

**RETENCIÓN DE Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) CON CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE
MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS**

MAYELIS SÁENZ MONTALVO

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
MONTERÍA – CÓRDOBA
2020**

**RETENCIÓN DE Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) CON CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE
MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS**

MAYELIS SÁENZ MONTALVO

Trabajo de grado, modalidad monografía como requisito para optar al título de Químico

DIRECTOR

DAIRO PÉREZ SOTELO. MSc

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

2020

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas expresadas, conceptos y resultados del proyecto son responsabilidad del autor.

Artículo 17, acuerdo N° 039 del 24 de junio de 2005 del Consejo Superior de la Universidad de Córdoba.

Nota de aceptación

Dairo Pérez Sotelo. Msc
Director

Manuel Páez Meza
Jurado

Roberth Paternina Uribe
Jurado

Montería, 2020.

AGRADECIMIENTOS

Detrás de este logro está mi esmero y esfuerzo, y el de las personas que hicieron de esto posible, a renglón seguido menciono a cada una de ellas.

Principalmente a Dios, por haberme acompañado y guiado durante el transcurso de mi carrera, por ser mi punto de referencia, mi fortaleza en momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias que enriquecieron mi formación académica.

A mis padres Rafael Sáenz Nassif y Elis Tais Montalvo Guerra, por ser mis motores, por sus esfuerzos y dedicación, por brindarme la educación superior y también por sus valiosos aportes para mi crecimiento personal.

A mi novio William Trespalacios Calderón, por su amor incondicional, apoyo constante y por sus palabras de motivación que me hicieron crecer como persona.

A mi tutor Dairo Pérez Sotelo, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, la dirección y el rigor que ha facilitado el desarrollo del mismo, y a mi profesor Basilio Díaz Pongutá por el aporte de sus conocimientos y su amistad.

A mis amigas Tania Humánez, Wendy Ortega y Teresa Martínez por brindarme su apoyo, comprensión y amistad.

A nuestra alma mater, la Universidad de Córdoba.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	16
4. GENERALIDADES DEL CARBÓN ACTIVADO	18
4.1 El Carbón.....	18
4.1.1 Clasificación de los carbones	18
4.1.2 Estructura del carbón	19
4.2. Carbón activado	21
4.2.1. Características fisicoquímicas del carbón activo	22
4.2.2. Activación del carbón	23
4.2.3. Parámetros del carbón activado.....	25
5. CAPACIDAD DE ADSORCIÓN.....	26
5.1. Adsorción.....	26
5.2. Capacidad de adsorción de un carbón	26
5.2.1. Parámetros que influyen en la adsorción del carbón activado.....	27
5.3. Isotermas de adsorción	28
5.4. Isotermas de adsorción en un sistema sólido-líquido	31
5.5. Precursores para el carbón activado	33
5.5.1. Propiedades de un precursor	34
5.5.2. Materiales lignocelulósicos	34
5.6. Metales pesados	36
5.6.1. Níquel	36

5.6.1.1. Efectos del Níquel en el medio ambiente.....	37
5.6.1.2. Efectos del Níquel en la salud.....	38
5.6.2. Adsorción de Níquel.....	39
5.6.3. Cromo.....	43
5.6.3.1. Efectos del Cromo en el medio ambiente.....	44
5.6.3.2. Efectos del Cromo en la salud.....	44
5.6.4. Adsorción de cromo.....	45
5.6.5. Mercurio.....	50
5.6.5.1. Efectos del Mercurio en el medio ambiente.....	50
5.6.5.2. Efectos del Mercurio en la salud.....	51
5.6.6. Adsorción de mercurio.....	52
6. Espectrofotometría de absorción atómica.....	55
6.1. Bases de la espectrofotometría de absorción atómica.....	55
6.2. Instrumentación.....	56
6.2.1 Fuente de radiación.....	56
6.2.2 Lámpara de cátodo hueco.....	57
6.2.4. Mechero de flujo laminar.....	58
6.2.4. Monocromador.....	59
DISCUSIÓN.....	60
CONCLUSIÓN.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	64

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Artículos relevantes.....	17
Tabla 2. Composición de los principales tipos de carbón natural.....	19
Tabla 3. Parámetros del carbón activado	25
Tabla 4. Propiedades de precursores de desechos agroindustriales para la producción de carbón activado.....	34
Tabla 5. Principales grupos funcionales y su afinidad por los iones metálicos.....	35
Tabla 6. Resultados de las pruebas de equilibrio de adsorción a pH de 1,2 unidades para el CAG2 y el CAG3	39
Tabla 7. Adsorción de níquel en solución de NiSO ₄	40
Tabla 8. Parámetros para el modelado cinético del proceso de adsorción de Cr (VI) mediante CA.	46

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura N° 1. Distribución porcentual de los artículos publicados respecto al año.....	16
Figura N° 2. Dependencia de las interacciones intra e intermoleculares con el tango del carbón (Orrego, 2008)....	20
Figura N° 3. Vista microscópica de microporos de carbón activado.....	22
Figura N° 4. Clasificación según la IUPAC de las formas de las isothermas de adsorción.....	30
Figura N° 5. Capacidad de adsorción (a) porcentaje de adsorción (b) de Ni	41
Figura N° 6. Porcentaje de adsorción (a) y capacidad de adsorción (b).....	42
Figura N° 7. Efecto del tamaño de partícula en la adsorción de Cr(VI).....	47
Figura N° 8. Eficiencia de adsorción para cascara de plátano.....	48
Figura N° 9. Comportamiento de Cr (VI) en soluciones binarias.....	49
Figura N° 10. Isothermas de adsorción de los CA modificados y sin modificar en soluciones de distinto pH.....	52
Figura N° 11. Isothermas tipo Langmuir de adsorción de Hg ²⁺ utilizando carbón activado de ZM como material adsorbente.....	53
Figura N° 12. Porcentaje de adsorción de mercurio con respecto a su concentración inicial.....	54
Figura N° 13. Componentes de un espectrómetro de absorción atómica.....	56
Figura N° 14. Lámpara de cátodo hueco.....	57
Figura N° 15. Mechero de flujo laminar.....	59

RESUMEN

La contaminación del agua es producida principalmente por el vertimiento de aguas industriales y agrícolas; el incremento de uso de metales y sustancias químicas en los procesos industriales ha resultado en la generación de contaminación de muchos efluentes acuíferos, con la presencia de tóxicos orgánicos, metales pesados, entre otros; por esta razón, el objetivo de este estudio fue conocer, por medio del estado del arte, la capacidad de retención de Ni (II), Cr (VI) y Hg (II) con carbón activado teniendo como precursores materiales lignocelulósicos y su eficiencia como método para mitigar la concentración de estos metales en las aguas residuales, para lo cual el proceso de búsqueda de la información referente a retención de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) con carbón activado a partir de material lignocelulósicos, se llevó a cabo haciendo uso de artículos publicados en revistas seriadas e indexadas a través de las bases de datos Science Direct, Scopus, y Scielo. Se concluyó que la técnica es eficiente, donde los materiales lignocelulosicos más usados incluyen, cáscaras de frutos secos, cortezas y semillas de diferentes árboles; para la adsorción de Ni(II), el carbón activado a partir de la cascara de coco, con una capacidad de adsorción de 98 %; para Cr(VI), el carbón activado a partir de la cascara de plátano, con una capacidad de adsorción de 65,4 % y para el Hg(II), el carbón activado a partir de la cascarilla de arroz, con una capacidad de adsorción de 92 % así mismo, se destaca el importante papel de la afinidad de los metales hacia la lignina y los grupos ácidos superficiales.

Palabras claves: Carbón, Adsorción, Metales Pesados, Lignocelulósicos, Lignina, Precursores.

ABSTRACT

Water pollution is produced mainly by the discharge of industrial and agricultural waters; The increase in the use of processes of metals and chemical substances in industrial plants has resulted in the generation of contamination of many aquifer effluents, with the presence of organic toxins, heavy metals, among others; For this reason, the objective of this study was to know, by means of the state of the art, the retention capacity of Ni (II), Cr (VI) and Hg (II) with activated carbon having lignocellulosic materials as precursors and their efficiency as method to mitigate the concentration of these metals in wastewater, for which the process of searching for information regarding retention of Ni (II), Cr (VI) and Hg (II) with activated carbon from lignocellulosic material, It was carried out using articles published in serial journals and indexed through the Science Direct, Scopus and Scielo databases. It was concluded that the technique is efficient, where the most used lignocellulosic materials include nutshells, barks and seeds of different trees; for the adsorption of Ni (II), the activated carbon from the coconut shell, with an adsorption capacity of 98%; for Cr (VI), activated carbon from banana peel, with an adsorption capacity of 65,4 % and for Hg (II), activated carbon from rice husk, with a capacity of 92 % adsorption also highlights the important role of the affinity of metals towards lignin and surface acid groups.

Keywords: Carbon, Adsorption, Heavy Metals, Lignocellulosics, Lignin, Precursors.

1. INTRODUCCIÓN

Los seres humanos debemos convivir con ciertos compuestos y elementos que se encuentran de manera natural en nuestro alrededor. Sin embargo, algunos de estos pueden afectar considerablemente la salud de cualquier individuo; algunos de estos elementos perjudiciales para el ser humano son Ni(II), Cr(VI) y Hg(II). Se conoce que, los niveles naturales de mercurio en la corteza terrestre varían de un lugar a otro, pero la media es de 50 mg por tonelada de roca, por lo cual, el mercurio se extrae cuando está presente en mineral de cinabrio, que generalmente contiene alrededor de 10 kg por tonelada de roca, ahora bien, el metilmercurio es particularmente problemático, porque puede acumularse en algunas partes de peces de agua dulce y agua salada en niveles mucho más altos que los niveles del agua que los rodea. En cuanto al níquel, se conoce que constituye el 0,008 % de la corteza terrestre, los minerales de níquel están ampliamente difundidos en pequeñas concentraciones, los más importantes son: la pirrotina o pirita magnética, la garnierita, la nicolita o niquelina, el níquel arsenical, y el níquel antimónico; en los sistemas acuáticos, el níquel habitualmente se encuentra en su forma Ni^{2+} el espectro de los compuestos que se introducen en los cuerpos de agua por acción antrópica abarca desde sales solubles y óxidos insolubles hasta polvo de níquel metálico (INS, 2015).

Por otra parte, el cromo se encuentra en la naturaleza casi exclusivamente en forma de compuestos, el mineral de cromo más importante es la cromita (cromoferrita, pirita crómica), los diversos compuestos del cromo hexavalente representan la mayor amenaza, especialmente debido a sus efectos genéticos. se llevó a cabo en Colombia el estudio *“Effect of anthropic activities on the physicochemical and microbiological characteristics of the Bogotá River along the municipality of Villapinzón-Cundinamarca”* (Díaz, J., Granada, C. 2016), el cual tuvo como una concentración de $0,105 \text{ mg.L}^{-1}$ y $0,700 \text{ mg.L}^{-1}$ de cromo total, en la zona de vertimiento de las curtiembres; en estas tres estaciones los valores superan el nivel máximo que tiene efecto adverso sobre la salud humana ($0,05 \text{ mg.L}^{-1}$) según la normatividad colombiana (Miniambiente, 2004), es decir, el cromo total tiene una concentración en el agua 2-10 veces mayor al nivel saludable. Estas estaciones también superan el nivel máximo de cromo total para agua potable establecido por la EPA (100 partes por 1 000 millones) (EPA, 2010).

La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables, algunos de estos metales tienen efectos de bioacumulación, ya que una vez emitidos pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años; además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otras especie animal (biomagnificación), por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación (Chávez, 2011). Los efectos negativos de estos metales pesados son principalmente en el sistema renal, ya que la ingesta de aguas con alto nivel de dichos metales ocasiona una concentración irregular de proteínas en la orina (La EPA recomienda que los niveles de estos metales pesados en el agua potable no excedan 0.1 mg.L^{-1}) (ATSDR, 2016), esto genera un desequilibrio que compromete considerablemente a los riñones. Ahora bien, al ingerir agua contaminada con presencia de estos metales pesados, la cantidad que pasará al cuerpo a través del estómago y los intestinos será más alta que si se come alimentos que contienen una cantidad similar de estos, una vez dentro del cuerpo, pueden distribuirse a todos los órganos, pero se distribuye principalmente a los riñones. (ATSDR, 2016).

Para eliminar o recuperar metales contenidos en residuales líquidos se pueden aplicar procesos de precipitación, coagulación/floculación, intercambio iónico, adsorción, extracción por solventes, cementación, procesos electroquímicos y biológicos, evaporación, filtración y procesos de membranas. Sin embargo, para estos procesos el uso de carbón activado ha tenido muy buenos resultados, actualmente es utilizado en la gran mayoría de los procesos de remoción de contaminantes en fase acuosas (Fu et al., 2011). La adsorción es un proceso por medio del cual se da la transferencia de moléculas disueltas en una fase líquida a una fase sólida en varias etapas sobre la superficie del carbón activado (Ngai et al., 2005). El proceso de adsorción, se puede describir cinéticamente en cuatro pasos: primero, una transferencia del metal desde la fase líquida hasta la película que rodea al adsorbente; luego, una transferencia, a través de la película líquida hacia el adsorbente; posteriormente, se da la difusión del metal en el adsorbente, para que esto facilite el proceso de adsorción, químico o físico, donde finalmente se dan las interacciones del metal en los sitios activos del adsorbente (Netzahuatl-Muñoz et al., 2010). La adsorción se puede desarrollar utilizando carbón activado a partir de material lignocelulosico, el cual abarca una amplia variedad de residuos agroindustriales, por lo cual es un material de fácil acceso y poco

costoso. Estos materiales en su mayoría están conformados por celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina, que son los principales responsables de la adsorción de los iones metálicos. Otras propiedades del carbón activado son la densidad aparente, resistencia a la abrasión, el tamaño de partícula, superficie química y efectos de difusión y la distribución del tamaño del poro (Colpas et al., 2016).

La creciente demanda internacional de carbones activados, principalmente asociada a su uso en la resolución de problemas del ambiente, ha conducido a investigar la capacidad de retención de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) empleando diversos residuos agroindustriales como potenciales precursores de carbón activado; ya que este tipo de materiales lignocelulósicos son de bajo costo y abundante disponibilidad.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Conocer por medio del estado del arte, la capacidad de retención de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) con carbón activado a partir de materiales lignocelulósicos y su eficiencia como método para mitigar la concentración de estos metales en las aguas residuales, con ventana en función del tiempo de 5 años con respecto al actual.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar búsqueda de información en base de datos científicas con respecto a la retención de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) con carbón activado a partir de materiales lignocelulósicos.
- Analizar la eficiencia del carbón activado a partir de materiales lignocelulósicos para la retención de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II).
- Indagar sobre el método de espectroscopia de absorción atómica como método para evaluar la eficiencia de adsorción de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II).

3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El proceso de búsqueda de la información referente a retención de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) con carbón activado a partir de material lignocelulósicos, se llevó a cabo haciendo uso de artículos publicados en revistas seriadas e indexadas a través de las bases de datos Science Direct, Scopus, y Scielo.

Primeramente, se realizó la búsqueda utilizando las palabras claves “carbón activado”, “lignocelulósicos” para observar que tanto se ha trabajado el tema a nivel nacional e internacional los últimos 5 años, se extrajo un total de 5.714 artículos publicados por las tres bases de datos; luego se agregó como filtro “metales pesados”, lo cual redujo la cantidad de trabajos primeramente obtenidos en las bases de datos, a un total de 1.604; en base a esto se observó que la base de datos Science Direct fue la que más aportes formalizó en los últimos 5 años, con un 99 %; considerando a Scielo como la base de datos que menos contribuyó, con un 0,1 % (Figura N°1). Sin embargo, no todos artículos contenían la información requerida para formar parte del estudio, teniendo en cuenta que se necesitaban aspectos relevantes, como adsorción Ni(II), Cr(VI) o Hg(II) en matriz acuosa; por lo cual, aquellos que no cumplían los estándares, fueron utilizados para realizar discusiones en base a las investigaciones realizadas. Posteriormente, se destacan 11 artículos (Tabla N°1), considerados más relevantes desde el punto de vista de la temática investigada.

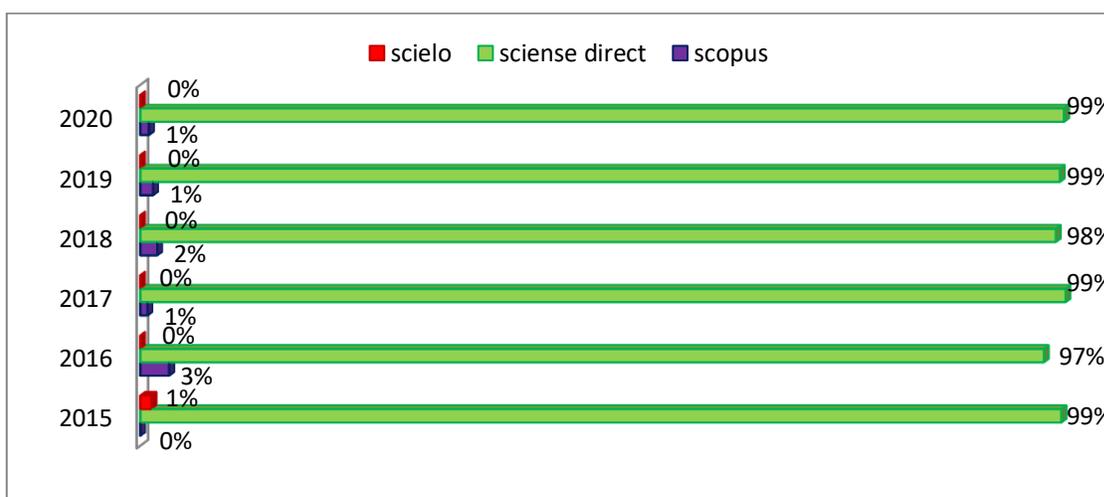


Figura N° 1. Distribución porcentual de los artículos publicados respecto al año

Tabla N° 1 Artículos relevantes

TITULO	AUTORES	Año de publicación
Remoción de mercurio empleando carbón activado preparado a partir de aguaje (mauritia flexuosa)	Daniel Obregón-Valencia*, Ilse Acostaa, Isabel Díaz, Rosario Sun-Koub	2020
Remoción de cromo hexavalente empleando carbón activado como adsorbente	Jorge Pellegrini1, Jorge de Celis 1, Juan Apesteguy2.	2018
Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente	Candelaria Tejada Tovar1*, Ángel Villabona Ortiz2, María Jiménez Villadiego3	2017
Adsorción de NI(II) en carbón activado de conchas de coco modificado con soluciones de Ácido Nítrico	Ing. Mónica Hernández-RodríguezI, Ing. Alexis Otero-CalvisI, Dr. José Falcón-HernándezII, Dr. Yan YpermanIII	2017
Adsorción de Mercurio Utilizando Carbones Activados Modificados con Peróxido de Hidrogeno y Calentamiento	Fredy Colpas (1)*, Arnulfo A. Tarón 2 y Wilder Fon 3	2016
Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco	Dr. Margarita Penedo Medina, Msc. Enma Michel Manals Cutiño, Msc. Frank Vendrell Calzadilla, Msc. Dolores Salas Tort	2016
Aplicación de carbón activado de cascarón de coco en adsorción de especies metálicas contenidas en el licor de desecho (WL) de la lixiviación ácida de mineral laterítico	MSc. Enma M. Manals Cutiño, MSc. Frank Vendrell Calzadilla, Dra. Margarita Penedo Medina	2016
Capacidad de Adsorción del Carbón Activado de Algarrobo como Lecho Fijo para la Adsorción de Níquel	Jefferson Contreras *, 1 Gilberto Colina *, 2 Danilo López, 3 Williams Campos, 1 Nancy Rincón	2016
Estudio de modificación química y física de biomasa (Citrus sinensis y Musa paradisiaca) para la adsorción de metales pesados en solución.	Lesly Tejada Benítez, Candelaria Tejada Tovar, Wilfredo Marimón Bolívar, Ángel Villabona Ortiz	2015
Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico	Candelaria Tejada-Tovar, Ángel Villabona-Ortiz2 y Luz Garcés-Jaraba3	2015
Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje	María del Rosario Sun-Kou*1; Daniel Obregón-Valencia2; Ángela Pinedo-Flores1; Ana Lucía Paredes-Doig1; Javier Aylas Orejón1	2015

4. GENERALIDADES DEL CARBÓN ACTIVADO

4.1 El Carbón

El carbón es una roca combustible de origen sedimentario, que presenta gran contenido en carbono, formada a partir de restos de vida vegetal; a medida que se va formando el carbón, este sufre ciertos cambios, los cuales proporcionan un enriquecimiento de carbono, ya que éste permanece mientras que los demás elementos que lo componen (oxígeno y nitrógeno) van desapareciendo. Cabe resaltar que dichos cambios dependen de las condiciones de presión y temperatura, las cuales son proporcionales a la profundidad. Por esta razón los depósitos que cuentan con los carbones de mejor calidad son los depósitos más profundos, que corresponden a los más antiguos (“El carbón”, 2016).

4.1.1 Clasificación de los carbones

Los carbones naturales son los de origen fósil y los artificiales son producidos por el hombre.

Entre los carbones naturales tenemos:

- Turba: se forma por la descomposición de las plantas (Sevilla, 2002). Denominado carbón joven por su rápida formación, es el de mayor contenido en impurezas y humedad y el de menor poder calorífico (Vallina, 2013).
- Lignito: se forma una vez comprimida la turba. Es el carbón con mayor grado de impurezas (Vallina, 2013), de menor valor calórico, porque se formó en épocas más recientes y contiene menos carbón (30 %) y más agua. Es una sustancia parda y desmenuzable en la que se pueden reconocer algunas estructuras vegetales (Sevilla, 2002).
- Hulla: se origina por la compresión del lignito. Reúne a una gran variedad de carbones con diferente contenido en impurezas. Tiene un importante poder calorífico por lo que se utiliza en las plantas de producción de energía. Es dura y quebradiza, de color negro. La concentración de carbono está entre el 75 y el 80 % (Sevilla, 2002).

- Antracita: procede de la transformación de la hulla. Es el mejor de los carbones, muy poco contaminante y de alto poder calorífico. Arde con dificultad, pero desprende mucho calor y poco humo. Es negro, brillante y muy duro. Tiene una concentración de hasta el 95 % de carbono (Sevilla, 2002).

En la tabla N° 2, se puede ver la composición de los principales tipos de carbón natural

Tabla N°2. Composición de los principales tipos de carbón natural

	Humedad (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	Volátiles (%)	Poder calorífico (kcal/g)
Turba	70-90	45-60	4-7	20-45	1-3	45-75	4,5-6
Lignito	30-50	60-75	4-7	17-35	1-2	45-60	6-7
Hulla	1-20	75-92	4-6	3-20	1-2	11-50	7-8
Antracita	1-4	92-95	3-4	2-3	1-2	3-10	8-9

Fuente: (Sevilla, 2002)

4.1.2 Estructura del carbón

El carbón es una mezcla compleja de material orgánico y componentes inorgánicos, la parte orgánica del carbón está constituida principalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno y pequeñas cantidades de nitrógeno y azufre. Además contiene agua libre (humedad inherente) cuyo contenido varia de 40 a 50 % de lignitos y menos de 5 % de antracitas (Orrego, 2008).

Debido a su carácter heterogéneo, no es posible atribuirle al carbón una estructura única, se considera como una red tridimensional de carácter polimérico, sin unidades monomérica repetidas regularmente, en la que gran variedad de macromoléculas con diferente masa molecular y proporciones de sus grupos funcionales, se enlazan para formar clúster de anillos fusionados que se mantienen unidos gracias a las interacciones intermoleculares principalmente iónicas de lignitos, de tipo puente de hidrogeno en carbones bituminosos y $\pi - \pi$ en antracitas (Marzec, 2002). En general, es una mezcla compleja de entidades estructurales diferentes. La

caracterización detallada del material orgánico es imposible, debido a su naturaleza amorfa y al gran número de grupo funcionales que lo conforman, aun cuando actualmente existen analíticas poderosas en la elucidación estructural de moléculas orgánicas como Resonancia Magnética Nuclear (RMN), Difracción de Rayos X (DRX) y espectrometría de masas MALDI-TOF en la determinación de pesos moleculares.

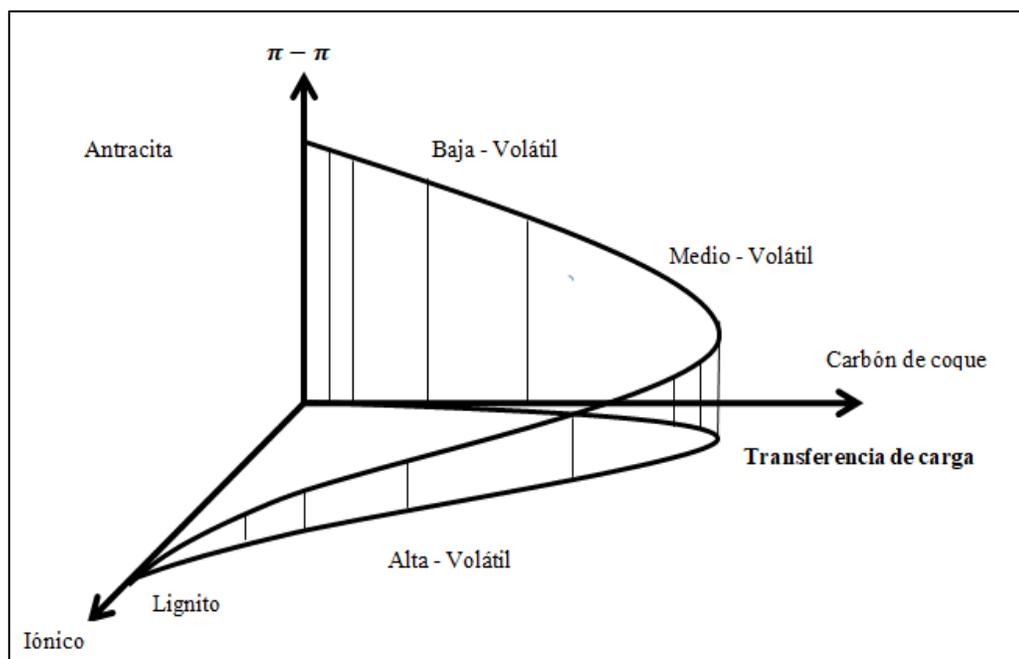


Figura N° 2. Dependencia de las interacciones intra e intermoleculares con el rango del carbón

Fuente: (Orrego, 2008).

Las fuerzas de atracción inter e intramoleculares $\pi - \pi$ entre anillos aromáticos, iónicas y transferencia de carga (estructura secundaria), están relacionadas con el rango de los carbones como se observa en la figura N°2. Cuando el rango aumenta, se incrementa la aromaticidad y el número de anillos por unidad estructural, la sustitución de las cadenas decrece y la estructura tiende a compactarse dando lugar a una red covalente con fuertes interacciones $\pi - \pi$ entre los anillos aromáticos (Marzec, 2002).

4.2. Carbón activado

El nombre de carbón activado, se le atribuye a una serie de carbones porosos preparados artificialmente para que presenten un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna, características que son responsables de sus propiedades adsorbentes, las cuales son utilizadas ampliamente en muchas aplicaciones tanto en fase gas como en fase líquida (Rodríguez, 2006).

El carbón activado, posee la capacidad retener en su superficie uno o más componentes (átomos, moléculas, iones) del líquido que está en contacto con él; este fenómeno es denominado “poder adsorbente”. El carbón activado se caracteriza por poseer una superficie específica (alrededor de 500 a 1500 m² por gramo) con una extensa cantidad de poros muy finos que son los que retienen (adsorben) ciertos compuestos no deseados. Son las altas temperaturas, la atmósfera especial y la inyección de vapor del proceso de fabricación del carbón activado lo que activa y crea la porosidad (Carrillo y Sánchez, 2013).

Sin embargo, las propiedades adsorbentes de un carbón activado no se definen únicamente por su estructura porosa, sino también por su naturaleza química, el carbón activado presenta en su estructura átomos de carbono con valencia insaturada y, además, grupos funcionales (principalmente de oxígeno) y componentes inorgánicos que son los responsables del porcentaje de cenizas, todos ellos con un efecto importante en los procesos de adsorción (Trinidad, 2013).

Los grupos funcionales de oxígeno ocasionan que la superficie del carbón sea químicamente reactiva, razón por la que esto afecta las propiedades adsorbentes, especialmente para moléculas de cierto carácter polar. Así, el carbón activado puede ser considerado en principio como hidrófobo por su poca afinidad por el agua, lo que es de gran importancia para aplicaciones como la adsorción de gases en presencia de humedad, o de especies en disolución acuosa; sin embargo, la presencia de grupos funcionales en la superficie del carbón activado hace que puedan interactuar con el agua, generando que la superficie sea más hidrófila (Rodríguez, 2006).

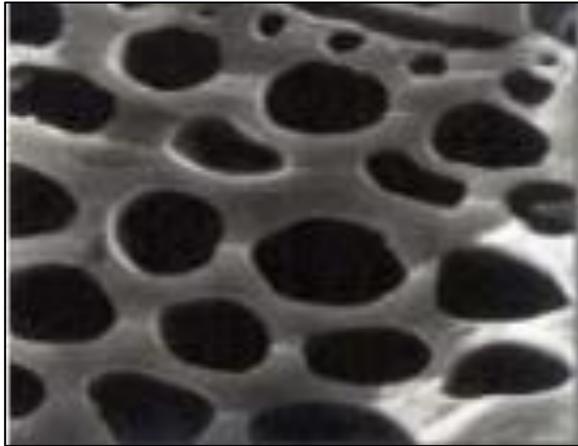


Figura N° 3: Vista microscópica de microporos de carbón activado.

Fuente: (Yadira Carrillo y Sánchez Muños 2013)

4.2.1. Características fisicoquímicas del carbón activo

- Composición química: El término carbón activo designa un amplio espectro de materiales que se diferencian principalmente en su estructura interna (distribución de poros y superficie específica) y en su granulometría. El carbón activo se compone en un 75-80 % en carbono y un 5-10 % en cenizas.
- Estructura física del carbón activo: El carbón activo posee una estructura microcristalina que recuerda en cierta medida a la del grafito; esta estructura que presenta el carbón activo da lugar a una distribución de tamaños de poro bien determinada. Los poros de un carbón activado se clasifican de acuerdo a su tamaño, en tres tipos:
 - Macroporos (500 nm)
 - Poros medios o mesoporos (25 nm)
 - Microporos (1 nm)

La distribución del tamaño de poro depende fundamentalmente de tres factores: El origen de la materia prima, el tipo de activación y la duración del proceso de activación. (Chiclote, 2018).

4.2.2. Activación del carbón

La función del carbón activo en los procesos de adsorción viene dada fundamentalmente, por la naturaleza de la materia prima y del proceso de activación utilizado en la producción del mismo (Sevilla, 2002). Un carbón activado tiene una superficie activa de 1000 a 1200 m² /g, lo cual expresa que un gramo de carbón activado tiene una superficie activa similar al área de un campo de fútbol. Si el carbón tiene gran afinidad por la adsorción específica de un compuesto, la cantidad que puede remover de dicho compuesto, es de hasta 60 gramos de contaminante por cada 100 gramos de carbón activado (Segnini et al., 2008); cualidades que han llevado a argumentar que el uso del carbón es la mejor tecnología disponible actualmente para la remoción de contaminantes del aire y del agua. Su capacidad absorbente se ve favorecida por la estructura porosa y la interacción con adsorbatos polares y no polares, debido a su estructura química, además las reacciones químicas en su superficie están influenciadas por centros activos, dislocaciones y discontinuidades, donde los carbones poseen electrones desapareados y valencias insaturadas, presentando mayor energía potencial (Sevilla, 2002). Los procesos de fabricación del carbón activado se dividen según el tipo de activación: La activación física (llamada también térmica) y la activación química (Luna et al., 2007).

El proceso de activación física se inicia con la etapa de carbonización, de tal manera que se logre la deshidratación y la desvolatilización de forma controlada, obteniéndose un carbonizado con elevado porcentaje de carbono fijo y una estructura porosa inicial. Durante la carbonización los elementos no carbonosos, como el hidrógeno y oxígeno, presentes en la materia prima, son eliminados en parte por la pirólisis del material y los átomos de carbono se organizan en estructuras microcristalitas, entre estos micro cristales hay espacios libres, debido a que su ordenamiento es irregular (Vélez, 2015). Durante la gasificación el carbonizado se expone a una atmosfera oxidante (vapor de agua, dióxido de carbono, o mezcla de ambos) que elimina los productos volátiles y átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y el área específica. El carbón que se obtiene es llamado carbón primario (Luna et al., 2007). La activación se realiza en una segunda etapa a temperaturas entre 800 y 1100 °C en presencia de un oxidante como agente activante que puede ser vapor de agua (Vélez, 2015). Se efectúa la siguiente reacción:

El carbón que reacciona con el vapor de agua, escapa en forma de hidrógeno y monóxido de carbono dejando una gran porosidad en la estructura del material. La forma, tamaño y naturaleza de la porosidad formada depende de factores como: el pre tratamiento químico que se haya dado al material, el origen del material a partir del cual se elabora el carbón activado, temperatura de activación, etc. (Segnini et al., 2008).

El proceso de activación química por su parte se desarrolla en una sola etapa, calentando en atmósfera inerte una mezcla del agente activante con el material de partida (Vélez, 2015). La porosidad de los carbones que se obtiene por activación química es generada por reacciones de deshidratación química, que tienen lugar a temperaturas mucho más bajas, entre 200 y 650 °C. En este proceso el material a base de carbón se impregna con un agente químico, principalmente ácido fosfórico, cloruro de cinc u otras sales y el material impregnado se calienta en un horno a 500 –700 °C. Los agentes químicos utilizados reducen la formación de materia volátil y alquitranes. El carbón resultante se lava para eliminar los restos del agente químico usado. Este carbón es llamado carbón secundario (Luna et al., 2007). La composición química del carbón activo es aproximadamente un 75-80 % en carbono, 5–10 % en cenizas, 60 % en oxígeno y 0,5 % en hidrógeno (Sevilla, 2002).

4.2.3. Parámetros del carbón activado

En la tabla 3, se muestran los principales parámetros especificados para carbón activado granular que se destina para el tratamiento de agua, también válidos para el carbón activado en polvo.

Tabla N° 3. Parámetros del carbón activado

PARAMETROS	UNIDADES EN LOS QUE SE EXPRESA	RANGO DE VAORES TIPICOS
Número de yodo	Mg.g ⁻¹ de carbón	500 a 1.200
Área superficial	m ² /g	500 a 1.200
Radio medio de poro y volumen total de poro	nm y cm ³	0,7 a 500,0 Y 0,2 a 1,0
Densidad aparente	g/ cm ³	0,26 a 0,65
Dureza	Adimensional	30 a 99
Rango de tamaño de partícula	Malla estándar americana (U.S. Std sieve)	4x8 a 20x50
Tamaño efectivo de partícula	mm	0,4 a 3,3
Coficiente de Uniformidad	Adimensional	Menor a 2,1
Contenido de cenizas totales	% Base seca	3 a 15
Solubles en agua	% Base seca	0,5 a 7
pH del extracto acuoso	pH	2 a 11
Humedad	%	2 a 15
Longitud de Semidecloración	cm	2 a 10

Fuente: (Sevilla, U. 2011).

5. CAPACIDAD DE ADSORCIÓN

5.1. Adsorción

La adsorción es un método altamente eficiente para la eliminación y retención de compuestos orgánicos y metales en medio acuoso, debido al fácil manejo de los materiales adsorbentes utilizados; este es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello, se considera como un fenómeno sub superficial.; la sustancia que se concentra en la superficie o es adsorbida se llama “adsorbato” y la fase que adsorbe, se llama “adsorbente” (Peña et al., 2012). Por tal razón, la atención industrial se ha enfocado en las últimas décadas en la síntesis y el desarrollo de carbonizados de bajo costo, pero con propiedades texturales adecuadas para usos ambientales, ya que el carbón activado es el adsorbente más versátil y comúnmente usado debido a su alta área superficial y volumen de poro, alta capacidad de adsorción, con cinética rápida, y relativamente fácil regeneración.

5.2. Capacidad de adsorción de un carbón

La capacidad de adsorción de un determinado carbón activado se puede valorar a partir de los datos de la isoterma. Si se representan los datos de la isoterma, se obtendrá una gráfica como la figura N° 4. A partir de esta gráfica, la capacidad de adsorción del carbón se puede determinar extendiendo la isoterma hasta la intersección con la línea vertical trazada por el punto correspondiente a la concentración inicial C_0 , el valor de $(x/m) C_0$ que corresponde a ese punto se puede leer en el eje de ordenada en el gráfico. Este valor de $C_0 (x/m)$ representa la cantidad de materia adsorbida por unidad de peso de carbón activado, una vez llegado al punto de equilibrio con la concentración inicial de constituyente. Esta condición se debe cumplir en la parte superior de un lecho de carbón correspondiente a un tratamiento en columna de contacto, por lo cual representa la capacidad de adsorción última del carbón para un constituyente determinado (Chirinos, 2018).

5.2.1. Parámetros que influyen en la adsorción del carbón activado.

La adsorción es un proceso por el cual moléculas de impurezas se adhieren a la superficie del carbón activado, la adherencia es gobernada por una atracción electroquímica, el resultado es la creación de millones de poros microscópicos en la superficie del carbón. Esta gran cantidad de área superficial provee grandes oportunidades para que tenga lugar el proceso de adsorción. El carbón activado tiene una gran atracción adsorptiva para otras moléculas (orgánicas) basadas en el carbono, además, es eficiente reteniendo firmemente moléculas más pesadas, tales como compuestos orgánicos aromáticos. En el proceso de adsorción, se da una interacción tipo imán, que actúa para mantener las impurezas en la superficie del carbón activado, esto es una acción totalmente diferente de aquella que actúa como una esponja en lo que es el proceso de absorción, en el cual un gas o líquido es atraído hasta el centro del cuerpo poroso y allí mantenido. (Chiclote, 2018)

- Área superficial: La capacidad de adsorción es proporcional al área superficial (ella es función del grado de activación del carbón).
- Tamaño del poro: La correcta distribución del tamaño de poros es necesaria para facilitar el proceso de adsorción (suministrando los sitios de adsorción, los 43 poros finos, y los canales de transporte adecuados para el manejo del adsorbato).
- Tamaño de partículas: El tamaño de partículas no influye sobre el área superficial total. El área superficial total es definida por el grado de activación y por la estructura de los poros del carbón.
- Temperatura: Las temperaturas bajas aumentan la capacidad de adsorción.
- Concentración del adsorbato: La capacidad de adsorción es proporcional a la concentración del adsorbato (altas concentraciones proveen grandes fuerzas de empuje durante el proceso de adsorción).
- pH: La capacidad de adsorción aumenta, con aquellas condiciones de pH que aumentan la solubilidad del adsorbato.

- Tiempo de contacto: Para alcanzar el equilibrio en la adsorción y maximizar su eficiencia, se requiere de suficiente tiempo de contacto.
- Densidad aparente: Es utilizada para indicar la actividad de un volumen de carbón. Esta es significativamente más baja que la densidad teórica del sólido (La actividad volumétrica es proporcional a la densidad aparente), (Carrillo y Sánchez, 2013).

5.3. Isotermas de adsorción

Una isoterma de adsorción, es la variación de la capacidad de adsorción en equilibrio de un sólido en función de la concentración presión en equilibrio del asertivo para una temperatura constante (Gómez et al., 2010). Las isotermas de adsorción se pueden obtener siguiendo un procedimiento gravimétrico (aumento de peso) o volumétrico (cambio en el volumen de un sistema por adsorción del gas o vapor sobre el carbón activado), eligiendo uno u otro en función del área de cada sólido. Estas se miden experimentalmente y se expresan matemáticamente por medio de la aplicación de diferentes modelos del proceso (Gómez et al., 2010).

Las isotermas de adsorción no presentan siempre la misma forma, ya que existen diferencias apreciables en las interacciones de adsorción de distintos adsorbentes para un adsorbato dado, lo que significa que la forma de la isoterma es altamente dependiente de la naturaleza del adsorbente (Rodríguez, 2011).

La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) clasifica las isotermas de adsorción en seis tipos, como se muestra en la figura 4.

- Tipo I: es conocida como la isoterma de Langmuir. En la zona de presiones relativas bajas, la cantidad adsorbida aumenta rápidamente con la presión hasta alcanzar una meseta (esta zona es cóncava hacia el eje de las presiones relativas) La cantidad adsorbida alcanza un valor límite a medida que la presión relativa se acerca a la unidad (Doig et al., 2011). Isotermas que llegan a un valor máximo de adsorción sin inflexiones y características de los carbones que contengan sólo micro porosidad (Mendoza, 2012). Esta

isoterma es característica de sistemas micro porosos en los que hay una fuerte interacción adsorbato-adsorbente. En estos sistemas, los poros se llenan con el adsorbato y la adsorción se detiene cuando los microporos están llenos (Doig et al., 2011).

- Tipo II: Estas son características de las isotermas de adsorción en superficies abiertas con la formación de capas (con la asistencia de condensación, y no debe considerarse como el volumen de llenado) se producen en las etapas finales del proceso (Mendoza, 2012). Se pueden diferenciar tres zonas. La primera (a presiones relativas bajas) es cóncava hacia el eje de las presiones relativas. La segunda, expresa que la cantidad adsorbida aumenta casi linealmente con la presión relativa. Por último, en la tercera, la cantidad adsorbida aumenta drásticamente cuando las presiones relativas tienden a la unidad (Doig et al., 2011).

En este tipo de sistemas se da la formación de una monocapa de adsorbato sobre la superficie cuando las presiones relativas son bajas. A medida que se incrementa la presión relativa, se origina la formación de una multicapa a la presión relativa de uno, en que la presión de trabajo es la presión de saturación o vapor del gas, se lleva a cabo la condensación sobre la superficie. Esta isoterma es frecuente en los sólidos meso y macroporosos, ya que en estos no hay impedimento de formación de una multicapa a presiones relativas altas. El punto B indica la presión relativa a la cual se formó la monocapa (Doig et al., 2011).

- Tipo III: son convexas, mirando hacia arriba, y son características de la adsorción en las zonas de bajo potencial de adsorción, como es el caso de la adsorción en las superficies de los sistemas de polímeros orgánicos (Mendoza, 2012). Este tipo es representativo de sistemas en los cuales las interacciones adsorbato – adsorbente son muy débiles, y no se puede definir el punto B. Para observar una adsorción de manera apreciable, se requiere aumentar la presión relativa hasta cierto valor (Doig et al., 2011).

- Tipo IV: se asemejan a las isothermas de tipo II, pero, además, en lugar de adsorción en superficies abiertas a altas presiones relativas, la adsorción tiene lugar en mesoporosidad (Mendoza, 2012). Presenta un ciclo de histéresis, el cual se asocia al llenado y vaciado de los poros por dos rutas diferentes: adsorción y desorción. Esto se debe a la no coincidencia de las velocidades de adsorción y desorción en un determinado rango de presiones relativas (Doig et al., 2011).
- Tipo V: son las de un bajo consumo de energía y superficie sólida homogénea por poseer mesoporosidad (Mendoza, 2012). También presenta ciclo de histéresis.
- Tipo VI: son de las superficies con una estructura muy homogénea (por ejemplo, grafito pirolítico) usando, por ejemplo, el argón y metano, adsorbatos (pero no de nitrógeno) (Mendoza 2012).

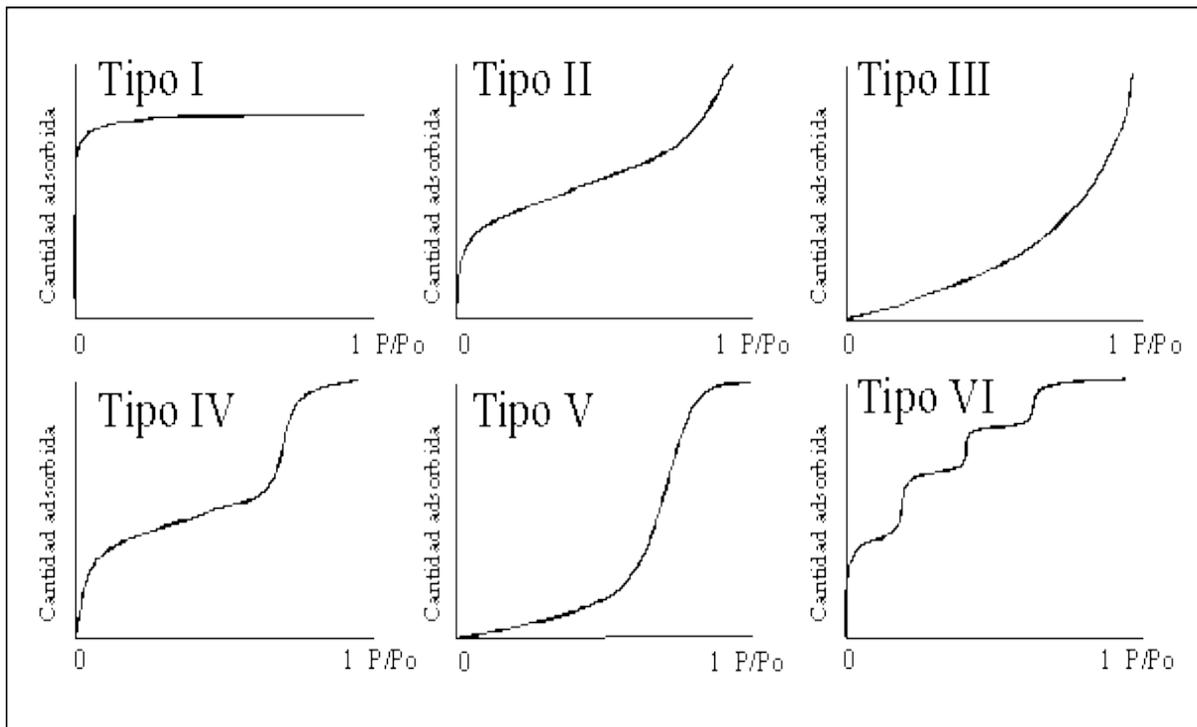


Figura N° 4. Clasificación según la IUPAC de las formas de las isothermas de adsorción

Fuente: (Mendoza , 2012).

5.4. Isotermas de adsorción en un sistema sólido-líquido

La adsorción en un sistema sólido-líquido es un proceso frecuente (ya que muchos contaminantes se encuentran en solución), pero a su vez es más complejo que en un sistema sólido-gas. Esto se debe a que el solvente podría participar en el proceso de adsorción (adsorción cooperativa) compitiendo con el o los solutos por ocupar los centros activos del adsorbente. Las isotermas de adsorción en el sistema sólido-líquido se obtienen relacionando la cantidad de soluto adsorbido por gramo de adsorbente (q_e) versus la concentración del soluto en el equilibrio (C_e) (Doig et al., 2011).

Las fórmulas más frecuentemente empleadas para el tratamiento de los datos experimentales de las isotermas de adsorción fueron desarrolladas por Freundlich, Langmuir, Brunauer, Emmet y Teller (“El carbón”, 2016).

➤ Modelo de Freundlich:

Este modelo describe una adsorción no ideal, reversible y heterogénea. Se puede aplicar este modelo para una adsorción en multicapa sin una distribución uniforme de energía o afinidad de adsorción sobre una superficie heterogénea. La expresión matemática que establece este modelo es:

$$q = KC^{1/n} \quad \text{Ecuación 1}$$

Forma lineal

$$\text{Log } q = \text{Log } K + \frac{1}{n} \text{Log } C \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde “ q ” es la cantidad de materia removida por unidad de masa del adsorbente; “ K ” y “ n ” son constantes para un sistema dado; “ C ” es la concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción. En general el valor de n es inferior a la unidad. Esta ecuación no corresponde a la saturación de la superficie; la cantidad adsorbida continúa aumentando a medida que “ C ” aumenta (Rodríguez, 2011).

➤ Modelo de Langmuir:

El modelo de Langmuir, en cambio, es válido para la adsorción sobre una superficie con un número finito de sitios idénticos, los cuales se consideran que están homogéneamente distribuidos sobre la superficie del adsorbente (Doig et al., 2011). Se asume que el sistema establece un equilibrio dinámico entre los procesos de adsorción y desorción del adsorbato (A) (gas, líquido o especies en solución) sobre la superficie sólida (S), formando un complejo adsorbato-adsorbente (AS) con constantes de velocidad K_a y K_d para los procesos de adsorción y desorción (Carriazo et al., 2010).

En este modelo se supone que (Rodríguez, 2011):

- El adsorbato forma una capa mono molecular sobre la superficie.
- Todos los sitios de la superficie son equivalentes, por tanto, el calor de adsorción es el mismo para todos.
- No hay interacción entre las partículas adsorbidas.
- Las moléculas adsorbidas no tienen movimiento sobre la superficie.
- Se expresa de la siguiente manera:

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: q_m y b son los parámetros de Langmuir relacionados a la máxima capacidad de adsorción y la energía de enlace de la adsorción, respectivamente. Q_e es la concentración del soluto retenido en el adsorbente en el equilibrio (mg.g^{-1}) C_e es la concentración de soluto en la solución en el equilibrio (mg.L^{-1})

La ecuación precedente puede ser linealizada como se muestra a continuación:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde b y q_m son calculados al graficar $\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e

➤ Modelo de BET:

La teoría BET responde a sus autores, Brunauer, Emmett y Teller quienes desarrollaron las ideas de Langmuir para describir la adsorción multimolecular o en multicapas. El modelo para la formación de infinitas capas moleculares conduce a la bien conocida ecuación BET (“El carbón”, 2016).

$$\frac{p}{V_{ad}(P_0 - P)} = \frac{1}{V_c C} + \frac{(C-1)P}{CV_m P_0} \quad \text{Ecuación. 5}$$

Dónde:

V_{ad} = volumen adsorbido de N_2 por gramo de muestra ($cm^3 g^{-1}$)

V_m = volumen de la monocapa por gramo de muestra ($cm^3 g^{-1}$)

P_0 = presión de saturación de N_2 medido a condiciones normales (mmHg).

P = presión de equilibrio de N_2 (mmHg)

C = constante BET relacionada con el calor de adsorción.

La ecuación anterior da una adecuada descripción para carbones con micro, meso y macroporosos sobre un rango limitado de presión relativa, normalmente entre 0,05 y 0,3.

5.5. Precursores para el carbón activado

Para la preparación de carbón activo se puede emplear como precursor prácticamente cualquier tipo de material orgánico, debido al elevado contenido de carbono que estos presentan en su estructura. Los más empleados son residuos agrícolas o forestales, productos de naturaleza lignocelulósica, como la madera, cáscara de nuez, de coco, de almendra, hueso de aceituna, etc. También se emplea antracita, carbones grasos, coque de petróleo, turba, huesos, lodos, plásticos, breas, neumáticos, etc. La elección del precursor se realiza en función de su disponibilidad,

precio y pureza (González, 2017). Es por este motivo que los desechos agroindustriales toman fuerza como posibles materias primas para la preparación de CA, ya que, al ser desechos que se descartan de los procesos industriales tiene bajo costo y su disponibilidad va a depender de las alternativas de reutilización que este desecho presente en la industria (González, 2017).

5.5.1. Propiedades de un precursor

Los precursores lignocelulosicos se caracterizan por su contenido de humedad, de volátiles, de cenizas y de carbón fijo, donde se tiene que la humedad es el agua que retiene el material intrínsecamente en condiciones normales, las cenizas son la fracción de materia inorgánica presente originalmente en el material, los volátiles la fracción de materia orgánica que se puede liberar por efectos térmicos y que están compuestos principalmente por la materia vegetal del precursor como lo son la lignina y la celulosa. Y finalmente el contenido de carbón fijo que es el que conforma principalmente el carbón activado (CA). A partir de estas características se define un precursor del que se obtendrá un carbón de alta pureza, a aquel que cumpla con ser un sólido microparticulado con humedad <10 %, cenizas entre 1-3 % y porcentaje máximo de volátiles esperados del 60 % (González, 2017).

Tabla N° 4. Propiedades de precursores de desechos agroindustriales para la producción de carbón activado.

Precursor	Carbón fijo (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)
Madera suave	40-50	55-60	0,3-1,1
Madera dura	40-42	55-60	0,3-1,2
Cascara de nuez	30-40	55-60	5-15

Fuente: (González, 2017)

5.5.2. Materiales lignocelulósicos

En su mayoría están conformados por celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina. Estos polímeros de cadenas largas ramificadas o lineales, se encuentran presentes en las paredes celulares de las plantas, y son los principales responsables de la adsorción de los iones metálicos. Si bien es

cierto, que las biomásas lignocelulósicas son buenas biosorbentes, es necesario conocer los grupos funcionales que estas poseen y su afinidad por los iones metálicos, pues la eficiencia del proceso dependerá de ello (Pérez Marín, 2010).

En la Tabla N°5, se registran los principales grupos funcionales y su afinidad por los iones metálicos, los metales del grupo A tienden a formar enlaces con los ligandos de tipo I a través del átomo de oxígeno. Los elementos del grupo B, a su vez muestran una gran afinidad por los ligandos tipo III, pero además establecen fuertes uniones con los ligandos tipo II. Además, los iones metálicos intermedios pueden establecer uniones con los tres tipos de ligandos con diferentes preferencias. La capacidad de remoción de iones metálicos del adsorbente va a depender de ciertos parámetros controlables en el proceso de adsorción como lo son el pH, el tamaño de partícula, la temperatura, y la concentración de carbón activado, sin embargo, es posible incrementar dicha capacidad de remoción mediante la modificación física o química de sus propiedades (Tejada, 2015).

Tabla N°5. Principales grupos funcionales y su afinidad por los iones metálicos.

Tipo de ligandos	Ligandos	Grupos de metales
I: ligandos que prefieren al grupo A	F ⁻ , O ₂ ⁻ , OH, H ₂ O, CO ₃ ²⁺ , SO ₄ ⁻ , ROSO ₃ ⁻ , HPO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻ , ROH, RCOO ⁻ , C=O, ROR	Grupo A: Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Sc, Rb, Sr, Y, La, Fr, Ra, Ac, Al, Lantánidos, Actínidos
II: otros ligandos	Cl ⁻ , Br ⁻ , N ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , SO ₃ ²⁻ , NH ₃ , N ₂ , RNH ₂ , R ₂ NH, =N, CO-N-R, O ₂ , O ₂ ⁻ , O ₂ ²⁻	Iones intermedios: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Cd, In, Sn, Sb, As
III: ligando que prefieren al grupo B	H, I, R ⁻ , CN ⁻ , CO, S ²⁻ , RS ⁻ , R ₂ S, R ₃ AS	Grupo B: Rh, Pd, Ag, Lr, Pt, Au, Hg, Ti, Pb, Bi

Fuente: (Tejada, 2015)

5.6. Metales pesados

La contaminación por metales pesados es un problema ambiental grave y representa una amenaza para los seres humanos y el ecosistema. A diferencia de los contaminantes orgánicos, metales pesados como cromo, níquel y mercurio, son los principales contaminantes de agua dulce debido a su naturaleza carcinógena y persistente (Ibrahim et al., 2016).

5.6.1. Níquel

Símbolo Ni, número atómico 28, metal duro, blanco plateado, dúctil y maleable. La masa atómica del níquel presente en la naturaleza es 58,71.

El níquel tiene cinco isótopos naturales con masas atómicas de 58, 60, 61, 62, 64. También, se han identificado siete isótopos radiactivos, con números de masa de 56, 57, 59, 63, 65, 66 y 67. El níquel metálico es fuerte y duro (3,8 en la escala de Mohs), Cuando está finamente dividido, es de color negro. La densidad del níquel es 8,90 veces la del agua a 20 °C (68 °F); se funde a 1.455 °C (2651 °F) y hierve a 2840 °C (5144 °F); es sólo moderadamente reactivo. Resiste la corrosión alcalina y no se inflama en trozos grandes, pero los alambres muy finos pueden incendiarse. Está por encima del hidrógeno en la serie electroquímica; se disuelve con lentitud en ácidos diluidos liberando hidrógeno. En forma metálica es un agente reductor fuerte (Lenntech, 2015).

El níquel es dispositivo en sus compuestos, pero también puede existir en los estados de oxidación 0, 1⁺, 3⁺, 4⁺. Además de los compuestos simples o sales, el níquel forma una variedad de compuestos de coordinación o complejos. La mayor parte de los compuestos de níquel son verdes o azules a causa de la hidratación o de la unión de otros ligandos al metal. El ion níquel presente en soluciones acuosas de compuestos simples es a su vez un complejo, el $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$. (Lenntech, 2015).

5.6.1.1. Efectos del Níquel en el medio ambiente.

El níquel es liberado al aire por las plantas de energía y las incineradoras de basuras. Este se depositará en el suelo o caerá después de reaccionar con las gotas de lluvia. Usualmente lleva un largo periodo de tiempo para que el níquel sea eliminado del aire. El níquel puede también terminar en la superficie del agua cuando es parte de las aguas residuales. La mayor parte de todos los compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorberán por los sedimentos o partículas del suelo y llegará a inmovilizarse. En suelos ácidos, el níquel se une para llegar a ser más móvil y a menudo alcanza el agua subterránea (ATSDR, 2016).

La concentración promedio de níquel en el agua potable es entre 2 y 4,3 ppb. Sin embargo, usted puede estar expuesto a niveles de níquel en el agua potable más altos que el promedio si vive cerca de industrias que procesan o usan níquel. Los niveles de níquel más altos que se han detectado en el agua potable, aproximadamente 72 ppb, se encontraron cerca de áreas con grandes depósitos naturales de níquel, en donde se mina y refino níquel (ATSDR, 2016).

El suelo generalmente contiene entre 4 y 80 partes de níquel en un millón de partes de suelo (ppm; 1 ppm = 1.000 ppb). Las concentraciones más altas de níquel en el suelo (hasta de 9,000 ppm) se encuentran cerca de industrias que extraen níquel de minerales. Altas concentraciones de níquel ocurren cuando el níquel liberado desde chimeneas en forma de polvo durante el procesamiento de minerales se deposita en el suelo. Los alimentos contienen níquel y son la principal fuente de exposición al níquel para la población general. Usted consume diariamente aproximadamente 170 microgramos (μg ; 1 μg es la millonésima parte de 1 gramo) de níquel en los alimentos. Entre los alimentos con alto contenido natural de níquel se encuentra el chocolate, habichuelas de soya, nueces y avena. La ingesta diaria de níquel a través del agua potable es sólo aproximadamente 2 μg . La cantidad de níquel que inhalamos es entre 0,1 y 1 μg de níquel/día, sin incluir níquel que se encuentra en el humo de tabaco (ATSDR, 2016).

5.6.1.2. Efectos del Níquel en la salud.

Es conocido que las plantas acumulan níquel y como resultado la toma de níquel de los vegetales será eminente. Los humanos podemos ser expuestos al níquel al respirar el aire, beber agua, comer comida o fumar cigarrillos. El contacto de la piel con suelo contaminado por níquel o agua puede también resultar en la exposición al níquel (ATSDR, 2016)

Algunos trabajadores expuestos a más de 10 mg de níquel/m³ en la forma de compuestos de níquel poco solubles (como el subsulfuro de níquel) desarrollaron cáncer del pulmón y de los senos nasales. La exposición a niveles altos de compuestos de níquel fácilmente solubles en agua también puede producir cáncer cuando también hay presentes compuestos de níquel poco solubles u otras sustancias químicas que pueden producir cáncer. Las concentraciones de compuestos de níquel solubles o poco solubles que produjeron cáncer eran entre 100.000 y 1 millón de veces más altas que los niveles de níquel que se encuentran comúnmente en el aire en Estados Unidos. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) de EE. UU. ha determinado que es razonable predecir que el níquel metálico es carcinogénico y que los compuestos de níquel son carcinogénicos. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer External (IARC) ha determinado que algunos compuestos de níquel son carcinogénicos en seres humanos y que el níquel metálico posiblemente es carcinogénico en seres humanos. La EPA ha determinado que el polvo de níquel de refinerías y el subsulfuro de níquel son carcinogénicos en seres humanos. Estas clasificaciones fueron basadas en estudios de trabajadores expuestos a níquel y de animales de laboratorio (ATSDR, 2016).

Las tomas de altas cantidades de níquel tienen las siguientes consecuencias:

- Elevadas probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata.
- Embolia de pulmón.
- Fallos respiratorios.
- Defectos de nacimiento.
- Asma y bronquitis crónica.
- Desordenes del corazón.

5.6.2. Adsorción de Níquel

Estudios recientes motivados por la versatilidad de los carbones activos en el tratamiento de aguas, adsorción de gases contaminantes y recuperación de especies químicas de efluentes residuales, utilizan carbón activado granular de conchas de coco (CAG) para remover iones de níquel (II) presentes en soluciones acuosas. Así pues, en el estudio de Hernández – Rodríguez y otros en el año 2017, han comparado el efecto de la modificación química del material adsorbente a partir de la concha de coco en la capacidad de adsorción de los iones de níquel (II) a pH de 1,2 y 6,9 unidades, obteniéndose que el acrecentamiento de los grupos ácidos en la superficie del carbón provoca un aumento de la capacidad de adsorción y porcentajes de remoción del níquel (II), debido a las interacciones específicas de estos grupos con los cationes del metal, por lo cual se obtuvo mejores resultados de adsorción con un pH de 1,2 con CAG₂ (carbón activado granular tratado con una solución de 0,55 mol/L de HNO₃) y CAG₃ (carbón activado granular tratado con una solución de 1 mol/L de HNO₃) (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados de las pruebas de equilibrio de adsorción a pH de 1,2 unidades para el CAG2 y el CAG3

Muestra	Concentración de Ni(II) Inicial (g/L)	pH final de la solución	Concentración en el equilibrio (g/L)			Porcentaje de adsorción de Ni(II) (%)
			Ni (II)	Na (I)	K (I)	
CAG ₂	0,5	4,00	0,127	0,003 4	0,001	74,60
CAG ₂	1,0	4,52	0,187	0,003 5	0,001	81,30
CAG ₂	2,0	4,49	0,363	0,003 6	0,001	81,85
CAG ₂	2,5	4,41	0,515	0,003 5	0,001	79,40
CAG ₂	3,0	4,47	0,625	0,001 8	0,001	79,17
CAG ₂	3,5	4,34	0,738	0,001 9	0,001	78,91
Valor promedio del porcentaje de adsorción de Ni(II) (%)						79,21
CAG ₃	0,5	4,09	0,093	0,004 9	0,028	81,40
CAG ₃	1,0	4,30	0,171	0,005 0	0,030	82,90
CAG ₃	2,0	4,24	0,278	0,005 1	0,031	86,10
CAG ₃	2,5	4,20	0,351	0,003 1	0,034	85,96
CAG ₃	3,0	4,15	0,476	0,000 1	0,034	84,13
CAG ₃	3,5	4,17	0,530	0,002 9	0,032	84,86
Valor promedio del porcentaje de adsorción de Ni(II) (%)						84,23

Fuente: (Hernández et al., 2017)

En ambos valores de pH de la solución, se observa una tendencia al acrecentamiento en la remoción, hasta que la concentración inicial de níquel (II) es 2,0 g.L⁻¹, luego el porcentaje de adsorción desciende ligeramente, indicando que el proceso se favorece con el aumento del gradiente de concentración que origina la difusión de los iones desde el seno de la solución a la superficie del sólido, hasta un valor en el cual el aumento de la fuerza iónica de la solución provoca una disminución en la capacidad de adsorción. El proceso de adsorción del níquel (II) a partir de soluciones modeladas es descrito por el modelo de Freundlich, formándose múltiples capas del adsorbato sobre la superficie del adsorbente.

Penedo, y otros (2016), realizaron un estudio donde el objetivo era explorar la capacidad del carbón activado de cáscara de coco para la extracción de níquel (II), considerando como efectos principales la concentración inicial de la solución, pH y dosis de adsorbente. El pH ejerció una influencia significativa en el porcentaje de adsorción. La capacidad de adsorción se favoreció en el nivel superior de concentración inicial y nivel inferior de dosis de adsorbente. A pH 5,0; siendo el porcentaje de adsorción elevado (98,21 % de níquel). Se obtuvieron las isotermas de adsorción a pH 1,2; 3,0 y 5,0.

Tabla N°7. Adsorción de níquel en solución de NiSO₄

Exp.	A (pH)	B (Ci)	C (Mc)	Ce (g.L ⁻¹)	Qe (mg de Ni(II)/g CAG)	R %
1	1	0,1	10	0,02594	7,41	74,06
2	5	0,1	10	0,00284	9,72	97,16
3	1	1	10	0,02087	97,91	97,91
4	5	1	10	0,01792	98,21	98,21
5	1	0,1	30	0,0215	2,62	78,5
6	5	0,1	30	0,0001	3,33	99,9
7	1	1	30	0,02195	32,60	97,81
8	5	1	30	0,01082	32,97	98,92
9	3	0,55	20	0,0043	27,29	99,22
10	3	0,55	20	0,00667	27,17	98,79
11	3	0,55	20	0,02931	26,03	94,67

Fuente: (Penedo et al., 2016)

Los mayores porcentajes de adsorción se alcanzaron en los experimentos 6 y 8, siendo de 99,9 % y 98,92 %. En los experimentos 3 y 4 la capacidad de adsorción de Ni(II) fue elevada, de 97,91 y 98,21 mg de Ni(II)/g de CAG respectivamente. En la variable respuesta capacidad de adsorción de Ni (II) influyeron significativamente los factores concentración inicial y dosis de adsorbente, así como la interacción de estos (figura N°5), el pH no tuvo efecto significativo.

En el porcentaje de recuperación de Ni(II) tuvieron un efecto muy significativo el pH y la concentración inicial, así como la interacción entre estos dos factores (fig. 5b), el incremento del pH y de la concentración inicial dio lugar al incremento del porcentaje de adsorción, el aumento de la dosis de CAG provocó también un aumento de esta variable respuesta, pero su efecto no fue significativo.

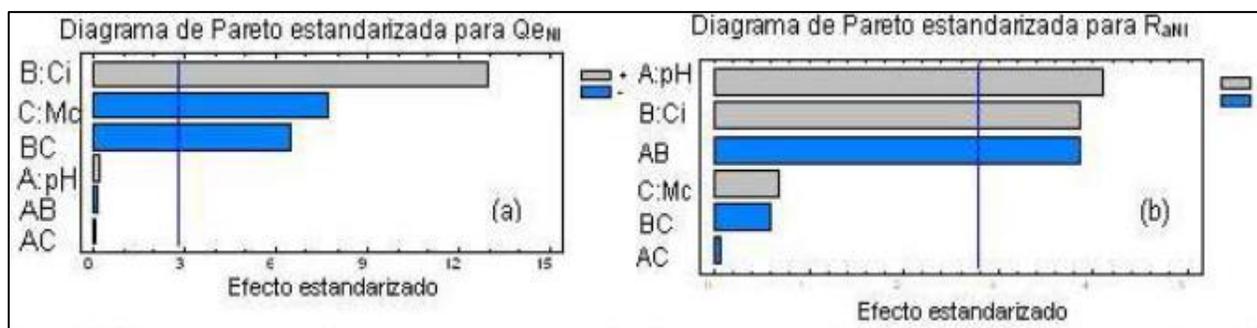


Figura N° 5. Capacidad de adsorción (a) porcentaje de adsorción (b) de Ni (II).

Fuente: (Penedo et al., 2016)

Los resultados de equilibrio correspondientes a la adsorción de Ni(II) tuvieron un mejor ajuste al modelo de Freundlich, los valores de KF obtenidos fueron 15,86 y 17,60 mg.g^{-1} pH 3,0 y 5,0 siendo la adsorción favorable, con valores de $1/n$ entre cero y uno. Entonces bien, como resultado del análisis estadístico se puede comprobar que la capacidad de adsorción de Ni (II) fue mayor en el nivel superior de concentración inicial del ion metálico y nivel inferior de dosis de adsorbente; esta última no ejerció una influencia significativa en el porcentaje de adsorción; tales condiciones pueden resultar ventajosas para lograr buena separación de los iones metálicos con economía en el consumo de adsorbente. El pH influyó significativamente en el porcentaje de adsorción, ya que

en las condiciones más favorables de adsorción (experimento 4) se alcanzó 98,1 % de adsorción de níquel.

Mánalas y colaboradores en el año 2016, evaluaron el comportamiento de la capacidad del carbón activado de cascara de coco en la adsorción de los iones metálicos; Ni(II), Co(II), Fe(II) y Mn(IV) así como el porcentaje de adsorción de los metales en el carbón, a diferentes tiempos de contacto. Los experimentos de adsorción fueron realizados con muestras de licor residual (WL) a escala de laboratorio en reactores batch con agitación magnética, a las condiciones siguientes: velocidad de agitación de 200 rpm, temperatura 21 °C, tiempo de contacto 20, 40 y 60 min. Luego de cada experimento se procedió a determinar la concentración de los iones metálicos en la solución filtrada utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica (EAA), Modelo Carl Zeiss 5FL; obteniendo como resultado un porcentaje de adsorción que estuvo entre 30 y 40 % para Ni (II) (figura 6a) y capacidad de adsorción de Ni (II) de 1,125 mg.g⁻¹ de carbón activado granular (CAG) (figura 6b).

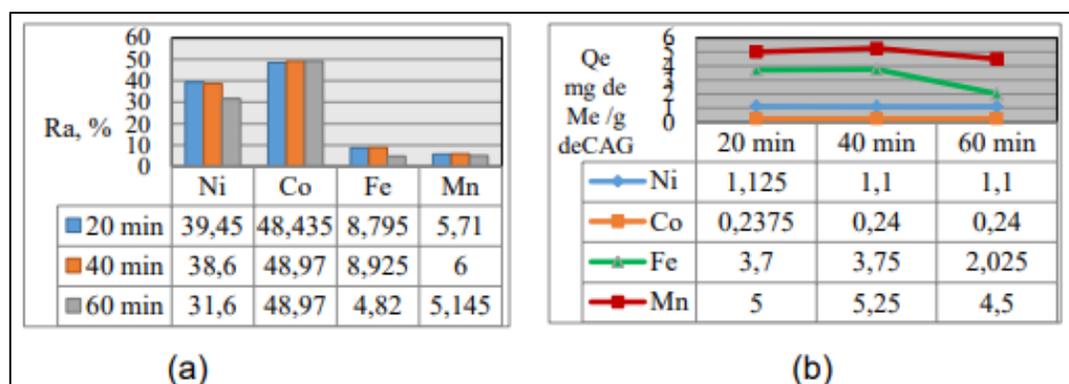


Figura N° 6. Porcentaje de adsorción (a) y capacidad de adsorción (b).

Fuente: (Mánalas et al., 2015)

De igual forma, se puede hacer mención de los resultados de adsorción de Ni(II) sobre Carbón activado preparado a partir de cáscara de almendra, reportados por Hasar, H. en su estudio titulado " *Adsorption of nickel(II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from almond husk*" donde la capacidad de adsorción tuvo valores entre 0,616 y 4,89 mg.g⁻¹, y la

remoción de níquel fue de hasta 97,8 %; se comprobó además que tenía lugar una disminución de la capacidad de adsorción con el aumento de la dosis de adsorbente y un pH óptimo de 5,0 reforzando así las investigaciones antes mencionadas, demostrando la capacidad de adsorción de Ni con carbón activado a partir de materiales lignocelulosicos, determinando de esta manera que es una técnica viable para la remoción de este metal en soluciones acuosas.

5.6.3. Cromo

Elemento químico, símbolo Cr, número atómico 24, peso atómico 51,996; metal que es de color blanco plateado, duro y quebradizo. Sin embargo, es relativamente suave y dúctil cuando no está tensionado o cuando está muy puro. Sus principales usos son la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizados. El cromo elemental no se encuentra en la naturaleza. Su mineral más importante por abundancia es la cromita. Es de interés geoquímico el hecho de que se encuentre 0,47 % de Cr_2O_3 en el basalto de la Luna, proporción que es de 3-20 veces mayor que el mismo espécimen terrestre (Lenntech, 2015).

Sus propiedades mecánicas, incluyendo su dureza y la resistencia a la tensión, determinan la capacidad de utilización. El cromo tiene una capacidad relativa baja de forjado, enrollamiento y propiedades de manejo. Sin embargo, cuando se encuentra absolutamente libre de oxígeno, hidrógeno, carbono y nitrógeno es muy dúctil y puede ser forjado y manejado. Es difícil de almacenarlo libre de estos elementos (Lenntech, 2015).

El cromo forma tres series de compuestos con otros elementos; éstos se representan en términos de los óxidos de cromo: cromo con valencia dos, CrO , óxido de Cr (II) u óxido cromoso; con valencia tres, Cr_2O_3 , óxido de Cr (III) u óxido crómico, y con valencia seis, CrO_3 , anhídrido de Cr (VI) o anhídrido de ácido crómico. El cromo es capaz de formar compuestos con otros elementos en estados de oxidación (II), (III) y (VI). (Lenntech, 2015).

5.6.3.1. Efectos del Cromo en el medio ambiente.

Hay varias clases diferentes de Cromo que difieren de sus efectos sobre los organismos. El Cromo entra en el aire, agua y suelo en forma de Cromo (III) y Cromo (VI) a través de procesos naturales y actividades humanas. Las mayores actividades humanas que incrementan las concentraciones de Cromo (III) son el acero y las industrias textiles, pintura eléctrica y otras aplicaciones industriales del Cromo (VI). Estas aplicaciones incrementarán las concentraciones del Cromo en agua. A través de la combustión del carbón el Cromo será también emitido al agua y eventualmente se disolverá (ATSDR, 2016).

El Cromo (III) es un elemento esencial para organismos que puede interferir en el metabolismo del azúcar y causar problemas de corazón, cuando la dosis es muy baja. El Cromo (VI) es mayoritariamente tóxico para los organismos. Este puede alterar el material genético y causar cáncer (ATSDR, 2016).

Los cultivos contienen sistemas para gestionar la toma de Cromo para que esta sea lo suficientemente baja como para no causar cáncer. Pero cuando la cantidad de Cromo en el suelo aumenta, esto puede aumentar las concentraciones en los cultivos. La acidificación del suelo puede también influir en la captación de Cromo por los cultivos. Las plantas usualmente absorben sólo Cromo (III). Esta clase de Cromo probablemente es esencial, pero cuando las concentraciones exceden cierto valor, efectos negativos pueden ocurrir (ATSDR, 2016).

5.6.3.2. Efectos del Cromo en la salud.

Los humanos podemos estar expuestos al Cromo a través de respirarlo, comerlo o beberlo y a través del contacto con la piel con Cromo o compuestos del Cromo. El nivel de Cromo en el aire y el agua es generalmente bajo. En agua para beber el nivel de Cromo es usualmente bajo como en el agua de pozo, pero el agua de pozo contaminada puede contener el peligroso Cromo (VI); Cromo hexavalente (ATSDR, 2005). Para la mayoría de la gente que come comida que contiene Cromo III es la mayor ruta de entrada de Cromo, como Cromo III ocurre naturalmente en muchos vegetales, frutas, carnes, levaduras y granos. Varias maneras de preparación de la comida y

almacenaje pueden alterar el contenido de Cromo en la comida. Cuando la comida es almacenada en tanques de acero o latas las concentraciones de Cromo pueden aumentar. El Cromo III es un nutriente esencial para los humanos y la falta de este puede causar condiciones del corazón, trastornos metabólicos y diabetes. Pero la toma de mucho Cromo III puede causar efectos sobre la salud también, por ejemplo, erupciones cutáneas (ATSDR, 2016).

El Cromo (VI) es un peligro para la salud de los humanos, mayoritariamente para la gente que trabaja en la industria del acero y textil. La gente que fuma tabaco también puede tener un alto grado de exposición al Cromo. El Cromo (VI) es conocido porque causa varios efectos sobre la salud. Cuando es un compuesto en los productos de la piel, puede causar reacciones alérgicas, como es erupciones cutáneas. Después de ser respirado el Cromo (VI) puede causar irritación de nariz y sangrado de la nariz (ATSDR, 2016).

Otros problemas de salud que son causados por el Cromo (VI) son:

- Erupciones cutáneas
- Malestar de estómago y úlceras
- Problemas respiratorios
- Debilitamiento del sistema inmune
- Daño en los riñones e hígado
- Alteración del material genético
- Cáncer de pulmón

5.6.4. Adsorción de cromo

El Cromo es uno de los metales pesados que presenta mayores problemáticas ambientales y de salud pública; este metal se encuentra con facilidad en el agua vertida por las actividades industriales que lo requieren dentro de sus procesos, principalmente las curtiembres, conservación de maderas y fabricación de aerosoles; generando impactos a la salud pública como efectos carcinógenos y mutagénicos.

En su estudio Pellegrini y colaboradores (2018) analizaron la factibilidad de remoción de Cr (VI) empleando como material adsorbente un carbón activado sintetizado a partir de la cáscara de nuez de nogal por activación química, a distintas temperaturas. El proceso de adsorción estudiado consistió en tres etapas bien diferenciadas, la primera etapa representa una transferencia rápida del soluto desde la solución a la superficie del carbón activado, debida principalmente a la elevada agitación que se empleó en el proceso, en la segunda zona predomina la adsorción ocasionada por la difusión intra particular macro y mesoporosa; por último, se puede apreciar la saturación de los microporos del carbón activado (CA) con el contaminante empleado, siendo las dos primeras las más influyentes en el proceso de remoción de Cr (VI). Para ello, se usó una dosis de 0,1 g de carbón activado preparado en 100 ml de solución de $K_2Cr_2O_7$ con una concentración inicial de 50 ppm de Cr(VI), se realizaron ensayos a 18 °C, 22 °C y 25 °C para poder estudiar la influencia de la temperatura, el pH se mantuvo constante para todos los ensayos en un valor de 5, se realizó la agitación utilizando un agitador orbital a una velocidad de 185 rpm. Finalmente, se observó que la capacidad de adsorción de Cr(VI) en el equilibrio aumenta con la temperatura, quiere decir que la adsorción es beneficiada por la misma. Concluyeron que el efecto de la temperatura fue más notorio en la última etapa de adsorción, proceso que ocurre en los poros más pequeños; así mismo, que el carbón activado a partir de la cáscara de nuez de nogal presenta una remoción efectiva de cromo hexavalente.

Tabla N°8. Parámetros para el modelado cinético del proceso de adsorción de Cr (VI) mediante carbón activado (CA).

		Modelo Pseudo-primer orden		Modelo Pseudo-segundo orden	
Temperatura (°C)	q_e [mg.g ⁻¹]	k_1 [min ⁻¹]	R ²	k_1 [min ⁻¹]	R ²
18	12,92	0,00071	0,77	0,00229	0,999
22	14,25	0,00064	0,89	0,00099	0,998
25	17,47	0,00069	0,84	0,00038	0,996

Fuente: (Pellegrini et al., 2018)

Por otra parte, en Colombia, Tejada T y colaboradores (2017), realizaron un estudio de la adsorción de Cromo hexavalente, usando carbón activado a partir de cáscara de cacao, como

material adsorbente, así como dos tratamientos químicos a la misma, con hidróxido de sodio y ácido clorhídrico, evaluando el efecto del tamaño de la partícula en la remoción del ión metálico. En el estudio, para determinar el mejor tamaño de partícula, fue llevado a cabo a temperatura de (25 °C), por 120 minutos, a pH 2,0 y la relación CA /solución fue de 5 g.L⁻¹.

El efecto del tamaño de partícula (0,355 - 0,5 -1,0 mm) fue medido, a una concentración inicial del metal de 100 ppm. Se encuentra que es el tamaño de 0,355 mm (Figura N°7), el cual favorece el proceso de adsorción, así se establece que, a un menor tamaño, se podría dar un aumento en el área superficial.

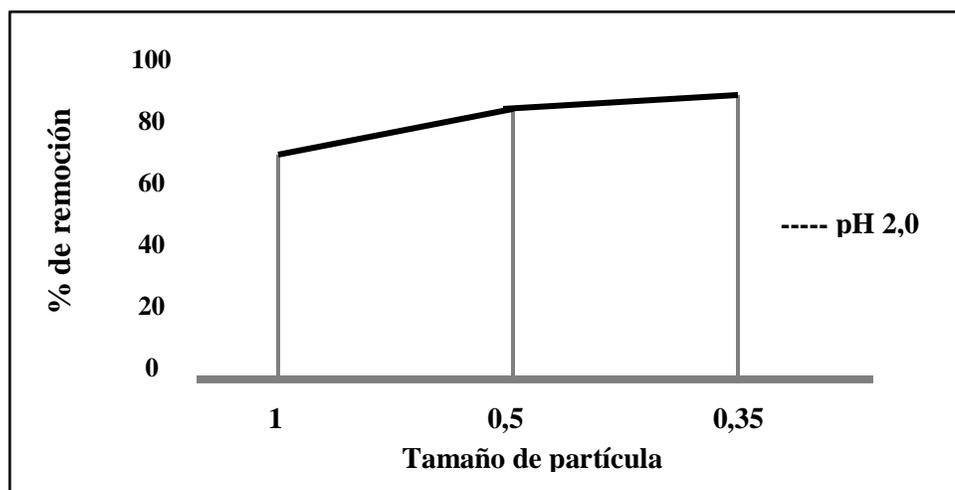


Figura N° 7. Efecto del tamaño de partícula en la adsorción de Cr(VI).

Fuente: (Tejada et al., 2017)

Respecto al análisis de isotermas de adsorción, se establece la correlación de los datos experimentales con el modelo de Freundlich, así se puede concluir que el enlace se da, principalmente, por fuerzas físicas; la adsorción está limitada a la formación de una monocapa; el número de especies adsorbidas no excede el total de sitios disponibles y no se considera ninguna reacción de desorción que pueda tener lugar durante el proceso de remoción

Teniendo en cuenta el estudio anterior, cabe resaltar que el aumento de microporos aumenta el número de sitios accesibles, pero no puede ser relacionado con el tamaño de partícula, pues en realidad, se están usando partículas con un mismo espesor, que es lo que determina la distancia

de difusión y la clasificación de tamaño de la partícula de una biomasa por tamices estándar, que funciona en longitud y ancho.

De igual forma en Colombia, Tejada Benítez y colaboradores en el año 2015, estudiaron las capacidad de adsorción de iones metálicos de Cr(VI) por parte de carbones activados provenientes de cáscaras de naranja y plátano, comparados con la cascara sin modificar y modificada; lo cual se realizó a partir de 300 ml de 100 ppm de Cr(VI) en solución, se tuvo como condiciones de operación 3 niveles de pH (3,0; 4,0; y 5,0) y tres niveles de concentración de adsorbente (2,0; 4,0 y 6,0 g.L⁻¹), dejando constantes el tiempo de contacto estándar de 60 minutos, concentración del adsorbato de 100 ppm, velocidad de agitación de 180 rpm y temperatura ambiente de 25°C. Luego se realizó el análisis de la concentración final mediante absorción atómica (AA), determinando que los mejores resultados se obtuvieron con los carbones activados de cascara de plátano, donde la remoción fue de 95 ppm. Concluyendo así, que la adsorción sobre los carbones activados provenientes de estas biomásas mejora el potencial de adsorción (figura 8).

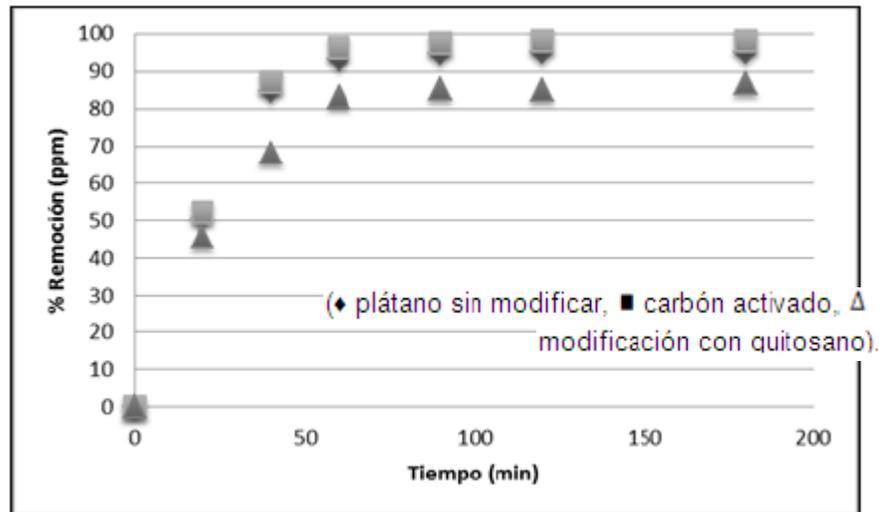


Figura N° 8. Eficiencia de adsorción para cascara de plátano.

Fuente: (Tejada Benítez et al., 2017)

El ajuste de los datos experimentales a las isothermas, se concluye que la isoterma que mejor describe la adsorción de Cr(VI) en cáscaras de naranja y de plátano es la de Langmuir. Esto nos

indica que la superficie del adsorbente es uniforme, es decir, todos los sitios de adsorción son equivalentes, las moléculas adsorbidas no interaccionan, por lo cual la adsorción se produce a través del mismo mecanismo, entonces la máxima adsorción solo se forma una monocapa donde las moléculas de adsorbato no se depositan sobre otras ya adsorbidas.

En este mismo estudio, Conforme a la aplicación en efluentes industriales reales, se llevó a cabo el análisis de una muestra de una industria de la Zona de Mamonal (Cartagena) en la cual sus efluentes son ricos en Cr(VI). La muestra tenía una concentración inicial del metal de 1636 ppm, las pruebas de adsorción fueron realizadas a un tiempo de adsorción de 1 hora con carbón activado de plátano, a pH de 3,0 y relación carbón activado/metal de 6 g.L⁻¹. Los resultados de este ensayo mostraron una reducción a 581 ppm de Cr (VI), mostrando así una efectividad del 65,4 %. También se analizó el comportamiento de adsorción del Cr(VI) en mezclas binarias de iones metálicos y mezclas múltiples, ya que por lo general en los efluentes industriales el cromo no se encuentra solo sino en algunas mezclas de metales. Se observa una notoria disminución en el potencial de adsorción de Cr(VI) cuando este se encuentra en presencia de iones de cobre y níquel (Figura N°9), esta situación puede deberse a la afinidad de los grupos funcionales que participan en la adsorción del Cr(VI) por los iones de níquel y cobre, los cuales son los grupos carboxilo, hidroxilo y amino.

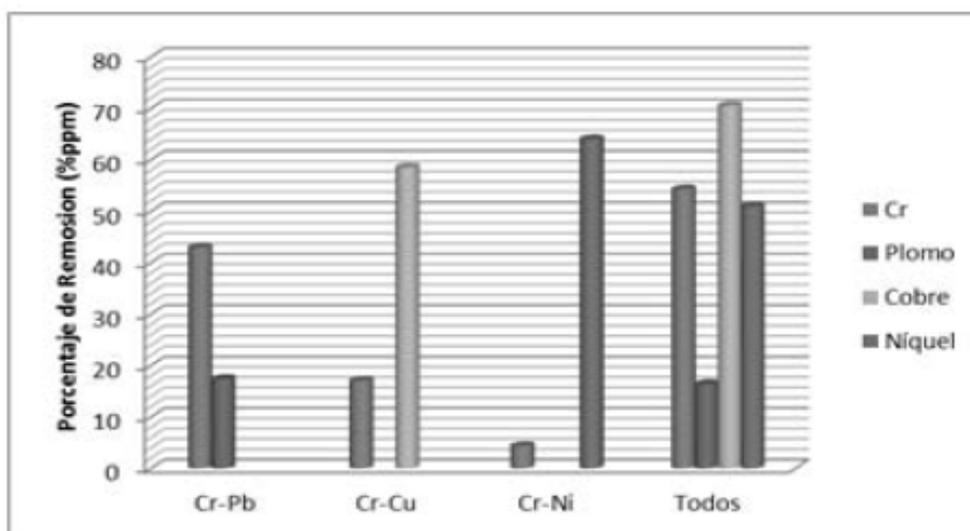


Figura N° 9. Comportamiento de Cr(VI) en soluciones binarias.

Fuente: (Tejada Benítez et al., 2017)

5.6.5. Mercurio

Es un metal pesado plateado que a temperatura ambiente es un líquido inodoro. No es buen conductor del calor comparado con otros metales, aunque es buen conductor de la electricidad. Se alea fácilmente con muchos otros metales como el oro o la plata produciendo amalgamas, pero no con el hierro. Es insoluble en agua y soluble en ácido nítrico. Cuando aumenta su temperatura por encima de los 40 °C, produce vapores tóxicos y corrosivos, más pesados que el aire por lo que se evapora creando miles de partículas en vapor ya que estas se enfrían y caen al suelo. Es dañino por inhalación, ingestión y contacto: se trata de un producto muy irritante para la piel, ojos y vías respiratorias. Es incompatible con el ácido nítrico concentrado, el acetileno, el amoníaco, el cloro y los metales. Es el metal no radioactivo existente con mayor toxicidad. Existe en gran variedad de formas, particularmente como compuestos orgánicos de mercurio (dimetilmercurio, fenilmercurio, etilmercurio y metilmercurio) (Gracia et al., 2011).

5.6.5.1. Efectos del Mercurio en el medio ambiente.

La mayoría del mercurio liberado por las actividades humanas es liberado al aire, a través de la quema de productos fósiles, la minería, la fundición y la combustión de desechos sólidos. Diversas formas de actividades humanas hacen que el mercurio se libere directamente al suelo, Por ejemplo, aplicación de fertilizantes en la agricultura y descargas de aguas residuales industriales. Allí, todo el mercurio liberado finalmente se deroga en el suelo o en las aguas superficiales (ATSDR, 2016).

Las aguas superficiales ácidas pueden contener significantes cantidades de mercurio, cuando los valores de pH están entre cinco y siete, las concentraciones de Mercurio en el agua se incrementarán debido a la movilización del mercurio en el suelo. El Mercurio que ha alcanzado las aguas superficiales o suelos los microorganismos pueden convertirlo en metilmercurio, una substancia que puede ser absorbida rápidamente por la mayoría de los organismos y es conocido que daña al sistema nervioso. Los peces son organismos que absorben gran cantidad de metilmercurio de agua superficial cada día. Como consecuencia, el metilmercurio puede

acumularse en peces y en las cadenas alimenticias de las que forman parte, los efectos del mercurio en los animales son daño en los riñones, trastornos en el estómago, daño en los intestinos, fallos en la reproducción y alteración del ADN (ATSDR, 2016).

5.6.5.2. Efectos del Mercurio en la salud.

El mercurio es un elemento que puede ser encontrado de forma natural en el medio ambiente. Puede ser encontrado en forma de metal, como sales de mercurio o como mercurio orgánico. El mercurio no es encontrado de forma natural en los alimentos, pero este puede aparecer en la comida, así como ser expandido en las cadenas alimentarias por pequeños organismos que son consumidos por los humanos, por ejemplo, a través de los peces. Las concentraciones de mercurio en los peces usualmente exceden en gran medida las concentraciones en el agua donde viven. Los productos de la cría de ganado pueden también contener eminentes cantidades de mercurio. El mercurio no es comúnmente encontrado en plantas, pero este puede entrar en los cuerpos humanos a través de vegetales y otros cultivos. Cuando sprays que contienen mercurio son aplicados en la agricultura (ATSDR, 2016).

El Mercurio tiene un número de efectos sobre los humanos, que pueden ser todos simplificados en las siguientes principalmente:

- Daño al sistema nervioso
- Daño a las funciones del cerebro
- Daño al ADN y cromosomas
- Reacciones alérgicas, irritación de la piel, cansancio, y dolor de cabeza
- Efectos negativos en la reproducción, daño en el espermatozoides, defectos de nacimientos y abortos

El daño a las funciones del cerebro puede causar la degradación de la habilidad para aprender, cambios en la personalidad, temblores, cambios en la visión, sordera, incoordinación de músculos, pérdida de la memoria y daño en el cromosoma (ATSDR, 2016).

5.6.6. Adsorción de mercurio

El mercurio es considerado uno de los elementos con mayor presencia y toxicidad en el ambiente, junto con el plomo y el arsénico. El mercurio no es biodegradable y puede ser transportado a través de la cadena alimenticia.

Obregón, y colaboradores en el año 2020, determinaron la capacidad de remoción de Hg con carbón activado modificado con óxido de manganeso y sin modificar, obtenido a partir de semillas de aguaje; para lo cual emplearon 20 mL de una solución de 5 ppm de mercurio y 12 mg de carbón activado a temperatura ambiente y un pH de 2,0 y 3,5. Se mantuvieron en agitación constante por un tiempo determinado (entre 5 y 1400 min). Luego, observaron que la adsorción de mercurio fue mayor en el carbón activado modificado, en comparación con el carbón activado sin modificar, a un pH mayor al punto de su carga cero, el carbón activado modificado a pH 9,0 alcanzó una mayor adsorción que el carbón activado modificado a pH 3,0 (Figura N°10). Basado en esto, determinaron que los carbones modificados con óxido de manganeso presentaron un aumento de su carga cero, siendo la adsorción de mercurio más efectiva pasando el punto de carga cero de dichos carbones, debido al incremento de los grupos fenólicos en su superficie.

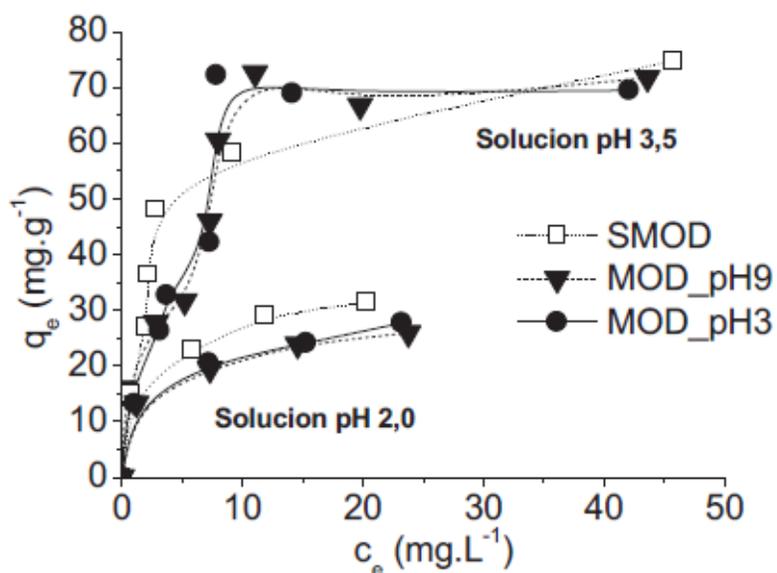


Figura N° 10. Isotermas de adsorción de los CA modificados y sin modificar en soluciones de distinto pH.

Fuente: (Obregón et al., 2020)

El modelo de Freundlich presentó un coeficiente de correlación alto y una menor desviación estándar normalizada. Por tal motivo, se puede establecer que el proceso de adsorción de mercurio se llevó a cabo en sitios activos heterogéneos y con la formación de multicapas. Se puede observar que la velocidad de adsorción disminuye con el incremento del tiempo de adsorción debido a la reducción de sitios activos sobre la superficie del carbón activado (CA) y la disminución del gradiente de concentración entre la interfaz sólido-líquido.

Colpa y colaboradores en el año 2016, compararon la adsorción de mercurio en carbones activados a partir de zuro de maíz, modificados y sin modificar. Para llevar a cabo esto, prepararon carbones activados utilizando soluciones de nitrato de mercurio a una concentración de $100,0 \text{ mg.L}^{-1}$ a pH 2,0; 4,0 y 6,0; luego prepararon soluciones acuosas de 100 mg.L^{-1} a partir de nitrato de mercurio $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ y pesaron por triplicado aproximadamente 0,2 gramos de carbón activado, a los que adicionaron 50,00 mL de la solución de Hg^{2+} , agitando a temperatura ambiente continuamente durante 18 horas. Como resultado, observaron que la adsorción de mercurio se ve favorecida en los carbones activados sin modificar (Figura N°11), ya que los carbones modificados con calentamiento térmico y tratamiento químico no aumentan la capacidad de adsorción de Hg^{2+} de los materiales, lo que se atribuye a los cambios texturales, como consecuencia del reacomodamiento molecular y la superficie química.

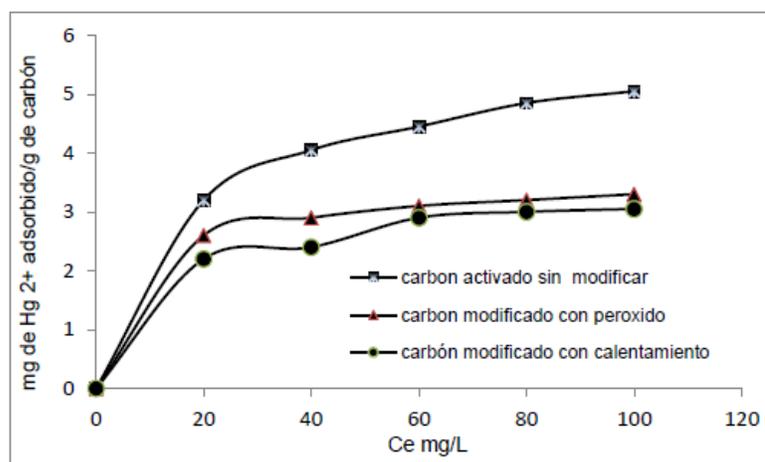


Figura N° 11. Isotermas tipo Langmuir de adsorción de Hg^{2+} utilizando carbón activado de ZM como material adsorbente.

Fuente: (Colpas et al., 2016)

Vera, G. y Vanessa, E., en el año 2015 realizaron la evaluación de la adsorción del Pb y Hg en carbón activado proveniente de la cascarilla de arroz, mediante espectrometría de absorción atómica; para esto se llevó a cabo la preparación de carbones activados, obtenidos por el método de activación química, utilizando soluciones de ácido fosfórico (H_3PO_4); los ensayos de adsorción se realizaron utilizando 0,5 g de carbón activado que se pusieron en contacto con 500 ml de solución acuosa de plomo y mercurio a distintas concentraciones (1,0; 3,0; 5,0; 7,0; y 9,0 ppm y 10, 20, 30, 40, 50 ppb respectivamente) en condiciones de temperatura ambiente, seguidamente se colocó en agitación a 120 rpm durante 4 horas, controlando un pH de 4,0 – 5,0.

Como resultado de la adsorción de mercurio por parte del carbón activado, se indicó que a menor concentración de mercurio (ppm) en el agua sintética, mayor porcentaje de adsorción por parte del carbón activado, como se indica en la figura N°12. En esta investigación se utilizó espectrofotometría de adsorción atómica (AAS) para cuantificar las concentraciones de mercurio residual en agua sintética, resultando porcentajes de adsorción de 91,5 %.

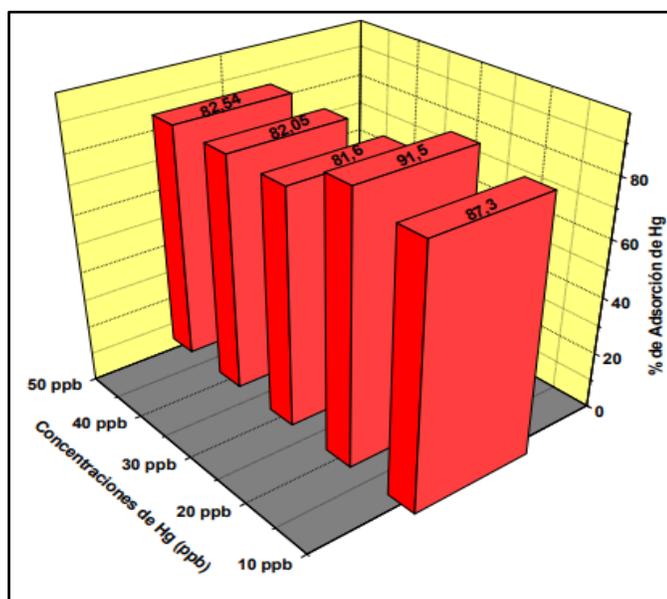


Figura N° 12. Porcentaje de adsorción de mercurio con respecto a su concentración inicial.

Fuente: (Vera, G. y Vanessa, E, 2015)

6. Espectrofotometría de absorción atómica

La espectroscopia de absorción atómica (a menudo llamada espectroscopia AA o AAS, por Atomic absorption spectroscopy) es un método instrumental de la química analítica que permite medir las concentraciones específicas de un material en una mezcla y determinar una gran variedad de elementos. Esta técnica se utiliza para determinar la concentración de un elemento particular (el analito) en una muestra y puede determinar más de 70 elementos diferentes en solución o directamente en muestras sólidas utilizadas en farmacología, biofísica o investigación toxicológica (Hannaford, 2010).

6.1. Bases de la espectrofotometría de absorción atómica

La espectrometría de absorción, técnica utilizada para evaluar la concentración de un analito en una muestra; se basa en gran medida en la ley de Beer-Lambert. Donde, los electrones de los átomos en el atomizador pueden ser promovidos a orbitales más altos por un instante, mediante la absorción de una cuantía de energía (es decir, luz de una determinada longitud de onda). Esta cantidad de energía (o longitud de onda) se refiere directamente a una transición de electrones en un elemento específico, y en general, cada longitud de onda corresponde a un solo elemento (Skoog, 1998).

Ahora bien, como la cantidad de energía que se pone en la llama es conocida, y la cantidad restante en el otro lado (el detector) se puede medir, es posible, a partir de la ley de Beer-Lambert, calcular cuántas de estas transiciones tiene lugar, y así obtener una señal que es proporcional a la concentración del elemento que se mide (Skoog, 1998).

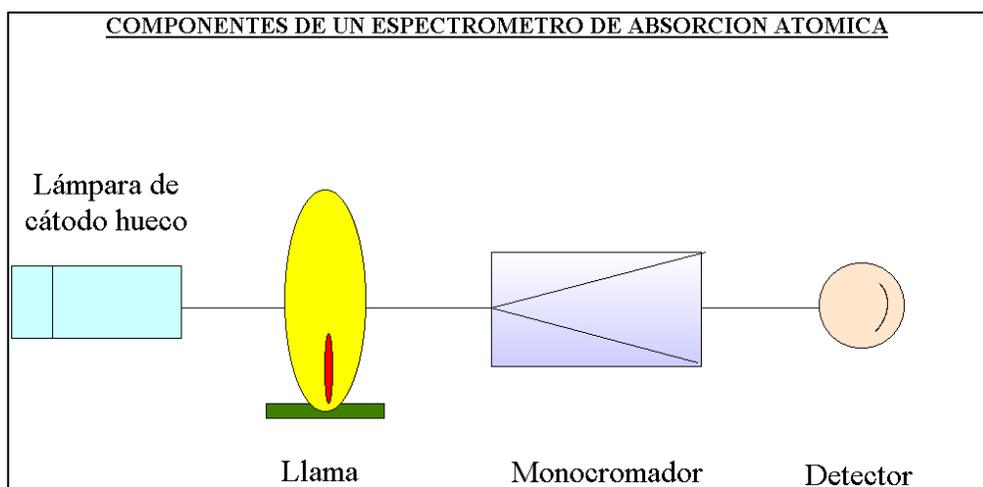


Figura N° 13. Componentes de un espectrómetro de absorción atómica.

Fuente: (Hernán Alva 2013)

6.2. Instrumentación

6.2.1 Fuente de radiación

Los métodos de absorción son muy específicos, esto se debe a que las líneas de absorción atómicas son notablemente estrechas (0,002 a 0,005 nm) también, porque las energías de transición electrónicas son únicas para cada elemento. Por otro lado, las amplitudes de línea estrechas crean un problema, ya que incluso los monocromadores de buena calidad tienen anchos de banda significativamente mayores que la amplitud de las líneas de absorción atómica. Como resultado, las curvas de calibración no lineales son inevitables cuando las mediciones de absorción atómica se hacen con un espectrómetro ordinario equipado con una fuente de radiación continua. Además, las pendientes de las curvas de calibración que se obtienen en estos experimentos son pequeñas porque la muestra absorbe solo una pequeña fracción de la radiación proveniente de la rendija del monocromador; el resultado es una sensibilidad poco eficiente.

El problema creado por la muy pequeña amplitud de las líneas de absorción atómica ha sido solucionado mediante el uso de fuentes de líneas con anchos de banda incluso más reducidos que la amplitud de la línea de absorción. Por ejemplo, se usa la línea de 589,6 nm del sodio como

base para identificar dicho elemento, se aísla una línea de emisión de sodio a esta misma longitud de onda para que esta sirva como fuente. En este caso, se puede utilizar una lámpara de vapor de sodio en la que los átomos del elemento son excitados mediante una descarga eléctrica para producir una línea. Las demás líneas emitidas de sodio desde la fuente, son removidas con filtro o con un monocromador relativamente barato. Una desventaja de este procedimiento es que se necesitaría una lámpara de fuente para cada elemento (o a veces grupo de elementos) (Castro, 2017).

6.2.2 Lámpara de cátodo hueco

Estas son lámparas de descarga diseñadas para ser utilizadas dentro de instrumentos de absorción atómica (AA). Están compuestas por un cátodo fabricado a partir del elemento de interés, un ánodo y un gas de relleno inerte contenido en una envoltura de vidrio (Krausse, 2017).

Las ventajas de utilizar la lámpara de cátodo hueco son:

- Buena sensibilidad química
- Elevada respuesta espectral.
- Salida de luz estable.
- Bajo ruido instrumental.
- Larga vida útil y larga vida almacenada.

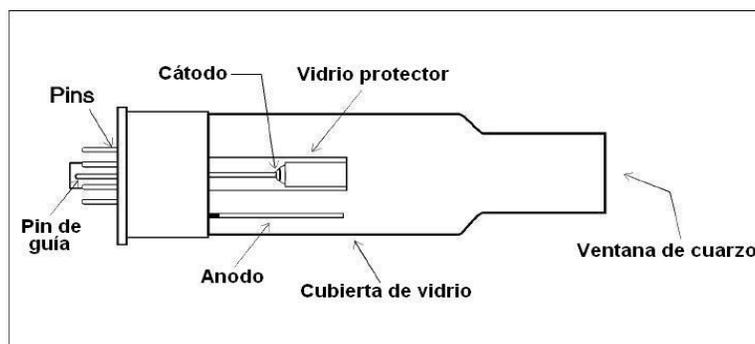


Figura N° 14. Lámpara de cátodo hueco.

Fuente: Principios de Análisis Instrumental. Douglas A. Skoog.

6.2.3. Tipos de atomizadores

Para atomizar la muestra normalmente se usa una llama, pero también pueden usarse otros atomizadores como el horno de grafito o los plasmas, principalmente los plasmas de acoplamiento inductivo.

Cuando se usa una llama, se dispone de tal modo que pase a lo largo lateralmente (10 cm) y no en profundidad. La altura de la llama sobre la cabeza del quemador se puede controlar mediante un ajuste del flujo de mezcla de combustible. Un haz de luz pasa a través de esta llama en el lado más largo del eje (el eje lateral) e impacta en un detector (Skoog et al., 2005).

- Análisis de los líquidos

Una muestra de líquido normalmente se convierte en gas atómico en tres pasos (Skoog et al., 2005):

- Desolvación. El líquido disolvente se evapora, y la muestra permanece seca.
- Vaporización. La muestra sólida se evapora a gas.
- Atomización. Los compuestos que componen la muestra se dividen en átomos libres.

6.2.4. Mechero de flujo laminar

En espectroscopia atómica en llama se emplean dos tipos de mecheros; mechero de flujo laminar y mechero de flujo turbulento, este último se caracteriza por estar unido al nebulizador formando un todo, la muestra se aspira y nebuliza por efecto Venturi creado por el flujo de gases en torno a la punta del capilar, los caudales típicos son de 1 a 3 ml/min el aerosol resultante se mezcla a continuación con el combustible y pasa a través de una serie de deflectores que dejan pasar únicamente las gotas más finas. En cuanto a los mecheros de flujo laminar, estos proporcionan una llama relativamente silenciosa y una longitud de camino óptico significativamente mayor, estas propiedades aumentan la sensibilidad y reproducibilidad. (Skoog, Holler y Crouch, 2010).

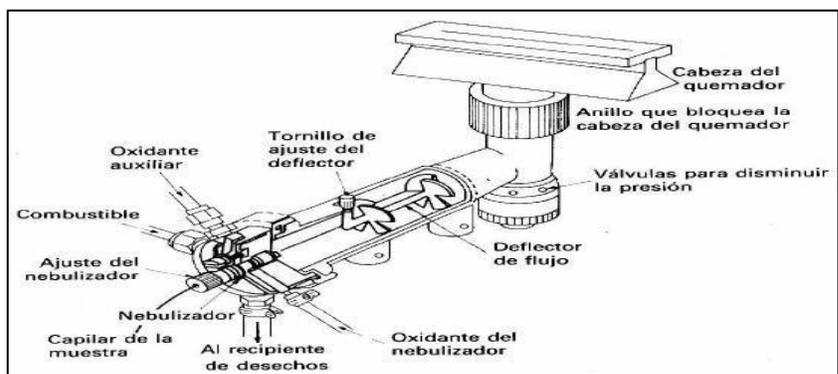


Figura N° 15. Mechero de flujo laminar.

Fuente: Principios de Análisis Instrumental. Douglas A. Skoog.

6.2.4. Monocromador

En general, el monocromador dispone de una rendija de entrada, esta limita la radiación lumínica producida por la fuente y la confina en un área específica; un agregado de espejos para pasar la luz a través del sistema óptico; un elemento para separar las longitudes de onda de la radiación lumínica, el cual puede ser un prisma o una rejilla de difracción, y una rendija de salida para seleccionar la longitud de onda con la cual se desea iluminar la muestra. El monocromador elimina las radiaciones interferentes y parte de la radiación no absorbida es dirigida hacia el detector (Castro, 2017).

DISCUSIÓN

A lo largo de la exhaustiva recolección de información en distintas bases de datos se destacaron ciertos artículos (Tabla 1) que mostraron las características pertinentes requeridas en esta revisión. Principalmente se evidencia que al realizar la activación del carbón, por medio de la activación química se incrementa el carácter hidrófilo (Dado que los carbones presentan en principio un carácter hidrófobo), que resulta beneficioso para la adsorción de compuestos inorgánicos en fase acuosa; si adicional a esto, se realiza una modificación con compuesto ácido, se aumenta la presencia de grupos funcionales ácido en la superficie de los materiales, los cuales son importantes en los procesos de adsorción de metales, producto de la creación de interacciones específicas con el material adsorbente. Además, se observa que el material lignocelulósico más utilizado es la cascara de coco, lo que se puede atribuir a su elevada porosidad y área superficial, bajo contenido de ceniza y el alto índice de yodo, sobre todo a su buen contenido de grupos ácidos superficiales carboxílicos, lactonas y fenólicos, los cuales incrementan al momento de la activación, mejorando así la adsorción.

Así mismo, queda claro que un pH de la solución ácido favorece la adsorción de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II), puesto que como se observó en el estudio de Hernández, et al.2017, para el carbón activado granular sin modificar se obtuvo mejor adsorción de Ni(II) a pH 1,2, ya que ese carbón presenta menor contenidos de grupos ácidos y por consiguiente mayor basicidad, por lo tanto el pH de 1,2 favorece mecanismo de intercambio iónico de los elementos contenidos en la matriz del carbón por los iones de níquel (II). De esta misma forma se puede tomar como desventaja las limitaciones a una solución ácida, por lo que modificar el carbón con un compuesto ácido puede ayudar a una buena adsorción en una solución de pH neutro o básico.

Por otra parte, se tiene en cuenta que la afinidad de los metales hacia la lignina sigue el siguiente orden: Au(III) > Pb(II) > Hg(II) > Zn(II) > La(III) > Fe(III) > Pt(IV) > Cd(II) > Co(II) > Cu(II) > Pd(II) > Cr(III) > Ni(II) > Cr(VI) > V(II) (Gómez, et al. 2015) esta secuencia muestra una mayor afinidad en la medida que el número atómico aumenta; al comparar la adsorción de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) registrada por diversos autores, se observó que el carbón activado a partir de materiales

lignocelulósicos presenta mayor adsorción para Hg(II) y menor porcentaje de adsorción para Cr(VI), lo que se pudo evidenciar en el estudio de Benítez, et al. 2015, cuando la adsorción de Cr(VI) en presencia de Ni (II) disminuyó drásticamente de un 65,4 % a un 10 %, mientras que el Ni(II) tuvo un porcentaje de remoción de 63 %; paralelamente, el Hg(II) tiene un registro de adsorción de hasta el 92 % según el estudio de Vera y Morocho, 2015. Así pues, esta diferencia de adsorción se puede atribuir a la alta densidad electrónica en la molécula, ya que una alta densidad electrónica permite incrementar la capacidad máxima de adsorción; y a los grupos funcionales como los hidroxilos, carbonilos y carboxílicos, que son los que mayor relación tienen con la afinidad de la lignina hacia los iones metálicos.

En cuanto a la espectroscopia de absorción atómica, se observa que es la técnica de caracterización más utilizada en el estudio de retención de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) por carbón activado a partir de materiales lignocelulosicos; en un 65 % de la bibliografía indagada se implementó esta técnica, ya que permite determinar la concentración de los metales pesados antes y después de que la solución se someta al contacto con el carbón activado, esto se debe a su amplia sensibilidad; se concluye que el método de generación de hidruros aumenta la sensibilidad, debido a que el método de absorción atómica adaptado a un generador de hidruros sirvió para detectar trazas de elementos, es decir cantidades en el orden de partes por billón (μ g.L⁻¹).

CONCLUSIÓN

La contaminación del agua es producida principalmente por el vertimiento de aguas industriales y agrícolas; el incremento de uso de metales y sustancias químicas en los procesos industriales ha resultado en la generación de contaminación de muchos efluentes acuíferos, con la presencia de tóxicos orgánicos, metales pesados, entre otros; se sabe que la presencia de metales pesados en el ambiente causa severos daños a la vida acuática y ocasiona que el proceso de purificación decaiga, viéndose afectada la calidad de vida de los seres humanos. Por lo cual, se ha recurrido al uso del carbón activado como agente adsorbente de dichos metales pesados.

En tal sentido, basados en la recopilación de información realizada para este estudio, obtenidas en las bases de datos Science Direct, Scopus, y Scielo; se puede concluir que, los materiales lignocelulósicos ofrecen un gran potencial como materia prima sostenible para la producción de carbón activado, el cual presenta una excelente capacidad de remoción de metales pesados, demostrando mayor rentabilidad y por lo tanto, una estrategia efectiva en la implementación comercial de carbón activado a partir de materiales lignocelulósicos; ya que, al ser considerado como un residuo agroindustrial, la obtención de esta materia prima no genera gasto económico; así entonces, el tratamiento del material y su activación dependerá del método al que se desee recurrir, inclusive se puede activar químicamente con salmuera (sal común) entre otros químicos que no generan un gasto económico significativo. En consecuencia, las fuentes bibliográficas demostraron que la capacidad de adsorción de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II), fueron significativas y favorables, destacando el importante papel de la afinidad de los metales hacia la lignina y los grupos ácidos superficiales.

Ahora bien, el tipo de precursor lignocelulósico para la generación de carbón activado, aporta gran importancia al proceso de adsorción, puesto que de esta materia prima dependerá la cantidad de grupos ácidos superficiales carboxílicos, lactonas, fenólicos, hidroxilo y amino; de igual manera, es de gran importancia el pH, el tamaño de partícula, la temperatura y la concentración de carbón activado. Del mismo modo, se resalta el significativo valor que tiene el orden de afinidad de los metales pesados hacia la lignina; cuyo orden afecta directamente el potencial de

adsorción de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II), puesto que, en una matriz conformada por dichos metales, estos competirán en el intercambio iónico con la superficie del carbón activado.

Por otra parte, los estudios realizados a nivel nacional e internacional sobre la retención de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II) con carbón activado a partir de materiales lignocelulósicos, evidencian el interés reciente en la investigación de esta temática y por ende su importancia; en los últimos cinco años, se ha investigado el uso de una amplia variedad de materiales lignocelulósicos residuales para la remoción de iones metálicos en aguas contaminadas, entre los que se incluye cáscaras de frutos secos, cortezas y semillas de diferentes árboles; donde destacan los residuos del arroz, maíz, coco y naranja, como precursores lignocelulósicos de carbón activado eficientes para la remoción de iones de Ni(II), Cr(VI) y Hg(II).

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, ATSDR. (2005). Reseña Toxicológica del Níquel (versión para comentario público). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. Servicio de Salud Pública. [Revisada el 6 de mayo 2016]. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts15.html.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, ATSDR. (2005). Reseña Toxicológica del Cromo. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. Servicio de Salud Pública. [Revisada el 6 de mayo 2016]. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.html.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, ATSDR. (2005). Reseña Toxicológica del Mercurio. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. Servicio de Salud Pública. [Revisada el 6 de mayo 2016]. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs46.html.
- Carriazo, J., Saavedra, M., y Molina, M. (2010). Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo, *Educación Química*, 21(3), 224-229.
- Carrillo, V., y Sánchez, M. (2013). Elaboración de un filtro a base de carbón activado obtenido del endocarpio de coco con el propósito de reducir la dureza en el agua potable. San Salvador: Universidad de el Salvador.
- Castro, E. (2017). *Espectromía de Absorción Atómica*. Facultad de Ciencias Químicas. México.
- Chávez, C. (2011). *Detección de Metales Pesados en Agua*. Instituto Nacional De Astrofísica, Óptica Y Electrónica. Tonantzintla, Puebla. 2011.
- Chirinos, G. (2018). *Evaluación de la recuperación de oro en relaves de cianuración en la planta concentradora Transformación y Procesos J&C S.A. CSAYÁN*. Ciudad Universitaria, Huacho Perú. 2018.
- Colpas, F., Taron, A. y Fong, W. (2015). *Análisis del desarrollo textural de carbones activados preparados a partir de zuro de maíz*. Cartagena, Colombia.

- Colpas., Tarón. y Fon (2016). Adsorción de Mercurio Utilizando Carbones Activados Modificados con Peróxido de Hidrogeno y Calentamiento Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Programa de Química. Cartagena, Colombia.
- Díaz, J. y Granada, C. (2016). Effect of anthropic activities on the physicochemical and microbiological characteristics of the Bogotá River along the municipality of Villapinzón-Cundinamarca.
- Doig, P. y Lucía, A. (2011). Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cáscara de castaña (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Colombia.
- El Carbón. (2016). I.E.S. “Cristóbal de Monroy”. Dpto. De Tecnología. Recuperado de <https://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/carbon.pdf>.
- Espitia, L. y Molina, C. (2016). Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano.
- Fu, F. y Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewater: A review. *Journal of environmental management*: 92, 407-418.
- García, F. (2013), Planta de Producción de Carbón Activo. Departamento: Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente. Zaragoza, España. 2013.
- Garzón, S. y González, L. (2012). Adsorción de Cr (VI) utilizando carbón activado a partir de cáscara de naranja. Universidad de Cartagena.
- Gómez, A., Rincón, S. y Klose, W. (2010). Carbón activado de cuesco de palma Estudio de termo gravimetría y estructura. Universidad Nacional de Colombia.
- Gracia, L., Marrugo, J. y Alvis, E. (2011). Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*.
- Hannaford, P. (2010). Espectrofotometría de absorción atómica. *Revista Gestión y Ambiente*.
- Hernán, A. (2013). Componentes de un espectrómetro de absorción atómica <https://absorcion-atmica.blogspot.com>
- Hernández, R., Otero, C. y Falcón, H. (2016). Adsorción de NI(II) en carbón activado de conchas de coco modificado con soluciones de Ácido Nítrico. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

- Ibrahim, W., Hassa, A. y Azab, Y. (2016). Biosorption of toxic heavy metals from aqueous solution by *Ulva lactuca* activated carbón, *Egyptian journal of basic and applied sciences*, 3, 241–249.
- Instituto Nacional de Medicina Legal. (2016). Estudio Pericial de Exposición a Níquel en las comunidades indígenas y afrocolombianas de los municipios Montelíbano, San José de Uré y Puerto Libertador, departamento de Córdoba, Colombia. Bogotá: INML.
- Instituto Nacional de Salud (INS), Grupo de Evaluación de Riesgos en Inocuidad de Alimentos. (2015). Evaluación de riesgo de mercurio en peces de aguas continentales en Colombia. Bogotá D.C., Colombia. 2015.
- López, L. (2013). Activación de Carbones para Aplicación en Almacenamiento de Gas Natural Vehicular (Metano). Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía. Medellín, Colombia. 2013.
- Luna, D., González, A., Gordo, M. y Martínez, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cascara de coco, *Contactos*, 64, 39 – 48.
- Mánalas, C., Emma M., Vendrell, F. y Medina, P. (2016). Aplicación de carbón activado de cascarón de coco en adsorción de especies metálicas contenidas en el licor de desecho (WL) de la lixiviación ácida de mineral litérico. *Tecnología Química*, XXXVI (1) ,117-129. [Fecha de Consulta 6 de Mayo de 2020]. ISSN: 0041-8420.
- Marzec, A. (2002). Towards an understanding of the coal structure: A review. *Fuel Processing Technology*, 77–78, 25–32. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00045-0)
- Mendoza, E. (2012). Remoción de Pb (II) de soluciones mediante carbón activado: experimentos en lotes (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia - universidad del Magdalena, Bogotá D.C. Colombia.
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 2115 de 2007 (2017): Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Bogotá D.C. Diario Oficial 46679.

- Netzahuatl-Muñoz, A.; Cristiani-Urbina, M.; Cristiani-Urbina, E. (2010). Estudio cinético de la remoción de cromo hexavalente y de cromo total por la corteza del árbol de pirul. *Rev. Cub. Quím.* 22(3):3-8.
- Ngai, T. K., Dangol, B., Murcott, S. E., & Shrestha, R. R. (2005). *Kanchan Arsenic Filter*. Massachusetts Institute of Technology (MIT) and Environment and Public Health Organization (ENPHO). Kathmandu, Nepal. Kathmandu, Nepal.
- Obregón, V. y Sun, K. (2020). Remoción de mercurio empleando carbón activado preparado a partir de aguaje (*mauritia flexuosa*). Pontificia universidad católica del Perú. av. universitaria 1801, lima 32, Perú.
- Orrego, J. (2008). Estudio de la estructura de cinco carbones colombianos por Espectroscopía Fotoacústica en el infrarrojo medio (tesis de maestría). *Universidad Industrial de Santander*, 1_74.
- Pellegrini, C. y Apesteguy. (2018). Remoción de cromo hexavalente empleando carbón activado como adsorbente Ingeniería Química, Facultad Regional Avellaneda. UTN. Ramón Franco 5050 (1874). Villa Domínico, Avellaneda. Buenos Aires. Argentina.
- Peña K., Giraldo, L. y Moreno J. (2012). Preparación de carbón activado a partir de cáscara de naranja por activación química. Caracterización física y química. *Revista Colombiana Química*.
- Penedo, M., Manals, C. y Vendrell Calzadilla. (2015). Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente.
- Pérez, M., Aguilar, M., Ortuño. y Sáez. (2010). "Biosorption of chromium (III) by orange (*Citrus cinensis*) waste: Batch and continuous studies," *Chem. Eng. J.*, vol. 155, no. 1-2, pp. 199-206.
- Primera, O., Colpas, F. y Meza, E. (2011). Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. *Revista de la academia Colombiana de la Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*: 35(136) ,387-396 (2011).
- Quispe, A., Ernesto de la Torre., y Guevara, A. (2010). Tratamiento de efluentes líquidos de la industria de curtido mediante precipitación química, adsorción con carbón activado y rizo filtración Departamento de Metalurgia Extractiva.

- Rendón, M. (2016). Desarrollo de Montelíbano y Unión Matoso, a partir de la explotación de Cerromatoso SA 2005-2015. Universidad del Rosario.
- Rodríguez, D. (2017). Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente. Avenida de Las Américas S/N. Santiago de Cuba, Cuba.
- Rodríguez, F. (2006). Nuevos retos en la síntesis y aplicación de carbón activado. España: Universidad de Alicante.
- Rodríguez, J. (2011). Modificación y Caracterización Calorimétrica de Carbón Activado Granular, para la Remoción de Cd (II) y Ni (II) en Adsorción Simple y Competitiva (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá- Colombia.
- Sevilla, U. (2011). Manual del carbón activo. Aula.aguapedia.org, 1–89. Retrieved from http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBoNACTIVODEFINITIVO tar.pdf
- Sun, K., Obregón, V. y Pinedo, F. (2015). Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje. Instituto de Corrosión y Protección – Pontificia Universidad Católica del Perú – CEP: Lima 32 – San Miguel – Lima – Perú
- Segnini, S., Castillo, A., Osorio, Y., Vence, L., & Vilorio, J. (2008). Tratamiento con carbón activado. *Revista de Obras Publicas*, 146(42), 72–78. <https://doi.org/ISSN:1885-625X>
- Skoog, D., Holler, F. y Crouch, S. (2010). Principios de análisis instrumental (6th ed., pp. 617-619). México, D.F. Cengage Learning.
- Tejada, L., Tejada, C., Marimón, W. y Villabona, A. (2014). Estudio de modificación química y física de biomasa (*Citrus sinensis* y *Musa paradisiaca*) para la adsorción de metales pesados en solución. *Revista Luna Azul*, 39, 124-142.
- Tejada, Villabona, A. y Jiménez, M. (2017). Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 20(1): 139-147.
- Tejada, A., Villabona, L. y Garcés, J. (2015) “Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico”, *Tecno Lógicas*, vol. 18, no. 34, pp. 109-123.

Vera, G. y Vanessa, E. (2015). Unidad académica de ciencias químicas y de la salud carrera de ingeniería química título: evaluación de adsorción de plomo y mercurio en carbón activado proveniente de la cascarilla de arroz. Machala - el oro.