115 L
Alimentación	3166 mg B 476 mg N	12170 mg B 1802 mg N	12596 mg B 1786 mg N
Cantidad total adsorbida	2982 mg B 471 mg N	10537 mg B 1764 mg N	11949 mg B 1786 mg N
Cantidad adsorbida por gramo de carbón	199 mgB/gCA 31 mgN/gCA	702 mgB/gCA 118 mgN/gCA	797 mgB/gCA 119 mgN/gCA
Volumen de ruptura	23 L	62 L	88 L
Tiempo de ruptura	anterior a los 41 días	54 días	76 días

4.3 Evaluación económica de los procesos de adsorción

Para el proceso de adsorción se dividió la evaluación económica en dos partes:

1. Costos de operación
2. Costos de inversión

Cabe señalar que para hacer la estimación económica se seleccionó un flujo arbitrario de agua a tratar igual a 194 GPM es decir de 10L/s.

4.3.1. Costos de operación.

Para esta parte se tomaran en cuenta los costos de materia prima y los costos de energía eléctrica.

Materia Prima.

Se cotizó carbón activado con índice de yodo 900 obteniendo un precio de \$24.85 por cada kg de carbón.

En la tabla 4.4 se muestran los tiempos y volúmenes de ruptura para las tres columnas que se estudiaron:

Tabla 4.4 Tiempos y volúmenes de ruptura de las columnas de adsorción

	COLUMNA ESTÉRIL	COLUMNA ABIÓTICA	COLUMNA BIÓTICA
Tiempo de ruptura (días)	41	54	76
Volumen de ruptura (mL)	22,848	61,860	88,416
(m ³)	0.0228	0.06186	0.0884

Para el calculo de los costos por tratar cada m³ de agua se utilizó un "factor de utilización" que es el resultado de dividir la masa de carbón activado entre el volumen percolado al punto de ruptura de cada columna.

Enseguida se muestran los cálculos para las columnas de adsorción :

$$\frac{\$}{\text{kgC}^*} * \text{factor de utilización de cada columna} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

$$\frac{\$}{\text{kgC}^*} * \frac{\text{kgC}^*}{\text{m}^3} = \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Columna Estéril

$$\frac{\$24.85}{\text{kgC}^*} * \frac{0.015\text{kgC}^*}{0.0228\text{m}^3} = \frac{\$16.348}{\text{m}^3}$$

Columna Abiótica

$$\frac{\$24.85}{\text{kgC}^*} * \frac{0.015\text{kgC}^*}{0.06186\text{m}^3} = \frac{\$6.025}{\text{m}^3}$$

Columna Biótica

$$\frac{\$24.85}{\text{kgC}^*} * \frac{0.015\text{kgC}^*}{0.0884\text{m}^3} = \frac{\$4.216}{\text{m}^3}$$

Las especificaciones de la torre de adsorción que se cotizó son las siguientes:

Capacidad de adsorción = 10 L/seg

Flujo de retrolavado = 30 L/seg

Presión de operación = 2-5 kg/cm².

Diámetro = 2.1336 m

Altura = 1.8288 m

A continuación se calcula el volumen de la torre de adsorción:

$$\text{Si } \phi = 2.1336 \text{ m y}$$

$$H = 1.8288 \text{ m}$$

$$\text{Volumen columna de adsorción} = \pi \frac{(2.1336)^2}{4} \cdot 1.46304 = 5.231 \text{ m}^3$$

La capacidad de la torre de adsorción:

$$Q = \frac{10L}{\text{seg}} = \frac{0.01 \text{ m}^3}{\text{seg}}$$

Con el flujo (Q) y el volumen de la torre de adsorción (V) se calcula el tiempo de retención hidráulica (t_{th}):

$$t_{th} = \frac{5.231 \text{ m}^3}{0.0058 \text{ m}^3/\text{seg}} = 901.9 \text{ seg} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 15.031 \text{ min}$$

El tiempo de retención que se utilizó en la parte experimental de este trabajo fue de 15 min, por lo que se utilizó el mismo t_{th} para la torre de adsorción y de esta forma se obtuvo el flujo a utilizar:

$$15 \text{ min.} = \frac{5.231 \text{ m}^3}{Q}$$

$$Q = \frac{5.231 \text{ m}^3}{15 \text{ min}} = \frac{0.349 \text{ m}^3}{\text{min}} \cdot \frac{1000L}{1 \text{ m}^3} = \frac{349L}{\text{min}}$$

La densidad del carbón activado utilizado es:

$$\rho = \frac{0.6529 \text{ g}}{\text{cm}^3} = \frac{652.9 \text{ kg}}{\text{m}^3}$$

Con el volumen de la columna de adsorción (V) y la densidad (ρ) se calcula la cantidad de carbón activado que utilizará la columna de adsorción:

$$\frac{652.9kg}{m^3} * 5.231m^3 = 3415.32kg$$

$\rho * V =$ cantidad de carbón activado

Columna Estéril

Volumen percolado = 0.0228 m³

En la parte experimental de las columnas de adsorción se utilizaron 15 g de carbón activado, y se determinó que por cada kg de C* se trata un volumen de 1.52 m³:

$$\frac{0.0228m^3}{0.015kg} = \frac{1.52m^3}{kg}$$

A continuación se presenta el cálculo de los días que funcionará la columna de adsorción en condiciones totalmente abióticas al llegar su tiempo de ruptura:

$$\frac{1.52m^3}{kg} * 3415.32kg * \frac{1 \text{ min}}{0.349m^3} * \frac{1 \text{ día}}{3600 \text{ min}} = 4.13 \text{ días}$$

Columna Abiótica

Volumen percolado = 0.06186 m³

Para esta columna se tiene que por cada kg de C* se trata un volumen de 4.124 m³:

$$\frac{0.06186m^3}{0.015kg} = \frac{4.124m^3}{kg}$$

Y los días que funcionará la torre de adsorción en condiciones abióticas, permitiendo el crecimiento de microorganismos al llegar su tiempo de ruptura es:

$$\frac{4.124m^3}{kg} * 3415.23kg * \frac{1min}{0.349m^3} * \frac{1dia}{3600min} = 11.21días$$

Columna Biótica

Volumen percolado = 0.0884 m³

Por último se tiene que por cada kg de C* se trata un volumen de 5.893 m³:

$$\frac{0.0884m^3}{0.015kg} = \frac{5.893m^3}{kg}$$

El tiempo de ruptura para la torre de adsorción a la que se le inocularían los microorganismos es de:

$$\frac{5.893m^3}{kg} * 3415.23kg * \frac{1min}{0.349m^3} * \frac{1dia}{3600min} = 16.01días$$

En la tabla 4.5 podemos observar los días que se mantendrán funcionando las columnas de adsorción al llegar al punto de ruptura:

Tabla 4.5 Resultados comparativos de las columnas de adsorción

	COLUMNA ESTÉRIL	COLUMNA ABIÓTICA	COLUMNA BIÓTICA
Tiempo de ruptura de las columnas (días)	4	11	16
Costo por cada m ³ de agua tratada (\$/m ³)	16.348	6.025	4.216

De la tabla anterior se puede observar que la presencia de microorganismos inoculados en el carbón activado favorece el tiempo de operación de la columna ya que la columna biótica dura 5 días más funcionando, lo que trae como consecuencia que disminuya la frecuencia de regeneración del carbón y por lo tanto bajan los costos de operación. Además se observa que en la columna de adsorción en condiciones bióticas hay un ahorro de \$1.809/m³ de agua tratada en comparación con la columna de adsorción en condiciones abióticas.

Reactivación del carbón:

Para tener un tiempo de retención de 15 min el flujo utilizado será de 349 L/min, de esta manera se calcularon los días que tardará cada columna en llegar a su punto de ruptura, en la tabla 4.6 se calculó el volumen de agua a tratar en este tiempo.

Tabla 4.6 Tiempos y volúmenes de ruptura de las columnas de adsorción

	COLUMNA ESTÉRIL	COLUMNA ABIÓTICA	COLUMNA BIÓTICA
Tiempo de ruptura (días)	4	11	16
Volumen de ruptura (L)	2,010,240	5,528,160	8,040,960
Volumen de ruptura (m ³)	2,010.240	5,528.160	8,040.960

Se cotizó la reactivación del carbón y se obtuvo un precio de \$15.00 por kilogramo de carbón reactivado. En la reactivación del carbón se pierde el 40% de éste, por lo que la empresa reactivadora pide un mínimo de 5 Toneladas de carbón.

En la tabla 4.7 mostrada a continuación se han resumido los costos del tratamiento y la reactivación del carbón o el cambio de carbón en las diferentes condiciones estudiadas, tomando como base de cálculo 1 año.

Tabla 4.7 Costos por tratamiento. Reactivación o cambio de carbón

		COLUMNA ESTÉRIL	COLUMNA ABIÓTICA	COLUMNA BIÓTICA
No. de reactivaciones o cambios de carbón		90	32	22
Costo por tratamiento de agua		\$ 2,998,785.57	\$ 1,105,192.26	\$ 773.359.43
Costo del carbón activado		\$ 84,870.70	\$ 84,870.70	\$ 84,870.70
Reactivación del carbón	Costo por reactivación del carbón	\$ 4,610,682.00	\$ 1,639,353.60	\$ 1,127,055.60
	Costo del carbón activado	\$ 3,055,345.27	\$ 1,086,344.99	\$ 746,862.18
Costo por cambio del carbón		\$ 7,638,363.18	\$ 2,715,862.46	\$ 1,867,155.44
Costos totales de tratamiento y reactivación del carbón		\$ 10,749,683.54	\$ 3,915,761.55	\$ 2,732,147.91
Costos totales de tratamiento y cambio del carbón		\$ 10,722,019.45	\$ 3,905,925.42	\$ 2,725,385.57

En este caso se ha determinado que es más rentable cambiar el carbón en vez de reactivarlo, ya que el volumen propuesto a tratar no es muy grande.

En la tabla 4.8 observamos la comparación de costos entre la reactivación del carbón y el cambio del mismo:

Tabla 4.8 Comparación de costos reactivación y cambio de carbón

	COLUMNA ESTÉRIL	COLUMNA ABIÓTICA	COLUMNA BIÓTICA
Costo Total del tratamiento y reactivación del carbón	\$ 10,749,683.54	\$ 3,915,761.55	\$ 2,732,147.91
Costo Total del tratamiento y el cambio del carbón	\$ 10,722,019.45	\$ 3,905,925.42	\$ 2,725,385.57
Diferencia de costos	\$ 27,664.09	\$ 9,836.13	\$ 6,762.34

En la tabla anterior, se constata que efectivamente resulta más rentable utilizar carbón nuevo que regenerarlo, esto se debe a las pérdidas en volumen que sufre el carbón al reactivarlo, también se puede observar que al utilizar carbón activado inoculado biológicamente obtenemos costos de operación menores.

Energía eléctrica:

De acuerdo con los requerimientos necesarios, se solicitaron cotizaciones a proveedores de equipo y se seleccionó una bomba construida en acero inoxidable 316, con sello mecánico John Crane, acoplada a motor de 20 HP a 1780 RPM 220/440 V. 3F, 60 Hz, tipo TCCV, por medio de cople flexible con espaciador.

Los costos de energía eléctrica para tratar el agua durante 1 año se calcularon de la siguiente manera:

$$HP * h * \frac{\$}{kWh} * \frac{0.7457kW}{1HP} = \$$$

$$20HP * 8760h * \frac{\$0.61}{kWh} * \frac{0.7457kW}{1HP} = \$79,694.45$$

4.3.2. Costos de inversión.

Estos costos comprenden la adquisición de todos los activos fijos necesarios para iniciar las operaciones del proceso, en este caso los activos fijos comprende el costo de los equipos para el tratamiento del agua.

Se cotizó una torre de adsorción modelo DM-96/72P P con una capacidad de 10 L/seg obteniendo un precio de \$ 46,897 USCy, y una bomba centrífuga marca durco 2K3X2-13, obteniéndose un costo de \$ 46,437.00

El tipo de cambio fue de \$10.5 por dólar

Torre de adsorción:

\$ 46,897 dólares * \$10.5/ dólar = \$ 492,418.5

4.3.3. Costos totales.

Estos son la suma de los costos de operación más los costos de inversión. En la tabla 4.9 se presentan los costos anuales para el tratamiento de agua.

Tabla 4.9 Costos totales para el tratamiento de agua

		COLUMNA ESTÉRIL	COLUMNA ABIÓTICA	COLUMNA BIÓTICA
Costos de operación	Costos totales de tratamiento y cambio del carbón	\$ 10,722,019.45	\$ 3,905,925.42	\$ 2,725,385.57
	Costo energía eléctrica	\$ 79,694.45	\$ 79,694.45	\$ 79,694.45
Costos de inversión	Torre de adsorción	\$ 492,418.5	\$ 492,418.5	\$ 492,418.5
	Bomba 20 HP	\$ 46,437.00	\$ 46,437.00	\$ 46,437.00
Total		\$ 11,340,569.4	\$ 4,524,475.37	\$ 3,343,935.52

De acuerdo a lo anterior se puede observar que el proceso de adsorción de hidrocarburos utilizando carbón activado inoculado con microorganismos resulta más barato que utilizar un proceso de adsorción en condiciones abióticas.

Capítulo 5. Conclusiones

El uso de los SCAAB tiene ciertas ventajas sobre los sistemas de carbón activado que funcionan en condiciones abióticas como son: Una mayor vida útil del carbón activado, mayor degradación de contaminantes orgánicos y la posibilidad de eliminar compuestos difícilmente biodegradables. Una posible desventaja es la interferencia del fenómeno de adsorción debido al bloqueo de los poros.

El proceso de adsorción sobre carbón activado es efectivo para eliminar de las soluciones acuosas al benceno y al naftaleno en los intervalos de concentración de 100ppm para benceno y 15 ppm para naftaleno. Los experimentos de adsorción fueron descritos adecuadamente por los modelos de Freundlich y Langmuir como lo indican los coeficientes de correlación, muy cercanos a 1, obtenidos de la linearización de los modelos.

Los parámetros de operación de la columna empacada con carbón activado inoculado con microorganismos que se utilizó en el presente estudio fueron los siguientes: Altura de lecho de CA 13 cm, TRH 15 min, flujo 1 mL/min, temperatura de operación 25 °C, concentración del Influyente 15 ppm de Naftaleno y 100 ppm de Benceno.

En la columna que inicialmente se pretendía que fuera estéril no se logró establecer las condiciones de esterilidad, por lo tanto se procedió a empacar otra columna en condiciones estériles adicionando sulfato de plata a una concentración de 0.05 M a la solución de alimentación desde el volumen cero, obteniendo resultados favorables ya que no se presentó crecimiento de microorganismos.

Comparando los masas de benceno y naftaleno eliminados en las columnas con respecto a las masas teóricas que podían adsorberse en las mismas (capacidad máxima de adsorción, q_m , multiplicada por la masa total de carbón, 15g), en la columna abiótica

se eliminó 110% más de benceno y en la columna biótica la eliminación de este compuesto fue 139% más alta que la eliminación teórica. Esta diferencia entre los valores teóricos y los experimentales se atribuye al efecto de biodegradación provocado por los microorganismos que se desarrollaron en el interior de las columnas. Estos resultados demostraron un efecto benéfico de la presencia de microorganismos en columnas de carbón activado.

Con respecto al Naftaleno, no se pudieron establecer conclusiones contundentes en cuanto a la función del proceso de biodegradación pues la masa total eliminada en las columnas era muy pequeña con respecto a la masa teórica que el carbón activado podía eliminar. Esta situación se debió a que, por problemas de solubilidad, la concentración de naftaleno en las soluciones de alimentación era muy baja (5 mg/L).

En función de los parámetros de adsorción calculados para el naftaleno, en donde su q_m es de 909 mgN/gCA, para lograr obtener una adsorción del 0.05 de C_0 se necesita operar la columna durante un periodo de 632 días, lo cual resulta impráctico, por lo que se recomienda aumentar la concentración de naftaleno en la solución de alimentación, o empacar una columna con menor cantidad de carbón.

Desde el punto de vista económico, se observa que al usar los SCAAB hay un ahorro de \$1,809/m³ de agua tratada, también se observó que hay una diferencia de casi \$8,000,000 al usar torres de adsorción en condiciones totalmente estériles, y \$1,200,000 al usar torres de adsorción permitiendo el crecimiento de microorganismos en el carbón, en vez de inocularlo desde el principio del proceso, por otro lado se observa que es más rentable cambiar el carbón en vez de regenerarlo, al menos para volúmenes pequeños de agua a tratar.

Se mostró que la superficie porosa del carbón activado Picactif NC60 ofrece un ambiente muy favorable para la fijación y desarrollo de microorganismos, lo que permite que se presente un fenómeno de biodegradación de contaminantes orgánicos.

Se recomienda al final del tiempo de operación de las columnas realizar la cuantificación de la concentración de microorganismos adsorbidos en el carbón activado.

Capítulo 6. Bibliografía

- 1) Atlas, R. y Cerniglia, C. (1995). Bioremediation of petroleum pollutants. *BioScience* 43:5 (332-338).
- 2) Bagchi M., Bagchi D., Balmoori J., Ye X., Stohs SJ. (1998). Naphthalene-induced oxidative stress and DNA damage in cultured macrophage J774A.1 cells. *Free Radical Biology & Medicine*, Vol.25, No. 2, pp. 137-143.
- 3) Calderón de Anda, J.A., Velásquez Cuevas Raúl. (2001). Desarrollo de un programa para el diseño de adsorbedores de carbón activado para el tratamiento de agua. Tesis en Ingeniería Química, UNAM.
- 4) Cheremisinoff P. y Morresi, A.C., *Carbon Adsorption Handbook*, P.H. Cheremisinoff and F. Elieberbusch, Eds., Ann Arbor Science Publishers, Inc., Ann Arbor, Mich.
- 5) Chiang P C., Chang E E., Wu J S (1997). Comparison of Chemical and Thermal regeneration of aromatic compounds on exhausted activated carbon. *Wat. Sci. Tech.* Vol 35, No. 7, 279-285
- 6) Collins, C. (1989). *Métodos microbiológicos*. Ed. Acribia. Zaragoza, España.
- 7) Corseuil, H. y Weber, W. (1994). Potential biomass limitations on rates of degradation of monoaromatic hydrocarbons by indigenous microbes in subsurface soils. *Wat. Res.* 28:6 (1415-1423)
- 8) Craveiro de SA et Malina J, J.F. (1992). Bioregeneration of granular-activated carbon. *Wat. Sci. Tech.* 26 (9-11), 2293-2295

- 9) De Laat J. (1988). Contribution à l'étude du mode d'élimination de molécules organiques modèles sur charbon actif en grains : Interactions entre les processus d'adsorption et de biodégradation. Tesis de Doctor de Estado, Universidad de Poitiers, N° de orden: 485, Francia.
- 10) Dreisbach, R. y Robertson, W. (1988). Manual de toxicología clínica. Prevención, diagnóstico y tratamiento. El Manual Moderno, S.A. 12a. Ed. México, D.F. México.
- 11) Durán Moreno, A. (1997). Contribution à l'étude de l'adsorption et de la biodegradation de composés organiques sur charbon actif: Cas du phénol et de dérivés phénoliques. Tesis de doctorado, Universidad de Rennes 1, No. de orden: 1807, Francia.
- 12) Eganhouse R.; Dorsey T., Phinney C. y Westcott A. (1993). Determination of C₆ – C₁₀ aromatic hydrocarbons in water by purge-and-trap capillary gas chromatography. J. Chrom. 628:81-92.
- 13) Freeman, H.M. (1988). Standard Handbook of Hazardous Wastes Treatment and Disposal. McGraw-Hill Book Company. San Diego, EUUA.
- 14) Hanaki K., Saito T. Matsuo T., (1997). Anaerobic treatment utilizing the function of activated carbon. Wat. Sci. Tech., 35:8:193-201.
- 15) Hernández-Rojas, ME. (2002). Eliminación de Benceno y Naftaleno de soluciones acuosas con carbón activado inoculado biológicamente. Tesis de Maestría en Ciencias Químicas, UNAM.
- 16) Ivancev-Tumbas I.; Dalmacija B., Tamas Z. Y Karlovic E. (1998). Reuse of biologically regenerated activated carbon for phenol removal. Wat. Res. 32:4:1085-1094.

- 17) Jahangir M. A.Q. (1994). Bioregeneration of granular activated carbon. Ph. D. Thesis of the university of Birmingham U.K.
- 18) John R.J., Breure A.M., Van Andel JG. (1988). Reversibility of adsorption of aromatic compounds on to powdered activated carbon (PAC). *Water Res.*, 30:4:883-892.
- 19) Jonge, R.J., Breure A.M., y Van Andel, J.G. (1996). Bioregeneration of powdered activated carbon (PAC) loaded with aromatic compounds. *Wat. Res.*, 30:4:875-882.
- 20) Julien F., Baudu M. Y Mazet M. (1998). Relationship between chemical and physical surface properties of activated carbon. *Wat. Res.* 32(11) :3414-3424
- 21) Kosteky, P.T Calabrese, E.J.. (1992). *Hydrocarbon Contaminated Soil and Groundwater*. Lewis Publishers.Chelsea, EEUUA.
- 22) Le Cloirec P. (1983). Elimination de polluants organiques de l'eau au moyen de filtres biologiques à charbon actif. Tesis de Doctorado, Universidad de Rennes, Francia 1, B,156,108.
- 23) Lee A.Y.L., Digiano F.A. (1981). Availability of sorbed substrate for microbial degradation on granular activated carbon. *JWPCF* 55 (4), 392-399.
- 24) Lesage S., Jackson R., Priddle W. y Reimann P. (1990). *Environ. Anal.Chem.* 24:559.

- 25) McCarty P.L. (1983). Removal of organic substances from water by air stripping. In Control of Organic Substances in Water and Wastewater (Edited by Berger B) EPA-600/8-83-011.
- 26) Metcalf y Eddy (1996). Ingeniería de las aguas residuales. Ed. McGraw Hill. México D.F. México.
- 27) Mizairi-Hiriart (1997). Caracterización de sitios de canal en la zona industrial de la subcuenca de Chalco. En memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C., Toluca, Edo. México, México.
- 28) Mossel B., Moreno García B. (1984). Fundamentos ecológicos para garantizar y comprobar la inocuidad en la calidad de los alimentos. Ed. Acribia SA, Zaragoza, España.
- 29) Orshansky F., Narkis N., (1996). Characteristics of organics removal by PACT simultaneous Adsorption and Biodegradation. Wat. Res. 3:13: 391-398.
- 30) Perroti A. y Rodman C. (1974). Factors involved with biological regeneration of activated carbon. Water. Am. Inst. Chem. Engrs. Symp. Ser. 144:316-325.
- 31) Razo, E., Torres L., Muñoz A. Urquiza G. y Cabrera L. (2000). Caracterización y tratabilidad de aguas desfleadas provenientes de una refinería mexicana. 2do. Simposio Internacional de Tratamiento y Reuso del Agua, Aguas Residuales y Residuos Industriales UAM. México, D.F.
- 32) Rice R. y Rodman, C. (1982). Biological Activated Carbon. Ann. Arbor Science, Ann Arbor, Mich. EEUUA.

- 33) Ridgway H., Safarik J. Phipps D., Carl P. y Clark D. (1990). Identification and catabolic activity of well-derived gasoline-degrading bacteria from a contaminated aquifer. *Applied. and Env. Microbiology*. 12:3565-3575.
- 34) Rodman C.A., Shunney E. L., Perroti A. E. (1970). Biological regeneration of activated carbon. In "Carbon Adsorption Handbook", Edited by Cheremisinoff P. N. and Ellebursch F., Ann Arbor Science, Ann Arbor, Mich.
- 35) Rozkov, A. Kård, A. y Vilu, R. (1998). Biodegradation of dissolve jet fuel in chemostat by a mixed bacterial culture isolated from a heavily polluted site. *Biodegradation*. 8: 363-369.
- 36) Scholz M. Martin R.J. (1997). Ecological equilibrium on biological activated carbon. *Wat. Res.*
- 37) Schultz J. y Keinath T. (1984). Powdered activated carbon treatment process mechanisms. *JWPCF*. 56:2:143-151.
- 38) Servais P., Billen G., Becker E. (1986). Action des populations bactériennes vis-à-vis de l'élimination des matières organiques dans les filtres biologiques. Rapport de recherche, Université Libre de Bruxelles, SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile de France).
- 39) Silvera Araúz, D. (2001). Sistemas de Carbón Asistidos Biológicamente para la eliminación del agua: Estado del Arte. Tesis en Ingeniería Química, UNAM.
- 40) Suzuki, M. (1997). Role of adsorption in water environment processes. *Wat. Sci. Tech.* 35(7): 1-11.

- 41) Tien C. (1994). Adsorption calculations and modelling. Ed. Butterworth - Heinemann, EEUUA.
- 42) The Merck Index. Sixth Edition of Chemical and Drugs. An Encyclopedia for the Chemist, Pharmacist, Physician and Allied Professions.
- 43) Voice, T.; Pak, D. Zhao, .; Shi, J. y Hickey, R. (1992). Biological activated carbon in fluidized bed reactors for the treatment of groundwater contaminated with volatile aromatic hydrocarbons. 26:10(1389-1401)
- 44) Walker G M y Weatherley L R., (1997). A simplified predictive model for biologically activated carbon fixed beds. Process Biochemistry, Vol 32, No. 4 327-335
- 45) Weber W. (1979). Control de la calidad del agua de procesos fisicoquímicos. Ed. Reverté. Barcelona, España.
- 46) Weber W. J. Jr. (1984). Environmental engineering proceedings of the 1984 speciality conference. Pirbazari M. and Devinnu J.S. Eds., American Society of Civil Engineers, N. Y.
- 47) Weber W. y Smith E. (1987). Simulation and design models for adsorption process. Environ. Sci. Technol. 21:11:1040-1050.
- 48) Weber W. (1988). Physicochemical processes for water quality control. Wiley-Intescience, Nueva York, EEUUA.
- 49) Xiaojian Z., Zhansheng W., Xiasheng, G., (1991). Simple combination of biodegradation and carbon adsorption- The mechanism of the biological activated carbon process. Wat. Res., 25:2: 165-172.

- 50) Zhao, X., Hickey, R., Voice, T. (1999). Long-Term evaluation of adsorption capacity in a biological activated carbon fluidized bed reactor system. *Wat. Res.* 33:13 2983-2991.

Anexo 1. Tablas de Resultados

Resultados de los parámetros de operación de la columna estéril empacada con CA
BENCENO

DÍA	CONC. INFLUENTE BENCENO (ppm)	CONC. EFLUENTE BENCENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)	DÍA	CONC. INFLUENTE BENCENO (ppm)	CONC. EFLUENTE BENCENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)
1	99.5257038	0	0	26	88.4428767	0	13722.5
2	94.3358809	0	365	27	83.5093083	0	14322.5
3	101.226795	0	900	29	92.9455876	0	16097.5
4	93.5842968	0	1535	32	82.0874649	0	17857.5
5	92.8454504	0	1775	35	82.9755046	0	19717.5
7	92.928996	0	2985	36	94.6740479	0	20342.5
8	100.411	0	3505	39	100.865047	0	22102.5
9	100.916781	0	4160	41	103.718336	14.8425436	22847.5
10	100.698478	0	4760	42	98.4943497	17.9971912	23072.5
11	100.126396	0	5347.5	43	104.811418	16.6107518	23522.5
13	95.0930825	0	6477.5	46	99.1071265	23.615259	25172.5
14	92.2152982	0	7017.5	47	99.8733425	29.8270625	25472.5
15	98.7234307	0	7572.5	48	95.4317068	32.6318505	25847.5
16	101.927951	0	8062.5	49	94.06003	36.7858776	26322.5
17	94.6840421	0	8627.5	50	99.4305311	41.6583382	26757.5
18	100.126396	0	8867.5	51	103.718336	40.7577895	27222.5
19	100.701613	0	9467.5	52	94.06003	40.1119603	27797.5
20	103.465478	0	10142.5	53	101.851656	40.7549154	28452.5
22	101.851656	0	11337.5	54	95.8568163	40.7580508	28922.5
25	97.6407995	0	13112.5	55	98.4943497	41.7110197	29597.5

**Resultados de los parámetros de operación de la columna estéril empacada con CA
NAFTALENO**

DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE NAFTALENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE NAFTALENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)	DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE NAFTALENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE NAFTALENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)
1	17.7158288	0	0	27	13.4746244	0	13722.5
2	12.5223202	0	365	29	13.7959851	0	14322.5
3	12.658266	0	900	32	14.1681038	0	16097.5
4	14.9523695	0	1535	35	13.2579175	0	17857.5
5	12.5068272	0	1775	36	12.9699762	0	19717.5
7	12.8098217	0	2985	39	12.9504999	0	20342.5
8	15.1817341	0	3505	40	12.9699762	0	22102.5
9	13.8863865	0	4160	41	16.4424148	0	22407.5
10	14.9541463	0	4760	42	16.1470775	0	22847.5
11	13.4889971	0	5347.5	43	16.6547845	0	23072.5
13	15.7828428	0	6477.5	46	15.8482862	0	23522.5
14	12.9440628	0	7017.5	47	16.2669906	0	25172.5
15	14.241988	0	7572.5	48	16.433462	0	25472.5
16	13.5990638	0	8062.5	49	15.4733391	0	25847.5
17	14.650901	0	8627.5	50	15.2358911	0	26322.5
18	12.770027	0	8867.5	51	14.8886995	0	27222.5
19	14.1097986	0	9467.5	52	13.6871076	0	27797.5
20	16.7539532	0	10142.5	53	14.5273345	0	28452.5
22	12.1800192	0	10707.5	54	14.878152	0.12775244	28922.5
25	12.1236798	0	11337.5	55	15.8370892	0.13548866	29597.5
26	12.741512	0	13112.5				

Resultados de los parámetros de operación de la columna abiótica empacada con CA
BENCENO

DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE BENCENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE BENCENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)	DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE BENCENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE BENCENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)
1	94.5321053	0	0	43	85.9581945	0	48045
2	92.9140375	0	1250	44	96.1382847	0	49070
3	93.0642106	0	2580	45	88.4211901	0	50270
4	90.7369521	0	3900	46	100.619505	0	51520
5	92.5048664	0	5252.5	47	84.4288327	0	52785
6	89.8555098	0	6412.5	48	95.1292704	0	54160
7	91.9260566	0	7777.5	49	93.4492129	0	55635
8	98.0000653	0	9177.5	50	100.74773	0	56815
9	94.1794369	0	10262.5	52	100.185904	2.35044745	59380
10	100.340127	0	11272.5	54	100.121628	4.8141616	61860
11	92.0243648	0	12542.5	59	100.97753	7.28104383	68405
12	94.1871448	0	13602.5	61	86.3522111	8.44904958	69725
13	80.7734013	0	14902.5	62	95.5189104	10.6185251	70945
14	92.7185969	0	16112.5	63	89.2641583	13.9997061	72285
15	100.294859	0	17382.5	64	104.883337	19.2249004	73577.5
16	83.3609641	0	18332.5	65	100.701613	20.395225	74972.5
17	81.2883271	0	19692.5	67	101.062578	21.3921223	77372.5
18	85.7480567	0	20717.5	71	98.2883924	31.4285388	81807.5
19	91.7856163	0	22047.5	72	97.5731269	34.1179045	83042.5
20	89.8555098	0	23272.5	77	106.508263	38.9432687	89662.5
21	100.294859	0	24577.5	84	93.5178653	33.3031877	98537.5
22	98.8574041	0	25842.5	85	82.5639167	27.4379123	99672.5
23	86.6688876	0	26992.5	86	99.3262787	23.2134365	100622.5
25	90.4014632	0	29307.5	87	97.7877066	25.2028872	101632.5
26	100.962048	0	30557.5	88	99.1992292	24.5331504	102902.5
29	77.0025475	0	32707.5	91	98.6015416	25.5192044	102987.5
30	83.6417793	0	34012.5	92	92.0522568	25.3094585	104212.5
31	93.0853746	0	34850	93	99.7686328	26.753511	105482.5
32	89.1066693	0	35442.5	94	99.1150304	27.2546215	106857.5
34	98.5669867	0	38017.5	95	99.4947417	27.4534587	108187.5
35	83.352995	0	39605	96	100.701613	26.2100725	109617.5
36	100.074139	0	40792.5	97	97.7877066	26.2782677	111102.5
39	79.6649683	0	43780	98	99.7686328	27.0305049	112517.5
40	87.4115226	0	44642.5	99	99.4947417	27.50356	113922.5
41	82.3770984	0	45720	100	99.4947417	28.8882357	115290
42	92.7139591	0	46545				

Resultados de los parámetros de operación de la columna abiótica empacada con CA
NAFTALENO

DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE NAFTALENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE NAFTALENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)	DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE NAFTALENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE NAFTALENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)
1	16.1587832	0	0	47	14.8304837	0	52785
2	14.7304043	0	1250	48	12.2919108	0	54160
3	13.5629088	0	2580	49	14.060979	0	55635
4	15.6918263	0	3900	50	12.4447415	0	56815
5	16.6597026	0	5252.5	52	14.7773199	0	59380
6	14.8107427	0	6412.5	53	15.5994831	0	60540
7	14.277545	0	7777.5	54	15.5044764	0	61860
8	15.5633246	0	9177.5	55	14.082837	0	63160
9	13.5200966	0	10262.5	56	12.2731253	0	64560
10	16.4221137	0	11272.5	58	12.2818307	0	67070
11	14.1607078	0	12542.5	59	12.2968048	0	68405
12	14.2264434	0	13602.5	61	13.8654049	0	69725
13	13.5038956	0	14902.5	62	12.0626252	0	70945
14	13.312968	0	16112.5	63	15.3614303	0	72785
15	13.3790163	0	17382.5	64	14.6923968	0	73577.5
16	15.5494743	0	18332.5	65	13.9578134	0	74972.5
17	13.2293715	0	19692.5	67	14.3527403	0	77372.5
18	14.0837478	0	20717.5	70	16.5281697	0	80312.5
19	16.0460118	0	22047.5	71	13.5621699	0	81807.5
20	14.0003265	0	23272.5	72	14.4548663	0	83042.5
21	15.6918263	0	24577.5	74	13.3567012	0	85982.5
22	14.0574769	0	25842.5	77	16.7726888	0	89662.5
23	15.6008475	0	26992.5	80	17.751678	0	93477.5
25	15.5860899	0	29307.5	81	13.5382704	0	94832.5
26	15.873282	0	30557.5	84	14.4993831	0	98537.5
29	15.3137791	0	32707.5	85	12.1635535	0	99672.5
30	13.9341614	0	34012.5	86	14.5273345	0	100622.5
31	14.9756881	0	34850	87	16.4767278	0	101632.5
32	15.3503191	0	35442.5	88	16.183645	0	102902.5
34	12.0293193	0	38017.5	91	16.0790222	0	102987.5
35	12.0858236	0	39605	92	14.9910094	0	104212.5
36	12.2275569	0	40792.5	93	14.8098114	0	105482.5
39	12.6440755	0	43780	94	14.9241328	0	106857.5
40	16.2661796	0	44642.5	95	15.0170568	0.24822576	108187.5
41	16.2297049	0	45720	96	14.8780798	0.35518904	109617.5
42	14.4879523	0	46545	97	14.9129942	0.47943595	111102.5
43	12.7928577	0	48045	98	15.1604501	0.53508449	112517.5
44	15.2605157	0	49070	99	14.6828734	0.52397334	113922.5
45	15.3346336	0	50270	100	14.9965632	0.6306445	115290
46	15.7034495	0	51520				

Resultados de los parámetros de operación de la columna biótica empacada con CA
BENCENO

DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE BENCENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE BENCENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)	DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE BENCENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE BENCENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)
1	94.5321053	0	0	46	100.6195049	0	51520
2	92.91403749	0	1250	47	84.42883271	0	52785
3	93.0642106	0	2580	48	95.12927036	0	54160
4	90.73695212	0	3900	49	93.44921288	0	55635
5	92.50486642	0	5252.5	50	100.7477301	0	56815
6	89.85550983	0	6412.5	52	100.1859037	0	59380
7	91.92605657	0	7777.5	53	100.4862499	0	60540
8	98.00006532	0	9177.5	54	100.1216278	0	61860
9	94.17943693	0	10262.5	55	79.38892155	0	63160
10	100.3401267	0	11272.5	56	100.1172513	0	64560
11	92.02436475	0	12542.5	58	93.50924293	0	67070
12	94.18714482	0	13602.5	59	100.9775296	0	68405
13	80.77340127	0	14902.5	61	86.35221112	0	69725
14	92.7185969	0	16112.5	62	95.51891044	0	70945
15	100.2948592	0	17382.5	63	89.26415834	0	72285
16	83.36096414	0	18332.5	64	104.8833366	0	73577.5
17	81.28832713	0	19692.5	65	100.7016134	0	74972.5
18	85.7480567	0	20717.5	67	101.0625776	1.800803449	77372.5
19	91.7856163	0	22047.5	70	91.06133647	3.114246522	80312.5
20	89.85550983	0	23272.5	71	98.28839245	2.715200209	81807.5
21	100.2948592	0	24577.5	74	93.72176497	3.777091907	85982.5
22	98.85740414	0	25842.5	77	106.5082631	7.174211248	89662.5
23	86.66888758	0	26992.5	80	96.54432033	10.29887648	93477.5
25	90.40146319	0	29307.5	84	93.51786531	12.85926579	98537.5
26	100.9620485	0	30557.5	85	82.56391665	10.44702463	99672.5
29	77.00254752	0	32707.5	86	99.32627866	15.36890065	100622.5
30	83.64177935	0	34012.5	87	97.78770658	13.99621138	101632.5
31	93.08537462	0	34850	88	99.19922921	15.28996015	102902.5
32	89.10666928	0	35442.5	91	98.60154158	13.59742635	102987.5
34	98.56698674	0	38017.5	92	92.05225684	13.24675028	104212.5
35	83.35299497	0	39605	93	99.76863283	12.89414723	105482.5
36	100.0741394	0	40792.5	94	99.11503037	12.50989614	106857.5
39	79.66496832	0	43780	95	99.49474166	11.20305049	108187.5
40	87.41152263	0	44642.5	96	100.7016134	12.73244497	109617.5
41	82.37709844	0	45720	97	97.78770658	11.83323535	111102.5
42	92.71395911	0	46545	98	99.76863283	12.81840747	112517.5
43	85.95819453	0	48045	99	99.49474166	15.80384088	113922.5
44	96.13828467	0	49070	100	99.49474166	16.46443269	115290
45	88.42119015	0	50270				

Resultados de los parámetros de operación de la columna biótica empacada con CA
NAFTALENO

DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE NAFTALENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE NAFTALENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)	DÍA	CONCENTRACIÓN INFLUENTE NAFTALENO (ppm)	CONCENTRACIÓN EFLUENTE NAFTALENO (ppm)	VOLUMEN PERCOLADO (mL)
1	16.1587832	0	0	47	14.8304837	0	52785
2	14.7304043	0	1250	48	12.2919108	0	54160
3	13.5629088	0	2580	49	14.060979	0	55635
4	15.6918263	0	3900	50	12.4447415	0	56815
5	16.6597026	0	5252.5	52	14.7773199	0	59380
6	14.8107427	0	6412.5	53	15.5994831	0	60540
7	14.277545	0	7777.5	54	15.5044764	0	61860
8	15.5633246	0	9177.5	55	14.082837	0	63160
9	13.5200966	0	10262.5	56	12.2731253	0	64560
10	16.4221137	0	11272.5	58	12.2818307	0	67070
11	14.1607078	0	12542.5	59	12.2968048	0	68405
12	14.2264434	0	13602.5	61	13.8654049	0	69725
13	13.5038956	0	14902.5	62	12.0626252	0	70945
14	13.312968	0	16112.5	63	15.3614303	0	72285
15	13.3790163	0	17382.5	64	14.6923968	0	73577.5
16	15.5494743	0	18332.5	65	13.9578134	0	74972.5
17	13.2293715	0	19692.5	67	14.3527403	0	77372.5
18	14.0837478	0	20717.5	70	16.5281697	0	80312.5
19	16.0460118	0	22047.5	71	13.5621699	0	81807.5
20	14.0003265	0	23272.5	72	14.4548663	0	83042.5
21	15.6918263	0	24577.5	74	13.3567012	0	85982.5
22	14.0574769	0	25842.5	77	16.7726888	0	89662.5
23	15.6008475	0	26992.5	80	17.751678	0	93477.5
25	15.5860899	0	29307.5	81	13.5382704	0	94832.5
26	15.873282	0	30557.5	84	14.4993831	0	98537.5
29	15.3137791	0	32707.5	85	12.1635535	0	99672.5
30	13.9341614	0	34012.5	86	14.5273345	0	100622.5
31	14.9756881	0	34850	87	16.4767278	0	101632.5
32	15.3503191	0	35442.5	88	16.183645	0	102902.5
34	12.0293193	0	38017.5	91	16.0790222	0	102987.5
35	12.0858236	0	39605	92	14.9910094	0	104212.5
36	12.2275569	0	40792.5	93	14.8098114	0	105482.5
39	12.6440755	0	43780	94	14.9241328	0	106857.5
40	16.2661796	0	44642.5	95	15.0170568	0	108187.5
41	16.2297049	0	45720	96	14.8780798	0	109617.5
42	14.4879523	0	46545	97	14.9129942	0	111102.5
43	12.7928577	0	48045	98	15.1604501	0.01608419	112517.5
44	15.2605157	0	49070	99	14.6828734	0.01529029	113922.5
45	15.3346336	0	50270	100	14.9965632	0.00183525	115290
46	15.7034495	0	51520				

Resultados de cuantificación de coliformes totales de la columna abiótica empacada con CA

DA	concentración	UFC con membrana	UFC con asa	UFC CVP (24 hrs)	UFC CVP (48 hrs)	UFC con membrana	UFC con asa	UFC CVP (24 hrs)	UFC CVP (48 hrs)
8	1.00E-01	incontable				71	1.00E+00	incontable	incontable
	1.00E-02	incontable					1.00E 01	23 (1 mL)	incontable
	1.00E-03	incontable					1.00E 02	no hay crecimiento	incontable
10	1.00E-01	incontable					1.00E 03	no hay crecimiento	56 (1 mL)
	1.00E-02	incontable					1.00E 04	no hay crecimiento	17 (1 mL)
	1.00E-03	incontable					1.00E 05	no hay crecimiento	5 (1 mL)
13	1.00E-01	incontable					1.00E 06	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-02	incontable				77	1.00E+00	incontable	incontable
	1.00E-03	incontable					1.00E 01	incontable	incontable
15	1.00E-01	incontable					1.00E 02	32 (1 mL)	184 (1 mL)
	1.00E-02	incontable					1.00E 03	12 (1 mL)	115 (1 mL)
	1.00E-03	239 (10 mL)					1.00E 04	no hay crecimiento	83 (1 mL)
21	1.00E-03	incontable					1.00E 05	no hay crecimiento	41 (1 mL)
	1.00E-04	incontable					1.00E 06	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-05	incontable				84	1.00E+00	incontable	incontable
37	1.00E-02	incontable					1.00E 01	incontable	incontable
	1.00E-04	incontable					1.00E 02	86 (1 mL)	incontable
	1.00E-06	10 (1 mL)					1.00E 03	35 (1 mL)	173 (1 mL)
	1.00E-08	no hay crecimiento					1.00E 04	11 (1 mL)	176 (1 mL)
	1.00E-10	no hay crecimiento					1.00E 05	no hay crecimiento	80 (1 mL)
43	1.00E-01		no hay crecimiento				1.00E 06	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-02		no hay crecimiento						
	1.00E-03	incontable		no hay crecimiento					
	1.00E-04	incontable		no hay crecimiento					
	1.00E-05	incontable		no hay crecimiento					
45	1.00E-05	incontable	no hay crecimiento	no hay crecimiento	no hay crecimiento				
	1.00E-06	incontable	no hay crecimiento	no hay crecimiento	no hay crecimiento				
	1.00E-07	incontable	no hay crecimiento	no hay crecimiento	no hay crecimiento				
	1.00E-08	incontable	no hay crecimiento	no hay crecimiento	no hay crecimiento				
50	1.00E+00			no hay crecimiento	104 (1 mL)				
	1.00E-01			no hay crecimiento	56 (1 mL)				
	1.00E-02			no hay crecimiento	12 (1 mL)				
	1.00E-03			no hay crecimiento	no hay crecimiento				
	1.00E-04			no hay crecimiento	no hay crecimiento				
	1.00E-05			no hay crecimiento	no hay crecimiento				
	1.00E-06			no hay crecimiento	no hay crecimiento				
	1.00E-07			no hay crecimiento	no hay crecimiento				
53	1.00E+00			no hay crecimiento	220 (1 mL)				
	1.00E-01			no hay crecimiento	100 (1 mL)				
	1.00E-02			no hay crecimiento	23 (1 mL)				
	1.00E-03			no hay crecimiento	14 (1 mL)				
	1.00E-04			no hay crecimiento	no hay crecimiento				
	1.00E-05			no hay crecimiento	no hay crecimiento				
	1.00E-06			no hay crecimiento	no hay crecimiento				
63	1.00E+00			incontable	incontable				
	1.00E-01			incontable	2 (1 mL)				
	1.00E-02			no hay crecimiento	90 (1 mL)				
	1.00E-03			no hay crecimiento	25 (1 mL)				
	1.00E-04			no hay crecimiento	2 (1 mL)				
	1.00E-05			no hay crecimiento	1 (1 mL)				
	1.00E-06			no hay crecimiento	no hay crecimiento				

Resultados de cuantificación de coliformes totales de la columna biótica empacada con CA

Día	Concentración	UFC con membrana	UFC con asa	UFC CVP (24 hrs)	UFC CVP (48 hrs)	Día	Concentración	UFC con membrana	UFC con asa	UFC CVP (24 hrs)	UFC CVP (48 hrs)
8	1.00E-01	incantable				71	1.00E-01			incantable	incantable
	1.00E-02	incantable					1.00E-02			incantable	incantable
	1.00E-03	incantable					1.00E-03			53 (1 mL)	incantable
10	1.00E-01	incantable				72	1.00E-04			85 (1 mL)	183 (1 mL)
	1.00E-02	incantable					1.00E-05			no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-03	incantable					1.00E-06			no hay crecimiento	no hay crecimiento
13	1.00E-01	incantable				77	1.00E-07			no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-02	incantable					1.00E-01			incantable	incantable
	1.00E-03	incantable					1.00E-02			incantable	incantable
15	1.00E-01	incantable				78	1.00E-03			incantable	incantable
	1.00E-02	incantable					1.00E-04			incantable	incantable
	1.00E-03	incantable					1.00E-05			156 (1 mL)	incantable
21	1.00E-04	incantable				84	1.00E-06			115 (1 mL)	incantable
	1.00E-05	incantable					1.00E-07			no hay crecimiento	89 (1 mL)
	1.00E-06	incantable					1.00E-01			incantable	incantable
37	1.00E-02	incantable				85	1.00E-02			incantable	incantable
	1.00E-04	incantable					1.00E-03			incantable	incantable
	1.00E-06	incantable					1.00E-04			incantable	incantable
	1.00E-08	15 (1mL)					1.00E-05			incantable	incantable
	1.00E-10	117 (10mL)					1.00E-06			205 (1 mL)	incantable
43	1.00E-01		no hay crecimiento			86	1.00E-07			145 (1 mL)	incantable
	1.00E-02		no hay crecimiento								
	1.00E-03	incantable	no hay crecimiento								
	1.00E-04	incantable	no hay crecimiento								
	1.00E-05	incantable	no hay crecimiento								
45	1.00E-06	incantable	no hay crecimiento	1 (1 mL)	no crecimiento	hay					
	1.00E-07	incantable	no hay crecimiento	no crecimiento	no crecimiento	hay					
	1.00E-08	incantable	no hay crecimiento	no hay crecimiento	no crecimiento	hay					
	1.00E-09	incantable	no hay crecimiento	no hay crecimiento	no crecimiento	hay					
	1.00E-10	incantable	5 (1mL)	no hay crecimiento	no crecimiento	hay					
50	1.00E+00			incantable	incantable						
	1.00E-01			279 (1 mL)	incantable						
	1.00E-02			2 (1 mL)	115 (1 mL)						
	1.00E-03			1 (1 mL)	93 (1 mL)						
	1.00E-04			no hay crecimiento	54 (1 mL)						
	1.00E-05			no hay crecimiento	2 (1 mL)						
	1.00E-06			no hay crecimiento	no crecimiento	hay					
1.00E-07			no hay crecimiento	no crecimiento	hay						
53	1.00E-01			no hay crecimiento	incantable						
	1.00E-02			no hay crecimiento	incantable						
	1.00E-03			no hay crecimiento	196 (1 mL)						
	1.00E-04			no hay crecimiento	90 (1 mL)						
	1.00E-05			no hay crecimiento	8 (1 mL)						
	1.00E-06			no hay crecimiento	1 (1 mL)						
	1.00E-07			no hay crecimiento	no crecimiento	hay					
63	1.00E-01			incantable	incantable						
	1.00E-02			24 (1 mL)	164 (1 mL)						
	1.00E-03			10 (1 mL)	84 (1 mL)						
	1.00E-04			no hay crecimiento	42 (1 mL)						
	1.00E-05			no hay crecimiento	3 (1 mL)						
	1.00E-06			no hay crecimiento	no crecimiento	hay					
	1.00E-07			no hay crecimiento	no crecimiento	hay					

Resultados de cuantificación de coliformes totales de la columna estéril empacada con CA

Día	concentración	UFC CVP (24 hrs)	UFC CVP (48 hrs)
5	1.00E+00	19 (1 mL)	
	1.00E-01	10 (1 mL)	
	1.00E-02	8 (1 mL)	
8	1.00E+00	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-01	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-02	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-03	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-04	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-05	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-06	no hay crecimiento	no hay crecimiento
18	1.00E+00	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-01	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-02	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-03	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-04	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-05	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-06	no hay crecimiento	no hay crecimiento
26	1.00E+00	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-01	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-02	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-03	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-04	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-05	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-06	no hay crecimiento	no hay crecimiento
32	1.00E+00	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-01	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-02	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-03	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-04	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-05	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-06	no hay crecimiento	no hay crecimiento
39	1.00E+00	no hay crecimiento	10 (1mL)
	1.00E-01	no hay crecimiento	2 (1mL)
	1.00E-02	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-03	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-04	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-05	no hay crecimiento	no hay crecimiento
	1.00E-06	no hay crecimiento	no hay crecimiento

ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE BENCENO

VOL. 250ML

CA MG/L	CEQ MG/L	QE MGB/GCA	1/CE	1/QE	LN CE	LN QE
200	38.76	243.584	0.026	0.004	3.657	5.495
300	37.52	203.754	0.027	0.005	3.625	5.317
400	18.31	156.342	0.055	0.006	2.907	5.052
500	20.79	150.455	0.048	0.007	3.034	5.014
600	12.11	130.755	0.083	0.008	2.494	4.873
800	10.87	106.877	0.092	0.009	2.386	4.672
1000	7.78	90.563	0.129	0.011	2.052	4.506

ISOTERMA DE ADSORCIÓN NAFTALENO

VOL. 850ML

C* MG/L	CONC. EQUI.	Q (MGN/GC*)	1/CE	1/QE	LN CE	LN QE
5	8.73	960.974	0.11454	0.00104	2.167	6.868
15	6.45	478.345	0.15504	0.00209	1.864	6.170
25	2.89	418.935	0.34555	0.00239	1.063	6.038
45	1.19	259.441	0.83889	0.00385	0.176	5.559

Anexo 2. Equipo

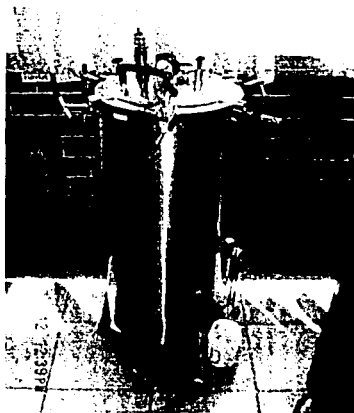


Foto a.2.1. Autoclave equipar thermolyne. Se empleó para esterilizar el material y los medios para las pruebas microbiológicas

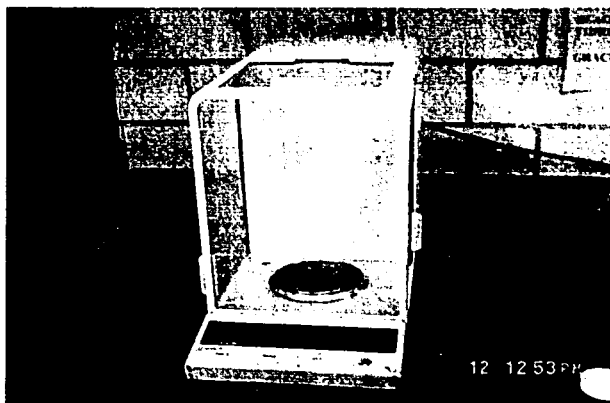


Foto A.2.2. Balanza analítica OHAUS. Se empleó para pesar los reactivos utilizados con gran precisión

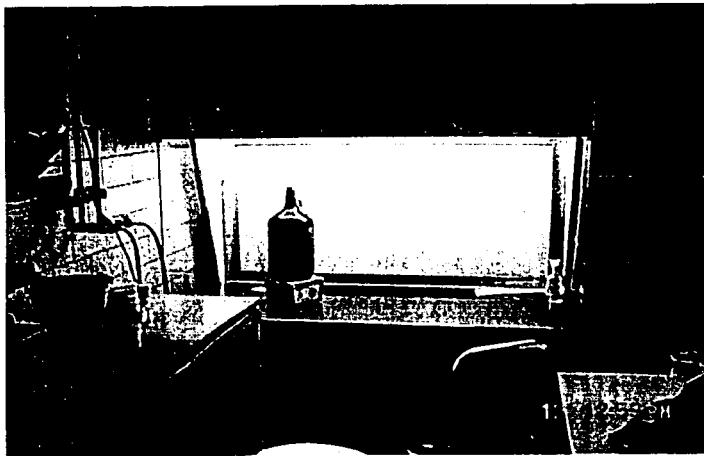


Foto A.2.3. Campana de flujo laminar SEV-CFL 102. Se empleó para realizar las pruebas microbiológicas y esterilizar el material con luz UV

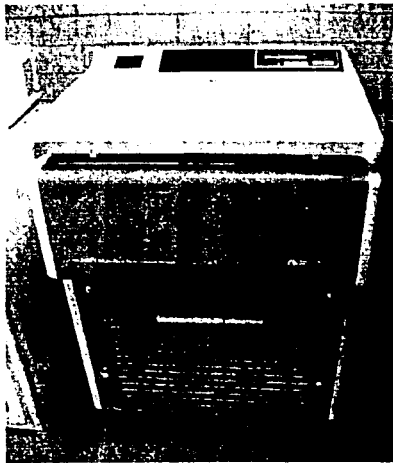


Foto A.2.4. Centrífuga Rotixa 50RS. Se empleó para centrifugar la biomasa utilizada en la experimentación

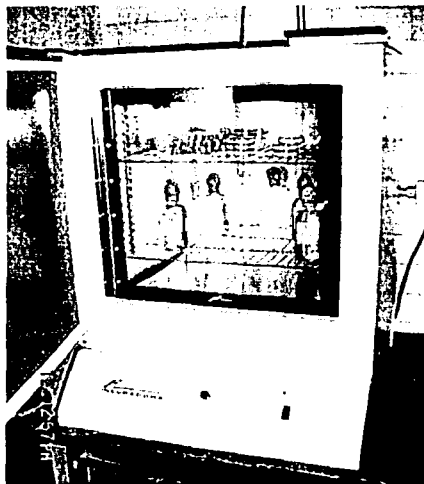


Foto A.2.3.6. Incubadora Felisa, empleada en las pruebas microbiológicas



Foto A.2.3.10. Espectrofotómetro GBC UV/Vis 911. Utilizado para conocer la concentración de biomasa usada.