



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**



**FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL**

**LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**Remoción de Cu, Zn y Fe en aguas residuales de la actividad de soldadura y herrería de la localidad de San Francisco Cheje, municipio de Jocotitlán, empleando residuos de *Zea mays***

**TESIS**

PRESENTAN:

Jocelyn Miranda Saenz

Zayra Lizeth Medina Rosales

DIRECTOR DE TESIS

**Dr. En C.A. Eduardo Campos Medina**

## Índice

Índice de Tablas.....	6
Índice de Figuras .....	7
Resumen.....	9
Introducción.....	11
Planteamiento del Problema.....	13
Justificación.....	16
Hipótesis.....	19
Objetivos.....	19
Capítulo 1.....	20
1.1 Contaminación.....	21
1.1.1 Contaminación del aire.....	21
1.1.2 Contaminación del suelo.....	22
1.2 Contaminación del agua.....	22
1.2.1 Contaminantes orgánicos.....	23
1.2.1 Contaminantes inorgánicos.....	24
1.3 Contaminación por metales.....	24
1.3.1 Efectos de la contaminación por metales.....	25
1.4 Parámetros de la calidad del agua.....	26
1.4.1 Parámetros fisicoquímicos del agua.....	26
1.4.1.1 Composición física.....	26
1.4.1.2 Composición química.....	27
1.4.2 Parámetros biológicos.....	28

1.5 Normas mexicanas.....	29
1.5.1 NOM-127-SSA1-1994.....	29
1.5.1.1 Límites permisibles de características químicas.....	29
1.5.2 NOM-001-SEMARNAT-1996.....	30
1.5.3 NOM-002-SEMARNAT-1996.....	32
1.5.4 NOM-003-SEMARNAT-1997.....	33
1.5.5 NMX-AA-051-SCFI-2001.....	34
Capítulo 2.....	35
2.1 Actividades antrópicas (orientadas a la generación de Cu, Zn y Fe).....	36
2.1.1 Cobre (Cu).....	36
2.1.2 Zinc (Zn).....	37
2.1.3 Hierro (Fe).....	37
2.2 Efectos tóxicos.....	38
2.2.1 Cobre (Cu).....	38
2.2.2 Zinc (Zn).....	39
2.2.3 Hierro (Fe).....	40
2.3 Tratamientos generales de las aguas.....	41
2.3.1 Tratamientos de las aguas contaminadas.....	41
2.3.1.1 Tratamiento primario.....	41
2.3.1.2 Tratamiento secundario.....	41
2.3.1.3 Tratamiento terciario.....	42
2.4 Tratamientos orientados a remover metales.....	42
2.4.1 Procesos electroquímicos.....	43

2.4.2 Tecnología de membranas.....	44
2.4.3 Intercambio iónico.....	46
2.4.4 Biorremoción.....	47
2.4.5 Procesos de adsorción.....	47
Capítulo 3.....	49
3.1 Adsorción.....	50
3.2 Características y tipos de adsorción.....	52
3.2.1 Adsorción física.....	52
3.2.2 Adsorción química.....	52
3.3 Factores que afectan la adsorción .....	53
3.4 Estudios de adsorción en los cuales se han removido Cu, Zn y Fe. Procesos de biorremoción.....	53
Capítulo 4.....	63
4.1 Diagrama experimental.....	64
4.2 Desglose por etapas.....	65
4.2.1 Preparación de soluciones sintéticas de Cu, Zn y Fe.....	65
4.2.2 Estudio de predominio de especies en función del pH .....	65
4.2.3 Muestreo de la planta Zea mays.....	65
4.3 Preparación del biomaterial.....	65
4.3.1 Recolección del olote.....	65
4.3.2 Secado y triturado.....	65
4.4 Proceso de biosorción empleando olote (Zea mays).....	65
4.5 Muestreo.....	67
4.6 Separación de las soluciones líquidas y biomaterial.....	67

4.7 Cuantificación de Cu, Zn y Fe mediante absorción atómica.....	67
4.8 Determinación de remoción de Cu, Zn y Fe.....	67
4.9 Estudio de las isothermas.....	68
Capítulo 5.....	69
5.1 Resultado del estudio de predominio de especies en función del pH.....	70
5.1.1 Graficas de predominio de especies.....	70
5.2 Resultados de cuantificación de los tres elementos.....	73
5.3 Cinéticas de remoción.....	76
5.4 Mecanismo de adsorción de Cobre, Hierro y Zinc.....	80
5.5 Cálculos de isothermas.....	85
5.5.1 Estudio de las isothermas.....	85
5.5.1.1 Graficas de las isothermas.....	87
Conclusiones.....	93
6. Bibliografía.....	95

### Índice de tablas

Tabla 1.5.1.1. Límites permisibles de características químicas.....	29
Tabla 1.5.2. Límites Máximos permisibles para metales pesados y cianuros.....	31
Tabla 1.5.3. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas.... residuales a los sistemas alcantarillados urbano o municipal	33
Tabla 5.2.1 Porcentaje de remoción a $1 \text{ mgL}^{-1}$ .....	73
Tabla 5.2.2 Porcentaje de remoción a $3 \text{ mgL}^{-1}$ .....	74
Tabla 5.2.3 Porcentaje de remoción a $5 \text{ mgL}^{-1}$ .....	74
Tabla 5.2.4 Porcentaje de remoción a $7 \text{ mgL}^{-1}$ .....	75
Tabla 5.2.5 Porcentaje de remoción a $10 \text{ mgL}^{-1}$ .....	76
Tabla 5.5.1.1 Resultados de las variables para las isotermas de Cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ).....	86
Tabla 5.5.1.2 Resultados de las variables para las isotermas de Hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ).....	86
Tabla 5.5.1.3 Resultados de las variables para las isotermas de Zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ).....	86

## Índice de figuras

Figura 2.4.1.1 Celda Electroquímica.....	44
Figura 2.4.2 Membrana Semipermeable.....	46
Figura 2.4.3 Intercambio iónico.....	47
Figura 3.1.1 Adsorción.....	50
Figura 3.1.2 Fenómenos de adsorción, absorción y sorción.....	50
Figura 3.2.1.1 Adsorción física.....	52
Figura 3.2.2.1 Adsorción química.....	53
Figura 4.4.1 Recipientes artesanales.....	66
Figura 5.1.1.1 Predomino de especies para el cobre.....	70
Figura 5.1.1.2. Predomino de especies para el hierro.....	71
Figura 5.1.1. 3 Predomino de especies para el zinc.....	72
Figura 5.3.1. Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a 1 mgL <sup>-1</sup> .....	77
Figura 5.3.2 Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a 3 mgL <sup>-1</sup> .....	77
Figura 5.3.3 Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a 5 mgL <sup>-1</sup> .....	78
Figura 5.3. 4 Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a 7 mgL <sup>-1</sup> .....	79
Figura 5.3.5 Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a 10 mgL <sup>-1</sup> .....	80
Figura 5.4.1. Estructuras de la Celulosa y Hemicelulosa.....	81
Figura 5.4.2 Mecanismo de adsorción del Cu, Fe y Zn.....	82
Figura 5.4.3 Mecanismo de adsorción del Cu, Fe y Zn.....	83
Figura 5.4.4 Mecanismo de adsorción del Cu, Fe y Zn.....	84
Figura 5.5.1.1.1 Isoterma de Langmuir para el Cobre (Cu <sup>2+</sup> ).....	87
Figura 5.5.1.1.2 Isoterma de Freundlich para el Cobre (Cu <sup>2+</sup> ).....	88

Figura 5.5.1.1.3 Isoterma de Langmuir para el Hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ).....	88
Figura 5.5.1.1.4 Isoterma de Freundlich para el Hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ).....	89
Figura 5.5.1.1.5 Isoterma de Langmuir para el Zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ).....	90
Figura 5.5.1.1.6 Isoterma de Freundlich para el Zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ).....	90



## Resumen

Una de las principales fuentes de contaminación de las aguas es el vertido de efluentes por pequeñas, medianas y grandes industrias, sin un tratamiento previo que en un determinado momento se puede convertir en una problemática ambiental al afectar a ecosistemas acuáticos y terrestres así como la salud de la población humana. Las técnicas convencionales para la eliminación de metales pesados presentan en ocasiones, dificultades para lograr el cumplimiento de los límites máximos permisibles de la normatividad ambiental, siendo necesaria la búsqueda de nuevas técnicas o procedimientos alternativos para reducir o eliminar este tipo de emisiones. En este sentido las técnicas de adsorción empleando algún tipo de biomaterial han mostrado en los últimos años un gran potencial como alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados.

En este trabajo se realizó un estudio sobre el proceso de adsorción para la eliminación de los iones de hierro, cobre y zinc en aguas residuales de la actividad de soldadura y herrería de la localidad de San Francisco Cheje, Municipio de Jocotitlán, empleando residuos de *Zea mays* (olote).

Para lo cual se prepararon soluciones sintéticas a diferentes concentraciones de cada elemento. A la par se efectuó un estudio de predominio de especies para determinar cuál sería el valor del pH óptimo al cual se estudiaría la más eficiente adsorción, se determinó que el pH sería ácido por lo cual se agregaron pequeños volúmenes de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) hasta obtener un pH de 2. Después se procedió a la recolección de la planta de *Zea mays* así como su preparación ya que de la planta solo se utilizó el olote. El proceso consistió en secado y triturado para posteriormente llevar a cabo el proceso de biosorción. En este paso se construyó de manera artesanal dos recipientes que contuvieron las soluciones de los tres elementos a separar. En el primer recipiente se agregó la cantidad de 60 gr del biomaterial y 11 Lt de la solución sintética que tuvo disueltos los tres elementos, para favorecer el contacto entre el biomaterial y los analitos. En este mismo recipiente se colocó un motor mecánico que propicio una turbulencia que favoreció el proceso de biosorción.

Posteriormente se llevó a cabo el muestreo del biomaterial y de pequeños volúmenes de agua el cual se realizó en diferentes tiempos; que fueron a los 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180 minutos. Las soluciones recolectadas del proceso que contienen disueltos al Cu, Zn y Fe se llevaron

a un equipo de absorción atómica para cuantificar las concentraciones de cada elemento y estas se determinaron los porcentajes de remoción de Cu, Zn y Fe correspondientes. Una vez llevada a cabo la adsorción, para cada una de las soluciones se procedió al cálculo de las respectivas isothermas de Langmuir y Freundlich.

## Introducción

La actividad humana genera impactos ambientales que repercuten en los medios físicos, biológicos y socioeconómicos afectando a los recursos naturales con el consiguiente deterioro de las condiciones de salud en que se desenvuelve la vida del hombre. Esos impactos se hacen sentir en las aguas, el aire, los suelos y paradójicamente en la propia actividad humana que les da origen. (Acuña Carmona , y otros, 2003)

La creciente preocupación por los problemas ambientales, surge de la percepción y constatación de un doble peligro candente: el agotamiento de los recursos naturales no renovables, el deterioro creciente del medio natural como consecuencia del impacto de los desechos provenientes de la civilización industrial y que se cristaliza en diversas formas de contaminación, polución, efecto invernadero, agujero de ozono, vertidos sólidos, líquidos, etc. (Acuña Carmona , y otros, 2003)

Derivado de las actividades antropogénicas una de las principales problemáticas que se tienen hoy en día no nada más en México sino en todo el mundo es la contaminación del agua principalmente por metales pesados. Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. Las aguas procedentes de las industrias, minerías, la de recubrimientos metálicos, soldaduras, fundidoras, herrerías y otras más, contaminan las aguas con diversos metales que en concentraciones elevadas resultan tóxicos para la salud así como para la flora y faunas terrestres y acuáticas .Además, la inadecuada disposición de residuos metálicos también ha ocasionado la contaminación del suelo, agua superficial y subterránea. Sin embargo, fuentes como la agricultura y la eliminación de residuos también contribuyen a su contaminación.

En general se considera como “contaminante” al exceso de materia o energía que provoque daño a los humanos, animales plantas y bienes o bien que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua. Por lo que las exigencias higiénicas y el grado de avance de la ciencia y tecnología para determinar los efectos y medir los contaminantes en el agua siguen creciendo. Existen distintos métodos para la remoción de metales pesados, como son métodos físicos, biológicos y químicos, ya que el problema del agua es complejo y para hacer uso de ella se requiere que tenga calidad adecuada.(Jiménez Cisneros, 2001). Los métodos

convencionales para la eliminación de metales pesados tales como intercambio iónico o precipitación son ineficaces o muy caros en la mayoría de los casos. Según (García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012) el fenómeno de adsorción es una opción viable para el tratamiento de aguas residuales y es considerado un tratamiento de pulimento y refinado, y por lo tanto al final de los sistemas de tratamiento más usuales, especialmente con posterioridad a un tratamiento biológico. La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento este en auge.

Normalmente para que se lleve a cabo la adsorción se debe de seleccionar un biomaterial, el más adecuado para la investigación que se pretende desarrollar, que actualmente la vertiente es que son residuos orgánicos. A estos residuos se les debe de dar un pre-tratamiento, que usualmente es un secado durante varias horas con la finalidad de que las moléculas de agua que se encuentran dentro del biomaterial se evaporen(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012).

En este trabajo se trata de dar una solución a una problemática ambiental como lo es la contaminación de agua mediante el fenómeno de adsorción empleando biomaterial de *Zea mays* para la eliminación de iones de cobre, hierro y zinc asimismo se pretende dar una alternativa diferente para tratamiento de aguas residuales derivadas de talleres de herrerías y soldaduras en la localidad de San Francisco Cheje municipio de Jocotitlán.

## **Planteamiento del Problema**

El crecimiento demográfico, desarrollo industrial y urbanización, son factores que han venido evolucionando rápidamente y han ocasionado en las últimas décadas la contaminación del agua de la mayoría de los ríos, lagos y mares debido a las diversas actividades humanas.

Las impurezas del agua pueden originar efectos adversos a la salud de las personas durante diferentes periodos de exposición o de tiempo, como constituyentes importantes de muchas aguas se pueden encontrar un número importante de metales pesados aunque su cuantificación sea a niveles diferentes. Las aguas residuales contienen un gran número de estos metales pesados entre los que destacan; níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro, mercurio, entre otros. Las fuentes habituales de aguas residuales que contienen grandes cantidades de metales como el cromo, cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc proceden, principalmente, de limpieza de metales, recubrimientos, curados, refinado de fosfato y bauxita, generación de cloro, fabricación de baterías y teñidos (SEMARNAT, sin año)

El Cobre es una sustancia muy común que ocurre naturalmente y se extiende a través del ambiente a través de fenómenos naturales, los humanos usan ampliamente el Cobre. Por ejemplo este es aplicado en industrias y en agricultura. La producción de Cobre se ha incrementado en las últimas décadas y debido a esto las cantidades de Cobre en el ambiente se ha expandido. Puede ser encontrado en muchas clases de comidas, en el agua potable y en el aire. Debido a que absorbemos una cantidad eminente de cobre cada día por la comida, bebiendo y respirando. La absorción del Cobre es necesaria, ya que es un elemento traza que es esencial para la salud de los humanos. Aunque el ser humano puede manejar concentraciones de Cobre proporcionalmente altas, mucho Cobre puede también causar problemas de salud. (Lenntech, sin año)

La producción mundial de Cobre está todavía creciendo. Esto básicamente significa que más y más Cobre termina en el medioambiente. Los ríos están depositando barro en sus orillas que están contaminados con Cobre, debido al vertido de aguas residuales contaminadas con este elemento. Este metal puede ser liberado en el medioambiente tanto por actividades humanas como por procesos naturales. Ejemplo de fuentes naturales son las tormentas de polvo, descomposición de la vegetación, incendios forestales y aerosoles marinos. Unos pocos de ejemplos de actividades

humanas que contribuyen a la liberación del Cobre han sido ya nombrados. Otros ejemplos son la minería, la producción de metal, la producción de madera y la producción de fertilizantes fosfatados. (Lenntech, sin año )

El zinc es una sustancia muy común que ocurre naturalmente. Muchos alimentos contienen ciertas concentraciones de zinc. El agua potable también contiene cierta cantidad de zinc. La cual puede ser mayor cuando es almacenada en tanques de metal. Las fuentes industriales o los emplazamientos para residuos tóxicos pueden ser la causa del zinc en el agua potable llegando a niveles que causan problemas. (Lenntech, sin año )

El zinc entra al aire, el agua y el suelo como resultado tanto de procesos naturales como actividades humanas. Inhalar grandes cantidades de zinc (en forma de vapor o polvos durante fundición o soldadura) puede producir una enfermedad de corta duración llamada fiebre de vapores de metal que es generalmente reversible una vez que la exposición cesa. ((ATSDR)., 2005)

El hierro es uno de los elementos más abundantes en la tierra. Es un elemento esencial para los seres humanos, y se utiliza en una variedad de procesos industriales. También se encuentra en el agua potable. Los altos niveles de hierro puede ser fatales, pero la cantidad que se encuentra en el agua potable suele ser demasiado baja para ser peligrosa. Sin embargo, los altos niveles de hierro en el agua potable pueden causar efectos no sanitarios, incluyendo el mal gusto y la decoloración. (LEVESTRONG, 2013)

Puede provocar conjuntivitis, coriorretinitis, y retinitis si contacta con los tejidos y permanece en ellos. La inhalación crónica de concentraciones excesivas de vapores o polvos de óxido de hierro puede resultar en el desarrollo de una neumoconiosis benigna, llamada sideriosis. (LENNTECH, 2015)

Finalmente los metales pesados contenidos en el agua, se han convertido en un tema de interés, tanto en el campo ambiental como en el de salud pública. Los daños que causan son tan severos y en ocasiones tan ausentes de síntomas, que las autoridades ambientales y de salud de todo el mundo han puesto mucha atención en minimizar la exposición de la población, en particular de la población infantil, a estos elementos tóxicos. Estos factores indican que la solución a estos

problemas no puede esperar y es necesario tomar acciones para descontaminar de metales pesados los cuerpos de agua.

La principal actividad económica de la localidad de San Francisco Cheje municipio de Jocotitlán es la herrería y la soldadura, siendo una de las principales fuentes de contaminación del agua pues no cuentan con un tratamiento previo antes de desembocar en la presa la Yerbabuena. Por lo cual, la propuesta de esta investigación es aportar una alternativa de solución para esta actividad que se desarrolla en la localidad, ya que, el agua de la presa es utilizada para riego y las altas concentraciones de metales pueden afectar a la población.

### **Justificación**

El agua es un recurso renovable, ya que es parte de un ciclo natural continuo e interminable. Sin embargo, se puede contaminar por las actividades humanas y volverse no útil para muchos de sus propósitos e, incluso, volverse nociva para los seres vivos que la utilizan. La contaminación del agua es un problema que se da en todos los niveles y lugares del mundo, y está muy relacionado con la contaminación del aire y con el modo en que el hombre utiliza los recursos de la Tierra. (Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norteamérica CICEANA, sin año)

El agua es indispensable, no tiene sustituto y no se conoce forma de vida que prescindiera de ella; los bosques, ciudades, polos, zonas industriales, pastizales, plantíos, bacterias, flora y fauna, todos de una u otra manera necesitan agua. La vida se originó en el agua y así mismo la mantiene, es uno de los factores que regula el clima del planeta, permite la existencia de los ecosistemas y de la humanidad. La importancia de la calidad del agua en el uso de varios procesos industriales, urbanos, comerciales y naturales ha permitido evidenciar la necesidad de eliminar dichas impurezas que afectan esta calidad. (SEMARNAT, sin año)

Se presentó un estudio en El río San Pedro, que es el principal cuerpo de agua superficial del Estado de Aguascalientes. Cruza la entidad en dirección norte-sur, cubriendo una distancia en línea recta de aproximadamente 90 km, hasta su confluencia con el río Santiago en el Estado de Jalisco. Con la finalidad de estudiar el nivel de contaminación del río y la probable infiltración de contaminantes al acuífero del Valle de Aguascalientes, se tomaron muestras de agua y sedimentos de 50 sitios seleccionados a lo largo del río. Se evaluaron además 17 pozos aledaños al río (a menos de 300 m). Se realizaron dos campañas de muestreo, una en temporada de sequía y otra posterior a las lluvias. Se determinó pH, oxígeno disuelto, DBO5, DQO, P-total, N-total, fenoles, anilinas, detergentes (SAAM), coliformes fecales y metales pesados (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn). El agua del río San Pedro presentó elevadas concentraciones de materia orgánica, P-total, N-total, detergentes y coliformes fecales. Algunos sitios mostraron contaminación moderada por Al y Fe. De acuerdo con los criterios de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos, todos los sedimentos presentaron contaminación por As; el 50% de los mismos por Pb y Zn, el 25% con Cu y aproximadamente el 13% con Mn y Cr. Tres sedimentos presentaron contaminación moderada por Fe y otros tres por Hg. Los resultados obtenidos en los pozos de agua no mostraron



evidencia concluyente de contaminación del acuífero por aguas superficiales.(Guzman Colis, Ramírez López, Thalasso, Rodriguez Narciso, Guerrero Barrera, & Avelar Gonzáles, 2011)

Otro estudio llevado a cabo sobre la contaminación por metales fue la determinación de posibles especies de hierro, manganeso y cobre presentes en el agua de la presa J. A. Alzate, en el Estado de México. Mediante resina a dos profundidades (superficie y fondo) y en 4 zonas de la presa. Los tres metales se hallaron asociados a las partículas en suspensión en un 94%del total. El hierro y el manganeso disueltos, en su mayoría están relacionados con las fracciones denominadas “inerte o lentamente lábil”. Las concentraciones de las especies predominantes en las diferentes fracciones son más bajas en el fondo que en la superficie. La evolución de las concentraciones de los tres metales a lo largo del medio acuoso y de sus especies muestra que el embalse se comporta espontáneamente como una laguna de tratamiento.(D. Barcelo, E. Solis, Gonzalez, L. Bussy, Avila, & A. García, sin año)

La presencia de metales pesados en aguas residuales industriales y municipales, exige un tratamiento efectivo de las mismas para su uso posterior o bien para un confiable desecho a corrientes o cuerpos de agua tales como ríos, lagos, lagunas, presas, estuarios y costas; todo ello acorde a la normatividad establecida. El propósito de este trabajo fue la eliminación de metales pesados de aguas de desecho industrial. El contenido de metales en estas debe disminuir por precipitación bajo la técnica de aglomeración esférica. Se determinaron los parámetros óptimos de reacción (rangos de pH, velocidad de dosificación de Na OH y sobresaturación de la solución) para los procesos de precipitación y aglomeración de los metales pesados en modelos de solución acuosa y en función de la temperatura (de 20 a 80 °C) y de la concentración de iones metálicos (de 74 a 1236 mg/L) en la solución. Los resultados de investigación en los patrones se aplicaron a muestras verdaderas de aguas residuales industriales y municipales altamente concentradas con Co, Fe, Zn, Al, Ni, Cd y Mn. Los resultados muestran que el crecimiento de las partículas, así como su separación del medio; dependen principalmente de la sobresaturación de Na OH en la solución. Es de fundamental importancia la completa precipitación del metal, que ocurre en un rango específico de pH.(Proal Najera, Martinez Tabche, & Mueller, sin año )

Finalmente la localidad San Francisco Cheje tiene como actividad principal, la herrería y soldadura por lo que el entorno está expuesto a contaminación por metales y es necesario generar un método alternativo para la remoción de estos metales en el agua, y de esta manera el líquido tratado pueda ser reutilizado; ya que las aguas residuales de la localidad, desembocan en la presa “La Yerbabuena”, cuyas aguas son utilizadas para riego.

La propuesta de investigación ayudara a reducir las concentraciones de estos elementos en las aguas residuales de los sitios o lugares donde la actividad principal es la soldadura y herrería.

## **Hipótesis**

Mediante el uso del biomaterial *Zea mays* vía adsorción se reducirán las concentraciones de los elementos cobre, zinc y hierro disueltos en fase acuosa, de tal manera que se cumplirá con los límites permisibles que se señalan en la NORMA OFICIAL MEXICANA **NOM-127-SSA1-1994**. "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".

## **Objetivos**

### ***General***

Establecer el grado de remoción de los elementos cobre, hierro y zinc, disueltos en fase acuosa, mediante un proceso de adsorción, empleando un material orgánico de desecho que es el *Zea mays*. Estableciendo que es lo que sucede durante este proceso de remoción.

### ***Específicos***

- Preparar soluciones sintéticas de los elementos Cu, Zn y Fe a diferentes concentraciones.
- Recolectar y preparar el biomaterial *Zea mays* para efectuar el proceso de biosorción.
- Realizar los contactos entre el biomaterial y las soluciones sintéticas en función del tiempo.
- Estudiar el proceso de adsorción que se lleva a cabo durante estos tiempos de contacto y establecer los porcentajes de remoción alcanzados en este proceso experimental.
- Determinar el mecanismo de adsorción que se presenta en dicho fenómeno.
- Establecer qué tipo de isoterma es la que más se ajusta y explica de manera teórica el proceso de adsorción de estos elementos disueltos en fase acuosa.

# Capítulo 1

## 1.1. Contaminación

La contaminación es uno de los problemas ambientales más graves que afecta a nuestro planeta, y se produce cuando la presencia cuantitativa o cualitativa de materia o energía genera un desequilibrio ambiental. De manera más clara la contaminación puede definirse como la adición de cualquier sustancia al medio ambiente en cantidades tales que cause efectos adversos en seres humanos, animales, vegetales, materiales o en funcionamiento natural del ecosistema. (Beltrami, 2001)

### 1.1.1 Contaminación del aire

Jiménez Cisneros menciona en su libro de Contaminación Ambiental en México que debido a que el aire es una mezcla de compuestos que varía en el tiempo y el espacio es muy difícil definir lo que es la contaminación y hace referencia a cuatro definiciones:

- ❖ (Jiménez, 2001, pp.319) cita a American Society for Testing Material (Lora y Miro, 1978). Quien describe que la contaminación del aire es la presencia en la atmósfera de sustancias no deseables en concentraciones, tiempo y circunstancias tales que puedan afectar significativamente al confort, salud y bienestar de las personas o al uso y disfrute de sus propiedades.
- ❖ (Jiménez, 2001, pp.319) cita Consejo de Europa (Lora y Miró, 1978). Quien describió que existe contaminación del aire cuando la presencia en el de una sustancia extraña o una variación importante en la proporción habitual es capaz de provocar un efecto perjudicial o una molestia teniendo en cuenta los conocimientos científicos del momento.
- ❖ (Jiménez, 2001, pp.319) cita En Francia la Norma AFNOR NFX43-001 (Chabrier de la Saulniere, 1969). Establece que; es la presencia de impurezas en el aire que pueden provocar un perjuicio notable en la salud, la comodidad o los bienes humanos. Esta contaminación puede deberse a gases, vapores, partículas sólidas o líquidas e incluso radiaciones.
- ❖ (Jiménez, 2001, pp.319) cita en México la Ley Federal para el Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente de 1988 menciona que:  
Se entiende por contaminación la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes (materia o energía) o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

### 1.1.2 Contaminación del suelo

El aumento de la población humana, los recursos naturales decrecientes, la inestabilidad social, la aceleración del crecimiento tecnológico de las sociedades industriales y agroindustriales de la degradación ambiental ponen en estado de riesgo los procesos naturales que sostienen la vida en la tierra y el ecosistema. (Ruda de Schenquer, Mongiello, & Acosta , 2004)

(Ruda de Schenquer, Mongiello, & Acosta , 2004) Cita que el suelo es un recurso vivo y dinámico no-renovable, cuya condición es vital para la producción de alimentos y para el balance del funcionamiento de nuestro planeta. Un suelo contaminado es una porción delimitada de terreno superficial o subterráneo, donde las cualidades originales del suelo han sido modificadas por la acción humana produciendo:

- ❖ Contaminación física con variaciones en parámetros como temperatura y radiactividad.
- ❖ Contaminación biológica, al inducir la proliferación de especies o cepas patógenas o ajenas a los microorganismos presentes en el suelo de forma natural.
- ❖ Contaminación química por adición los elementos o compuestos en concentraciones que alteran la composición original del suelo.

## 1.2 Contaminación del agua

La contaminación del agua puede ser por sustancias químicas ya sea orgánicas e inorgánicas, por contaminantes físicos como olor, color, turbiedad, temperatura y/o biológicos como bacterias, hongos, protozoarios, algas y virus entre otros, estas sustancias provocan un impacto importante en el medio ambiente.(Mercado, 2012)

Se considera como contaminante del agua al exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a los humanos, animales, plantas y bienes, o bien, que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua. Todo esto debido principalmente se le atribuye al funcionamiento de su uso, exigencias higiénicas y del grado de avance de la ciencia y tecnología para determinar los efectos y medir los contaminantes, ya que la contaminación provoca la muerte de flora y fauna, impide el uso de agua en industrias y ciudades así como el deterioro del medio ambiente.(Jiménez Cisneros, 2001, pág. 39)

El origen de la contaminación es muy variado pero se puede citar como causantes a los desechos urbanos e industriales, los drenados de la agricultura y de minas, la erosión, los derrames de sustancias tóxicas (accidentes o intencionales), los efluentes de plantas depuradoras, los subproductos de procesos de depuración, la ruptura de drenajes entre otros. (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 39)

### 1.2.1 Contaminantes Orgánicos

Existen más de 600 sustancias orgánicas muchas de ellas biológicamente activas, varias de ellas conocidas como carcinogénicas o promotoras y algunas con propiedades mutagénicas otras sustancias carecen de efectos o se desconocen si tienen. Los contaminantes orgánicos se dividen en cuatro categorías:

- ❖ Compuestos naturales que producen olor y sabor
- ❖ Compuestos sintéticos de origen industrial que causan olor y sabor o son tóxicos.
- ❖ Precursores naturales para la obtención de subproductos durante la desinfección.
- ❖ Subproductos generados por la desinfección.

Los compuestos orgánicos presentes en el agua comúnmente son ácidos húmicos que existen tanto en forma natural como por la creciente descarga de compuestos orgánicos sintéticos que actúan como precursores, tales como los empleados para la limpieza de textiles y de componentes electrónicos (solventes). Los ácidos húmicos se dividen en dos grandes grupos: el fúlvico y el húmico. Las fracciones que componen estos grupos son químicamente similares y su clasificación se basa en la diferencia de peso molecular. Los fúlvicos tienen peso molecular más bajo (200 a 1000g/mol), mientras que el de los húmicos es superior (2000,000 g/mol). (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 82)

Entre los compuestos orgánicos problemáticos se encuentran los trihalometanos y los halógenos orgánicos que se forman mediante reacciones de oxidación y sustitución entre el cloro y los ácidos húmicos. El ozono también produce compuestos secundarios como son los aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos y ftalatos. Durante la desinfección con dióxido de cloro existe el riesgo de formar compuestos orgánicos clorados. Entre los compuestos orgánicos de origen sintético que se

encuentran en el agua están los herbicidas, pesticidas, queroseno y los derivados del benceno. (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 82)

### **1.2.2 Contaminantes Inorgánicos**

Algunos contaminantes inorgánicos no son particularmente tóxicos, pero aun así son un peligro para el medio ambiente porque son usados extensivamente. Estos incluyen fertilizantes, tales como nitratos y fosfatos. Los nitratos y fosfatos provocan auges globales en las aguas superficiales, lo que hace que el nivel de oxígeno en el agua disminuya. Esto provoca un estrés oxigénico debido a la toma de oxígeno por parte de los microorganismos descomponedores de algas. Lo que comúnmente es conocido como eutrofización. (Lenntech B. , 2011)

La concentración de los metales en agua residual doméstica es generalmente baja y proviene de compuestos específicos, mientras que es alta en algunas descargas industriales. Los metales que se presentan en forma insoluble son fácilmente eliminados por sedimentación primaria (aproximadamente entre el 36% y 62%) en cambio los solubles son difíciles de remover y requieren etapas específicas de tratamiento, aunque son parcialmente eliminados durante algún tipo de tratamiento cuando están en concentraciones bajas. (Jiménez Cisneros, 2001, págs. 48-49)

### **1.3 Contaminación por metales**

Un metal es un elemento que es un buen conductor de la electricidad, es flexible y posee brillo. Algunos metales son necesarios para los seres vivos; Para llevar a cabo sus funciones, los organismos vivos requieren de diversos iones inorgánicos esenciales como son:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ . Otros iones que también se hallan en el ambiente son ya sea tóxicos y sin alguna actividad biológica asociada ( por ejemplo, los metales pesados  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ), o bien son esenciales, pero son tóxicos cuando se encuentran en concentraciones relativamente elevadas (tal como  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ). (Cervantes & Moreno Sanchez, 1999, pág. 1). Si rebasan ciertas concentraciones, a estos últimos se les llama con frecuencia “metales pesados”. Químicamente se entiende por metal pesado cuya densidad es mayor de  $5 \text{ g/cm}^3$ , pero costumbre ha hecho que la connotación se emplee para aquellos que son tóxicos y que en realidad abarcan los grupos de transición y pos transición (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn), al igual que el de los metaloides (As, Se). En consecuencia, los metales



pesados, como se acostumbra entender en ingeniería ambiental, no son todos metales ni todos pesados, desde el punto de vista químico. (Jiménez Cisneros, 2001, págs. 48-49)

Los metales pesados normalmente aparecen en el agua superficial procedentes de las actividades comerciales e industriales y tienen que eliminarse si el agua residual se va a reutilizar. Existen en las aguas superficiales en forma coloidal, de partículas y en fases disueltas, pero, las concentraciones en disolución son generalmente bajas. El metal en partículas y coloidal puede encontrarse en hidróxidos, óxidos, silicatos o sulfuros, o adsorbidos en la arcilla, en el sílice o en la materia orgánica. Las formas solubles generalmente son iones, quelatos o complejos órgano metálicos no ionizables. La solubilidad de trazas de metales en las aguas superficiales está controlado predominantemente por el pH, por el tipo de concentración en los cuales el metal puede absorberse, y por el estado de oxidación de los componentes minerales el ambiente del sistema. (Robertson & Dreshbach, 1998).

### **1.3.1. Efectos de la contaminación por metales**

Todos los metales tienen niveles óptimos de concentración, por encima de los cuales resultan tóxicos. La toxicidad de un metal depende de su vía de administración y del compuesto químico al que está ligado. La combinación de un metal con un compuesto orgánico puede aumentar o disminuir sus efectos tóxicos sobre las células. La toxicidad suele resultar, cuando el organismo se ve sometido a una concentración excesiva del metal durante un periodo prolongado, cuando el metal se presenta en una forma bioquímica, cuando el organismo lo absorbe por cualquiera de las vías, ya sea respiratoria, o directamente ingerida. (Robertson & Dreshbach, 1998).

Para la mayoría de los seres vivos es extremadamente tóxica la exposición a un exceso de metales pesados como Cd, Hg, Cr, Ni, y Pb. Los iones metálicos tóxicos suelen penetrar a la célula a través de los mismos sistemas de captación que utilizan los iones metálicos fisiológicamente importantes como Ca, Mg, Cu y Zn. Dentro de la cadena alimenticia los organismos fotosintéticos son las principales vías de acceso de los metales pesados hacia los animales y el ser humano. El incremento en los valores de los metales pesados en la biosfera, es resultado de perturbaciones originadas por el hombre en el medio ambiente o por fenómenos geológicos. En las últimas décadas se ha incrementado la contaminación de la atmósfera, los ríos, los océanos y los suelos por metales

pesados, como consecuencia de la actividad industrial y de la explotación minera. (Cervantes & Moreno Sanchez, 1999)

La peligrosidad de los metales pesados reside en que no se pueden degradar (ni química, ni biológicamente) y, además, tienden a bioacumularse y a biomagnificarse (que significa que se acumulan en los organismos vivos alcanzando concentraciones mayores que la que alcanzan en los alimentos o medioambiente, y que estas concentraciones aumentan a medida que ascendemos en la cadena trófica), provocando efectos tóxicos de muy diverso carácter. (Ambiente, sin año )

En el ser humano se han detectado infinidad de efectos físicos (dolores crónicos, problemas sanguíneos, etc.) y efectos psíquicos (ansiedad, pasividad, etc.).(Ambiente, sin año )

## 1.4 Parámetros de la calidad del agua

### 1.4.1 Parámetros fisicoquímicos del agua

#### 1.4.1.1 Composición Física

Según (Jiménez, 2001, pp.117-128). Entre las propiedades físicas se encuentran el color, olor, sabor, temperatura, turbiedad, contenido de sólidos y conductividad.

- **Color:** se define como el que procede para sustancias disueltas. Es muy importante en el agua potable ya que puede proporcionar una indicación rápida de la calidad.
- **Olor:** es un parámetro que proporciona información sobre el estado del agua, algunos olores indican el aumento de actividad biológica, otros pueden originarse por la contaminación industrial.
- **Sabor:** el sabor al igual que el olor se origina por la presencia de minerales (metales y sales del suelo) o por productos finales de las reacciones biológicas, los compuestos inorgánicos generalmente producen sabor pero no olor, en cambio, los orgánicos producen ambos.
- **Temperatura:** influye sobre las tasas de crecimiento biológico, las reacciones químicas, la solubilidad de los contaminantes o compuestos requeridos (sólidos, líquidos, o gases principalmente O<sub>2</sub>) y en el desarrollo de la vida. La temperatura no tiene efectos directos en la salud. No obstante, una mayor temperatura (alrededor de 40°C) favorece al desarrollo de microorganismos y acrecienta los problemas del sabor, olor, color y corrosión.

- **Turbiedad:** es el parámetro que mide que tanto es absorbida o dispersada la luz por la materia suspendida (sedimentable y coloidal) del agua.
- **Sólidos:** se entiende por sólidos todo residuo que queda después de la evaporación y se puede encontrar en el agua sólidos disueltos y sólidos no disueltos y estos pueden flotar o sedimentarse ya sea rápidamente o lentamente.
- **Conductividad:** la conductividad representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados, concentraciones, estados de oxidación de los mismos, así como la concentración relativa de cada uno y la temperatura.

#### 1.4.1.2 Composición Química

Según (Jiménez, 2001, pp.129 -137) entre la composición química del agua se encuentran:

- **Alcalinidad:** expresa la capacidad que tiene un agua de mantener su pH a pesar de recibir una solución acida o alcalina. Corresponde principalmente a los hidróxidos, carbonatos, y bicarbonatos de los iones  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , Na, K, y  $NH_4^+$  los más comunes son los de calcio y magnesio.
- **Cloro residual:** la cloración del agua de abastecimiento, o de agua tratada, tiene por objeto destruir o desactivar microorganismos patógenos. Un segundo en el agua de abastecimiento es mejorar la calidad global mediante la reacción del cloro con el nitrógeno amoniacal, fierro, magnesio, sulfuros y algunos compuestos orgánicos.
- **Dureza:** la dureza es parámetro para agua potable y agua de uso industrial. Representa la concentración de cationes metálicos multivalentes presentes en el agua.
- **Índice de saturación:** el índice de saturación del carbonato de calcio se emplea para evaluar la tendencia recalcitante o corrosiva del agua. Es de suma importancia para proteger las tuberías, torres de enfriamiento, o cualquier otro ducto donde circule agua caliente.
- **Oxígeno disuelto:** la concentración de oxígeno disuelto, es un parámetro importante para evaluar la calidad del agua. Sirve como indicador del efecto producido por los contaminantes oxidables de la aptitud del agua para mantener vivos peces u otros organismos aeróbicos y de la capacidad auto depuradora de un cuerpo receptor.

- **pH:** se determina mediante un electrodo de vidrio que proporciona, en forma directa, el valor del pH del agua. La escala varía entre 0 y 14 siendo el valor de 7 el de la neutralidad. La evaluación de pH se emplea para caracterizar el agua, dar seguimiento a un proceso o bien para controlar las condiciones de operación ya que la velocidad de las reacciones depende mucho de él.
- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):** es una medida de cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica en el agua en 5 días a 20°C.
- **Demanda química de oxígeno (DQO):** es una medida de la concentración de sustancias que en agua pueden ser atacadas por oxidante fuerte ( $K_2$ ,  $Cr_2$ ,  $O_7$ ) en altas temperaturas (350°C).
- **Carbono orgánico total (COT):** evalúa el contenido total de carbono en su forma orgánica. La medición se hace por combustión del carbono orgánico.
- **Grasas y aceites:** son ésteres compuestos de alcohol o glicerol (glicerina) y ácidos grasos.
- **Metales:** en determinación de metales está los términos disueltos y suspendidos, para la detección de metales se emplea la absorción atómica.

#### 1.4.2 Parámetros Biológicos

El análisis para la evaluación de la calidad biológica del agua consiste, generalmente, en la determinación de indicadores bacteriológicos y no de organismos patógenos como tales. Tradicionalmente, los grupos de bacterias considerados como indicadores, son los coliformes totales y coliformes fecales. El indicador ideal es el que se encuentra presente cuando existen bacterias patógenas de origen fecal y cuyo número está relacionado directamente con el grado de contaminación. El indicador tradicional de la calidad microbiológica son las bacterias del grupo de las coliformes fecales, especialmente *Escherichia coli*. (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 137)

Los coliformes fecales están estrechamente relacionados con la probabilidad de encontrar patógenos excretados, mientras que los miembros del grupo coliforme total están ampliamente distribuidos en la naturaleza, en comparación con su presencia en el intestino humano y en el de animales de sangre caliente. (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 137)

## 1.5.- Normas Mexicanas

### 1.5.1 NOM-127-SSA1-1994

NORMA OFICIAL MEXICANA **NOM-127-SSA1-1994**, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas. Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización. (NOM-127-SSA1-1994, 2000)

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional. (NOM-127-SSA1-1994, 2000)

#### 1.5.1.1 Límites permisibles de características químicas

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 1.6.1.2. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

Tabla 1.5.1.1. Límites permisibles de características químicas.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE (mg/l)
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE (mg/l)
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 – D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

Fuente: Elaboración propia en base a(NOM-127-SSA1-1994, 2000)

### 1.5.2 NOM-001-SEMARNAT-1996

NORMA OFICIAL MEXICANA **NOM-001-SEMARNAT-1996** QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.

Esta norma oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta

norma oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales.(NOM-001-SEMARNAT-1996, 1996)

Tabla 1.5.2. Límites Máximos permisibles para metales pesados y cianuros

<b>Límites Máximos permisibles para metales pesados y cianuros</b>										
Parámetros (*)	Ríos						Embalses Naturales y Artificiales			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (C)	
(miligramos por litro)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cianuro	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0
Parámetros (*)	Ríos						Embalses Naturales y Artificiales			
(miligramos por litro)	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (C)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.

Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

Fuente: elaboración propia en base a (NOM-001-SEMARNAT-1996, 1996)

(\*) Medidos de manera total

P.D.=promedio diario; P.M=promedio mensual.

(A), (B) y (C): tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos

### **1.5.3 NOM-002-SEMARNAT-1996**

NORMA OFICIAL MEXICANA **NOM-002-SEMARNAT-1996**, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas del alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir o controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.(NOM-002-SEMARNAT-1996, 1997)

Los límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no deben ser superiores a los indicados en la siguiente tabla 1.5.3.



Tabla 1.5.3. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas alcantarillados urbano o municipal

<b>Límites máximos permisibles</b>			
Parámetros (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Fuente: elaboración propia en base a; (NOM-002-SEMARNAT-1996, 1997)

Los límites máximos permisibles establecidos en la columna **instantáneo**, son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan.(NOM-002-SEMARNAT-1996, 1997)

#### **1.5.4 NOM-003-SEMARNAT-1997**

NORMA OFICIAL MEXICANA **NOM-003-SEMARNAT-1997**, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REUSEN EN SERVICIOS AL PÚBLICO.

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y rehusó. En el caso de que el servicio al público se realice por

terceros, estos serán responsables del cumplimiento de la presente Norma, desde la producción del agua tratada hasta su rehuso o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma. (NOM-003-SEMARNAT-1997, 1998)

#### **1.5.5 NMX-AA-051-SCFI-2001**

**NMX-AA-051-SCFI-2001** ANÁLISIS DE AGUA.-DETERMINACIÓN DE METALES POR ABSORCIÓN ATÓMICA EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS. - MÉTODO DE PRUEBA.

Los efectos de los metales que se encuentran en las aguas naturales, potables y residuales sobre la salud humana, pueden ir desde el intervalo de benéficos, causantes de problemas hasta tóxicos, esto es dependiendo de su concentración, por lo que su cuantificación en cuerpos de agua es importante. Algunos metales son esenciales, otros pueden afectar adversamente a los consumidores de agua, sistemas de tratamiento de aguas residuales y cuerpos receptores de agua.

Esta norma mexicana establece el método de espectrofotometría de absorción atómica para la determinación de metales disueltos, totales, suspendidos y recuperables en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

El método para la determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica en aguas naturales, potables y residuales se basa en la generación de átomos en estado basal y en la medición de la cantidad de energía absorbida por estos, la cual es directamente proporcional a la concentración de ese elemento en la muestra analizada. (NMX-AA-051-SCFI-2001, 2001)

# Capítulo 2

## **2.1 Actividades antrópicas (orientadas a la generación de Cu, Zn y Fe)**

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. En general esto puede ocurrir durante la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares. Además, la inadecuada disposición de residuos metálicos también ha ocasionado la contaminación del suelo, agua superficial y subterránea y de ambientes acuáticos. (Naturales, 2009)

Tanto las fuentes naturales como antropogénicas pueden contribuir de manera importante a la emisión de elementos metálicos a la atmósfera. Cabe señalar que al comparar las emisiones globales, la emisión de elementos como selenio, mercurio y manganeso se realizan en su mayoría por fuentes naturales; sin embargo, en el plano regional las fuentes antropogénicas pueden contribuir de manera importante y estos metales se convierten en contaminantes en la escala local. (Naturales, 2009)

### **2.1.1 Cobre (Cu)**

El cobre es un nutriente esencial ampliamente distribuido en la naturaleza. El cobre forma parte de todos los seres vivos, es un componente esencial de múltiples enzimas. La producción anual de cobre en el mundo es de 12 millones de toneladas, de las que se estima que un 16% corresponde al reciclaje. (ATSDR A. p., 2005)

Los principales usos del cobre son la fabricación de equipamiento eléctrico, material de construcción (techumbres y tuberías), maquinaria industrial y aleaciones. También se utiliza para la fabricación de monedas y como material de construcción resistente a la corrosión en agua de mar, por lo que se emplea en bombas submarinas, hélices de buques y material constructivo de plantas desalinizadoras. (ATSDR A. p., 2005)

Se usa principalmente por sí solo o en aleaciones en la manufactura de alambre, láminas de metal, cañerías y otros productos de metal. Los compuestos de cobre se utilizan comúnmente en agricultura para tratar enfermedades de las plantas, por ejemplo hongos, o para el tratamiento de aguas y como preservativo para madera, cuero y telas. (ATSDR, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2010)

### **2.1.2 Zinc (Zn)**

El zinc es un metal anfótero cuya solubilidad se incrementa a pH bajos y altos. El cloruro de zinc se usa para preservar la madera, en la refinación del aceite en el cemento dental, en síntesis químicas, en la manufactura de pergamino, carbón activado, desodorantes, desinfectantes, tintes y soluciones para embalsamar. (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 63)

El zinc posee importantes aplicaciones industriales. Aproximadamente la mitad del zinc metal se destina a la fabricación de acero galvanizado, que posee un recubrimiento externo de zinc como protección contra la corrosión. La película externa de zinc se deposita por inmersión de la pieza de acero en zinc fundido, en forma electrolítica o por proyección de zinc pulverizado. Otras aplicaciones importantes son en tuberías y tanques enterrados, buques, plataformas marinas, y materiales de construcción. (Dolores, 2003, págs. 206-207)

El metal zinc se utiliza así mismo en pilas y baterías eléctricas. Por otra parte la aleación de zinc más importante cuantitativamente es el latón, compuesto por un 33% de zinc un 67% de cobre aunque también encuentran múltiples usos las aleaciones de zinc, cobre y níquel y el presta una aleación de zinc y aluminio fácil de moldear y dura como el acero. (Dolores, 2003, pág. 207)

En forma de óxido el zinc se utiliza en la industria del caucho y de pigmentos, en forma de sulfuro, con trazas de otros metales, se utiliza en aplicaciones electrónicas entre las que destacan las pantallas de televisión y de rayos X. También se utiliza en lámparas fluorescentes. (Dolores, 2003, pág. 207)

### **2.1.3 Hierro (Fe)**

El hierro que se utiliza en la industria suele proceder fundamentalmente de dos sitios; de las minas, de la chatarra, es decir, a través del reciclado de automóviles, electrodomésticos etc. El hierro puro tiene un uso limitado. La mayoría del hierro se usa en formas procesadas como hierro forjado y acero. (Madrid, sin año)

El hierro comercial contiene cantidades pequeñas de carbono y otras impurezas que alteran sus propiedades físicas, que son mejoradas apreciablemente por la adición de carbono y otros

elementos aleantes. El hierro comercialmente puro se usa para la producción de láminas de metal galvanizado y de electroimanes. (Madrid, sin año)

Algunos compuesto de hierro son empleados para propósitos medicinales en el tratamiento de la anemia, cuando la cantidad de hemoglobina o el número de los glóbulos rojos de la sangre disminuye. El hierro se usa también en la preparación de tónicos. (Madrid, sin año)

Forma compuestos ferrosos en los que actúa con valencia +2 y férricos en los que obtiene valencia +3. Los compuestos ferrosos se oxidan fácilmente a férricos. El más importante compuesto ferroso en el sulfato ferroso ( $\text{Fe SO}_4$ ) llamado vitriolo verde; normalmente se presenta en cristales de color verde pálido hidratados con siete moléculas de agua y se usa como un mordiente en el teñido, como medicina en tónicos y en la fabricación de tinta y pigmentos. (Madrid, sin año)

El cloruro férrico, cristales brillantes de color verde oscuro se obtiene calentando hierro en cloro, se usa en la medicina como una solución alcohólica llamada tintura de hierro. (Madrid, sin año)

El ferrocianuro férrico ( $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ ), azul oscuro, solido amorfo formado por la reacción de ferrocianuro de potasio con una sal férrica, se llama azul Prusia. Se usa como pigmento en la pintura y en la lavandería para corregir el matiz amarillento que dejan las sales ferrosas en el agua. (Madrid, sin año)

El ferrocianuro de potasio ( $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ), se obtiene a partir de ferrocianuro ferroso ( $\text{Fe}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$ ) y se usa en procesar papel de copia. El hierro también experimenta reacciones fisicoquímicas en el carbón que son esenciales en la formación de acero. (Madrid, sin año)

## **2.2. Efectos tóxicos**

### **2.2.1 Cobre (Cu)**

Para la mayoría de los organismos vivos el Cu es micronutriente esencial ya que es constituyente de muchos metales o enzimas y de otras proteínas implicadas en los procesos de transporte de electrones y en otras reacciones de óxido-reducción. Los requerimientos de Cu por parte de los microorganismos por lo general se satisfacen con muy bajas concentraciones del metal, pero cuando este elemento se encuentra en su forma iónica libre ( $\text{Cu}^{2+}$ ) en altas concentraciones es tóxico para las células microbianas, así como por ciertas algas, hongos, e incluso animales. La

toxicidad del Cu se atribuye principalmente a sus interacciones con los ácidos nucleicos, a la alteración de sitios activos de enzimas y a la oxidación de componentes de membranas, procesos que pueden relacionarse con la capacidad del Cu de generar radicales libres tóxicos. (Cervantes & Moreno Sanchez, 1999)

El cobre no representa un problema de salud en el agua si tiene las concentraciones comunes, pero le imparte un sabor desagradable y la colorea a partir de 1 a 5 mg/L. en algunas personas cuando las concentraciones en el agua para beber es superior a 3 mg/L aparece una irritación gástrica aguda. (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 56)

Principales contaminantes del agua padecen degeneración hepatolenticular, el mecanismo de regulación del cobre es defectuoso y la ingestión prolongada puede provocar cirrosis hepática. (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 56)

### **2.2.2 Zinc (Zn)**

Es un elemento esencial que es requerido entre 4 y 10 mg/d según edad y sexo. Proviene generalmente de alimentos. No obstante el agua para beber que contiene zinc en concentraciones superiores a 3 mg/L puede no ser aceptada por los consumidores pues valores superiores a 5 mg/L le dan un sabor astringente, apariencia iridiscente y produce una película grasosa cuando hierve. (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 62)

Las concentraciones de zinc en los distintos tejidos del organismo son muy desiguales, las mayores concentraciones se alcanzan en el sistema reproductor masculino, especialmente la próstata. También se alcanzan concentraciones elevadas en el músculo, el hígado, el riñón, el páncreas y la tiroides. El zinc induce la síntesis de metalotioneína con quien forma complejos en las células de la pared intestinal durante su absorción, y también se encuentra complejo con esta proteína en los distintos tejidos. El tiempo de vida media del zinc en el cuerpo humano es de 162-500 días (Dolores, 2003, pág. 208).

La exposición aguda por ingestión a zinc es poco común, si bien se han dado casos de molestias gastrointestinales y diarrea causadas por bebidas almacenadas en latas galvanizadas. No se han descrito efectos adversos en el riñón y el hígado ni efectos hematológicos como resultado de la ingestión de dosis elevadas de 12 g en un periodo de dos días. (Dolores, 2003, pág. 208)

La inhalación profesional de humos desprendidos en el calentamiento de zinc a altas temperaturas como ocurre durante las soldaduras de planchas galvanizadas, produce la llamada fiebre de los fundidores, que constituye el efecto tóxico más importante del zinc. (Dolores, 2003, pág. 208)

Los vapores de óxido de zinc desnaturalizan las proteínas de las células bronquiales alveolares, se cree que se forman complejos proteicos con zinc que pasan a la sangre y provocan las manifestaciones clínicas, consistentes con fiebre alta (40° C), escalofríos, fatiga, dolores musculares y torácicos, a veces, confusión mental, alucinaciones y convulsiones.

El zinc se encuentra incluido en el grupo D, no clasificable respecto a su actividad cancerígena, por la USEPA (IRIS, 2000), ya que tanto la evidencia obtenida en personas como en animales se considera inadecuada. (Dolores, 2003, pág. 208)

### **2.2.3 Hierro (Fe)**

El hierro en el agua no presenta problemas graves de toxicología. Pero en concentraciones superiores de 0.3mg/L le imparte un color amarillento y, a partir de 1 mg/L, genera un sabor amargo y astringente. El hierro tiñe de color café los textiles, la plomería y las paredes. La precipitación del exceso de hierro produce lo que se conoce como herrumbre que es de color pardo rojizo. Cuando hay más de 0.1mg/L, se deposita y para concentraciones de más de 0.3mg/L provoca el aumento de los costos de mantenimiento. (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 57)

La intoxicación aguda por hierro suele ser secundaria a la ingestión, accidental o intencionada, de medicamentos que contienen hierro. La ingestión de más de 0.5 g de hierro o de 2.5 g de sulfato ferroso provoca efectos tóxicos graves. Entre 1 y 6 horas después de la exposición oral aparecen vómitos, seguidos de signos de shock y acidosis metabólica, hepatopatía y trastornos de la coagulación en los dos días siguientes. Los efectos tardíos consisten en insuficiencia renal y cirrosis hepática. Se cree que el primer mecanismo de la toxicidad es la afectación aguda de las células de la mucosa y la absorción directa de los iones ferrosos hacia la circulación, lo cual lesiona las células del endotelio capilar del hígado. (McGraw-Hill, 2011)

Un problema más frecuente es la toxicidad crónica por hierro o la sobrecarga de hierro en los adultos. Las tres causas principales de la acumulación de hierro en el organismo son: 1) la hemocromatosis congénita secundaria a una absorción anormal del hierro en el tubo digestivo; 2) un



aporte excesivo de hierro en la dieta, y 3) las transfusiones de sangre frecuentes en algunas anemias resistentes al tratamiento (siderosis transfusional). Los efectos clínicos de la sobrecarga de hierro consisten en disfunción hepática, diabetes mellitus, trastornos endocrinos y alteraciones cardiovasculares. Existen indicios epidemiológicos que apuntan hacia una relación entre la concentración de hierro y las enfermedades cardiovasculares. El exceso de hierro contribuye a una mayor peroxidación de los lípidos, con la consiguiente afectación de la membrana de las mitocondrias, los microsomas y otros orgánulos celulares. (McGraw-Hill, 2011)

### **2.3. Tratamientos generales de las aguas**

#### **2.3.1 Tratamientos de aguas contaminadas**

La remoción de materia orgánica constituye uno de los objetivos del tratamiento de las aguas residuales, utilizándose en la mayoría de los casos procesos biológicos.

##### **2.3.1.1 Tratamiento primario**

El agua residual cruda se hace pasar por un primer tratamiento, que consta de rejillas separadoras de sólidos para evitar el paso de basuras que puedan obstruir los conductos hidráulicos o dañar bombas, etc., inmediatamente después el agua pasa por un desarenador donde las partículas inorgánicas de tamaño considerable como las arenas, sedimentan y son eliminadas antes de entrar al tratamiento secundario. Las aguas residuales son bombeadas desde el cárcamo al Tanque Distribuidor dividiendo equitativamente el agua entre los reactores. (IBASA, 2011)

El tratamiento primario es para reducir aceites, grasas, arenas y sólidos gruesos. Este paso está enteramente hecho con maquinaria, de ahí conocido también como tratamiento mecánico. (García Rojas, Villanueva Díaz, Campos Medina, & Velázquez, 2012)

##### **2.3.1.2 Tratamiento secundario**

Desde el Tanque Distribuidor las aguas son llevadas a los Reactores Anaerobios Híbridos de Flujo Ascendente, el agua que entra al reactor anaeróbico y va ascendiendo lentamente y entra en contacto con las bacterias (biomasa) que se encuentran dentro y que se alimentan de la materia orgánica presente en el agua, la cual es transformada por éstas en Biogás (compuesto principalmente en CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S) (IBASA, 2011)

El tratamiento biológico de aguas residuales produce distinto tipo de lodos dentro de cada uno de los procesos individuales. El propósito de la digestión es reducir la cantidad de materia orgánica y el número de los microorganismos presentes en los sólidos que causan enfermedades. (IBASA, 2011)

El agua es el componente principal. El contenido en agua depende del tipo de lodo y del tipo de estabilización (aeróbica o aeróbica). El lodo crudo tiene un contenido generalmente de 93 % a 95 %. De manera que la deshidratación o secado es necesario para su uso posterior. (IBASA, 2011)

El tratamiento secundario está diseñado para degradar sustancialmente el contenido biológico del agua residual, el cual deriva de residuos humanos, residuos de alimentos, jabones y detergentes. La mayoría de las plantas municipales utilizan procesos biológicos aeróbicos para este fin. (García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

### **2.3.1.3 Tratamiento de terciario**

En este paso se elimina la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en el tratamiento secundario, como por ejemplo los nutrientes, fosforo y nitrógeno. Estos procesos son de naturaleza biológica o fisicoquímica, siendo el proceso unitario más empleado el tratamiento fisicoquímico. (Cyclus, 2014)

El tratamiento terciario proporciona una etapa final para aumentar la calidad del efluente al estándar requerido antes de que éste sea descargado al ambiente receptor (mar, río, lago, campo, etc.) Más de un proceso terciario del tratamiento puede ser usado en una planta de tratamiento. Si la desinfección se practica siempre en el proceso final, es siempre llamada pulir el efluente. (García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

### **2.4.- Tratamientos orientados a remover metales**

A diferencia de los herbicidas, pesticidas y otros compuestos tóxicos que pueden degradarse biológicamente, los metales pesados no pueden ser eliminados y permanecen en los suelos o sedimentos de donde se liberan lentamente al agua. (Cervantes & Moreno Sanchez, 1999, pág. 117)

La remoción de los metales pesados de los cuerpos de agua mediante métodos tradicionales como el intercambio iónico o la precipitación con limo, resulta costoso y es ineficiente en particular a bajas

concentraciones del metal. Además el tratamiento de los lodos representa uno de los mayores costos en el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo a pesar de que los lodos suelen ser excelentes fertilizantes, su uso en la agricultura se ve limitado por la presencia de metales pesados. La lixiviación química también es costosa por requerir grandes cantidades de ácido: en cambio es más sencilla y económica la lixiviación efectuada por bacterias como *thiobacillus ferrooxidans*.(Cervantes & Moreno Sanchez, 1999, pág. 117)

Por estas razones se requiere desarrollar nuevas tecnologías capaces de reducir la concentración de metales pesados en cuerpos de agua a concentraciones biológicas aceptables y cuyos costos sean accesibles. Desde hace más de un siglo se ha reconocido el potencial de los microorganismos para utilizarse en la degradación o en la remoción de contaminantes ambientales y se han aplicado desde hace mucho tiempo por ejemplo en el tratamiento de aguas residuales.(Cervantes & Moreno Sanchez, 1999, pág. 117)

#### **2.4.1 Procesos Electroquímicos**

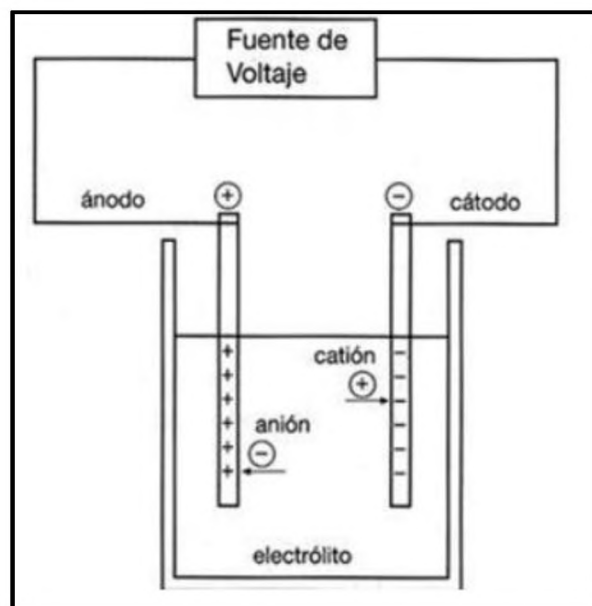
Consiste en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo.(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

Ofrece como mayor ventaja que el reactivo principal en los procesos electroquímicos es el electrón, que es una especie particularmente limpia cuya energía se puede controlar por medio de un potencial aplicado, evitando la introducción de reactivos en disolución.(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

Las reacciones electroquímicas se llevan a cabo dentro de una celda de electrolisis o celdas electroquímicas. Las más simples generalmente constan de dos electrodos (ánodo y cátodo) conectados a una fuente externa de electricidad y sumergidos en un líquido que puede conducir electricidad a través del movimiento de iones.(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

Dentro de la celda electroquímica se desarrolla el proceso electrolítico, que consiste en la disolución de una sustancia en un determinado disolvente, con el fin de que los iones que constituyen dicha sustancia estén presentes en la disolución. Posteriormente se aplica una corriente eléctrica a por lo

menos un par de electrodos conductores colocados en la disolución. El electrodo cargado negativamente se conoce como cátodo y el cargado positivamente como ánodo, cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta. Así, los iones positivos o cationes, son atraídos al cátodo, mientras que los iones negativos, o aniones, se desplazan hacia el ánodo. Las reacciones de reducción, donde las sustancias añaden electrones, ocurren en el cátodo y las reacciones de oxidación, donde las especies pierden electrones, ocurren en el ánodo.(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)



**Figura 2.4.1.1 Celda Electroquímica.** Fuente: (García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

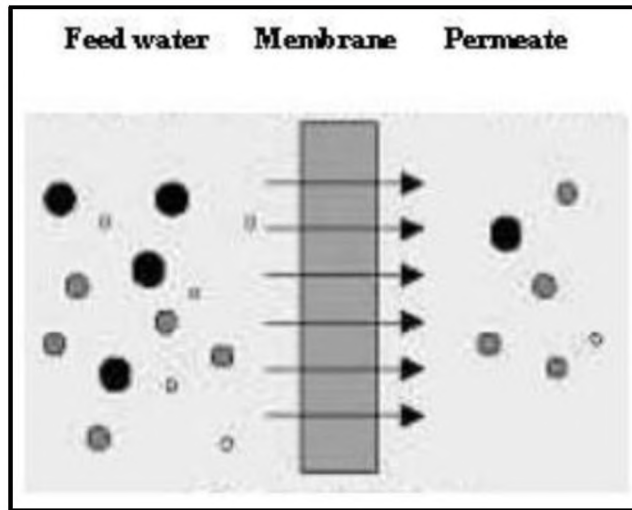
## 2.4.2 Tecnología de Membranas

Las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva. Este hecho permite la separación de las sustancias contaminantes del agua, generando un efluente acuoso depurado. Existen diferentes clasificaciones, según: Material de fabricación, porosidad de la membrana, estructura, geometría, fuerza impulsora y el proceso de separación del que forma parte.(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

El proceso de separación con membranas presenta características significativas, entre ellas, este proceso permite la separación de contaminantes que se encuentran disueltos o dispersos en forma

coloidal, elimina contaminantes que se encuentran a baja concentración, las operaciones se llevan a cabo a temperatura ambiente, los procesos son sencillos y diseños compactos que ocupan poco espacio y pueden combinarse con otros tratamientos. Sin embargo, no eliminan realmente el contaminante, únicamente lo concentran en otra fase, de igual modo pueden darse el caso de incompatibilidades entre el contaminante y la membrana, problemas de ensuciamiento de la membrana: necesidad de otras sustancias para llevar a cabo la limpieza, ajustes de pH, ciclos de parada para limpieza del equipo, deficiente escalado: doble flujo-doble de equipos (equipos modulares), ruido generado por los equipos necesarios para conseguir altas presiones. (García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

Estos métodos fisicoquímicos han sido utilizados para remover metales pesados de aguas residuales industriales, desgraciadamente estos son generalmente muy caros y tienen sus limitantes. Un método que se ha empezado a explorar y ha mostrado resultados interesantes es la adsorción química, en la cual se emplean varios materiales naturales y sintéticos, que aprovechan las interacciones a nivel molecular para recolectar el elemento contaminante y es removido del medio acuoso.(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

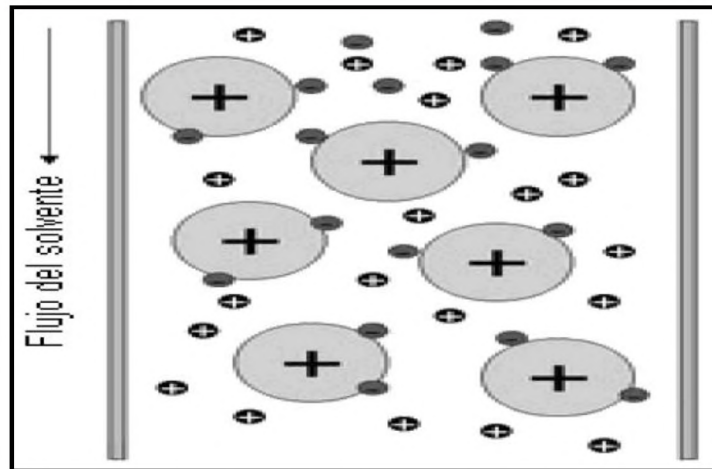


**Figura 2.4.2 Membrana Semipermeable.** Fuente:(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

### 2.4.3 Intercambio Iónico

Se trata un proceso que involucra una reacción química, en la que un ión de la solución es intercambiado por otro similarmente cargado y unido a una partícula sólida móvil. Es una operación en la que se utiliza un material, habitualmente denominado resinas de intercambio iónico, que es capaz de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, los mantiene temporalmente unidos a la superficie, y los cede frente a una disolución con un fuerte regenerante. Las resinas de intercambio catiónico son aquellas que tienen un ión de intercambio móvil cargado positivamente, mientras que los aniones de intercambio son aquellos que sus iones intercambiables están cargados negativamente.(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

Mediante el uso de una combinación de resinas de intercambio aniónico y catiónico, virtualmente todos los contaminantes pueden ser removidos de una solución. La reacción de intercambio iónico es reversible, es decir, puede avanzar en los dos sentidos y puede llevarse a cabo por lotes o columna.(García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)



**Figura 2.4.3 Intercambio iónico.** Fuente: (García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)  
Principio de intercambio iónico: Las partículas cargadas negativamente se unen a la matriz sólida cargada positivamente y son retenidas.

#### 2.4.4 Biorremoción

El término biorremoción puede definirse como la acumulación y concentración de contaminantes mediante el uso de materiales biológicos, preferentemente microorganismos que son capaces de secuestrar a los iones metálicos mediante procesos de adsorción así como la formación de metalotioninas (MT), fitoquelatinas (FQ) y otros compuestos que pueden sintetizarse en respuesta a valores tóxicos de los metales pesados. (Cervantes & Moreno Sanchez, 1999, pág. 118)

La biorremoción es el término aplicado a la descontaminación del agua y de suelo utilizando procesos bioquímicos en vez de procesos químicos o físicos. Recientemente ha habido interesantes procesos utilizando la biorremediación para limpiar el agua contaminada, uso de técnicas para tratar muchas formas de residuos siendo cada vez más amplia. (Baird, 2001)

#### 2.4.5 Procesos de adsorción

El proceso de adsorción fue observado primeramente para gases en el año 1773 por C. W. Scheele y luego para las soluciones por Lowitz en el año 1875 (Kraemer, 1930); actualmente se reconoce como un fenómeno importante para la mayor parte de los procesos físicos naturales, biológicos y químicos. La adsorción sobre sólidos particularmente carbón activo, ha llegado a utilizarse ampliamente para la purificación de aguas y aguas residuales. (Walter J. Weber, 2003)

La adsorción implica la acumulación en la interface o la concentración de sustancias en una superficie o interface. El proceso puede ocurrir en una interface que separa a dos fases, tales como líquido-líquido, gas-líquido, gas-sólido, o líquido-sólido. El material que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama adsorbato y la fase adsorbente se llama adsorbente. (Walter J. Weber, 2003)

Contrariamente, la absorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase constituyéndose una solución con esta segunda. El termino sorción incluye la adsorción y absorción conjuntamente, es una expresión general para un proceso en el cual el componente se mueve desde una fase para acumularse en otra, principalmente en los casos en que la segunda fase es sólida. (Walter J. Weber, 2003)

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra en la superficie de otra fase, y por ello se considera apropiadamente como un fenómeno superficial. (Walter J. Weber, 2003)



# Capítulo 3

### 3.1. Adsorción

La adsorción puede definirse como la tendencia de un componente del sistema a concentrarse en la interfase, donde la composición interfacial es diferente a las composiciones correspondientes al seno de las fases. (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año). Siendo este un proceso mediante el cual se concentra una sustancia sobre la superficie de otra fase sólida o líquida. Por lo cual es considerado un fenómeno superficial. (García Rojas , Villanueva Díaz , Campos Medina , & Velázquez, 2012)

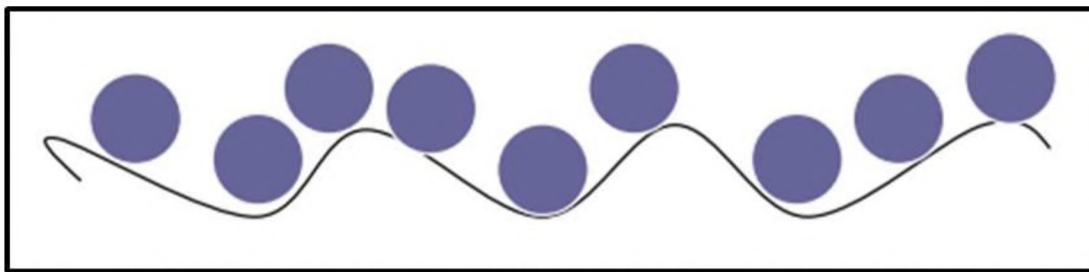


Figura 3.1.1 Adsorción. Fuente: (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

Hay una clara diferencia entre el fenómeno de adsorción y el de absorción, en el segundo existe una penetración física de una fase en la otra; sin embargo es factible que ambos sucedan simultáneamente, y en este caso puede ser muy difícil separar los efectos de ambos fenómenos, inclusive un fenómeno puede afectar al otro. (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

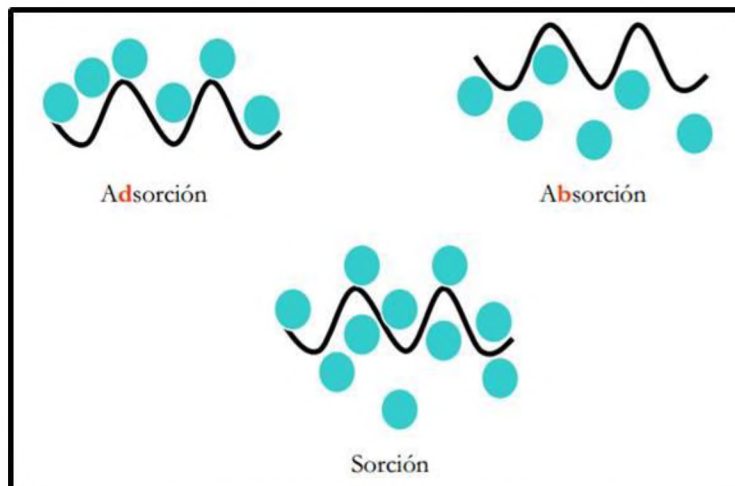


Figura 3.1.2 Fenómenos de adsorción, absorción y sorción. Fuente: (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

El fenómeno de adsorción es de particular relevancia en la ciencia de los coloides y superficies. El proceso de adsorción de átomos y moléculas en las interfaces, es una de las principales formas en que las interfaces de alta energía pueden modificarse para disminuir la energía total del sistema. (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

La adsorción puede ocurrir en cualquier tipo de interfase (L-G, S-G, L-S), sin embargo las diferentes características de las interfaces sólidas y líquidas hace necesario un análisis particular de cada caso. (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

Según (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año) en los procesos de adsorción hay dos aspectos que deben ser considerados;

- 1) El efecto de la adsorción sobre la energía interfacial del sistema en el equilibrio (termodinámica)
- 2) La rapidez del proceso de adsorción (cinética)

Según (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año) la definición de términos es:

Adsorbato: Sustancia que se pega (adsorbe) en la superficie.

Adsorbente: Superficie sobre la que sucede la adsorción.

$x$  = Cantidad de adsorbato adsorbida en una cantidad dada de adsorbente.

$m$  = Cantidad de adsorbente sobre la que sucede la adsorción.

$x/m$  = y Cantidad adsorbida por gramo de adsorbente.

$y_m$  = Cantidad adsorbida por gramo de adsorbente en la monocapa.

$\Sigma$  = Área superficial específica del adsorbente ( $m^2/g$ ).

$\sigma$  = Área molecular del adsorbato ( $m^2/molécula$ ).

$\theta$  = Fracción de superficie cubierta por el adsorbato.

$(1 - \theta)$  = Fracción de superficie no cubierta por el adsorbato.

Una isoterma de adsorción, es la relación general entre la cantidad de gas adsorbido por un sólido, a temperatura constante como función de la presión del gas. También puede definirse como la relación en el equilibrio entre la cantidad de gas adsorbido y la presión del gas a temperatura constante. (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

### 3.2. Características y tipos de adsorción

Según sus características la adsorción puede clasificarse en dos tipos:

**3.2.1 Adsorción física (fisisorción):** fuerzas de van der Waals,  $\Delta H \sim 20$  KJ/mol, reversible  $\Rightarrow$  desorción  $\Leftarrow$  si  $T \uparrow$  y  $P \downarrow$ , no es de naturaleza específica (sitios activos), formación de multicapas, el adsorbato conserva su identidad. (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

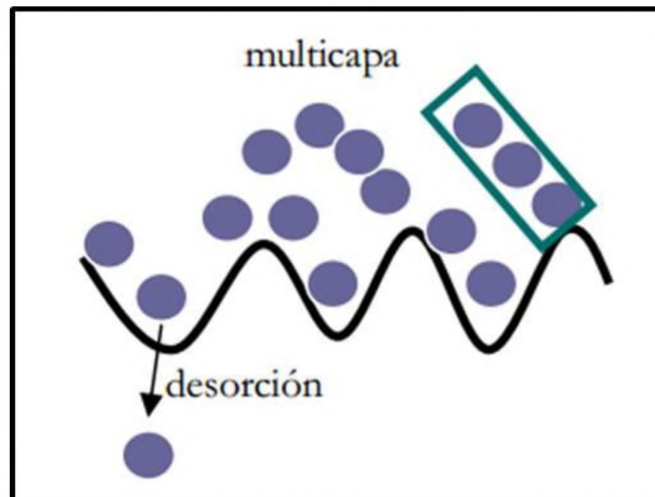


Figura 3.2.1.1 Adsorción física. Fuente: (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

**3.2.2 Adsorción química (quimisorción):** fuerzas análogas al enlace químico (atracción entre iones opuestos o coulombicas, coordinadas o covalentes),  $\Delta H \sim 200$  KJ/mol, irreversible  $\Rightarrow$  no hay desorción  $\Leftarrow$  si  $T \uparrow$  y  $P \downarrow$  a menos que sean cambios muy drásticos, es de naturaleza específica (sitios activos), formación de monocapas, el adsorbato puede perder su identidad. (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

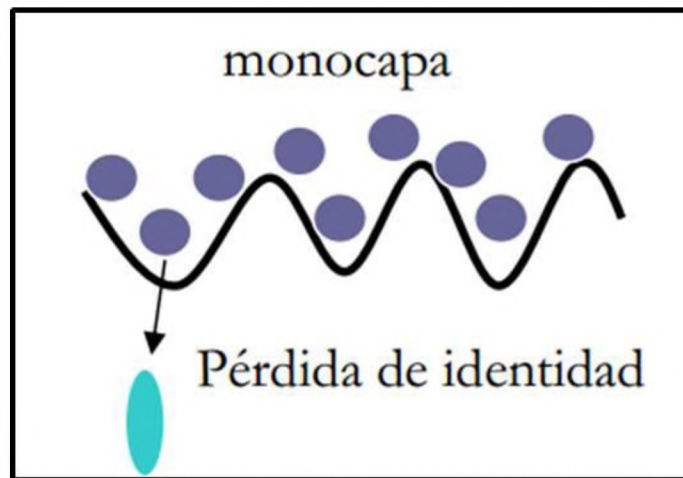


Figura 3.2.2.1 Adsorción química Fuente: (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año)

### 3.3 Factores que afecta la adsorción

Según (Universidad Nacional Autónoma de México, sin año) los factores que afectan a la cantidad adsorbida

1. Cantidad del adsorbente (m): Superficie disponible
2. P o C del adsorbato: Cantidad de material disponible
3. Temperatura: Generalmente la adsorción es exotérmica

Si T, P ó C y m dadas, entonces Y (x/m) se ve afectada por:

1. Naturaleza del adsorbato.
2. Naturaleza del adsorbente.
3. Naturaleza del disolvente.

### 3.4 Estudios de adsorción en los cuales se han removido Cu, Zn y Fe. Procesos de biorremoción

En este punto se muestran algunas investigaciones relacionadas con el proceso de biorremoción, en las cuales se señalan los biomateriales empleados y los resultados generados de las propuestas, con lo cual se fortalece la idea original de este trabajo de investigación.

Según (Cervantes & Moreno Sanchez, 1999) la biorremoción ofrece las siguientes ventajas potenciales sobre procedimientos no biológicos comúnmente usados para remover metales pesados. Como la precipitación o el intercambio iónico:

- 1.- Uso de materiales renovables y que pueden producirse a costos relativamente bajos.
- 2.- Alta selectividad y afinidad por los metales pesados.
- 3.- Posibilidad de tratar grandes volúmenes de agua y otros residuos.
- 4.- Capacidad de funcionar bajo límites amplios de condiciones fisicoquímicas incluyendo temperatura, pH, y la presencia de otros iones.

El agua contaminada puede ser tratada mediante la introducción de organismos diseñados o seleccionados para retener contaminantes; sin embargo tal vez sea necesario que el agua tratada circule varias veces a través de los reactores para tener una calidad de agua aceptable para su desecho o bien para su reciclamiento. Con el fin de regenerar un sitio contaminado se requiere introducir una comunidad de organismos distinta a los encontrados en la naturaleza; esta comunidad “artificial” puede ser sustituida por otra más apegada a las poblaciones naturales del área, una vez que se ha disminuido el impacto inicial. También pueden seleccionarse organismos con tolerancia parcial como biomonitores de alguna tendencia desfavorable en la zona de tratamiento. (Cervantes & Moreno Sanchez, 1999)

Los trabajos mencionados se enlistan a continuación:

- **Desarrollo de membranas de quitosano y diseño de un equipo para la eliminación de metales pesados en el agua.** En este estudio se comparó la eficiencia de la filtración con membranas de quitosano 1,75% m/v, entrecruzadas con glutaraldehído (0,08% m/v) y sin entrecruzar, para estimar la capacidad de remoción de iones de cadmio, cromo y cobre de disoluciones modelo. Además, se diseñó un equipo de bajo costo para la experimentación con las membranas elaboradas. (Mora Molina, Chaves Barquero, Araya Marchena, & Starbir Pérez, 2012)

La finalidad de la investigación era emplear materiales biodegradables para remover metales pesados de aguas, mediante una técnica de bajo consumo energético y, por otra parte, generar soluciones baratas, efectivas y aplicables a problemas específicos. Se elaboraron dos fichas técnicas con información sobre las membranas y se encontró que el cromo fue el metal removido en mayor medida por las membranas entrecruzadas, ajustándose al modelo de isoterma de Freundlich. (Mora Molina, Chaves Barquero, Araya Marchena, & Starbir Pérez, 2012)

Sin embargo, no se encontró relación entre el tamaño de poro de las membranas y el grado de entrecruzamiento. La determinación de las cantidades de metales pesados en solución previa y post filtración se realizó por medio de un equipo de Absorción atómica Perkin Elmer Analyst 800, en el Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos (Cequatec), siguiendo la metodología establecida en el "Standard Methods for the Examination of Waters and Waste waters", vigésima edición. (Mora Molina, Chaves Barquero, Araya Marchena, & Starbir Pérez, 2012)

- **Adsorción de metales pesados en residuos de café modificados químicamente.** En este trabajo se estudió el efecto de la modificación química de los residuos de café (RC) sobre su capacidad de adsorción de Pb (II) y Cu (II). (Bustamante Alcántara, 2011) Los RC se modificaron con ácido cítrico a diferentes concentraciones (0.1 y 0.6 M). Los adsorbentes modificados se caracterizaron mediante titulaciones potenciométricas para cuantificar los grupos funcionales y sus constantes de disociación y se realizaron experimentos en sistemas en lote, a diferentes valores de pH, para determinar su capacidad de adsorción de Pb (II) y Cu (II). (Bustamante Alcántara, 2011)

Además se realizaron experimentos de cinética de adsorción para determinar el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio. También se evaluó la desorción de los metales previamente adsorbidos usando una solución de HCl 0.01 M en sistemas en lote. Finalmente, se obtuvieron los espectros de infrarrojo con el fin de confirmar los grupos funcionales involucrados en el proceso de adsorción. (Bustamante Alcántara, 2011)

Se determinó que en general, la capacidad de adsorción de Pb (II) y Cu (II) disminuye al bajar el pH de la solución, ya que los protones y los cationes compiten por los mismos sitios

de adsorción (grupos carboxílicos). Basado en los estudios de cinética de adsorción, se requieren 8 y 10 horas para alcanzar el equilibrio de adsorción de Cu (II) y Pb (II) respectivamente. Las pruebas de desorción demuestran la factibilidad de reutilizar el biosorbente. Los espectros de infrarrojo corroboran el aumento de la cantidad de grupos carboxílicos debido a la modificación química de los RC, siendo este grupo funcional el principal responsable del proceso de adsorción. (Bustamante Alcántara, 2011)

- **Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.** En este estudio se llevó a cabo la remoción de zinc y cobre en borras de salmuera (residuo industrial), aserrín (residuo agrícola) y la mezcla de ambos residuos fue investigada por medio de experimentos batch simples y ensayos en columnas. Las borras están constituidas principalmente por NaCl (halita) y CaCO<sub>3</sub> (calcita), siendo el sodio (659,4 cmol+/kg) y el calcio (12,1 cmol+/kg) los principales cationes de intercambio. Los espectros obtenidos por medio de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier arrojaron que la mezcla entre el aserrín y las borras, provocó modificaciones principalmente en grupos carboxílicos, grupos alcohólicos y grupos fenólicos presentes en el aserrín. (Agouborde Manosalva, 2008)

La fijación máxima de zinc fue obtenida en la mezcla compuesta por las borras de salmuera y aserrín, alcanzándose valores de 2,29 y 5,59 (mg/g) para las relaciones adsorbente/solución 1/20 y 1/40, respectivamente. En el caso del cobre, la máxima fijación fue obtenida en las borras de salmuera, en donde se lograron valores de 3,15 y 4,69 (mg/g) para las relaciones adsorbente/solución 1/20 y 1/40, respectivamente. El modelo de Langmuir fue el que mejor se ajustó a las isotermas de adsorción. Por su parte, las columnas de adsorción mostraron un punto de saturación a los 690 min para el zinc y 360 min para el cobre, con valores máximos de remoción de 0,76 mg/g para el zinc y de 0,31 mg/g para el cobre. (Agouborde Manosalva, 2008)

El principal mecanismo implicado en la remoción de metales en ambos materiales es el intercambio iónico entre iones sodio y calcio presentes en las borras y H<sup>+</sup> presentes en grupos funcionales del aserrín. La utilización de la mezcla de ambos compuestos presenta un incremento en la remoción de zinc, debido a que el cloruro de sodio actúa como un agente regenerador in-situ para el aserrín. (Agouborde Manosalva, 2008)



La utilización, principalmente de la mezcla compuesta por ambos residuos, presenta una buena alternativa, como posible adsorbente no convencional para la remoción de metales pesados. (Agouborde Manosalva, 2008)

- **Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa.** El incremento en los niveles de contaminación del agua por metales pesados ha resultado en un aumento en la investigación y el desarrollo de métodos más efectivos para su eliminación. Existen varios métodos para la remoción de metales pesados de efluentes industriales aunque la mayoría crean otro problema ambiental debido a que son poco rentables. Debido a su efectividad y bajo costo de operación, la combinación de un método tradicional como la adsorción con un método nuevo como la biosorción, es muy prometedora para reducir los niveles de metales pesados en efluentes provenientes de la pequeña y mediana empresa. Este artículo presenta los últimos logros alcanzados por la combinación de estos métodos. (Reyes Toriz, Cerino Córdova, & Suárez Herrera, 2006)

Los estudios realizados en los últimos años aportan información que muestra un aumento en la capacidad de adsorción del carbón activado cuando se lleva a cabo una modificación biológica del mismo con biomasa. Estos datos muestran la factibilidad de utilizar sistemas de biosorción a nivel industrial en efluentes líquidos, constituidos por soluciones metálicas diluidas en presencia de compuestos orgánicos ya que estos podrán ser captados por carbón activado, mientras que los iones metálicos pueden ser adsorbidos tanto en el biofilm como en el carbón activado. (Reyes Toriz, Cerino Córdova, & Suárez Herrera, 2006)

- **Biosorción de Cobre (II) por biomasa pre tratada de cáscara de *Citrus sinensis* (naranja), *Citrus limonium* (limón) y *Opuntia ficus* (palmeta de nopal).** En el presente trabajo se ha investigado la biosorción de Cu (II) por las biomásas pretratadas de cáscaras de *Citrus sinensis* (naranja), *Citrus limonium* (limón) y *Opuntia ficus* (palmeta de nopal). Las biomásas fueron tratadas con cloruro de calcio, el cual les da una mayor estabilidad mecánica al material bioadsorbente. (Villanueva Huerta, 2007)

Los experimentos sobre el efecto del pH en el proceso de biosorción de Cu (II) por los materiales biosorbentes mostraron que el rango óptimo de pH se encuentra entre 4,5- 5,0.

Los datos experimentales obtenidos se procesaron usando las ecuaciones adsorción de Langmuir y Freundlich. La máxima capacidad de biosorción de Cu (II) por las biomasas fueron: 36,1011 mg/g para la cascara de *Citrus sinensis*; 47,0436 mg/g para la cascara de *Citrus limonium* y 44,2567 mg/g para el *Opuntia ficus*.(Villanueva Huerta, 2007)

- **Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso.** Memoria que, para optar al Título de Doctora por la Universitat de València, presenta MARTA IZQUIERDO SANCHIS, con título “ELIMINACIÓN DEL METALES PESADOS EN AGUAS MEDIANTE BIOADSORCIÓN. EVALUACIÓN DEMATERIALES Y MODELACIÓN DEL PROCESO”, menciona que el control de la contaminación de las aguas ha suscitado desde hace años un gran interés dada la importancia de la calidad de éstas para la protección de la salud y del medio ambiente. Una de las principales fuentes de contaminación de las aguas es el vertido de efluentes residuales sin depurar o insuficientemente depurados, razón por la que el control de vertidos ha centrado gran parte de las actuaciones legislativas de las administraciones competentes en esta materia. Las técnicas convencionales de depuración para la eliminación de metales pesados presentan, en ocasiones, dificultades para lograr el cumplimiento de los límites de vertido siendo necesaria la búsqueda de técnicas o procedimientos alternativos para reducir o eliminar este tipo de emisiones.

En este sentido, la investigación en bioadsorción ha mostrado en los últimos años el potencial de esta tecnología como alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados. En este trabajo de tesis doctoral se aborda el estudio del proceso de bioadsorción para la eliminación de metales pesados presentes en aguas residuales utilizando restos de *Posidonia oceanica* turba como bioadsorbentes.

Las principales técnicas de eliminación de iones metálicos de las aguas residuales son la precipitación química, la oxidación-reducción, el intercambio iónico, los tratamientos electroquímicos, los procesos de membrana, la extracción con disolventes, la adsorción sobre carbón activado y la bioadsorción.

La bioadsorción es un proceso por el cual ciertos tipos de materiales de origen natural retienen y concentran en su superficie sustancias y compuestos de diversa naturaleza química presentes en disoluciones acuosas. La aplicación de esta tecnología se ha estudiado ampliamente para la contaminación por metales pesados.

El término bioadsorción hace referencia a un tipo específico de adsorción. En el proceso participan una fase sólida, el bioadsorbente, y una fase líquida, el solvente, que contiene las especies disueltas que conviene separar de la disolución (adsorbatos). Como consecuencia de la elevada afinidad entre el bioadsorbente y el adsorbato, éste es atraído y retenido sobre el bioadsorbente por una serie de procesos complejos que incluyen la quimisorción, la complejación, la adsorción en superficie y en los poros, el intercambio iónico, la quelación y la adsorción de naturaleza física. (Izquierdo, 2010)

- **Remoción de contaminantes metálicos.** La contaminación causada por la presencia de metales pesados es, en la actualidad, uno de los problemas ambientales más importantes. Para **Xavier Domènech, Marta I. Litter y Héctor D. Mansilla, en su estudio de “REMOCIÓN DE CONTAMINANTES METÁLICOS”**, En este sentido, las actividades antrópicas ocasionan la introducción de varios centenares de miles de millones de toneladas por año de metales pesados en el medio terrestre (y esto excluye la atmósfera). Por otra parte, la toxicidad total anual de los metales movilizados por el hombre excede la toxicidad total de los residuos radiactivos y orgánicos generados cada año. Muchas especies metálicas son conocidas por sus efectos nocivos sobre la salud, y forman parte de la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (US EPA) como el cromo, mercurio, cobre, níquel, cadmio y otros.

Los metales están presentes en la superficie o en el interior de nuestro planeta como trazas, adsorbidos en el suelo, sedimentos y en partículas en suspensión, o disueltos como sales en sistemas acuosos naturales (ríos, lagos, océanos y aguas subterráneas). Aparecen también en barros y efluentes de proceso de diversas industrias, como la hidrometalúrgica, y de operaciones de lavado, enjuague y tratamientos superficiales en el metalizado de superficies o la fotografía. Además de la gran preocupación ambiental, la acumulación de metales en efluentes representa pérdidas significativas en materias primas. A diferencia del caso de la

destrucción de contaminantes orgánicos, la posibilidad de recuperación y reciclado de los metales ha sido un motor poderoso en los desarrollos de los procedimientos descritos en este capítulo.

Desde los inicios de la fotocatalisis heterogénea, la foto transformación y el foto depósito de metales principalmente los más nobles, caros y tóxicos fue visualizada como una de las potenciales aplicaciones más útiles de la técnica. Los tratamientos foto catalíticos pueden convertir las especies iónicas en su forma sólida metálica y depositarlas sobre la superficie del semiconductor, o bien transformarlas en otras especies solubles. Al final del proceso, la especie metálica puede ser extraída de la suspensión por procedimientos mecánicos o químicos. El foto depósito de metales en la superficie del semiconductor está relacionado, además, con aplicaciones tales como el almacenamiento de energía luminosa, el desarrollo de sistemas de imágenes fotográficas, la prevención de la corrosión de semiconductores y, especialmente, la preparación de semiconductores modificados. Por otra parte, la presencia de iones metálicos de transición puede afectar.

También la eficiencia de las oxidaciones foto catalíticas de materia orgánica, especialmente en el caso de los iones hierro y cobre. La formación de foto depósitos de metales es una reacción catódica y, como tal, puede ser complementaria con la oxidación anódica de materia orgánica. Es más, el electrodo de reducción no necesariamente debe ser el foto ánodo, y el tratamiento de metales se puede lograr muchas veces con celdas 122 Domènech, Litter y Mansilla foto electroquímicas. (Domenech, Litter, & Mansilla, 2000)

- **Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción de cadmio, cobre, hierro, níquel, plomo y zinc del agua utilizando zeolita natural tipo clinoptilolita.** Estudio propuesto por: Pavón T., Briones R., Ellangovan K., La zeolita tipo clinoptilolita recolectada en el Estado de Oaxaca, México, es una opción atractiva para remover iones del agua potable mediante un proceso de intercambio iónico. Este estudio muestra la selectividad de la zeolita para los cationes plomo, cadmio, zinc, hierro, níquel y cobre en pruebas en lote y en continuo para un ámbito de pH entre 4.0 y 5.0. a dos intervalos de temperatura ambiente (17-23°C) y 35°C. Para las pruebas en lote se emplearon concentraciones de 0.01, 0.03, 0.05, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0N de cada uno de los metales de estudio. De estos metales el

plomo es quién presenta mayores eficiencias de remoción, del orden de 99% para las concentraciones de 0.01N y 0.03N, sin manifestar influencia por temperatura. En el caso del níquel, hierro y zinc a concentraciones de 0.4 y 0.6N se presentan efectos muy marcados con respecto a la temperatura. De los resultados obtenidos de estas pruebas, se deduce que la selectividad de la zeolita para los iones involucrados es:  $Pb^{2+} > Cd^{2+} > Fe^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$ . Los estudios en columna se realizaron a tres diferentes regímenes de flujo 2,4 y 8 BV/h, logrando mejores eficiencias de remoción al menor flujo. Las condiciones de regeneración se evaluaron a 4,8 y 16 BV/h con cloruro de sodio a una concentración de 4N con buenos resultados a las seis horas de operación.

En pruebas con mezclas binarias y terciaria de los cationes plomo, cadmio y hierro, se comprueba que el plomo se remueve más fácilmente del agua con altas eficiencias aún en presencia de otros cationes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) teórica determinada a partir de la fórmula de la clinoptilolita es de 2.56 meq/g, sin embargo, se obtuvieron las capacidades de intercambio de la zeolita para cada uno de los cationes empleados. (Pavon, Briones, & Ilangovan, sin año)

- **Análisis de metales pesados en aguas residuales del rio San Javier y su repercusión en la salud e impacto ambiental.** En este trabajo propuesto por los autores Sánchez, Estrada, et al, con el título de “ANÁLISIS DE METALES PESADOS EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL RIO SAN JAVIER Y REPERCUSION EN LA SALUD E IMPACTO AMBIENTA”, se ha empleado la Espectroscopia de Absorción Atómica, la cual es una técnica muy empleada en el estudio cuantitativo de casi todos los elementos de la tabla periódica. Para este caso, específicamente en la determinación de metales pesados en aguas residuales (cromo y plomo) del Río San Javier. Se determinó que el metal en mayor concentración es el cromo; se conoce que la toxicidad del cromo produce efectos específicos a nivel celular, ya que pueden existir interacciones entre el metal y los sistemas enzimáticos, membranas celulares, organelos y sobre el metabolismo celular en general. Con estos datos obtenidos se puede decir que las descargas de agua residual provenientes de los afluentes que se descargan en el Río San Javier no cumplen con los límites

permisibles de características químicas propuestos por la Comisión Nacional del Agua y por lo tanto representan un riesgo para el medio ambiente. (Sanchez & Estrada, 2000)

- **Comportamiento de adsorción de Fe (II) y Fe (III) en iones Cross-Linkedtio urea Chitosan con Fe (III) como plantilla.** Un nuevo tipo de quitosano reticulado-tiourea con Fe (III) como plantilla (TCCTS plantilla) se sintetizó. Se estudió la adsorción de Fe (II) y Fe (III) en este TCCTS plantilla. Se consideraron los factores que influyen en la adsorción, tales como el pH y el tiempo de contacto. Los resultados mostraron que el valor de pH óptimo para la adsorción era pH =5,0 y al tiempo de equilibrio de adsorción fue de alrededor de 60 min.

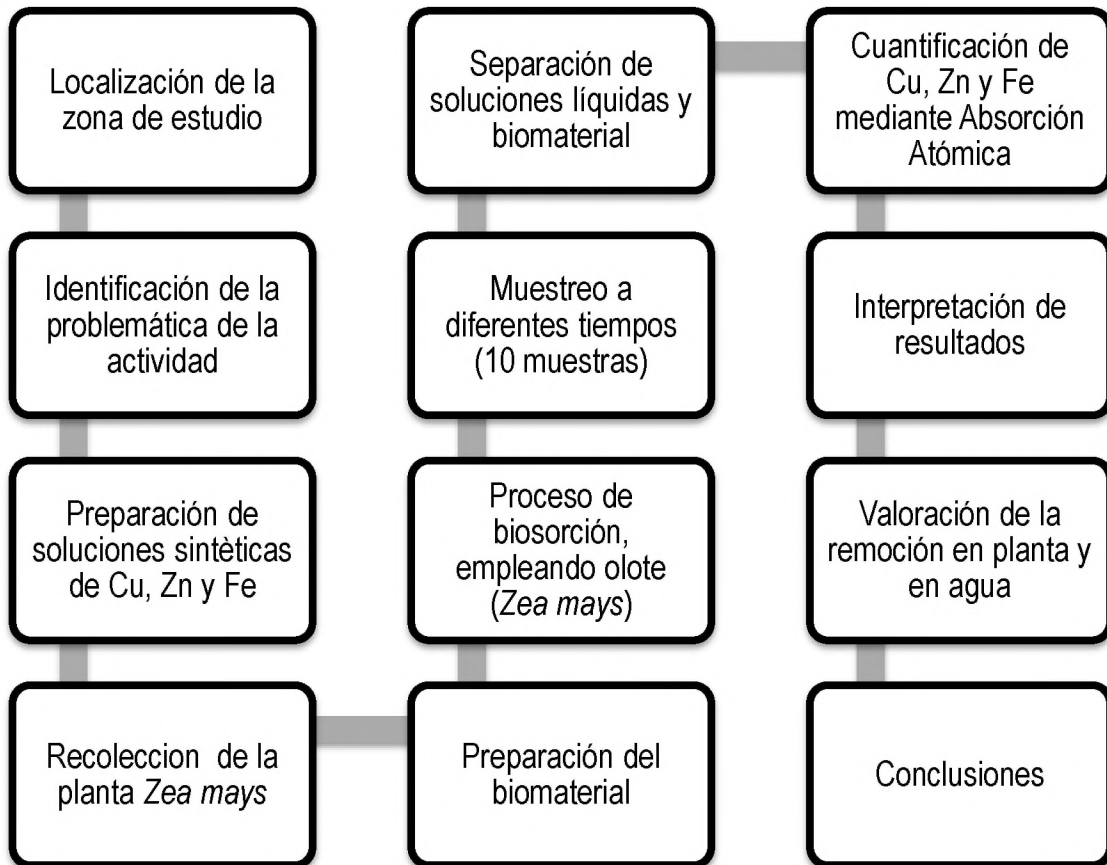
Las isothermas de adsorción y la cinética eran investigados, y los datos de equilibrio de acuerdo en muy bien con el modelo y la Langmuir modelo de pseudo-segundo orden podría describir el proceso de adsorción mejor que la pseudo-modelo de primer orden. Los resultados también mostraron que TCCTS plantilla era un adsorbente favorable para el Fe (II) y Fe (III) en solución acuosa. (Dai, Fenglian, & Chun Yuan, 2012)

**La eliminación de Fe<sup>3+</sup> a partir de solución acuosa por Natural apatita.** La viabilidad de la apatita natural para la eliminación por adsorción de Fe<sup>3+</sup> a partir de solución acuosa fue investigada. Experimentos por lotes se realizaron como función de los parámetros de proceso tales como tiempo de contacto, la concentración inicial de Fe<sup>3+</sup>, la temperatura, la dosis de apatita y el pH. La apatita natural, exhibió un alto rendimiento para la eliminación de Fe<sup>3+</sup> a partir de solución acuosa. El valor de pH afecta claramente el mecanismo de eliminación de Fe<sup>3+</sup> por apatita natural. Al valor de pH bajo, de disolución / precipitación es el principal efecto. El efecto de la hidrólisis aumenta con el valor de pH. Después de que el valor de pH por encima de 5,0, la hidrolización es el efecto principal. Las isothermas de adsorción demostraron que el adsorbente se comportó de una manera favorable para Fe<sup>3+</sup> de adsorción. Los datos experimentales estaban bien equipados con Langmuir isoterma. (Gongming, Maolin, Fei, & Xinggang, 2014)

# Capítulo 4

#### 4.1 Diagrama experimental

En el siguiente diagrama se muestra de manera resumida las etapas que se desarrollaron durante la investigación.





## 4.2 Desglose por etapas

### 4.2.1 Preparación de soluciones sintéticas de Cu, Zn y Fe

En esta etapa se realizó la preparación de 3.5 L de solución para cada elemento agregando 20ml de soluciones patrones de 1000 mL de concentración de Cu, Zn y Fe respectivamente, a partir de estas soluciones madre, se generaron otras soluciones en menor concentración por método de diluciones las cuales fueron a 1, 3, 5, 7, y 10 mgL<sup>-1</sup> por cada uno. Posteriormente se mezclaron para hacer una sola solución, con la cual se planteó el proceso de sorción.

### 4.2.2 Estudio de Predominio de Especies en función de pH.

Se realizó un estudio de predominio de especies empleando el programa de cómputo llamado medusa, en el cual se determinó cual fue el valor del pH al cual se trabajó la adsorción. El programa mostro que el pH favorable para llevar a cabo una mejor adsorción fue ácido, para lograr el pH ácido de las soluciones, se agregó ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) hasta obtener un pH de 2.

### 4.2.3 Muestreo de la planta *Zea mays*

La planta se recolecto de sembradíos de maíz en la localidad de San Francisco Cheje. De la cual solo se utilizó el olote.

## 4.3 Preparación del biomaterial

### 4.3.1 Recolección del olote

Una vez teniendo una cantidad considerable de mazorcas, se desgranaron, obteniendo el olote para ser utilizado.

### 4.3.2 Secado y triturado

En este tratamiento se utilizó *Zea mays* (olotes) los cuales se secaron por 8 días a los rayos del sol. Una vez secados se cortaron en trozos pequeños con ayuda de un cuchillo.

## 4.4 Proceso de biosorción empleando olote (*Zea mays*)

Se construyeron de manera artesanal dos recipientes que contuvieron la solución de los tres elementos a separar. Estos recipientes fueron contruidos de material de vidrio 40 x 40x 40 cm. Y de un grosor de 6 mm. Los dos recipientes estuvieron conectados por una manguera de plástico. En el primer recipiente se agregó el biomaterial en una cantidad de 60 gr y se agregaron los 11 Lt de la solución sintética que tuvo disueltos los tres elementos. Para favorecer el contacto entre el biomaterial y los analitos se colocó una cabeza de poder lo cual propicio una turbulencia que favoreció el proceso de biosorción.

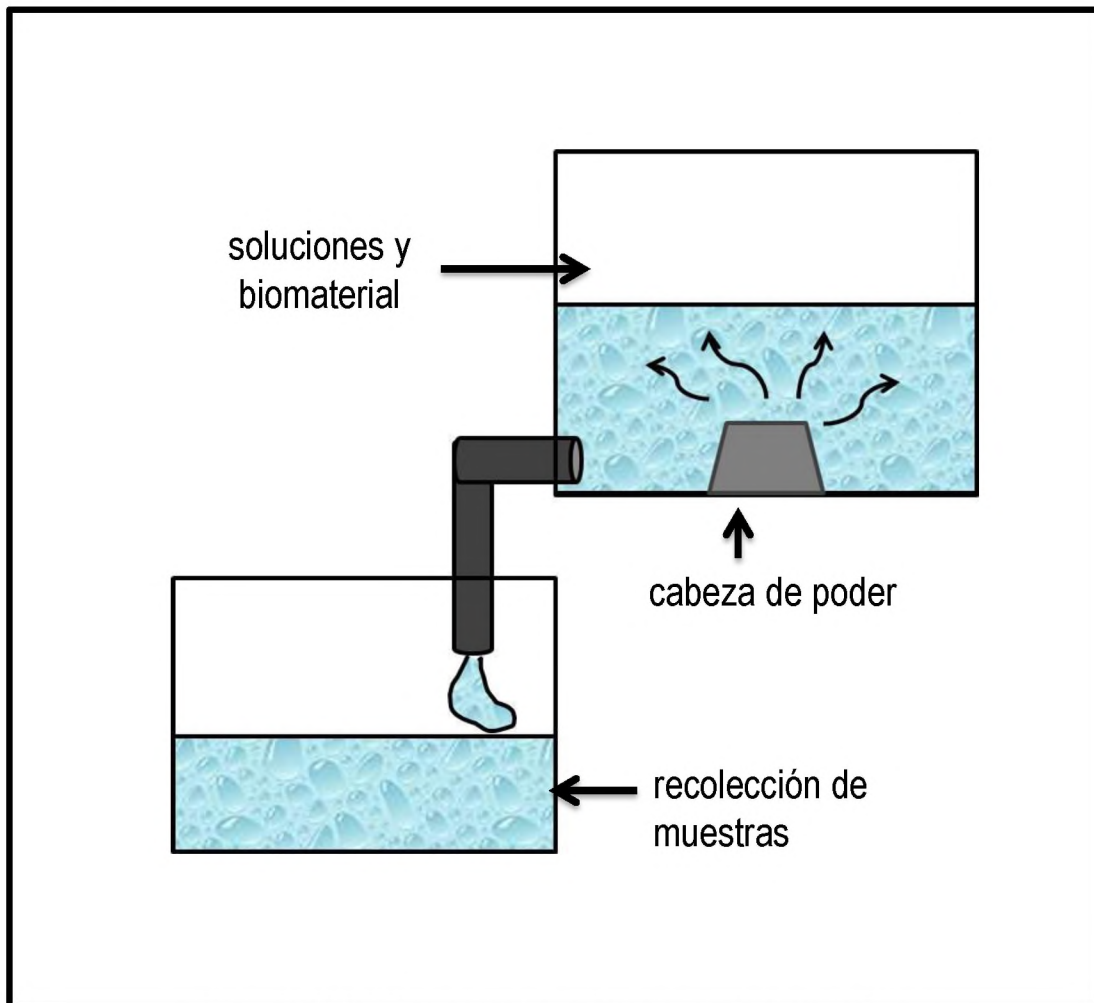


Figura 4.4.1 Recipientes artesanales. Fuente: propia del autor. 2015

#### 4.5 Muestreo

En esta etapa se llevó a cabo el muestro tanto del biomaterial como del agua. Se tomaron 10 muestras a diferentes tiempos tanto de agua como del biomaterial que fueron a los 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180 minutos.

#### 4.6 Separación de soluciones líquidas y biomaterial

Se tomaron muestras de agua en frascos de 250 ml y muestras del biomaterial en bolsas de plástico, a los tiempos mencionados en el punto anterior. Posteriormente se tomaron muestras de la biomasa que fueron secadas durante 3 horas al sol.

#### 4.7 Cuantificación de Cu, Zn y Fe mediante Absorción Atómica

Las soluciones recolectadas del proceso que contienen disueltos al Cu, Zn y Fe se llevaron a un equipo de absorción atómica marca Varian Spectr AA 10 plus el cual se encuentra en el Centro de Investigación de Química Sustentable con las condiciones de lámparas de cátodo hueco.

Con estos valores de absorbancia y concentración se determinó la ecuación de la recta así como su coeficiente de correlación y mediante esta recta se determinaron posteriormente las remociones de Cu, Zn y Fe correspondientes de las soluciones sintéticas que estuvieron en contacto con el biomaterial.

#### 4.8 Determinación de remoción de Cu, Zn y Fe

Una vez llevada a cabo la adsorción, para cada una de las soluciones se procedió al cálculo de los porcentajes de remoción de cada uno de los analitos. Las soluciones resultantes contenían el Cu, Zn y Fe no adsorbido por el biomaterial, a estas soluciones se les determino la cantidad de Cu, Zn y Fe disuelto y mediante una diferencia se valoró el Cu, Zn y Fe adsorbido por el biomaterial. Esto se muestra en la ecuación [1]

$$(\%) = (C_i - C_e / C_i) \times 100 \quad [1]$$

Donde  $C_i$  y  $C_e$  = Es la concentración inicial y en equilibrio del metal en la solución respectivamente ( $\text{mgL}^{-1}$ )

#### 4.9 Estudio de las Isotermas

Con los datos que se obtuvieron, se calcularon las respectivas isotermas de Langmuir y Freundlich (Seria, 2008).

$$q_e = Q_0 b C_e / (1 + b C_e) \quad [2]$$

Donde  $q_e$  = Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )  
 $Q_0$  = Cantidad de moles soluto adsorbido que forma una monocapa por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )  
 $b$  = Constante empírica ( $\text{Lmg}^{-1}$ )  
 $C_e$  = Concentración en equilibrio ( $\text{mgL}^{-1}$ )

El modelo de isoterma de Langmuir indica una reducción de los sitios de interacción disponibles conforme aumenta la concentración del metal, asume que la adsorción es en monocapa (Areco et al, 2012; Pan et al, 2009; Seira, 2008).

$$\text{Log } q_e = \text{Log } K_f + 1/n \text{ Log } C_e \quad [3]$$

Donde  $q_e$  = Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )  
 $K_f$  = Constante de Freundlich ( $\text{mgg}^{-1}$ )  
 $1/n$  = Coeficiente de Freundlich  
 $C_e$  = Concentración en equilibrio ( $\text{mgL}^{-1}$ )

El modelo de Freundlich predice la ausencia de saturación del adsorbente por el sorbato, implica un recubrimiento infinito, lo que indica la adsorción de múltiples capas sobre la superficie adsorbente. (Azouaou, 2010)

$$C_e / q_e (C_0 - C_e) = 1 / Q_0 B + (K - 1 / Q_0 B (C_e / C_0)) \quad [4]$$

Donde  $q_e$  = Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )  
 $Q_0$  = Cantidad de soluto adsorbido que forma una monocapa por peso unitario de adsorbente ( $\text{mgg}^{-1}$ )  
 $B$  = Constante relacionada con el calor de adsorción  
 $C_0$  = Concentración inicial del adsorbato en la solución ( $\text{mgL}^{-1}$ )  
 $C_e$  = Concentración en equilibrio ( $\text{mgL}^{-1}$ )

# Capítulo 5

## 5.1 Resultado del estudio de predominio de especies en función del pH

### 5.1.1 Graficas de Predominio de especies

Para cada uno de los analitos se generaron las gráficas de predominio, en las cuales se muestra la fracción de la especie química en función del pH. Esto se muestra en las Figuras 5.1.1.1.1, 5.1.1.2 y 5.1.1.3.

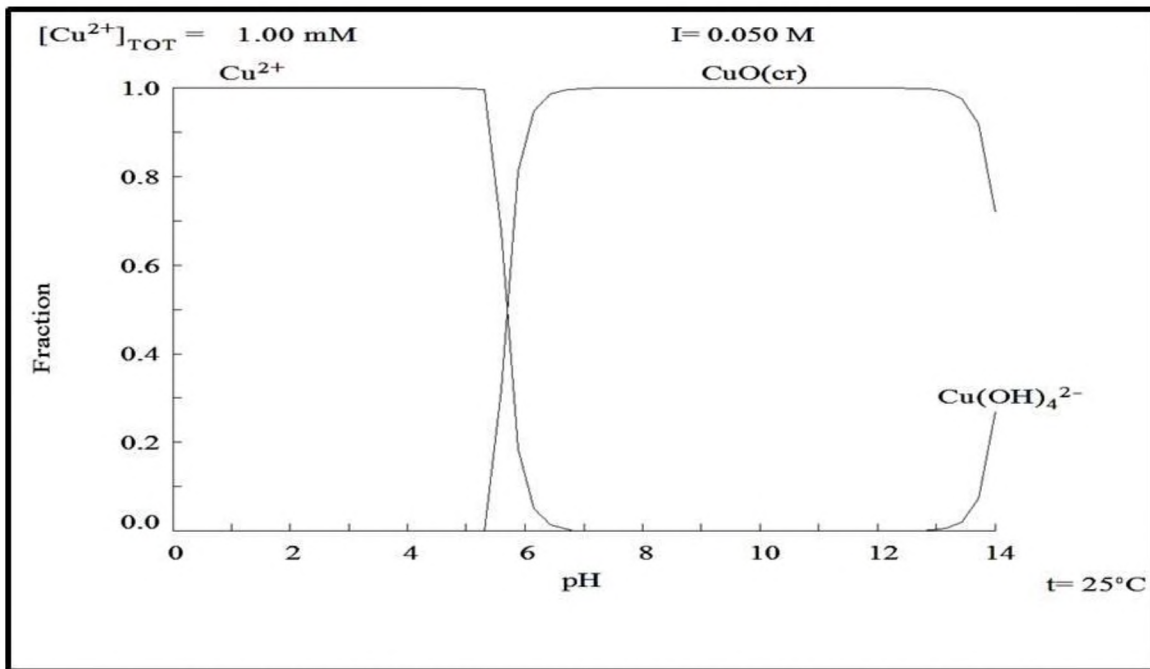


Figura 5.1.1.1 Predominio de especies para el cobre. Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la Figura 5.1.1.1 se puede apreciar que en el intervalo de 0 a 5.2 aproximadamente el cobre se encuentra en forma iónica es decir  $Cu^{2+}$ , pasando de este intervalo se empieza a generar la especie de óxido cúprico ( $CuO$ ) la como muestra la figura está en estado sólido (cr). Y la especie iónica disminuye en su fracción, al llegar al valor de 13 en pH se genera la especie  $Cu(OH)_4^{2-}$ . En este caso específico para favorecer la adsorción el intervalo de pH idóneo para que se lleve a cabo este proceso está en los valores de 0 a 4. Cabe señalar que las especies químicas que forma el cobre fuera de este intervalo no contribuirían de manera favorable en el proceso de adsorción entre el biomaterial y el analito en cuestión.

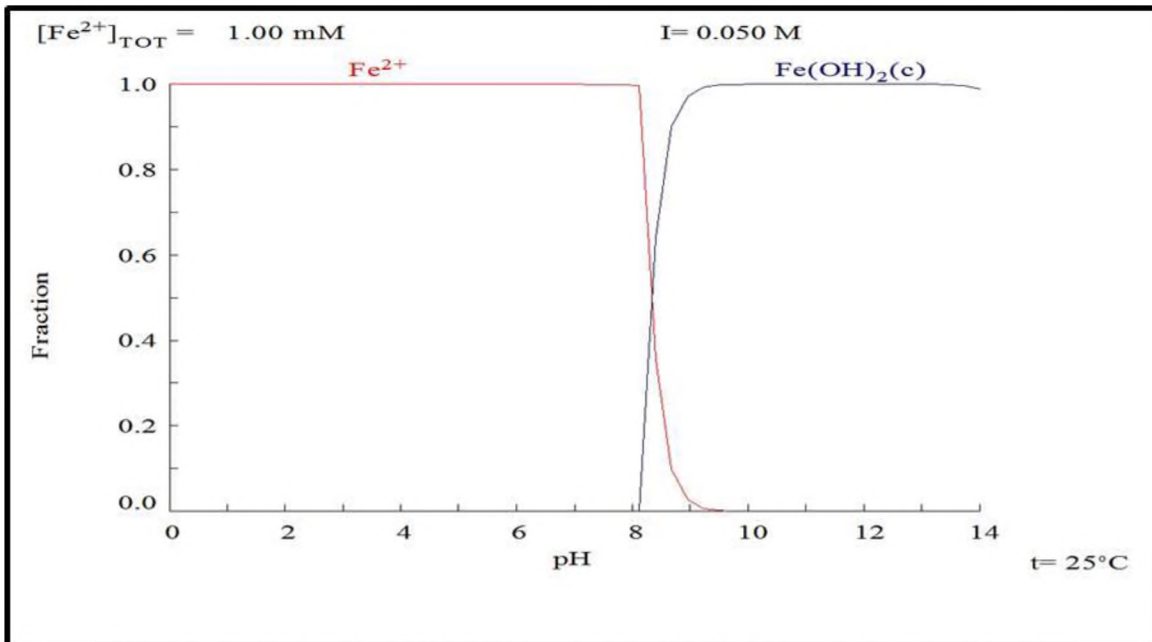


Figura 5.1.1.2 Predominio de especies para el hierro. Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la Figura 5.1.1.2. Se puede apreciar que en el intervalo de 0 a 8.1 aproximadamente el hierro se encuentra en forma iónica es decir  $Fe^{2+}$ , pasando de este intervalo se empieza a generar la especie de hidróxido ferroso ( $Fe(OH)_2$ ), como muestra la figura está en estado sólido (cr). En este caso específico para favorecer la adsorción el intervalo de pH idóneo para que se lleve a cabo este proceso está en los valores de 0 a 8. Cabe señalar que la especie química que forma el hierro fuera de este intervalo no contribuiría de manera favorable en el proceso de adsorción entre el biomaterial y el analito en cuestión.

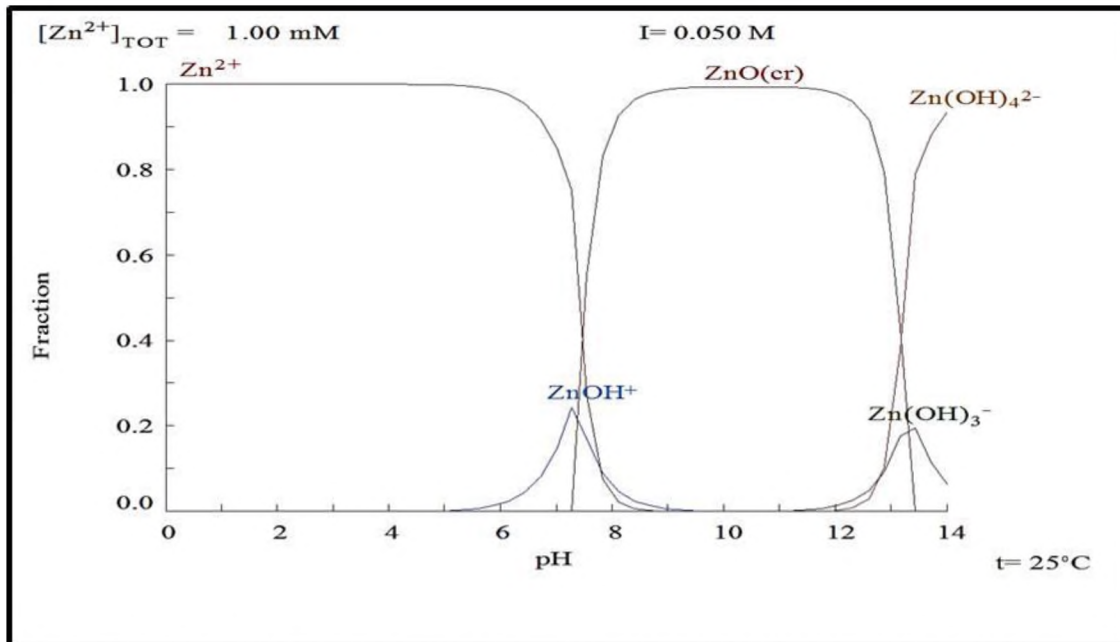


Figura 5.1.1.3 Predominio de especies para el zinc. Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la Figura 5.1.1.3. Se puede apreciar que en el intervalo de 0 a 4.5 aproximadamente el zinc se encuentra en forma iónica es decir  $Zn^{2+}$ , pasando de este intervalo se empieza a generar la especie de hidróxido de zinc ( $Zn(OH)^+$ ). Al llegar al valor 6.2 en pH se genera la especie  $ZnO(cr)$  y como se observa en la figura está en estado sólido. Posteriormente en el valor de pH 11.2 se forma la especie  $Zn(OH)_3^-$ . Al llegar al valor 12.9 se forma  $Zn(OH)_4^{2-}$ . En este caso específico para favorecer la adsorción el intervalo de pH idóneo para que se lleve a cabo este proceso está en los valores de 0 a 4. Cabe señalar que las especies químicas que forma el zinc fuera de este intervalo no contribuirían de manera favorable en el proceso de adsorción entre el biomaterial y el analito en cuestión.

Del análisis realizado para estas tres figuras se estableció que el intervalo de pH favorable, para que los metales se comporten como ion libre en el proceso de adsorción es ácido, ubicándose entre los valores de 0 y 4. Si esto no se cumple es seguro que las otras especies químicas que se forman en otros intervalos que no sean el señalado contribuirán de manera adversa al fenómeno de adsorción y por tanto a un porcentaje de remoción bajo de cada uno de los metales disueltos en la fase acuosa.



## 5.2 Resultados de cuantificación de los tres elementos

Una vez que se recolectaron las muestras a los diferentes tiempos, se procedió a cuantificar cada uno de los elementos vía absorción atómica, de estas cuantificaciones se generaron las tablas de remoción para las diferentes concentraciones que se emplearon en los experimentos de adsorción.

En la Tabla 5.2.1. Se muestran los valores de  $1 \text{ mgL}^{-1}$  de cada uno de los elementos, donde se observa que el cobre es el elemento con mayor porcentaje de remoción, debido a que el radio iónico del cobre es más pequeño que el del zinc y el hierro. En la tabla se distingue que a partir de los 60 minutos para los tres analitos, la remoción permanece constante.

**Tabla 5.2.1 Porcentaje de remoción a  $1 \text{ mgL}^{-1}$**

Tiempo (min)	Cu	Fe	Zn
0	0	0	0
10	85,1	75,2	74,8
20	89,2	84,3	83,5
30	91	87,6	86,4
40	92,8	90,1	89,4
50	93,6	91,4	90,6
60	94,1	92,3	91,2
90	94,2	92,3	91,2
120	94,2	92,3	91,2
150	94,3	92,3	91,2
180	94,3	92,3	91,2

Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la tabla 5.2.2. Se muestra el comportamiento de la remoción a  $3 \text{ mgL}^{-1}$  para los tres elementos, a los 10 minutos se identifica que el hierro y el zinc tienen el mismo porcentaje de remoción. Esto debido a que los radios iónicos de ambos analitos son casi iguales siendo para el hierro 82 picómetros (pm) y para el zinc 83 picómetros (pm). (Jimenez , sin año)

**Tabla 5.2.2 Porcentaje de remoción a 3 mgL<sup>-1</sup>**

Tiempo (min)	Cu	Fe	Zn
0	0	0	0
10	85,7	74,8	74,8
20	88,1	84	83,5
30	91,4	87,4	86,4
40	93	90	89,2
50	93,4	90,2	89,8
60	93,8	90,2	89,8
90	94	90,2	89,8
120	94	90,2	89,8
150	94	90,2	89,8
180	94	90,2	89,8

Fuente: Propia de los autores, 2015

En la siguiente tabla se observa el porcentaje de remoción a 5 mgL<sup>-1</sup>. En esta tabla se vuelve a identificar que el comportamiento del cobre sigue siendo predominante al ser el elemento que tiene mayor porcentaje de remoción. A partir de los 90 minutos su remoción es constante para los tres analitos.

**Tabla 5.2.3 Porcentaje de remoción a 5 mgL<sup>-1</sup>**

Tiempo (min.)	Cu	Fe	Zn
0	0	0	0
10	74	55,3	54,1
20	79,1	64,5	62,1
30	81,4	68,5	66,2
40	83,4	71,1	69
50	84,4	72,4	69,8
60	85,08	72,4	69,8
90	85,1	72,4	69,8
120	85,1	72,4	69,8
150	85,1	72,4	69,8
180	85,1	72,4	69,8

Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la tabla 5.2.4 se muestra el porcentaje de remoción a  $7 \text{ mgL}^{-1}$ , en la cual se observa que a comparación de las tabla 1 y 2 los tres elementos disminuyen su porcentaje de remoción, sin embargo el cobre sigue siendo el analito con mayor remoción debido a que su radio iónico es más pequeño que el del hierro y el zinc siendo este de  $72 \text{ picómetros (pm)}$ .(Antonio, sin )

**Tabla 5.2.4 Porcentaje de remoción a  $7 \text{ mgL}^{-1}$**

Tiempo (min)	Cu	Fe	Zn
0	0	0	0
10	71,1	51,5	50,7
20	80,2	60,3	59,7
30	83,8	64,7	63,1
40	86,6	67,6	65,1
50	87,4	68	65,5
60	88,1	68,9	66,3
90	88,2	69,2	66,3
120	88,3	69,3	66,3
150	88,3	69,3	66,4
180	88,3	69,5	66,4

Fuente: Propia de los autores, 2015.

El comportamiento del porcentaje de remoción se observa en la Tabla 5.2.5 En esta tabla se observa el comportamiento para los tres elementos, a los 10 minutos se distingue que el mayor porcentaje de remoción es para el cobre. Los valores para el hierro y el zinc son muy similares. Esto puede ser a que los radios iónicos de ambos elementos son muy cercanos entre sí en cuanto al valor de dicha variable.

**Tabla 5.2.5 Porcentaje de remoción a 10 mgL<sup>-1</sup>**

Tiempo (min)	Cu	Fe	Zn
0	0	0	0
10	67,1	46,5	45,9
20	76,2	55,3	54,8
30	79,8	59,7	59
40	82,8	62,6	61
50	83,6	63	61,8
60	84,1	63,9	62,4
90	84,2	64,2	62,4
120	84,2	64,3	62,4
150	84,3	64,3	62,4
180	84,3	64,5	62,4

Fuente: Propia de los autores, 2015.

### 5.3 Cinéticas de remoción

Con los valores generados de cada una de las tablas se realizaron las correspondientes graficas de las cinéticas de remoción.

En la Figura 5.3.1 se muestra el comportamiento de cada uno de los elementos para la concentración de 1 mgL<sup>-1</sup>. Para los tres analitos el comportamiento es similar, a los 10 primeros minutos se alcanzó el máximo incremento de porcentaje de remoción, posteriormente los incrementos de remoción fueron disminuyendo a tal grado en los últimos minutos estos porcentajes fueron nulos, es decir los valores permanecen constantes. Esto se puede corroborar en la forma asintótica que tiene cada una de las líneas que representan dichos valores.

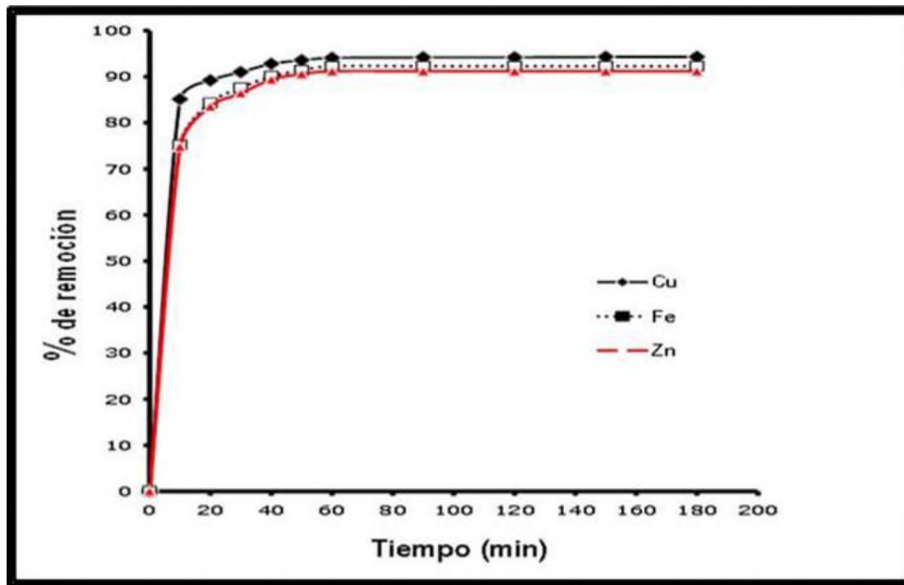


Figura 5.3.1. Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a 1 mgL<sup>-1</sup>. Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la figura 5.3.2, se aprecian los porcentajes de remoción a 3 mgL<sup>-1</sup>. Los tres analitos se comportaron de manera similar que; a los 10 minutos alcanzaron su máxima remoción. Para el hierro y el zinc el porcentaje en sus valores fue casi equivalente ya que los radios iónicos de ambos elementos provocan que haya una competencia entre ellos por su similitud. No así para el cobre, que empieza a apreciarse una diferencia entre las líneas que ejemplifican el comportamiento de adsorción, de manera específica el porcentaje de remoción. Esto indica que la adsorción de inicio empieza a tener una tendencia favorable hacia el cobre.

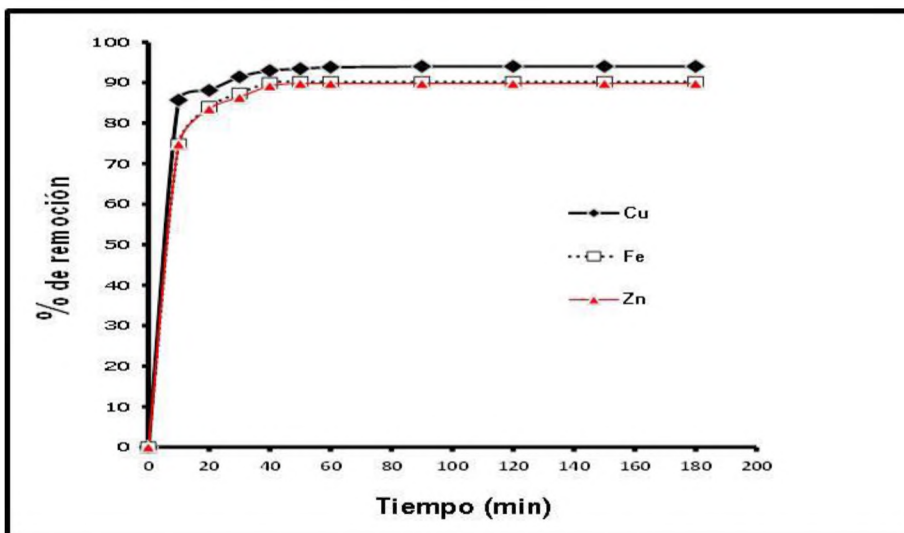


Figura 5.3.2 Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a 3 mgL<sup>-1</sup>. Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la figura 5.3.3 se empiezan a distinguir las diferencias de porcentajes de remoción de manera específica el Cu contra el Fe y Zn. Esto indica que conforme aumenta la concentración de los tres analitos, la adsorción favorece marcadamente al  $\text{Cu}^{2+}$ . Esto se justifica en los valores de radios iónicos de los tres elementos, para el  $\text{Cu}^{2+}$  es el más pequeño y esto podría indicar que el tamaño del ion es un factor determinante en los porcentajes de remoción. En cuanto a sus comportamientos de porcentajes de remoción, estos son los mismos, en los primeros minutos se presentan los incrementos más altos de remoción y posteriormente tienen a tener un comportamiento asintótico.

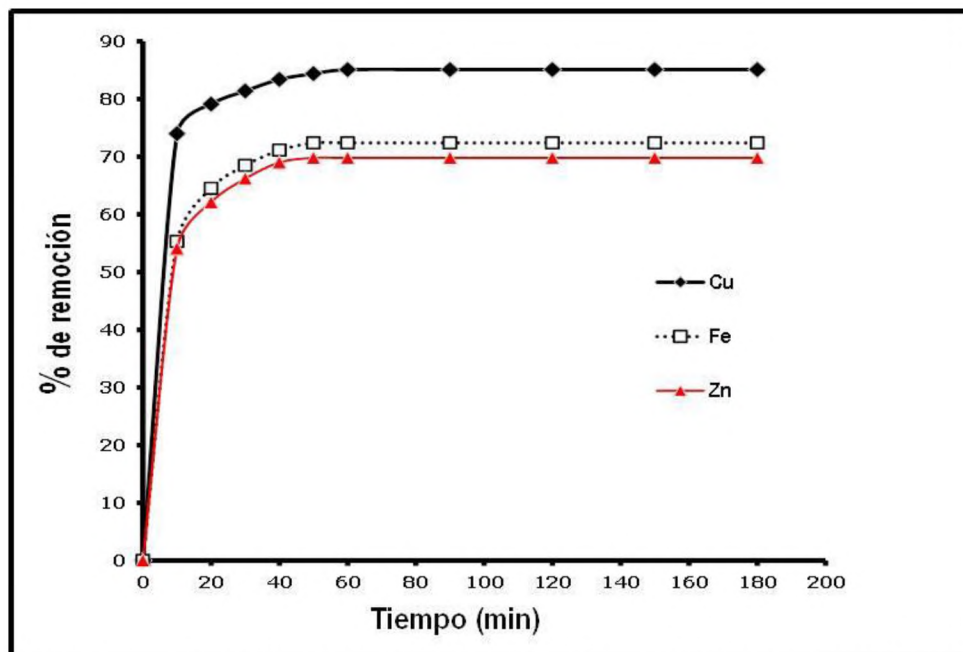


Figura 5.3.3 Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a  $5 \text{ mgL}^{-1}$ . Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la figura 5.3.4 es más notoria la variación que existe entre los valores de remoción de cobre y los otros dos elementos. El  $\text{Cu}^{2+}$  presenta mayores porcentajes de remoción en relación con el Zn y el Fe, nuevamente se propone que la adsorción favorece al cobre de hecho se establece que la mayoría de los sitios activos adsorben al cobre y los sitios que restan son los responsables de la adsorción de los otros iones,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ . El comportamiento de adsorción se repite en los primeros minutos se alcanza el mayor incremento de remoción y posteriormente en el tiempo restante los incrementos son menores hasta casi ser nulos.

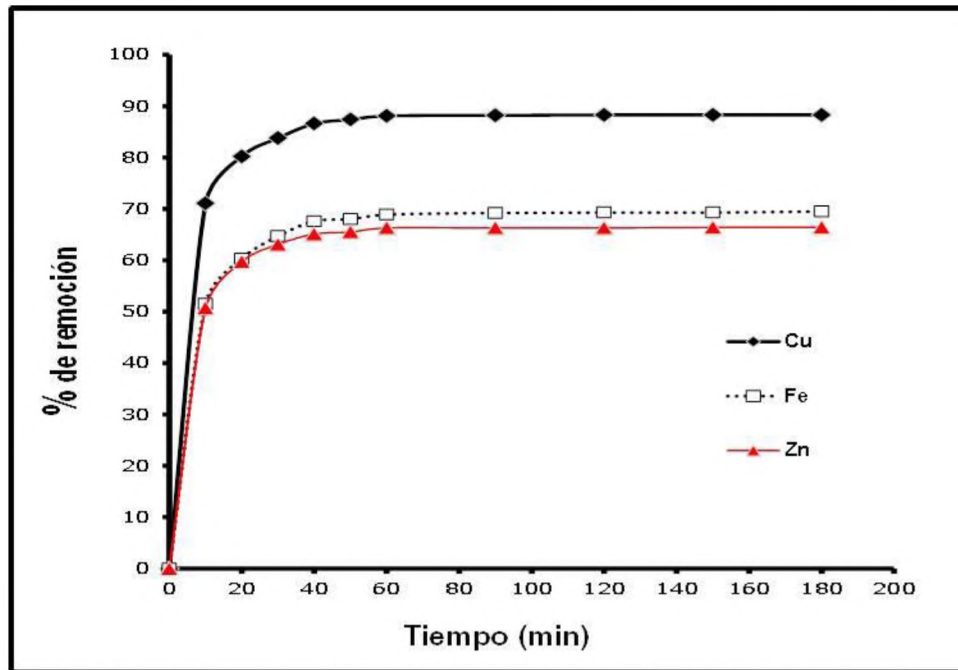


Figura 5.3. 4 Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a 7 mgL<sup>-1</sup>. Fuente: Propia de los autores, 2015.

Finalmente en la figura 5.3.5 se presenta los porcentajes de remoción a 10 mgL<sup>-1</sup>, que fue la concentración mayor donde es notorio la diferencia entre los valores de remoción del cobre con respecto al hierro y zinc. Como puede apreciarse la propuesta sigue siendo la misma y de hecho de ratifica el fenómeno de adsorción con respecto al tamaño de los iones. En el siguiente punto se desarrolla de una manera más puntual este mecanismo. En relación al comportamiento de porcentaje, este es el mismo, por así decirlo, es repetitivo en cuanto a los primeros minutos de contacto y los tiempos finales.

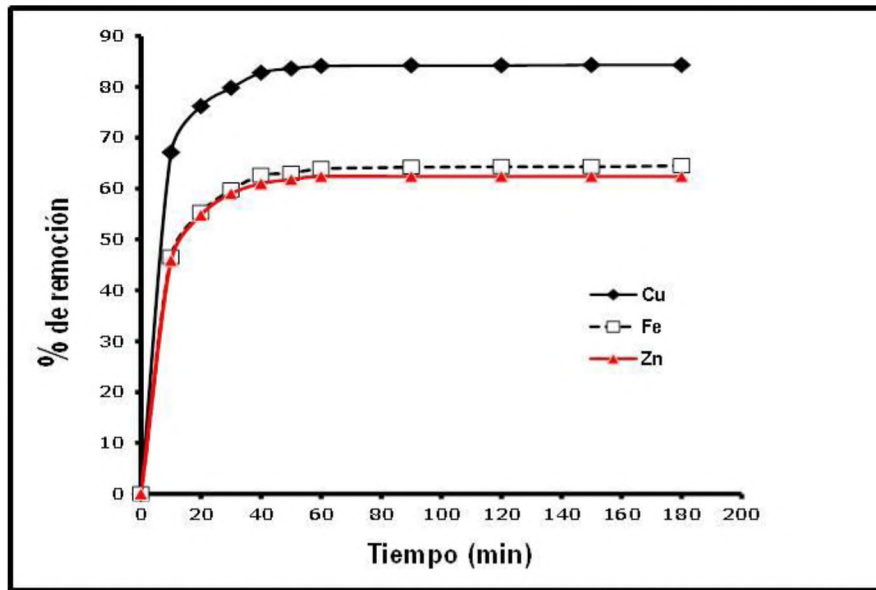


Figura 5.3.5 Porcentaje de remoción para Cu, Fe y Zn a  $10 \text{ mgL}^{-1}$ . Fuente: Propia de los autores, 2015.

#### 5.4 Mecanismo de adsorción del Cobre, Hierro y Zinc.

La estructura química del biomaterial está compuesta de celulosa y hemicelulosa, esto se muestra en la Figura 5.4.1. Estos dos compuestos orgánicos están constituidos por grupos funcionales que son los grupos hidroxilo (OH), éter (-O-) que debido al par de electrones libres que poseen cada uno de los oxígenos son los responsables de la atracción de las especies cargadas positivamente (cationes).



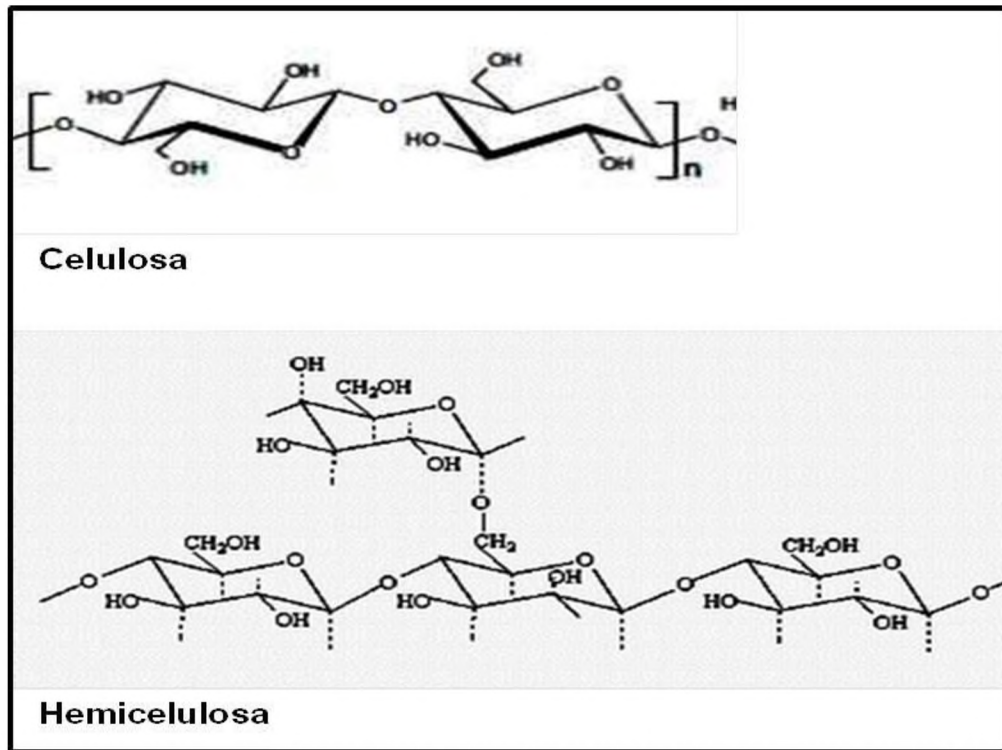


Figura 5.4.1. Estructuras de la Celulosa y Hemicelulosa. Fuente: (Hernandez , Carrasco, Mujica, & Espinola, 2007)

Cuando se lleva a cabo el contacto entre el biomaterial y la solución que contiene los analitos (Cu, Fe y Zn) cargados positivamente, la agitación por medio del motor mecánico, facilita la interacción entre estas dos partes. De manera específica se establece que la diferencia de cargas entre los grupos funcionales señalados previamente y dicho iones cargados positivamente ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) es la responsable del proceso de adsorción. Esto se puede explicar en diferentes etapas representadas en las Figuras 5.4.2, 5.4.3, y 5.4.4. En la 1ª etapa se puede apreciar en los cationes de los elementos estudiados se acercan a la estructura del biomaterial, aprovechando como se mencionó previamente la agitación de la solución y la diferencia de cargas eléctricas (Figura 5.4.2).

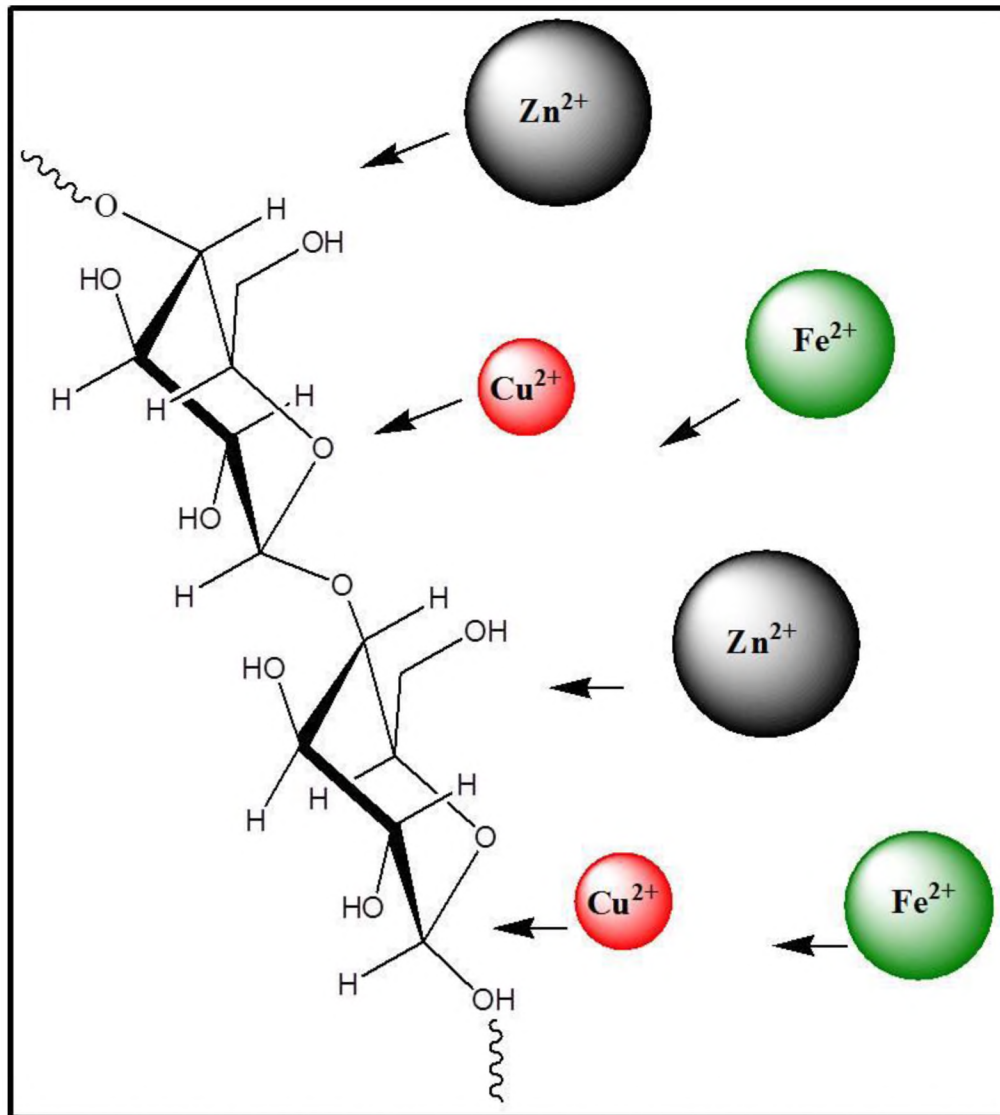


Figura 5.4.2 Mecanismo de adsorción del Cu, Fe y Zn. Fuente: Propia de los autores, 2015.

La 2ª etapa se muestra en la Figura 5.4.3. En la cual se da prioridad a los iones de Cu<sup>2+</sup>, esto debido a que el radio iónico de este elemento es el más pequeño de los tres elementos, por cuestiones estereoquímicas, se favorece dicha atracción en primer lugar de dicho analito, posteriormente se presenta una competencia entre el hierro y el zinc, estos dos elementos tienen radios iónicos casi iguales. Este comportamiento se corrobora en las gráficas que ejemplifican los porcentajes de remoción de los elementos a diferentes concentraciones y tiempos de contacto.

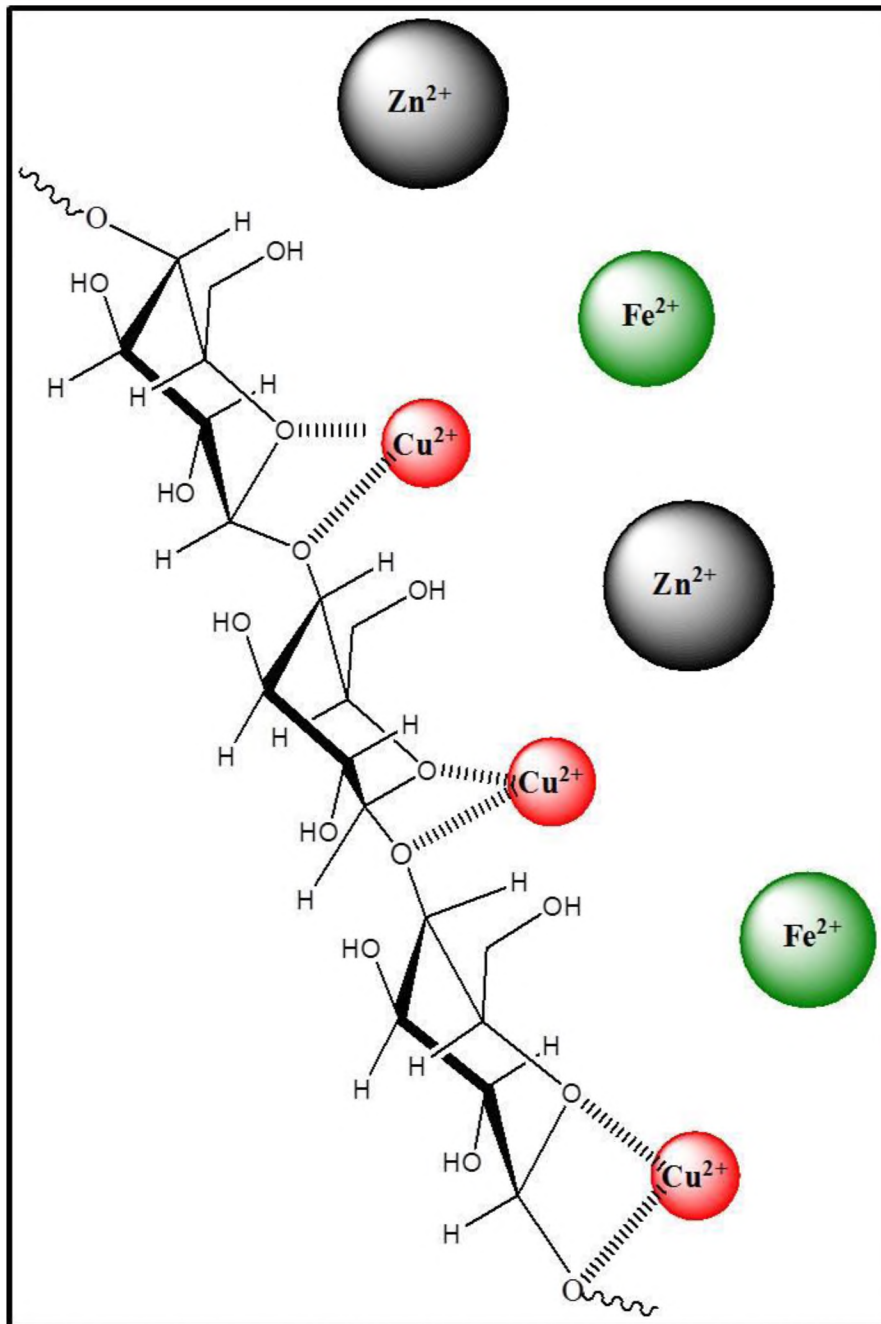


Figura 5.4.3 Mecanismo de adsorción del Cu, Fe y Zn. Fuente: Propia de los autores, 2015.

La 3ª etapa se muestra en la Figura 5.4.4. En la cual se establecen que en la mayoría de los grupos funcionales (sitios activos) han sido ocupados en su mayoría por atracciones con el cobre, por lo que el porcentaje de remoción de este elemento fue mayor en comparación con los otros dos elementos. Los pocos sitios activos que restan son utilizados para la atracción de los otros dos analitos. Este

comportamiento se puede apreciar en las gráficas donde las concentraciones de los tres elementos son altas. En esas graficas se aprecia claramente una diferencia entre el porcentaje de remoción de cobre comparado con el hierro y zinc. Este comportamiento tiene una marcada tendencia, en la cual conforme aumenta la concentración de los analitos las diferencias entre porcentajes aumentan también. Esto se debe como ya se estableció a que el biomaterial favorece primero a la adsorción de casi todos los iones del  $\text{Cu}^{2+}$  y posteriormente realiza la adsorción de los otros iones de los dos elementos restantes.

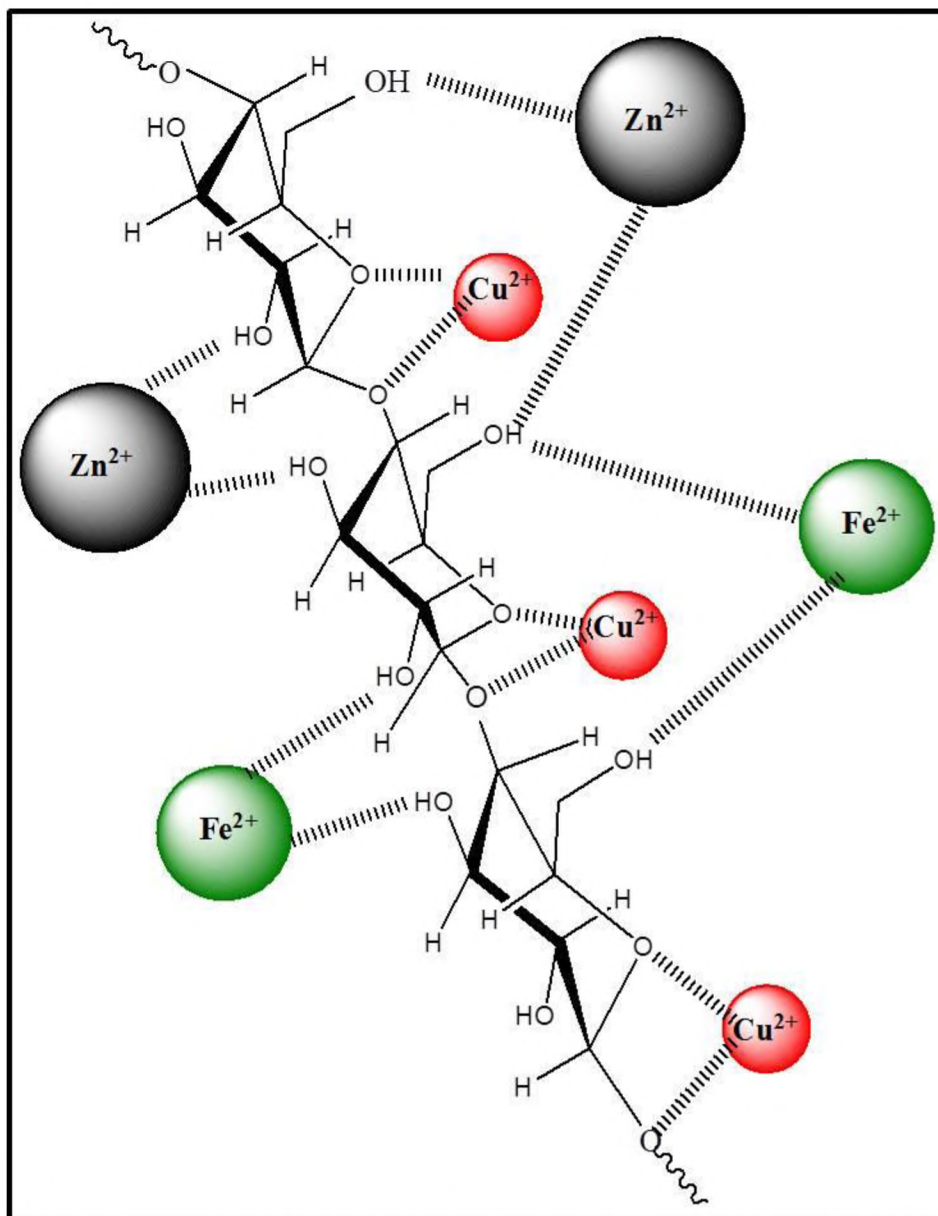


Figura 5.4.4 Mecanismo de adsorción del Cu, Fe y Zn. Fuente: Propia de los autores, 2015.

## 5.5 Cálculos de Isotermas

En esta sección se deben de manejar dos variables que son “ $C_e$ ” y “ $q_e$ ”. En donde “ $C_e$ ” es la concentración de analito en la solución después del tiempo de contacto y “ $q_e$ ” es la cantidad del analito adsorbido en la superficie del adsorbente en este caso el biomaterial. Para calcular “ $q_e$ ”, se tomó en consideración la ecuación [1]:

$$q_e = (C_o - C_e) ( \text{ml son agregados} ) / \text{grs.}(\text{del sorbato utilizado}) \quad [1]$$

Donde  $C_o$ : es la concentración inicial del analito en solución ( $\text{mgL}^{-1}$ )

Por lo cual al sustituir los valores correspondientes de cada variable, se tienen, que los mililitros agregados son 11 L (6 L de todos los analitos + 5 L de agua) y los 6000 mg de sorbato utilizado (*Zea mays*) equivalen a 60 grs. Los valores de  $C_o$  y  $C_e$  se tomarían de los resultados generados de los porcentajes de remoción. Por ejemplo para el cobre en concentración de  $10 \text{ mgL}^{-1}$ , los valores de  $C_o = 10$  y  $C_e = 1.59$  y del cálculo se generó el valor de  $q_e$ , esto se muestra a continuación:

$$q_e = \frac{(10 - 1.59) \text{ mgL}^{-1} (11) \text{ L}}{60 \text{ grs}}$$
$$q_e = 1.5418 \text{ mg/grs.}$$

Este cálculo se realiza para cada una de las concentraciones que presenta cada uno de los analitos, para posteriormente realizar los procesamientos de datos relacionados con las isotermas.

### 5.5.1 Estudio de las Isotermas

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de los modelos de adsorción de Langmuir y Freundlich con el fin de asumir como es que se llevó a cabo la adsorción. Cabe señalar que para la isoterma de Langmuir se manipulan las variables de  $C_e$  y  $q_e$ . De estos resultados se calcularon los valores de logaritmo correspondiente de cada variable ( $\log C_e$  y  $\log q_e$ ), que corresponden a la isoterma de Freundlich. La razón por la cual se calculó el logaritmo es con la intención de linealizar los datos e interpretar el fenómeno de adsorción en este modelo.

Con los resultados generados de ambos modelos se generaron las correspondientes ecuaciones de la rectas y se determinó el coeficiente de Pearson con la finalidad de realizar comparaciones de

valores de este coeficiente y establecer cuál es el modelo de adsorción que se ajusta a el estudio realizado para los tres elementos.

Por lo cual los resultados de cada de las variables señaladas se muestran en las Tablas 5.5.1.1, 5.5.1.2 y 5.5.1.3 que corresponden a los variables correspondientes de las isothermas señaladas para cada uno de los elementos que participaron en el proceso de adsorción.

**Tabla 5.5.1.1 Resultados de las variables para las isothermas de Cobre (Cu<sup>2+</sup>)**

Cu				
ppm	Ce	Qe	log Ce	log Qe
10	1,59	1,5418	0,20139712	0,18802804
7	0,833	1,1306	-0,079355	0,05330898
5	0,746	0,7799	-0,12726117	-0,10796108
3	0,186	0,5159	-0,73048706	-0,28743447
1	0,059	0,1725	-1,22914799	-0,7632109

Fuente: Propia de los autores, 2015.

**Tabla 5.5.1.2 Resultados de las variables para las isothermas de Hierro (Fe<sup>2+</sup>)**

Fe				
ppm	Ce	Qe	log Ce	log Qe
10	3,61	1,1715	0,5575072	0,06874229
7	2,177	0,8842	0,33785843	-0,05344949
5	1,38	0,6636	0,13987909	-0,17809362
3	0,294	0,4961	-0,53165267	-0,30443077
1	0,077	0,1692	-1,11350927	-0,77159964

Fuente: Propia de los autores, 2015.

**Tabla 5.5.1.3 Resultados de las variables para las isothermas de Zinc (Zn<sup>2+</sup>)**

Zn				
ppm	Ce	Qe	log Ce	log Qe
10	3,76	1,144	0,57518784	0,05842602
7	2,359	0,8508	0,37272794	-0,07017252
5	1,51	0,6398	0,17897695	-0,19395576
3	0,306	0,4939	-0,51427857	-0,30636097
1	0,088	0,1672	-1,05551733	-0,77676373

Fuente: Propia de los autores, 2015.

De cada uno de estas tablas se aprecian valores lo cuales no generaron una interpretación lógica a simple vista, por lo cual fue necesario realizar las gráficas y coeficientes correspondientes a fin de darles la interpretación matemática, esto se muestra en el punto 5.5.1.1.

### 5.5.1.1 Gráficas de las Isotermas

Como se mencionó con los datos de las Tablas se realizaron las correspondientes gráficas de isotermas de Langmuir y Freundlich para cada uno de los elementos. En la Figura 5.5.1.1.1 La isoterma de Langmuir para el cobre muestra la correspondiente ecuación de la recta, así como el correspondiente coeficiente de correlación ( $r^2$ ) con un valor de 0.936. Se estableció que dicho resultado está dentro de las especificaciones estadísticas, pero en un enfoque bajo, ya que para que exista una relación directamente proporcional entre las dos variables que participan en la recta, el coeficiente de correlación debe de tener un valor dentro del intervalo de 0.98 a 1.0.

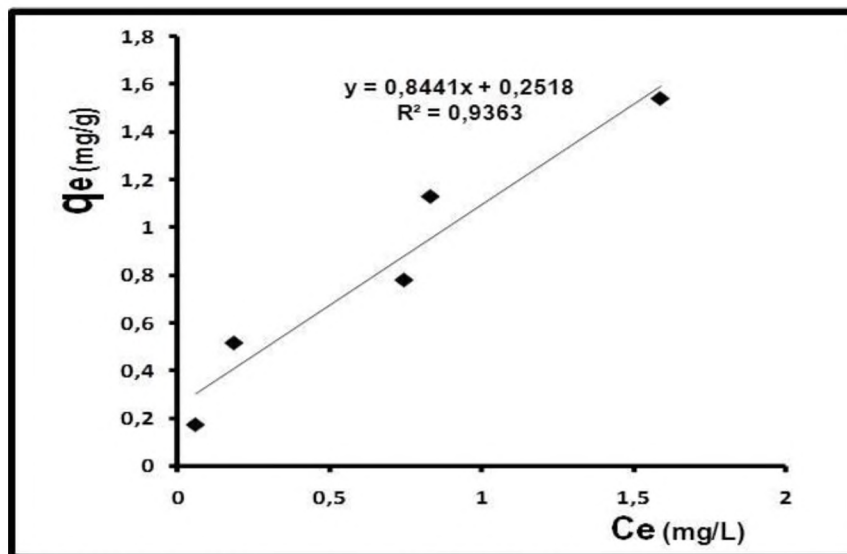


Figura 5.5.1.1.1 Isoterma de Langmuir para el Cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ). Fuente: Propia de los autores, 2015.

En cuanto a la isoterma de Freundlich, su grafica se muestra en la Figura 5.5.1.1.2. En esta Figura también se muestran la ecuación de la recta y el correspondiente coeficiente de correlación ( $r^2$ ). Con un valor de 0.955. Este valor también resulta un poco bajo en relación a lo señalado en la parte estadística.

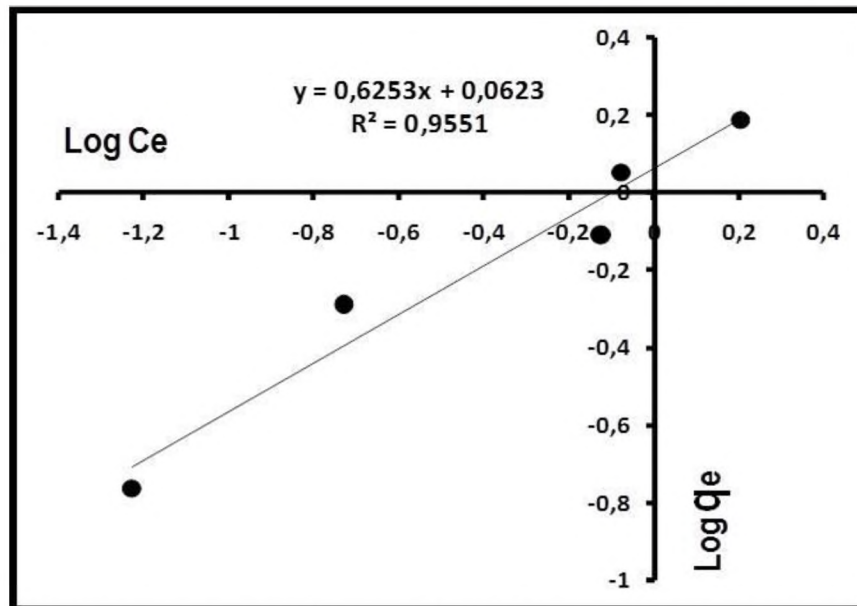


Figura 5.5.1.1.2 Isoterma de Freundlich para el Cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ). Fuente: Propia de los autores, 2015.

Al compararse ambos valores de las dos isotermas, el más alto corresponde a la isoterma de Freundlich, esto indica que la adsorción se lleva a cabo en forma de monocapa, pero en una superficie heterogénea. Esta propuesta se estableció con base en que la composición química del biomaterial ya que como se explicó está constituida de los compuestos de celulosa y hemicelulosa, y poseen grupos funcionales que son responsables de la adsorción. Y estos grupos funcionales no están repartidos de una manera homogénea en su superficie, por lo cual este resultado viene a comprobar que no toda la superficie es igual, en cuanto a los sitios activos de adsorción, es decir que estos grupos funcionales están a diferentes distancias unos de los otros.

La isoterma de Langmuir para el hierro en la figura 5.5.1.1.3 ejemplifica la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación ( $r^2$ ) cuyo valor es de 0.930. Nuevamente se analizaron los resultados con base a las especificaciones estadísticas, determinando que los valores obtenidos son bajos, puesto que su coeficiente de correlación no se encuentra en el intervalo de 0.98 a 1.0.



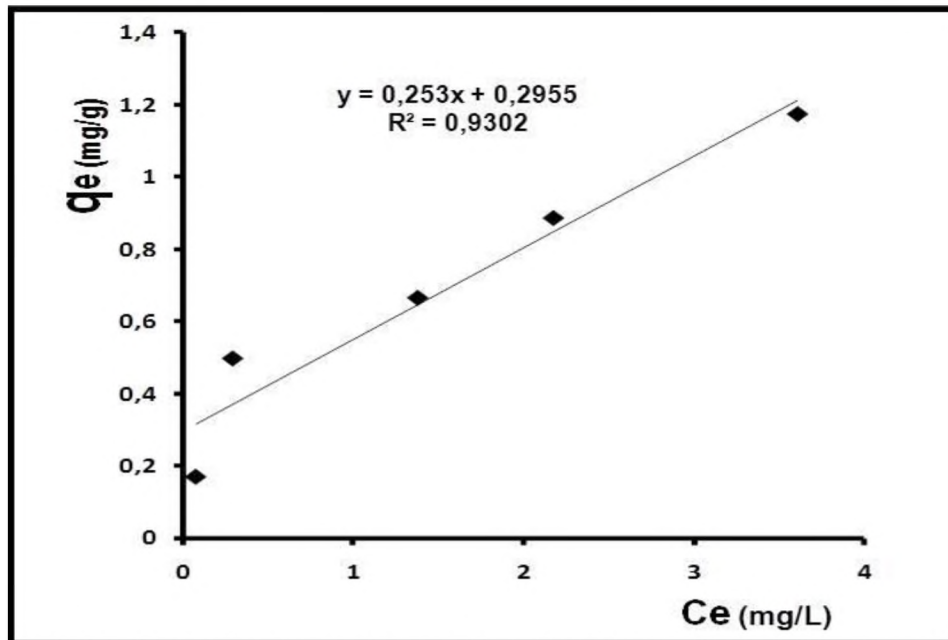


Figura 5.5.1.1.3 Isoterma de Langmuir para el Hierro ( $Fe^{2+}$ ). Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la figura 5.5.1.1.4 se aprecia la gráfica correspondiente al modelamiento matemático de los datos experimentales que corresponden a la isoterma de Freundlich en la cual se obtuvo un coeficiente de correlación ( $r^2$ ) con un valor de 0.940. Este valor resulta bajo con relación a la parte estadística sin embargo al hacer una comparación de las dos isotermas para este elemento, el más alto corresponde a la isoterma de Freundlich, lo que indica que la adsorción se lleva a cabo en forma de monocapa, en una superficie heterogénea.

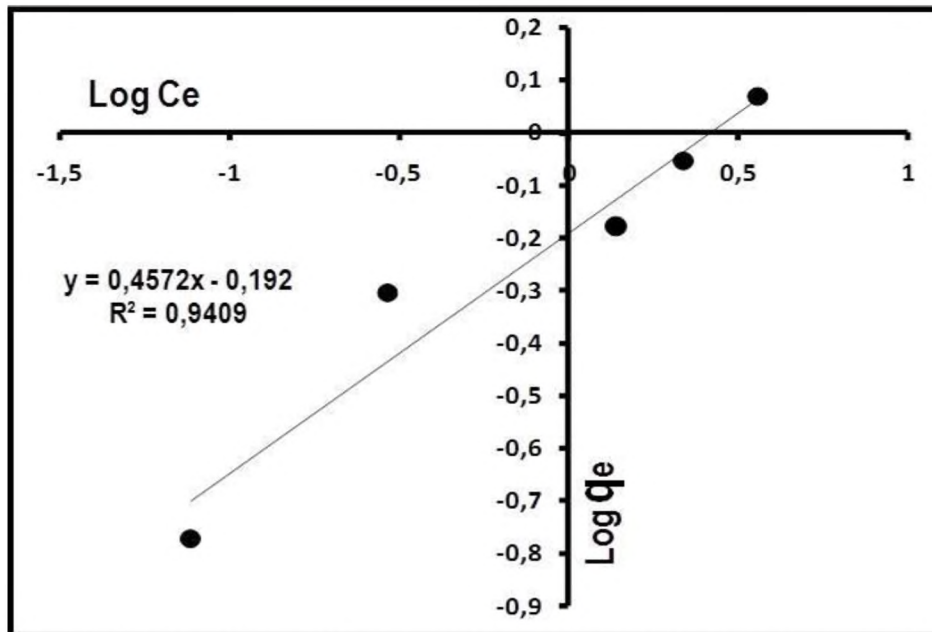


Figura 5.5.1.1.4 Isotherma de Freundlich para el Hierro (Fe<sup>2+</sup>). Fuente: Propia de los autores, 2015.

En la figura 5.5.1.1.5 se presenta la isoterma de Langmuir para el Zinc que señala que el coeficiente de correlación ( $r^2$ ) tiene un valor de 0.928. El valor resulta ser bajo al no establecerse dentro del intervalo estadístico de 0.98 a 1.0. A comparación de los valores obtenidos en la isoterma de Langmuir para el cobre y el hierro, el coeficiente de correlación resulto ser bajo. Sin embargo para el caso del zinc sucedió lo contrario teniendo el coeficiente de correlación más alto que en la isoterma de Freundlich. Este comportamiento es el mismo que se presentó para el cobre.

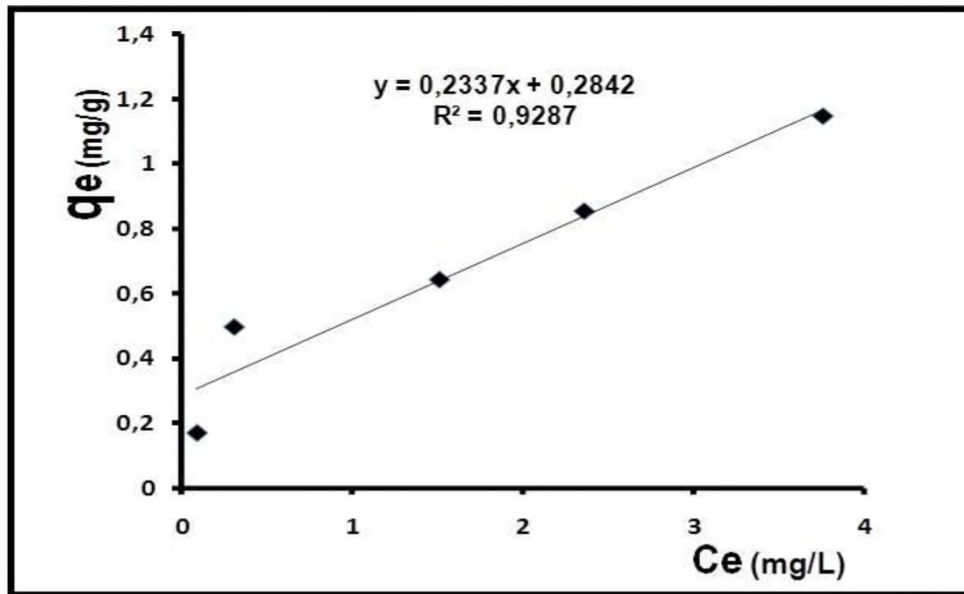


Figura 5.5.1.1.5 Isotherma de Langmuir para el Zinc ( $Zn^{2+}$ ). Fuente: Propia de los autores, 2015.

Para la isoterma de Freundlich en la figura 5.5.1.1.6 se muestra la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación ( $r^2$ ), con un valor de 0.923. Este valor resulta ser bajo en relación a las especificaciones estadísticas que indican que el valor debe estar entre 0.98 y 1.0. Como se puede observar para el zinc este modelo tuvo un valor bajo a diferencia del valor obtenido para el hierro y el cobre en esta isoterma.

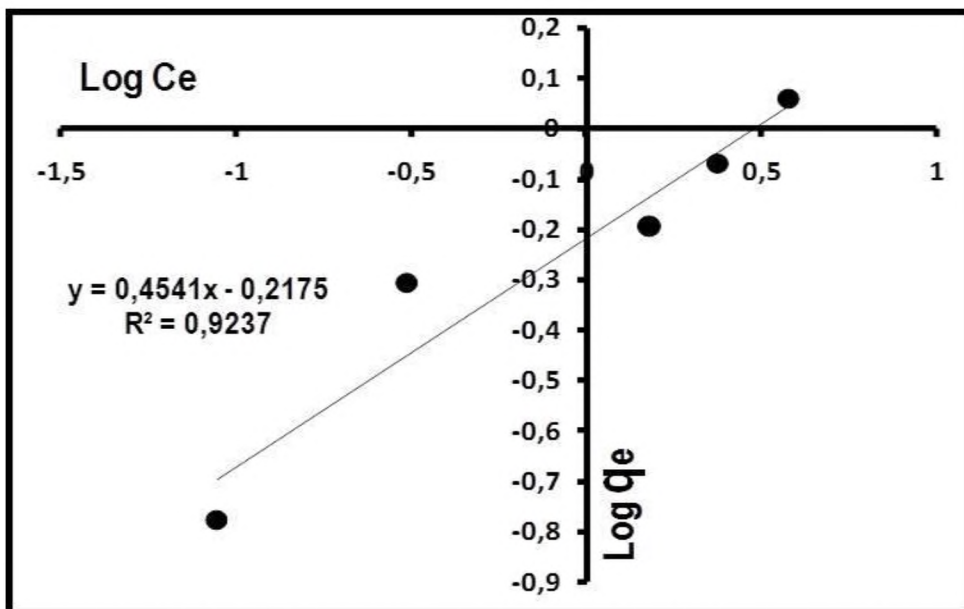


Figura 5.5.1.1.6 Isotherma de Freundlich para el Zinc ( $Zn^{2+}$ ). Fuente: Propia de los autores, 2015.

Para este elemento podría decirse que el comportamiento es similar, por así mencionarlo, basándose en los resultados de los coeficientes de correlación generados de los estudios de ambas isotermas. Pero si comparamos estos resultados contra las otras isotermas de los otros dos elementos puede establecerse que el fenómeno de adsorción es el mismo, es decir la adsorción se llevó a cabo en una superficie heterogénea y formando una monocapa. Esta aseveración se establece con base en los análisis de los resultados de los porcentajes de remoción y las correspondientes cinéticas. La variación de resultados puede justificarse debido a la ocupación de los sitios activos, primero por el cobre, seguido por el hierro y en su momento cuando se adsorbe el zinc, la mayoría de los sitios han sido ocupados, esto genera una disminución de porcentaje de eficiencia de remoción para el zinc. Finalmente este comportamiento es el mismo que se presentó en los dos analitos previos (cobre y zinc).

Se establece finalmente que la adsorción para los tres casos es igual, es decir que la superficie del biomaterial es heterogénea y fue determinante en los procesos de adsorción estudiados. Asimismo los porcentajes variaron debido al factor del radio iónico de cada una de las especies iónicas de los tres elementos estudiados.

La adsorción como se corroboró fue eficiente a bajas concentraciones, pero conforme aumenta la concentración del analito los porcentajes disminuyen. Esto se presentó de manera muy específica en los primeros apartados del capítulo, no obstante si se desea establecer un porcentaje óptimo de remoción se puede calcular un promedio de los porcentajes de remoción generados de todas las concentraciones de los tres elementos estudiados adsorbidos sobre el biomaterial, tenemos que para el cobre se alcanza un valor del 89.19 %, para el hierro fue de 77.6 %, para el zinc 75.92 % en un intervalo de 1 a 10 mg L<sup>-1</sup> de concentración en solución acuosa.

## Conclusiones

Al final del trabajo de investigación se generan las siguientes conclusiones:

- Los resultados a las concentraciones realizadas mostraron que el mayor porcentaje de remoción fue para el cobre. La propuesta para explicar este comportamiento es debido a que dicho elemento tiene un radio iónico más pequeño que el hierro y el zinc lo que hace que su adsorción sea favorecida, esto se constata en los porcentajes de remoción generados en la fase experimental.
- Como se mencionó en los resultados, la remoción se realizó a diferentes concentraciones 1, 3, 5, 7 y 10 mgL<sup>-1</sup>, para los tres elementos. En cuanto a sus comportamientos de porcentajes de remoción, estos fueron los mismos, en los primeros minutos se presentaron los incrementos más altos de remoción y posteriormente tendieron a tener un comportamiento asintótico. El cobre, fue el elemento que tuvo los porcentajes más altos de remoción, esto se debió a que su radio iónico es más pequeño que el de los otros elementos. Para el caso del Fe y el Zn, la remoción fue similar, ya que había una competencia entre estos dos analitos debido a que los dos tienen unos radios iónicos cercanos entre sí en cuanto a sus valores.
- Además se estableció que conforme aumenta la concentración de los analitos, la diferencias de porcentajes de remoción entre el Cu contra el Fe y Zn se acentúan visiblemente.
- Los porcentajes de remoción para el Cu, siempre fueron superiores a diferencia de los otros dos elementos. Esto se debe que entre el hierro y el zinc se presentó una competencia por los sitios activos en los cuales se lleva a cabo la adsorción. Finalmente este proceso favoreció al Fe, ya que a diferencia del zinc tuvo mayor remoción.
- De los cálculos realizados para las dos isotermas, estos mostraron que el modelo que más se ajusta es el de Freundlich. El modelo que explica el fenómeno de adsorción entre el biomaterial y los elementos indicando que la adsorción se lleva a cabo en forma de monocapa sobre una superficie heterogénea.
- La propuesta del mecanismo de adsorción se llevó a cabo en tres etapas, en la primera los elementos se acercaron a la estructura del biomaterial, en la segunda etapa los iones de Cu<sup>2+</sup> tuvieron prioridad, esto debido a que el radio iónico de este elemento es el más pequeño de los tres elementos y por cuestiones estereoquímicas, se favoreció su atracción.

En la última etapa la mayoría de los grupos funcionales (sitios activos) fueron ocupados en su mayoría por atracciones con el cobre, por lo que el porcentaje de remoción de este elemento fue mayor en comparación con los otros dos elementos.

- Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el biomaterial *Zea mays* (olote) puede ser considerado un material biosorbente para eliminar iones de Cu, Fe y Zn. por lo tanto puede ser una alternativa para incluir en algún tratamiento de aguas que contengan estos iones, principalmente en actividades de herrería y soldadura.
- Se determinó que los resultados para el cobre de 1.57 mg/L, y el zinc de 3.76mg/L., se encuentran dentro de los límites permisibles que establece la NOM-127-SSA1-1994, para el cobre 2.0 mg/L, para el zinc 5.0mg/L y para el hierro .30 mg/L. Para el caso del hierro no se cumplió la norma, ya que rebaso los límites permisibles dando como resultado 3.55mg/L., proponiendo que se realice otra etapa de adsorción para poder eliminar más iones de este elemento.

## Bibliografía

- (ATSDR), A. p. (2005). *Reseña Toxicológica del Cinc* . Recuperado el 24 de Marzo de 2015, de [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs60.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html)
- Acuña Carmona , A., Aguilera Vidal , R., Aguayo Arias , M., Azocar Garcia , G., Barra Rios , R., Fuentes Rios , D., y otros. (2003). *Conceptos Basicos sobre medio ambiente y desarrollo sustentable*. Buenos Aires Argentina : Overprint .
- Agouborde Manosalva, L. I. (2008). *Universidad de la Frontera, Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración*. Recuperado el 09 de Julio de 2014, de Remoción de Metales Pesados por Medio de Adsorbentes no Convencionales :  
[file:///C:/Documents%20and%20Settings/Personal/Mis%20documentos/Downloads/Tesis\\_Lina\\_Agouborde%20\(1\).pdf](file:///C:/Documents%20and%20Settings/Personal/Mis%20documentos/Downloads/Tesis_Lina_Agouborde%20(1).pdf)
- Agwaramgbo, L., Lathan, N., Edwards, S., & Nunez, S. (2013). Assessing Lead Removal from Contaminated Water Using Soil Biomaterials: Charcoal, Coffee, Tea, Fishbone, and Caffeine. *Journal of Environmental Protection*, 741-745.
- Ali, H., E., A., H.A., H., M.A., S., & A., A. (2013). Bioadsorption of Cd (II) From Contaminated Water on Treated Snwdust: Adsorption Mechanism and Optimization . *Scientific Research*, 1.
- Ambiente, M. d. (sin año ). *Problemática Ambiental y Contaminantes* . Recuperado el 16 de Diciembre de 2014, de Metales Pesados : [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales\\_pesados.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.aspx)
- Antonio, J. (sin ). *Radio iónico*. Recuperado el 5 de Marzo de 2015, de Radio iónico de los elementos representativos :  
<http://www.uam.es/docencia/elementos/spV21/conmarcos/graficos/radioionico/radioio.html>
- Atehortua, E., & Gartner, C. (Abril de 2013). *Revista Colombiana de Materiales* . Recuperado el 03 de Julio de 2014, de Estudios Preliminares de la Biomasa Seca de Eichhornia Crassipes como adsorbente de plomo y cromo en aguas :  
<http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/viewFile/15084/13161>
- ATSDR. (2 de Marzo de 2010). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. Recuperado el 13 de Octubre de 2014, de [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs132.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs132.html)
- ATSDR. (18 de Noviembre de 2013). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. Recuperado el 13 de Octubre de 2014, de ToxFAQs™ - Cadmio (Cadmium):  
[http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts5.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.html)

- ATSDR, A. p. (2005). *Resúmenes de Salud Pública*. Recuperado el 14 de Junio de 2014, de [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs55.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs55.html)
- Baird, C. (2001). *Química Ambiental*. España : Reverté, S. A.,.
- Beltrami, C. R. (2001). *La Contaminación el Equilibrio Ecológico* . Buenos Aires Republica de Argentina: Longseller.
- Bustamante Alcántara, E. (Septiembre de 2011). *Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas*. Recuperado el 03 de Julio de 2014, de Adsorción de Metales Pesados de Residuos de Café Modificados Químicamente: <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080223849.pdf>
- Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norteamérica CICEANA, A. C. (sin año ). *Contaminación del agua* . Recuperado el 24 de marzo de 2015, de [http://www.ciceana.org.mx/recursos/Contaminacion\\_del\\_agua.pdf](http://www.ciceana.org.mx/recursos/Contaminacion_del_agua.pdf)
- Cervantes, C., & Moreno Sanchez, R. (1999). *Contaminación Ambiental por Metales Pesados, Impacto en los Seres vivos*. Mexico, DF.: AGT, editor, S.A.
- Cyclus. (2014). *Cyclus*. Recuperado el 17 de Junio de 2014, de Tratamiento Terciario : <http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-terciario/>
- D. Barcelo, I., E. Solis, H., Gonzalez, C., L. Bussy, A., Avila, P., & A. García, J. (sin año). Determinación Experimental de las especies de hierro, magnesio y cobre en el agua de la presa J. A. Alzate, Estado de México . *Mexican Chemical Society* , 43.
- Dai, J., Fenglian, R., & Chun Yuan, T. (2012). Adsorption Behavior of Fe (II) and Fe (III) Ions on Thiourea Cross-Linked Chitosan with Fe (III) as Template. *Open Access Molecules*, 1-2.
- Dolores, M. G. (2003). *Toxicología Ambiental, Evaluación de riesgos para la salud humana* .Madrid: Mc Graw Hill.
- Domenech, X., Litter, M., & Mansilla, H. (2000). Remoción de contaminantes metálicos. 121-122.
- Estrucplan. (2002). *Estrucplan Online*. Recuperado el 26 de Junio de 2014, de Toxicología- Sustancias- Estaño: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=1178>
- García Rojas , N., Villanueva Díaz , P., Campos Medina , E., & Velázquez, R. A. (2012). Análisis de la adsorción como método de pulimento en el tratamiento de aguas residuales . *Redalyc* , 109-129.



- Gongming, Q., Maolin, L., Fei, W., & Xinggang, L. (2014). Removal of Fe<sup>3+</sup> from Aqueous Solution by Natural Apatite. *Journal of Surface Engineered Materials and Advance Technology* , 14-20.
- Guzman Colis, G., Ramírez López, E., Thalasso, F., Rodriguez Narciso, S., Guerrero Barrera, A., & Avelar Gonzáles, F. J. (2011). Evaluacion de Contaminantes en Agua y sedimentos del Río San Pedro en el Estado de Aguascalientes . *Universidad y Ciencia* , 17.
- Hengpeng , Y., & Zhijuan , Y. (2010). Adsorption of Pb (II) onto Modified Rice Bran . *Scientific Research* , 104-109.
- Hernandez , R. A., Carrasco, P., Mujica, R., & Espinola, M. (2007). Evaluacion de la capacidad de adsorción de desechos agroindustriales para la remoción de ácido acético. *Revista de la facultad de ingeniería, Universidad central de Venezuela*, 4.
- IBASA. (2011). IBASA. Recuperado el 17 de Junio de 2014, de El Binomio Agua Energía : <http://tratamientodeaguas.org.mx/>
- INECC. (17 de Agosto de 2009). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático* . Recuperado el 16 de Junio de 2014, de Metales Pesados : <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>
- Izquierdo, M. (2010). Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. 3-40.
- Jimenez , A. (sin año). *Radio iónico*. Recuperado el 5 de Marzo de 2015, de Radio iónico de los elementos representativos: <http://www.uam.es/docencia/elementos/spV21/conmarcos/graficos/radioionico/radioio.html>
- Jiménez Cisneros, B. E. (2001). *Contaminación Ambiental en México*. Colegio de Ingeniería Ambiental México A.C. de C. V.: Limusa.
- LENNTECH. (2015). *Water Treatment Solutions* . Recuperado el 24 de Marzo de 2015, de Hierro : <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/fe.htm>
- Lenntech. (sin año ). *Water Treatment Solutions*. Recuperado el 24 de Marzo de 2015, de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/zn.htm#Nombre>
- Lenntech, B. (2011). *Contaminantes del agua*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2012, de <http://www.lenntech.es/faq-contaminantes-del-agua.htm>
- LEVESTRONG. (2013). *Niveles de hierro en el agua potable* . Recuperado el 24 de Marzo de 2015, de [http://www.livestrong.com/es/niveles-hierro-agua-sobre\\_25780/](http://www.livestrong.com/es/niveles-hierro-agua-sobre_25780/)

- Madrid, E. (sin año). *Hierro*. Recuperado el 26 de Febrero de 2015, de <http://herramientas.educa.madrid.org/tabla/6usos/fe6.html>
- McGraw-Hill. (20 de Junio de 2011). *Maxmail*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2014, de Efectos Toxicos de los metales ( Metal Hierro): <http://www.mailxmail.com/curso-efectos-toxicos-metales-2/metal-hierro-fe>
- Mercado, P. (2012). Tratamiento de agua alimentados con energía solar: electrocoagulación adsorción contra fotoquímico-adsorción. En P. Mercado, *Tesis de Maestría, Facultad de Química UAEM*. Toluca, México .
- Mora Molina, J., Chaves Barquero, L., Araya Marchena, M., & Starbir Pérez, R. (Septiembre de 2012). *Desarrollo de Membranas de Quitosano y Diseño de un Equipo para la Eliminación de Metales Pesados del Agua* . Recuperado el 03 de Julio de 2014, de Tecnología en Marcha : [http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/tec\\_marcha/article/viewFile/453/381](http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/tec_marcha/article/viewFile/453/381)
- N. Babakhouya, H. A. (2010). Adsorption of Cd (II) Ions from Aqueous Solition using Mixed Sorbents Prepared from Olive Stone and Date Pit. *Applied Sciences* , 1.
- Naturales, S. d. (2009). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Recuperado el 24 de Junio de 2014, de <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales#2>
- NMX-AA-051-SCFI-2001. (2001). *Diario Oficial de la Federación* . Recuperado el 14 de Junio de 2013, de Secretaría de Economía : <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-051-SCFI-2001.pdf>
- NOM-001-SEMARNAT-1996. (30 de Octubre de 1996). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 15 de Junio de 2014, de Comisión Nacional del Agua: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NormasOficialesMexicanas.pdf>
- NOM-002-SEMARNAT-1996. (9 de Diciembre de 1997). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales* . Recuperado el 15 de Junio de 2014, de Comisión Nacional del Agua : <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NormasOficialesMexicanas.pdf>
- NOM-003-SEMARNAT-1997. (22 de Abril de 1998). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 15 de Junio de 2014, de Comisión Nacional del Agua: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NormasOficialesMexicanas.pdf>
- NOM-127-SSA1-1994. (22 de Noviembre de 2000). *Diario Oficial de la Federación* . Recuperado el 14 de Junio de 2013, de Secretaria de Salud: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>

- Pavon, Briones, & Ilangovan. (sin año). Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción de cadmio, cobre, hierro, níquel, plomo, y zinc, del agua utilizando zeolita natural. 1-3.
- Proal Najera, V., Martínez Tabche, L., & Mueller, N. (sin año). Estudio sobre la remoción de metales pesados en aguas de desechos bajo la técnica de aglomeración esférica. *Ciencia y mar*, 30.
- Reyes Toriz, E. D., Cerino Córdova, F. d., & Suárez Herrera, M. A. (Junio de 2006). *Remoción de Metales Pesados Carbón Activado como Soporte de Biomasa*. Recuperado el 08 de Julio de 2014, de [file:///C:/Documents%20and%20Settings/Personal/Mis%20documentos/Downloads/31\\_remo\\_cion.pdf](file:///C:/Documents%20and%20Settings/Personal/Mis%20documentos/Downloads/31_remo_cion.pdf)
- Robertson, W. O., & Dreshbach, R. (1998). *Toxicología*. México: Manuel Moderno.
- Ruda de Schenquer, E., Mongiello, A., & Acosta, A. (2004). *Contaminación y salud del suelo*. Santa Fe, República de Argentina: UNL.
- Sanchez, & Estrada. (2000). Análisis de metales pesados en las aguas residuales del río San Javier y repercusión en la salud e impacto ambiental. 1-4.
- SEMARNAT. (sin año). *Agua*. Recuperado el 23 de Marzo de 2015, de [http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/05\\_serie/yelmedioambiente/4\\_agua\\_v08.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/05_serie/yelmedioambiente/4_agua_v08.pdf)
- Universidad Nacional Autónoma de México, F. d. (sin año). *Fenómenos de Superficie. Adsorción*. Recuperado el Junio de 2014, de [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion\\_19664.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf)
- Villanueva Huerta, C. C. (2007). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química*. Recuperado el 10 de Julio de 2014, de Biosorción de Cobre (II) por biomasa pre tratada de cáscara de citrus sinensis (naranja), citrus limonium (limón) y opuntia ficus (palmeta de nopal): <http://es.slideshare.net/franknow/biosorcion-de-cobre-ii-por-biomasa-pretratada-de-cascara-de-naranja#>
- Walter J. Weber, J. (Febrero de 2003). *Google Libros*. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de Control de la Calidad del agua; Procesos Físicoquímicos: [https://books.google.com.mx/books?id=TLpzh5HQYvgC&pg=PA217&dq=adsorcion&hl=es&sa=X&ei=dsiRVO\\_cJM2lyATfuYGoAw&ved=0CCEQ6AEwAQ#v=onepage&q=adsorcion&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=TLpzh5HQYvgC&pg=PA217&dq=adsorcion&hl=es&sa=X&ei=dsiRVO_cJM2lyATfuYGoAw&ved=0CCEQ6AEwAQ#v=onepage&q=adsorcion&f=false)