

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**



**"BIOADSORCIÓN DE CADMIO POR MEDIO DE LODOS  
ACTIVADOS"**

**TESIS**  
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**  
**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:**  
**YAIR RODRÍGUEZ RAZO**

**MÉXICO D.F.**



**2002**

**EXAMENES PROFESIONALES**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

---



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.

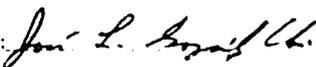
---

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Prof. José Luz González Chávez  
**Vocal:** Prof. María Isabel Gracia Mora  
**Secretario:** Prof. Rosa Elva Rivera Santillán  
**1er. Suplente:** Prof. Olivia Zamora Martínez  
**2º. Suplente:** Prof. Alfonso López Juárez

**Sitio donde se desarrolló el tema:** Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. División de Estudios de Posgrado. Departamento de Química Analítica. Laboratorio 104.

**Asesor:** Dr. José Luz González Chávez

Firma: 

**Sustentante:** Yair Rodríguez Razo

Firma: 

---

---

## *Dedicatoria:*

### *A mis padres:*

*Alma y Rubén, por haberme dado toda su confianza y cariño además de todo su apoyo moral para mi desarrollo personal y profesional, ya que sin estos, no hubiera podido llegar hasta donde he llegado.*

### *A mis Hermanos:*

*Joary, por aguantarme 21 años de tu vida, así como también por apoyarme cuando lo llegue a necesitar. Te dedico esta tesis, para que te des cuenta de que querer es poder. "Confía en ti mismo".*

*Pavel, por estar conmigo y elegirme alguna vez como modelo a seguir, "Sigue adelante hasta alcanzar todas tus metas como le gustaría a mamá (Isabel)".*

### *A mis Tíos:*

*Alberto (Beto) y Antonio (Toño), por considerarme siempre como un hijo y haber sido como unos padres, los cuales me dieron su apoyo incondicional.*

*Francisco (Paco), por ayudarme y sacarme de apuros siempre que lo necesite, además de ser una persona muy valiosa para mí, ya que contigo me di cuenta, que no hay imposibles, pues tu nunca te haz dado por vencido. "Sigue adelante".*

### *A mi Familia:*

*Abuelos, tíos, primos, por el apoyo moral y por preocuparse siempre por mí. A todos ustedes que han sido parte de mi vida...  
Gracias.*

---

---

### *A mi Novia:*

*Jessy, por haberme apoyado siempre en todo, por que gracias a ti me levante muchas veces durante mi carrera, por ser mi mejor amiga y compañera de la carrera, por brindarme tu confianza, cariño y amor durante cuatro fabulosos años.*

### *A Todos mis Viejos y Nuevos Amigos y en Especial a:*

*Dr. Ezequiel A. Benítez Flores y fam., Roberto Vazquez y fam., Jessica González Mejía y fam., Hugo Díaz Montes de Oca y fam., José Luis Bautista Espinosa y fam., Olivia, Francia, Sergio, Erwin, Fabián, Jonathan, Erick, Mauricio, Alejandra, América, Susana, Margot, Adriana, Elisa, Andrés, Janet, Miguel, Brenda, Yozune, Lorena, Victor, Javier, Israel, Edgar, Cinthya, Benjamin, Liliana, Chava, Yenni, Graciela, Arturo, etc...*

### *Así Mismo Agradezco a Todos los que Tuvieron que ver con el Desarrollo de Esta Tesis Pero Sobre Todo a:*

*A mi Asesor: Dr. José Luz González Chávez, por haberme dado la oportunidad de trabajar junto con él en su grupo de trabajo ya que aprendí muchas cosas nuevas e interesantes. Además de que considero que es un gran Dr. dentro del laboratorio, y una gran persona fuera de él.*

*Dra. Rosa Elva Rivera Santillán por aceptarme en su grupo de trabajo y guiarme antes de entrar a la carrera, ya que con usted aprendí muchas cosas que me sirvieron para mi buen desempeño durante la carrera e incluso para la elaboración de esta tesis.*

---

---

**Índice**

Resumen.....	1
I. Introducción.....	2
II. Generalidades.....	4
2.1. El Medio Ambiente y Contaminación.....	4
2.2. La Hidrosfera.....	5
2.3. La Necesidad del Tratamiento del Agua.....	7
2.4. Contaminación del Agua por Metales Pesados.....	8
2.5. El Cadmio un Metal Pesado.....	11
2.5.1. Origen Natural.....	11
2.5.2. Fuentes Industriales.....	12
2.5.3. Fuentes Ambientales de Cadmio.....	12
a) Fuentes Atmosféricas de Cadmio.....	12
b) Fuentes Acuáticas de Cadmio. ....	13
c) Fuentes Terrestres de Cadmio. ....	14
2.5.4. Distribución y Transporte Ambiental.....	15
a) Depósito Atmosférico de Cadmio.....	15
b) Transporte de Cadmio por agua o suelo.....	16
2.6. Toxicidad del Cadmio.....	16
2.6.1. Factores que Influyen.....	16
2.6.2. Toxicidad en Organismos Terrestres.....	18
2.6.3. Toxicidad en Seres Humanos.....	18
2.6.4. Toxicidad en Microorganismos.....	19
2.6.5. Toxicidad en Organismos Acuáticos. ....	20

---

---

2.7. Remediación de Aguas Residuales.....	21
2.7.1. Adsorción.....	21
2.7.2. Biosorción.....	22
2.7.3. Bioacumulación.....	26
2.7.4. Elución.....	27
2.7.5. Factores que Influyen en la Biosorción.....	27
a) Efecto del pH.....	27
b) Efecto de la Concentración de la Biomasa.....	28
c) Efecto de la Temperatura.....	28
d) Efecto del Pretratamiento Químico y Físico.....	28
e) Efecto de la Concentración de Cationes.....	29
f) Efecto de la Fuerza Iónica.....	29
 III. Parte Experimental.....	 30
3.1. Reactivos y Equipo.....	30
3.1.1. Reactivos.....	30
3.1.2. Equipo.....	31
3.2. Procedimiento Experimental.....	32
3.2.1. Caracterización de la Biomasa.....	32
3.2.1.1. Titulación con Hidróxido de Sodio y Ácido Clorhídrico.....	32
3.2.1.2. Consumo de Protones en Función del pH.....	32
3.2.1.3. Determinación del Potencial Electrocinético de la Biomasa.....	33
3.2.1.4. Espectros de I.R. de la Biomasa.....	33
3.2.2. Experimentos de Fijación de Cadmio.....	33
3.2.2.1. Determinación de Cadmio con Electrodo de Ion Selectivo.....	33

---

---

3.2.2.2. Fijación de Cadmio por la Biomasa en Función del pH.....	34
3.2.2.3. Optimización del pH para la Fijación del Cadmio.....	34
3.2.2.4. Determinación del Potencial Electrocinético de la Biomasa en Presencia de Cadmio.....	35
3.2.2.5. Espectros de I.R. de la Biomasa con Cadmio.....	35
IV. Resultados y Discusión.....	36
4.1. Caracterización de la Biomasa.....	36
4.1.1. Titulación con Hidróxido de Sodio y Ácido Clorhídrico.....	36
4.1.2. Consumo de Protones en Función del pH.....	38
4.1.3. Determinación del Potencial Electrocinético de la Biomasa.....	39
4.1.4. Espectros de I.R. de la Biomasa.....	40
4.2. Experimentos de Fijación de Cadmio.....	41
4.2.1. Curva de Calibración y Consumo de Cadmio.....	41
4.2.2. Fijación de Cadmio por la Biomasa en Función del pH.....	43
4.2.3. Optimización del pH para la Fijación del Cadmio.....	45
4.2.4. Determinación del Potencial Electrocinético de la Biomasa en Presencia de Cadmio.....	45
4.2.5. Espectros de I.R. de la Biomasa con Cadmio.....	47
4.2.6. Capacidad de Adsorción y Rendimientos de la Biomasa en Función del pH.....	48
4.2.7. Consumo de Protones por la Biomasa en Presencia y en Ausencia de Cadmio.....	49
V. Conclusiones.....	51
VI. Bibliografía.....	52

---

---

## Resumen

El uso de cadmio y sustancias químicas en los procesos industriales ha dado como resultado grandes cantidades de aguas residuales, las cuales contienen niveles muy altos de este metal. La presencia de cadmio en este tipo de aguas provoca contaminación. La biosorción puede utilizarse para resolver este tipo de problemas, ya que puede reducir el cadmio a un límite ambiental aceptable de manera eficiente. La biosorción es la eliminación de las especies metálicas y/o de sus componentes que se hallan en una disolución, por medio de biomasa fresca o seca.

En el presente trabajo se estudiaron lodos activados como biosorbentes de cadmio, para lo cual se llevaron a cabo experimentos para la caracterización de la biomasa, así como para determinar la capacidad de adsorción de ésta por medio de técnicas analíticas:

En las titulaciones ácido-base se estudió el comportamiento de la biomasa encontrándose que ésta consume protones.

Por medio de medidas de potencial electrocinético de la biomasa en un amplio rango de valores de pH (2-10) con y sin cadmio, se determinó que la biomasa tiene puntos de carga cero, además de que el mecanismo por el cual biosorbe no es, o al menos no predomina, el de intercambio iónico.

En las pruebas de la influencia del pH en la biosorción de cadmio por la biomasa se encontró que el mejor valor de pH para la fijación de cadmio es el de 3 teniendo una adsorción de casi el 95% del metal.

## I. Introducción

El tratamiento del agua contaminada con metales pesados se ha convertido en un problema prioritario para las industrias que desechan estos contaminantes, ya que los reglamentos gubernamentales exigen un manejo de estas sustancias que minimice el riesgo a la salud de quienes entran en contacto con ellos.

El simple confinamiento es una opción no viable, pues la amenaza que representa la alta concentración de metales pesados no disminuye concentrándola en un solo sitio y, además el costo que esto implica es muy alto.

Por lo tanto se han estudiado nuevos métodos económicos y eficaces para procesar adecuadamente los residuos con altas concentraciones de metales pesados.

El cadmio es un metal pesado presente en todos los alimentos a concentraciones bajas; la dosis más elevada se encuentra en los alimentos de origen vegetal, en los pescados y en carnes. Algunos alimentos pueden contener concentraciones más elevadas de cadmio, entre los que se encuentran los órganos internos de los animales.

Aunque en la naturaleza la presencia del cadmio es relativamente baja, éste tiene una vida media prolongada y un poder de acumulación que conducen a considerarlo como un agente grave para la contaminación ambiental. El uso del cadmio se ha extendido rápidamente y su eliminación se ha convertido en un problema ambiental. Para las personas no expuestas a éste ocupacionalmente, la alimentación y el tabaco constituyen la principal fuente de exposición, por ejemplo se consume hasta 1 mg de cadmio por cada cigarrillo; por otro lado, los granos y

verduras pueden presentar concentraciones del metal considerables si se cultivan en lugares contaminados con cadmio ya que el metal puede acumularse en los tejidos vegetales; así mismo la ingesta de animales acuáticos, produce la acumulación del metal en el humano, principalmente en tejidos blandos como hígado y riñón.

### Justificación y Objetivos

El incremento en el uso de metales y sustancias químicas (en especial del cadmio) en los procesos industriales, ha resultado en la generación de grandes cantidades de efluentes acuosos que tienen altos niveles de este metal. Su presencia, ocasiona problemas ambientales y de disposición. Aunado a esto, la minería, el procesamiento de minerales y las operaciones extractivas metalúrgicas, generan grandes volúmenes de desechos líquidos tóxicos.

El reducir el contenido de cadmio a un límite ambientalmente aceptable, a un costo relativamente bajo y de una manera ambientalmente amigable, es de gran interés. Considerando esto, la biosorción puede ser una alternativa a los tratamientos convencionales para el tratamiento de desechos, pudiendo así llegar hasta los límites permitidos mediante un proceso económicamente viable.

El objetivo del presente trabajo es contribuir al estudio de las posibilidades que ofrece el campo de la biosorción en la eliminación del cadmio en los vertidos industriales y minerometalúrgicos.

## II. Generalidades.

### 2.1. El Medio Ambiente y Contaminación.

El medio ambiente está conformado por 5 elementos muy importantes: el agua, el aire, la tierra, los seres vivos y la tecnología <sup>(1)</sup>. Estos tienen una relación muy estrecha entre sí, ya que cumplen todos ellos con un ciclo muy importante que es el de la vida. Por ejemplo, muchos de los gases que las industrias emiten a la atmósfera pueden ser convertidos en ácidos fuertes mediante procesos atmosféricos, caer a la tierra en forma de lluvias ácidas; contaminar las tierras por lixiviación y los mantos acuíferos, dañando o contaminando a los seres vivos que se encuentran en ellas y a los subsecuentes en la cadena alimenticia, ya que las plantas que estén sembradas en estas tierras o que sean regadas con el agua contaminada absorberán como consecuencia los contaminantes.

Las demandas cada vez mayores debido al crecimiento de la población mundial junto al deseo de una buena parte de la población de ofrecerse condiciones estándares de vida de buena calidad, han sido las causas de la contaminación masiva en todo el mundo.

Una definición operable de contaminación puede ser una condición en la que un medio o el ambiente se vuelve inadecuado para el fin que se le destinó. Un contaminante es una sustancia presente en concentración más alta de lo natural como resultado de las actividades humanas, cuya presencia tiene efectos perjudiciales sobre el medio ambiente. Algunos contaminantes pueden modificar drásticamente la composición del medio ambiente y ser altamente dañinos, todo contaminante tiene como origen un determinado recurso, una vez liberado, el contaminante puede actuar sobre un receptor. Un ejemplo muy simple sería el

escozor en los ojos de las personas debido a la presencia de sustancias oxidantes en la atmósfera. Eventualmente, cuando un contaminante tiene un periodo de vida muy largo, éste puede permanecer en un depósito durante mucho tiempo, es por eso que tiene gran importancia el estudio de las posibles soluciones para remediarlo <sup>(2)</sup>.

## 2.2. La Hidrosfera.

Toda el agua contenida en la tierra es a lo que se le llama hidrosfera, y ésta es muy importante, no sólo por que cubre más de dos terceras partes de la tierra sino porque forma parte del medio ambiente de este planeta. Más del noventa y siete por ciento del agua del planeta se encuentra en los océanos, otro dos por ciento está encerrado en las capas de hielo y los glaciares. En tierra, la fuente principal de agua dulce se localiza en el subsuelo. El agua subterránea totaliza un 0.6 por ciento del agua del planeta, mientras que sólo 0.02 por ciento está en los ríos y lagos. El vapor de agua de la atmósfera representa un 0.001 por ciento, aunque ésta es la fuente principal por la que nos llega la lluvia. Como consecuencia, prácticamente la totalidad del agua terrestre está involucrada en procesos geológicos, atmosféricos y biológicos que son muy importantes para la vida.

El agua es un medio eficaz de transporte de materia y energía en los diferentes ciclos de la vida. El agua lixivia los constituyentes solubles de los minerales y los lleva hacia los océanos o los deja a pocos kilómetros de sus fuentes en forma de depósitos. El agua transporta los nutrientes desde el suelo hasta las plantas a través de sus raíces. La energía solar absorbida durante el proceso de la evaporación del agua de los océanos es liberada en el interior de la tierra y transportada como calor latente desde las regiones tropicales hacia los polos generando tormentas masivas.

Todos los años caen más de 113 billones de metros cúbicos de agua en forma de agua de lluvia o de nieve. Esto sería más que suficiente para satisfacer las necesidades mundiales si cayeran de manera proporcionada. Sin embargo, extensas partes del mundo son áridas o semiáridas, con sequías largas regulares <sup>(10)</sup>.

La disponibilidad del agua también es de importancia decisiva para el hombre (se sabe que el cuerpo humano se compone en un gran porcentaje de este líquido), ya que es un compuesto esencial para la vida, hasta tal punto que fue en un medio acuoso donde ésta se originó. La molécula del agua, debido a su polaridad, resulta ser un poderoso disolvente, lo que facilita el transporte de nutrientes, sales e iones en su seno y hace posible los fenómenos de difusión y ósmosis, tan importantes para la fisiología de la célula y para la vida de todo ser vivo, sin embargo, el agua no sólo sirve para la alimentación, también se consume a diario en diversos usos, tanto para vivienda como en otras actividades <sup>(11)</sup>.

También la agricultura, pero sobre todo la pequeña y la gran industria, utilizan grandes cantidades de agua para los fines más diversos: producción de energía, riego, como servicio auxiliar y como disolvente, así como materia prima. La enorme cantidad de agua que demanda la industria está demostrada por los requerimientos de agua de algunos procesos químicos clave. Por ejemplo, la producción de una tonelada de ácido sulfúrico necesita cerca de 20 toneladas de agua, y una tonelada de sosa cáustica necesita casi 80 toneladas de agua. Algunos complejos industriales ocupan hasta un millón de toneladas al día.

La calidad del agua se ve amenazada cuando entran residuos industriales, agrícolas o aguas residuales no tratadas en el ciclo del agua. En la medida que estos residuos no sean controlados, destruidos o se consiga que permanezcan

depositados en forma sólida inalterable llegarán con las aguas residuales a los drenajes y desde allí a la hidrosfera.

El garantizar la cantidad y la calidad de las reservas de agua disponibles es, por lo tanto, una tarea de gran importancia para la protección del medio ambiente, ya que ésta se ve afectada en sus propiedades físicas como el color, la temperatura y el sabor, por la presencia de contaminantes <sup>(2)</sup>.

### 2.3. La Necesidad del Tratamiento del Agua.

El aumento en el conocimiento, en años recientes, de los efectos acumulativos de la contaminación ha llevado a una mayor preocupación general y a una legislación cada vez más estricta en lo que concierne a descarga de residuos industriales, líquidos y gaseosos. Los productos residuales tienen que ser descargados, y disponer de los residuos acuosos significa por lo general descargarlos en algún tipo de corriente de agua, como un río, canal, estuario o mar. Cuando las aguas residuales no han sido tratadas, o en forma insuficiente, el resultado será la contaminación del agua. La prevención de la contaminación en las corrientes de agua tiene obviamente un valor estético, pero tiene también sólidas razones económicas como ya se mencionó anteriormente.

El funcionamiento y expansión de las operaciones industriales y por lo tanto de nuestro nivel de vida, depende en gran parte de que se mantengan los suministros existentes libres de contaminación <sup>(8,9)</sup>.

## 2.4. Contaminación del Agua por Metales Pesados.

La enfermedad y la muerte son provocadas por numerosos factores. Algunos individuos son propensos a ciertas enfermedades a causa de su composición genética. Mucho más importante que ésta, es el medio ambiente, que afecta no sólo a los individuos, sino a comunidades enteras. El medio ambiente engloba sistemas para el mantenimiento de la vida como son el aire que respiramos, el agua, los alimentos y el albergue.

En el transcurso de la historia, la calidad del agua potable ha sido un factor determinante en el bienestar de la humanidad y en la prosperidad de muchas civilizaciones. Las enfermedades transmitidas por el consumo del agua contaminada han afectado a poblaciones enteras de algunas ciudades. Pese a que estas enfermedades han sido controladas en las naciones industrializadas, siguen preocupando en los países pobres, especialmente donde el número de la población supera los recursos disponibles para proporcionar agua potable o para el tratamiento de aguas residuales <sup>(3,4)</sup>.

Entre los contaminantes más preocupantes se deben mencionar sobre todo los metales pesados, cuya influencia se ha constatado desde la antigüedad. Además, las enfermedades que provocan son tanto más peligrosas cuanto más se concentran en la cadena biológica, por ejemplo, una concentración demasiado alta de ciertos elementos como cadmio, plomo, mercurio, que absorben las plantas, o aparecen en alimentos de origen animal, pueden ser dañinas para la salud.

Más específicamente se puede relacionar al plomo con el saturnismo, también en Japón, como resultado de la actividad humana surgió la enfermedad de Minamata. Ésta toma el nombre del puerto pesquero japonés donde, en la década de los 50's, una epidemia por envenenamiento con mercurio causó doscientas

---

muerter. Se originó cuando peces y mariscos absorbieron mercurio procedente del vertido de residuos industriales. Otros brotes de la enfermedad de Minamata se produjeron cuando varios agricultores comieron semillas tratadas con un compuesto orgánico de mercurio <sup>(4,5)</sup>.

En Japón, a finales de la segunda guerra mundial apareció un síndrome llamado Itai Itai (dolor dolor), por razón de los dolores intensos que provocaba en los huesos, que causó la muerte de 190 personas entre los años de 1945 y 1982. Los pacientes habían estado expuestos al cadmio por el consumo de agua y arroz contaminados por los efluentes de una mina de zinc situada en la región. Varias son las plantas que pueden acumular el cadmio debido a su gran semejanza con el zinc, elemento nutritivo esencial en sus funciones bioquímicas. La mayor proporción del cadmio que recibimos procede de las plantas y los granos que forman parte de nuestra dieta. Adicionalmente, los fumadores reciben una dosis extra de cadmio, puesto que éste se encuentra en altas concentraciones en las hojas del tabaco.

Generalmente se denominan metales pesados, en la química del agua, a todos los metales excepto los alcalinos y alcalinotérreos. Sin embargo, este término puede resultar engañoso ya que de dichos elementos no a todos se les puede considerar pesados en lo que se refiere a peso atómico, densidad o número atómico, y algunos ni siquiera tienen carácter totalmente metálico, como el arsénico <sup>(6)</sup>.

Aproximadamente 80 de los elementos de la tabla periódica pueden considerarse metálicos, pero realmente son pocos los que tienen un reconocido carácter tóxico, como son:

Arsénico	Magnesio	Plomo
Berilio	Manganeso	Selenio
Cadmio	Mercurio	Estaño
Cromo	Molibdeno	Zinc
Cobalto	Níquel	Lantánidos
Cobre	Plata	Actínidos

Cabe recordar que la toxicidad de los metales se ve afectada por las condiciones ambientales tales como la temperatura, el pH y la dureza del agua.

Todos los metales pesados pueden llegar a las aguas subterráneas y superficiales, al suelo o al mar por numerosas vías. Son vertidos con frecuencia a las alcantarillas y de allí llegan a los ríos y posteriormente al mar, o bien penetran en el medio marino por vertidos directos. Su principal origen son los efluentes industriales, aunque las aguas residuales urbanas también los contienen, si bien en mucha menor cuantía.

Los metales pesados procedentes de procesos industriales y especialmente la minería, ocupan un lugar importante entre los contaminantes. Por otra parte, metales no incluidos entre los tóxicos pueden dar lugar a trastornos en el medio marino si su concentración llega a alcanzar valores altos (7).

Los metales pesados son perjudiciales para la salud pública debido a que muchos organismos, base de la cadena trófica, entre ellos bacterias, hongos, levaduras, algas, plantas e incluso animales superiores, pueden bioacumularlos.

---

## 2.5. El Cadmio un Metal Pesado.

### 2.5.1. Origen Natural.

El cadmio está ampliamente distribuido en la corteza terrestre en una concentración promedio alrededor de 0.1 mg/Kg y se encuentra comúnmente asociado con el zinc; sin embargo se encuentra en niveles más altos en rocas sedimentarias: los fosfatos marinos con frecuencia contienen alrededor de 15 mg/Kg <sup>(13)</sup>. El clima y la erosión dan como resultado el transporte de grandes cantidades de cadmio a los océanos y esto representa la mayor contribución en el ciclo total del transporte de cadmio <sup>(12, 13)</sup>.

En terrenos alejados de yacimientos minerales y suelos no volcánicos, se han encontrado concentraciones típicas <sup>(14, 15)</sup>. El contenido de cadmio promedio en agua de mar es alrededor de 0.1 µg/L o menor <sup>(17)</sup>. Las determinaciones de cadmio disuelto, en aguas de mar abierto dan valores menores a 5 ng/L; la distribución vertical de cadmio disuelto en agua de océanos está caracterizada por una disminución superficial y un enriquecimiento en aguas profundas, lo cual corresponde al patrón de la distribución de nutrientes en estas áreas <sup>(16)</sup>. Esta distribución se considera resultado de la absorción de cadmio por el fitoplacton en aguas superficiales, su transporte a la profundidad, su incorporación a restos biológicos y la liberación subsecuente. En contraposición el cadmio está concentrado en aguas superficiales de áreas de manantiales y esto también está acorde con los niveles elevados de plancton originados por la actividad humana.

Los sedimentos oceánicos dentro de las áreas de alta actividad humana, pueden contener niveles de cadmio marcadamente elevados, como resultado de la asociación con desechos biológicos <sup>(16)</sup>.

### 2.5.2. Fuentes Industriales.

Las aplicaciones principales del cadmio corresponden a 5 categorías; galvanizado de acero; como estabilizador de PVC; como pigmento en plásticos y vidrio; como material de electrodo en baterías de cadmio-níquel; y como componente de varias aleaciones <sup>(19)</sup>.

La importancia relativa de las aplicaciones ha cambiado considerablemente en los últimos años. El empleo del cadmio para electroplatinado representaba en 1960 la mitad del cadmio consumido mundialmente, pero actualmente representa aproximadamente una cuarta parte <sup>(20)</sup>. Esta disminución se asocia a la introducción en muchos países de restricciones generales en el consumo de cadmio. En contraste, el uso de cadmio en baterías, ha mostrado un notable crecimiento en años recientes. El empleo del cadmio en baterías, es de gran importancia, en particular para países como Japón <sup>(20)</sup>.

Los pigmentos y estabilizadores representan una cantidad considerable del consumo total de cadmio. El empleo de este metal como constituyente de aleaciones es relativamente pequeño y ha declinado también en importancia en los últimos años <sup>(20)</sup>.

### 2.5.3. Fuentes Ambientales de Cadmio.

#### a) Fuentes Atmosféricas de Cadmio.

Se han hecho estimaciones de las emisiones de cadmio a la atmósfera por fuentes naturales y humanas en todo el mundo; a fin de determinar niveles regionales y/o nacionales. La actividad volcánica es la fuente natural de mayor liberación de cadmio a la atmósfera. El vulcanismo subterráneo también es una

fuente de liberación de cadmio al ambiente, pero el papel de este proceso en su ciclo total no ha sido cuantificado <sup>(16)</sup>.

**b) Fuentes Acuáticas de Cadmio.**

La minería de metales no ferrosos, representa una fuente mayoritaria de liberación de cadmio al medio acuático. La contaminación por esta fuente puede provenir de agua de drenado de minas, de aguas residuales provenientes del procesamiento de los minerales, derrames de las presas de jales, agua de lluvia que corre en el área general de la mina y de las partículas más ligeras que pasan sobre los cedazos en las operaciones de purificado.

La liberación de estos efluentes a los cursos de agua, puede conducir a una contaminación en los lechos, río abajo, lejos de la operación minera. Así sigue siendo tema de discusión, la responsabilidad de la contaminación continua de los cursos de agua.

Se ha estimado que a nivel mundial, la fundición de minerales metálicos no ferrosos, es la fuente humana más grande de liberación de cadmio al medio acuático <sup>(21)</sup>.

La fabricación de fertilizantes fosfatados conduce a una redistribución del cadmio presente en la roca fosfórica, distribuyéndose entre el ácido fosfórico producido y los desechos calizos. En muchos casos las calizas son transferidas a tiraderos cercanos a las costas, lo cual conduce a una considerable introducción de cadmio al mar. Algunos países recuperan la caliza para empleo como material de construcción y así, las descargas de cadmio al mar por esta fuente son despreciables.

La acidificación de suelos y de lagos, puede dar como resultado un incremento en la movilidad del cadmio de los suelos y sedimentos y conducir a un incremento de niveles en las aguas superficiales y los océanos (23).

c) Fuentes Terrestres de Cadmio.

Los desechos sólidos son dispuestos en confinamientos especiales, teniendo como consecuencia una gran introducción de cadmio vía lixiviación al medio terrestre (24). Las fuentes incluyen las cenizas del quemado de combustibles fósiles, desechos de fabricación de cementos y la disposición de residuos y aguas residuales municipales.

Desde el punto de vista ambiental, tienen una gran importancia los desechos sólidos fabriles: tanto de metales no ferrosos, como de artículos que contienen cadmio, así como los residuos y cenizas de la incineración de residuos. Estos tres materiales de desecho, que se caracterizan por sus altos niveles de cadmio, requieren de sitios controlados para su disposición, a fin de prevenir la contaminación de océanos.

La aplicación de fertilizantes fosfatados en la agricultura, representa un incremento directo de cadmio a suelos cultivables. El contenido de cadmio en los fertilizantes fosfatados varía ampliamente y depende del origen de la roca fosfórica. Se ha estimado que los fertilizantes de África Occidental contienen entre 160-225 g de Cd/Ton de pentóxido de fósforo, mientras que aquellos provenientes del sureste de los E.U.A. contienen 36 g/Ton.

La velocidad en el incremento anual de cadmio por esta vía a los suelos cultivables se ha estimado que es de 5 g/Ha para los países de la Unión Europea. Esto sólo representa alrededor del 1% del nivel de cadmio en suelo superficial. A

pesar de esta tasa de incremento relativamente pequeña, se ha demostrado que la aplicación continua de fertilizantes causa un incremento en la concentración de cadmio en los suelos.

La aplicación de lodos residuales municipales a suelos agrícolas como fertilizantes; también puede ser una fuente significativa de cadmio; se ha estimado un valor de 80 g/Ha para el Reino Unido <sup>(24)</sup>. Desde el punto de vista de una región o una nación, estos incrementos son mucho más bajos que los provenientes de fertilizantes fosfatados o por depósito atmosférico.

Los suelos contaminados pueden contener niveles de cadmio mayores de 57 mg/Kg, resultado de la aplicación de lodos a suelos y sobre 160 mg/Kg, en los alrededores de las industrias procesadoras de metales <sup>(25)</sup>. Los mayores niveles de cadmio que han sido informados son los de las áreas de antiguas minas; con niveles de 468 mg/Kg.

#### 2.5.4. Distribución y Transporte Ambiental.

##### a) Depósito Atmosférico de Cadmio

El cadmio es transferido de la atmósfera a áreas rurales por depósito y por precipitación. Muchas fuentes industriales de cadmio poseen altas chimeneas, lo cual redundo en una dispersión y dilución amplia de las partículas emitidas. Sin embargo, la velocidad de depósito del cadmio alrededor de las fundidoras, es marcadamente elevada cerca de la fuente y generalmente disminuye rápidamente con la distancia.

Las hierbas que crecen cerca de las fuentes atmosféricas pueden contener altas concentraciones de cadmio. Sin embargo no es siempre posible distinguir

entre el cadmio proveniente de depósito superficial o de la incorporación por raíces, ya que los niveles en los suelos de tales áreas son generalmente más altos que los normales <sup>(26, 27)</sup>.

#### b) Transporte de Cadmio por Agua o Suelo.

Los ríos contaminados con cadmio pueden contaminar la tierra de alrededores, ya sea por empleo de agua para riego agrícola o por dragado a través de las inundaciones.

Mucho del cadmio que ingresa a aguas dulces, proveniente de fuentes industriales se absorbe rápidamente por material minúsculo como el plancton, donde puede permanecer fijo o suspendido, dependiendo de las condiciones locales. Esto puede dar como consecuencia una concentración baja de cadmio disuelto en los ríos que reciben y transportan grandes cantidades de este metal <sup>(28)</sup>.

## 2.6. Toxicidad del Cadmio.

### 2.6.1. Factores que Influyen.

En sistemas acuáticos, el cadmio es frecuentemente incorporado por los organismos directamente del agua, pero también puede ser ingerido con alimentos contaminados. La incorporación de éste a través del agua se puede reducir por incremento de la concentración de sales de calcio y magnesio (aguas duras).

La incorporación del cadmio a través de agua de mar se puede reducir en gran medida por la formación de complejos con el cloro, que son menos accesibles para los organismos.

Los organismos de aguas dulces se contaminan de acuerdo a su capacidad de absorción del agua, más que por su posición en la cadena alimenticia. En consecuencia, son comunes las diferencias en la concentración de cadmio entre especies en el mismo trófico, no siendo esto una evidencia de bioconcentración. En contraparte los organismos marinos toman el cadmio principalmente de la comida. La primera fuente de cadmio en sistemas terrestres es el suelo y la incorporación sigue las rutas de la cadena alimenticia, sin embargo, el depósito de cadmio en las plantas y superficies puede ser además significativa, para incrementar la contaminación de cada nivel trófico.

Existen variaciones en la incorporación y retención de cadmio en carnívoros, además de que existen algunas evidencias de bioacumulación.

Los organismos que toman su comida de sedimentos o desechos pueden acumular más cadmio que los que pertenecen a la cadena alimenticia de pastoreo. Se han registrado niveles altos de cadmio en mamíferos marinos, aves marinas pelágicas y animales invertebrados.

En una amplia variedad de organismos, el cadmio se distribuye a través de la mayoría de los tejidos, pero tiende a acumularse en raíces, agallas o branquias, hígado, riñones y esqueleto externo. El cadmio en las células se une frecuentemente a las proteínas del citoplasma, como un posible mecanismo de desintoxicación. La eliminación ocurre probablemente en forma primaria por la vía de los riñones, pero también en la muda del esqueleto externo.

Hay algunas evidencias de interacción entre el cadmio y otros metales, especialmente el calcio y el zinc. El cadmio puede remplazar al calcio en la proteína específica para calcio, denominada calmodulina y afectar otros procesos fisiológicos que regulan la incorporación del calcio. En ciertas circunstancias, el

zinc incrementa la retención del cadmio en el hígado y los riñones de vertebrados acuáticos.

La selección natural en los seres vivos puede conducir a poblaciones tolerantes al cadmio tanto en ambientes terrestres como acuáticos (29).

### 2.6.2. Toxicidad en Organismos Terrestres.

Tanto los animales como las plantas terrestres acumulan cadmio, pero la velocidad de acumulación es mucho mayor en medios contaminados; ya que el cadmio puede estar disponible en solución, este es el caso del crecimiento de plantas en suelos contaminados con cadmio, en cambio en suelos donde el cadmio está ligado y menos disponible no sucede así.

El cadmio tiene efectos adversos en el crecimiento hidropónico de plantas a concentraciones del orden de miligramos por litro; mientras que en las plantas que crecen en suelos contaminados sólo se muestra reducción en el crecimiento.

Los invertebrados terrestres son relativamente insensibles a efectos tóxicos inducidos por cadmio, probablemente debido al efecto de mecanismos de secuestro en órganos específicos. Cuando llegan a ocurrir efectos tóxicos, éstos consisten en una reducción del crecimiento y reproducción.

### 2.6.3. Toxicidad en Seres Humanos.

La intoxicación con cadmio en los seres humanos se manifiesta con una irritación nefrotóxica y puede presentarse como:

- a) Intoxicación Aguda y Subaguda: Si se trata de inhalación de aerosoles, los síntomas van desde irritación de las vías respiratorias, hasta disnea, además de debilidad, fatiga, anorexia, náuseas, alteraciones renales con proteinuria.

Por ingestión de alimentos o bebidas contaminadas se presentan severas alteraciones hepáticas y renales; náuseas, vómitos, diarreas, dolores abdominales y musculares, así como abundante salivación.

- b) Intoxicación Crónica: Producida generalmente por inhalación de cadmio a través de aerosoles, conduce a enfisema y fibrosis pulmonar progresiva y alteraciones renales con proteinuria, que se agrava con el transcurso de la exposición.

Inicialmente aparece eliminación urinaria de proteínas de bajo peso molecular, posteriormente se incrementan los síntomas: astenia, anemia, glicosuria, aminoaciduria hipofosfaturia, incrementándose la excreción de ácido úrico y en el caso de que sea producida por ingestión de alimentos, se puede tener daños a los huesos.

La intoxicación crónica ocurre principalmente por dos motivos: por exposición ocupacional, o por ingestión de alimentos que tienen un contenido alto de cadmio adquirido generalmente por causas de contaminación ambiental <sup>(29)</sup>.

#### 2.6.4. Toxicidad en Microorganismos.

En forma experimental se ha demostrado que el cadmio es tóxico para una gran cantidad de microorganismos, sin embargo, la presencia de sedimentos, materia orgánica, o altas concentraciones de sales disueltas, reduce la

disponibilidad del cadmio para los microorganismos y así se reduce el impacto tóxico. Los microorganismos de agua dulce en estudio, son afectados por el cadmio a concentraciones menores que las especies marinas. Los microorganismos de tierra son protegidos parcialmente de los efectos de cadmio por la presencia de arcillas (29).

### 2.6.5. Toxicidad de Organismos Acuáticos.

La incorporación de cadmio del agua por organismos acuáticos es extremadamente variable y depende de la especie y de las condiciones ambientales, tales como dureza del agua (en forma sobresaliente), concentración del ion calcio, salinidad, temperatura, pH y contenido de materia orgánica.

La mayoría de los agentes quelantes hacen que disminuya la incorporación de cadmio. El impacto tóxico de organismos acuáticos varía también a través de un amplio rango de concentraciones y depende de la especie del organismo y de la presencia de otros iones metálicos, notablemente del calcio y del zinc.

Los resultados de que se dispone, indican que los estados larvario y embrionario de un organismo acuático, son los más sensibles en comparación con el estado adulto. Se inducen malformaciones de la espina dorsal en peces expuestos a cadmio, además de causar efectos sobre la reproducción, este elemento influye en el comportamiento de los organismos acuáticos (29).

---

## 2.7. Remediación de Aguas Residuales.

El objetivo del tratamiento de las aguas residuales no es solamente la purificación de dicha agua para cumplir los requisitos legales, sino también para su reutilización o reciclado parcial o total <sup>(30)</sup>.

Convencionalmente, los métodos utilizados para la remediación de las aguas residuales contaminadas con metales pesados incluyen alguno de los siguientes procesos: neutralización y precipitación química, separación sólido/líquido (filtración, sedimentación o flotación), oxidación o reducción química (cementación), tecnologías de membranas (ósmosis inversa, electrodiálisis y diálisis), resinas intercambiadoras de iones, adsorción con carbono, extracción con disolventes, dilución y recuperación por evaporación <sup>(31, 32, 33)</sup>.

El tipo de proceso o combinación de procesos que se debe utilizar depende del metal en cuestión y de la concentración final deseada; en general, una de las mayores desventajas de estas tecnologías es la producción de lodos. En otras palabras, estas tecnologías transforman la contaminación acuática en un problema asociado con la eliminación de los desechos sólidos generados. La cantidad de estos lodos así como su calidad varían en función de los productos químicos utilizados y del tipo de metal involucrado <sup>(31)</sup>. Además, estos procesos resultan poco efectivos o extremadamente caros, especialmente cuando la concentración de los metales en forma disuelta en el agua a tratar es baja y se sitúa en el rango de 1 a 100 mg/L <sup>(32)</sup>.

### 2.7.1. Adsorción.

La adsorción es un fenómeno superficial que ocurre entre una fase fluida (gaseosa o líquida) y otra sólida. La especie adsorbida se llama adsorbato y puede

---

haber uno o más en una operación de adsorción. La sustancia sólida sobre cuya superficie ocurre la adsorción se denomina adsorbente. Por ser un fenómeno superficial, un buen adsorbente es aquel que ofrece gran área superficial por unidad de peso o volumen <sup>(30)</sup>.

Uno de los adsorbentes más utilizados es el carbón activado. Éste se produce calcinando, y por lo tanto carbonizando anaeróbicamente y a altas temperaturas (que pueden ser hasta de 600 °C) una variedad de materiales con alto contenido en carbón, este tratamiento es seguido por una etapa de activación que consiste en una oxidación parcial, utilizando CO<sub>2</sub> a temperaturas entre 660 y 700 °C, o bien H<sub>2</sub>O<sub>(v)</sub> entre 880 y 900° C. Este proceso desarrolla cierta porosidad en el material activado, aumentando su área y su afinidad por los solutos.

El carbón activado puede ser regenerado, a través de un calentamiento del adsorbente a una temperatura de 950 °C, acompañado de un chorro de aire atmosférico. La adsorción con carbono tiene como limitación importante su gran costo, ya que se consume gran cantidad de energía en la activación y regeneración del mismo, otra desventaja adicional es que después de cada regeneración hay una disminución del 10% en la capacidad de adsorción <sup>(34)</sup>.

### 2.7.2. Biosorción.

En las últimas décadas los métodos de intercambio iónico y de adsorción han sido los más utilizados para la separación de los iones metálicos de las soluciones acuosas. Recientemente el uso de biomasa ha abierto nuevas expectativas para la eliminación de los metales tóxicos y radioactivos que contaminan las aguas residuales para que su descarga en la naturaleza se realice de una forma aceptable, o para la recuperación de los metales valiosos <sup>(32)</sup>.

La biosorción es la eliminación de las especies metálicas y/o de sus compuestos que se hallan en una disolución, por un material biológico llamado biomasa. La biosorción es el resultado de la formación rápida de enlaces covalentes o iónicos entre una especie metálica y algunos componentes particulares de la biomasa <sup>(35)</sup>.

Pueden acumularse grandes cantidades de metales en una biomasa mediante varios procesos, esto ocurre en dos fases; en la primera, bastante rápida, el metal se une a la biomasa independientemente de su actividad metabólica (biosorción propiamente dicha), esta etapa depende de los ligandos o grupos funcionales que contenga la biomasa. La segunda fase es lenta y se debe a los efectos simultáneos del crecimiento de la biomasa y de la adsorción del metal, se trata de una adsorción activa vía difusión pasiva (bioacumulación) <sup>(35,36)</sup>.

En los procesos de biosorción la biomasa puede tener naturalezas muy diversas, puede estar viva o muerta, libre o inmovilizada sobre algún soporte, puede ser unicelular o pluricelular, tratarse de algún compuesto celular (diferentes tipos de polímeros) o incluso de productos de excreción <sup>(37,38)</sup>.

Los mecanismos de biosorción incluyen una combinación de fenómenos como:

- Transporte activo de los iones metálicos a través de la pared celular del biosorbente.
- Ingestión de partículas por un mecanismo pinocitótico.
- Intercambio iónico.
- Complejación o quelación.
- Adsorción física.
- Precipitación.
- Atrapamiento de partículas por órganos o excrementos extracelulares.

Los dos primeros están relacionados con la actividad metabólica del biosorbente, mientras que el resto pueden realizarse por biomasa viva o muerta.

La biosorción es un fenómeno físico-químico rápido, y el equilibrio depende de:

- Características del biosorbente, tales como la edad del cultivo, la naturaleza del medio de cultivo y el pretratamiento de éste.
- Características físico-químicas del metal de interés.
- Características de la disolución metálica, tales como el pH, la temperatura, la coexistencia de otros iones, el diseño del reactor, etc <sup>(39)</sup>.

Es importante señalar que la cantidad total de metal adsorbida es siempre superior a la cantidad teórica necesaria para saturar estequiométricamente los sitios activos en la pared celular, esto debido a que el metal se adsorbe en los lugares activos de la pared celular de forma estequiométrica, esta cantidad de metal va a actuar como puntos de nucleación para la deposición de una parte del metal que se encuentra en la disolución, lo que conduce a la formación de agregados, denominados cristaloides. La biosorción no es un fenómeno específico, debido a que muchos microorganismos pueden contener en su pared celular una gran variedad de grupos funcionales, y por tanto el mecanismo y los lugares de adsorción pueden ser diferentes de un microorganismo a otro manifestando también diferentes capacidades de adsorción para diferentes metales.

Se ha establecido una buena correlación entre la capacidad de biosorber un metal y la concentración de fósforo en la biomasa. Se ha propuesto que el fosfato es el compuesto celular responsable de la retención de los iones metálicos <sup>(40)</sup>.

El fenómeno de la biosorción puede ser aprovechado para la recuperación de los metales que se encuentran en las aguas residuales. Sin embargo, para ser

factible, este proceso tiene que competir tecnológicamente y económicamente con los ya existentes. La biomasa debe tener ciertas características tales como:

- Gran eficiencia para la retención de los metales y gran capacidad de adsorción (150mg de metal/g de biomasa seca).
- Bajo costo de producción <sup>(41)</sup>.
- Poder ser utilizada en varios ciclos de adsorción-desorción. La desorción debe conducir a:
  - Efluente con concentraciones metálicas altas.
  - Biomosas bien conservadas, con la mayor parte de su capacidad de adsorción.
  - Evitar la contaminación de la disolución tratada con productos que la propia biomasa pueda generar y por lo tanto, conducir el sistema a condiciones sépticas <sup>(42)</sup>.

Además del bajo costo, la biosorción tiene otras ventajas:

- Mejor calidad del efluente, lo que permite entrar en el rango fijado por las instituciones medioambientales para sus vertidos.
- Operación simple.
- Proceso muy rápido. El 90% de la adsorción ocurre en los primeros cinco minutos.
- Amplio rango de valores de pH de operación (3 - 10).
- Amplio rango de temperaturas de operación (4 - 90°C).
- Posibilidad de recuperación de los metales de los lodos que resultan de la operación de depuración.
- Proceso independiente de la concentración metálica aplicable cuando la concentración del metal es inferior a 10 mg/L o cuando es superior a 100 mg/L.
- Los biosorbentes suelen tener muy poca afinidad para los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  <sup>(42)</sup>.

Algunas de las ventajas y desventajas de usar la biomasa en modo pasivo como adsorbente son:

- Por el hecho de ocurrir independientemente el proceso de propagación, la biomasa no está sujeta a efectos de toxicidad, no se requiere de nutrientes para el crecimiento y no se tienen los problemas de disposición de desechos del microorganismo.
- Puede utilizarse biomasa de procesos existentes y que normalmente se considerarían un desecho.
- Las condiciones del proceso no están restringidas por las de cultivo.
- El potencial de mejoramiento biológico, vía ingeniería genética es muy limitado.

En conclusión se puede formular tal como postula Ehrlich "potencialmente cualquier microorganismo que expone sus grupos cargados negativamente en su superficie tendrá una cierta afinidad por los cationes metálicos contenidos en una disolución acuosa" (40).

### 2.7.3. Bioacumulación (40).

La bioacumulación o la biosorción activa es el resultado de la retención de metales por microorganismos vivos. La energía del fenómeno de bioacumulación es el triple que la necesaria para el fenómeno de biosorción.

La biosorción es un fenómeno rápido e independiente de la presencia de nutrientes, mientras que la bioacumulación es lenta y depende de la presencia de nutrientes. Generalmente la cantidad de metal bioacumulada representa de 0.2-0.5% del peso seco de la biomasa y es siempre muy baja frente a la cantidad biosorbida.

#### 2.7.4. Elución.

Es muy importante que la unión biomasa-metal pueda romperse por agentes apropiados (desorción o elución) y así poder regenerar la biomasa para un posterior uso. En la mayoría de los casos se trata de disoluciones de diversos ácidos minerales, tales como el sulfúrico, clorhídrico, nítrico, etc., o bien ácidos orgánicos, tales como el acético, láctico, etc.; o bien se recurre al empleo de agentes complejantes como el EDTA. La flotación es otro método que también puede ser usado para la recuperación del metal, sin embargo, ha recibido poco interés por parte de la comunidad científica debido al alto precio de los agentes de flotación. No obstante, por lo general, la biomasa pierde capacidad de adsorción en cada ciclo de adsorción-desorción. Como no siempre es posible dicha regeneración, una alternativa a la recuperación del metal es el uso de la incineración, lo que podría estar justificado únicamente cuando se trata de biomasa barata y de fácil accesibilidad <sup>(43)</sup>.

#### 2.7.5. Factores que influyen en la Biosorción.

La capacidad de biosorción es afectada por factores tanto químicos como físicos, los cuales se analizan a continuación:

##### a) Efecto del pH.

El pH de la solución tiene un efecto significativo en la biosorción del metal, ya que tiene influencia tanto en los sitios de unión de la superficie de la célula como las características químicas de la solución. El comportamiento general observado para diferentes tipos de metales y biosorbentes es que la biosorción del metal es despreciable a valores de pH entre 1 y 2 y se incrementa conforme el pH aumenta hasta alcanzar un máximo a valores de pH entre 5 y 7 <sup>(44, 45)</sup>.

b) Efecto de la Concentración de la Biomasa.

La concentración de biomasa es también una variable que ha sido considerada que afecta la biosorción del metal. La capacidad de adsorción disminuye conforme aumenta la concentración de biomasa.

Este efecto de disminución de la capacidad de adsorción conforme aumenta la concentración celular puede deberse a que ocurren interacciones electrostáticas entre las células, lo cual podría causar una disminución en los sitios de unión de la pared celular por el aglomeramiento de éstas; es decir, conforme la distancia entre las células es mayor se adsorbe una mayor cantidad de iones <sup>(46,47)</sup>.

c) Efecto de la Temperatura.

Cuando se usan células metabólicamente inactivas como adsorbentes en procesos de biosorción, no se observa efecto de la temperatura en la captación del metal, particularmente a temperaturas entre los 25-40°C. En cambio cuando se utilizan células vivas, ésta tiene que influir bastante, ya que éstas necesitan un cierto rango de temperatura óptimo para poder adsorber el metal, y este rango depende de cada tipo de célula en específico <sup>(48,49)</sup>.

d) Efecto del Pretratamiento Químico y Físico.

La capacidad de adsorción de un determinado adsorbente puede ser aumentada por un pretratamiento del mismo; éste puede ser tanto físico como químico. En general, se podría considerar que el efecto del pretratamiento químico en el mejoramiento de la capacidad de adsorción puede ser debido a un cambio en la permeabilidad de la pared celular, al incremento en la exposición de sitios de

unión o a la remoción de polisacáridos amorfos de la pared celular, lo cual genera espacios más accesibles a los sitios de unión <sup>(50, 51)</sup>.

e) Efecto de la concentración de cationes.

La captación del metal por biomasa metabólicamente inactiva, es significativamente afectada por la presencia y concentración de otros cationes en la solución, dependiendo de las interacciones químicas de las otras especies iónicas con el metal de interés y la biomasa. Muchos de los grupos funcionales presentes en la pared celular son no específicos y los diferentes cationes compiten por los sitios de unión. Por lo anterior, la captación del metal de soluciones con más de una especie es menor que aquellas en las que una sola especie esté presente <sup>(52,53)</sup>.

f) Efecto de la fuerza iónica.

Los metales en solución no están presentes únicamente como iones libres, sino que interaccionan con otros iones llamados ligandos para formar complejos. La capacidad de un ligando para formar complejos metálicos está determinada por su actividad en solución y esta actividad depende de varios parámetros como son la temperatura, la concentración, la fuerza iónica y el pH. La fuerza iónica de una solución es el efecto combinado de las cargas de los iones y sus concentraciones y en experimentos donde se quiere estudiar el efecto de los otros factores, es necesario mantenerla constante; esto se logra adicionando a la solución electrolitos soporte o contra-aniones en cantidades apropiadas para evitar que el ion objeto de estudio se acompleje y no se adsorba <sup>(54,55)</sup>.

### III. Parte Experimental.

#### 3.1. Reactivos y Equipo.

##### 3.1.1. Reactivos.

- ✓ NaOH en granallas marca Mallinkrodt de una pureza del 98.6%. La preparación de las disoluciones se realizó por pesada de una cantidad específica de sosa y aforo con agua destilada.
- ✓ HCl de la marca J.T. Baker al 37.5% y para preparar el HCl a la molaridad requerida se midió el volumen necesario y se llevó al aforo con agua destilada.
- ✓  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  de la marca Mallinkrodt R.A. para preparar la solución de Cd de 10,000 ppm, se realizó por pesada de una cantidad específica de  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  y aforo con agua destilada. Para la solución de 100 ppm, se midió el volumen necesario de la solución de 10,000 ppm y se llevó al aforo.
- ✓ La biomasa utilizada fueron lodos activados obtenidos de plantas de tratamiento de aguas, a estos lodos antes de ser utilizados se les aplicó un lavado con agua destilada para procurar que la biomasa estuviera libre de cualquier interferencia, una vez lavados se secaron en una estufa a 60 °C durante 72 hrs. y posteriormente se disgregaron para poder ser utilizados en las pruebas de captación de cadmio.
- ✓ KCl marca Merk con una pureza del 99.5%.

### 3.1.2. Equipo.

- ✓ Para la determinación del potencial electrocinético se utilizó un zetámetro marca Zeta-Meter modelo 3.0 +.
- ✓ Para el seguimiento del pH se utilizó un pH-Metro modelo 620 marca Metrohm.
- ✓ Para las pruebas de fijación de cadmio, el monitoreo del catión se realizó con un electrodo combinado de ion selectivo de cadmio marca Phoenix modelo CD21502-003B.
- ✓ La recolección de datos se realizó utilizando una tarjeta de adquisición de datos modelo KNM-TC42-RS232C marca Keithley Smart Link acoplada a una PC.

## 3.2. Procedimiento Experimental.

### 3.2.1. Caracterización de la Biomasa.

Con el fin de caracterizar los lodos activados se realizaron los siguientes experimentos:

#### 3.2.1.1. Titulación con Hidróxido de Sodio y Ácido Clorhídrico.

Con la finalidad de evaluar si los lodos activados liberan o consumen  $H^+$  o  $OH^-$  se valoró la biomasa con Hidróxido de Sodio y Ácido Clorhídrico. Para esto se pesaron 0.1 g de biomasa y se adicionó a 200 mL de agua destilada.

La titulación se llevó a cabo bajo agitación constante con un agitador magnético tomando lectura de los valores de pH para cada adición de base o ácido.

#### 3.2.1.2. Consumo de protones en función del pH.

Con el fin de evaluar si el consumo de protones por la biomasa depende del pH del medio, se prepararon soluciones a diferentes valores de pH, abarcando el intervalo de 3 a 10. A estas disoluciones se les agregó 0.1 g de biomasa y se monitoreó el pH en función del tiempo durante 30 minutos. Este experimento se realizó con agitación constante.

Las mediciones del pH se realizaron tanto de manera manual como de manera automática con la tarjeta de adquisición de datos (una lectura por segundo).

### 3.2.1.3. Determinación del Potencial Electrocinético de la Biomasa.

Con el fin de determinar la carga superficial de la biomasa, se determinó el potencial electrocinético de ésta en función del pH.

Para esto se prepararon 10 disoluciones con 0.1 g de biomasa y 200 mL de agua destilada y a cada una se le fijó el pH en un intervalo de 2 a 12, después de dejar que la suspensión llegara al equilibrio, se midió el potencial electrocinético aplicando una diferencia de voltaje de 150 V en el zetámetro.

### 3.2.1.4. Espectros de I. R. de la Biomasa.

Se trazaron los espectros de infrarrojo de la biomasa en medio ácido, pH natural y medio básico. Para preparar cada una de las muestras se tomaron 0.1 g de biomasa y se adicionaron a 200 mL de agua destilada, para así fijarle respectivamente el pH a valores de 2 y 10; se filtraron cada una de ellas con un kitasato y un buchner con un papel filtro de Whatman 40 y se secaron en un horno, para posteriormente trazar los espectros de I.R. de las tres muestras.

## 3.2.2. Experimentos de Fijación de Cadmio.

### 3.2.2.1.- Determinación de Cadmio con el Electrodo de Ion Selectivo.

La determinación de cadmio se realizó con el electrodo de ion selectivo mediante curva de calibración, para lo cual se prepararon soluciones de cadmio a diferentes concentraciones, 10, 50, 100, 500 y 1000 ppm, a las cuales se les midió el potencial con el electrodo de ion selectivo, para así obtener una gráfica de potencial Vs. log de la concentración de cadmio (ppm).

### 3.2.2.2. Fijación de Cadmio por la Biomasa en Función del pH.

Se preparó una solución de 100 ppm de cadmio y la fuerza iónica se fijó en 0.5 con KCl. Se tomaron muestras de 200 mL de esta solución, a las cuales se les fijó el pH a 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 con Ácido Clorhídrico y Hidróxido de Sodio según corresponda. A cada una de las soluciones de pH fijo se les agregó 0.1 g de biomasa y se monitoreó el pH y el potencial con el electrodo de ion selectivo durante aproximadamente 30 minutos (una lectura por segundo). Los valores de potencial se transformaron a concentración de cadmio con la curva de calibración trazada con los datos obtenidos del electrodo de ion selectivo.

### 3.2.2.3. Optimización del pH para la Fijación del Cadmio.

Con el fin de evaluar si es más conveniente mantener el pH de la solución en 3 (determinado como óptimo en el punto anterior), se realizó un experimento de fijación de cadmio, por un lado fijando el pH inicial en 3 y dejarlo que variara libremente y por otro lado, fijando el pH inicial en 3 y tratar de mantenerlo en ese valor.

El procedimiento fue el siguiente: A 150 mL de solución de cadmio (100 ppm) se le fijó el pH a 3 y se procedió a mantener el pH fijo durante 30 minutos y a la otra muestra se le dejó el mismo tiempo, pero sin mantenerlo constante. Una vez transcurridos los 30 minutos, se filtró la biomasa y se analizó el cadmio para determinar las condiciones más adecuadas para la fijación de éste.

### 3.2.2.4. Determinación del Potencial Electrocinético de la Biomasa en Presencia de Cadmio.

Se determinó la carga superficial de la biomasa a través de la medida del potencial electrocinético, determinado como se define en el punto 3.2.1.3, pero en esta ocasión utilizando una cantidad de 2 g de biomasa, adicionada a 200 mL de solución de  $Cd^{2+}$  de 100 ppm, y puesta en agitación constante durante aproximadamente 30 minutos, después de esto, la biomasa se filtró, lavó y secó, para posteriormente disgregarla y tomar 0.1 g de biomasa con Cd e introducirla en 100 mL de agua destilada, preparando así 10 muestras en el mismo rango de pH antes mencionado y proceder a la realización de las mediciones de potencial electrocinético.

### 3.2.2.5. Espectros de I. R. de la Biomasa con Cadmio.

Con el fin de comparar los espectros de I. R. de la biomasa en presencia y ausencia de cadmio, se trazaron los espectros de ésta con cadmio en medio ácido, pH natural y medio básico.

Para preparar cada una de las muestras se tomaron 2 g de biomasa y se mezclaron en 200 mL de solución de  $Cd^{2+}$  de 100 ppm, se filtraron y se secaron, a la muestra seca se le dividió en tres partes iguales. A las dos primeras se les colocó en 200 mL de agua destilada. A cada muestra se le fijó el pH correspondiente (2 y 10), después de esto se filtraron y se secaron. Finalmente a la tercera muestra se le dejó así para ser analizadas por I.R.

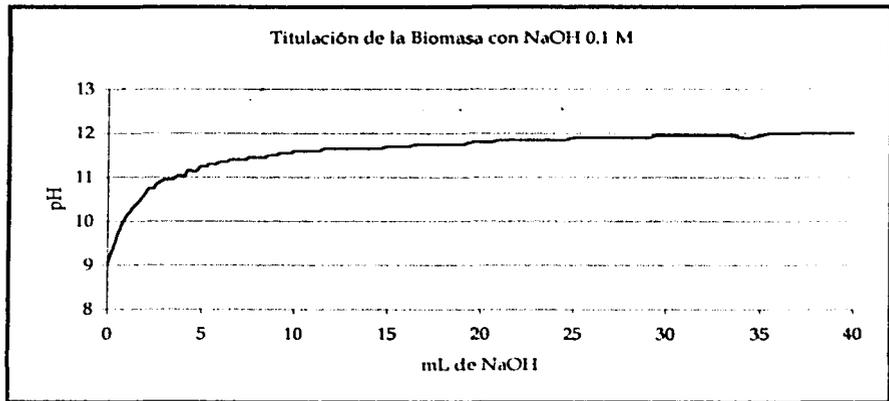
Se siguió el mismo procedimiento para las muestras con 10,000 ppm de cadmio.

## IV. Resultados y Discusión.

### 4.1. Caracterización de la Biomasa.

#### 4.1.1. Titulación con Hidróxido de Sodio y Ácido Clorhídrico.

Para la titulación con hidróxido de sodio, se colocó 0.1 g de biomasa en 200 mL de agua destilada y bajo agitación constante se fue titulando con NaOH 0.1 M, los resultados obtenidos se muestran en la gráfica 1.

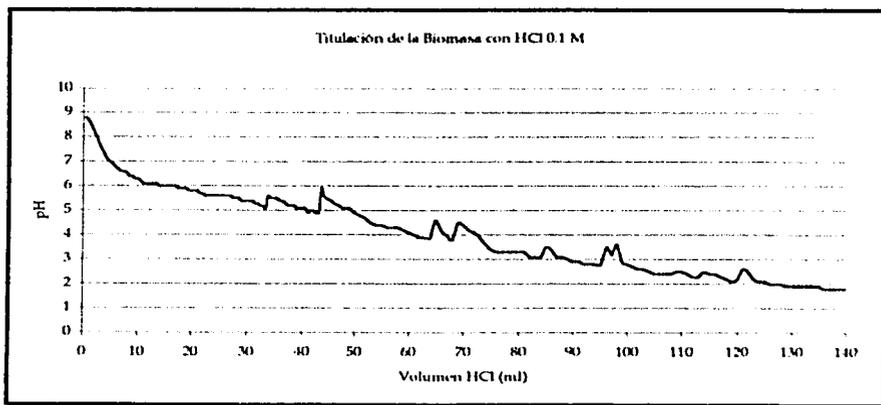


Gráfica 1. Titulación de la Biomasa con NaOH.

El pH inicial es 9.05 y al ir agregando el Hidróxido de Sodio va aumentando hasta estabilizarse a un pH alrededor de 12.

De esta gráfica se puede decir que no hay ni consumo, ni liberación de algún tipo de ion, con características ácido-básicas, la variación observada corresponde al cambio que presentaría el agua sola al agregarle sosa.

Para la titulación con ácido clorhídrico se procedió de la misma manera que con el hidróxido de sodio, es decir se colocó 0.1 g de biomasa en 200 mL de agua y se tituló con HCl 0.1 M. Los resultados se muestran en la gráfica 2.



Gráfica 2. Titulación de la Biomasa con HCl.

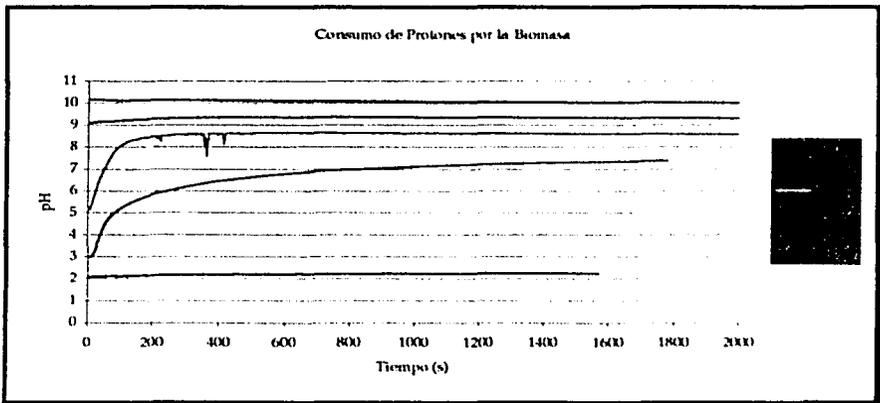
Como se puede observar en la gráfica, al ir agregando el HCl el pH disminuye, pero también se puede ver que cuando se deja de agregar éste; el pH automáticamente empieza a aumentar, esto es debido a que la biomasa consume protones.

El pH inicial es de 8.9 y se estabiliza alrededor de 2, esto debido a que la biomasa se empieza a saturar de protones ( $H^+$ ).

Para esta titulación, la cantidad de HCl utilizada es mayor, comparada con la cantidad de NaOH utilizada en el experimento anterior, ya que la biomasa consume protones.

#### 4.1.2. Consumo de protones en función del pH.

Para estas pruebas se fijaron los pH's de 6 soluciones a 2, 3, 4, 5, 9 y 10. Se monitoreó el pH de cada solución en función del tiempo al agregarles 0.1 g de biomasa. Los resultados obtenidos se presentan en la gráfica 3.



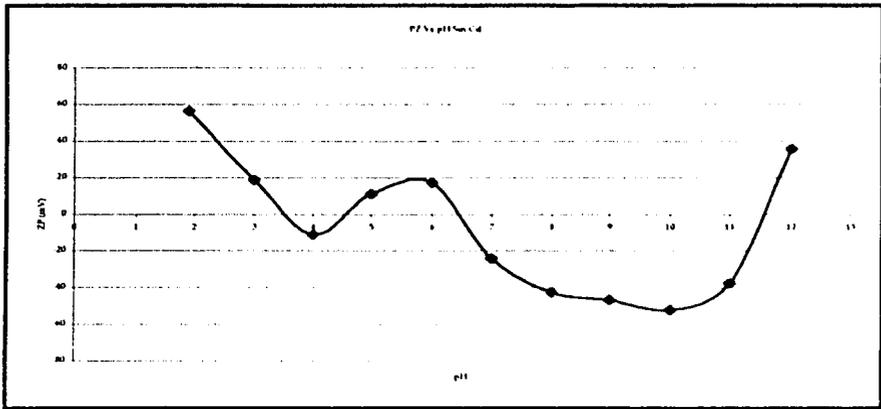
Gráfica 3. Consumo de Protones por la Biomasa en Función del Tiempo.

De la gráfica 3 se observa que la tendencia general es que el pH de todas las soluciones aumenta con el tiempo, lo que indicaría un consumo de protones por la biomasa introducida. De acuerdo a los cambios observados, el cambio de pH es mayor conforme el pH de inicio es menor, a excepción del pH 2, ya que la cantidad de  $H^+$  en el medio es muy importante. Esto indica que la cantidad de protones consumidos es mayor cuando el pH es menor, posiblemente porque la cantidad de

protones disponibles en el medio es mayor. Estos resultados corroboran los obtenidos en las valoraciones con sosa y ácido clorhídrico.

#### 4.1.3. Determinación del Potencial Electrocinético de la Biomasa.

Los valores de potencial electrocinético medidos a cada uno de los valores de pH para determinar la carga superficial de las partículas de la biomasa se muestran en la gráfica 4.

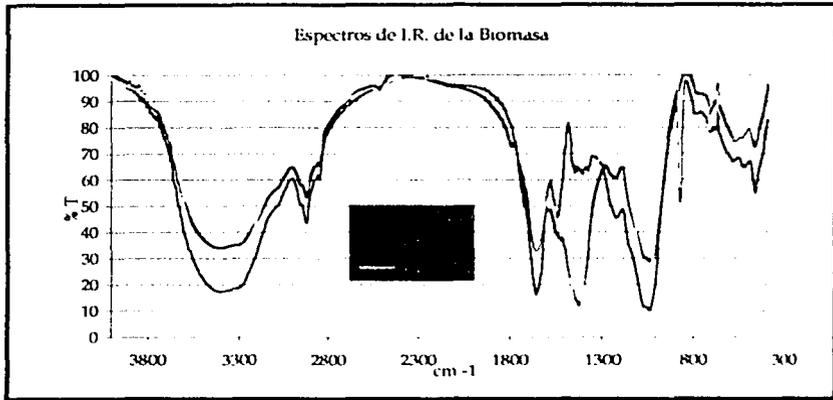


Gráfica 4. Potencial Electrocinético de la Biomasa en Función del pH.

En esta gráfica se puede observar que para los valores de pH de 2, 3, 5, 6 y 12 se tiene un valor de potencial electrocinético positivo y para los pH's restantes un valor negativo, teóricamente si la biomasa tuviera una adsorción por mecanismo de intercambio iónico, la mejor adsorción se llevaría a cabo en los valores de pH donde la partícula presenta los valores de potencial electrocinético más negativos, ya que una partícula positiva se vería fuertemente atraída por la carga de la biomasa.

#### 4.1.4. Espectros de I. R. de la Biomasa.

Los espectros de I.R. de la biomasa a los diferentes valores de pH se muestran en la gráfica 5.



Gráfica 5. Espectros de I.R. de la Biomasa a Diferentes pH's.

Las muestras de pH natural y de pH básico presentan espectros idénticos. En la de medio ácido, es decir la de pH 2 hay dos picos que no aparecen con respecto a las dos anteriores, estos picos se presenta a una longitud de onda de 1420 y 874 nm. Esto concuerda con los resultados obtenidos en las valoraciones realizadas con la sosa y el ácido clorhídrico. En medio básico no hay ningún cambio y tampoco hay consumo de sosa, mientras que en medio ácido si existen diferencias y en la valoración con ácido clorhídrico si hubo consumo de ácido, lo cual indica que puede existir algún cambio en los grupos funcionales presentes en la biomasa. De acuerdo a estos resultados el grupo funcional en cuestión debe poseer propiedades básicas y por lo tanto reaccionar con el medio ácido.

## 4.2. Experimentos de Fijación de Cadmio.

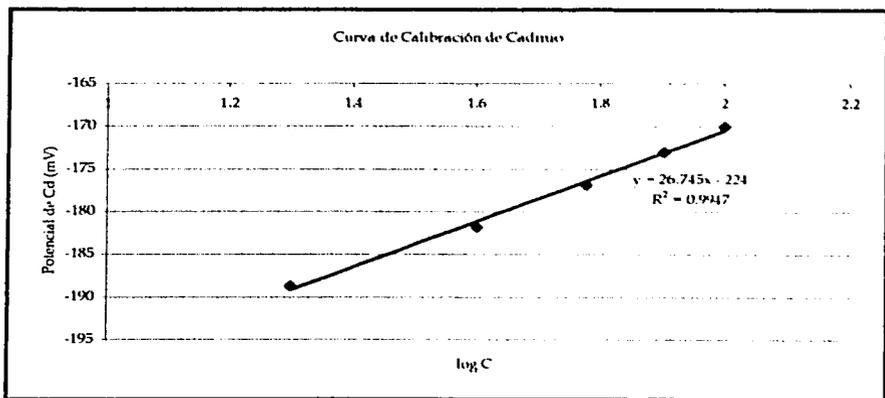
### 4.2.1. Curva de Calibración del Cadmio con el Electrodo de Ion Selectivo.

Como método de determinación de cadmio se seleccionó el electrodo de ion selectivo de cadmio, para lo cual se trazó la curva de calibración de este elemento. Los valores del potencial medidos para cada concentración de cadmio se muestra en la tabla 1.

Concentración de Cd (ppm)	E medido (mV)
20	-188.7
40	-181.8
60	-176.9
80	-173
100	-170

Tabla 1. Valores de Potencial para Diferentes Concentraciones de Cadmio.

Con estos datos se trazó la curva de calibración (gráfica 6).



Gráfica 6. Curva de Calibración de Cadmio con el electrodo de ion selectivo.

A partir del ajuste por mínimos cuadrados se obtiene la siguiente ecuación:

$$E = 26.745 \cdot \log [Cd^{2+}] - 224$$

$$E = m \cdot \log [Cd^{2+}] - C$$

A partir del potencial podemos calcular la concentración de cadmio con la siguiente ecuación:

$$[Cd^{2+}] = 10^{\frac{E+C}{m}}$$

donde:

$[Cd^{2+}]$  = Concentración de Cd en el Tiempo  $x$  (en ppm)

$E$  = Potencial del electrodo al tiempo  $x$  (mV)

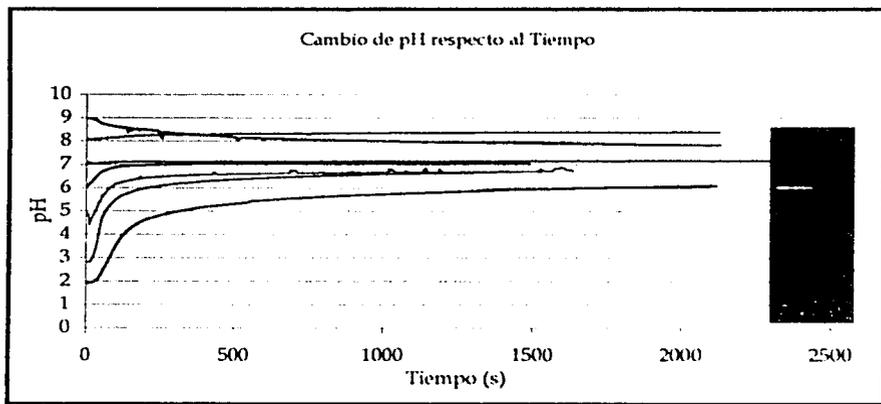
$m$  y  $C$  = Constantes de la Ecuación (estas constantes se determinaron experimentalmente a partir del ajuste por mínimos cuadrados).

El valor de la pendiente  $m$  para la ecuación anterior es de 26.7, el cual es muy cercano al esperado teóricamente, es decir:

$$\frac{59}{2} = 28.5$$

#### 4.2.2. Fijación de Cadmio por la Biomasa en Función del pH.

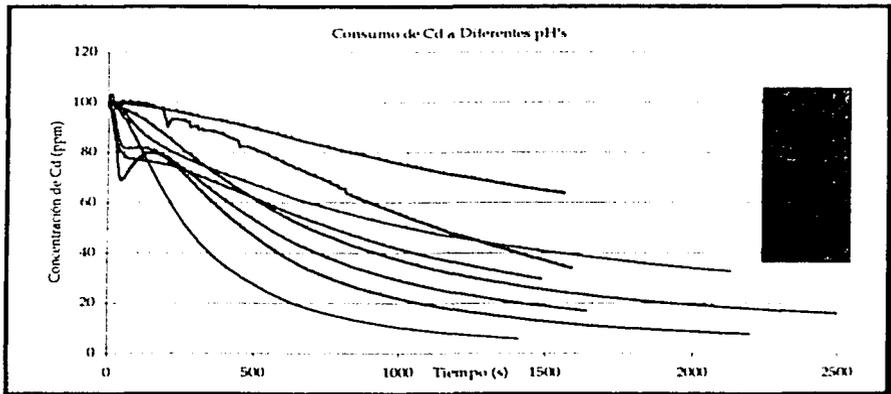
Las pruebas de fijación de cadmio se realizaron en el intervalo de pH de 2 a 9 en presencia de 100 ppm de cadmio. Se monitoreó el pH de la solución y el potencial del electrodo de ion selectivo de cadmio durante 30 minutos. A las soluciones preparadas se les fijó la fuerza iónica en 0.5 con KCl. Las lecturas tanto del pH como del potencial se hicieron cada segundo. Las curvas de pH se presentan en la gráfica 7.



Gráfica 7. Variación del pH en Presencia de Cadmio en Función del Tiempo

En general se observa un comportamiento muy similar al observado en las pruebas realizadas en ausencia de cadmio. La mayor diferencia se tiene a pH 2 donde en este caso si se obtiene una variación importante.

A partir de los valores de potencial medidos y con la ecuación obtenida en la curva de calibración, se obtienen los valores de concentración de cadmio en la solución en función del tiempo. Estos datos se presentan en la gráfica 8.



**Gráfica 8. Consumo de Cadmio por la Biomasa en Función del Tiempo a diferentes Valores de pH.**

Se puede observar que en todos los valores de pH hay una disminución de Cd en la disolución, lo que indica una adsorción de éste por la biomasa, ya que la cantidad de metal disminuye conforme pasa el tiempo. La mayor adsorción ocurre a pH 3, 4, y 5. Estos valores de pH también fueron los más adecuados para la fijación de protones por la biomasa. También en estos valores de pH se tienen pendientes más pronunciadas, lo que indica que la cinética de adsorción es mayor.

En el caso del pH 2 no se tiene un gran consumo de cadmio debido probablemente a la competencia que tendría el cadmio con los protones para fijarse a la biomasa. En cuanto a los demás valores, es decir 6, 7, 8, y 9 no se tiene una gran captación de cadmio y ésta disminuye conforme aumenta el pH.

#### 4.2.3. Optimización del pH para la Fijación del Cadmio

Los resultados obtenidos para la fijación de cadmio a pH 3 libre y controlado se presentan en la tabla 2.

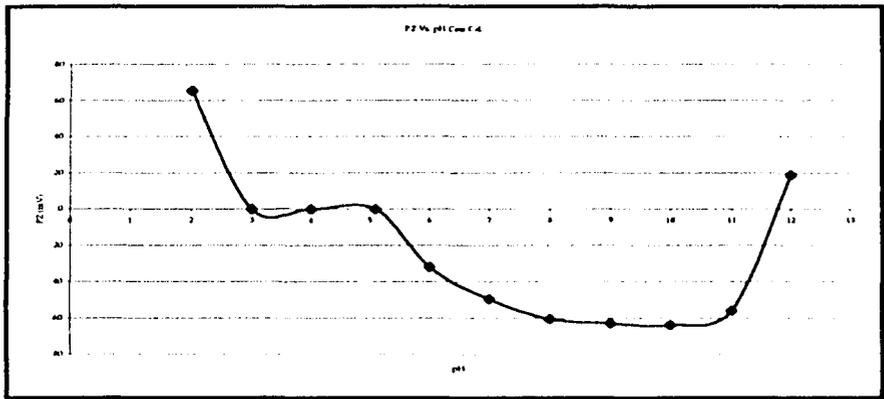
Muestra	Concentración de Cd (ppm)
Original	100
pH 3 libre	10.96
pH 3 Controlado	52.05

Tabla 2. Concentraciones de Cadmio Finales a pH 3 Libre y Controlado.

En estos resultados se observa que la fijación de cadmio fue mucho menor con el pH controlado, por lo que se concluye que es mejor dejar libremente al pH y se puede explicar debido a que cuando se agrega ácido clorhídrico para mantener el pH constante, la cantidad de protones aumenta y éstos compiten con el cadmio por los lugares en las paredes de la biomasa, lo que impide que el metal tenga la misma fijación que cuando se deja libre el pH.

#### 4.2.4.- Determinación del Potencial Electrocinético de la Biomasa en Presencia de Cadmio.

Los valores obtenidos de potencial electrocinético de la biomasa con cadmio en función del pH se presentan en la gráfica 9.

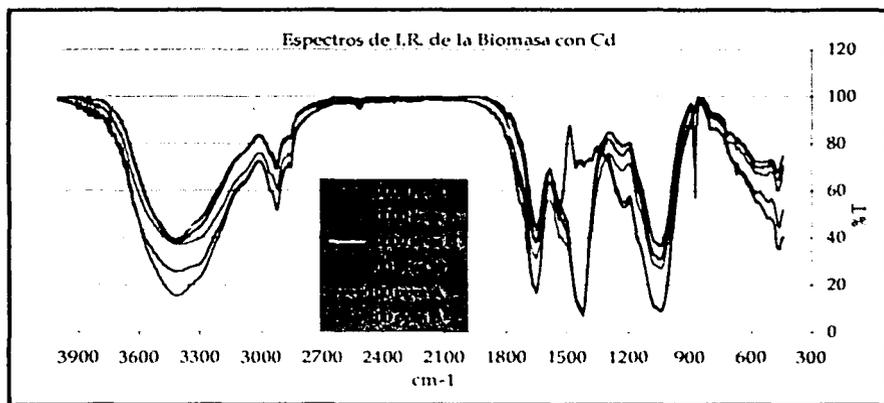


Gráfica 9. Potencial electrocinético de la Biomasa con Cd en Función del pH.

El potencial electrocinético entre pH 3 y 5 es prácticamente nulo, mientras que entre pH 5 y 11.5 es negativo. Los valores más negativos se tienen entre pH 8 y 11. Considerando los valores obtenidos para la biomasa sola (Gráfica 4), si el mecanismo de adsorción de cadmio fuera por intercambio iónico, los mayores rendimientos se deberían obtener a pH's entre 7 y 11, porque un metal cargado con carga positiva se uniría más fácilmente a la capa superficial con mayor carga negativa, sin embargo, éstos se presentan entre pH 3 y 5. Esto implica que el mecanismo predominante de fijación de cadmio sobre la biomasa no es de tipo electrostático.

#### 4.2.5. Espectros de I. R. de la Biomasa con Cadmio.

Los espectros de I.R. obtenidos para la biomasa con cadmio de 100 y 10,000 ppm a diferentes pH's, se presentan en la gráfica 10.



Gráfica 10. Espectros de I.R. de la Biomasa con Cadmio (N, A y B se refieren a que la biomasa se estudió en pH Neutro, Ácido<sub>(pH=2)</sub> y Básico<sub>(pH=10)</sub>)

De la comparación de los espectros de la biomasa con cadmio y sin cadmio, se observa que no existe diferencia alguna. Las variaciones encontradas en el medio ácido con respecto al medio neutro y básico se siguen conservando. Lo que se puede afirmar es que la fijación del cadmio sobre la biomasa no genera modificaciones a nivel de grupos funcionales de la biomasa.

#### 4.2.6. Capacidad de Adsorción y Rendimientos de la Biomasa en Función del pH.

A partir de los resultados obtenidos en los experimentos de fijación del cadmio, se calculó la capacidad de adsorción de la biomasa ( $q$ ) para cada valor de pH mediante la siguiente fórmula:

$$q = \frac{V_0(C_0 - C_e)}{B}$$

Donde:

$q$  es la capacidad de adsorción de la biomasa

$V_0$  es el volumen inicial de la disolución metálica (L)

$C_0$  es la concentración inicial de Cd (mg/L o ppm)

$C_e$  es la concentración final o concentración al equilibrio de cadmio (mg/L).

$B$  es la cantidad de biomasa añadida a la disolución de Cd en el tiempo cero (mg).

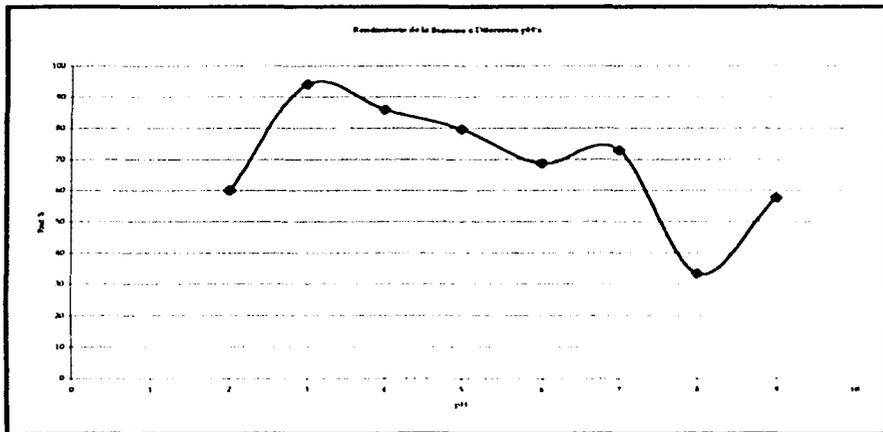
De igual manera se calcularon los rendimientos de fijación (Rnd %) de cadmio mediante la ecuación siguiente:

$$\text{Rnd\%} = 100 - C_e$$

Los resultados se muestran en la Tabla 3 y en la Gráfica 11.

pH	Q	Rnd %
2	0.090	60.04
3	0.141	94.19
4	0.128	85.96
5	0.119	79.76
6	0.103	68.68
7	0.109	72.96
8	0.050	33.37
9	0.086	57.78

**Tabla 3. Rendimientos y Capacidades de la Biomasa a Diferentes Valores de pH.**



Gráfica 11. Rendimientos de Fijación de Cadmio por la Biomasa en Función del pH.

Entre más alto es el valor de  $q$  mayor es la capacidad de adsorción, de tal manera que los valores de pH con los más altos valores de  $q$  serían los más adecuados. Si analizamos los datos obtenidos en la tabla anterior se puede ver que los valores de pH 3, 4 y 5 son los que tienen los mayores valores de  $q$  y de rendimiento, siendo el más alto y el más efectivo el de pH 3. De acuerdo a la literatura, se considera que una biomasa tiene gran capacidad de adsorción si su valor de  $q$  es de 0.15, como acabamos de calcular, la biomasa a pH 3 tiene un valor de 0.14, por lo que podríamos considerarla como adecuada.

#### 4.2.7. Consumo de Protones por la Biomasa en Presencia y en Ausencia de Cadmio.

Para calcular el consumo de protones de la biomasa con y sin cadmio se utilizó la siguiente fórmula:

$$H^+ = (10^{-\text{pH}_i} - 10^{-\text{pH}_f}) \cdot V$$

donde:

$H^+$  es la cantidad de protones consumidos (en moles)

$\text{pH}_i$  es el pH inicial de la solución

$\text{pH}_f$  es el pH final de la solución

$V$  es el volumen de la solución (en litros)

Los resultados se muestran en la tabla 4:

pH	Moles de $H^+$ (Ausencia de Cd)	Moles de $H^+$ (Presencia de Cd)
2	0.00042524	0.00180959
3	0.00015473	0.00022804
4	1.4265E-05	2.6103E-05
5	1.1514E-06	1.8331E-06
9	4.9486E-11	-1.6421E-09

Tabla 4. Consumo de Protones por la Biomasa en Ausencia y en Presencia de Cadmio.

En estos resultados se puede observar que el consumo de protones es mayor en presencia de cadmio que en ausencia de éste. Esto corrobora lo señalado anteriormente, en el sentido de que el mecanismo predominante de fijación de cadmio por la biomasa no es el intercambio iónico ya que de ser así, debería haber liberación de protones al fijar el cadmio.

## V. Conclusiones.

El empleo de lodos activados como biomasa para la biosorción de cadmio es adecuado.

El proceso de biosorción es rápido, llegando a alcanzarse el equilibrio alrededor de 30 minutos después de comenzado el contacto de la biomasa con las disoluciones de cadmio. Aproximadamente el 80% de la adsorción se lleva a cabo en los primeros 10-15 minutos.

Como se reporta en la literatura, uno de los parámetros de mayor influencia en la biosorción es el pH de la solución. La biomasa utilizada consume protones. Este consumo de protones depende del pH inicial, conforme el pH inicial es menor, el consumo es mayor. Para los lodos activados utilizados, el pH más adecuado para la fijación de cadmio es de 3.

A valores de pH por debajo de 3, la capacidad de adsorción de la biomasa se ve reducida, probablemente por competencia con los protones del medio.

La biomasa tiene la mayor capacidad de adsorción en los valores de pH 3, 4 y 5 y debido a que a estos valores de pH la biomasa presenta una carga superficial nula, el mecanismo predominante de fijación de cadmio no es el intercambio iónico.

De acuerdo al valor de  $q$  calculado y considerando el recomendado en la literatura para las biomاسas, los lodos activados se pueden considerar como adecuados para la fijación de cadmio.

## VI. Bibliografía

1. Manaham, S. E. Environmental Chemistry, Sixth Edition, "Environmental Science and Technology". CRC Press LLC, Florida. 1-20, 1994.
2. Metcalf, E. Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales, Capítulo 1. Ed. Labor. Calabria, 235-239-08029 Barcelona. 1-10, 1995.
3. <http://www.mcgill.ca/biosorption/publication/>
4. Spiro, T. G. & Stigliani, W. M. Chemistry of the Environment, "Toxic Chemicals". Prentice-Hall, USA. 311-328, 1996.
5. <http://www.engg.ksu.edu/HSRC/96Proceed/gardea2.html>
6. Mayers, G. J., Davidson, P. W., Weitzman, M. & Lanphear, B. P. "Contribution of Heavy Metals to Developmental Disabilities in Children". Vol. 3, 239-245, 1997.
7. Manaham, S. E. Environmental Chemistry, Sixth Edition, "Technology, Resources, and Energy". CRC Press LLC, Florida. 487-526, 1994.
8. Serie Quest "Alcantarillas" Vol. Ciencia y Tecnología. Ed. Planeta. España. 61, 1995.
9. Serie Quest "Abastecimiento de Agua" Vol. Ciencia y Tecnología. Ed. Planeta. España. 60, 1995.

10. Serie Quest "Recursos Hidrológicos" Vol. Planeta Tierra. Ed. Planeta. España. 60, 1995.
11. Serie Quest "Medio Ambiente y Enfermedades" Vol. Planeta Tierra. Ed. Planeta. España. 54, 1995.
12. Gesamp. IMO/FAO/UNESCO/WHO/IAEA/U/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution: Report of the fourteen session, Viena, 26-30 March, Viena International Atomic Energy Agency (Reports and Studies No. 21). 1984.
13. Gesamp. IMO/FAO/UNESCO/WHO/IAEA/U/UNEP Joint Group of experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution: Report of the seventeenth session, Rome, Geneva. World Health Organization (Reports and Studies No. 31). 1987.
14. Page, A. L. Bingham, F. T. & Chang, A. C. Cadmium. In: Leep, N. W. Ed. Effect of heavy metal pollution of plants. London, Applied Science, Vol. 1, 77-109, 1981.
15. Korte, F. Ecotoxicology on Cadmium: General overview. Ecotoxicol. Environ. Vol. 7, 3-8, 1983.
16. Nriagu, J. O. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals. London, Nature. Vol. 338, 47-49, 1989.
17. Scheumner, A. M. The chronic toxicity of aluminium, cadmium, mercury and lead in birds; a review. Environ. Pollut. Vol. 46, 263-295, 1987.

18. Boyle, E.A., Scalter, F. & Edmond, J. M. On the marine geochemistry of cadmium. London, Nature Vol. 263, 43-44, 1976.
19. Casarett and Doull. Casarett & Coull's Toxicology. The Basic Science of Poisons. Mc. Graw Hill. 4<sup>a</sup> Ed. 624-637, 1991.
20. Wilson, D. N. Cadmium - Market Trends and Influences, In: Cadmium 87. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Cadmium Conference, London, Cadmium Association. 9-16, 1988.
21. Nriagu, J. O. & Pacyna, J. M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. London, Nature. Vol. 333, 134-139, 1988.
22. Krell, U. & Roeckner. Model simulation of the atmospheric input of lead and cadmium into the North Sea. Atmos. Environ. Vol. 22 [2], 375-381, 1988.
23. Hutton M. & Symon C. The quantities of cadmium, lead, mercury and arsenic entering the U.K. environment from human activities. Sci. Total Environ., Vol. 32 [57], 129-150, 1986.
24. Fleisher, M., Sarofim, A. F., Fasset, D. W., Hammond, P., Shacklette, H. T., Nisbet, I. C. T. & Epstein, S. Environmental impact of cadmium: a review by the panel of Hazardous Trace Substances. Environ. Health Perspect. Vol. 12 [5], 253-323, 1974.
25. Lindberg, S. E., Turner, R. R. & Lovett, G. M. Process of atmospheric deposition of metals acids to forest. Annual Meeting of the Air Pollution

- Control Association, New Orleans, 20 June 1982, Pittsburgh, Pennsylvania, Air Pollution Control Association, (Conference Proceedings 75), 14, 1982.
26. Buchauer, M. J. The effects of zinc and cadmium pollution on forest vegetation. *Bull. New Jersey Acad. Sci.* Vol. 17 [2], 42, 1972.
27. Yamagata N. & Shigematsu Y. Cadmium pollution in perspective, Tokyo. *Bull. Inst. Public Health.* Vol. 24, 18-24, 1970.
28. Cadmium Environmental Aspects. *Environmental Health Criteria 135.* World Health Organization. 68-75. 1992.
29. Chi, T. Adsorption Calculation and Modeling "Chapter 1: Introduction". Butterworth-Heinemann, USA. 1-7, 1994.
30. Forster, C. F., Wase, D. A. J. Biosorbent for Metal Ions, "Biosorption of Heavy Metals: An Introduction". Taylor & Francis Ltd, Great Britain. 1-10, 1997.
31. Volesky, B. Biosorption of Heavy Metals, "Chapter 1.2 Removal and Recovery of Heavy Metals by Biosorption". CRC press, TNC, USA. 7-43, 1990.
32. Allen, S. J. & Brown, P. A. "Isotherm Analyses for Single Component and Multi-component Metal Sorption onto Lignite". *J. Chem. Tech. Biothecnol.* Vol. 62, 17-24, 1995.
33. Manahan, S. E. *Environmental Chemistry, "Water Treatment"*. CRC Press LLC, Sixth Edition, Florida. 223-262, 1994.
-

34. Gadd, M. G. "Biosorption". Chem. and Ind. Vol. 13, 421-426, 1990.
35. Wehrheim, B. & Wettern, M. "Comparatives Studies of the Heavy Metal Uptake of Whole Cells and Different Types of Cell Walls from *Chlorella fusca*", Biotech. Tech. Vol. 8 [4], 227-232, 1994.
36. Garnham, G. W. Biosorbent for Metal Ions, "The use of Algae as Metal Biosorbents". Taylor & Francis LTD. Great Britain. 11-37, 1997.
37. Torma, A. E. & Apel, W. A. Residues and Effluents-Processing and Environmental Considerations, "Recovery of Metals From Dilute Effluent Streams by Biosorption Methods". Edited by Ramans C. Reddy, William P. Imrie & Paul B. Queneau. The Minerals, Metals & Materials Society. 1991.
38. Tsezos, M., Remeudaki, E. & Angelatou, V. "A Systematic Study on Equilibrium and Kinetics of Biosorptive Accumulation. The Case of Ag and Ni". International Biodeterioration & Biodegradation. 129-153, 1995.
39. Rossi, G. Biohydrometallurgy, "Chapter 6: Biosorption". Mc Graw Hill, New York. 553-582, 1990.
40. Volesky, B. Biosorption of Heavy Metals, "Chapter 4.3: Economics". CRC Press Tnc, USA. 371-378, 1990.
41. Volesky, B. Biohydrometallurgy and the environment toward the mining of the 21<sup>st</sup> century, Memorias del Congreso IBS99 "Biosorption for the next Century". Madrid, Spain. 1999.

42. Butter, T. J., Evison, L. M., Hancock, I. C. & Holland, F. S. "The Kinetics of Metal Uptake By Microbial Biomass Implications for the Design of a Biosorption Reactor". *Wat. Sci. Tech.* Vol. 38 [6], 279-286, 1998.
43. Modak, J. M. and Natarajan, K. A. Biosorption of Metals using Nonliving Biomass. *Minerals and Metallurgical Processing.* Vol. 12 [4], 184-196, 1995.
44. Tsezos, M. and Volesky, B. Biosorption of Uranium and Thorium. *Biotechnol. Bioeng.* Vol. 23, 593-604, 1981.
45. Gadd, G. M. and White, C. Removal of Thorium from Simulated Acid Process Stream by Fungal Biomass. *Biotechnol. Bioeng.* Vol. 33, 592-597, 1989.
46. Luef, E. Preyand, T. Kubicek, C. P. Biosorption of Zinc by Fungal Mycelial Wastes. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* Vol. 34, 688-692, 1991.
47. Townsley, C. C., Ross, I. S. and Atkins, A. S. Biorecovery of Metallic Residues From Various Industrial Effluents Using Filamentous Fungi. In: *Fundamental and Applied Biohydrometallurgy.* Lawrence, R.W., Branion, R. M. Ebner, H.G. Editors, Elsevier: Amsterdam. 279-286, 1986.
48. Asku, Z. and Kutsal, T. A Bioseparation Process for Removing Lead (II) Ions From Waste by Using *C. Vulgaris*. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* Vol. 52, 109-118, 1991.
49. Fourest, E. and Roux, J. C. Heavy Metals Biosorption by Fungal Mycelial by Products: Mechanisms and Influence of pH. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* Vol. 37, 399-403, 1991.

50. Leush, A., Holan, Z. R. and Volesky, B. Biosorption of Heavy Metals ( Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) by Chemically-Reinforced Biomass of Marine Algae. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* Vol. 62, 279-288, 1995.
51. De Carvalho, R. P., Chong, K. H. and Volesky, B. Evaluation of the Cd, Cu and Zn Biosorption in Two Metal Systems Using an Algal Biosorbent. *Biotechnol. Prog.* Vol. 21 [11], 39-44, 1995.
52. Garnham, W. G. Codd, G. A. and Gadd, G. M. Accumulation of Zirconium by Microalgae and Cyanobacteria. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* Vol. 39, 666-672, 1993.
53. Freiser, H. *Concepts and Calculation in Analytical Chemistry.* CRC. Press, 1992.
54. Mitani, T. C., Nakajima, I. S. and Ishii, H. Effects of Ionic Strength on the Adsorption of Heavy Metals by Swollen Chitosan Beads. *J. Environ. Sci. Health*, Vol. A30 [3], 669-674, 1995.