



Universidad
Nacional de
Ingeniería

Área del Conocimiento de Agricultura

Remoción de Mercurio de aguas de manantial usando carbón activado obtenido de la vaina de Marango (moringa oleífera)

Trabajo monográfico presentado para optar al título de
Ingeniero Químico

Elaborado por:

Tutor:

Br. Fernando José Fariñas Gaitán
2018-1161U

M. en C. Rolando Antonio Guevara Arróliga

3 de marzo de 2026
Managua, Nicaragua

AGRADECIMIENTO

Primeramente, quiero darle gracias a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida. Lo que inició como un sueño, hoy se ha convertido en una realidad. Gracias por la perseverancia, sabiduría y valor que me brindó durante estos años para alcanzar esta meta.

A mis padres, quienes me enseñaron que cada día debe afrontarse con la mejor actitud. A mi padre, **Juan Fariñas**, por velar siempre por mi bienestar en cada viaje desde que inició este proyecto de vida. A mi madre, **María Isabel Gaitán**, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de estos años. Este logro es tanto de ustedes, como para ustedes.

A mí mismo, por cada paso que di. Tal vez no siempre fue el correcto, pero cada uno me llevó de donde estaba a un lugar mejor. Las experiencias vividas y el deseo constante de descubrir cosas nuevas me permitieron formarme como una mejor versión de mí: con educación, con valores, y con esperanza.

Por último, a las amistades que, a lo largo de estos años, fueron parte fundamental de mi vida. A quienes estuvieron, están y seguirán estando presentes en mis recuerdos. La vida se siente más ligera cuando tienes con quién compartir vivencias, alegrías, tristezas y un sinnúmero de emociones. Ustedes, que pasaron de ser extraños a convertirse en la familia que la vida eligió para mí, ocupan un lugar eterno en mi corazón. **Linda Avilés, Israel García y Sandra Clark**, gracias por apoyarme cuando más los necesité. Espero que la vida les retribuya todo el *dharma* que brindan.

“Now, you’re on your own, kid.” – T.S.

RESUMEN

La contaminación del agua por metales pesados derivados de la minería artesanal representa un problema ambiental y de salud pública de gran relevancia en Nicaragua. En particular, el mercurio, utilizado en procesos de extracción de oro, es un contaminante no biodegradable que persiste en el ambiente y se acumula en los organismos vivos. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la capacidad de bioadsorción del carbón activado obtenido de la vaina de *Moringa oleífera* para la remoción de mercurio en aguas de manantial de la comunidad El Jicaral, ubicada en el departamento de León. Para ello, se preparó carbón activado mediante calcinación y activación química, el cual fue caracterizado y sometido a pruebas de laboratorio utilizando soluciones acuosas con mercurio estandarizado y muestras reales de agua contaminada. Los ensayos de bioadsorción se realizaron a diferentes tiempos de contacto y concentraciones, y las mediciones de mercurio se efectuaron mediante espectrofotometría utilizando el método de ditizona. Los resultados mostraron que el carbón activado de la vaina de *Moringa oleífera* alcanzó niveles de remoción superiores al 90 % en soluciones sintéticas, y redujo significativamente la concentración de mercurio en muestras de agua de manantial, desde valores iniciales de 0.003 mg/L hasta niveles inferiores al límite de detección. Estos hallazgos confirman el potencial del carbón activado de origen vegetal como alternativa sostenible, de bajo costo y aplicable en comunidades afectadas por la minería artesanal para la mitigación de la contaminación hídrica.

Palabras clave: bioadsorción, carbón activado, contaminación hídrica, mercurio, *Moringa oleífera*.

ABSTRACT

Water contamination by heavy metals derived from artisanal mining represents a major environmental and public health concern in Nicaragua. Mercury, widely used in gold extraction processes, is a non-biodegradable contaminant that persists in the environment and bioaccumulates in living organisms. In this context, the present research aimed to evaluate the biosorption capacity of activated carbon obtained from *Moringa oleifera* pods for the removal of mercury in spring waters from the community of El Jicaral, located in the department of León. Activated carbon was produced through calcination and chemical activation, subsequently characterized, and tested in laboratory experiments using both standardized aqueous mercury solutions and real contaminated water samples. Biosorption tests were conducted at different contact times and concentrations, and mercury levels were determined by spectrophotometry using the dithizone method. Results showed that activated carbon from *Moringa oleifera* pods achieved removal efficiencies above 90% in synthetic solutions and significantly reduced mercury concentrations in spring water samples, from initial values of 0.003 mg/L to levels below the detection limit. These findings confirm the potential of plant-based activated carbon as a sustainable, low-cost, and applicable alternative for communities affected by artisanal mining to mitigate water pollution.

Keywords: activated carbon, biosorption, *Moringa oleifera*, mercury, water pollution.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	2
2.1. Objetivo general.....	2
2.2. Objetivos específicos	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
4.1. GENERALIDADES	4
4.1.1. Moringa Oleifera	4
4.2. Carbón activado.....	5
4.2.4. Activación de carbón activado.....	7
4.3. Mercurio.....	8
4.4. Aguas de Manantial	10
4.5. Bio-adsorción con carbón activado	10
4.6. Acondicionamientos del material	11
4.7. Ley No 217: Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales	12
4.8. Ley No. 260: Ley general de las aguas nacionales.....	13
4.9. Norma CAPRE: Calidad del agua para consumo humano.....	13
V. DISEÑO METODOLÓGICO.....	15
5.1. Área de estudio y punto de muestreo	15
5.2. Obtención del carbón activado.....	16
5.2.4. Caracterización del material absorbente	17
5.2.5. Acondicionamiento del material	17
5.2.6. Acondicionamiento E	17
5.3. Determinación de la capacidad absorbente a nivel de laboratorio	17
5.3.1. Prueba 1: solución acuosa de mercurio (Hg)	17
5.3.2. Prueba 2: agua de manantial (filtro lote)	18
5.4. Porcentaje de remoción de metales pesados	19
5.5. Análisis de datos estadísticos	19
VI. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	21
6.1. Carbonización y activación	26
6.2. Prueba de jarras	28
6.3. Prueba de agua de manantial	30
IX. BIBLIOGRAFIA	35
X. ANEXO	37

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: INSTRUMENTOS Y REACTIVOS PARA USO EXPERIMENTAL	16
TABLA 2: DETERMINACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE MERCURIO.....	18
TABLA 3: PARÁMETROS DE MEDICIÓN DE TIEMPO DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTE	20
TABLA 4: TABULACIÓN DEL RESULTADO DE TAMIZADO DE LOS RESTOS DE MORINGA OLEÍFERA	25
TABLA 5: PRIMER LECTURA DETERMINANTE DE MG MEDIANTE EL USO DEL ESPECTROFOTÓMETRO	29
TABLA 6: SEGUNDA LECTURA DE MG MEDIANTE EL USO DEL ESPECTROFOTÓMETRO	29
TABLA 7: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO	45

Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: SEPARACIÓN DE SEMILLAS DE LAS VAINAS DEL MARANGO	21
ILUSTRACIÓN 2: PESAJE DE VAINAS PARA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD	22
ILUSTRACIÓN 3: REJILLAS SOPORTE PARA HORNO.....	22
ILUSTRACIÓN 4: VAINAS INTRODUCIDAS AL HORNO PARA ELIMINACIÓN DE HUMEDAD.....	23
ILUSTRACIÓN 5: PESAJE DE LAS VAINAS DE MARANGO PREVIO AL SECADO.....	24
ILUSTRACIÓN 6: CRISOLES CON CARGAS DE MORINGA PARA SU CARBONIZACIÓN	26
ILUSTRACIÓN 7: CARBONIZACION DEL MATERIAL VEGETAL A 600°C.....	27
ILUSTRACIÓN 8: OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO DE LA VAINA DE MARANGO	27
ILUSTRACIÓN 9: PRUEBAS DE JARRAS EN ESTADO CONTROLADO DE REMOCIÓN	28
ILUSTRACIÓN 10: AGUA DE MANANTIAL DE LA LOCALIDAD EL JICARAL, LEÓN	30
ILUSTRACIÓN 11: LECTURA DE CANTIDAD DE MG PRESENTE EN MUESTRA DE AGUA EN MANANTIAL.....	31
ILUSTRACIÓN 12: LECTURA DEL ESPECTROFOTÓMETRO DR6000 QUE MUESTRA LA CONCENTRACIÓN DE MERCURIO TRAS EL PROCESO DE BIOADSORCIÓN.	32
ILUSTRACIÓN 13: EFLUENTE DE LA LOCALIDAD DEL JICARAL, LEÓN	43
ILUSTRACIÓN 14: ZONA DE MINERÍA ARTESANAL.....	43
ILUSTRACIÓN 15: LOCACIÓN GEOGRÁFICA DEL JICARAL, LEÓN.....	44
ILUSTRACIÓN 16: MEDICIÓN DE PH DE AGUAS DE MANANTIAL EN EL JICARAL, LEÓN.....	44

Índice de Ecuaciones

ECUACIÓN 1	11
ECUACIÓN 2	19
ECUACIÓN 3	24
ECUACIÓN 4	28
ECUACIÓN 5	39
ECUACIÓN 6	39
ECUACIÓN 7	39
ECUACIÓN 8	40
ECUACIÓN 9	40

I. INTRODUCCIÓN

La *Moringa Oleífera*, conocida en Nicaragua como Marango, es una planta en la cual destacan propiedades medicinales y, según estudios recientes, presenta potencial para implementarla en la bio-adsorción de metales pesados presentes en las aguas residuales que son desechadas por las empresas donde se practica la actividad minera. El agua de manantiales en el Triángulo Minero de Nicaragua tiene niveles de mercurio superiores a los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (López, 2021). Estos manantiales son importantes fuentes de agua para las comunidades locales y para la fauna silvestre; sin embargo, también están expuestos a la contaminación por mercurio, ya que se encuentran en la zona de influencia de la minería artesanal.

Nicaragua es un país tropical que cuenta con una variedad de recursos naturales, lo que indica que, en una escala de posición, es el país que cuenta con una mayor cantidad de recursos hídricos dentro de la región centroamericana (FAO-Aquastat, 2003). A pesar de ser muy abundante, no es el único recurso que resalta en el país; los minerales también se cuentan como un recurso natural muy valioso porque generan importantes cantidades de ingreso económico. La explotación minera es históricamente conocida desde los años 1527 con la colonización española, pero es hasta mediados de 1800 que comienza la llamada “fiebre del oro” con el descubrimiento de las minas de oro de La Libertad y Bonanza. Estos recursos naturales, tanto hídricos como minerales, que son de suma importancia dentro del país, tienen como consecuencia la explotación debido a la actividad humana, lo que genera efectos negativos.

La actividad minera genera desechos de metales pesados como plomo, mercurio, cadmio, arsénico y cromo, que causan problemas no solo para la población, sino también para las formas de vida en general; cuando se dispersan metales tóxicos en el ambiente, contaminan el suelo y se acumulan en las plantas y los tejidos orgánicos. En este contexto, la presente investigación propone usar la bio-adsorción con carbón activado obtenido de la vaina de la Moringa. Se aborda precisamente el agua a la cual se vierten directamente los desechos producto de la minería artesanal, contaminada principalmente por mercurio. El efluente natural al que se pretende aplicar la bio-adsorción es agua de manantial de la comarca El Jicaral, donde convergen muchas minerías de tipo artesanal, ubicadas en el departamento de León.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- ✓ Remover mercurio de aguas superficiales de manantial mediante la acción del carbón activado obtenido de la vaina de Marango (*moringa oleífera*).

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Obtener carbón activado a partir de la vaina de Marango (*moringa oleífera*).
- ✓ Modelar la bio-adsorción del mercurio con el carbón activado a escala de laboratorio, usando la prueba de jarra.
- ✓ Proponer un sistema de filtros en lote con el carbón activado para la remoción del mercurio presente en el agua de manantial.

III. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, existe en el mundo un incremento en la preocupación debido al aumento en la contaminación por metales pesados como el Mercurio, que se dan por efectos de actividad minera, la mayor preocupación en cuanto a estos metales es su carácter no biodegradable tanto de forma química como de forma biológica, lo que hace que su persistencia en el medio ambiente sea un factor a considerar.

En Nicaragua la política nacional de recursos hídricos (Gaceta, 2001) establece la importancia que tiene el agua ya que es patrimonio nacional de dominio público para satisfacer las necesidades básicas de la población respetando los principios de equidad social y género. También existe la conocida “*Ley de reforma a la Ley N°. 620, Ley General de Aguas Nacionales*” donde se especifica el manejo correcto y establece rangos de límites permitidos en las aguas residuales que garanticen la correcta biodegradación. Sin embargo, existe una preocupación en cuanto a actividad minera artesanal la cual es responsable de acciones que provocan importantes cantidades de contaminación por metales pesados. Al ser la minería una actividad importante a nivel económico es necesario dar solución a los problemas que este pueda estar presentando en relación a las normas ambientales, en este caso el desecho de mercurio en fuentes naturales.

La presente investigación pretende dar respuesta a la problemática planteada. Se busca aprovechar las propiedades de la *Moringa oleífera* para remover el mercurio, un metal pesado altamente tóxico, de las aguas naturales de la comunidad de El Jicaral, en León. Para ello, se utilizará la vaina de la moringa, una parte de bajo valor comercial, como materia prima para la obtención de carbón activado, material efectivo en procesos de bioadsorción. De esta manera, se contribuye a la reducción de la contaminación del agua ocasionada por la minería artesanal, la cual libera mercurio en efluentes naturales que posteriormente son utilizados para el consumo humano por comunidades aledañas, generando riesgos ambientales y de salud pública. (Chavarría, 2006)

IV. MARCO TEÓRICO

4.1. GENERALIDADES

4.1.1. *Moringa Oleífera*

Moringa oleífera es un árbol caducifolio el cual se puede encontrar en la India, el sudeste asiático y partes de África, América Central, Norte y Sur América, es notorio por ser un árbol de rápido crecimiento que puede alcanzar alturas de 25 a 30 metros a como se aprecia en la ilustración 1. Particularmente se diferencia debido a las hojas oblongas y verdes, al igual que por su tronco robusto y su corteza de color marrón. Al fruto de esta planta se le denomina como nuez de moringa y su forma se asemeja a la de una pequeña calabaza la cual es comestible y rico en proteínas (Márquez, 2013).



Ilustración 1: Aspecto general de la planta *Moringa oleífera*

Nota. Tomado de *Moringa oleífera* (s. f.), en Floresyplantas.net.
<https://www.floresyplantas.net/moringa-oleifera/>

Primordialmente, los usos de este árbol son para combustible y alimentación animal, no obstante, sus usos también están siendo inspeccionados por la industria farmacéutica, en el acápite de Anexos, figura A-1, se incluye material gráfico acerca de los diferentes usos de esta planta. Su nombre científico (*Moringa pterygosperma* Gaertn), que también se puede encontrar descrita con otros nombres como árbol de baquetas, árbol milagroso, árbol de aceite de ben o árbol de rábano picante, Marango entre otros, es tradicional y por cualidades naturales, es tolerante a la sequía; fue redescubierta en la década de 1990 y desde entonces su cultivo se ha vuelto cada vez más popular en Asia y África, donde se encuentra entre los cultivos económicamente más valiosos. (Velásquez, Peón, Bautista, & Jiménez, 2016)

4.1.2. Uso industrial de la moringa

De acuerdo con (García, 2012) existen investigaciones previas que estudian el potencial de la *Moringa Oleífera* en la eliminación de metales pesados tales como cromo, zinc, níquel, mercurio y plomo utilizando distintos sustratos producidos a partir de *Moringa oleífera* como adsorbente. Entre los más utilizados se encuentran

las semillas crudas trituradas, el carbón activo a partir de madera, extractos de semillas o la cáscara de la misma con resultados variables.

Al extraer aceite de la semilla de la moringa oleífera, la torta del aceite que resulta de este proceso tiene un contenido de proteínas floculantes al 1%, la cual se une a partículas minerales y material orgánico en la purificación del agua potable. En las industrias de jugos y cervezas, la sedimentación de fibras es realizada con la ayuda de estas mismas proteínas.

4.2. Carbón activado

Conocido como carbón en forma porosa que se fabrica partiendo de diversas materias primas carbonosas. Comercialmente, el carbón activado por carbón está hecho de cáscaras de coco y otras fuentes naturales, como el bambú, carbón mineral, turba y madera, esencialmente es de origen natural, es decir, orgánico por lo que es un producto que no contiene productos químicos ni aditivos. Para lograr el proceso que activa el carbón, se implementa el tratamiento de la materia prima a través de vapor o compuestos químicos, todo para lograr conseguir su estructura porosa a como se muestra en la Ilustración 2; (Desotec, 2024).

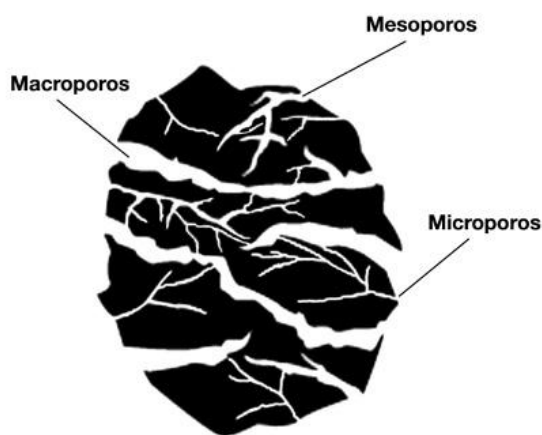


Ilustración 2: Estructura porosa del carbón activado

Nota. Tomado de *Evaluación de la obtención de carbón activado*, (s. f.), *Ingeniería Industrial* (Universidad de Lima). Recuperado de https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/view/5959/5913

Los poros del carbón activado son caracterizados por su tamaño molecular dentro de las partículas de carbón, lo que deja como resultado una extensa superficie interna. Se puede destacar su funcionalidad por la capacidad que tiene para la absorción de muchos químicos, metales y toxinas. El carbón activo posee dos variaciones en su figura, distinguidos como carbón activado en polvo (CAP) y carbón activado granular (CAG), por supuesto que, de estas dos variantes, la más usada es la versión de CAG, sobre todo para el tratamiento de aguas. (Desotec, 2024)

4.2.1. Propiedades

El carbón activo es un producto que se basa en el carbón. La estructura química del carbón se puede definir como una forma amorfa de grafito, con estructura aleatoria altamente porosa con poros con dimensiones distintas, desde las cavidades y huecos que son visibles hasta otros con dimensiones moleculares.

El tratamiento realizado con carbón activo se basa inicialmente en el fenómeno conocido como adsorción, tal y como se muestra en la ilustración 3, en el cual las moléculas de un líquido o gas se aglutinan a una cavidad interna o externa de una sustancia sólida.

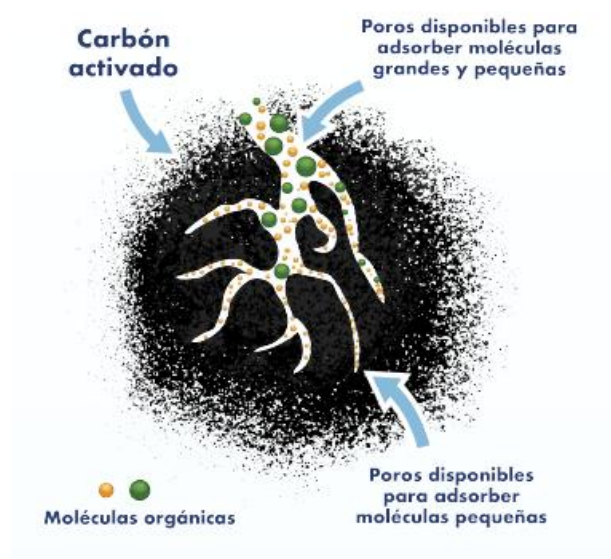


Ilustración 3: Funcionamiento de filtros de bloque de carbón activo

Nota. Tomado de *Por qué son tan especiales los filtros de bloque de carbón activo para la filtración de agua potable y cómo funcionan* (s. f.), en MarionKuprat.com. <https://www.marionkuprat.com/por-que-son-tan-especiales-los-filtros-de-bloque-de-carbon-activo-para-la-filtracion-de-agua-potable-y-como-funcionan/>

Igualmente, el carbón activo puede impregnarse con determinadas sustancias químicas para mejorar así sus propiedades para ciertas aplicaciones. Destacan sus propiedades purificantes y desintoxicantes. Se le atribuyen propiedades antiinflamatorias, digestivas y antioxidantes, que ayudan a prevenir y tratar diversas enfermedades. (Huizen, J.,2020)

4.2.2. Características

Los átomos de carbón presentes en la superficie de un cristal son capaces de atraer moléculas de compuestos que causan color, olor o sabores indeseables; a diferencia del carbón activo, que consiste en la cantidad de átomos en la superficie disponibles para realizar la absorción.

Según Carbotecnia (2021) “el carbón activado implica hacerlo poroso para aumentar su absorbencia, un gramo de carbón vegetal tiene una superficie de unos 50 metros cuadrados; con la activación alcanza los 600 u 800 m², es decir, aumenta de 12 a 16 veces”. Se prepara el carbón activado en la industria como un material con la finalidad de poder elevar la superficie interna y así poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución.

4.2.3. Uso Industrial del carbón activado

El carbón activado es utilizado en procesos de purificación de gases, purificación de oro, extracción de metales, purificación de agua, tratamiento de aguas

residuales, filtros de aire en máscaras de gas y respiradores, filtros en aire comprimido y muchos otros procesos.

Una aplicación industrial importante implica el uso de carbón activado en el campo de acabado de metales. Es muy utilizado en la purificación de soluciones de galvanoplastias, donde, el carbón activo elimina las impurezas y restaura el rendimiento del recubrimiento al nivel que se desea. (Sangiacomo, J., 2015)

Además, también está presente en los procesos como la depuración de agua subterránea, decoloración del agua, depuración de aguas para piscinas y para un refinamiento de aguas residuales tratadas.

4.2.4. Activación de carbón activado

Según Sangiacomo, 2015, la activación se puede llevar a cabo por dos vías distintas, se incluye diagrama grafico en la ilustración 4, sobre las dos diferentes maneras de activación del carbón, :

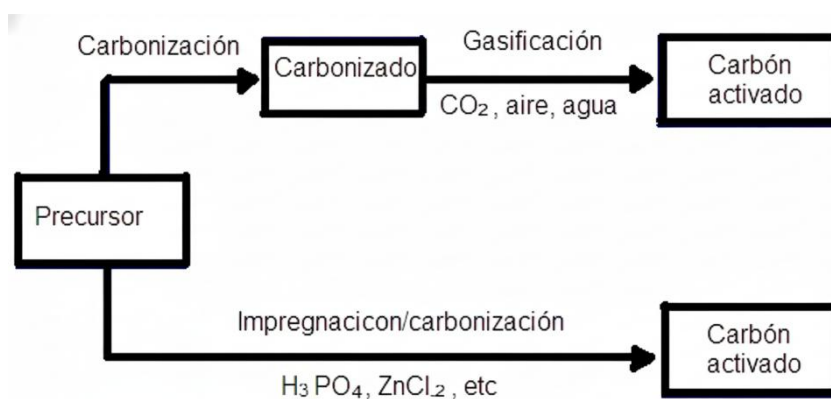


Ilustración 4: Activación de carbón en vía química y física

Vía física: se realiza en dos etapas. En la primera etapa se da la carbonización que consiste en la descomposición térmica de la materia prima, de esta etapa se obtiene un producto de estructura porosa, esta estructura se encuentra rellena con carbonos amorfos y residuos de la descomposición de la materia prima, estas sustancias son disueltas posteriormente en la segunda etapa por la acción oxidante de la atmosfera activante. La segunda etapa se centra más en la activación que se da a temperaturas relativamente altas y en presencia de sustancias activante (vapor de agua, CO_2 , cloro N_2 y otros gases).

Vía química: acá la materia es impregnada con una sustancia activante y luego es sometida a carbonización a temperaturas menores de 500°C . Este proceso es endotérmico con la ventaja de que el suministro de energía de activación pueda ser regulado por las temperaturas de trabajo.

4.3. Mercurio

Un elemento de la tabla periódica con número atómico 80, catalogado como un metal pesado, que se puede encontrar en estado líquido si se es sometido a condiciones normalizadas de temperatura y presión.



Ilustración 5: Mercurio Líquido

Nota: Tomado de *Mercurio (elemento)*, por Wikipedia contributors (s. f.), *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Mercurio_%28elemento%29

Los seres humanos aprovechan al máximo este elemento que está presente en la corteza terrestre de manera acotada. Este se alea fácilmente con muchos otros metales como el oro o la plata produciendo amalgamas, pero no con el hierro (PNUMA, 2010).

Existen un variado equipo de medición que recurren al mercurio, como los termómetros, manómetros y los barómetros. También se encuentran empleados en la fabricación de lámparas fluorescentes, en plaguicidas y en el ámbito de la odontología.

4.3.1. Propiedades

4.3.1.1. Químicas

Posee una reactividad química baja, lo que hace que reaccione muy poco con la mayoría de los ácidos, como aquellos que poseen niveles altos de oxidantes.

Es importante mencionar que el mercurio es altamente venenoso, ya que provoca diversos daños e incluso desencadena distintas enfermedades.

Algunas otras reacciones que presenta el mercurio se asemejan a las de la plata. Cuando está en contacto con otros metales, el mercurio puede formar amalgamas. Sin embargo, el mercurio puede disolver el oro a la perfección, también el manganeso, el cobre y el zinc. Difícilmente no puede hacer lo mismo con el hierro ni la mayoría de los metales de transición.

4.3.1.2. Físicas

Únicamente el elemento natural en estado líquido, pese a su condición blanda y pesada, este líquido es un excelente conductor de electricidad, siendo lo contrario, para la conducción del calor. Presenta puntos de ebullición y solidificación que

particularmente son bajos para ser un metal, esto debido a su configuración electrónica tan particularmente semejante al de los gases nobles (Lenntech, 2009). La manera que responde ante el calor, al comportarse como un metal, dilatándose, es lo que le da la propiedad y caracterización para ser usado en termómetros.

4.3.2. Aplicaciones

- En la minería: debido a la reactividad ante el oro y otros metales preciosos, este elemento es usado para la extracción (mayormente, ilegal) de estos, lo cual trae como consecuencia el envenenamiento de ríos y aguas subterráneas.
- En industria manufacturera: la elaboración de termómetros, barómetros y otros instrumentos a partir del mercurio, al aprovechar la dilatación que realiza ante la exposición al calor. También lo utilizan para la fabricación de lámparas de vapor de mercurio, interruptores líquidos y electrodos.
- En la industria química: se emplea en la fabricación de pesticidas, como catalizador de baterías, detonador de explosivos (fulminato de mercurio), o como pigmento en pinturas y ceras de lacrar.
- En medicina: en la antigüedad se aplicaba para hacer amalgamas dentales (odontológicas), lo cual dejó de ser así, debido a las toxinas del metal. Al igual, se pueden encontrar en antisépticos, laxantes, pomadas y otros medicamentos, que, debido a las propiedades de este elemento, cada vez es más frecuente la prohibición para el uso.

4.3.3. Toxicidad

La ingesta de este elemento para el cuerpo, resulta altamente toxico, ya que ocasiona daños en el sistema nervioso y en el sistema hepático. Su presencia en el organismo incluso, ocasiona daños al ADN y cromosomas, ocasionando infertilidad y descendencia con defectos congénitos. Depende de su forma química y, por lo tanto, los síntomas y signos varían según se trate de exposición al mercurio elemental, a los compuestos orgánicos del mercurio (en particular los compuestos de alquilmercurio como sales de metilmercurio y etilmercurio y el di metilmercurio).

4.3.4. Impacto ambiental

Los efectos que el mercurio provoca al medioambiente al ser procesado suelen ser desastrosos, ya que se aglomeran en el suelo y las aguas. Esta polución también es proveniente del mercurio que se vierte a la atmosfera posterior a la quema de combustibles y diferentes tipos de procesos industriales.

Así pues, el pH del ecosistema, agua y suelo, están alterados significativamente. Posteriormente, esto se acumula a su vez dentro de los seres vivos, por ejemplo, en peces, estos animales particularmente son sensibles al metil-mercurio y debido a esto, sus organismos se ven seriamente afectados. También el mercurio puede intoxicar a los seres humanos al practicar la pesca y a su vez, la ingesta de alimentos contaminados. Las investigaciones de la última década muestran que los efectos tóxicos pueden generarse a concentraciones más bajas, y que podrían afectar a más población mundial de lo que se había pensado (PNUMA, 2010).

4.4. Aguas de Manantial

Las aguas de manantial son aquellas que emergen de forma natural desde acuíferos subterráneos hacia la superficie terrestre como resultado de la infiltración y acumulación de aguas pluviales en el subsuelo. Estas fuentes hídricas se caracterizan por presentar un flujo relativamente constante, y en condiciones naturales, una calidad físico-química favorable; no obstante, su calidad puede verse comprometida cuando el punto de surgencia o las áreas circundantes están expuestas a actividades antrópicas que generan contaminación (OMS, 2007).

4.4.1. Aguas superficiales de manantial

Las aguas superficiales de manantial corresponden a aquellas que, una vez emergidas, entran en contacto directo con el ambiente superficial, quedando expuestas a contaminantes provenientes del suelo, escorrentías, residuos sólidos y descargas de origen antropogénico. A diferencia de los manantiales protegidos, estas aguas presentan una mayor vulnerabilidad a la contaminación química, incluyendo metales pesados como el mercurio, especialmente en zonas influenciadas por actividades mineras artesanales (Chavarría, 2006) (PNUMA, 2010).

Desde el punto de vista normativo y sanitario, las aguas de manantial utilizadas como fuentes de abastecimiento para consumo humano no pueden considerarse automáticamente potables, ya que requieren ser evaluadas y tratadas para cumplir con los límites de calidad establecidos en normativas regionales como la Norma CAPRE. Dicha normativa establece que toda fuente de agua destinada al consumo humano debe someterse a procesos de control y tratamiento que aseguren concentraciones de contaminantes dentro de los límites máximos permisibles, independientemente de su origen natural (CAPRE, 2019); (OMS, 2007).

4.5. Bio-adsorción con carbón activado

Esta técnica o proceso de adsorción en carbón activado se alcanza combinándolo con el tratamiento biológico del agua, no solamente como proceso previo y posterior, sino de forma simultáneamente.

En el proceso de Bio-adsorción con carbón activado, las partículas de carbón actúan de soporte para el crecimiento de los microorganismos, dándose de forma paralela la adsorción y la oxidación biológica. “Los bio-adsorbentes son materiales provenientes de la flora microbiana, algas, plantas, biomasa, productos agroindustriales o algunos biopolímeros, estos deben ser capaces de adsorber directamente el metal de forma iónica de la solución. (Tejada, 2014)”.

Entre los materiales más comunes que poseen propiedades bio-adsorbentes que se implementan en el proceso de adsorción de metales pesados, según Caviedes. (2015), Tejada. (2014) y Quiñones. (2013), como muestra se consideran:

- cáscara de maní (*Arachis hypogaea*); hojas y semillas de Teberinto (*Moringa oleífera* Lam.)

- Carbón Activado: carbón activado a partir de cáscara de coco (*Cocos nucifera*); carbón activado obtenido a partir de vainas y cascarillas de semilla de Teberinto (*Moringa oleífera Lam.*)
- Otros componentes: cenizas volantes, arena.

La finalidad de este proceso se describe como la unión física de las moléculas en fases gaseosas o líquidas hacia una superficie, en esta situación, la superficie del carbón activado. Este tratamiento puede implementarse en 3 diferentes pasos.

- Absorción: Adhesión física del material orgánico a la superficie del carbón activo en los meso-poros y microporos del carbón activo.
- Micro transporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de microporos del carbón activo (microporo < 2nm; meso-poro 2-50nm).
- Macro transporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de macro-poros del carbón activo (macro-poros > 50nm).

Cada clase de carbón tiene su propia isoterma de adsorción y en el campo del tratamiento de aguas esta isoterma viene definida por la función de Freundlich en la ecuación 1.

$$\frac{x}{m} = K_f C_e^{\frac{1}{n}}$$

Ecuación 1

x/m = sustancia adsorbida por gramo de carbón activo

C_e = diferencia de concentración (entre antes y después)

K_f, n = constantes específicas

De la concentración depende el nivel de actividad que tendrá la adsorción de los componentes en el agua, la temperatura y la polaridad de la sustancia. Una materia polar que es soluble en agua es difícilmente eliminada, o de ser posible, es innoblemente eliminada por el carbón activo. (Eddy, 1991)

4.6. Acondicionamientos del material

Para los acondicionamientos, se usa la materia prima seleccionada, que es aquella que se obtiene en el tamiz #50.

4.6.1. Acondicionamiento A

Se introduce al horno durante 24 horas a 110°C, para remover posible humedad presente y activar el material absorbente.

4.6.2. Acondicionamiento B

Se lava el material con agua a 100°C (temperatura de ebullición), en un papel filtro a modo de bolsa, repetir la acción hasta que el material desprenda la mayor cantidad de color posible. Posteriormente, el material se seca en la estufa a 110°C durante 24 horas (Reddy, 2010).

4.6.3. Acondicionamiento C

Según la metodología propuesta por Parlikar (2013), se introduce el material envuelto en un papel filtro a modo de bolsa, dejándose por 20 min en 500 mL de NaOH. Se repite esta acción, pero esta vez con agua destilada, y posteriormente se introduce a la estufa a 110°C durante 24 horas.

4.6.4. Acondicionamiento D

Tomando como referencia la metodología propuesta por Bhatti (2006), se introduce el material envuelto en un papel filtro a modo de bolsa en 500 mL de una solución de HCl 1M. Se realiza un segundo lavado con agua destilada para finalmente ser secado en una estufa de 110°C durante 24 horas.

4.6.5. Acondicionamiento E

Se toman 20 gr de los materiales que pasaron por todos los tamices de tamaño igual y menor a 0.420 mm (en caso de ejemplo tamiz #40, #50, #70). Luego se somete a un lavado con H₃PO₄ concentrado en una relación 1:1 ácido: carbón, para esto se introduce el material en un vaso de precipitado de 1L, y se humedece con agua destilada, luego se agrega el ácido y se homogeniza con ayuda de una varilla de agitación, luego el material es llevado a secado en una estufa a 60° C por 48 horas, finalmente el material se calcina a 450°C durante 1 hora con la ayuda de una mufla (Rodríguez Y., 2012).

4.7. *Ley No 217: Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales*

La Ley No. 217 constituye el principal marco legal en Nicaragua para la protección del medio ambiente y el uso racional de los recursos naturales, estableciendo la obligación de prevenir, controlar y mitigar la contaminación generada por actividades humanas. En el ámbito hídrico, esta ley regula la disposición y el vertimiento de aguas residuales a cuerpos receptores, con el objetivo de evitar la degradación de las aguas superficiales y subterráneas que puedan afectar la salud humana y los ecosistemas (Ley No. 217).

Dentro de sus disposiciones, la Ley No. 217 contempla el control de contaminantes peligrosos, como el mercurio y sus compuestos, especialmente aquellos provenientes de actividades industriales y mineras. Aunque la ley no evalúa directamente la calidad del agua para consumo humano, su aplicación resulta fundamental para prevenir la contaminación de fuentes hídricas, como ríos y manantiales superficiales, que pueden verse afectadas por vertimientos asociados a la minería artesanal (Ley No. 217).

En este sentido, la Ley No. 217 actúa como un instrumento preventivo y complementario a la normativa técnica de calidad del agua, proporcionando el marco legal para el monitoreo y control de actividades que pueden generar contaminación por mercurio en cuerpos de agua utilizados o potencialmente destinados al consumo humano (Ley No. 217).

4.8. Ley No. 260: Ley general de las aguas nacionales

La Ley No. 260 establece el marco jurídico para la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos en Nicaragua, reconociendo el agua como un bien de dominio público cuya protección es responsabilidad del Estado y de la sociedad. Esta ley prioriza la conservación de las fuentes de agua, incluyendo cuencas hidrográficas, acuíferos y nacimientos de manantiales, debido a su importancia para el abastecimiento y la protección de la salud de la población (Ley No. 260).

Asimismo, la Ley No. 260 define las aguas residuales como aquellas cuya calidad ha sido alterada por actividades humanas y que pueden generar impactos negativos sobre los cuerpos receptores, estableciendo la necesidad de regular las descargas para prevenir la contaminación de las aguas superficiales. Este enfoque resulta relevante para la protección de manantiales superficiales expuestos a actividades antrópicas, como la minería artesanal (Ley No. 260).

Finalmente, la ley incorpora el enfoque de protección y valoración de los servicios ambientales hídricos, destacando la importancia de conservar nacimientos de agua y áreas de recarga. Este principio respalda la necesidad de implementar acciones de control y tratamiento que contribuyan a mejorar la calidad de las aguas superficiales utilizadas por comunidades rurales cuando estas se ven afectadas por contaminantes como el mercurio (Ley No. 260).

4.9. Norma CAPRE: Calidad del agua para consumo humano

La Norma Regional para la Calidad del Agua para Consumo Humano, elaborada por el Comité Regional de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica (CAPRE), establece los criterios técnicos y los límites máximos permisibles de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos que deben cumplir las fuentes de agua destinadas al consumo humano en los países de la región centroamericana. Su objetivo principal es proteger la salud pública, garantizando que el agua utilizada para consumo no represente riesgos sanitarios para la población, independientemente de su origen superficial o subterráneo (CAPRE, 2019).

La norma CAPRE fue desarrollada inicialmente como un instrumento técnico regional orientado a armonizar los criterios de la calidad del agua para consumo humano en Centroamérica, siendo posteriormente revisada y actualizada para incorporar avances científicos y recomendaciones internacionales, particularmente las emitidas por la Organización Mundial de la Salud. Estas actualizaciones permiten que la norma mantenga vigencia técnica y sea aplicable a fuentes naturales como aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas de manantial destinadas al abastecimiento humano (CAPRE, 2019) (OMS, 2007).

Dentro de los parámetros químicos regulados por la Norma CAPRE se incluyen los metales pesados, los cuales son considerados contaminantes prioritarios debido a su elevada toxicidad, persistencia ambiental y capacidad de bioacumulación. Entre

estos, el mercurio representa un riesgo significativo para la salud humana, ya que incluso a bajas concentraciones puede generar efectos adversos a nivel neurológico, renal y cardiovascular, razón por la cual su control en fuentes de agua resulta de alta relevancia sanitaria (OMS, 2007).

De acuerdo con la norma CAPRE, la concentración máxima permisible de mercurio en agua destinada al consumo humano es de 0.001 mg/L, valor que coincide con las recomendaciones establecidas por la Organización Mundial de la Salud. La superación de este límite implica que el agua no cumple con los estándares de calidad requeridos para su consumo, por lo que debe someterse a procesos de tratamiento adecuados que permitan reducir la concentración del metal a niveles seguros para la población. Si bien esta norma no establece límites específicos, el valor máximo permisible constituye un criterio técnico de referencia para evaluar el impacto de descargas, escorrentías y actividades antrópicas, como la minera artesanal, sobre fuentes hídricas utilizadas o potencialmente destinadas al consumo humano. También es importante destacar que la norma CAPRE no regula los vertimientos de aguas residuales ni las descargas de efluentes industriales o mineros al ambiente, ya que estas materias corresponden al ámbito de la legislación ambiental nacional; esta se enfoca exclusivamente en la calidad del agua final destinada al consumo humano (CAPRE, 2019).

V. DISEÑO METODOLÓGICO

Las pruebas experimentales tendrán lugar en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos (LIP), del Programa de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

5.1. Área de estudio y punto de muestreo

La muestra de agua superficial fue recolectada en un manantial ubicado en la localidad de El Jicaral, Zona rural del departamento de León, área caracterizada por la presencia de actividad minera en su entorno. El sitio de muestreo fue seleccionado debido a su importancia como fuente hídrica superficial y a su posible vulnerabilidad frente a procesos de contaminación asociados a actividades antrópicas, particularmente las relacionadas a la minería.

La localización geográfica del punto de muestreo se presenta mediante ilustraciones en el anexo A-10, donde se muestra la ubicación del manantial dentro del área de estudio.

5.1.1. Recolección de muestra

La recolección de la muestra de agua superficial se realizó siguiendo un procedimiento técnico de muestreo, con el fin de garantizar la representatividad del manantial y evitar alteraciones en la calidad del agua. La toma se efectuó directamente en el punto de afloramiento del manantial, evitando zonas con estancamiento o acumulación de sedimentos, y utilizando recipientes limpios y previamente acondicionados.

Debido a la posible presencia de contaminación por actividad minera, se tuvo especial cuidado en minimizar la contaminación externa durante el muestreo, asegurando que la muestra representara las condiciones reales del agua superficial del manantial al momento de la recolección.

5.2. Obtención del carbón activado

5.2.1. Selección de materia prima

La materia prima seleccionada, es la vaina de la moringa y restos de cáscara de la semilla. Para la obtención de la cáscara, se procura que la vaina esté lo más seca posible, para la obtención de la cascara de la semilla, se retira de forma manual.

5.2.2. Reactivos y Equipos de Laboratorios

Los materiales, equipos y reactivos necesarios para el proceso de investigación se presentan en la Tabla 1. Así mismo, se incluye una especificación de equipos utilizados en el anexo A-12, como complemento de la metodología aplicada.

Tabla 1: Instrumentos y reactivos para uso experimental

Instrumentos	Reactivos
• Bolsas de plástico • Triturador • Mufla • Beaker (50,100,250,500,1000ml) • Pipeta • Agitador • Gotero • Agitadores magnéticos • Autoclave • Balanza digital • Papel filtro • Vidrio de reloj • Mechero • Tamices (juego) • Cámara	• Agua destilada para lavado y preparación de diferentes disoluciones • Metil-mercurio • NaOH • H₂SO₄ • NaClO₂ • H₃PO₄

Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Secado y triturado

Para la etapa de trituración se usa un mortero, es decir, esta etapa se efectúa de forma manual.

Se introduce la materia prima en un horno a una temperatura recomendada de 105 -110 °C por 24 hr con el fin de que, al momento de triturar, la humedad no provoque una consistencia pastosa.

5.2.4. Tamizado

Después de la trituración, se pasa por un juego de tamices, para clasificar la materia prima según el tamaño de sus partículas. Se hace vibrar el conjunto durante un tiempo determinado, después se retira el vibrador y se registra el peso del material retenido en cada tamiz. Se clasifica el tamaño de cribas y se obtiene los rangos de tamaño de partículas deseados.

5.2.4. Caracterización del material absorbente

La caracterización del material absorbente se hace con el resto de materia prima que fue retenido en los otros tamices, para lo cual se consideraron los parámetros de humedad, lignina, celulosa, hemicelulosa y holocelulosa, determinados por los métodos señalados en la norma ASTM D2216, ASTM D1106, ASTM 1109, se incluye descripción de parámetros en anexos A3, A4, A5, A6, A7, respectivamente. ASTM (American Society for Testing and Materials o ASTM International).

5.2.5. Acondicionamiento del material

Se elige la propuesta de acondicionamiento establecida por Rodríguez (2012) ya que presenta resultados favorables en la activación del carbón activado y en su desempeño al momento de remover Cromo, siendo este un metal, que al igual que el Mercurio, se implementa en la minería artesanal.

5.2.6. Acondicionamiento E

Se toman 20 gr de los materiales que pasaron por todos los tamices de tamaño igual y menor a 0.420 mm. Luego se somete a un lavado con H_3PO_4 concentrado en una relación 1:1 ácido: carbón, para esto se introduce el material en un vaso de precipitado de 1L, y se humedece con agua destilada, luego se agrega el ácido y se homogeniza con ayuda de una varilla de agitación, luego el material es llevado a secado en una estufa a 60 °C por 48 horas, finalmente el material se calcina a 450 °C durante 1 hora con la ayuda de una mufla. (Rodríguez Y., 2012).

5.3. Determinación de la capacidad absorbente a nivel de laboratorio

Para la determinación de las concentraciones en las diferentes etapas presentadas en la tabla 3, se recomienda el uso de un espectrofotómetro, para la determinación de concentraciones por colorimetría. Se prepara una solución acuosa de Hg, se disuelven 0.40 mL de solución de mercurio en 2 L de agua destilada. Se calcula la concentración inicial. Se incluye material gráfico a forma de referencia en anexos figura A-2.

NOTA:

- ✓ Si se decide reducir a 1 L, se debe de tener en cuenta que se va a usar 0.5 L para el acondicionamiento, la idea de que se haga una porción doble es poder volver a repetir el análisis si es necesario.
- ✓ Si se decide reducir a 1 L, la porción de 0.40 mL se sugiere reducirla a la mitad.

5.3.1. Prueba 1: solución acuosa de mercurio (Hg)

Para esta parte, se recomienda el uso de un reactor discontinuo (Batch), usando un equipo de prueba de jarra con vasos de precipitación de 1L. Para el acondicionamiento E se usa una dosis de 1 g en 1 L.

Se procede a tomar muestras del acondicionamiento en los tiempos 0, 10, 30, 60 minutos, mientras que el equipo está en marcha, para poder identificar la forma en la que el carbón activado absorbe a través del tiempo.

Tabla 2: Determinación de concentración de mercurio

Etapas (M)	Tiempo (minutos, T)	% remoción
Primera medición	10	T1E1
Segunda medición	20	T2E2
Tercera medición	40	T3E3
Cuarta medición	60	T4E4

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Prueba 2: agua de manantial (filtro lote)

Para esta prueba se necesita haber determinado que efectivamente el acondicionamiento E, obtuvo un buen rendimiento de remoción.

Se crea un filtro casero y se rellena con los materiales adecuados que faciliten la filtración del agua de manantial. Entre los materiales estarán telas o gasas, el carbón activado que obtuvimos de la vaina de Moringa, piedras o gravas fina, y algodón. Se dejará reposar por 24 horas.

Antes del reposo, se medirá la cantidad de mercurio que contiene el agua de manantial; pasado las 24 horas, se medirá de nuevo la cantidad de mercurio residual después del proceso de Bioadsorción.

5.3.3. Diseño de filtro en lote

La metodología empleada para el diseño del sistema de filtración en lote es de tipo descriptiva–propositiva, orientada a plantear una alternativa de tratamiento para la remoción de mercurio en aguas superficiales de manantial. La propuesta se fundamentó en el análisis de los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas de bioadsorción con carbón activado elaborado a partir de la vaina de Moringa oleífera, considerando su eficiencia de remoción del metal y su viabilidad como material adsorbente principal dentro del sistema de filtración.

Con base en dichos resultados, se estableció un diseño conceptual de un sistema de filtración en lote operado por gravedad, utilizando materiales de fácil acceso y bajo costo, específicamente algodón, arena fina, carbón activado de Moringa oleífera y grava, dispuestos en capas sucesivas, a como se aprecia en la ilustración 6. Esta configuración permite la retención de sólidos, la filtración física y la adsorción química del mercurio, concibiéndose el sistema como una etapa de tratamiento previa a la potabilización del agua, aplicable a pequeña escala en contextos rurales y sin contemplar su validación a nivel piloto o industrial.

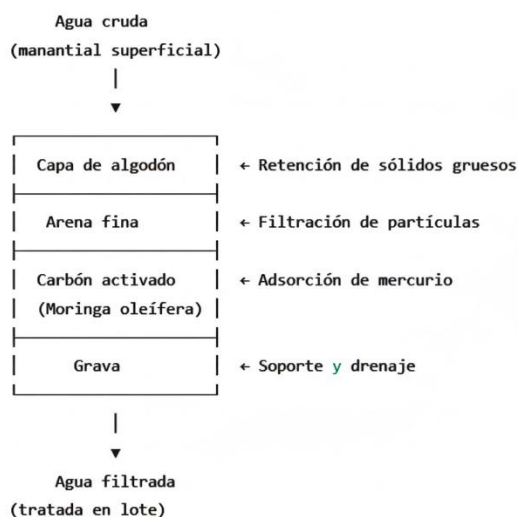


Ilustración 6: Esquema conceptual del sistema de filtración en lote para la remoción de mercurio en aguas superficiales de manantial.

5.4. Porcentaje de remoción de metales pesados

Para determinar los porcentajes de mercurio removidos se utiliza la ecuación 2:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{(\text{concentración inicial} - \text{concentración final})}{\text{concentración inicial}} * 100$$

Ecuación 2

Se determina la concentración inicial a partir del acondicionamiento preparado con mercurio, y la concentración final proveniente de la concentración encontrada de mercurio en las muestras del tratamiento de Bio-adsorción con las vainas de la Moringa.

5.5. Análisis de datos estadísticos

Se realiza una tabulación de datos obtenidos en los diferentes tratamientos o acondicionamientos en el programa Microsoft Excel para determinar la disminución que presentan los porcentajes de Mercurio que se establecen en el objeto de estudio, esto con la finalidad de precisar el tiempo de retención de los iones de mercurio. Los datos que se obtienen a través de esta tabulación se pueden ejecutar con una prueba no paramétrica estadística, en afinidad con nuestro estudio, se recomienda la prueba estadística Kruskal-Wallis, que se interpreta por la corroboración de la existencia de diferencias que sean relevantes en una variable dependiente; concentración final vs tiempo.

Las variables independientes o factores de estudio serán:

- Gramos de carbón activado de la vaina de Moringa Oleífera
- Tiempos de remoción

Las variables dependientes o respuestas relevantes serán:

- Porcentajes de remoción del mercurio

Tabla 3: Parámetros de medición de tiempo de remoción de contaminante

Gr de carbón activado	Tiempo de remoción (min)	Concentración inicial de mercurio (mg/L)	Concentración final de mercurio (mg/L)	% de remoción de mercurio
1 gr	10	-	-	-
2 gr	20	-	-	-
4 gr	40	-	-	-
6 gr	60	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

VI. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Para la obtención de la materia prima, considerada un elemento primordial en esta investigación, se seleccionó la zona del departamento de Managua con mayor densidad de árboles de Moringa, lo que permitió disponer de una cantidad suficiente de vainas secas para el estudio. En total, se recolectaron aproximadamente 520 g de vainas con semillas, que, una vez extraídas, representaron un peso neto de 486.36 g de material vegetal aprovechable. Este registro cuantitativo aseguró la representatividad de la muestra y la continuidad del proceso experimental. Posteriormente, las vainas fueron trasladadas a las instalaciones de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde se realizó una clasificación detallada entre vainas sanas y aquellas con imperfecciones. Este proceso de selección cuantitativa permitió garantizar la calidad del material desde el inicio, asegurando que la materia prima empleada en la obtención del carbón activado presentara condiciones homogéneas y adecuadas para evaluar con precisión la eficiencia del proceso de bioadsorción.

Según la literatura, se decidió separar y descartar las semillas contenidas en las vainas de Moringa oleífera, con el propósito de utilizar exclusivamente la vaina como materia prima. Esta decisión respondió a estudios previos que indican que la estructura lignocelulósica de la vaina presenta propiedades adsorbentes más adecuadas para la producción de carbón activado, en comparación con otras partes de la planta.



Ilustración 7: Separación de semillas de las vainas del Marango

En la ilustración 7, a) se observan las vainas de la moringa las cuales presentaron un tamaño alargado aproximado de 20 centímetros y en la ilustración 1. b), se observan las semillas extraídas de las vainas con forma ovalada.

En la ilustración 8. Se observa el pesaje de las vainas posterior a la separación de las semillas, con el objetivo determinar la masa total de vainas que ingresan al proceso de secado. La cantidad obtenida fue de 486.36 gramos de vainas.



Ilustración 8: Pesaje de vainas para determinación de humedad

En la ilustración 8 se registró el peso de las vainas de Moringa oleífera antes de ser sometidas al secado térmico. Esta medición fue fundamental para la determinación del contenido de humedad. Mediante el principio de pérdida de peso por evaporación, se asumió que la diferencia entre el peso inicial y el peso posterior al secado correspondió al agua no químicamente enlazada presente en el tejido vegetal, es decir, agua físicamente adsorbida o libre que puede eliminarse con tratamiento térmico sin alterar la estructura química del material. Este procedimiento es equivalente al método gravimétrico convencional utilizado para determinar humedad en muestras lignocelulósicas.

En la Ilustración 9. se preparó las rejillas donde se introdujeron las vainas al horno para ser secadas y posteriormente trituradas. En esta fase se preparó la base con papel aluminio para aumentar la capacidad calorífica del horno y que el secado fuera más rápido, haciendo perforaciones para que el calor pasara a través de las rejillas y secara de una manera uniforme las vainas. El proceso de secado fue llevado a cabo a una temperatura de 200°C durante un periodo de 4 horas, una modificación en contraste a lo que indica la metodología antes descrita, esto a conveniencias del factor tiempo.



Ilustración 9: Rejillas soporte para horno

En la ilustración 10 se muestra la fase de preparación del material vegetal previo al secado térmico. Las vainas de Moringa fueron colocadas sobre rejillas metálicas recubiertas con papel aluminio perforado. Esta estrategia se implementó para aumentar la eficiencia en la transferencia de calor dentro del horno. El papel aluminio actúa como reflector térmico, devolviendo la radiación infrarroja hacia las vainas desde distintos ángulos y reduciendo la pérdida de calor por conducción hacia el metal de las rejillas. Las perforaciones, por su parte, permiten el libre flujo del aire caliente.



Ilustración 10: Vainas introducidas al horno para eliminación de humedad

El secado realizado fue de tipo convectivo, basado en la circulación de aire caliente que transfirió energía térmica al material húmedo. A medida que el aire caliente pasó por las superficies de las vainas, absorbió la humedad superficial y la transportó fuera del sistema. Este mecanismo favoreció un secado uniforme, rápido y controlado, eliminando principalmente el agua no químicamente enlazada presente en los tejidos vegetales, sin alterar la estructura lignocelulósica que fue esencial en las etapas posteriores de carbonización.



Ilustración 11: Pesaje de las vainas de Marango previo al secado

La ilustración 11 muestra el registro del peso final de las vainas de Moringa oleífera previo al proceso de secado térmico. Este valor fue esencial para determinar el contenido de humedad del material vegetal mediante el método gravimétrico. La determinación se basó en la diferencia de masa antes y después del secado, bajo el principio de que la pérdida corresponde exclusivamente a la evaporación del agua libre o físicamente adsorbida, no químicamente enlazada a la estructura celular de la biomasa.

Este procedimiento permitió calcular el porcentaje de humedad removido mediante la siguiente ecuación:

$$\%Humedad = \frac{masa\ inicial(g) - masa\ seca(g)}{masa\ seca\ (g)} * 100$$

Ecuación 3

$$\%Humedad = \frac{486.36\ g - 442.96\ g}{442.96\ g} * 100 = 9.7\%$$

La fase de triturado se tendría que haber hecho a mano con un mortero, no obstante, se pretendía obtener una reducción de tamaño deseable y adecuado para el siguiente paso, que sería la tamización, que consiste en clasificar la moringa ya triturada en diferentes tamaños, de ahí se tomó el material más óptimo para nuestra investigación.

Se dispuso de una trituradora de alimento, instrumento que fue facilitado el uso en la instalación del laboratorio de alimentos del área de conocimiento de ingeniería química.

Obteniendo la vaina de Moringa reducida a pequeños trozos y partículas, se procedió a tamizar para clasificar por tamaños, y seleccionar posterior a esto, el mejor tamaño para la creación del carbón.

En esta etapa se decidió tamizar dos veces los resultados de cada tamiz dependiendo de su numeración, para que el resultado que se requiera será el indicado para la etapa final.

A continuación, se detalla las dos cargas aplicadas en cada tamizado.

Tabla 4: Tabulación del resultado de tamizado de los restos de Moringa Oleífera

# Tamiz	Resultado de Moringa (g)				
	Peso inicial Tamiz (g)	Peso final con Moringa (g)	Tamizado 1	Tamizado 2	Σ Tamizados (g)
#12	442.96				
#20	394	420	29	26	55
#35	359	362.5	9	3.5	12.5
#50	344.5	353.5	17	9	26
#80	340	345.5	10	3.5	13.5
#140	317.5	322	7.5	4.5	12
#230	330.5	334.5	5.5	4	9.5
plato	360.5	363.5	2.5	3.5	6

Fuente: Elaboración Propia

Habiendo obtenido el resultado de reducción de tamaño y tamizado de la vaina, se seleccionó la carga del tamiz #50, ya que su aspecto no era arenoso ni muy grande. El tamaño indicado para proceder a la etapa de la creación y obtención del carbón.

6.1. Carbonización y activación

Para producir el carbón, el proceso de calcinación se llevó a cabo en una mufla a una temperatura a 600 grados Celsius durante el periodo de 4 horas para la total calcinación de la materia prima. Este se colocó por cargas pequeñas en pequeños recipientes, crisoles, que facilitaron la manipulación y compactación de lo que se deseó realizar.



Ilustración 12: Crisoles con cargas de Moringa para su carbonización

En la ilustración 12 se aprecia la distribución del material vegetal previamente tamizado (procedente del tamiz #50) en crisoles cerámicos. Estos recipientes permitieron un manejo seguro del material durante el proceso de calcinación, asegurando una exposición uniforme al calor dentro de la mufla. Cada crisol fue cubierto con papel aluminio para reducir la pérdida de calor por convección y favorecer una calcinación controlada, evitando el contacto directo con el oxígeno que podría desencadenar combustión en lugar de pirolisis.



Ilustración 13: Carbonización del material vegetal a 600°C

En la ilustración 13 se ve el proceso de pirolisis controlada que transformó la materia orgánica en carbón, eliminando componentes volátiles y enriqueciendo la estructura porosa del material. La carbonización fue un paso crítico, ya que determina en gran medida la calidad física y química del carbón resultante

Con el carbón resultante de la calcinación, en las figuras a y b de la ilustración 14 se observa el producto final tras la activación química del carbón obtenido. El material carbonizado fue tratado con ácido sulfúrico (H_2SO_4) para incrementar su porosidad y área superficial específica, parámetros clave para su desempeño como bioadsorbentes. Posteriormente, se procedió al secado del material activado en horno a 300 °C durante 2 horas, eliminando la humedad residual generada por el proceso de lavado ácido. El resultado fue un carbón activado de origen vegetal, con características adecuadas para la adsorción de contaminantes metálicos como el mercurio en soluciones acuosas.

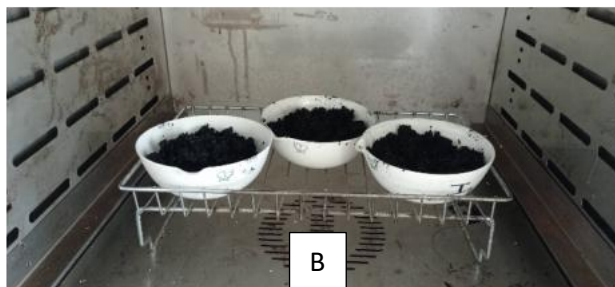


Ilustración 14: Obtención de Carbón Activado de la Vaina de Marango

6.2. Prueba de jarras

Las pruebas de jarras consistieron en tratar un volumen fijo de solución contaminada en diferentes recipientes (vasos de precipitación de 1 litro), cada uno con cantidades específicas de carbón activado. Estos recipientes fueron agitados simultáneamente durante lapsos de tiempo determinados a como se muestra en la ilustración 15, permitiendo medir la eficiencia del proceso de bioadsorción a diferentes intervalos. En el presente estudio, se utilizó este método para evaluar la capacidad del carbón activado, producido a partir de la vaina de *Moringa oleífera*, para remover mercurio de soluciones acuosas. Las muestras fueron recolectadas a los 10, 20, 40 y 60 minutos, y posteriormente analizadas para determinar las concentraciones finales de mercurio.



Ilustración 15: Pruebas de jarras en estado controlado de remoción

La siguiente parte experimental para verificar y comprobar las características bioadsorbentes del carbón activado obtenida de la vaina del marango, se llevó a cabo en los laboratorios de las instalaciones del PIENSA, Micropulentes, donde se realizan estudios de saneamiento y tratamiento de aguas residuales.

Se realizó una contaminación de agua destilada con mercurio estándar para simular un medio contaminado que posteriormente se trató con carbón activado.

Se trabajó con la solución de mercurio estándar ya que no se contaba con el reactivo en polvo, para esta medida se hizo la conversión adecuada de gramos requeridos a mg/L, resultando así 0.2mg/L de mercurio estandarizado; siendo aforado a 100 ml, esta fue la concentración inicial de las 4 jarras.

$$V_{\text{Conc}}: \frac{\text{concentracion deseada} * V_{\text{final}}}{\text{Concenracion del reactivo}} = \frac{0.2 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 100 \text{ mL}}{100 \text{ mg/L}} = 0.2 \text{ mL}$$

Ecuación 4

Para la determinación de mercurio se utilizó el método de determinación de la Ditizona, que realizó un arrastre de las partículas de contaminante, en este caso mercurio, y que se pudo leer mediante la lectura en el espectrofotómetro. Resultando así, las lecturas siguientes mediante la curva de calibración del equipo Hatch. Para una mejor claridad de lo que es el método de Ditizona y su preparación, revise el acápite de anexos A-8 y A-9.

Para la lectura del equipo Hatch

Se leyó la celda de dos puntos de vidrio para cada muestra, se programó la búsqueda de usuario para determinar mercurio en bajas cantidades.

Se lavó la celda para quitar rastros de cualquier otra lectura. Se indicó que la primera lectura del blanco siempre es cero.

A continuación, se detallan las condiciones experimentales y los resultados que se obtuvieron en cada una de las fases evaluadas:

Tabla 5: Primer lectura determinante de Mg mediante el uso del espectrofotómetro

Prueba de equipo	Tiempo de remoción (minutos)	Carbón Activado añadido (g)	Con. Inicial Mg (mg/L)	Conc. Final Mg (mg/L)
Jarra 1	10	1	0.2	<DOL
Jarra 2	20	2	0.2	<DOL
Jarra 3	40	4	0.2	<DOL
Jarra 4	60	6	0.2	<DOL

Fuente: Elaboración Propia

Nota: <DOL son las siglas en ingles de la abreviación indicando que el límite está por debajo del límite de detección (detection of limits), ya que la lectura en este caso del metal que se pretendía analizar estaba por debajo de la curva de calibración.

Tabla 6: Segunda lectura de Mg mediante el uso del espectrofotómetro

Prueba de equipo	Tiempo de remoción (minutos)	Carbón Activado añadido (g)	Conc. Inicial Mg (mg/L)	Conc. Final Mg (mg/L)
Jarra 1	10	1	0.2	0.0001
Jarra 2	20	2	0.2	0.001
Jarra 3	40	4	0.2	0.0001
Jarra 4	60	6	0.2	0.0001

Fuente: Elaboración propia

La determinación de mercurio se llevó a cabo mediante el método de Ditizona y lectura en espectrofotómetro Hatch, técnicas que requieren reactivos

específicos como clorhidrato de hidroxilamina, ditizona, cloroformo y bromuro de potasio. Estos reactivos no estaban disponibles en cantidades suficientes para replicar todas las mediciones sin comprometer la integridad del resto de los ensayos, al no poder realizar las réplicas necesarias, se determinó que no es posible aplicar ANOVA ni Kruskal Wallis directamente con significado estadístico confiable. Al tratarse de un estudio donde el objetivo principal fue validar la eficacia del carbón activado obtenido de las vainas de Moringa oleífera en la remoción de mercurio en condiciones controladas. Los resultados obtenidos cumplieron con este objetivo, demostrando porcentajes de remoción superiores al 90%.

6.3. Prueba de agua de manantial

Para esta parte del estudio, se determinó que el acondicionamiento previo del sistema de filtración presentó un rendimiento de remoción verificable, lo cual permitió continuar con la evaluación de la muestra de agua superficial.

Las pruebas realizadas sobre la muestra de agua de manantial evidenciaron un valor de pH de 8.4, correspondiente a condiciones ligeramente alcalinas. La lectura obtenida se presenta de forma ilustrativa en el anexo A-11.



Ilustración 16: Agua de manantial de la localidad el Jicaral, León

En la ilustración 16 podemos observar el recipiente donde se recolectó el agua que nos sirvió de muestra, procedente del efluente de estudio. Luego se procedió a realizar el método de determinación de mercurio en el laboratorio de Micropuluentes, así se verificó la cantidad inicial de contaminante que presentaba la muestra. Para esto se necesitó realizar el arrastre por método de Ditizona (se incluye detalladamente en anexos A-8 y A-9 la descripción de la preparación del método). Dando como resultado la cantidad de 0.003mg/L de Mercurio presente en la Muestra de agua del efluente, tal y como se muestra la lectura en el equipo Hatch en la ilustración 17.



Ilustración 17: Lectura de cantidad de Mg presente en muestra de agua en manantial

Teniendo en conocimiento que realmente el agua recolectada en un punto bajo del manantial si presentó contaminación, se procedió a formar un embudo en forma de lote, como propuesta de método de filtración, el cual almacenaría el agua durante el tiempo necesario para que se remuevan las diferentes partículas de suciedad, así mismo, el contaminante que se deseaba remover, mercurio.

Para la construcción del filtro, se dispusieron diversos materiales en capas sucesivas dentro de un embudo, simulando un sistema de filtración por gravedad. Las capas incluyeron algodón, arena fina, grava, rocas porosas y, en la parte central, el componente clave del sistema: el carbón activado obtenido de la vaina de *Moringa oleífera*, cuya función principal fue la remoción del contaminante metálico, en este caso, el mercurio. Es importante destacar que esta configuración corresponde a una propuesta experimental a escala de laboratorio, por lo que sus características y requerimientos pueden variar significativamente si se busca su aplicación en contextos a mayor escala o en sistemas de tratamiento industrial.

Transcurrido el tiempo de contacto establecido para facilitar la adsorción, el agua de manantial tratada fue cuidadosamente filtrada utilizando el método de decantación, asegurando la separación del líquido de las fases sólidas contenidas en el filtro.

Posteriormente, se aplicó el procedimiento de arrastre con el reactivo ditizona, siguiendo el protocolo establecido, y se realizaron dos mediciones mediante el espectrofotómetro Hach DR6000. Los resultados obtenidos confirmaron la eficiencia del carbón activado obtenido de la vaina de Moringa Oleífera como bioadsorbentes, al demostrar una reducción significativa de la concentración de mercurio en el agua analizada.



Ilustración 18: Lectura del espectrofotómetro DR6000 que muestra la concentración de mercurio tras el proceso de bioadsorción.

En la ilustración 18 se muestra el registro visual del equipo, donde se evidencia que la concentración final alcanzó un valor de -0.008mg/L que corresponde a un nivel por debajo del límite de detección (DOL) del método aplicado, confirmando la eficacia del material en la remoción del contaminante.

VII. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que el carbón activado producido a partir de la vaina de Moringa Oleífera es altamente efectivo para la remoción de mercurio en aguas de manantial, tanto en condiciones controladas de laboratorio como en muestras reales, cumpliendo con el objetivo general del estudio y demostrando su potencial como alternativa sostenible y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas por minería artesanal.
- Se logró obtener carbón activado a partir de la vaina de Moringa Oleífera, verificándose que este material presenta propiedades fisicoquímicas adecuadas tras los procesos de calcinación y activación química con ácido fosfórico. El acondicionamiento E mostro una estructura favorable en términos de porosidad, lo que confirma la viabilidad del uso de esta biomasa residual como materia prima para la producción de adsorbentes.
- Mediante las pruebas de jarras realizadas con soluciones acuosas sintéticas. Se comprobó la alta capacidad de bioadsorción del carbón activado de Moringa, alcanzando porcentajes de remoción de hasta el 99% a concentraciones iniciales de 0.2 mg/L de mercurio. Los valores finales obtenidos estuvieron por debajo del límite de detección del equipo, evidenciando una alta eficiencia del proceso en función del tiempo de contacto y la dosis del adsorbente.
- En las pruebas realizadas con agua de manantial de la comunidad El Jicaral, León, se demostró que el carbón activado de Moringa es eficaz en condiciones reales, logrando reducir significativamente la concentración inicial de mercurio (0.003 mg/L) hasta niveles inferiores al límite de detección. Estos resultados respaldan la propuesta de un sistema de filtración en lote como una alternativa práctica, accesible y replicable para comunidades afectadas por la contaminación hídrica.

Aunque no fue posible aplicar análisis estadísticos robustos debido a la falta de réplicas experimentales, los resultados obtenidos mostraron una tendencia clara y consistente de eficiencia en la remoción de mercurio. En conjunto, la investigación demuestra el uso de la vaina de Moringa Oleífera constituye una solución ambientalmente sostenible, económicamente viable y alineada con el aprovechamiento de recursos locales.

VIII. RECOMENDACIONES

- Con el objetivo de aplicar análisis estadísticos robustos, se recomienda realizar replicas experimentales en futuras investigaciones, que permitan dar valor agregado a la eficacia de los tratamientos aplicados.
- Se podría evaluar el comportamiento del carbón activado de Moringa en algunos sistemas que sean de diseño continuo o de mayor escala, esto para permitir valorar la eficiencia bajo condiciones cercanas a tratamientos reales.
- En comunidades afectadas por la minería, se insta a promover el uso de tecnologías que tenga su base en biomasa residuales, así como las vainas de la moringa oleífera, esto como estrategia ambientalmente amigable y replicable.
- Para finalizar, se propone que se integre esta investigación a programas de saneamiento rural, en coordinación con instituciones como ENACAL o MARENA, implementando tecnología y capacitaciones a comunidades locales en el uso de filtros caseros con carbón activado.

IX. BIBLIOGRAFIA

- Aguas residuales: Definición y clasificación. (2022, 6 abril). Telwesa. <https://telwesa.com/aguas-residuales/>
- Asociación Americana de Obras Hidráulicas. (2023). AWWA B100-18: *Carbón activado para potabilización de agua*. AWWA.
- Caviedes, D. (2015). Tratamiento para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*.
- Chavarría, K. L. (Agosto de 2006). impacto socioambiental de la actividad minera artesanal en el municipio de Siuna, RAAN, Nicaragua, 2005-2006. León, Nicaragua.
- Carbotecnia. (2021, 20 de diciembre). ¿Cuál es la diferencia entre absorción y adsorción? <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/diferencia-entre-absorcion-y-adsorcion/>
- Desotec. (2024, 4 de enero). *Estructura química del carbón activado*. <https://www.desotec.com/es/knowledge-hub/chemical-structure-ofactivated-carbon>
- Empresa Pública de Medellín. (2019). *Especificación técnica de carbón activado en polvo para potabilización (ET-AS-ME14-03, Rev. 2)*. Centros de Excelencia Técnica.
- García, B. (2012). Estudio de la descontaminación de efluentes líquidos con elevada concentración de metales pesados mediante bioadsorbentes de moringa oleífera. Universidad Politécnica de Valencia.
- Heuzé V., Tran G., Hassoun P., Bastianelli D., Lebas F., (2019). Moringa (Moringa oleífera). Feedipedia, un programa del INRAE, CIRAD, AFZ y FAO. <https://www.feedipedia.org/node/124> Última actualización el 9 de mayo de 2019
- Huizen, J. (2020, 8 diciembre). ¿Cuáles son los beneficios del carbón activado? <https://www.medicalnewstoday.com/articles/es/carbon-activado#posibles-usos>
- Lenntech (2014). Mercurio. En Línea: <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Hg.htm>
- Ley No. 217, Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales. La Gaceta, Diario Oficial de la República de Nicaragua, 6 de junio de 1996. <http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf>
- Ley No. 620, Ley de Reforma a la Ley General de Aguas Nacionales. La Gaceta, Diario Oficial de la República de Nicaragua, 23 de noviembre de 2020. <http://legislacion.asamblea.gob.ni/gacetas/2020/11/g217.pdf>
- Lorenzo-López, A., González-Acosta, L., Espinoza-Molina, J., & López-Molina, E. (2021). Contaminación por mercurio en el agua de manantiales del Triángulo Minero de Nicaragua. *Revista Cubana de Química*, 39(3), 461-470

- Marsh, H. (1997). Introduction to carbon technologies (H. Marsh, E.A. Heintzz and F. Rodriguez-Reinoso (eds.). Alicante: Servicios de Publicaciones de la Universidad de Alicante, pp. 1-34.
- Menéndez Díaz, JA, Martin-Gullon, I. (2006). Types of carbon adsorbents and their production. In: Activated Carbon Surfaces in Enviromental Remediation. Oviedo: Elsevier. Chap. 1, pp. 1-48.
- Metcalf & Eddy (1991); Wastewater Engineering; tercera edición; página 317
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K. S., & Talbot, B. G. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water Research*, 29(2), 703–710.
- Organización Mundial de la Salud. (2007). *Guías para la calidad del agua potable* (3.^a ed.). OMS. https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2010). *Evaluación mundial sobre el mercurio*. PNUMA.
- San Giacomo, J. (2015) Manual del Carbón activo MANUAL DEL CARBÓN ACTIVO. www.academia.edu. https://academia.edu/9985114/Manual_del_Carb%C3%B3n_Activo_MANUAL_DEL_CARB%C3%93N_ACTIVO
- Suárez, J. M. V. (2019, 2 agosto). Carbón activado: algunas aplicaciones y usos. <https://es.linkedin.com/pulse/carb%C3%B3n-activado-algunas-aplicaciones-y-usos-vel%C3%A1squez-su%C3%A1rez>
- Telwesa. (2022, 6 de abril). *Aguas residuales: definición y clasificación*. <https://telwesa.com/aguas-residuales/>
- Velásquez, M., Peón, I., Bautista, R., & Jiménez, M. (2016). Moringa (*Moringa oleifera* Lam.): usos potenciales en la agricultura, industria y medicina. *Revista Chapingo serie horticultura*, 22(2), 95-116.

X. ANEXO

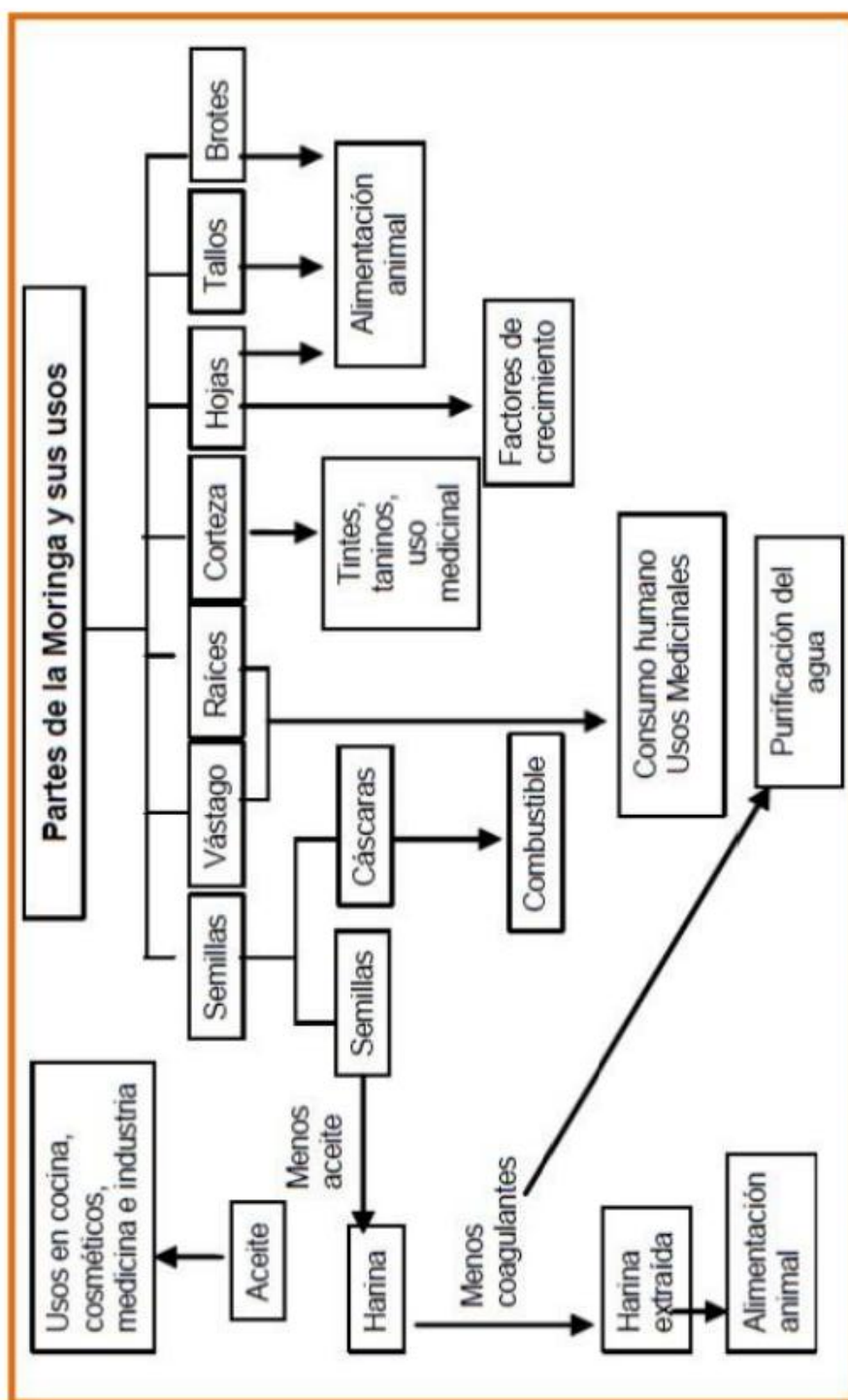


Figura A-1: Usos potenciales de diferentes partes de la planta *Moringa oleífera* en la industria y producción de alimentos.

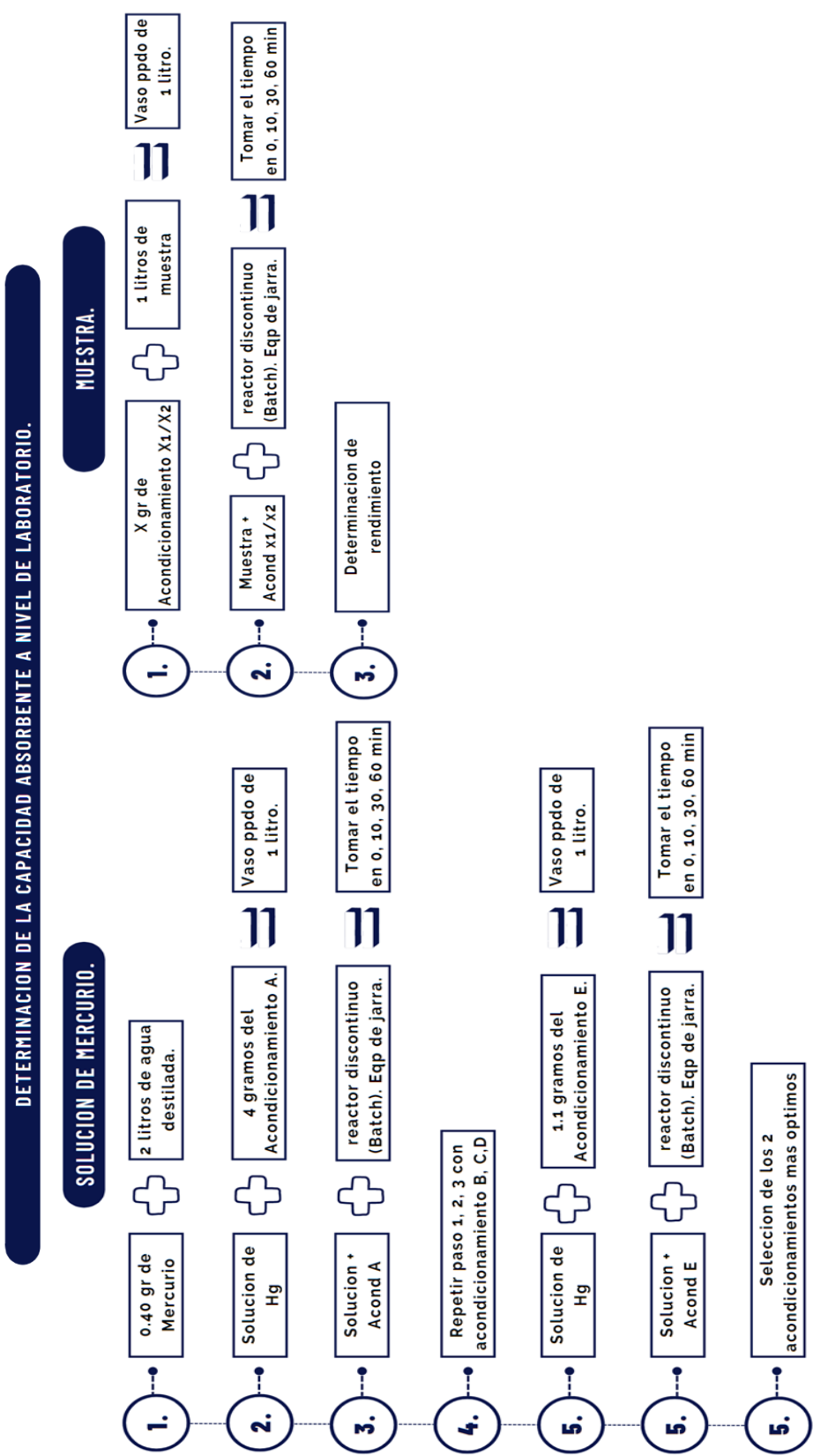


Figura A-2: Flujograma de determinación de la capacidad absorbente a nivel de laboratorio.

A-3 Determinación de humedad

1. Pesar la muestra de vaina de Moringa oleífera.
2. Colocar la muestra en el horno previamente calentado a 105°C durante 24 horas.
3. Almacenar las muestras en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente.
4. Pesar y registrar el valor.

$$\%Humedad = \frac{masa\ inicial(g) - masa\ seca(g)}{masa\ seca\ (g)} * 100$$

Ecuación 5

A-4 Determinación de lignina

1. Pesar la muestra seca de aproximadamente 1 gramo en una balanza analítica.
2. Se coloca la muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se agrega 100 mL de solución de sulfito-acido (100 gramos de sulfito de sodio y 50 ml de ácido sulfúrico en 1 litro de agua)
3. Se calienta la solución a 150°C durante 2 horas. Posteriormente, se deja enfriar en un desecador.
4. Filtrar la muestra con ayuda de una placa filtrante, y lavar el recipiente con agua caliente.
5. Secar la muestra en el horno a 105 °C durante 2 h, y posteriormente enfriar en un desecador.

$$\%Lignina = \frac{masa\ lignina\ (g)}{masa\ seca\ (g)} * 100$$

Ecuación 6

A-5 Determinación de celulosa

1. Pesar 2 g de vaina de Moringa oleífera en una balanza analítica.
2. Se coloca la muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se agrega 100 mL de solución de ácido sulfúrico-clorhídrico (100 gramos de ácido sulfúrico y 200 ml de ácido clorhídrico en 1 litro de agua)
3. Se calienta la solución a 120°C durante 2 horas. Posteriormente, se deja enfriar en un desecador.
4. Filtrar la muestra con ayuda de una placa filtrante, y lavar el recipiente con agua caliente.
5. Secar la muestra en el horno a 105 °C durante 2 h, y posteriormente enfriar en un desecador.

$$\% Celulosa = \frac{masa\ seca\ (g) - masa\ celulosa\ (g)}{masa\ seca\ (g)} * 100$$

Ecuación 7

A-6 Determinación de holocelulosa

1. Pesar 2 g de vaina de Moringa oleífera en una balanza analítica.
2. En un Erlenmeyer, añadir 150 mL de agua destilada y colocar 0.2 mL de ácido acético al 10% de concentración, junto con 1 g de NaClO₂.
3. Se calienta la solución a 120°C durante 2 horas. Agitar en intervalos convenientes. Durante las siguientes 2 h añadir 0.22 mL de ácido acético y 1 g de NaClO₂ en intervalos de 1 h.
4. Después de transcurrido el tiempo se debe bajar la temperatura. Dejar enfriar.
5. Filtrar la muestra con ayuda de una placa filtrante y luego lavar con 500 mL de agua destilada.
6. Secar en el horno a 110 °C durante 3 h, posteriormente dejar enfriar en un desecador.
7. Pesar y reportar el valor como porcentaje de holocelulosa.

$$\%Holocelulosa = \frac{masa\ seca\ (g) - masa\ holocelulosa\ (g)}{masa\ seca\ (g)} * 100$$

Ecuación 8

A-7 Determinación de hemicelulosa

Se hace una relación entre los porcentajes resultados de la determinación de celulosas y holocelulosa.

$$\% Hemicelulosa = holocelulosa - celulosa$$

Ecuación 9

A-8 Determinación de Mercurio Hg. (Método de la Ditizona)

- Buscar vaso de precipitado de 400 ml
- Agregar muestra de 250 ml, preparar blanco
- Agregar al vaso de precipitado 1 ml de sol. de permanganato de potasio (KMnO_4)
- Agregar 10 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), si es necesario agregar más KMnO_4 hasta que el color rosa persista
- Una vez agregado, llevamos a digestión que las muestras ebulan
- Esperar que se enfríen
- Los beakers que contienen las muestras frías, agregamos 5 ml de Persulfato de Potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$), agitamos
- Agregamos gotas de clorhidrato de hidroxilamina ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$), agitamos hasta que el color rosa desaparezca por completo y quede como el inicio
- Pasar las muestras a embudo de separación de 500 ml y acidificamos los gases
- Añadimos 25 ml de Ditizona de trabajo, y agitamos vigorosamente, liberando los gases
- Se forman 2 capas, desechar el color verde (fase de la ditizona)
- Repetir la extracción 2 veces
- La segunda vez la capa orgánica (ditizona color verde) pasarla a un embudo de separación de 250 ml codificado
- La ditizona que está en el balón de 250 ml, agregar 50 ml de H_2SO_4 0.25 N (lavado de Ditizona), agitamos y liberamos gases
- Se forman 2 capas, pasar la capa inferior (lavado de Ditizona) a otro embudo de 250 ml codificado
- Al lavado que está en el embudo agregar 50 ml de H_2SO_4 0.25 N y 10 ml de Bromuro de potasio (KBr), sacudir vigorosamente y liberar gases (Así el ditizonato de mercurio pasará desde la capa orgánica a la capa acuosa)
- Descartar la capa de ditizona inferior = fase orgánica
- La fase acuosa que queda en el embudo, agregamos gotas de cloroformo (objetivo de arrastrar toda la Ditizona), descartamos
- Al balón (embudo de separación) agregamos: 20 ml de fosfato-carbonato, 10 ml de ditizona y sacudimos
- Pasar ditizona verde a un beaker de 50 ml

- Leemos en el espectrofotómetro en absorbancia de 492 nm

Preparación de Soluciones

Solución de Permanganato de Potasio (KMnO_4)
Disolver 5 g de KMnO_4 en 100 ml de agua destilada

Solución de Persulfato Potásico ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$)
Disolver 5 g de $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ml en agua destilada

Solución de clorhidrato de hidroxilamina ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$)
Disolver 50 g de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ en 100 ml de agua destilada

Solución de Ácido Sulfúrico 1N
Disolver 14 ml de H_2SO_4 EJ en 500 ml de agua destilada

Solución de Ácido Sulfúrico 0.25N
Disolver 250 ml de H_2SO_4 1N en 1L de agua destilada

Solución de Ditizona de trabajo
Disolver 100 ml de Ditizona de Reserva en un balón de 250 ml y aforar con cloroformo

A-9 Solución de Ditizona de Reserva (Proceso de Purificación)

a) Hidróxido de Amonio 1+99 (NH_4OH)
Preparar para 200 ml de solución: Agregar 2 ml de NH_4OH y 198 ml de agua destilada en un balón de 200 ml.

b) Ácido clorhídrico 1+1 (HCl)
Preparar para 10 ml: agregar 5 ml de HCl concentrado y 5 ml de agua destilada en un balón de 10 ml.

Procedimiento: (Todo a la mitad)

Pesar 100 mg de Ditizona

En un Erlenmeyer de 250 ml colocar un embudo en un filtro, con un gotero tomar cloroformo y enjuagamos el filtro.

En un vaso de precipitado de 150 ml agregamos los 100 mg de ditizona y agregamos 50 ml de cloroformo; agitamos que se disuelva por completo y después lo filtramos al Erlenmeyer de 250 ml que contiene el embudo con el filtro.

Enjuagamos el vaso de precipitado con dos porciones de 5 ml de cloroformo y lo agregamos al embudo.

Lavamos el filtro y embudo con 3 porciones de 5 ml de cloroformo.

La ditizona del Erlenmeyer pasa a un embudo de separación de 500 ml.

Al embudo añadir 100 ml de NH_4OH 1+99, agitamos moderadamente durante 1 minuto (evitando las emulsiones).

Se formarán 2 capas, transferir la capa inferior a un embudo de separación de 250 ml, manteniendo la capa rojo-naranja en el embudo de 500 ml.

Al embudo de 250 ml agregamos 100 ml de NH_4OH 1+99, agitamos, dejamos y se forman 2 capas, descartamos la capa inferior (cloroformo).

La capa superior del embudo de 250 ml combinarlo en el que contiene los extractos del embudo de 500 ml.

Al embudo de 500 ml agregamos porciones de HCl 1+1, esto hasta que la ditizona precipite y la solución pierda su color rojo-anaranjado y cambie a unida permanentemente.

La capa inferior (color verde) lo pasamos a un beaker, del embudo extraer precipitados de Ditizona con 3 porciones de 25 ml de cloroformo, cada extracción pasarlo al beaker.

Finalmente, lo del beaker pasarlo a un balón de 100 ml y aforamos con cloroformo.

A.10 Locación El Jicaral, León, Manantial

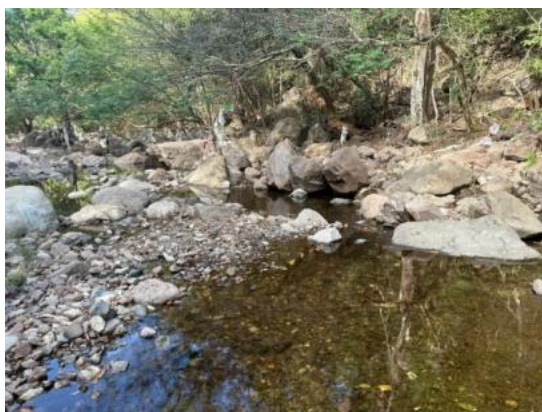


Ilustración 19: Efluente de la localidad del Jicaral, León



Ilustración 20: Zona de minería artesanal



Ilustración 21: Locación geográfica del Jicaral, León

A-11 Medición de PH de aguas de manantial



Ilustración 22: Medición de PH de aguas de manantial en el Jicaral, León

A-12

Tabla 7: Especificaciones técnicas de los equipos utilizados en el estudio

N.º	Nombre del equipo	Modelo	Fabricante	Precisión (±)	Observaciones
1	Horno tipo mufla	CAPA M30/14	CAPA Instruments	±5 °C (estimada)	Temperatura usada: 600 °C
2	Balanza digital de precisión	LA620S	Sartorius	±0.01 g	Capacidad máx.: 620 g
3	Floculador o equipo de prueba de jarras	Genérico	Phipps & Bird	±2 rpm	Velocidad: 162 rpm
4	Espectrofotómetro UV-Vis	DR 6000	HACH	±0.001 mg/L (estimada)	Medición de Hg: 0.003 mg/L
5	Estufa de secado	Genérico	-	±2 °C (estimada)	Secado de vainas vegetales

Fuente: Elaboración propia