



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESPUMAS DE CARBÓN A PARTIR DE RAQUIS DE BANANO PARA LA
RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS

CAJAMARCA GONZALEZ PAOLA PRISCILA
INGENIERA QUÍMICA

ROMERO AGUILAR KAREN YANETH
INGENIERA QUÍMICA

MACHALA
2022



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESPUMAS DE CARBÓN A PARTIR DE RAQUIS DE BANANO
PARA LA RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES
ACUOSAS

CAJAMARCA GONZALEZ PAOLA PRISCILA
INGENIERA QUÍMICA

ROMERO AGUILAR KAREN YANETH
INGENIERA QUÍMICA

MACHALA
2022



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

TRABAJO TITULACIÓN
TRABAJO EXPERIMENTAL

ESPUMAS DE CARBÓN A PARTIR DE RAQUIS DE BANANO PARA LA
RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS

CAJAMARCA GONZALEZ PAOLA PRISCILA
INGENIERA QUÍMICA

ROMERO AGUILAR KAREN YANETH
INGENIERA QUÍMICA

LAPO CALDERON BYRON

MACHALA, 22 DE SEPTIEMBRE DE 2022

MACHALA
2022

ESPUMAS DE CARBÓN A PARTIR DE RAQUIS DE BANANO PARA LA RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Técnica de Machala Trabajo del estudiante	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	Submitted to UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología Trabajo del estudiante	<1%
4	wgbis.ces.iisc.ernet.in Fuente de Internet	<1%
5	eprints.ucm.es Fuente de Internet	<1%
6	ressources.ciheam.org Fuente de Internet	<1%
7	J. A. Vázquez-Ovando, J. G. Rosado-Rubio, L. A. Chel-Guerrero, D. A. Betancur-Ancona. " Procesamiento en seco de harina de chía (L.): caracterización química de fibra y proteína Dry processing of chía (L.) flour: chemical	<1%

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Las que suscriben, CAJAMARCA GONZALEZ PAOLA PRISCILA y ROMERO AGUILAR KAREN YANETH, en calidad de autoras del siguiente trabajo escrito titulado ESPUMAS DE CARBÓN A PARTIR DE RAQUIS DE BANANO PARA LA RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Las autoras declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Las autoras como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 22 de septiembre de 2022



CAJAMARCA GONZALEZ PAOLA PRISCILA
0707031704



ROMERO AGUILAR KAREN YANETH
0705958858

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación dedico a Dios por darme la vida y llenarme de fuerza en todo el transcurso de mi formación académica. A mi querida madre Myrian Gonzalez que es la persona a quien más admiro en esta vida por todo el amor incondicional apoyo moral y estar siempre presente en todo momento, a mi querido padre Fúlton Cajamarca por su apoyo moral y sus consejos y a todos mis hermanos los cuales siempre estuvieron apoyándome para no rendirme y lograr mi objetivo.

Paola Priscila Cajamarca Gonzalez

Dedico este trabajo de titulación con mucho cariño a mi madre Elvira Aguilar por ser mi amiga incondicional y pilar fundamental, a mi padre Armando Romero por brindarme su paciencia y amor, a mis hermanos Yerson y Diego que han sido esenciales en mi crecimiento personal y profesional, a mis sobrinos Dylan y María Emilia por ser el motivo de mis alegrías y la luz de mis ojos, a mis ángeles en el cielo: tío Orlando; abuelita Raquel y, primo Jordan, a quienes extraño con toda mi alma y sé que se sentirían muy orgullosos de mí, y por ultimo y no menos importante a mi mascota ney que me ha acompañado todos estos años y su preciosa energía me ha ayudado a salir de los momentos más oscuros.

Karen Yaneth Romero Aguilar

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios por brindarnos vida, salud, y fortaleza para poder superar todas las adversidades y cumplir con nuestros objetivos, a todas las personas que han contribuido para que nuestro trabajo de titulación se lleve a cabo.

A nuestro tutor Ing. Byron Lapo y Cotutora Ing. Tanya Carchi por la guía y apoyo proporcionado durante todo este proceso de elaboración de tesis.

A los docentes que contribuyeron todos estos años en nuestra formación académica, y fueron parte esencial de nuestro crecimiento profesional.

Finalmente, a nuestras familias que siempre nos han brindado amor, paciencia y apoyo incondicional, sin ellos nada de esto sería posible.

Eternamente agradecidas,

Paola y Karen

RESUMEN

El itrio (Y^{+3}) es un metal de transición que actualmente se ha convertido en un elemento valioso para el desarrollo de la microelectrónica y la cibernética. Sin embargo, el proceso de extracción y refinado de este elemento de tierras raras resulta perjudicial, pues ocasiona problemas de salud en los seres humanos y contaminación al medio ambiente. La adsorción surge como una alternativa práctica para la recuperación de este elemento, consecuentemente, el objetivo del presente trabajo experimental fue desarrollar espumas de carbón a partir del raquis de banano para la recuperación de Y^{+3} en soluciones acuosas.

Se desarrollaron 4 espumas de carbón en las que se varió la cantidad de raquis y el tamaño de partícula de raquis empleado: EC a partir de 5 g de PRF (M1C1); EC desarrollado a partir de 10 g de PRF (M1C2); EC a partir de 5 g de PRG (M2C1) y; EC elaborado a partir de 10 de PRG (M2C2). Las cuales fueron sometidas a un proceso de pirólisis con una atmósfera inerte de gas nitrógeno a 800 °C y un tiempo de residencia de 1 hora.

Para la caracterización del material bioadsorbente se realizó un estudio de potencial de carga cero (pH_{pzc}). Por otra parte, para evaluar la aplicabilidad del material se llevó a cabo: estudios de pH, estudios de equilibrio empleando los modelos de las isothermas de Langmuir y Freundlich y estudio de cinética con los modelamientos matemáticos de Pseudo Primer Orden (PPO) y Pseudo Segundo Orden (PSO).

El estudio de potencial de carga cero (pH_{pzc}) se hizo a partir de una solución de NaCl 0.1 M que se ajustó a diferentes valores de pHs (2,4,6,8,10,12), dosificación de 1 g.L⁻¹, a temperatura de 25 °C y, agitación mecánica a 70 rpm durante un lapso de 24 horas. Se obtuvieron como resultado para las 4 espumas de carbón los siguientes valores de pH_{pzc} : 6,7 M1C1, 7 M1C2 y, 8,1 para los materiales M2C1 y M2C2.

Para el estudio de pH, la solución fue ajustada a valores de 4 y 5, bajo las siguientes condiciones: solución de itrio a 50 mg.L⁻¹, dosificación del material bioadsorbente 1 g.L⁻¹, temperatura 25 °C, tiempo de contacto 24 horas con agitación mecánica de 70 rpm. El material M1C2 fue el que presentó una mejor capacidad de remoción de itrio a un pH de 5 con un porcentaje de adsorción de 45,175 mg.g⁻¹

La capacidad de adsorción se evaluó con las isothermas de Langmuir y Freundlich, se empleó el material adsorbente M1C2 que fue el que presentó mejor capacidad de

remoción del analito en el estudio de pH, el análisis se llevó a cabo bajo las mismas condiciones de dosificación, temperatura, tiempo de contacto que en el estudio de pH, pero a diferentes concentraciones de soluciones de itrio: 10, 50, 75, 100, 200, 300, 500 y 750 mg.L⁻¹. Donde, la Isoterma de Freundlich fue el modelo matemático que mejor se ajustó a los resultados experimentales con un coeficiente de correlación de 0,909.

Para el estudio cinético se utilizó una solución de itrio a 50 mg.L⁻¹ de concentración, la dosis de M1C2 fue de 1 g.L⁻¹, temperatura ambiente 25 °C y, tiempo de contacto de 5 horas con agitación magnética a 90 rpm. Obteniéndose como mejor ajuste al modelamiento de Pseudo segundo orden con un $R^2 = 0,999$ para la espuma de carbón M1C2.

La presente investigación ejecutada evidencia que las espumas de carbón desarrolladas a partir del raquis de banano presentan una destacada capacidad de adsorción para Y⁺³ en soluciones acuosas.

PALABRAS CLAVES: pirólisis, espuma de carbón, adsorción, itrio.

ABSTRACT

Yttrium (Y^{+3}) is a transition metal that has become a valuable element for the development of microelectronics and cybernetics. However, the extraction and refining process of this rare earth is detrimental, causing health problems in humans and environmental pollution. Adsorption emerges as a practical alternative for the recovery of this element, consequently, the objective of the present experimental work was to develop carbon foams from banana rachis for the recovery of Y^{+3} in aqueous solutions.

Four carbon foams were developed in which the amount of rachis and the particle size of rachis used varied: EC from 5 g of PRF (M1C1); EC developed from 10 g of PRF (M1C2); EC from 5 g of PRG (M2C1) and; EC elaborated from 10 g of PRG (M2C2). These were subjected to a pyrolysis process with an inert atmosphere using nitrogen gas at 800 °C and a residence time of 1 hour.

For the characterization of the bioadsorbent material, a zero charge potential study (pHpzc) was performed. On the other hand, to evaluate the applicability of the material, pH studies, equilibrium studies using Langmuir and Freundlich isotherm models and kinetic studies with Pseudo First Order (PPO) and Pseudo Second Order (PSO) mathematical modeling were carried out.

The zero-charge potential (pHpzc) study was performed using a 0.1 M NaCl solution adjusted to different pH values (2,4,6,8,10,12), dosage of 1 g.L⁻¹, at a temperature of 25 °C and, mechanical agitation at 70 rpm for a period of 24 h. The results were obtained for the 4 different pH values (2,4,6,8,10,12). The following pHpzc values were obtained for the 4 carbon foams: 6,7 M1C1, 7 M1C2 and 8,1 for materials M2C1 and M2C2.

For the pH study, the solution was adjusted to values of 4 and 5, under the following conditions: yttrium solution at 50 mg.L⁻¹, dosage of the bioadsorbent material 1 g.L⁻¹, temperature 25 °C, contact time 24 hours with mechanical agitation of 70 rpm. The material M1C2 showed the best yttrium removal capacity at pH 5 with an adsorption percentage of 45.175 mg.g⁻¹.

The adsorption capacity was evaluated with the Langmuir and Freundlich isotherms, the adsorbent material M1C2 was used, which was the one that presented the best removal capacity of the analyte in the pH study, the analysis was carried out under the same conditions of dosage, temperature, contact time as in the pH study, but at different

concentrations of yttrium solutions: 10, 50, 75, 100, 100, 200, 300, 500 and 750 mg.L⁻¹. The Freundlich Isotherm was the mathematical model that best fitted the experimental results with a correlation coefficient of 0,909.

For the kinetic study a solution of yttrium at 50 mg.L⁻¹ concentration was used, the dose of M1C2 was 1 g.L⁻¹, room temperature 25 °C and contact time of 5 hours with magnetic stirring at 90 rpm. The best fit to the pseudo-second order modeling was obtained with an R² = 0,999 for the M1C2 carbon foam.

The present investigation shows that the carbon foams developed from banana rachis present an outstanding adsorption capacity for Y⁺³ in aqueous solutions.

KEY WORDS: pyrolysis, carbon foam, adsorption, yttrium.

CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO.....	II
RESUMEN	III
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE DIAGRAMAS	XI
ÍNDICE DE ANEXOS	XII
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	16
Objetivo General.....	16
Objetivos específicos	16
CAPÍTULO I	17
1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 Tierras raras	17
1.1.1 Generalidades.....	17
1.1.2 Problemas ambientales	17
1.1.3 Producción.....	18
1.1.4 Comercialización de tierras raras.....	18
1.1.5 Itrio.....	18
1.2 Residuos lignocelulósicos.....	20
1.2.1 Composición química.....	20
1.2.2 Raquis de banano	23
1.3 Pirólisis	24
1.3.1 Tipos de pirólisis.....	25
1.3.2 Variables del proceso de pirólisis	27
1.4 Espuma de Carbón	29
1.4.1 Aplicaciones	30
1.5 Caracterización del material adsorbente.....	30
1.5.1 Potencial de carga cero (pHpzc)	30
1.6 Evaluación del material adsorbente	31
1.6.1 Adsorción.....	31
1.6.2 Bioadsorción	31
1.6.3 Estudio de pH.....	32
1.6.4 Estudio de equilibrio	33

1.6.5	Cinética de adsorción	34
CAPÍTULO II		36
2.	METODOLOGÍA	36
2.1	Tipo de investigación	36
2.2	Ubicación de la Investigación.....	36
2.3	Materiales, Reactivos y Equipos.....	36
2.3.1	Materiales	36
2.3.2	Reactivos	37
2.3.3	Equipos.....	37
2.4	Desarrollo experimental	38
2.4.1	Tratamiento preliminar de la muestra	38
2.4.2	Desarrollo de precursores de espuma de raquis.....	39
2.4.3	Obtención de las espumas de carbón por pirólisis	40
2.5	Caracterización del material	41
2.5.1	Potencial de carga cero (pH_{pzc}).....	41
2.6	Estudios de adsorción.....	42
2.6.1	Preparación de la solución a partir de Óxido de itrio (Y_2O_3).....	42
2.6.2	Estudio de pH.....	43
2.6.3	Estudio de equilibrio	44
2.6.4	Estudio cinético.....	44
CAPÍTULO III.....		45
3.	RESULTADOS.....	45
3.1	Caracterización del material adsorbente.....	45
3.1.1	Potencial de carga cero (pH_{pzc}).....	45
3.2	Estudios de adsorción.....	46
3.2.1	Estudio de pH.....	46
3.2.2	Estudio de Isotermas	49
3.2.3	Estudio cinético.....	52
CAPÍTULO IV.....		56
4.	CONCLUSIONES	56
CAPÍTULO V		57
5.	RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA.....		58
ANEXOS		65

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Estructura de la celulosa.....	21
Gráfico 2. Estructura de la hemicelulosa	22
Gráfico 3. Estructura de la lignina.....	22
Gráfico 4. Partes de la planta de banano.....	23
Gráfico 5. Esquema de los estudios de adsorción	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Potencial de carga cero (pzc) de los bioadsorbentes	45
Figura 2. Efecto del pH en la capacidad de adsorción de las espumas de carbón	47
Figura 3. Isoterma de Langmuir de M1C2	49
Figura 4. Isoterma de Freundlich de M1C2.....	50
Figura 5. Modelo cinético PPO de M1C2	53
Figura 6. Modelo cinético PSO de M1C2	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físico - químicas del itrio	19
Tabla 2. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en biomasa lignocelulósica	20
Tabla 3. Condiciones del proceso de pirólisis.....	26
Tabla 4. Propiedades del biocarbón según el proceso de pirólisis	26
Tabla 5. Capacidad de adsorción de distintos materiales adsorbentes	32
Tabla 6. Tipos de espumas de raquis.....	40
Tabla 7. Resultados del estudio de pH de la solución ajustada a 4	46
Tabla 8. Resultados del estudio de pH de la solución ajustada a 5	47
Tabla 9. Resultados de isotermas para Y^{+3}	51
Tabla 10. Cuadro comparativo de diferentes materiales biadsorbentes utilizados para la adsorción de metales	52
Tabla 11. Resultados del estudio de cinética para Y^{+3}	55

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Proceso de preparación de la muestra	38
Diagrama 2. Proceso de obtención de las espumas de raquis.....	39
Diagrama 3. Proceso de pirólisis y tratamiento final	41

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Troceado y lavado del raquis de banano	65
Anexo 2. Raquis de banano secado en estufa de aire forzado	65
Anexo 3. Molienda del raquis de banano seco	66
Anexo 4. Materiales para la elaboración de las espumas de raquis	66
Anexo 5. Espumas de raquis de banano	67
Anexo 6. Espumas de carbón.....	67
Anexo 7. Muestras a pH 4, filtradas para mediciones en el ICP	68
Anexo 8. Muestras a pH 5, filtradas para mediciones en el ICP	68

LISTADO DE ABREVIATURAS

ETR: Elementos de tierras raras

TRP: Tierras raras pesadas

TRL: Tierras raras ligeras

REO: Óxidos de tierras raras

CMC: Carboximetilcelulosa

PEG: Polietilenglicol

PRF: Polvo de raquis fino

PRG: Polvo de raquis grueso

ER: Espumas de raquis

EC: Espumas de carbón

NM: Nanómetro

UM: Micrómetro

PPM: Partes por millón

ICP: Espectrómetro de emisión atómica acoplado inductivamente.

PZC: *Potential zero charge* (Potencial de carga cero)

PPO: Pseudo de Primer Orden

PSO: Pseudo de Segundo Orden

INTRODUCCIÓN

Las tierras raras son un conjunto de 17 elementos químicos, los cuales han marcado una revolución científica en la microelectrónica y la cibernética¹. Los elementos de tierras raras (ETR) tienen varias aplicaciones en la industria; el trio, europio y lantano se emplean en fósforos para lámparas fluorescentes de bajo consumo, aleaciones refractarias y equipos electrónicos.

La extracción y el refinado de los ETR resultan de una manera compleja, costosa y agresiva para el medio ambiente, debido a que en la naturaleza por lo general se encuentran unidos a elementos radioactivos y su separación genera residuos y acumulaciones en vertederos². Sin embargo, como una solución a esta problemática ambiental, actualmente se ha optado por emplear el reciclaje como vía de recuperación de ETR, el mismo que se está convirtiendo en un valioso suministrador de materias primas, además permite proteger el medio ambiente, ahorrar recursos minerales y energía³.

Con el transcurso del tiempo, se han desarrollado diversos métodos físico-químicos para la recuperación de ETR. Entre estos métodos se encuentran: la flotación, coagulación, floculación, extracción con disolventes, intercambio iónico, coprecipitación y la adsorción. La mayoría de estas tecnologías alcanzan altas capacidades de recuperación, pero con elevados costos y prolongados tiempos de procesamiento⁴.

Actualmente uno de los métodos más aplicados para la separación y/o recuperación de metales en soluciones acuosas es la bioadsorción; debido a que es una técnica sostenible, económica y eficaz. En este contexto, los materiales lignocelulósicos han sido empleados como bioadsorbentes, dado que presentan mayor resistencia mecánica, estabilidad química y capacidad de remoción de elementos contaminantes⁵.

La producción y agro exportación bananera en Ecuador ha ido creciendo hasta convertirse en uno de los principales generadores de cultivo de banano a nivel mundial, en el año 2020 la superficie cosechada de banano fue de 160,6 mil hectáreas⁶. Sin embargo, a lo largo de toda la línea de producción de esta fruta se generan diversos residuos, tales como: el tallo, pseudo tallo y raquis. Los mismos que al descomponerse generan contaminación del suelo, fuentes hídricas subterráneas, proliferación de bacterias y enfermedades. En contraste a lo mencionado, varios grupos de investigación han optado por tratar física y

químicamente estos residuos para emplearlos como nuevos métodos para la adsorción de contaminantes⁷.

Los materiales bioadsorbentes han demostrado tener alta capacidad de adsorción, entre ellos se encuentra el raquis de banano; el cual es un material lignocelulósico con amplia disponibilidad en la provincia de El Oro, puesto que es un subproducto de la actividad bananera de la zona⁷.

La pirólisis es un proceso termoquímico que se efectúa a altas temperaturas para la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Actualmente, la pirólisis ha llamado la atención por su capacidad para generar productos sólidos, líquidos y gaseosos solo con la modificación de los parámetros de operación como la temperatura o velocidad de calentamiento. Además, proporciona la posibilidad de transformar a los diferentes tipos de residuos orgánicos (madera, desechos agrícolas, residuos de la silvicultura, entre otros) en productos químicos de alto valor⁸.

La espuma de carbón es un material adsorbente que se obtiene del proceso térmico denominado pirólisis, el mismo que se caracteriza por su empleo en la remoción de contaminantes. Entre sus ventajas más importantes se encuentra la alta conductividad térmica y bajo costo de producción. Por lo general, las espumas de carbón tienen diversas aplicaciones térmicas, eléctricas y mecánicas, sus propiedades varían de acuerdo a la metodología empleada para su obtención⁹.

En el presente trabajo experimental, se tiene como finalidad obtener espumas de carbón mediante pirólisis, aprovechando las propiedades adsorbentes de los residuos lignocelulósicos (raquis de banano) para la recuperación del itrio en soluciones acuosas. El cual se va a realizar mediante un proceso de adsorción, que comprende un estudio de pH, estudio de isotermas y un estudio cinético. Adicional a ello, se realizará la caracterización del material, mediante el potencial de carga cero (pHpzc).

OBJETIVOS

Objetivo General

Recuperar itrio de soluciones acuosas mediante el uso de espumas de carbón obtenidas a partir del raquis de banano.

Objetivos específicos

- Elaborar espumas de carbón a partir del raquis de banano mediante un proceso térmico controlado de pirólisis.
- Caracterizar el material adsorbente mediante un estudio de potencial de carga cero.
- Evaluar la aplicabilidad del material mediante estudios de pH, isothermas de adsorción y cinético.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Tierras raras

1.1.1 Generalidades

Consisten en diecisiete elementos químicos, cuyos números atómicos son del 57 al 71, incluyendo el itrio y en algunos casos el escandio. Este grupo se encuentra dividido en dos grandes categorías, tierras raras pesadas (TRP) y tierras raras ligeras (TRL) Esta división se da por las masas atómicas de los mismos, excepto el itrio que es ligero, pero debido a sus propiedades pertenece al grupo de TRP. Estados Unidos fue el primer país en producir estos elementos, posteriormente en el año de 1987, China comenzó su producción consiguiendo así convertirse en el máximo productor hasta la actualidad¹⁰.

Todos los elementos que conforman las tierras raras se los encuentra en la corteza terrestre como un fragmento de un mineral, pero no en forma nativa. Estos en la actualidad son sumamente importantes en lo que concierne al mundo tecnológico debido a sus propiedades fosforescentes, magnéticas, entre otras¹¹.

1.1.2 Problemas ambientales

Los procesos de extracción de ETR, específicamente la etapa de explotación, genera graves daños ambientales, esto debido a los desechos de materiales radiactivos, los cuales provocan la contaminación de las aguas subterráneas y el deterioro de los suelos aledaños, imposibilitándolo para su producción agrícola. Además, se originan otros contaminantes como polvo, metales pesados y agua residual que contiene sulfato de amonio¹².

La fase que se da en la explotación minería contribuye de forma significativa un 66% al smog en el aire y 78% a las emisiones de partículas, esto se debe al impacto por el uso de maquinarias con motor a diésel y a la técnica de minería a cielo abierto¹³.

Para la etapa de extracción con disolventes se utiliza una variedad de productos químicos/ácidos lo cual representa el 39% del calentamiento global, 35% de potencial de eutrofización y por último un 39% de toxicidad humana (no cancerígena)¹³.

La industria que mayor impacto ambiental genera es la que elabora equipos eléctricos y electrónicos, estos aparatos al terminar con su ciclo de vida útil pasan a vertederos o a ser incinerados. Esta manufactura implica el uso de muchas sustancias químicas peligrosas, por lo cual se hayan concentraciones de cadmio, cobre, plomo, zinc y níquel en los desechos electrónicos tales que generan un riesgo al ecosistema como la salud humana al ser liberados al ambiente¹.

1.1.3 Producción

La producción mundial anual de ETR se suele expresar en toneladas de óxidos de tierras raras (REO). Actualmente se estima que la producción de REO es de alrededor 130,000 a 140,000 toneladas anuales, y por lo general es muy complicado obtener unas cifras más exactas. China abarca una mayor participación con un alrededor del 95% de producción total. No obstante, estos rendimientos totales no nos dan información sobre la disponibilidad individual de ETR. Al mismo tiempo se debe tener en cuenta que estos elementos no se encuentran en cantidades iguales en los minerales y esto se debe a la poca abundancia en la naturaleza. Desde una perspectiva más general de acuerdo va aumentando su número atómico los elementos de las tierras raras se tornan más escasos¹⁴.

1.1.4 Comercialización de tierras raras

Debido a la existencia de ETR individuales es razón de inquietud sobre las aplicaciones de alta tecnología que necesitan el uso de ETR puros, ya sea en industrias tradicionales, nuclear, agricultura, automotriz y metalurgia como por ejemplo en la elaboración de (imanes permanentes y lámparas fluorescentes), y principalmente se utiliza en catálisis, aleaciones y producción de fósforos, la disponibilidad de ETR individuales es un problema. La cantidad de procesamiento y separación produce al menos la cantidad específica de ETR requerida para estas aplicaciones¹⁴.

China es el principal productor de óxidos de tierras raras, para el año de 2018 alcanzo una importación de 41,400 toneladas, en lo cual sus principales importaciones fueron de minerales y concentrados químicos¹⁵.

1.1.5 Itrio

Elemento que tiene como número atómico 39 y su símbolo es “Y”, fue descubierto en el año de 1794 por el químico sueco Gadolin y posee fácil oxidabilidad. Este elemento se lo

haya en abundancia en la corteza terrestre. En la tabla 1 se presentan las propiedades físico - química del itrio¹.

Tabla 1. Propiedades físico - químicas del itrio

Símbolo	Y
Número atómico	39
Valencia	3+
Estado de oxidación	+3
Densidad(g.ml ⁻¹)	4.47
Masa atómica(g/mol)	88,9 g.mol ⁻¹
Fuente: Ron Cusme ¹ .	

1.1.5.1 El itrio como elemento contaminante

La contaminación del itrio en la naturaleza se debe a que este elemento se lo utiliza como óxido de itrio Y_2O_3 , ya sea, en síntesis, materiales aditivos y blindaje para altas temperaturas /infrarrojo. Esto se debe a su uso amplio en la manufactura causando así el riesgo de la liberación intencionada e involuntaria al medio ambiente a través de la eliminación de sus productos lo cual puede causar daño a la salud humana y ecosistema. Sin embargo, el conocimiento actual sobre los impactos ambientales que genera el itrio es bajo, especialmente para el ecosistema acuático¹⁶.

Existen varios informes sobre los efectos adversos en la salud humana debido a la exposición de ETR, entre ellos está el itrio el cual se lo haya en los hogares en televisores a color y lámparas ahorradoras, entre otras. En lugares de trabajo puede ser peligroso por la inhalación de gases las cuales estas a altas concentraciones pueden ocasionar cáncer en los seres humanos esto se debe al estar expuesto al elemento durante un tiempo extenso por lo que puede dañar los pulmones y el hígado¹⁶.

1.1.5.2 Aplicación Industrial

Es un metal muy utilizado para mejorar la resistencia y cristalización de otros metales en aleaciones metálicas en las cuales lleve cromo, niobio, hierro, entre otros. Al encontrarse en forma de óxido tiene una amplia utilización como fosforo fluorescente y esto se da al ser dopado con europio. Los granates de itrio-aluminio son empleados en gemas de joyerías y láseres, y los itrio- hierro son utilizados en transmisores y transductores¹.

1.2 Residuos lignocelulósicos

Los residuos lignocelulósicos son materia natural derivado de las actividades agrícolas. Estos residuos se generan de manera exorbitante cada año, lo cual origina un gran problema, dado a que su almacenamiento es inadecuado y, es posible que el material lignocelulósico en su mayoría sea quemado para su eliminación. Este método puede ser muy perjudicial para el medio ambiente, debido a que se generan gases de efecto invernadero como amoníaco y metano¹⁷.

El material lignocelulósico es considerado como el biopolímero más abundante en la tierra, alrededor del 50% de la biomasa mundial es considerada como lignocelulósica y su producción anual total está estimada en 10-50 mil millones de toneladas aproximadamente¹⁸.

Actualmente existe un considerable aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica, esto se debe principalmente a las características físico-químicas, gran disponibilidad y naturaleza renovable de este material. Dichas características han permitido que esta biomasa adquiera un valor especial en diversos productos de interés industrial como biocombustibles, alimentos mejorados para animales, compuestos poliméricos, producción de enzimas, papel, etc¹⁹.

1.2.1 Composición química

El análisis de la composición química de los residuos lignocelulósicos ha evidenciado que este se encuentra constituido principalmente por polímeros orgánicos como celulosa, hemicelulosa y lignina²⁰. En la tabla 2, se observa la composición de varios tipos de biomasa lignocelulósica.

Tabla 2. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en biomasa lignocelulósica

Materia prima	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Cultivos energéticos	21 – 54	5 - 30	5 – 10
Hierbas	25 – 40	25 – 50	10 – 30
Maderas blandas	45 – 50	25 – 35	25 – 35
Maderas duras	45 – 55	24 – 40	18 – 25

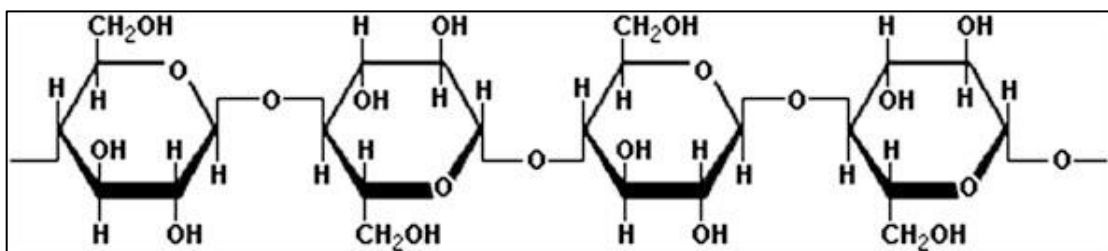
Fuente: Yusuf et al. ²¹

1.2.1.1 Celulosa

La celulosa es un compuesto orgánico abundante dado a su naturaleza renovable, se localiza en la pared celular de la planta y cumple con la función de brindarle firmeza y estabilidad a la planta¹⁹. Se caracteriza por ser un polímero, es decir, está constituido por polisacáridos unidos por una cadena lineal de subunidades de D-glucosa ligados mediante un enlace glucósido β -(1-4)²². En el gráfico 1, se observa la estructura química de la celulosa.

Por su abundancia y excelentes propiedades mecánicas, la celulosa y sus derivados han sido estudio de diversas aplicaciones industriales, en especial para polímeros de embalaje, biomedicina, adhesivos, electrónica, entre otros²³.

Gráfico 1. Estructura de la celulosa

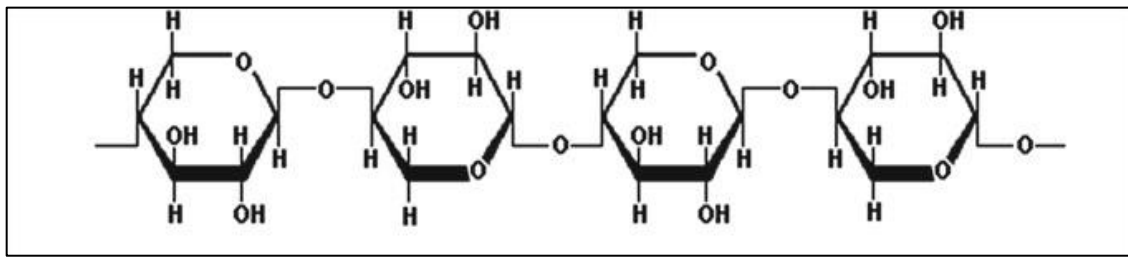


Fuente: ²⁴

1.2.1.2 Hemicelulosa

Es el segundo polímero orgánico más abundante después de la celulosa, comprende aproximadamente entre un 20 y 50% de la biomasa lignocelulósica. En comparación con la celulosa, su peso molecular es bajo y no es químicamente homogéneo. La hemicelulosa se compone principalmente de pentosas, hexosas y varios ácidos de azúcar, estos compuestos se unen formando ramificaciones con cadenas laterales cortas que se hidrolizan fácilmente²⁴. En el gráfico 2, se observa la estructura química de la hemicelulosa. Una de las funciones más importantes que desempeña la hemicelulosa es la de servir como enlace entre las fibras de celulosa y la lignina, brindando rigidez a la pared celular²¹.

Gráfico 2. Estructura de la hemicelulosa

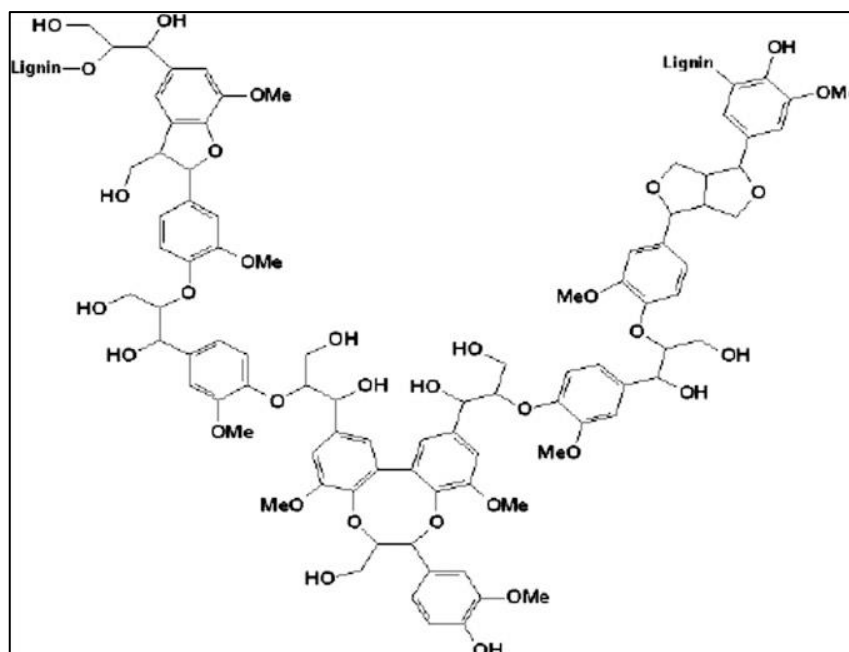


Fuente: ²⁴

1.2.1.3 Lignina

La lignina es un polímero vegetal abundante, representa de entre 15 a 35% de la biomasa lignocelulósica. Este compuesto posee una estructura compleja de fenilpropano, grupos metoxi y una sustancia polifenólica, además, se caracteriza por ser un biopolímero fenólico de alto peso molecular, baja solubilidad en solventes.²⁵ La lignina es la encargada de proporcionar soporte estructural, impermeabilidad y resistencia a la pared celular de la planta, previniendo de este modo la degradación microbiana de la misma²⁶. En el gráfico 3, se observa la estructura química de la lignina.

Gráfico 3. Estructura de la lignina



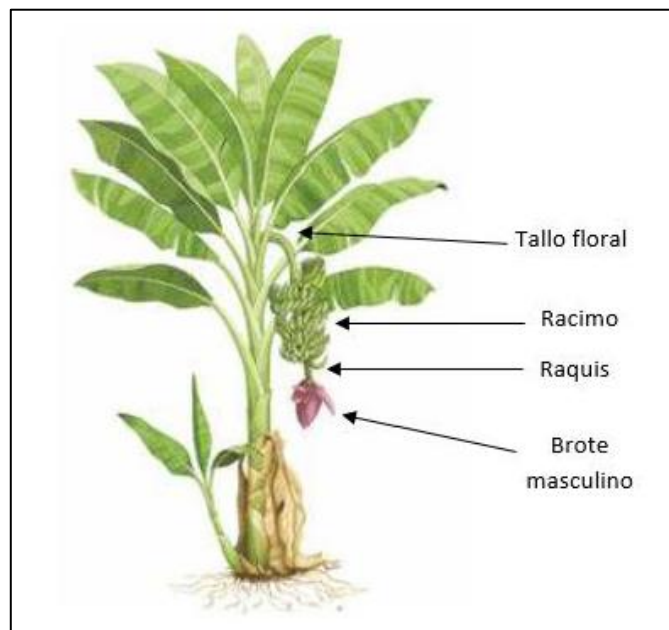
Fuente: ²⁴

1.2.2 Raquis de banano

Ecuador es un país eminentemente agrícola, sus condiciones climáticas favorecen a la obtención de un producto al nivel de las exigencias del mercado internacional, una de las actividades agrícolas con mayor relevancia es el cultivo de banano. Nuestro país tiene aproximadamente 162,236 hectáreas destinadas al cultivo de banano y cuenta con 4,473 de la fruta. El Oro es una de las provincias con mayor índice de producción de banano, pues aquí se encuentran aproximadamente el 42% de productores de esta fruta en el país²⁷.

La cosecha de banano genera un estimado del 95% de residuos orgánicos, ya que una vez que se produce el racimo, la planta es cortada quedando como desecho el raquis, el pseudotallo y las cáscaras de la fruta que no son aprovechadas por el cultivado⁶. El raquis es uno de los residuos más importantes generados durante la cosecha de banano, pues su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo convierten en un residuo de gran interés para la generación de productos con valor agregado²⁸.

Gráfico 4. Partes de la planta de banano



Fuente: ²⁹

1.2.2.1 Aplicación como material adsorbente

Los residuos de banano, en particular la cáscara y el raquis son considerados como un excelente material adsorbente para la eliminación de iones metálicos, tintes, pesticidas y algunos actínidos. Además, en la actualidad se han realizado diversas investigaciones en las cuales denotan que los residuos de banano representan una fuente efectiva para la adsorción de elementos de tierras raras a partir de soluciones acuosas³⁰

1.3 Pirólisis

La pirólisis es un proceso irreversible que consiste en la degradación térmica de la materia orgánica a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno. Las cadenas complejas de materiales orgánicos tratados se transforman en otros más pequeños y menos complejos al controlar el flujo de calor y la presión de operación. Los productos de la pirólisis generalmente se clasifican en tres fases; productos gaseosos (monóxido de carbono, hidrógeno, metano y dióxido de carbono), productos líquidos (bioaceite, alquitranes, compuestos alifáticos y aromáticos, fenoles, aldehídos), y también genera residuos sólidos ricos en carbono (carbón vegetal, *biochar*)³¹. Las características físico-químicas de los productos de pirólisis dependen principalmente de la materia prima y de las condiciones de pirólisis: temperatura, presión y tiempo de residencia³².

Cuando la materia prima para la pirólisis se deriva de la biomasa, el producto obtenido se denomina biocarbón o *biochar*. Entre el 10 y 20 % en peso de la biomasa se convierte en carbón vegetal, el cual es una mezcla de residuos carbonosos del contenido orgánico de la biomasa y cenizas procedentes de los minerales de la biomasa³². El rendimiento del *biochar* está determinado principalmente por el área superficial y la porosidad, que son decisivos en la cantidad de los sitios activos disponibles en el biocarbón y, por consiguiente, mejoran la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de retención de agua y la capacidad de adsorción. Dentro de los poros que se pueden formar en el *biochar*, se citan a los macroporos, mesoporos y microporos. En términos generales, los macroporos (>50 nm) conducen a la difusión de sustancias; los mesoporos (2–50 nm) actúan como canales de transferencia de masa y; los microporos (<2 nm) proveen un espacio de captura. Los parámetros de la pirólisis (temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia) pueden ser modificados, para de este modo producir biocarbón de área superficial y porosidad acorde a las necesidades requeridas³³.

1.3.1 Tipos de pirólisis

1.3.1.1 Pirólisis rápida

Es un proceso continuo, cuya finalidad es evitar que los productos de pirólisis se descompongan en compuestos no condensables. El requisito principal de la pirólisis rápida son las altas tasas de transferencia de calor, la alimentación se calienta a temperaturas mayores a 500 °C durante tiempos de residencia cortos (0,5-10 s, normalmente menos de 2 segundos). Los productos deseados se pueden obtener ajustando los parámetros del proceso a niveles óptimos³⁴. Este tipo de pirólisis generalmente es utilizado para la producción de bioaceite, puesto que en un bajo tiempo de residencia se genera mayor cantidad de vapores que, al enfriarse en condiciones de temperatura ambiente producen bioaceite³⁵.

1.3.1.2 Pirólisis lenta

Este tipo de pirólisis se realiza durante largos tiempos de residencia (unas pocas horas o días), generalmente a temperaturas que no exceden los 500 °C y a una velocidad de calentamiento de 0,1 a 1 °C por segundo. Estas variables son claves dentro del proceso para la obtención de altas proporciones de biocarbón³⁶.

Los estudios de pirólisis de materiales lignocelulósicos denotan que las mayores transformaciones ocurren a temperaturas de 200 a 400 °C, acompañadas de una rápida evolución de los gases y un incremento de la temperatura del sólido. A medida que las partículas del material lignocelulósico se contraen, los productos de descomposición de los polímeros constituyentes (celulosa, hemicelulosa y lignina) reaccionan formando una serie de enlaces químicos, que ayudan a que el sólido se vuelva más rico en carbono y, por lo tanto, más rígido³⁷.

1.3.1.3 Pirólisis intermedia

Este tipo de pirólisis es aquella que se encuentra entre la pirólisis rápida y pirólisis lenta, se lleva a cabo a temperaturas de 300 a 500 °C y un tiempo de residencia de 0,5 a 20 segundos. La pirólisis intermedia tiene la capacidad de tratar materia prima con alto contenido de humedad, además de producir bioaceite separable de dos fases de alta calidad y biocarbón seco. El *biochar* producido bajo estas condiciones tiene un área

superficial alta ($100-250 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), es ideal como adsorbente, su calidad aumenta a medida que incrementa el contenido de humedad de la alimentación³⁸.

En la tabla 3, se observan las diferentes condiciones de operación para los tres tipos de pirólisis.

Tabla 3. Condiciones del proceso de pirólisis

Clasificación de los procesos de pirólisis			
Propiedad	Lenta	Intermedia	Rápida
Tasa de calentamiento ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	1,1 - 1	1 – 10	10 – 200
Tamaño de alimentación (mm)	5 - 50	1 - 5	< 1
Temperatura de reacción ($^{\circ}\text{C}$)	400 - 500	400 - 650	850 – 1250
Tiempo de residencia (s)	300 - 550	0,5 - 20	0,5 -10
Rendimiento de bioaceite (%)	20 – 50	35 – 50	60 – 75
Rendimiento de biocarbón (%)	25 – 35	25 – 40	10 – 25
Rendimiento de gas (%)	20 – 50	20 - 30	10 – 30

Fuente: Kazawadi et al.³⁸

En la tabla 4, se observa las propiedades del biocarbón según el proceso de pirólisis aplicado.

Tabla 4. Propiedades del biocarbón según el proceso de pirólisis

Propiedades del biocarbón en diferentes categorías de pirólisis			
Propiedad	Lenta	Intermedia	Rápida
Contenido de agua (%), base húmeda	2 - 42	0,7 - 4	3 - 6
Materia volátil (%), base seca	7 - 41	15 - 29	11 - 27
Carbón fijo, base seca	26 – 91	55 - 65	58 - 75
Potencial de hidrógeno (pH)	6 - 12	8 – 9,6	7 - 11
Área específica promedio ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	0,4 - 370	100 - 250	15 - 110
Volumen total de poros ($\text{cm} \cdot \text{g}^{-1}$)	0,0013 – 0.14	0,05 – 0.16	0,1 – 1

Fuente: Kazawadi et al.³⁸

1.3.2 Variables del proceso de pirólisis

1.3.2.1 Temperatura

En el proceso de pirólisis la temperatura es un parámetro predominante que incide en el área superficial y la porosidad del biochar. Cuando la pirólisis se lleva a cabo a una temperatura menor a 400 °C, el área de superficie y volumen de los poros cambian ligeramente. La baja temperatura representa una gran dificultad, pues no tiene la capacidad de proveer las condiciones para que los componentes volátiles desaparezcan por completo y, en consecuencia, genera que los poros de la materia prima se bloqueen y dificulten la formación de nuevos poros. La elevación drástica de la temperatura empieza entre 400 y 500 °C; a medida que se va incrementando la temperatura, los carbonos amorfos se convierten en carbonos cristalinos mediante la condensación, se eliminan los compuestos volátiles de la materia y, por ende, provoca la generación de más poros³³.

1.3.2.2 Velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento es un factor que influye significativamente en el rendimiento del biocarbón, pues modifica la porosidad y el área superficial. La tasa de calentamiento baja es favorable para la formación de estructuras aromáticas, también es beneficiosa para la retención de la complejidad estructural. Por el contrario, la velocidad de calentamiento alta puede generar grandes cantidades de productos líquidos y minimizar la producción de biocarbón. Las características de la pirólisis de la *madera de haya* a una temperatura de 600 - 2000 °C y una tasa de calentamiento de 5-450 °C.s⁻¹ dieron como resultado tejidos carbonizados más ordenados³⁹.

1.3.2.3 Tiempo de residencia

El tiempo de aislamiento a la temperatura de pirólisis es un parámetro importante para la eficiencia de carbonización. Las condiciones para la obtención de un biocarbón de alto rendimiento son: baja temperatura y extenso tiempo de residencia. En el proceso de pirólisis mientras mayor sea el tiempo de residencia, mayor será el tiempo de residencia de los volátiles y, por lo tanto, mayor será la cantidad biomasa después de la reacción de polimerización. El aumento en el tiempo de residencia (120 min a 360 min) conduce a una disminución en la producción total de carbón, pero, en consecuencia, aumenta el contenido de carbono fijo³⁹.

1.3.2.4 Presión

El estado en el que el parámetro de presión tiene mayor incidencia en el resultado de la transformación de la biomasa es la pirólisis al vacío. De acuerdo a estudios realizados para la pirólisis al vacío, se debe usar un rango de presión de entre 0,05 y 0,20 MPa y una temperatura de 450 a 600 °C. Cuando se trabaja en condiciones de vacío, solo usar el vacío o baja presión para eliminar el vapor generado en el proceso de pirólisis puede prevenir de manera efectiva la volatilización de compuestos inorgánicos, lo cual es sumamente positivo para la producción de un biocarbón de alta calidad³⁶.

Por otra parte, la pirólisis a alta presión precisa de condiciones de reacción mucho más estrictas, además de una elevada inversión económica. La aplicación de pirólisis a condiciones de alta temperatura y alta presión puede mejorar los rendimientos del gas de pirólisis, pero disminuye la producción de carbón. Sin embargo, simplemente aumentar el factor de presión tiene un efecto significativo en el comportamiento de la pirólisis, la producción biocarbón como de carbón fijo aumenta en estas condiciones. De modo que, aumentar la presión sería una forma favorable para mejorar la estabilidad potencial del biocarbón³⁶.

1.3.2.5 Caudal del gas portador

Para el proceso de pirólisis frecuentemente se usa nitrógeno como gas portador. La pirólisis es un proceso que se realiza en ausencia de oxígeno, por lo tanto, se emplea un gas para generar una atmósfera inerte para la descomposición de la materia. El aumento del flujo de nitrógeno en la pirólisis favorece a la descarga de la materia volátil, lo que es fundamental para la formación de poros en el biocarbón, pero si el flujo del gas es aumentado por encima del valor ideal (varios estudios recomiendan emplear una velocidad de flujo de gas de 50 a 150 ml.min⁻¹), disminuirá la temperatura del biocarbón, lo que conduciría a que la velocidad de reacción sea baja y haya una menor liberación de materia volátil, lo cual aportaría un resultado negativo en el área superficial y volumen de los poros³³.

1.4 Espuma de Carbón

Las espumas de carbón (EC) son materiales porosos que se obtienen generalmente mediante pirólisis, poseen una microestructura singular, de propiedades únicas y potencialmente aplicables en varios campos industriales, es por esta razón que hoy en día han atraído la atención mundial. Las EC se encuentran clasificadas en dos categorías: espumas de carbón grafitico y espumas de carbón no grafitico, esto tomando en consideración el precursor y el tratamiento térmico que se empleó para la preparación de las espumas. Las espumas grafiticas se elaboran a partir de la carbonización y grafitización de materiales como la brea, carbón, alquitrán de hulla, entre otros. Por otra parte, las espumas no grafiticas se pueden elaborar por pirólisis de polímeros sintéticos o de residuos agrícolas ricos en celulosa, hemicelulosa, lignina, sacarosa o taninos⁴⁰.

Las EC en apariencia son similares a una esponja, se caracterizan principalmente por poseer baja densidad ($0,2-0,8 \text{ g.cm}^{-3}$), gran área superficial y estructura celular abierta. En general, la estructura celular abierta se encuentra conectada entre sí, es por esto que hay pocos poros cerrados, usualmente más del 90% de los poros están abiertos. En un proceso de adsorción los poros abiertos de las espumas de carbono juegan un papel sumamente importante, pues mientras mayor cantidad de microporos se encuentren abiertos más rápida será la cinética de adsorción⁴¹.

Teniendo en cuenta que cada año se producen grandes cantidades de residuos agrícolas, el uso de precursores de origen lignocelulósico representa una alternativa favorable, pues la biomasa es un recurso abundante, renovable y de bajo costo en términos de materias primas. Es por esta razón y por sus propiedades físicas-químicas que en la actualidad la biomasa tiene gran acogida en la elaboración de materiales carbonosos de alta calidad⁴².

Las espumas de carbono son un tipo de material de carbono poroso con microestructuras tridimensionales interconectadas, que poseen prestaciones únicas:

Este material de carbón con estructura celular es que cuenta con macroporos, gran área superficial, baja densidad, estabilidad térmica, alta resistencia, inercia química, conductividades térmicas y eléctricas adaptables. Además, la conductividad térmica que posee la espuma de carbón puede ser mucho más elevada que la del aluminio o igual de bajas a las de cualquier otro material aislante⁴³.

1.4.1 Aplicaciones

Las espumas de carbón tienen un amplio campo de aplicaciones, como ya se conoce este material posee una estructura de celdas abiertas, las mismas en las que se puede activar un área superficial específica y de este modo aplicar la espuma de carbón como material adsorbente para la recuperación de metales pesados y otros elementos contaminantes. Además, al ser un material con alta capacidad de conducción son utilizados como soportes de catalizadores, electrodos en baterías de litio y celdas de combustible. Por otro lado, aquellas espumas no conductoras son altamente eficientes en aislamiento aeroespacial, diversos tipos de materiales refractarios, equipos de protección contra incendios y otras aplicaciones en el área médica⁴⁴.

1.5 Caracterización del material adsorbente

1.5.1 Potencial de carga cero (pHpzc)

El potencial o punto de carga cero (pzc) se define como el valor de potencial de hidrógeno (pH) en el que no hay carga de electrodos libres, es decir, la carga neta superficial del material adsorbente es nula. Por lo tanto, la cantidad de los sitios activos positivos y negativos son iguales⁴⁵. El pH desempeña un papel muy importante en la sorción de cationes, esto se debe a que el pH influye en la especiación química del metal en solución y de igual manera en la ionización de los sitios activos en el material adsorbente⁴⁶.

Conocer el pHpzc permite formular hipótesis sobre la ionización de los grupos funcionales presentes en la superficie del material adsorbente y su interacción con especies metálicas presentes en la solución; si el pH de la solución es superior a pHpzc, la superficie del sorbente se cargará negativamente y podría interactuar con especies de metales positivos, en cambio a pH inferior a pHpzc la superficie del material adsorbente se cargará positivamente y podría interactuar con especies negativas⁴⁶.

1.6 Evaluación del material adsorbente

1.6.1 Adsorción

La adsorción es un fenómeno que acumula y concentra un material o sustancia en una superficie, esta sustancia representa la fase líquida llamada adsorbato y fase sólida llamada adsorbente. En los últimos años la tecnología de adsorción se ha aplicado de manera amplia para el tratamiento de aguas residuales y esto se debe al bajo costo, la gran eficiencia y sobre todo la poca contaminación hacia el medio ambiente. Este proceso se encuentra dividido en dos tipos: adsorción física y adsorción química⁴⁷.

Los mecanismos de adsorción incluyen principalmente a la adsorción química y esta se debe a la formación de enlaces químicos y de la adsorción física la cual se encuentra relacionada con las fuerzas de Van de Waals y el intercambio iónico⁴⁷.

La adsorción química es una técnica que está basada en la fijación de los elementos nocivos sobre la superficie de un material, esta fijación debe ser captada ya sea en los poros o por reacción química.⁴⁸ Durante el proceso de la adsorción química la molécula que fue adsorbida y la red sólida forman un sistema mecánico cuántico unificado⁴⁹.

La adsorción física se da cuando un gas entra en contacto con una superficie de un sólido (adsorbente). Las sustancias que se adsorben se las denomina adsorbato lo cual es diferente al adsorbente que generalmente es un gas o vapor. Los métodos más utilizados son los volumétricos y gravimétricos⁵⁰.

1.6.2 Bioadsorción

Es una tecnología de contaminantes ambientales acuosos, tienen mucha popularidad entre los investigadores durante los últimos 20 años. La bioadsorción no es más que un proceso en la cual se requiere que los materiales sean de origen biológico, es decir naturales y que dispongan de propiedades absorbentes de metales, para así de esta manera bajar las concentraciones de iones de metales que están en ppm a ppb⁵¹.

La bioadsorción es un término el cual hace referencia a cualquier sistema que tenga que ver con interacciones que involucren a un adsorbato en los cuales puede ser una molécula, un átomo o ya sea un ion simple o complejo con un bioadsorbente que disponga de una superficie sólida. Es una técnica con una tecnología que dispone de un tratamiento muy eficaz⁵¹.

En la tabla 5, se puede observar la comparación de la capacidad de adsorción de distintos tipos de adsorbentes utilizados para recuperar diversos elementos.

Tabla 5. Capacidad de adsorción de distintos materiales adsorbentes

Absorbentes	Elemento contaminante	Capacidad de adsorción (mg.g ⁻¹)	Referencia
Cáscara de maní	Pb ²⁺	38,91	52
Carbón activado en forma de pino	Pb ²⁺	27,53	53
Polvo de cáscara de almendra (<i>Prunus amygdalus</i>)	CN ⁻	32,05	54
<i>Serratia marcescens</i> (bacilo Gram negativo)	Y ³⁺	123,65	55
Aserrín	(NH ₄ ⁺)	1,7	56
Cáscara de naranja	Cu ²⁺	72,73	57
Cáscara de naranja celulósica (CWOP)	Cu ²⁺	63	58
Carbón activado de cáscara de yuca (CAY)	Colorante azul DB-86	6.2	59
Nano maghemita (Óxido de hierro)	Y ³⁺	13,5	60
Compuestos de alginato Na	Y ³⁺	18,18	61
Compuestos de alginato Ca	Y ³⁺	99	61

Fuente: Autoría propia

1.6.3 Estudio de pH

El estudio del pH es uno de los parámetros más importante en el proceso de adsorción, en una solución acuosa puede afectar ya sea a las cargas superficiales de la superficie del bioadsorbente, eliminación de iones metálicos, el grado de ionización y concentración de los contraiones de los grupos funcionales presentes en el bioadsorbente⁵⁸.

Un pH bajo tiene una capacidad de adsorción de iones metálicos bajo, esto se debe a la presencia excesiva de iones de H^+ los cuales compiten con los iones metálicos por los sitios activos⁵⁸.

1.6.4 Estudio de equilibrio

El estudio de equilibrio es comúnmente conocido como isothermas de adsorción el cual intercepta detalles específicos con relación al comportamiento de las interacciones entre adsorbato-adsorbente, el cual da información relevante sobre la capacidad de adsorción estudiada. Hay varios modelos isotérmicos inmersos dentro de este estudio de equilibrio, pero sin embargo los más usados son Langmuir y Freundlich⁶².

1.6.4.1 Isotherma de Langmuir

La isoterma de adsorción de Langmuir es el modelo más aplicado para el proceso de adsorción, el cual se basa en la máxima adsorción que se produce cuando hay una cobertura de monocapa saturada de adsorbato en la superficie de los adsorbentes. Esta mantiene una energía de adsorción constante y no hay desplazamiento de moléculas de adsorbato en la superficie⁶³.

La ecuación no lineal de Langmuir se refleja en la ecuación 1:

$$q_e = \frac{Q_{max} * b * C_e}{1 + b * C_e} \quad (1)$$

Donde:

qe = Cantidad de ion metálico adsorbido ($mg.g^{-1}$)

Q_{max} = Capacidad máxima de cobertura de monocapa ($mg.g^{-1}$)

b = Constante de isoterma de Langmuir ($dm^3.mg^{-1}$).

Ce = Concentración del adsorbato en estado de equilibrio ($mg.L^{-1}$)

1.6.4.2 Isoterma de Freundlich

El modelo de la isoterma de Freundlich el que se utiliza para describir la isoterma del proceso de adsorción de múltiples lados y se la aplica en superficies heterogéneas⁶³.

A continuación, en la ecuación 2 se expresa el modelo no lineal de Freundlich:

$$q_e = k_f * C_e^{1/n} \quad (2)$$

Donde:

q_e = Cantidad de adsorbato contenido en el adsorbente (mg.g⁻¹)

K_f = Capacidad de adsorción (mg.g⁻¹)

C_e = Concentración del adsorbato en estado de equilibrio (mg.L⁻¹)

n = Intensidad de adsorción

1.6.5 Cinética de adsorción

La cinética de adsorción es el comportamiento en el cual las moléculas de soluto se adhieren a la superficie del adsorbente, este proceso se realiza en configuración ya sea de lote o columna. El mecanismo de cinética de adsorción es la base en la cual se determina el desarrollo de un sistema continuo y, se la utiliza para calcular la velocidad de adsorción del soluto, además, se utiliza para determinar el tiempo de residencia necesaria para completar su objetivo⁶⁴.

1.6.5.1 Modelamiento cinético Pseudo de primer orden (PPO)

Este modelo cinético es conocido como el modelo de Lagergren, en el cual describe la adsorción del soluto en el adsorbente siguiendo este un mecanismo de primer orden⁶⁵.

En la ecuación 3, se expresa el modelo cinético de primer orden:

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 * t}) \quad (3)$$

Donde:

q_t = cantidad o capacidad de soluto adsorbido (mg.g⁻¹)

q_e = cantidad o capacidad de adsorción en equilibrio (mg.g⁻¹)

k=constante de adsorción de Pseudo de primer orden ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

t= tiempo (min)

1.6.5.2 Modelamiento cinético de Pseudo de Segundo Orden (PSO)

El modelo cinético de segundo orden asume que la cantidad de adsorción en el soluto es proporcional a los sitios disponibles que se encuentran en el adsorbente. Y su velocidad de reacción depende de la cantidad de soluto que se encuentra en la superficie del adsorbente⁶⁵.

La ecuación de modelamiento cinético de PSO se refleja en la ecuación 4:

$$qt = \frac{qe^2 * k * t}{1 + k * qe * t} \quad (4)$$

Donde:

K = es la constante de velocidad de adsorción ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

qe = es la cantidad de soluto adsorbida en el equilibrio

qt = es la cantidad de soluto adsorbido ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) en el tiempo t

t = tiempo (min)

CAPÍTULO II

2 METODOLOGÍA

2.1 Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación está basado en un estudio experimental, analítico y comparativo.

2.2 Ubicación de la Investigación

Los ensayos experimentales fueron desarrollados en el Laboratorio de Investigaciones ubicado en la Facultad de Ciencias Químicas de la Salud de la Universidad Técnica de Machala. Las lecturas de concentración del analito de interés fueron realizadas en un equipo de ICP-OES en el laboratorio de suelos del “Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias” (INIAP) ubicado en la ciudad de Quevedo, provincia de los Ríos.

2.3 Materiales, Reactivos y Equipos

2.3.1 *Materiales*

- Bata de laboratorio
- Mascarilla
- Vasos de precipitación (25 ml; 50 ml; 250 ml; 600 ml; 1000 ml)
- Balones volumétricos (100 ml; 250 ml; 500 ml, 1000 ml)
- Erlenmeyer (250 ml)
- Papel filtro
- Pipetas graduadas
- Pipetas volumétricas
- Micropipetas
- Termómetro
- Espátula
- Embudos
- Varilla de agitación
- Papel aluminio
- Frascos ámbar
- Vidrio de reloj

- Gradillas
- Tubos falcon
- Pera volumétrica
- Piseta
- Cápsulas de porcelana
- Fundas ziploc
- Jeringas

2.3.2 *Reactivos*

- Agua destilada
- Polietilenglicol 4000 (PEG)
- Carboximetilcelulosa (CMC)
- Cloruro de sodio (NaCl, Pureza: 99,6%; Fisher Chemical: USA)
- Hidróxido de sodio (NaOH, Pureza: 98,8%; Fisher Chemical: USA)
- Ácido nítrico (HNO₃, Pureza: 68 a 70%; Fisher Chemical: USA)
- Óxido de itrio (Y₂O₃, Pureza: 99%; Alfa Aesar: USA)
- Solución Itrio 50ppm-2000ppm

2.3.3 *Equipos*

- Molino de cuchillas
- Tamiz vibratorio (RO-TAP)
- Agitador orbital (INFORS HT CELLTRON)
- Balanza analítica (SHIMADZU AUX 200)
- Estufa (MEMMERT VN6400 4051785)
- Agitador digital con calefacción (CIMAREC)
- pH-Metro (OHAUS STARTER 5000)
- Campana de extracción (LABCONCO)
- Mufla horizontal
- Nitrógeno gaseoso (N₂)

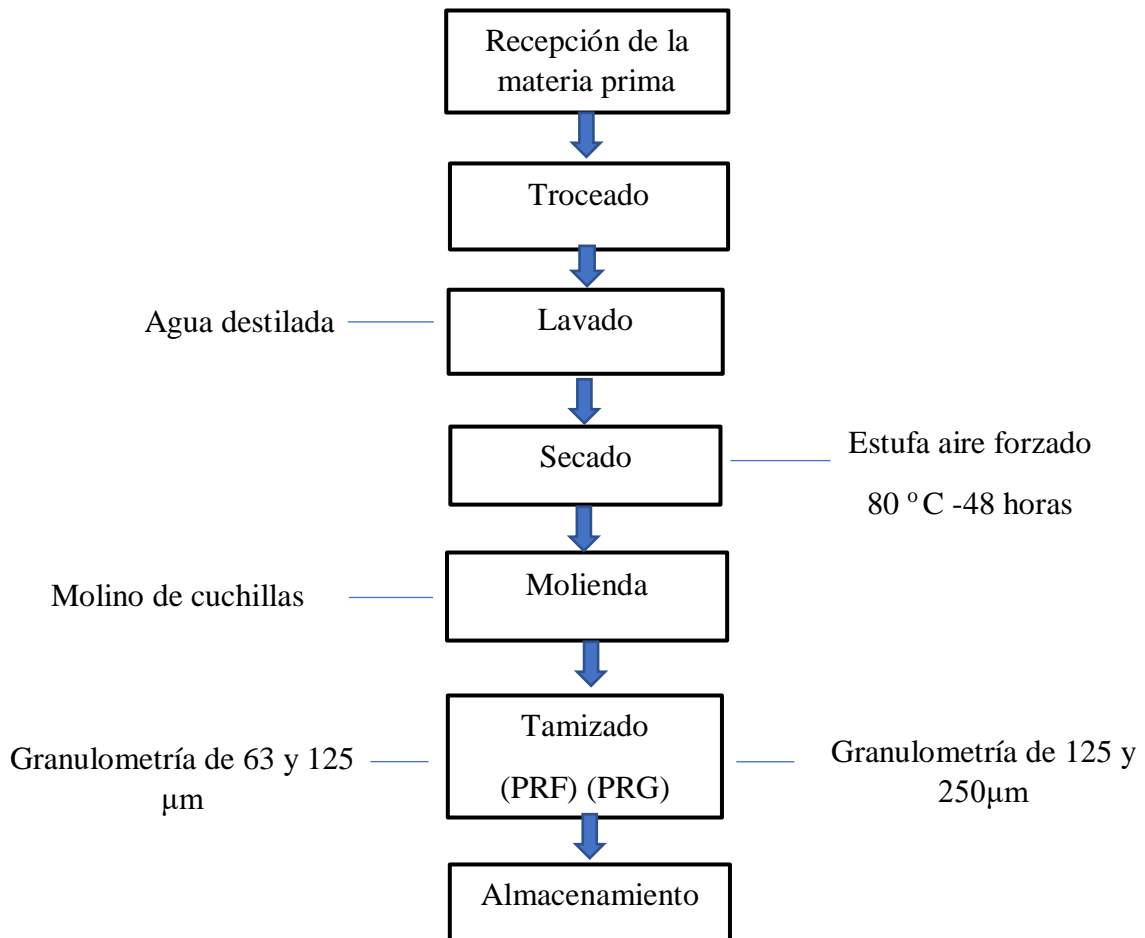
2.4 Desarrollo experimental

2.4.1 Tratamiento preliminar de la muestra

El raquis de banano fue recolectado de los cultivos ubicados en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala. En primer lugar, el raquis fue cortado en fragmentos pequeños, después se procedió a lavar con agua destilada para eliminar cualquier tipo de partículas adheridas, luego el material lignocelulósico se secó durante 48 horas en una estufa de aire forzado a 80 °C. Posteriormente se molió en molino de cuchillas y con ayuda de un tamiz se clasificó en dos granulometrías diferentes: polvo de raquis fino PRF (entre 63 y 125 μm) y polvo de raquis grueso PRG (entre 125 y 250 μm).

En el diagrama 1, se observa el tratamiento preliminar del raquis de banano que se empleó en el presente trabajo de investigación.

Diagrama 1. Proceso de preparación de la muestra



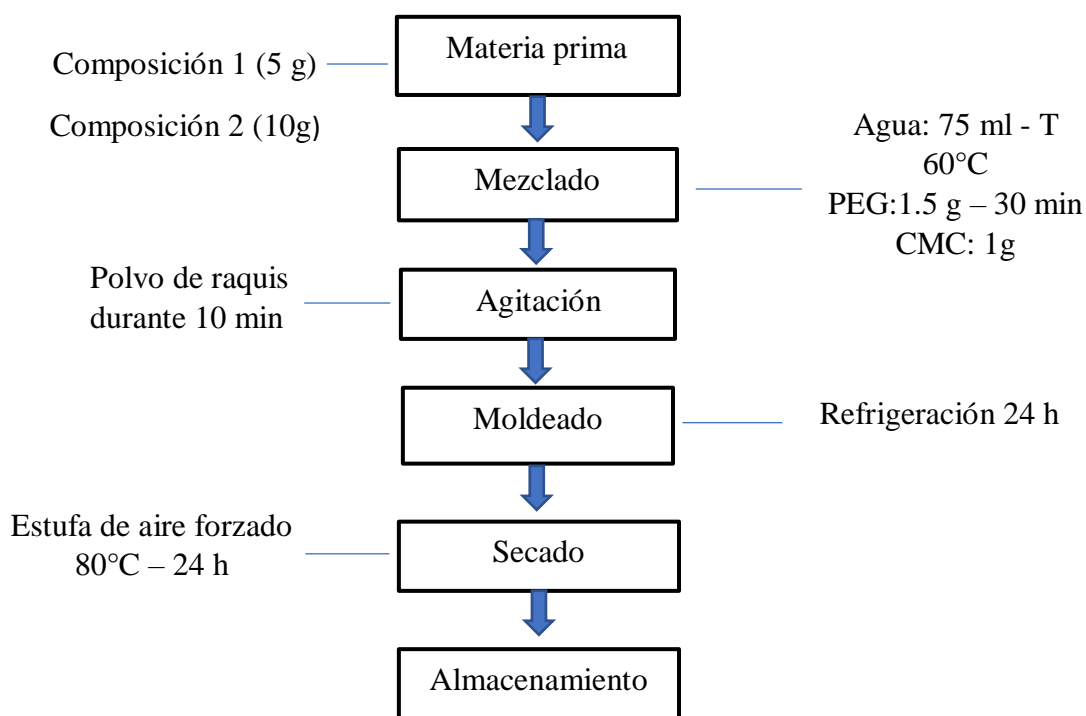
Fuente: Autoría propia

2.4.2 Desarrollo de precursores de espuma de raquis

Para la obtención de estas espumas se emplearon dos niveles de polvo de raquis de banano: 5g (composición 1) y 10g (composición 2) de los dos tipos de granulometría tamizadas PRF Y PRG. Primero, en un vaso de precipitación con 75 ml de agua destilada a una temperatura de 60°C se solubilizó 1,5 g polietilenglicol (PEG) el cual fue agitado constantemente durante 30 minutos, luego se añadió 1 g de carboximetilcelulosa (CMC) y, se agitó hasta homogenizar por completo la mezcla, finalmente se incorporó a la mezcla homogenizada el polvo de raquis. El gel que se obtuvo fue colocado en moldes y llevado a refrigeración durante 24 horas, una vez concluido el tiempo de refrigeración los geles fueron secados a 80°C en una estufa de aire forzado en un lapso de 24 horas, obteniendo de este modo lo que se denominará espumas de raquis (ER). El objetivo de emplear CMC en la composición es la formación de un gel, para de este modo evitar la flotación del polvo de raquis en el medio líquido. Por otra parte, el PEG tiene la función de mantener unidas a las partículas después de la extracción de agua del material ⁶⁶.

En el diagrama 2, se observa el proceso que se realizó para la obtención de las espumas de raquis de banano.

Diagrama 2. Proceso de obtención de las espumas de raquis



Fuente: Autoría propia

En la tabla 6, se observa una codificación interna para los materiales adsorbente que se elaboró, esto de acuerdo a su granulometría y composición.

Tabla 6. Tipos de espumas de raquis

CÓDIGO	ESPUMAS DE RAQUIS
M1C1	ER de PRF y composición 1 (5g)
M1C2	ER de PRF y composición 2 (10g)
M2C1	ER de PRG y composición 1 (5g)
M2C2	ER de PRG y composición 2 (10g)

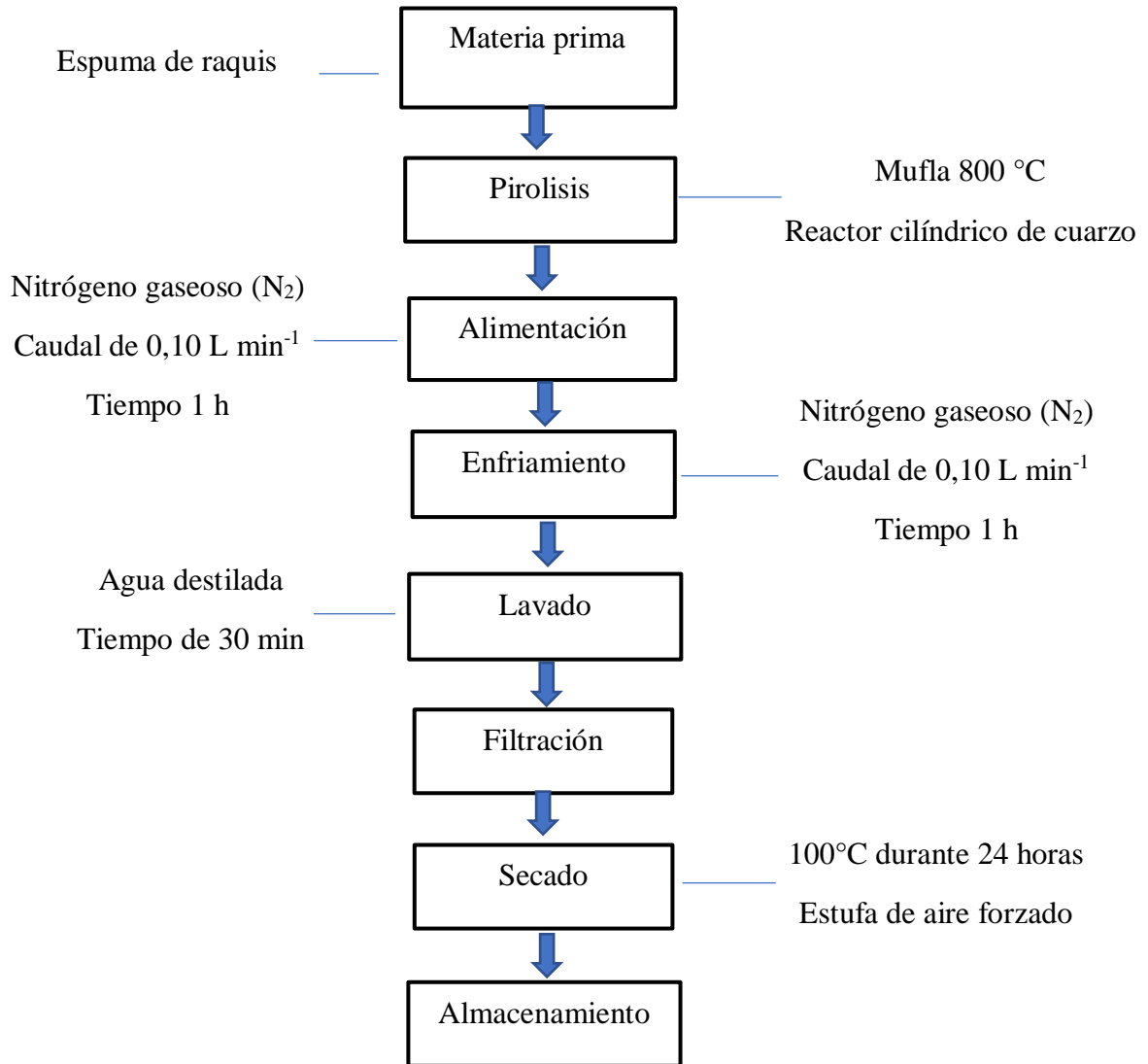
Fuente: Autoría propia

2.4.3 Obtención de las espumas de carbón por pirólisis

Las espumas de raquis (ER) que se obtuvieron preliminarmente, fueron pirolizadas en una mufla horizontal que fue modificada para la incorporación de un reactor cilíndrico de cuarzo. El reactor se alimentó con aproximadamente 7 g de ER, durante la reacción de pirólisis que se llevó a cabo a 800 °C durante 1 hora se inyectó nitrógeno gaseoso (N₂), con un caudal de 0,10 L.min⁻¹, posteriormente el sistema se enfrió bajo el flujo de N₂ durante 1 hora a temperatura ambiente. Las espumas de carbón (EC) que se obtuvieron fueron lavadas con agua destilada mediante agitación mecánica por un periodo de 30 minutos, finalmente fueron filtradas y secadas a 100°C durante 24 horas en una estufa de aire forzado⁶⁷.

En el diagrama 3 se observa el proceso de pirólisis de los geles de raquis de banano, para la obtención de las espumas de carbón

Diagrama 3. Proceso de pirólisis y tratamiento final



Fuente: Autoría propia

2.5 Caracterización del material

2.5.1 Potencial de carga cero (ph_{pzc})

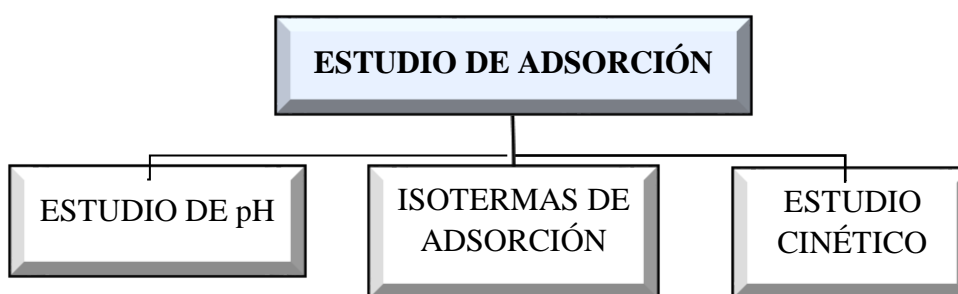
Para la determinación del potencial de carga cero se preparó una solución de cloruro de sodio (NaCl) a una concentración de 0,01 M. Posteriormente se pesaron 0,1 g de cada material adsorbente (M1C1, M1C2, M2C1, M2C2, RS) y se colocaron en un tubo falcon, luego se tomó una alícuota de 25 ml de NaCl 0,01 M ajustada a diferentes valores de pH (2, 4, 6, 8, 10, 12) y se incorporó a cada uno de los recipientes que contenían los materiales

adsorbentes. Los tubos fueron agitados durante 24 horas a temperatura ambiente, todos los análisis fueron realizados por duplicado⁶⁸. Después de ese tiempo, se procedió a medir el pH final de cada muestra.

2.6 Estudios de adsorción

Para realizar estos estudios de adsorción se procedió a preparar una solución patrón de 2000 mg.L⁻¹ de óxido de itrio (Y₂O₃). En el gráfico 5 se observa un esquema de los estudios de adsorción que se realizaron en el presente trabajo de investigación.

Gráfico 5. Esquema de los estudios de adsorción



Fuente: Autoría propia

2.6.1 Preparación de la solución a partir de Óxido de itrio (Y₂O₃)

Se pesó 1,26 g de óxido de itrio para preparar un volumen de 500 mL de solución patrón de concentración 2000 ppm. En primer lugar, se colocaron 200 mL de agua destilada en un vaso de precipitación y se calentó a 100°C, de a poco y con agitación constante se fue añadiendo el Y₂O₃, simultáneamente se agregaron alícuotas de ácido nítrico concentrado (HNO₃), las cual fueron 3 mL. Ya disuelto, se dejó enfriar la solución y se aforó con agua destilada en un balón volumétrico de 500mL, logrando así la concentración deseada. Para conocer la cantidad que se requiere del compuesto a una definida concentración se empleó la fórmula de la ecuación 1:

$$Conc \cdot \frac{Pm}{Z} \cdot \frac{Vp}{Vt} \quad (5)$$

Donde:

Con: concentración que se desea preparar (g.L⁻¹)

Pm: peso molecular del compuesto (Y₂O₃)

Z: peso atómico del compuesto (gramos de Y)

V_p: volumen a preparar (L)

V_t: volumen total (1 L)

2.6.1.1 Dilución de la solución de óxido de itrio

Para esto se tomó un volumen de 12,5 mL de la solución patrón de óxido de itrio de 2000 ppm de concentración y se colocó en un balón aforado de 500 mL en donde se aforó con agua destilada, de este modo se obtuvo Y₂O₃ de 50 ppm de concentración. Para determinar el volumen de solución patrón requerido se aplicó la ecuación 6:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (6)$$

Donde:

C₁: concentración inicial (ppm)

V₁: volumen inicial (L)

C₂: concentración deseada ppm

V₂: volumen a preparar (L)

2.6.2 Estudio de pH

Se realizaron pruebas o estudios de pH para determinar el óptimo en la adsorción. Para ello se trabajó con valores de pH de 4 y 5 a una concentración de 50 ppm de solución Itrio. Se pesó aproximadamente 0,025 g de cada material adsorbente M1C1, M1C2, M2C1 y M2C2 (ver tabla 6) y se colocaron en tubos falcon de 50 mL, a los cuales se les agregó 25 mL de la solución de itrio al pH y concentración ya definida. Los ensayos se realizaron por duplicado con agitación mecánica a temperatura ambiente durante un tiempo de 24 horas, posteriormente las muestras fueron filtradas y, de esto se tomaron alícuotas de 10 mL; las cuales fueron llevadas a leer en el equipo ICP para determinar la concentración final de itrio.

2.6.3 Estudio de equilibrio

Se utilizó el material absorbente de condiciones óptimas de pH, M1C2. Las muestras para este estudio fueron preparadas por duplicado a diferentes concentraciones de 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 500 y 750 ppm, preparados a partir de una solución patrón de itrio. Se agregó 1 g.L⁻¹ del material absorbente óptimo y se agitó mecánicamente por 24 h a temperatura ambiente. Finalmente, las muestras fueron filtradas y llevadas a leer en el equipo de ICP.

2.6.4 Estudio cinético

Para realizar este análisis se preparó 250 ml de solución de itrio a una concentración de 50 ppm ajustada al pH óptimo. Se colocó alrededor de 0,25 g de la espuma de carbón M1C2, junto con la solución de itrio ajustado al pH óptimo. El material con la solución se mantuvo en agitación constante durante 5 horas, en este lapso de tiempo se fueron tomando alícuotas de 10 ml desde el primer contacto denominado tiempo 0, durante la primera media hora las muestras se tomaron cada 5 minutos, luego cada 15 minutos durante 2 horas y, finalmente se tomó muestras cada media hora. Posteriormente se filtraron y leyeron en el equipo de ICP.

CAPÍTULO III

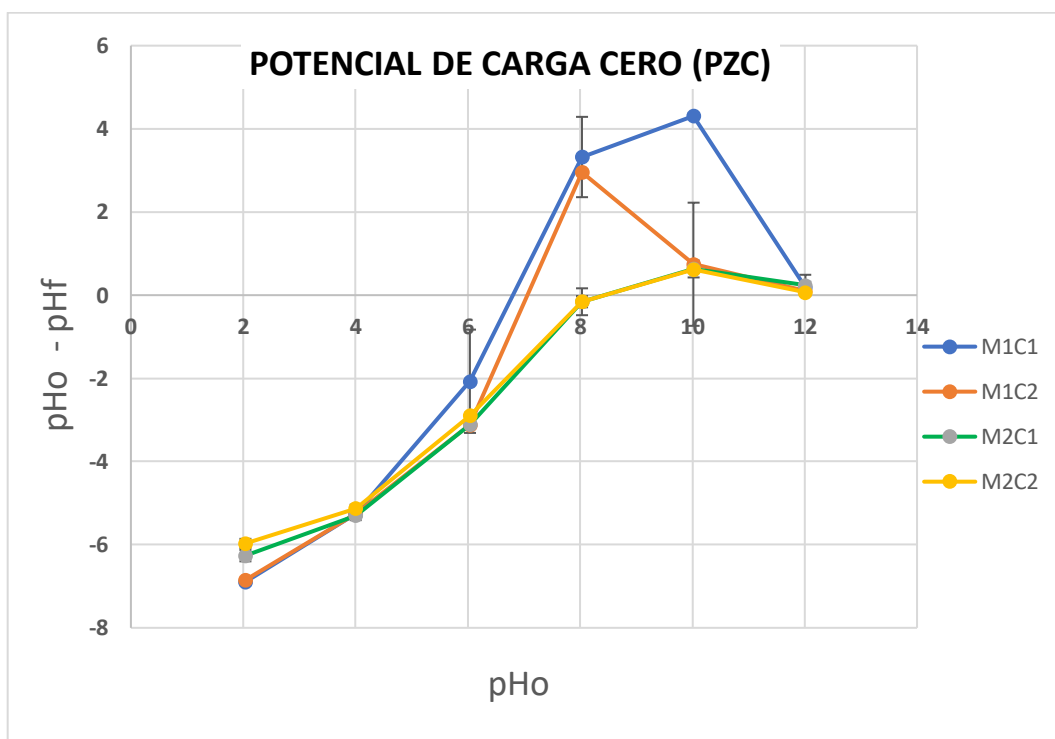
3 RESULTADOS

3.1 Caracterización del material adsorbente

3.1.1 Potencial de carga cero (pH_{pzc})

En un adsorbente el pH_{pzc} es una de las características más importantes, la cual determina la neutralidad del adsorbente. Los grupos funcionales ya sea ácidos o básicos no aportan al pH de la solución⁶⁹.

Figura 1. Potencial de carga cero (pzc) de los bioadsorbentes



Fuente: Autoría propia

Condiciones: Dosis: 1 g.L^{-1} , Volumen: 25 ml, Agitación: 70 rpm, Tiempo de contacto: 24 horas, Temperatura: $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

De acuerdo a la Figura 1, en la que se puede visualizar el comportamiento de las espumas de carbón en relación al pH, el valor de potencial de carga cero (pzc) resultante para las espumas de carbón fue: 6,7 para M1C1; 7 para M1C2, y 8,1 para las espumas M2C1 y M2C2.

Estos resultados denotan que la superficie de los materiales bioadsorbentes al estar inmersos en pHs superiores a los valores de pzc obtenidos se cargarán negativamente y, por lo tanto, serán más propensos a adsorber cationes, por lo contrario, a pHs menores de los valores de pzc se cargará positivamente y atraerá a especies negativas (aniones).

Investigaciones similares realizadas para la adsorción de ETR con materiales lignocelulósicos, donde los desechos derivados del cultivo de banano (*Musa Cavendish*): raquis (BR), pseudotallo (BPS), la cáscara del banano (BP), se obtuvieron potenciales de carga cero pH_{pzc} de 6,5, 6,0 y 5,7 para BR, BPS y BP, respectivamente⁷⁰. Siendo estos resultados similares a los conseguidos en este estudio donde se obtuvo pHs de: 6,7 para M1C1, 7 para M1C2, y 8,1 para las espumas M2C1 y M2C2.

3.2 Estudios de adsorción

3.2.1 Estudio de pH

En una fase acuosa la distribución de solutos depende del pH de la solución. Los datos obtenidos debido a la adsorción de especies de solutos a diferentes valores de pH deben dar una idea precisa sobre el rango de pH favorable para el proceso de adsorción⁷¹.

Para llevar a cabo el estudio de pH con itrio (Y^{+3}) se trabajó con dos valores distintos de pH (4 y 5) para cada material adsorbente elaborado: M1C1, M1C2, M2C1 y M2C2. En la figura 2 se puede observar que el material adsorbente (M1C2) a pH 5 denota un mejor comportamiento en relación con las demás espumas, obteniendo una capacidad y porcentaje de adsorción de 45,175 mg.g⁻¹ y 95,567%, respectivamente. En las tablas 7 y 8 se presentan los promedios del estudio de pH de forma simplificada.

Tabla 7. Resultados del estudio de pH de la solución ajustada a 4

CÓDIGO	pH	% ADSORCIÓN	CAPACIDAD DE ADSORCIÓN (mg.g ⁻¹)
M1C1	4	86,648	39,427
M1C2	4	91,321	44,0423
M2C1	4	74,103	34,336
M2C2	4	50,837	23,575

Fuente: Autoría propia

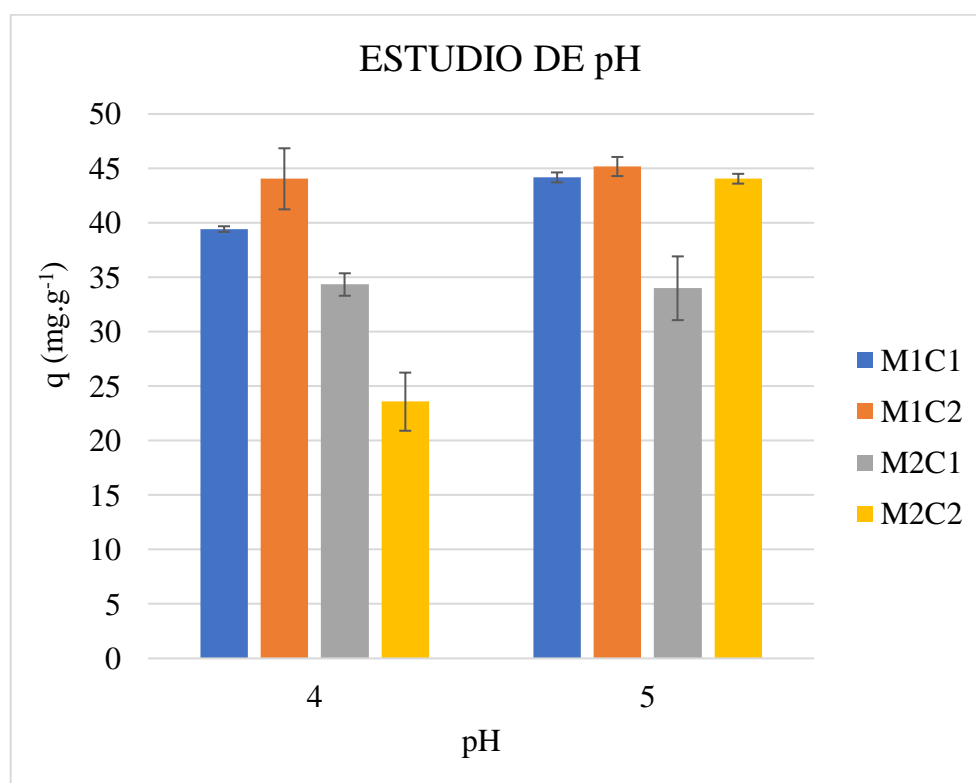
Tabla 8. Resultados del estudio de pH de la solución ajustada a 5

CÓDIGO	pH	% ADSORCIÓN	CAPACIDAD DE ADSORCIÓN (mg.g ⁻¹)
M1C1	5	95,253	44,172
M1C2	5	95,567	45,175
M2C1	5	71,807	33,993
M2C2	5	89,414	44,052

Fuente: Autoría propia

Mientras que en la figura 2 se presenta el comportamiento de la capacidad de adsorción (mg.g⁻¹) en relación al pH.

Figura 2. Efecto del pH en la capacidad de adsorción de las espumas de carbón



Fuente: Autoría propia

Condiciones: Dosis: 1 g.L⁻¹, Volumen: 25 ml, Agitación: 70 rpm, Tiempo de contacto: 24 horas, Temperatura: 25°C, Concentración inicial: 50 ppm.

Los resultados del estudio de pH que se realizó coinciden con los valores obtenidos en otro trabajo de investigación de espuma de carbón mesoporosas para la adsorción de iones de Pb^{2+} , en el que se emplearon valores de pH de 3 y 5, donde el pH 5 fue más favorable con una capacidad de adsorción $q_e = 9,4 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de plomo⁷². El parámetro de pH juega un papel importante dentro del proceso de bioadsorción, pues, tiene la capacidad de afectar la solubilidad de los metales y la activación de los grupos funcionales presentes en la biomasa. A valores de pH bajos los grupos funcionales (carboxilos) no se encuentran disociados y, por lo tanto, pierden la capacidad de enlazarse a los iones metálicos presentes en la solución. Por lo contrario, al aumentar el nivel de pH las cargas negativas en la biomasa aumentan, lo que favorece a la formación de enlaces con los iones metálicos, es por este motivo que a medida que incrementa el pH, mejora el porcentaje de remoción del contaminante⁷³. La capacidad máxima de adsorción demostró que la abundancia de grupos funcionales creados en la superficie del carbón es factor determinante para incrementar la capacidad de adsorción de iones Pb^{2+} a pH 5⁷².

3.2.2 Estudio de Isotermas

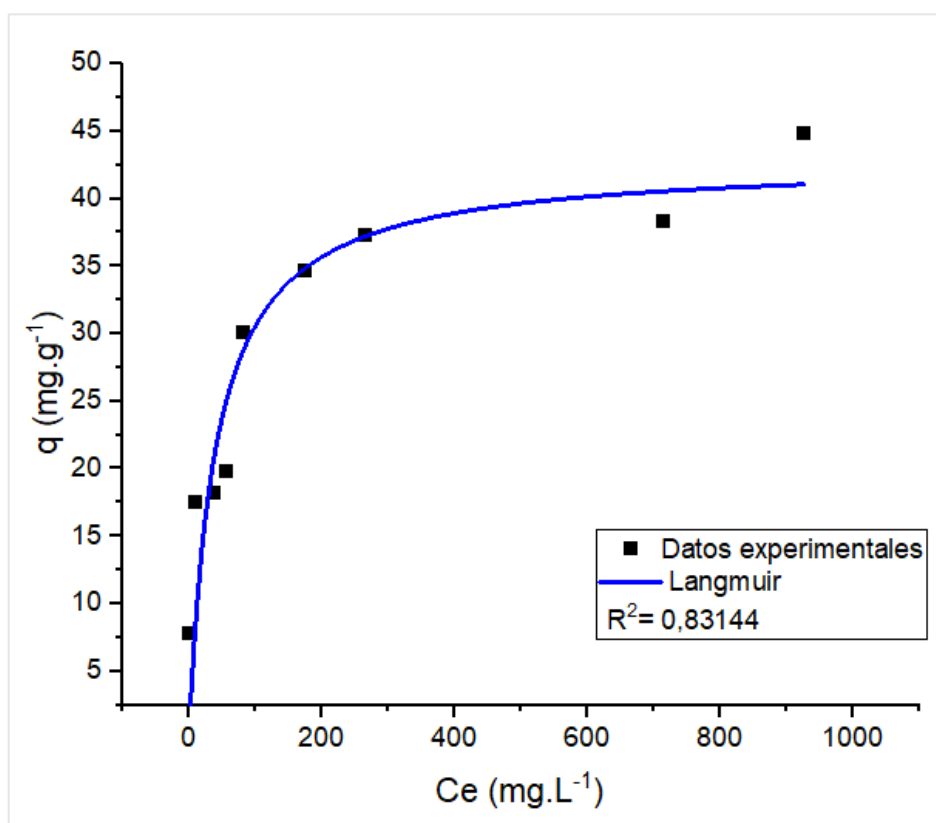
El estudio de equilibrio comúnmente conocido como estudio de isotermas de adsorción, representa el punto de equilibrio entre el adsorbato y adsorbente⁶².

3.2.2.1 Isotherma de Langmuir

El modelo matemático de Langmuir implica que la adsorción en la monocapa se produce en una estructura homogénea, indicando que todos los sitios de adsorción son iguales y de igual manera la energía⁷⁴.

En función al resultado del pH óptimo, se hizo el estudio de isotermas para el MIC2. En la figura 3 se muestra el ajuste de los datos experimentales con el modelo matemático no lineal de la Isotherma de Langmuir.

Figura 3. Isotherma de Langmuir de MIC2



Fuente: Autoría propia

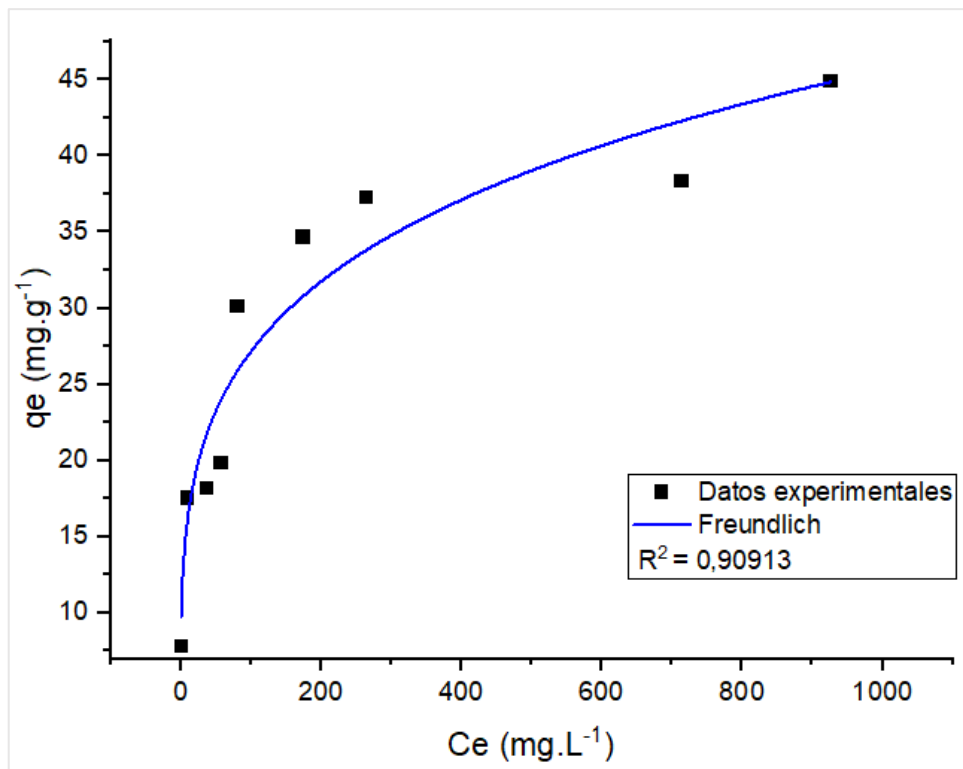
Condiciones: Dosis: 1 g.L⁻¹, Volumen: 25 ml, Agitación: 70 rpm, Tiempo de contacto: 24 horas, Temperatura: 25°C, pH: 5

3.2.2.2 Isoterma de Freundlich

La isoterma de Freundlich es un modelo empírico el cual se aplica a una superficie irregular donde la capacidad de adsorción aumentara siempre y cuando aumente la concentración de iones metalitos⁷⁴

La figura 4 muestra el ajuste de los datos experimentales obtenidos del material M1C2 con el modelo matemático no lineal de la Isoterma de Freundlich.

Figura 4. Isoterma de Freundlich de M1C2



Fuente: Autoría propia

Condiciones: Dosis: 1 g.L⁻¹, Volumen: 25 ml, Agitación: 70 rpm, Tiempo de contacto: 24 horas, Temperatura: 25°C, pH: 5

En tabla 9, se presentan los resultados obtenidos de los modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich aplicados al material adsorbente M1C2 usando el software estadístico Originlab 2022.

Tabla 9. Resultados de isothermas para Y^{+3}

Modelo Matemático	Fórmula	Parámetros	Valores	Unidades
Langmuir	$q_e = \frac{Q_{max} \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e}$	Q_{max}	42,829	mg.g ⁻¹
		b	0,025	-
		R ²	0,831	-
Freundlich	$q_e = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$	K_f	9,601	mg.g ⁻¹
		n	4,431	-
		R ²	0,909	-

Fuente: Autoría propia

La interacción entre los iones del ion Y^{+3} y el material bioadsorbente, dió como resultado un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,831$ para la isoterma de Langmuir, mientras que para la isoterma de Freundlich el coeficiente de correlación fue de $R^2 = 0,909$, estos valores obtenidos denotan que la isoterma de Freundlich fue el modelo matemático que mejor se ajustó con los valores experimentales obtenidos para la espuma de carbón M1C2.

Por otro lado, existe una investigación en donde se aplica raquis de banano sin modificaciones, para la biosorción de Cd^{+2} en solución acuosa, donde, se obtuvieron coeficientes de correlación de $R^2 = 0,798$ para el modelo matemático de Langmuir y, $R^2 = 0,832$ para el modelo matemático de Freundlich⁷⁵. Al ser la isoterma de Freundlich el modelo matemático no lineal que mejor se ajustó a los datos experimentales, se puede decir que la adsorción de los iones del analito fue una adsorción de multicapa (primero se ocuparon los sitios energéticos más activos y luego la superficie), es decir, hubo una adsorción de una superficie con una distribución de energía heterogénea⁷⁶.

Estos resultados denotan que la modificación de la biomasa mediante un proceso termoquímico como la pirólisis aporta a la mejora de las capacidades de adsorción de elementos contaminantes, de acuerdo a algunas investigaciones realizadas, esto posiblemente se deba al aumento del área superficial y volumen de los poros del material

adsorbente. En la tabla 10, se indica un cuadro comparativo de modelos matemáticos aplicados en la adsorción de contaminantes empleando bioadsorbentes.

Tabla 10. Cuadro comparativo de modelos de isotermas para diferentes materiales bioadsorbentes destinados a la adsorción de metales

MATERIALES BIOADSORBENTES APLICADOS A LA ADSORCIÓN DE METALES						
Material	pH	Elemento	Temperatura	Modelo de Isoterma	q_{max} (mg.g⁻¹)	Ref.
Nanofibras de celulosas	5	Y ⁺³	25 °C	Freundlich	200,00	77
Raicillas de malta	4,5	Eu ⁺³	25 °C	Langmuir	1,00	78
	4,5	Eu ⁺³	25 °C	Dubinin radushkevich	2,70	78
	4,5	Eu ⁺³	25 °C	Freundlich	2,10	78
	6	Y ⁺³	40 °C	Langmuir	31,09	79
	6	Y ⁺³	40 °C	Freundlich	1,74	79
Cáscara de naranja	6	Y ⁺³	40 °C	Dubinin-Radushkevich (D-R)	26,06	79
	6	La ⁺³	40 °C	Langmuir	37,60	79
	6	La ⁺³	40 °C	Freundlich	1,41	79
	6	La ⁺³	40 °C	Dubinin-Radushkevich (D-R)	31,13	79

Fuente: Autoría propia

3.2.3 Estudio cinético

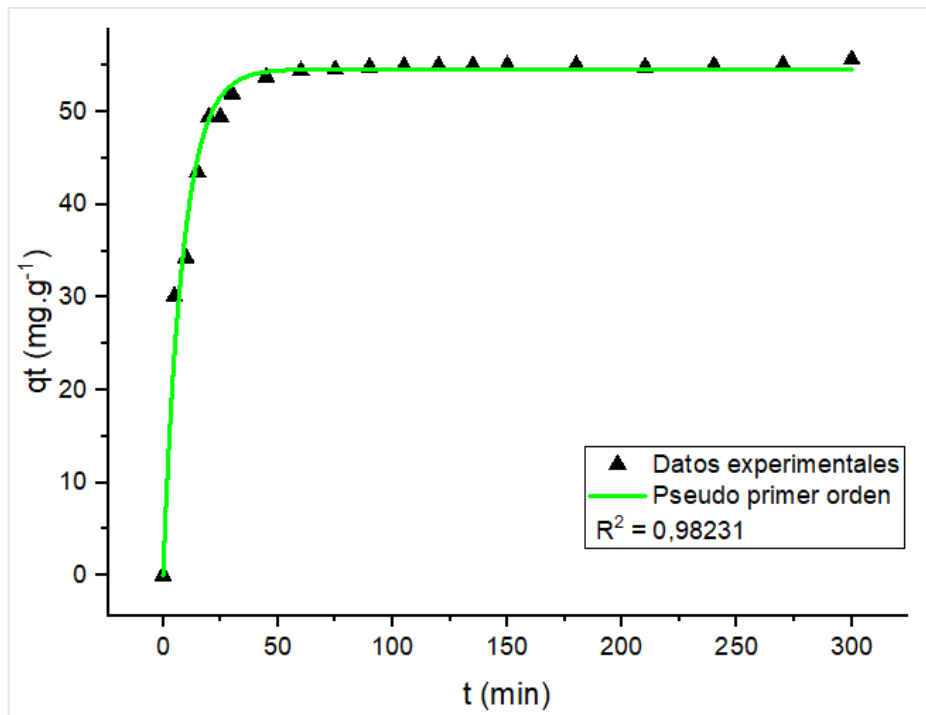
El estudio cinético no es más que la relación que existe entre adsorbato y adsorbente, de tal manera que este demuestra la cantidad de adsorbato que se adhiere en el material adsorbente con relación al tiempo⁶⁵. Es decir, se trata de analizar las concentraciones del material adsorbente M1C2 desde un tiempo cero hasta el tiempo final de contacto. Para este estudio se emplearon dos modelos matemáticos: Pseudo primer orden (PPO) y Pseudo segundo orden (PSO), para identificar cuál de estos modelamientos es el ideal con los resultados experimentales.

3.2.3.1 Modelo cinético de Pseudo primer orden (PPO)

De la misma manera que el estudio de isotermas, para la cinética se realizó para el material adsorbente M1C2.

En la figura 5, es posible observar la curva de cinética de adsorción para el analito de interés ajustada con el modelo cinético no lineal de PPO.

Figura 5. Modelo cinético PPO de M1C2



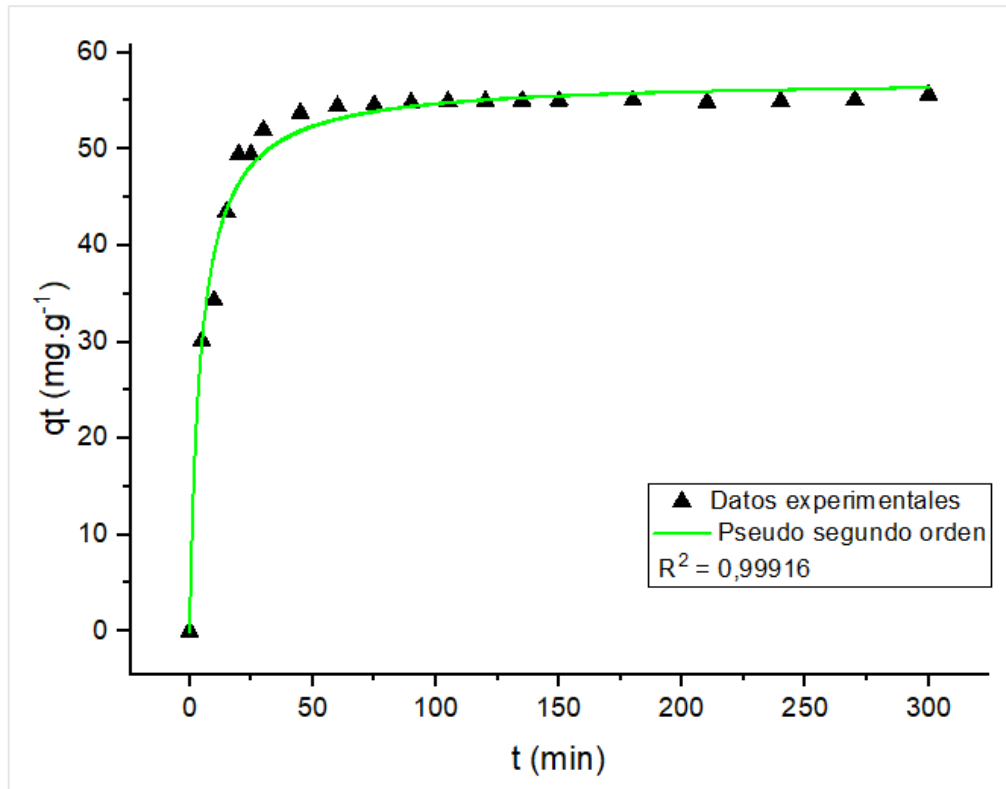
Fuente: Autoría propia

Condiciones: Dosis $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, tiempo: 5 horas, Temperatura: 25°C , concentración inicial: 50 ppm, agitación 90 rpm, pH 5

3.2.3.2 Modelo cinético de Pseudo segundo orden (PSO)

En la figura 6 se puede visualizar la curva de cinética de adsorción para el analito de interés ajustada con el modelo cinético no lineal de PSO.

Figura 6. Modelo cinético PSO de M1C2



Fuente: Autoría propia

Condiciones: Dosis $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, tiempo: 5 horas, Temperatura: 25°C , concentración inicial: 50 ppm, agitación 90 rpm, pH 5

Las curvas del estudio de cinética de adsorción de las figuras 5 y 6, denotan que en el inicio del proceso la adsorción es más rápida, con el transcurrir del tiempo el comportamiento se torna lento hasta que aproximadamente a los 75 minutos alcanza el equilibrio cinético.

Los resultados del estudio de cinética de adsorción se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados del estudio de cinética para Y^{+3}

Modelo Matemático	Fórmula	Parámetros	Valores	Unidades
Pseudo primer orden	$qt = qe(1 + e^{-k_1 t})$	qe	54,626	$mg \cdot g^{-1}$
		K_1	0,116	-
		R^2	0,983	-
Pseudo segundo orden	$qt = \frac{qe^2 * K_2 * t}{1 + K_2 * qe * t}$	qe	57,174	$mg \cdot g^{-1}$
		K_2	0,004	-
		R^2	0,999	-

Fuente: Autoría propia

Realizando una comparación con un estudio en el que para la adsorción de ion de Pb^{+2} se emplea una espuma de carbono con una estructura de red tridimensional se obtiene un mejor ajuste en el proceso de adsorción con la cinética de pseudo segundo orden $R^2 = 0,988$, con una concentración de la solución de 200 ppm y pH de 6, esto se debe a que en este modelo matemático existe la mayoría de disposición de sitios activos para retener más fácil el catión, una vez que estos sitios activos se saturan la adsorción llega a su punto de equilibrio⁸⁰.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES

- Fue posible desarrollar 4 espumas de carbón a partir del proceso de pirólisis del raquis de banano: EC de PRF y composición 5 g (M1C1); EC de carbón de PFR y composición 10 g (M1C2); EC de PRG Y composición 5 g (M2C1); EC de carbón de PFG y composición 10 g (M2C2).
- La caracterización de las espumas de carbón mediante el pH_{pzc} permitió identificar que a valores de pH de: 6,7 M1C1, 7 M1C2 y, 8,1 para M2C1 y M2C2, la superficie del material adsorbente se cargará negativamente atrayendo a cationes, en este caso al analito de interés Y^{+3} .
- Según el estudio de pH realizado a los 4 materiales, el pH óptimo para la recuperación de itrio fue de 5, en el cual, el material M1C2 demostró una mayor capacidad de adsorción del analito. Por otra parte, con el estudio de isothermas se pudo realizar el ajuste de los resultados experimentales con modelos matemáticos de isothermas, en el cual, se ajustaron de mejor manera con el modelo matemático de la Isotherma de Freundlich con un $R^2 = 0,909$ y una $K_f = 9,60$; mientras que para la Isotherma de Langmuir se obtuvo un $q_{\text{max}} = 42,829$ y $R^2 = 0,831$. Por último, al realizar una comparación de los modelos de cinética de adsorción, se estableció que el modelamiento de PSO tuvo un mejor ajuste con coeficiente de correlación de 0,999, en el cual, se alcanzó el equilibrio cinético en los 75 minutos de adsorción.
- En base a los resultados obtenidos, se demuestra que realizando una modificación al raquis de banano, es decir, un tratamiento térmico (pirólisis) se obtiene una mejor capacidad de adsorción del elemento contaminante; esto se debe posiblemente a que la pirólisis ha incrementado el área y volumen de los poros del material adsorbente.

CAPÍTULO V

5. RECOMENDACIONES

- En base a la eficiencia de adsorción que presentaron las espumas de carbón, se recomienda el empleo de las mismas para realizar otros estudios de adsorción para remover otros contaminantes.
- Efectuar estudios de desorción para determinar la durabilidad y regenerabilidad de las espumas de carbón.
- Realizar comparación de los materiales adsorbentes sometiéndolos a tratamiento de pirólisis con variaciones en sus parámetros (temperatura, caudal de gas, tiempo de residencia)

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Ron Cusme, C. A. Estudio de La Recuperación de Europio e Itrio a Partir de Tubos de Rayos Catódicos Desechados, 2016.
- (2) Pitron, G. *La Guerra de Los Metales Raros : La Cara Oculta de La Transición Energética y Digital*; Península, 2019.
- (3) Trinidad Juárez, B.; Valencia Alvarado, G.; Duro Mendoza, M.; Lira Campos, A.; García Pichardo, O.; Mendoza Anaya, D. Caracterización Del Material Fluorescente Contenido En El Interior de Las Lámparas Ahorradoras de Energía. *Padi* **2019**, 7, 76–80. <https://doi.org/10.29057/icbi.v7iEspecial.2.4891>.
- (4) Negrea, A.; Gabor, A.; Davidescu, C. M.; Ciopec, M.; Negrea, P.; Duteanu, N.; Barbulescu, A. Rare Earth Elements Removal from Water Using Natural Polymers. *Sci Rep* **2018**, 8 (1), 316. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18623-0>.
- (5) Anastopoulos, I.; Bhatnagar, A.; Lima, E. C. Adsorption of Rare Earth Metals: A Review of Recent Literature. *J Mol Liq* **2016**, 221, 954–962. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.076>.
- (6) INEC. *Boletín Técnico Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua*; 2021.
- (7) Haro Velasteguí, A. J.; Borja Arévalo, A. E.; Triviño Bloisse, S. Y. Análisis Sobre El Aprovechamiento de Los Residuos Del Plátano, Como Materia Prima Para La Producción de Materiales Plásticos Biodegradables. *Dominio de las ciencias* **2017**, 3 (2), 506–525. <https://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.2.esp.506-525>.
- (8) Czajczyńska, D.; Anguilano, L.; Ghazal, H.; Krzyżyńska, R.; Reynolds, A. J.; Spencer, N.; Jouhara, H. Potential of Pyrolysis Processes in the Waste Management Sector. *Thermal Science and Engineering Progress* **2017**, 3, 171–197. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>.
- (9) Inagaki, M.; Qiu, J.; Guo, Q. Carbon Foam: Preparation and Application. *Carbon N Y* **2015**, 87 (C), 128–152. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.02.021>.
- (10) Ganguli, R.; Cook, D. R. Rare Earths: A Review of the Landscape. *MRS Energy & Sustainability* **2018**, 5 (1). <https://doi.org/10.1557/mre.2018.7>.
- (11) Balaram, V. Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact. *Geoscience Frontiers* **2019**, 10 (4), 1285–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.
- (12) Avendaño Corvalán, P. J. Evaluación de Factibilidad Técnico-Ambiental de Una Planta de Extracción de Tierras Raras En Chile, 2017.
- (13) Arshi, P. S.; Vahidi, E.; Zhao, F. Behind the Scenes of Clean Energy: The Environmental Footprint of Rare Earth Products. *ACS Sustain Chem Eng* **2018**, 6 (3), 3311–3320. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03484>.
- (14) Binnemans, K.; Jones, P. T.; Müller, T.; Yurramendi, L. Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? *Journal of Sustainable Metallurgy*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH March 1, 2018, pp 126–146. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0162-8>.

- (15) Calderón, C. E. Á.; Palacio, J. H. T. Geopolitics of Rare Earths: A Strategic Natural Resource for the Multidimensional Security of the State. *Revista Científica General Jose Maria Cordova* **2020**, *18* (30), 335–355. <https://doi.org/10.21830/19006586.587>.
- (16) Zhang, F.; Wang, Z.; Wang, S.; Fang, H.; Chen, M.; Xu, D.; Tang, L.; Wang, D. Physicochemical Properties and Ecotoxicological Effects of Yttrium Oxide Nanoparticles in Aquatic Media: Role of Low Molecular Weight Natural Organic Acids. *Environmental Pollution* **2016**, *212*, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.054>.
- (17) Bilal, M.; Wang, Z.; Cui, J.; Romanholo, L. F. R.; Bharagava, R. N.; N. Iqbal, H. M. Environmental Impact of Lignocellulosic Wastes and Their Effective Exploitation as Smart Carriers – A Drive towards Greener and Eco-Friendlier Biocatalytic Systems. *Science of The Total Environment* **2020**, *722*, 137903. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137903>.
- (18) Srivastava, N.; Rawat, R.; Singh Oberoi, H.; Ramteke, P. W. A Review on Fuel Ethanol Production From Lignocellulosic Biomass. *Int J Green Energy* **2015**, *12* (9), 949–960. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.890104>.
- (19) Anwar, Z.; Gulfraz, M.; Irshad, M. Agro-Industrial Lignocellulosic Biomass a Key to Unlock the Future Bio-Energy: A Brief Review. *J Radiat Res Appl Sci* **2014**, *7* (2), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003>.
- (20) Tiappi Deumaga, M. F.; Jacquet, N.; Vanderghem, C.; Aguedo, M.; Thomas, H. G.; Gerin, P.; Deleu, M.; Richel, A. Fractionation and Structural Characterization of Hemicellulose from Steam-Exploded Banana Rachis. *Waste Biomass Valorization* **2020**, *11* (5), 2183–2192. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0457-9>.
- (21) Yousuf, A.; Pirozzi, D.; Sannino, F. Fundamentals of Lignocellulosic Biomass. In *Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels*; Elsevier, 2020; pp 1–15. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815936-1.00001-0>.
- (22) Rajesh Banu, J.; Preethi; Kavitha, S.; Tyagi, V. K.; Gunasekaran, M.; Karthikeyan, O. P.; Kumar, G. Lignocellulosic Biomass Based Biorefinery: A Successful Platform towards Circular Bioeconomy. *Fuel* **2021**, *302*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121086>.
- (23) Zimmermann, T.; Bordeanu, N.; Strub, E. Properties of Nanofibrillated Cellulose from Different Raw Materials and Its Reinforcement Potential. *Carbohydr Polym* **2010**, *79* (4), 1086–1093. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.045>.
- (24) Bajpai, P. Structure of Lignocellulosic Biomass; 2016; pp 7–12. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6_2.
- (25) De, S.; Mishra, S.; Poonguzhali, E.; Rajesh, M.; Tamilarasan, K. Fractionation and Characterization of Lignin from Waste Rice Straw: Biomass Surface Chemical Composition Analysis. *Int J Biol Macromol* **2020**, *145*, 795–803. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.068>.
- (26) Bhushan, S.; Rana, M. S.; Mamta; Nandan, N.; Prajapati, S. K. Energy Harnessing from Banana Plant Wastes: A Review. *Bioresour Technol Rep* **2019**, *7*, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100212>.

- (27) Acaro Chamba, L. M.; Córdova Montoya, A. N.; Vega Granda, A. del C.; Sánchez Quezada, T. X. Evolución En Las Exportaciones de Banano e Impacto Del Desarrollo Económico, Provincia de El Oro 2011 -2020, Pre-Pandemia, Pandemia; Aplicando Series de Tiempo. *Polo del Conocimiento* **2021**, *6*, 257–277. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i8>.
- (28) Tiappi Deumaga, M. F.; Villani, N.; Aguedo, M.; Jacquet, N.; Thomas, H. G.; Gerin, P.; Deleu, M.; Richel, A. Chemical Composition Analysis and Structural Features of Banana Rachis Lignin Extracted by Two Organosolv Methods. *Ind Crops Prod* **2019**, *132*, 269–274. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.022>.
- (29) Llangari Sibiri, A. M. Comparación Del Rendimiento y Calidad de Bioetanol Obtenido a Partir de La Biomasa Lignocelulosica de Los Pseudotallos de Banano", 2018.
- (30) Lapo, B.; Bou, J. J.; Hoyo, J.; Carrillo, M.; Peña, K.; Tzanov, T.; Sastre, A. M. A Potential Lignocellulosic Biomass Based on Banana Waste for Critical Rare Earths Recovery from Aqueous Solutions. *Environmental Pollution* **2020**, *264*, 114409. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114409>.
- (31) Fahmy, T. Y. A.; Fahmy, Y.; Mobarak, F.; El-Sakhawy, M.; Abou-Zeid, R. E. Biomass Pyrolysis: Past, Present, and Future. *Environ Dev Sustain* **2020**, *22* (1), 17–32. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0200-5>.
- (32) Campuzano, F.; Brown, R. C.; Martínez, J. D. Auger Reactors for Pyrolysis of Biomass and Wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2019**, *102*, 372–409. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.014>.
- (33) Leng, L.; Xiong, Q.; Yang, L.; Li, H.; Zhou, Y.; Zhang, W.; Jiang, S.; Li, H.; Huang, H. An Overview on Engineering the Surface Area and Porosity of Biochar. *Science of The Total Environment* **2021**, *763*, 144204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>.
- (34) Dhyani, V.; Bhaskar, T. A Comprehensive Review on the Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Renew Energy* **2018**, *129*, 695–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>.
- (35) Jeyasubramanian, K.; Thangagiri, B.; Sakthivel, A.; Dhaweethu Raja, J.; Seenivasan, S.; Vallinayagam, P.; Madhavan, D.; Malathi Devi, S.; Rathika, B. A Complete Review on Biochar: Production, Property, Multifaceted Applications, Interaction Mechanism and Computational Approach. *Fuel* **2021**, *292*, 120243. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120243>.
- (36) Zhou, Y.; Qin, S.; Verma, S.; Sar, T.; Sarsaiya, S.; Ravindran, B.; Liu, T.; Sindhu, R.; Patel, A. K.; Binod, P.; Varjani, S.; Rani Singhnia, R.; Zhang, Z.; Awasthi, M. K. Production and Beneficial Impact of Biochar for Environmental Application: A Comprehensive Review. *Bioresour Technol* **2021**, *337*, 125451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125451>.
- (37) Rios, R. V. R. A.; Martínez Escandell, M.; Molina Sabio, M.; Rodríguez Reinoso, F. Carbon Foam Prepared by Pyrolysis of Olive Stones under Steam. *Carbon N Y* **2006**, *44* (8), 1448–1454. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.11.028>.
- (38) Kazawadi, D.; Ntalikwa, J.; Kombe, G. A Review of Intermediate Pyrolysis as a Technology of Biomass Conversion for Coproduction of Biooil and Adsorption

- Biochar. *Journal of Renewable Energy* **2021**, 2021, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/5533780>.
- (39) Li, Y.; Xing, B.; Ding, Y.; Han, X.; Wang, S. A Critical Review of the Production and Advanced Utilization of Biochar via Selective Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Bioresour Technol* **2020**, 312, 123614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>.
- (40) Yargic, A. S.; Ozbay, N. Effect of Chemical Activation on the Cellular Structure of Biopitch-Derived Green Carbon Foam. *Diam Relat Mater* **2019**, 96, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.04.032>.
- (41) Wang, R.; Li, W.; Liu, S. A Porous Carbon Foam Prepared from Liquefied Birch Sawdust. *J Mater Sci* **2012**, 47 (4), 1977–1984. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5993-7>.
- (42) Ozbay, N.; Yargic, A. S. Carbon Foam Production from Bio-Based Polyols of Liquefied Spruce Tree Sawdust: Effects of Biomass/Solvent Mass Ratio and Pyrolytic Oil Addition. *J Appl Polym Sci* **2019**, 136 (11), 47185. <https://doi.org/10.1002/app.47185>.
- (43) Priyanka, M.; Saravanakumar, M. P. A Short Review on Preparation and Application of Carbon Foam. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* **2017**, 263 (3), 032018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032018>.
- (44) Stahlfeld, K. W.; Belmont, E. L. Carbon Foam Production from Lignocellulosic Biomass via High Pressure Pyrolysis. *J Anal Appl Pyrolysis* **2021**, 156, 105115. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105115>.
- (45) Huang, J.; Li, P.; Chen, S. Potential of Zero Charge and Surface Charging Relation of Metal-Solution Interphases from a Constant-Potential Jellium-Poisson-Boltzmann Model. *Phys Rev B* **2020**, 101 (12), 125422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.125422>.
- (46) Fiol, N.; Villaescusa, I. Determination of Sorbent Point Zero Charge: Usefulness in Sorption Studies. *Environ Chem Lett* **2009**, 7 (1), 79–84. <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0139-0>.
- (47) Wang, J.; Guo, X. Adsorption Isotherm Models: Classification, Physical Meaning, Application and Solving Method. *Chemosphere*. Elsevier Ltd November 1, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>.
- (48) Menkouchi Sahli, M. A.; Annouar, S.; Mountadar, M.; Soufiane, A.; Elmidaoui, A. Nitrate Removal of Brackish Underground Water by Chemical Adsorption and by Electrodialysis. *Desalination* **2008**, 227 (1–3), 327–333. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.021>.
- (49) Lavrenko, V. A.; Podchernyaeva, I. A.; Shchur, D. v.; Zolotarenko, A. D.; Zolotarenko, A. D. Features of Physical and Chemical Adsorption During Interaction of Polycrystalline and Nanocrystalline Materials with Gases. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* **2018**, 56 (9–10), 504–511. <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9922-z>.

- (50) Thommes, M.; Cychosz, K. A. Physical Adsorption Characterization of Nanoporous Materials: Progress and Challenges. *Adsorption* **2014**, *20* (2–3), 233–250. <https://doi.org/10.1007/s10450-014-9606-z>.
- (51) Al-Qodah, Z.; Yahya, M. A.; Al-Shannag, M. On the Performance of Bioadsorption Processes for Heavy Metal Ions Removal by Low-Cost Agricultural and Natural by-Products Bioadsorbent: A Review. *Desalination and Water Treatment*. Desalination Publications August 1, 2017, pp 339–357. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21256>.
- (52) Taşar, Ş.; Kaya, F.; Özer, A. Biosorption of Lead(II) Ions from Aqueous Solution by Peanut Shells: Equilibrium, Thermodynamic and Kinetic Studies. *J Environ Chem Eng* **2014**, *2* (2), 1018–1026. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.015>.
- (53) Momčilović, M.; Purenović, M.; Bojić, A.; Zarubica, A.; Randelović, M. Removal of Lead(II) Ions from Aqueous Solutions by Adsorption onto Pine Cone Activated Carbon. *Desalination* **2011**, *276* (1–3), 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.013>.
- (54) Dwivedi, N.; Balomajumder, C.; Mondal, P. Comparative Investigation on the Removal of Cyanide from Aqueous Solution Using Two Different Bioadsorbents. *Water Resour Ind* **2016**, *15*, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.06.002>.
- (55) Liang, C.; Shen, J. Removal of Yttrium from Rare-Earth Wastewater by *Serratia Marcescens*: Biosorption Optimization and Mechanisms Studies. *Sci Rep* **2022**, *12* (1), 4861. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08542-0>.
- (56) Wahab, M. A.; Jellali, S.; Jedidi, N. Ammonium Biosorption onto Sawdust: FTIR Analysis, Kinetics and Adsorption Isotherms Modeling. *Bioresour Technol* **2010**, *101* (14), 5070–5075. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.121>.
- (57) FENG, N.; GUO, X.; LIANG, S. Kinetic and Thermodynamic Studies on Biosorption of Cu(II) by Chemically Modified Orange Peel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **2009**, *19* (5), 1365–1370. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60451-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60451-3).
- (58) Guiza, S. Biosorption of Heavy Metal from Aqueous Solution Using Cellulosic Waste Orange Peel. *Ecol Eng* **2017**, *99*, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.043>.
- (59) Castellar-Ortega, G.; Mendoza Colina, E. D. J.; Angulo Mercado, E. R.; Paula Pereira, Z. A.; Rosso Bravo, M. C.; Jaramillo Colpas, J. E. Equilibrio, Cinética y Termodinámica de La Adsorción Del Colorante DB-86 Sobre Carbón Activado de La Cáscara de Yuca. *Rev MVZ Cordoba* **2019**, *24* (2), 7231–7238. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1700>.
- (60) Dubey, S. S.; Grandhi, S. Sorption Studies of Yttrium (III) Ions on Nano Maghemite. *J Environ Chem Eng* **2016**, *4* (4), 4719–4730. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.006>.
- (61) Khotimchenko, M.; Kovalev, V.; Khozhaenko, E.; Khotimchenko, R. Removal of Yttrium (III) Ions from Water Solutions by Alginate Compounds. *International Journal of Environmental Science and Technology* **2015**, *12* (10), 3107–3116. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0737-2>.

- (62) OZER, A. Removal of Pb(II) Ions from Aqueous Solutions by Sulphuric Acid-Treated Wheat Bran. *J Hazard Mater* **2007**, *141* (3), 753–761. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.040>.
- (63) Senthil Kumar, P.; Ramalingam, S.; Senthamarai, C.; Niranjanaa, M.; Vijayalakshmi, P.; Sivanesan, S. Adsorption of Dye from Aqueous Solution by Cashew Nut Shell: Studies on Equilibrium Isotherm, Kinetics and Thermodynamics of Interactions. *Desalination* **2010**, *261* (1–2), 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.032>.
- (64) Vitela Rodríguez, A. V. Remoción de Arsénico Por Medio de Carbón Activado Modificado Con Nanopartículas de Hidro (Óxidos) de Hierro, Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C., 2011.
- (65) George William Kajjumba, Serkan Emik, A. Ö.; Aydın, H. K. Ö. and S. We Are IntechOpen , the World ' s Leading Publisher of Open Access Books Built by Scientists , for Scientists. **2018**, No. November. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80495>.
- (66) Zimmermann, M. V. G.; Perondi, D.; Lazzari, L. K.; Godinho, M.; Zattera, A. J. Carbon Foam Production by Biomass Pyrolysis. *Journal of Porous Materials* **2020**, *27* (4), 1119–1125. <https://doi.org/10.1007/s10934-020-00888-y>.
- (67) Lazzari, L. K.; Zimmermann, M. V. G.; Perondi, D.; Zampieri, V. B.; Zattera, A. J.; Santana, R. M. C. Production of Carbon Foams from Rice Husk. *Materials Research* **2019**, *22* (suppl 1). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2019-0427>.
- (68) Ribeiro, B. T.; Maria De Lima, J.; Curi, N.; César De Oliveira, G.; Luiz, P.; Lima, T. *CARGAS SUPERFICIAIS DA FRAÇÃO ARGILA DE SOLOS INFLUENCIADAS PELA VINHAÇA E FÓSFORO*; 2011; Vol. 34.
- (69) Albis Arrieta, A.; Llanos Reales, H.; Galeano Gil, J.; García Moreno, D. Adsorción de Azul de Metileno Utilizando Cáscara de Yuca (Manihot Esculenta) Modificada Químicamente Con Ácido Oxálico. *Revista ION* **2019**, *31* (2), 99–110. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018007>.
- (70) Lapo, B.; Bou, J. J.; Hoyo, J.; Carrillo, M.; Peña, K.; Tzanov, T.; Sastre, A. M. A Potential Lignocellulosic Biomass Based on Banana Waste for Critical Rare Earths Recovery from Aqueous Solutions. *Environmental Pollution* **2020**, *264*, 114409. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114409>.
- (71) Krishnan, K. A.; Sreejalekshmi, K. G.; Baiju, R. S. Bioresource Technology Nickel (II) Adsorption onto Biomass Based Activated Carbon Obtained from Sugarcane Bagasse Pith. *Bioresour Technol* **2011**, *102* (22), 10239–10247. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.069>.
- (72) Burke, D. M.; Morris, M. A.; Holmes, J. D. Chemical Oxidation of Mesoporous Carbon Foams for Lead Ion Adsorption. *Sep Purif Technol* **2013**, *104*, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.10.049>.
- (73) Fernández Villalón, M.; Calzado Lamela, O.; Cascaret Carmenaty, D. A.; Pérez Silva, R. M. Factores de Mayor Influencia En La Adsorción de Metales Pesados Por Biomasa Seca de *Kluyveromyces Marxianus* CCEBI 2011. *Tecnología Química* **2018**, *38* (2), 335–345.

- (74) Zhang, Z.; Li, H.; Li, J.; Li, X.; Wang, Z.; Liu, X.; Zhang, L. A Novel Adsorbent of Core-Shell Construction of Chitosan-Cellulose Magnetic Carbon Foam: Synthesis, Characterization and Application to Remove Copper in Wastewater. *Chem Phys Lett* **2019**, *731*, 136573. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.07.001>.
- (75) Inga Manchola, P. A. Estudio Isotérmico de Biosorción de Cadmio, Cromo, Plomo y Zinc En Solución Acuosa Empleando El Pinzote (Raquis) de Plátano (*Musa Paradisiaca* L.), 2012.
- (76) Tan, I. A. W.; Chan, J. C.; Hameed, B. H.; Lim, L. L. P. Adsorption Behavior of Cadmium Ions onto Phosphoric Acid-Impregnated Microwave-Induced Mesoporous Activated Carbon. *Journal of Water Process Engineering* **2016**, *14*, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.10.007>.
- (77) Pintado Viveros, K. Aplicación de Nanofibras de Celulosa Oxidada Mediante Reactivo Tempo Para La Recuperación de Itrio En Fase Acuosa, Universidad Técnica de Machala, 2022.
- (78) Anagnostopoulos, V. A.; Symeopoulos, B. D. Sorption of Europium by Malt Spent Rootlets, a Low Cost Biosorbent: Effect of PH, Kinetics and Equilibrium Studies. *J Radioanal Nucl Chem* **2013**, *295* (1), 7–13. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1956-y>.
- (79) Liu, L.; Rao, Y.; Tian, C.; Huang, T.; Lu, J.; Zhang, M.; Han, M. Adsorption Performance of La(III) and Y(III) on Orange Peel: Impact of Experimental Variables, Isotherms, and Kinetics. *Adsorption Science & Technology* **2021**, *2021*, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/7189639>.
- (80) Li, S.; Yang, F.; Zhang, Y.; Lan, Y.; Cheng, K. Performance of Lead Ion Removal by the Three-Dimensional Carbon Foam Supported Nanoscale Zero-Valent Iron Composite. *J Clean Prod* **2020**, No. xxxx, 125350. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125350>.

ANEXOS



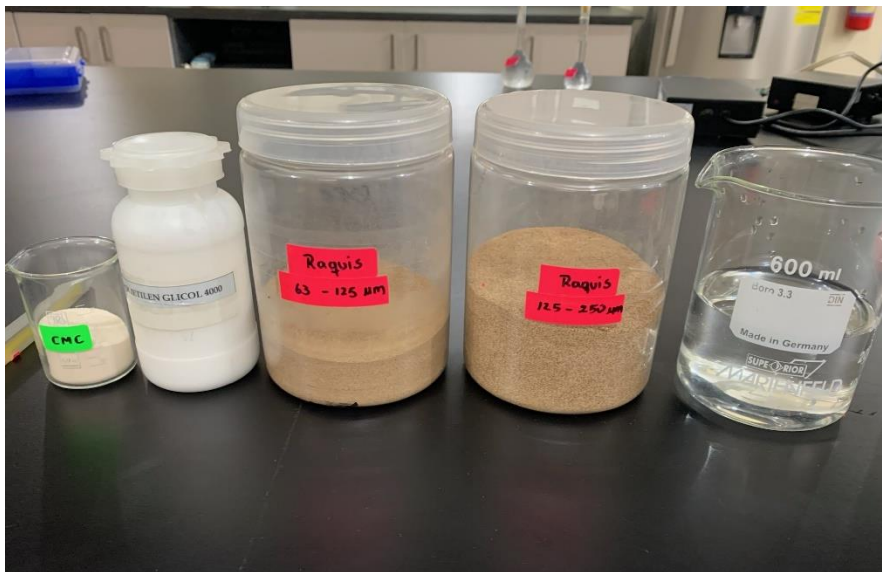
Anexo 1. Troceado y lavado del raquis de banano



Anexo 2. Raquis de banano secado en estufa de aire forzado



Anexo 3. Molienda del raquis de banano seco



Anexo 4. Materiales para la elaboración de las espumas de raquis



Anexo 5. Espumas de raquis de banano

MIC1



MIC2



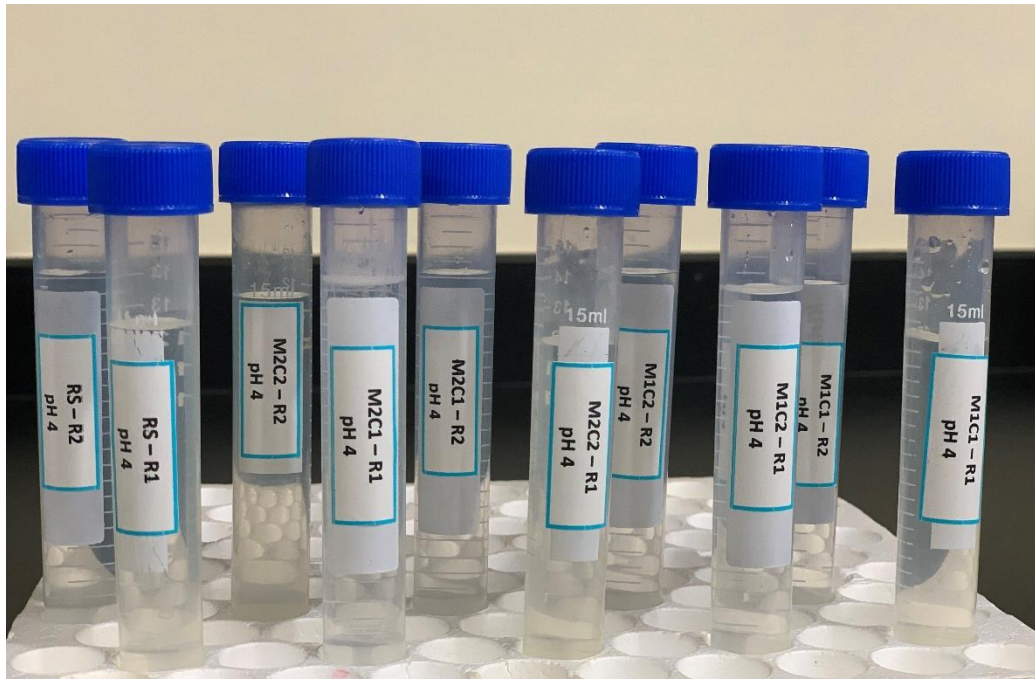
M2C1



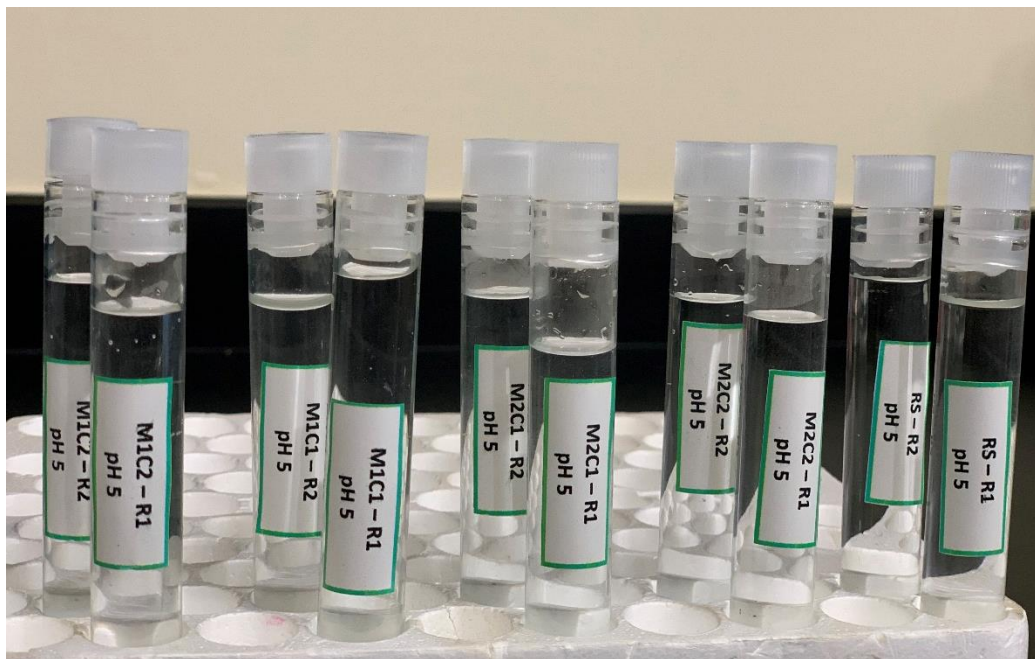
M2C2



Anexo 6. Espumas de carbón



Anexo 7. Muestras a pH 4, filtradas para mediciones en el ICP



Anexo 8. Muestras a pH 5, filtradas para mediciones en el ICP