

1-1-2017

Evaluación del biochar producido por pirólisis lenta como medio adsorbente de cinc, cobre, cromo y níquel

Héctor Felipe Hernández Morales
Universidad de La Salle, Bogotá

Esteban Felipe Piñeros Avendaño
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria

Citación recomendada

Hernández Morales, H. F., & Piñeros Avendaño, E. F. (2017). Evaluación del biochar producido por pirólisis lenta como medio adsorbente de cinc, cobre, cromo y níquel. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/345

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**EVALUACIÓN DEL BIOCHAR PRODUCIDO POR PIROLISIS LENTA COMO MEDIO
ADSORBENTE DE CINC, COBRE, CROMO Y NIQUEL**

**HECTOR FELIPE HERNÁNDEZ MORALES
ESTEBAN FELIPE PIÑEROS AVENDAÑO**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ D.C.
2017**

**EVALUACIÓN DEL BIOCHAR PRODUCIDO POR PIROLISIS LENTA COMO MEDIO
ADSORBENTE DE CINC, COBRE, CROMO Y NIQUEL**

**HECTOR FELIPE HERNÁNDEZ MORALES
ESTEBAN FELIPE PIÑEROS AVENDAÑO**

PROYECTO DE GRADO

**Director
JAIRO VANEGAS GORDILLO
Químico
Profesor Departamento Ciencias Básicas**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ D.C.
2017**

Notas de Aceptación:

Director:
Jairo Vanegas Gordillo

Firma Jurado 1:

Firma Jurado 2:

Bogotá D.C. 13 de enero de 2017

AGRADECIMIENTOS

En primera medida quiero agradecer a Dios por permitirme llegar a éste momento de mi vida, y por cada logro que he alcanzado, además quiero agradecerle a mi familia por estar conmigo en los momentos más importantes de mi vida y apoyarme en cada paso que he realizado. Mi compañero y amigo Esteban fue alguien muy importante a lo largo de mi carrera, además de dar este paso junto a mí, quiero agradecerle por lograr éste proyecto juntos. Por último quiero agradecer nuestro director Jairo Vanegas por acompañarnos y guiarnos en cada paso de este trabajo. Muchas gracias.

Héctor Felipe Hernández Morales

Gracias a la vida, a mis padres, a mi tía, a toda mi familia por apoyarme en este largo camino, siempre demostrándome el cariño y la confianza que se necesita en este largo viaje. A todos mis compañeros que a lo largo de la carrera aportaron un grano de arena para este logro. A Felipe Hernández, mi compañero y amigo, por este arduo trabajo y por su incondicionalidad. Finalmente un gran agradecimiento a Jairo Vanegas, nuestro director, quien nos guio a lo largo de la carrera y hoy culminamos con este gran paso. Muchas gracias.

Esteban Felipe Piñeros Avendaño

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN EJECUTIVO	10
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	11
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	11
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. OBJETIVOS.....	13
4.1. GENERAL	13
4.2. ESPECÍFICOS	13
5. MARCO DE REFERENCIA	14
5.1. MARCO CONCEPTUAL.....	14
5.2. MARCO TEÓRICO.....	15
6. METODOLOGÍA	19
6.1. Fase uno: Pretratamiento de la cascarilla y Producción del Biochar	20
6.2. Fase Dos: Proceso de remoción en función de su carga óptima.	22
6.3. Fase Tres: Proceso de remoción en función del tiempo de contacto.	23
6.4. Preparación de soluciones metálicas	24
6.4.1. Cinc	24
6.4.2. Cromo.....	24
6.4.3. Níquel	25
6.4.4. Cobre.....	25
6.5. Preparación y Estandarización del EDTA.....	25
6.6.1. Determinación de Cinc.....	28
6.6.2. Determinación de Cromo	28
6.6.3. Determinación de Níquel	28
6.6.4. Determinación de Cobre.....	28
7. RESULTADOS	28
7.1. FASE UNO	28
7.1.1. Obtención del Biochar.....	28
7.2. FASE DOS Determinación de carga optima de biochar	29
7.2.1. Cinc	30
7.2.2. Cromo.....	33
7.2.3. Cobre	39
7.2.4. Níquel	42
7.3. FASE TRES	46
7.3.1. Evaluación de Cinc con respecto al tiempo	46

7.3.2. Evaluación de Cromo con respecto al tiempo	47
7.3.3. Evaluación de Cobre con respecto al tiempo	50
7.3.4. Evaluación de Níquel con respecto al tiempo	51
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
9.1. Conclusiones	60
9.2. Recomendaciones	62
10. BIBLIOGRAFÍA.....	63

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Características de la cascarilla de arroz y biochar de cascarilla de arroz.....	22
Tabla 2. Proceso de remoción en función de carga óptima.....	23
Tabla 3. Proceso de remoción en función del tiempo de contacto.....	24
Tabla 4: Características organolépticas del Biochar	29
Tabla 5. Volumen de EDTA utilizado en Carbón Activado.	30
Tabla 6. Concentración de Cinc en Carbón Activado.....	31
Tabla 7. Concentración de Cinc removida en Carbón Activado.....	31
Tabla 8. Volumen de EDTA utilizado para la determinación de Cinc en Biochar.....	31
Tabla 9. Concentración de Cinc en Biochar.....	32
Tabla 10. Concentración promedio de Cinc en Biochar.	32
Tabla 11. Concentración de Cinc removida en Biochar.....	33
Tabla 12. Volumen de MnSO ₄ utilizado en la determinación de cromo en carbón activado.....	34
Tabla 13. Equivalentes de MnSO ₄ en la determinación de Cromo en carbón activado.	35
Tabla 14. Equivalentes de Cr, resultado de la diferencia de equivalentes de MnSO ₄ y equivalentes de EDTA.	35
Tabla 15. Concentración de cromo en carbón activado.	36
Tabla 16. Concentración de cromo removida por carbón activado.....	36
Tabla 17. Volumen de MnSO ₄ utilizado en la determinación de cromo por biochar.....	36
Tabla 18. Equivalentes de MnSO ₄ en la determinación de cromo por biochar.....	37
Tabla 19. Equivalentes de cromo en la determinación por biochar.	37
Tabla 20. Concentración de cromo en la determinación por biochar.....	38
Tabla 21. Concentración promedio de cromo en la determinación por biochar.	38
Tabla 22. Concentración de cromo removida por biochar.	38
Tabla 23. Volumen de EDTA utilizado en la determinación de Cobre en Carbón Activado.	40
Tabla 24. Concentración de Cobre en Carbón Activado.....	40
Tabla 25. Concentración de Cobre removida en Carbón Activado.....	40
Tabla 26. Volumen de EDTA utilizado para la determinación de Cobre en Biochar.....	41
Tabla 27. Concentración de Cobre en Biochar.	41
Tabla 28. Concentración promedio de Cobre en Biochar.	41
Tabla 29. Concentración de Cobre removida en Biochar.	42
Tabla 30. Volumen de EDTA utilizado para la determinación de Níquel en Carbón Activado. ...	43
Tabla 31. Concentración de Níquel en Carbón Activado.....	43
Tabla 32. Concentración de Níquel removida en Carbón Activado.	44
Tabla 33. Volumen de EDTA utilizado en la determinación de Níquel en Biochar.....	44
Tabla 34. Concentración de Níquel en Biochar.	44
Tabla 35. Concentración promedio de Níquel en Biochar.....	45
Tabla 36. Concentración de Níquel removida en Biochar.	45
Tabla 37. Volumen de EDTA en función del tiempo para la determinación de cinc	46
Tabla 38. Concentración de Cinc en función del tiempo.	46
Tabla 39. Concentración de Cinc removida en función del tiempo.	47
Tabla 40. Volumen de MnSO ₄ utilizado en la determinación de cromo en función del tiempo...	48
Tabla 41. Equivalentes de MnSO ₄ en la determinación de cromo en función del tiempo.	48
Tabla 42. Equivalentes de cromo en la determinación en función del tiempo.....	48
Tabla 43. Concentración de cromo en función del tiempo.	49
Tabla 44. Concentración de cromo removida en función del tiempo.	49

Tabla 45. Determinación de Cobre con respecto al tiempo.	50
Tabla 46. Concentración de Cobre en función del tiempo.	50
Tabla 47. Concentración de Cobre removida en función del tiempo.	51
Tabla 48. Determinación de Níquel en función del tiempo.	52
Tabla 49. Concentración de Níquel en función del tiempo.	52
Tabla 50. Concentración de Níquel removida en función del tiempo.	52

CONTENIDO DE GRÁFICAS

Grafica 1. Evaluación de Cinc para Biochar y Carbón Activado.	33
Grafica 2. Evaluación de cromo en función de la carga óptima.	39
Grafica 3. Evaluación de Cobre para Biochar y Carbón Activado.	42
Grafica 4. Evaluación de Níquel en Biochar y Carbón Activado.	45
Grafica 5. Evaluación del Cinc con respecto al tiempo.	47
Grafica 6. Evaluación del cromo en función del tiempo.	49
Grafica 7. Evaluación de remoción del Cobre con respecto al tiempo.	51
Grafica 8. Evaluación de Níquel en función del tiempo.	53
Grafica 9. Porcentaje de remoción de cinc en función de la carga.	54
Grafica 10. Porcentaje de remoción de cinc en función del tiempo.	55
Grafica 11. Porcentaje de remoción de níquel en función de la carga.	56
Grafica 12. Porcentaje de remoción de níquel en función del tiempo.	56
Grafica 13. Porcentaje de remoción de cobre en función de la carga.	57
Grafica 14. Porcentaje de remoción de cobre en función del tiempo.	58
Grafica 15. Porcentaje de remoción de cromo en función de la carga.	59
Grafica 16. Porcentaje de remoción de cromo en función del tiempo.	59

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Reacciones químicas a diferentes temperaturas en la pirolisis.	15
<i>Ilustración 2. Aplicación de los productos de la pirolisis rápida.</i>	16
Ilustración 3. Esquema de diferencia entre pirolisis lenta y rápida.	17
<i>Ilustración 4. Esquema de adsorción en Biochar.</i>	18
Ilustración 5. Mufla Thermolyne 1400 Furnace, con atmosfera y temperatura controlada.	20
Ilustración 6. Peso cascarilla de arroz.	21
Ilustración 7. Peso biochar.	29

INTRODUCCIÓN

Existen industrias que generan residuos orgánicos en gran cantidad y no se les da un manejo correcto, por lo que hay una suma considerable de residuos de este tipo, que pueden ser aprovechados y no lo son, específicamente residuos agroindustriales como la cascarilla de arroz, se ven grandes cantidades de este producto a lo que estas industrias generadoras no saben cómo reutilizar, por lo que se disponen de manera incorrecta.

Se busca evaluar un nuevo material sólido como medio adsorbente de metales pesados, este proyecto consiste en la producción de un material sólido altamente poroso y con un gran área superficial, generando una gran capacidad de adsorción de diferentes tipos de contaminantes, a partir de un residuo agroindustrial, mediante un proceso de pirólisis lenta con unas condiciones de presión y temperatura determinadas.

La producción de materiales adsorbentes y su empleo en problemas vinculados con la protección y el saneamiento ambiental se han visto notablemente incrementados en las últimas décadas por ser materiales que presentan una considerable capacidad de adsorción gracias a su estructura porosa altamente desarrollada que les confiere una gran superficie específica. Estos adsorbentes han demostrado resultar de utilidad en el tratamiento de efluentes en procesos industriales, y han sido propuestos por la EPA (Agencia de Protección Ambiental) para alcanzar niveles sanitarios admisibles de distintos contaminantes presentes en el agua. En particular, es interesante su aplicación en la remoción de iones metálicos pesados los cuales presentan efectos nocivos para los ecosistemas cuando su concentración excede los límites señalados por los entes reguladores.

Los materiales adsorbentes pueden obtenerse a partir de diversos precursores carbonosos, aunque usualmente se utilizan maderas, carbón mineral o cáscaras de coco. La creciente demanda de estos adsorbentes ha suscitado la búsqueda de nuevas fuentes de materias primas, de disponibilidad segura y bajo costo, centrándose la atención especialmente en los materiales biomásicos (lignocelulósicos) por su carácter renovable.

En el presente documento se evaluará la eficiencia de un nuevo material adsorbente producido a partir de pirólisis lenta para la remoción de metales pesados (cinc, níquel, cobre y cromo), y se hará la comparación frente al medio adsorbente comercial conocido como Carbón Activado. Para esto se preparan soluciones metálicas a partir de sales de los elementos de interés mencionados anteriormente, con una concentración definida, y se determinará la eficiencia de retención determinando la concentración final después de pasar por el medio adsorbente mediante titulación con EDTA.

1. RESUMEN EJECUTIVO

Además de darle una mejor disposición a los residuos que se generan en diferentes procesos industriales o agroindustriales Esta propuesta de investigación busca evaluar un nuevo material sólido como medio adsorbente de metales pesados, este proyecto consiste en la producción de un material sólido altamente poroso y con un gran área superficial, generando una gran capacidad de adsorción de diferentes tipos de contaminantes, a partir de un residuo agroindustrial, mediante un proceso de pirolisis lenta con unas condiciones de atmosfera y temperatura controladas, el cual será realizado en un equipo de pirolisis diseñado para la producción de biochar en el proyecto de doctorado en agro ciencias. El compuesto sólido obtenido se usa como adsorbente, que permite mediante un mecanismo de adsorción la retención de contaminantes (metales pesados). Se evaluará la carga de adsorbente óptima donde se tiene la mayor adsorción así como la adsorción en función del tiempo. Este estudio se basa en la implementación de un material poroso usado como lecho filtrante que favorece económicamente al sector de las pequeñas y medianas empresas (pymes) por sus bajos costos y facilidad e innovación tecnológica que además de ser eficiente promueve el aprovechamiento de residuos industriales y agroindustriales.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible la utilización de Biochar como material adsorbente de níquel, cinc, cobre y cromo?

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En muchos casos, las industrias que generan residuos orgánicos, agrónomos, agroindustriales y demás; a medida que su volumen aumenta, no hay claridad en cuanto a lo que se debe hacer con los mismos, en la mayoría de estos casos, los costos de disposición son considerables, por lo que la entidad prefiere deshacerse de ellos sin darles tratamiento alguno causando un gran impacto ambiental por su disposición final que en su mayoría es la incineración; Por lo que se hace necesario generar alternativas de aprovechamiento que permitan desarrollar materiales que se involucren en proceso industriales para establecer tecnologías limpias como lo es el tratamiento de aguas residuales generando una disminución en los costos de producción y procesos amigables con el medio ambiente. El desarrollo de sólidos adsorbentes a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de metales, es necesario para establecer su eficiencia y poder generar nuevas tecnologías en el tratamiento de aguas residuales.

3. JUSTIFICACIÓN

Con el fin de dar un manejo a los residuos agroindustriales que se generan en gran cantidad se producirá un material filtrante conocido como biochar, el cual es obtenido a partir del proceso de pirolisis lenta de biomasa, donde en el caso puntual se tratara de un residuo agroindustrial, de esta manera no solo se propone una nueva forma de disposición de los residuos si no la producción de nuevos materiales adsorbentes para establecer sistemas que permitan la remoción de metales en sistemas de tratamiento de aguas, disminuyendo el impacto ambiental y generado por los residuos agroindustriales así como los provenientes de industrias.

4. OBJETIVOS

4.1. GENERAL

Evaluar la utilización de biochar producido por pirolisis lenta como medio adsorbente para la remoción de metales pesados (cinc, níquel, cobre, cromo).

4.2. ESPECÍFICOS

- Obtener un nuevo material sólido, a usar como lecho filtrante conocido como biochar, a partir de cascarilla de arroz mediante el proceso de pirolisis lenta, a temperaturas de 450 °C, 550 °C y 650°C. Tiempo de residencia 2 horas.
- Determinar la carga de material adsorbente óptima para la remoción de metales, con diferentes cantidades de Biochar, para cada una de las temperaturas mencionadas anteriormente.
- Evaluar la adsorción de metales y la selectividad del adsorbente en función del tiempo basado en los resultados obtenidos en la determinación de la carga óptima de material adsorbente.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1. MARCO CONCEPTUAL

- Adsorción: Proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidos en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase. Como resultado de este proceso, se forma una capa de líquido o gas en la superficie de una sustancia sólida o líquida. (QuimiNet, 2011)
- Biochar: Es un derivado carbonado estable producido a partir de biomasa vegetal y/o animal por medio de pirolisis, para su aplicación en agricultura sostenible y tratamiento de aguas. (Refertil, 2014)
- Pirolisis: La pirolisis se define como un proceso termoquímico mediante el cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua. (Agrowaste, 2013)
- Contaminante: Una sustancia que se encuentra en un medio al cual no pertenece o que lo hace a niveles que pueden causar efectos (adversos) para la salud o el medio ambiente. (Green Facts, s.f.)
- Metales pesados: Son aquellos elementos metálicos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. (Thiel, s.f.)
- Residuo aprovechable: Es cualquier material, objeto, sustancia o elemento sólido que no tiene valor de uso para quien lo genere, pero que es susceptible de aprovechamiento para su reincorporación a un proceso productivo. (Ministerio Vivienda Ciudad y Territorio, 2013)
- Presión de Vacío: Se puede definir como la ausencia total de materia en un determinado sistema o lugar. (Hernández, 2011)
- Temperatura: La temperatura es una medida del calor o energía térmica de las partículas en una sustancia. (LEGACY, 2001)

5.2. MARCO TEÓRICO

- **La pirolisis**

La pirolisis se define como un proceso termoquímico donde un material orgánico sólido se descompone por la acción del calor, en una atmósfera sin presencia de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, y un material sólido con una gran capacidad de adsorción (AgroWaste, 2013). La finalidad de estos procesos se basa en obtener una mayor eficiencia energética mediante la generación de compuestos químicos secundarios y calor. El proceso de pirólisis tiene tres etapas definidas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la materia orgánica y, finalmente, la obtención e identificación de los productos (char, bio-aceite y gas). Existen diferentes tipos de pirólisis, cada una de ellas tiene diferentes condiciones en el proceso, lo cual favorece la generación de diferentes productos (Klug, 2012).

Ilustración 1 Reacciones químicas a diferentes temperaturas en la pirolisis.

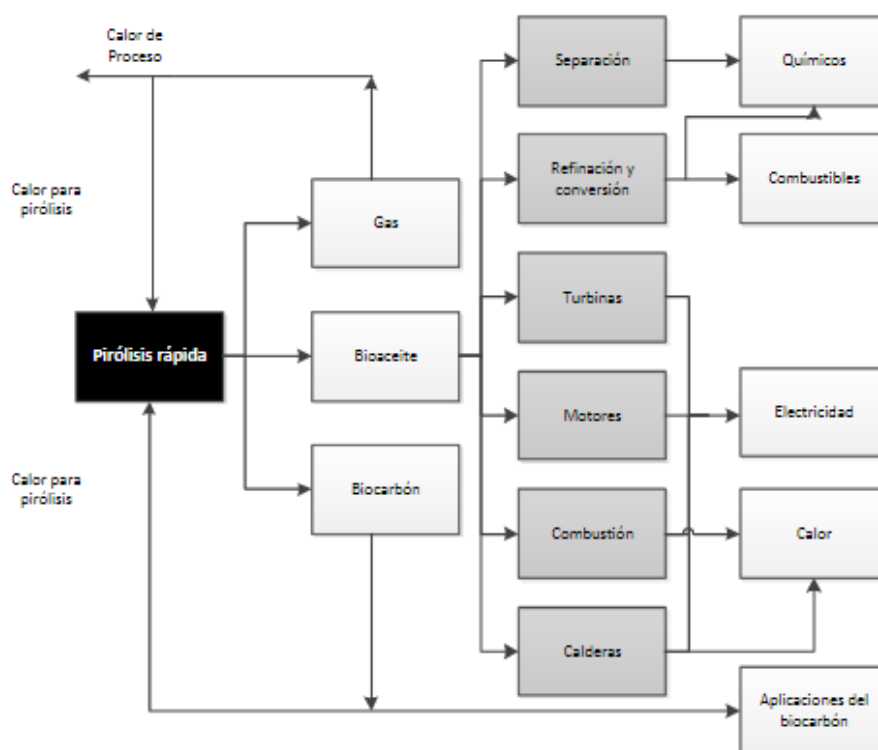
temperatura (rango °C)	Reacción Química
100-120	<u>deshidratación</u>
250	<u>desoxigenación y desulfurización</u> , disociación molecular de agua y dióxido de carbono. comienza la liberación de sulfuro de hidrógeno
340	<u>rotura de enlaces en compuestos alifáticos</u> , comienza la liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros
380	<u>fase de carbonización</u> . Concentración de carbón en los residuos
400	<u>rotura de enlaces C-O y C-N</u>
400-600	<u>descomposición de los materiales bituminosos</u> . generación de aceites y alquitranes. Carbonización de baja temperatura
600	<u>cracking de los materiales bituminosos</u> , generación de hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos (derivados del benceno)
>600	dimerización de las olefinas (etileno) a α -butileno; reacción de etileno a ciclohexano; generación de compuestos aromáticos volátiles.

Fuente: Cuevas, s.f.

La pirolisis convencional se realiza a bajas o medias temperaturas. Los procesos a bajas temperaturas son hasta los 550°C, y es usado frecuentemente para la producción de aceites y alquitranes; en tanto que los procesos a temperaturas medias se llevan a cabo entre los 550°C a 800°C, en donde se produce metano e hidrocarburos superiores. La pirolisis a altas temperaturas se efectúa a los 800°C o más, con lo cual se logra la producción de gas con bajo poder calorífico. Esta última pirolisis denominada pirolisis súbita o rápida, que se realiza en tiempos cortos y temperaturas altas (800°C-1.000°C), donde se obtiene una pequeña parte de material sólido (10%) y un 60% se convierte en gas rico en hidrógeno y monóxido de carbono. Esto hace que la pirolisis súbita pueda competir con los métodos de gasificación convencionales (Cuevas, s.f).

Pirolisis rápida: La pirolisis rápida es un proceso a alta temperatura donde la biomasa (con una humedad inferior al 10%) se calienta rápidamente (sin presencia de oxígeno). La biomasa se descompone generando vapores, aerosoles, y carbonizado en menor cantidad. Después del enfriamiento y la condensación de los vapores y aerosoles, se obtiene un líquido marrón oscuro con un poder calorífico de aproximadamente la mitad del aceite combustible convencional. Este proceso tiene como productos una porción entre 60-75% de líquido, 15-25% de sólidos, y 10-20% de gases no condensables, dependiendo de la materia prima utilizada, la temperatura y presión de operación, la velocidad de calentamiento, el tamaño de partícula de la biomasa, la configuración del reactor y la presencia de catalizadores (Montoya, 2014).

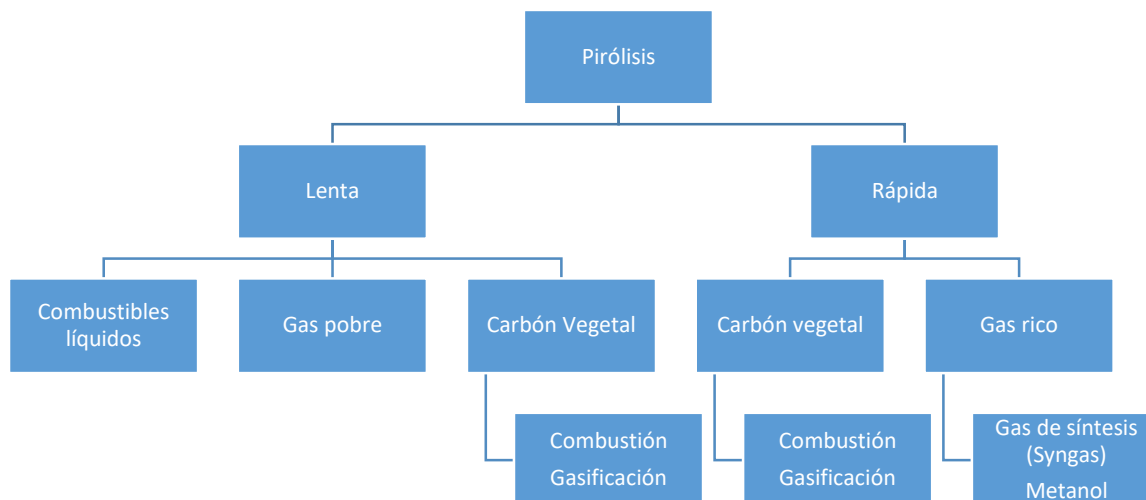
Ilustración 2. Aplicación de los productos de la pirolisis rápida.



Fuente: Montoya, 2014.

Pirolisis lenta: La pirolisis lenta se basa en la combustión parcial de la biomasa por calentamiento uniforme y lento (aproximadamente 0,01-2°C/seg) a temperaturas entre 450 y 650°C, en ausencia de oxígeno, donde se capturan los gases producidos para la obtención de syngas (combustible gaseoso), obteniendo aproximadamente un 40% de la biomasa original en char (AgroWaste, 2013). En la ilustración 3 se observan los productos generados por la pirolisis lenta y rápida.

Ilustración 3. Esquema de diferencia entre pirolisis lenta y rápida.



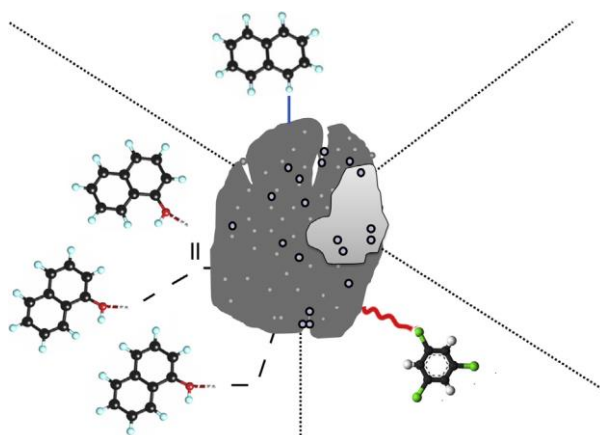
Fuente: Agrowaste, 2013.

- **Biochar**

Se trata de un producto de grano fino y poroso similar en apariencia al carbón vegetal. Se produce a partir de la transformación de distintos tipos de biomasa mediante el procedimiento de pirolisis, que consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica bajo un aporte de oxígeno limitado. (Abezna, 2012).

Normalmente, la superficie del Biochar posee una carga negativa, por lo que puede facilitar la atracción electrostática de compuestos orgánicos cargados. La sorción de contaminantes orgánicos del agua en el biochar se produce debido a su gran área superficial y micro porosidad (Yu et al, 2009; Yang et al, 2010; Lou et al., 2011). Los Biochar producidos a temperaturas mayores a 400°C son más eficaces para la adsorción de contaminantes orgánicos debido a su gran área superficial y el desarrollo de sus micro-poros. En general, los biochar producidos a temperaturas más altas exhiben una mayor eficiencia de adsorción para la remediación de contaminantes orgánicos en el suelo y el agua. Esto es probablemente debido a la alta área superficial y micro-porosidad de biochar. Como se muestra en la ilustración 4.

Ilustración 4. Esquema de adsorción en Biochar.



Fuente: Sik Ok (2014)

La temperatura en el proceso de generación de Biochar juega un papel muy importante, ya que al producirlo a temperaturas muy altas se puede generar una mayor cantidad de gases volátiles y muy poca área superficial, por lo que el rendimiento sería prácticamente nulo, por otro lado, a temperaturas que se encuentran dentro de los 400 y 600°C se ha encontrado que poseen un rendimiento constante, debido a que se genera un área superficial considerable y la capacidad de adsorción no se ve afectada. (Ahmad, et al, 2014)

- **Adsorción**

El fenómeno de adsorción es el proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidos en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase. Como resultado de este proceso, se forma una capa de líquido o gas en la superficie de una sustancia sólida o líquida (Environmental Protection Agency, s.f.).

El mecanismo exacto del proceso de adsorción depende de qué sustancias estén involucradas. La cantidad de material adsorbido depende de las tasas de adsorción y desorción de la sustancia, y del punto en el cual se alcance el equilibrio entre ambas. Cuanto mayor sea la adsorción y menor se la desorción, se encontrará mayor cantidad de material adsorbido en equilibrio (González, 2010).

Tipos de adsorción

Es posible diferenciar tres tipos de adsorción, dependiendo de qué tipos de fuerzas existan entre el soluto y el adsorbente. Estas fuerzas pueden ser de tipo eléctrico, de fuerzas de Van der Waals o de tipo químico (González, 2010).

Adsorción por intercambio. En este proceso el soluto y el adsorbente se atraen por fuerzas electrostáticas. Dicho de otra manera, los iones del soluto se concentran en la superficie del adsorbente, que se halla cargada eléctricamente con signo contrario a los iones del soluto. Si tenemos dos adsorbatos iónicos iguales en varios factores, pero uno con mayor carga que otro, el de mayor carga será el que se adsorbido. Para adsorbatos con igual carga, el tamaño molecular es el que determina cuál será adsorbido (González, 2010).

Adsorción por fuerzas de Van der Waals. También llamada adsorción física o fisisorción. En este tipo de adsorción, el adsorbato no está fijo en la superficie del adsorbente, sino que tiene movilidad en la interface. Ejemplo de este tipo de adsorción es el de la mayoría de las sustancias orgánicas en agua con carbón activado. En este tipo de adsorción el adsorbato conserva su naturaleza química.

Adsorción química. Sucede cuando hay interacción química entre adsorbato y adsorbente. También llamada quimisorción. La fuerza de la interacción entre adsorbato y adsorbente es fuerte, casi como un enlace químico. En este tipo de adsorción el adsorbato sufre una transformación, más o menos intensa, de su naturaleza química (González, 2010).

La mayoría de los fenómenos de adsorción son combinaciones de estos tres tipos de adsorción, y muchas veces resulta difícil distinguir la fisisorción de la quimisorción. Una de las más importantes aplicaciones del fenómeno de adsorción a nivel industrial, es de la extracción de humedad del aire comprimido. En este proceso se hace pasar el aire comprimido por un lecho de alúmina u otro material activo, que retiene las moléculas de agua por adsorción. (González, 2010).

La producción de materiales adsorbentes y su empleo en problemas vinculados con la protección y el saneamiento ambiental se han visto notablemente incrementados en las últimas décadas por ser materiales que presentan una considerable capacidad de adsorción gracias a su estructura porosa altamente desarrollada que les confiere una gran superficie específica. Estos adsorbentes han demostrado resultar de utilidad en el tratamiento de efluentes en procesos industriales, y han sido propuestos por la EPA (Agencia de Protección Ambiental) para alcanzar niveles sanitarios admisibles de distintos contaminantes presentes en el agua. En particular, es interesante su aplicación en la remoción de iones metálicos pesados los cuales presentan efectos nocivos para los ecosistemas cuando su concentración excede los límites señalados por los entes reguladores. (Periasamy y Namasivayam, 1994; Cuper, 1999).

Los materiales adsorbentes pueden obtenerse a partir de diversos precursores carbonosos, aunque usualmente se utilizan maderas, carbón mineral o cáscaras de coco. La creciente demanda de estos adsorbentes ha suscitado la búsqueda de nuevas fuentes de materias primas, de disponibilidad segura y bajo costo, centrándose la atención especialmente en los materiales biomásicos (lignocelulósicos) por su carácter renovable. En este sentido, varios residuos agroindustriales, tales como cáscaras de nueces, carozos de frutas, bagazo de caña de azúcar, cascarilla de arroz, aserrín y cortezas de algunas especies de crecimiento rápido, han sido recientemente investigados como posibles precursores mediante diferentes métodos de pirolisis (Periasamy y Namasivayam, 1994; Cuper, 1999).

6. METODOLOGÍA

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos se diseñaron tres (3) fases en las que se especifica en cada una como se realizará la parte experimental del proyecto, desde la fase de preparación de la cascarilla, producción del Biochar y evaluación de la retención de los metales.

6.1. Fase uno: Pretratamiento de la cascarilla y Producción del Biochar

- Adquisición y tratamiento del residuo

El residuo utilizado será cascarilla de arroz por su alto contenido en celulosa y hemicelulosa, se utilizó cascarilla comercial la cual se secó en una estufa de aire forzado a 105 °C durante 24 horas hasta peso constante obteniendo así el peso seco de la biomasa, esta se tritura y tamiza por malla 100 para ser utilizada en el proceso de pirolisis lenta.

- Producción de biochar

El biochar se obtendrá por la tecnología de Pirolisis Lenta a temperaturas de 450 °C, 550 °C y 650°C en una atmosfera controlada de oxígeno , tiempos de reacción de 3 horas y una velocidad de calentamiento de 5°C/min. En el equipo, mufla Thermolyne 1400 Furnace.

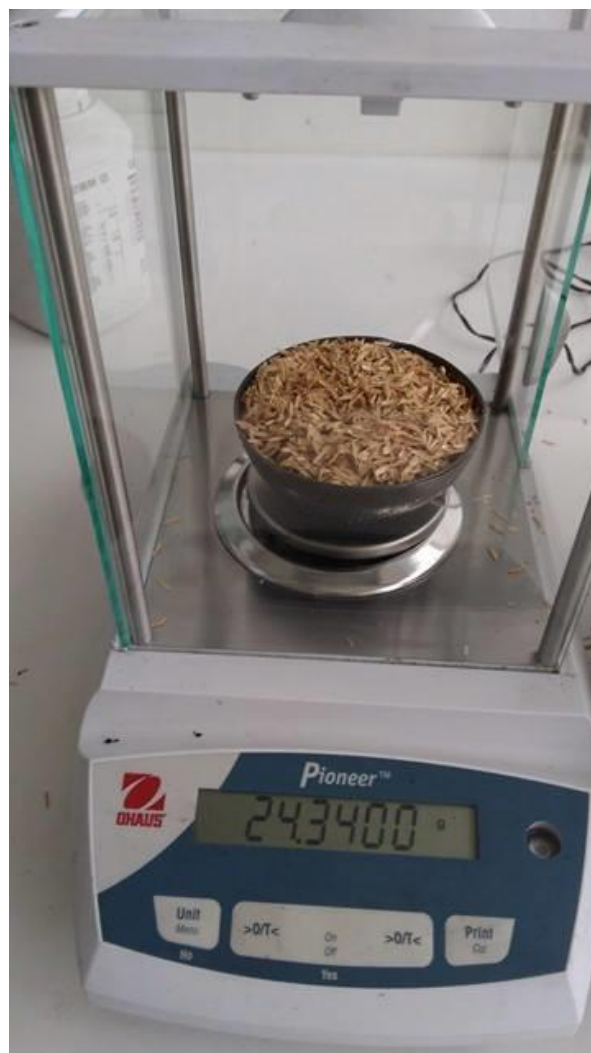
Para el procedimiento se pesan 25 gramos de cascarilla de arroz en una capsula de porcelana y se colocan en la mufla y se calienta a una velocidad de 5 °C/min hasta alcanzar la temperatura deseada, esta temperatura se mantiene hasta completar las 3 horas de calentamiento, cumplido el tiempo, se saca y se coloca en un desecador para dejar enfriar, se pesa y se determinan los rendimientos de obtención del biochar.

Ilustración 5. Mufla Thermolyne 1400 Furnace, con atmosfera y temperatura controlada.



Fuente: Autores

Ilustración 6. Peso cascarilla de arroz.



Fuente: Autores

- Caracterización del Biochar

Como el interés del trabajo es evaluar la retención de metales por el biochar en función de la temperatura de obtención y del tiempo contacto, la caracterización del biochar será reportada teóricamente por los diferentes autores a partir de cascarilla de arroz. Entre los cuales tenemos los reportados por Varela Milla et al, en su artículo *“Agronomic properties and characterization of rice husk and wood biochars and their effect on the growth of water spinach in a field test”* de Taiwan, que reporta la siguientes características tanto de la cascarilla como del biochar producido a partir de cascarilla de arroz.

Tabla 1. Características de la cascarilla de arroz y biochar de cascarilla de arroz.

	Elements evaluated	Fresh rice husk	Rice husk biochar
Characteristics of materials	T (°C)	-	300 - 350
	Si (mg/kg)	107	171
	Ca (mg/kg)	108	220
	K (mg/kg)	9523	175
	Mg (mg/kg)	175	182
	Water (%)	11.3	3.9
	Ash (%)	12.63	50.53
	pH (%)	6.41	8.02
Elemental analysis	Fixed C (mg)	-	43.73
	H (mg)	-	2.38
	N (mg)	-	1.0
	S (mg)	-	0.19
	O (mg)	-	2.36
	Volatile	2.42	1.86
VM	Matter (%)		
BET	Surface Area		
	Analysis (m ²)	-	2.21

Fuente: Varela et al (2013)

El análisis muestra que el biochar a partir de cascarilla de arroz presenta altos contenidos de sílice, potasio, calcio, carbón y un alto grado de macro porosidad (Varela, Rivera, Huang, Chien, & Wang, 2013). Sin embargo, es necesario tener en cuenta que para el estudio realizado por Varela, las temperaturas de obtención de biochar fueron de 300 a 350 °C, por lo cual estos resultados varían para los biochar del presente estudio, sin embargo son tomados como datos base y de interés.

6.2. Fase Dos: Proceso de remoción en función de su carga óptima.

- Evaluación de carga óptima:

Para la evaluación de la carga óptima de biochar se realizaran ensayos variando la cantidad en gramos de biochar, obtenido a 450 ° C. Tomando 1g, 2g, 3g, 4g y 5g en Erlenmeyer, se adicionan 200 ml de soluciones de los metales de interés con una concentración de 200 ppm y se deja en agitación durante 1 hora, transcurrido este tiempo se filtra y se determina la concentración final para cada uno de los metales mediante titulación con EDTA, estos ensayos se realizan por triplicado para obtener un promedio.

Este procedimiento se repite para los biochar producidos a 550°C y 650°C, y con la sustancia control que es carbón activado comercial, como se muestra en la tabla 2.

Las sales de los metales de interés utilizadas fueron Nitrato de Zinc $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, Nitrato de Cobre $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, Nitrato de Cromo $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ y Cloruro de Níquel NiCl_2 . Se escogieron estas sales por disponibilidad en el laboratorio y por ser las sales que se usan en los procesos industriales de recubrimientos electrolíticos, la concentración de 200 ppm se estableció por ser la concentración promedio en aguas residuales en los procesos industriales mencionados.

Tabla 2. Proceso de remoción en función de carga óptima.

Metal	Biochar 450°C					Biochar 550°C					Biochar 650°C					Carbón Activado									
	1g	2g	3g	4g	5g	1g	2g	3g	4g	5g	1g	2g	3g	4g	5g	1g	2g	3g	4g	5g					
NiCl_2																									
$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$																									
$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$																									
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$																									

Fuente: Autores.

Para determinar donde se presenta la mayor adsorción, se realizara una curva de Concentración (ppm) vs. Carga (gramos), donde se graficaran cada uno de los resultados medios de cada ensayo de carga (1g, 2g, 3g, 4g y 5g) de biochar a diferente temperatura de producción y Carbón activado. De esta manera se determinará la cantidad adecuada de Biochar que debe ser usada según su temperatura de producción y cada uno de los iones metálicos a evaluar.

6.3. Fase Tres: Proceso de remoción en función del tiempo de contacto.

- Evaluación de la adsorción en función del tiempo

Para la evaluación de la adsorción en función del tiempo, serán tenidos en cuenta los resultados de carga óptima de biochar (y carbón activado), donde se ha establecido cual es la cantidad optima de cada uno de los medios, donde se presenta la mayor adsorción de los diferente iones metálicos. La determinación de la adsorción de los iones metálicos en biochar en función del tiempo se realizara ensayos manteniendo la carga de biochar producido a 450 °C constante y variando el tiempo de contacto desde 20 minutos hasta 180 minutos.

Para su procedimiento, se adiciona la cantidad de biochar optimo en un Erlenmeyer, se adicionan 200 ml de soluciones de los metales de interés con una concentración de 200 ppm y se agita durante el tiempo establecido, transcurrido este tiempo se filtra y se determina la concentración final para cada uno de los metales mediante titulación con EDTA, estos ensayos se realizan por triplicado para obtener un promedio.

Este procedimiento se repite para los biochar producidos a 550°C y 650°C, y con la sustancia control que es carbón activado comercial, como se muestra en la tabla 3

Tabla 3. Proceso de remoción en función del tiempo de contacto.

Metal	Biochar 450°C						Biochar 550°C						Biochar 650°C						Carbon Activado																			
	Tiempo (min)						Tiempo (min)						Tiempo (min)						Tiempo (min)																			
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	20	40	60	80	100	120	140	160	180	20	40	60	80	100	120	140	160	180	20	40	60	80	100	120	140	160	180		
Ni(NO ₃) ₂																																						
Cr(NO ₃) ₃																																						
Cu(NO ₃) ₂																																						
Zn(NO ₃) ₂																																						

Fuente: Autores.

Una vez obtenidos los resultados para cada tiempo determinado y Biochar a diferente temperatura de producción, se elaborara una curva de Concentración (ppm) vs. Tiempo (min), para establecer la adsorción en función del tiempo de adsorción de cada uno de los contaminantes criterios.

6.4. Preparación de soluciones metálicas

La selección de las sales metálicas se basó en la disponibilidad de las mismas por parte de los laboratorios de la Universidad de La Salle, además la solubilidad de cada una de estas, permite que el proceso de determinación por titulación con EDTA se realice de manera satisfactoria y son las sales que se usan en los procesos industriales de cobrizado, cincado, cromado y niquelado. Las concentraciones de las soluciones son de 200 ppm por ser la concentración promedio en las aguas residuales de los procesos industriales mencionados. Y estas fueron preparadas de la siguiente manera:

6.4.1. Cinc

Para la determinación de cinc se utilizó una solución de Nitrato de Zinc Zn(NO₃)₂, las 200ppm de Zinc fueron obtenidas de la siguiente manera:

$$\frac{200 \text{ mg Zn}}{L} * \frac{189,36 \text{ mg (Zn(NO}_3)_2)}{65,3 \text{ mg Zn}} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0,579 \text{ gr}$$

Se pesaron 0,579 gramos de Nitrato de Zinc en forma sólida, se disolvieron en 500 ml de agua destilada, una vez disuelta completamente se transfiere a un balón aforado de 1L y se completa el volumen con agua destilada.

6.4.2. Cromo

Para la determinación de cromo se utilizó una solución de Nitrato de Cromo Cr(NO₃)₃, las 200ppm de Cromo fueron obtenidas de la siguiente manera:

$$\frac{200 \text{ mg Cr}}{L} * \frac{238,01 \text{ mg (Cr(NO}_3)_3)}{52 \text{ mg Cr}} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0,915 \text{ gr}$$

Se pesan 0,915 gramos de Nitrato de Cromo en forma sólida, se disolvieron en 500 ml de agua destilada, una vez disuelta completamente se transfiere a un balón aforado de un litro y se completa el volumen con agua destilada.

6.4.3. Níquel

Para la determinación de níquel se utilizó una solución de Cloruro de Níquel NiCl₂, las 200ppm de Níquel fueron obtenidas de la siguiente manera:

$$\frac{200 \text{ mg Ni}}{L} * \frac{129,6 \text{ mg (NiCl}_2\text{)}}{58,69 \text{ mg Ni}} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0,442 \text{ gr}$$

Se pesaron 0,442 gramos de Cloruro de Níquel en forma sólida, se disolvieron en 500 ml de agua destilada, una vez disuelta completamente se transfiere a un balón aforado de un litro y se completa el volumen con agua destilada.

6.4.4. Cobre

Para la determinación de cinc se utilizó una solución de Nitrato de Cobre Cu(NO₃)₂, las 200ppm de Cobre fueron obtenidas de la siguiente manera:

$$\frac{200 \text{ mg Cu}}{L} * \frac{187,56 \text{ mg (Cu(NO}_3\text{)}_2\text{)}}{51,99 \text{ mg Cu}} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0,721 \text{ gr}$$

Se pesaron 0,442 gramos de Cloruro de Níquel en forma sólida, se disolvieron en 500 ml de agua destilada, una vez disuelta completamente se transfiere a un balón aforado de un litro y se completa el volumen con agua destilada.

6.5. Preparación y Estandarización del EDTA

- Preparación del EDTA

Se realizaron los cálculos para preparar una solución de la sal di sódica del ácido etilendiamino tretra acético. Así se pesaron 186,13 gramos de sal y se disolvieron en 500 ml de agua destilada, una vez disuelta completamente se transfiere a un balón aforado de un litro y se completa el volumen con agua destilada.

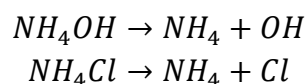
- Estandarización del EDTA

La solución de EDTA fue estandarizada usando carbonato de calcio como patrón estándar siguiendo el siguiente procedimiento. se pesaron 0,5 gr de patrón primario (CaCO₃) se disuelven en 50 ml de agua ligeramente acidula con ácido clorhídrico, una vez disuelto el carbonato de calcio se transfiere a un balón aforado de 100 ml y se completa el volumen con agua destilada, se toman 20 de esta solución en un Erlenmeyer de 250 ml, y se le adiciona 20 ml de agua destilada, 10 ml

de solución buffer de pH 10, 20 ml de hidróxido de amonio a 10% y 3 ml de indicador negro de eriocromo t, titular con la solución de EDTA hasta que la solución cambie de color rojo a azul. En la estandarización la concentración real de la solución de EDTA es 1,33 N como se muestra en los resultados de estandarización del EDTA.

- Preparación Solución Buffer pH 10

Se entiende una solución buffer como una solución que tiene la capacidad de mantener el pH de una muestra de manera constante (Pontificia Universidad Católica del Perú, s.f.). La preparación de esta fue realizada con una mezcla de Hidróxido de Amonio (NH_4OH) y Cloruro de Amonio (NH_4Cl).



Para el caso concreto fue necesario un pH 10, donde se entiende el pH como la concentración de los iones hidrogeno en una solución determinada. Así mismo, la concentración de iones hidróxidos, está dada por el pOH, donde la sumatoria de pH y pOH dentro de una solución, debe ser igual a 14 unidades, entonces:

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 10 \\ \text{pH} + \text{pOH} &= 14 \\ \text{pOH} &= 14 - 10 \\ \text{pOH} &= 4 \\ [\text{OH}] &= 10^{-4} \\ [\text{OH}] &= 1 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Donde:

$[\text{OH}] = \text{Concentración de OH}$

De la misma manera, es relevante para la preparación de la solución determinar la cantidad necesaria de cada uno de los compuestos, para esto recurrimos al concepto de la constante de basicidad (K_b), que se trata de la medida de fuerza de una base débil, y para el caso concreto se expresa de la siguiente manera:

$$K_b = \frac{[\text{NH}_4][\text{OH}]}{[\text{NH}_4\text{OH}]}$$

Donde:

$K_b = \text{Constante de basicidad del Hidróxido de Amonio } (1,8 \times 10^{-5})$

$[\text{NH}_4] = \text{Concentración de Amonio}$

$[\text{OH}] = \text{Concentración de Hidróxido}$

$[\text{NH}_4\text{OH}] = \text{Concentración de Hidróxido de Amonio}$

$$\frac{K_b [NH_4OH]}{[NH_4]} = [OH]$$

$$\frac{[base]}{[sal]} = \frac{[OH]}{K_b}$$

Donde:

[Base] = Concentración de Hidróxido de Amonio

[Sal] = Concentración de Cloruro de Amonio

Teniendo en cuenta la ecuación anterior como la solución buffer es de pH 10 la concentración de iones hidroxilo (OH) es de 1×10^{-4} y la constante de disociación de la base a usar que es el hidróxido de amonio (NH_4OH) es $1,8 \times 10^{-5}$ reemplazamos en la ecuación para encontrar la relación entre la base a usar y su correspondiente sal, así:

$$\frac{[base]}{[sal]} = \frac{1 \times 10^{-4}}{1,8 \times 10^{-5}}$$

$$5,55 = \frac{[base]}{[sal]}$$

$$5,55 = \frac{0,55 \text{ mol base}}{0,1 \text{ mol sal}}$$

Esto nos indica que para preparar un litro de la solución buffer debemos usar 0,55 moles de base (NH_4OH) y 0,1 moles de su sal (NH_4Cl)

$$0,55 \text{ mol } NH_4OH * \frac{35 \text{ gr } NH_4OH}{1 \text{ mol } NH_4OH} * \frac{100}{25} = 77 \text{ gr}$$

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \rightarrow \text{Volumen} = \frac{\text{masa}}{\rho}$$

$$\text{Volumen} = \frac{77 \text{ gr}}{0,91 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = 84,61 \text{ ml } NH_4OH$$

$$0,1 \text{ mol } NH_4Cl * \frac{53,5 \text{ gr } NH_4Cl}{1 \text{ mol}} = 5,35 \text{ gr } NH_4Cl$$

Se pesaron 5,35 gramos de cloruro de amonio y se tomaron 84,61 ml de hidróxido de sodio del 25 % y se disolvieron en 500 ml de agua destilada, una vez disueltas las sustancias se transfieren a un balón aforado de un litro y se completa el volumen con agua destilada y obtenemos la solución buffer de pH 10.

- Resultados estandarización del EDTA

Fueron necesarios 1,5 ml de EDTA para alcanzar el viraje de rojo a azul. Entonces:

$$0,5 \text{ gr } \frac{\text{CaCO}_3}{100\text{ml}} * \frac{40 \text{ gr Ca}}{100 \text{ gr CaCO}_3} * \frac{2 \text{ eq}}{40 \text{ gr Ca}} * 20\text{ml} = 0,002 \text{ eq}$$

$$Eq \text{ CaCO}_3 = Eq \text{ EDTA}$$

$$N \text{ EDTA} = \frac{Eq \text{ EDTA}}{V \text{ EDTA}} = \frac{0,002 \text{ eq}}{0,0015\text{L}} = 1,33\text{N}$$

Siendo finalmente 1,33N la concentración del EDTA utilizado para la determinación de adsorción de metales en el Carbón Activado y biochar.

6.6 Determinación de las concentraciones de las soluciones madres de los iones metálicos

6.6.1. Determinación de Cinc

Tomar una alícuota de 25 ml de la solución madre de Nitrato de Cinc $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, se neutraliza la solución con Hidróxido de amonio, añadir 10 ml de solución buffer de pH 10, inmediatamente agregar 3 ml de solución de negro eriocromo T al 0,2 %, y titular con EDTA hasta que haya viraje de rojo a azul (Welcher, 1958).

6.6.2. Determinación de Cromo

Tomar 10 ml de la solución de Nitrato de Cromo $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$, agregar 20 ml de EDTA (0,1M), determinar el pH de la muestra, si es necesario neutralizar la solución a pH entre 7 y 8, dejar que reaccione durante 2 a 5 minutos y titular el exceso de EDTA con una solución de Sulfato de Manganeso II (MnSO_4) al 0,1 M (Welcher, 1958).

6.6.3. Determinación de Níquel

Tomar 20 ml de la solución de Cloruro de Níquel (NiCl_2), adicionar 1 ml de Amoniaco al 10% y una pequeña cantidad de Murexida como indicador. Titular con EDTA hasta que la solución cambie de color amarillo/dorado a violeta (Welcher, 1958).

6.6.4. Determinación de Cobre

Tomar una alícuota de 20 ml de la solución de Nitrato de Cobre $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y agregarlo en un Erlenmeyer. Añadir 1 ml de amoniaco al 10% hasta que el color de la solución cambie a azul, una pequeña cantidad de Murexida, valorar con solución de EDTA hasta que el color cambie de amarillo/dorado a violeta (Welcher, 1958).

Estos procedimientos se repiten para la determinación de las concentraciones finales de las soluciones de iones metálicos tanto en la fase dos como en la fase tres.

7. RESULTADOS

7.1. FASE UNO

7.1.1. Obtención del Biochar

El biochar a temperaturas de 450, 550 y 650 °C, fue obtenido en el laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad de La Salle, la mufla Thermolyne 1400 Furnace, con atmosfera y temperatura

controlada. Como se especificó en la metodología, se utilizan 25gr de cascarilla de arroz para finalmente obtener entre 7 y 8 gr de Biochar, es decir se obtiene un rendimiento en la obtención entre el 25 y 35%, valor que coincide con los datos reportados en la literatura para la pirolisis lenta.

Ilustración 7. Peso biochar.



Fuente: Autores.

Características organolépticas del biochar

Se realizó un análisis de color y textura al tacto de los biochar producidos a diferentes temperaturas, que se muestran en la tabla 4. El cual muestra que a temperatura de 650 °C la granulometría cambia así como el color

Tabla 4: Características organolépticas del Biochar

Temperatura (°C)	Características	
	Color	Textura
450	Negro	Rugoso
550	Negro	Rugoso
650	Gris	Fino

Fuente: Autores

7.2. FASE DOS Determinación de carga optima de biochar

En esta fase se evalúa la cantidad de medio adsorbente más eficiente para la remoción de los iones metálicos a evaluar. Es necesario aclarar que para la preparación del EDTA se utilizó sal sódica, debido a la disponibilidad de ésta en los laboratorios de la Universidad de La Salle, así mismo la

concentración de la solución madre se tendrá en cuenta como concentración inicial para todos los cálculos de cada uno de los metales, respectivamente.

7.2.1. Cinc

Como se propuso en la metodología, la solución madre de Nitrato de Cinc se puso en contacto con cada una de las cargas de biochar (450, 550, y 650°C) y carbón activado (1, 2, 3, 4 y 5 gramos de cada medio), y se realizó el filtrado de cada uno de estos, con el fin de determinar la cantidad de EDTA a utilizar para la titulación, como se muestra a continuación. Los resultados de concentración para la solución madre usada para el carbón activado es la misma que se tiene en cuenta para el biochar.

Para el cálculo de concentración fueron tenidos en cuenta la cantidad total de mililitros de EDTA utilizados, la normalidad del EDTA, el peso atómico del cinc y los equivalentes de este. Como se muestra en la siguiente memoria de cálculo:

$$5,9 \text{ ml} * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} * 1,33 \frac{\text{eq}}{\text{L}} * 65,38 \frac{\text{g}}{2\text{eq}} = 0,25652\text{g} * \frac{1000\text{mg}}{1\text{g}} = \frac{256,52\text{mg}}{\text{L}}$$

El resultado obtenido es dado en concentración (mg/L), pues los datos presentados fueron siempre en referencia al volumen total de la solución metálica (1L).

Tabla 5. Volumen de EDTA utilizado en Carbón Activado.

NITRATO DE CINC			
<i>Evaluación de carbón activado</i>	<i>Volumen de EDTA utilizado (ml)</i>		
Solución madre	5,9	6,0	5,9
Solución en 1 gramo	4,1	3,9	4,0
Solución en 2 gramos	2,7	2,5	2,7
Solución en 3 gramos	2,6	2,4	2,5
Solución en 4 gramos	2,2	1,8	2,0
Solución en 5 gramos	1,6	1,2	1,4

Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos en la tabla 5 y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta, se muestran en la tabla 6 las concentraciones promedio en ppm para cada uno de los iones metálicos evaluados.

Tabla 6. Concentración de Cinc en Carbón Activado.

<i>Evaluación de carbón activado</i>	<i>Concentración de Cinc (mg/L)</i>			<i>Concentración promedio de Cinc (mg/L)</i>
Solución madre	256,52	260,87	256,52	258,0
Solución en 1 gramo	178,26	169,56	173,91	173,9
Solución en 2 gramos	117,39	108,69	117,39	114,5
Solución en 3 gramos	113,04	104,35	108,69	108,7
Solución en 4 gramos	95,65	78,26	86,96	87,0
Solución en 5 gramos	69,56	52,17	60,87	60,9

Fuente: Autores

En la tabla 7 se muestra la concentración en ppm removida en cada una de las soluciones obtenida mediante la diferencia entre la concentración de la solución madre y la concentración promedio en cada una de las cargas de carbón activado.

Tabla 7. Concentración de Cinc removida en Carbón Activado.

<i>Evaluación de carbón activado</i>	<i>Con. removida (mg/L)</i>
Solución madre	258,0
Solución en 1 gramo	84,1
Solución en 2 gramos	143,5
Solución en 3 gramos	149,3
Solución en 4 gramos	171,0
Solución en 5 gramos	197,1

Fuente: Autores

En la tabla 8 se muestra los volúmenes de EDTA (en ml) utilizada para la titulación, del ion metálico cinc, cuando se usa biochar como medio adsorbente. Se tiene en cuenta la misma metodología usada para el carbón activado

Tabla 8. Volumen de EDTA utilizado para la determinación de Cinc en Biochar.

NITRATO DE CINC									
<i>Evaluación de Biochar</i>	<i>Volumen de EDTA utilizado (ml)</i>								
	<i>450°C</i>			<i>550°C</i>			<i>650°C</i>		
Solución en 1 gramo	1,5	1,5	1,8	2,0	2,0	2,1	2,0	1,8	2,1
Solución en 2 gramos	2,8	3,0	2,5	2,0	2,1	2,2	2,4	2,3	2,2
Solución en 3 gramos	1,5	1,5	1,4	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0
Solución en 4 gramos	1,4	1,3	1,3	1,8	1,7	1,6	1,8	1,7	1,9
Solución en 5 gramos	1,2	1,2	1,1	1,7	1,8	2,0	1,6	1,5	1,4

Fuente: Autores

En la tabla 9 Con base en los resultados obtenidos en la tabla 8 y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta, se muestran los resultados de concentración de cinc en los diferente biochar producidos a diferentes temperaturas y en la tabla 10 las concentraciones promedios a las respectivas temperaturas de producción.

Tabla 9. Concentración de Cinc en Biochar.

NITRATO DE CINC									
Evaluación de Biochar	Concentración de Cinc (mg/L)								
	450°C			550°C			650°C		
Solución en 1 gramo	65,22	65,22	78,26	86,96	86,96	91,30	86,96	78,26	91,30
Solución en 2 gramos	121,74	130,43	108,69	86,96	91,30	95,65	104,35	100,00	95,65
Solución en 3 gramos	65,22	65,22	60,87	82,61	82,61	86,96	86,96	86,96	86,96
Solución en 4 gramos	60,87	56,52	56,52	78,26	73,91	69,56	78,26	73,91	82,61
Solución en 5 gramos	52,17	52,17	47,83	73,91	78,26	86,96	69,56	65,22	60,87

Fuente: Autores

Tabla 10. Concentración promedio de Cinc en Biochar.

Evaluación de Cinc	Concentración promedio de Cinc (mg/L)		
	450°C	550°C	650°C
Temperatura			
Solución en 1 gramo	69,56	88,40	85,51
Solución en 2 gramos	120,29	91,30	100,00
Solución en 3 gramos	63,77	84,06	86,96
Solución en 4 gramos	57,97	73,91	78,26
Solución en 5 gramos	50,72	79,71	65,22

Fuente: Autores

En la tabla 11 se muestra la concentración de cinc en ppm removida en cada una de las soluciones obtenida mediante la diferencia entre la concentración de la solución madre y la concentración promedio en cada una de las cargas de biochar.

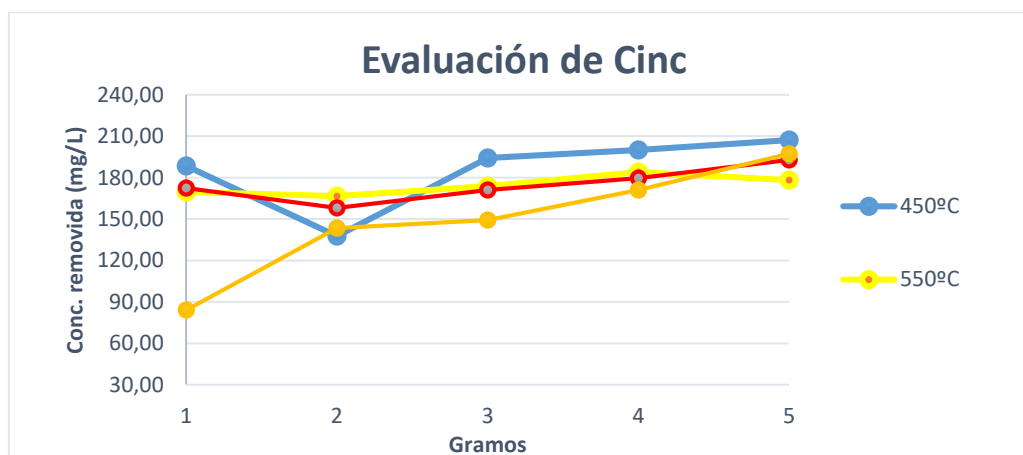
Tabla 11. Concentración de Cinc removida en Biochar.

<i>Evaluación de Cinc</i>	<i>Concentración de Cinc removida (mg/L)</i>		
	<i>450°C</i>	<i>550°C</i>	<i>650°C</i>
Temperatura			
Solución en 1 gramo	188,40	169,56	172,46
Solución en 2 gramos	137,68	166,66	157,97
Solución en 3 gramos	194,20	173,91	171,01
Solución en 4 gramos	200,00	184,06	179,71
Solución en 5 gramos	207,24	178,26	192,75

Fuente: Autores

La siguiente grafica muestra el comportamiento de la capacidad de adsorción en función de la carga, para biochar y carbón activado para el ion zinc.

Grafica 1. Evaluación de Cinc para Biochar y Carbón Activado.



Fuente: Autores

7.2.2. Cromo

Como se propuso en la metodología, la solución madre de Nitrato de Cromo se puso en contacto con cada una de las cargas de biochar (450, 550, y 650°C) y carbón activado (1, 2, 3, 4 y 5 gramos de cada medio), y se realizó el filtrado de cada uno de estos, con el fin de determinar la cantidad de Sulfato de Manganeso a utilizar para la titulación, como se muestra a continuación. Los resultados de concentración para la solución madre usada para el carbón activado es la misma que se tiene en cuenta para el biochar.

Para el cálculo de la concentración de cromo, se utiliza una titulación por retroceso donde se determina la cantidad de EDTA que reacciona teniendo en cuenta los equivalentes de la cantidad de EDTA utilizado (20ml), y los equivalentes de Sulfato de Manganeso necesarios para titular el exceso de EDTA. La diferencia de estos dos, da como resultado los equivalentes de EDTA que reaccionan que son iguales a los equivalentes de cromo removidos, estos equivalentes se multiplican por el resultado de la fracción del peso atómico y la valencia del elemento para determinar la concentración en ppm Como se muestra en la siguiente memoria de cálculo:

$$\left(20ml * \frac{1L}{1000ml} * \frac{1,33eq}{L}\right) - \left(3,1ml * \frac{1L}{1000ml} * \frac{0,56eq}{L}\right) = 0,025eq Cr$$

$$0,025 eq Cr * \frac{52gr}{3} * \frac{1000mg}{1gr} = 430,99mg/L$$

El resultado obtenido es dado en concentración (mg/L), pues los datos presentados fueron siempre en referencia al volumen total de la solución metálica (1L).

En la tabla 12 se muestra los volúmenes de sulfato de manganeso utilizado para titular el exceso de EDTA para poder determinar qué cantidad de EDTA que reacciona y poder determinar la concentración de cromo con carbón activado como medio adsorbente

Tabla 12. Volumen de MnSO4 utilizado en la determinación de cromo en carbón activado.

NITRATO DE CROMO			
<i>Evaluación de carbón activado</i>	<i>Volumen de MnSO4 utilizado (ml)</i>		
Solución madre	3,1	2,6	2,8
Solución en 1 gramo	1,2	1,7	1,5
Solución en 2 gramos	1,0	1,3	1,1
Solución en 3 gramos	1,8	1,4	1,6
Solución en 4 gramos	0,2	0,5	0,8
Solución en 5 gramos	1,5	1,0	1,0

Fuente: Autores

Como se expuso en la memoria de cálculo, las tablas 13 Y 14 muestran la cantidad de equivalentes de Sulfato de Manganeso y Cromo, respectivamente, para el cálculo de la concentración de este metal.

Tabla 13. Equivalentes de MnSO₄ en la determinación de Cromo en carbón activado.

NITRATO DE CROMO			
<i>Evaluación de carbón activado</i>	<i>Equivalentes MnSO₄</i>		
Solución madre	0,001734974	0,00145514	0,00156707
Solución en 1 gramo	0,000671603	0,00095144	0,0008395
Solución en 2 gramos	0,000559669	0,00072757	0,00061564
Solución en 3 gramos	0,001007404	0,00078354	0,00089547
Solución en 4 gramos	0,000111934	0,00027983	0,00044774
Solución en 5 gramos	0,000839503	0,00055967	0,00055967

Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos en las tablas 13 y 14 y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta, la tabla 15 muestra las concentraciones de cromo así como la concentración promedio de cromo con carbón activado como medio absorbente

Tabla 14. Equivalentes de Cr, resultado de la diferencia de equivalentes de MnSO₄ y equivalentes de EDTA.

NITRATO DE CROMO			
<i>Evaluación de carbón activado</i>	<i>Equivalentes Cromo</i>		
Solución madre	0,024865026	0,02514486	0,02503293
Solución en 1 gramo	0,025928397	0,02564856	0,0257605
Solución en 2 gramos	0,026040331	0,02587243	0,02598436
Solución en 3 gramos	0,025592596	0,02581646	0,02570453
Solución en 4 gramos	0,026488066	0,02632017	0,02615226
Solución en 5 gramos	0,025760497	0,02604033	0,02604033

Fuente: Autores

Tabla 15. Concentración de cromo en carbón activado.

NITRATO DE CROMO				
Evaluación de carbón activado	Concentración Cromo (mg/L)			Concentración promedio de Cromo (mg/L)
Solución madre	430,99	435,84	433,90	433,6
Solución en 1 gramo	224,71	222,29	223,26	223,4
Solución en 2 gramos	225,68	224,23	225,20	225,0
Solución en 3 gramos	221,80	223,74	222,77	222,8
Solución en 4 gramos	229,56	228,11	226,65	228,1
Solución en 5 gramos	223,26	225,68	225,68	224,9

Fuente: Autores

En la tabla 16 se muestra la concentración removida de ion cromo que fue determinada de la misma manera que en los otros iones metálicos

Tabla 16. Concentración de cromo removida por carbón activado.

Evaluación de carbón activado	Concentración removida (mg/L)
Solución madre	433,6
Solución en 1 gramo	210,2
Solución en 2 gramos	208,5
Solución en 3 gramos	210,8
Solución en 4 gramos	205,5
Solución en 5 gramos	208,7

Fuente: Autores

En la tabla 17 se muestran los volúmenes de sulfato de manganeso utilizados para la determinación del EDTA que no reacciono para poder determinar qué cantidad de EDTA que reacciona y poder determinar la concentración de cromo con biochar como medio adsorbente

Tabla 17. Volumen de MnSO₄ utilizado en la determinación de cromo por biochar.

NITRATO DE CROMO									
Evaluación de Biochar	Volumen de MnSO₄ utilizado (ml)								
	450°C			550°C			650°C		
Solución en 1 gramo	1,4	1,5	1,5	0,7	0,8	1,0	1,8	1,8	2,0
Solución en 2 gramos	1,0	1,2	1,1	0,7	0,7	0,8	2,6	2,5	2,4
Solución en 3 gramos	1,2	1,1	1,1	0,7	0,6	0,8	2,3	2,4	2,4
Solución en 4 gramos	1,0	1,1	1,0	0,5	0,5	0,5	2,4	2,5	2,3
Solución en 5 gramos	1,1	1,1	1,1	0,4	0,4	0,3	2,5	2,5	2,4

Fuente: Autores

Las tablas 18 y 19 muestran la cantidad de equivalentes de Sulfato de Manganeso y Cromo, respectivamente, para el cálculo de la concentración de este metal usando biochar como medio absorbente.

Tabla 18. Equivalentes de MnSO₄ en la determinación de cromo por biochar.

NITRATO DE CROMO									
Evaluación de Biochar	Equivalentes MnSO₄								
	450°C			550°C			650°C		
Solución en 1 gramo	0,00078	0,00084	0,00084	0,00039	0,00045	0,00056	0,00101	0,00101	0,00112
Solución en 2 gramos	0,00056	0,00067	0,00062	0,00039	0,00039	0,00045	0,00146	0,00140	0,00134
Solución en 3 gramos	0,00067	0,00062	0,00062	0,00039	0,00034	0,00045	0,00129	0,00134	0,00134
Solución en 4 gramos	0,00056	0,00062	0,00056	0,00028	0,00028	0,00028	0,00134	0,00140	0,00129
Solución en 5 gramos	0,00062	0,00062	0,00062	0,00022	0,00022	0,00017	0,00140	0,00140	0,00134

Fuente: Autores

Tabla 19. Equivalentes de cromo en la determinación por biochar.

NITRATO DE CROMO									
Evaluación de Biochar	Equivalentes Cr								
	450°C			550°C			650°C		
Solución en 1 gramo	0,02582	0,02576	0,02576	0,02621	0,02615	0,02604	0,02559	0,02559	0,02548
Solución en 2 gramos	0,02604	0,02593	0,02598	0,02621	0,02621	0,02615	0,02514	0,02520	0,02526
Solución en 3 gramos	0,02593	0,02598	0,02598	0,02621	0,02626	0,02615	0,02531	0,02526	0,02526
Solución en 4 gramos	0,02604	0,02598	0,02604	0,02632	0,02632	0,02632	0,02526	0,02520	0,02531
Solución en 5 gramos	0,02598	0,02598	0,02598	0,02638	0,02638	0,02643	0,02520	0,02520	0,02526

Fuente: Autores

Con base en los resultados reportados en las tablas 18 y 19, y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta, en la tabla 20 y 21 se muestran los resultados de concentración de cromo y concentración promedio de cromo usando biochar como medio absorbente.

Tabla 20. Concentración de cromo en la determinación por biochar.

NITRATO DE CROMO									
Evaluación de Biochar	Concentración Cr (mg/L)								
	450°C			550°C			650°C		
Solución en 1 gramo	223,743	223,258	223,258	227,138	226,653	225,683	221,802	221,802	220,832
Solución en 2 gramos	225,683	224,713	225,198	227,138	227,138	226,653	217,922	218,407	218,892
Solución en 3 gramos	224,713	225,198	225,198	227,138	227,623	226,653	219,377	218,892	218,892
Solución en 4 gramos	225,683	225,198	225,683	228,108	228,108	228,108	218,892	218,407	219,377
Solución en 5 gramos	225,198	225,198	225,198	228,593	228,593	229,078	218,407	218,407	218,892

Fuente: Autores

Tabla 21. Concentración promedio de cromo en la determinación por biochar.

Evaluación de Cromo	Concentración de Cromo (mg/L)		
Temperatura	450°C	550°C	650°C
Solución en 1 gramo	223,42	226,49	221,48
Solución en 2 gramos	225,20	226,98	218,41
Solución en 3 gramos	225,04	227,14	219,05
Solución en 4 gramos	225,52	228,11	218,89
Solución en 5 gramos	225,20	228,75	218,57

Fuente: Autores

En la tabla 22 se muestra la concentración removida de ion cromo que fue determinada de la misma manera que en los otros iones metálicos

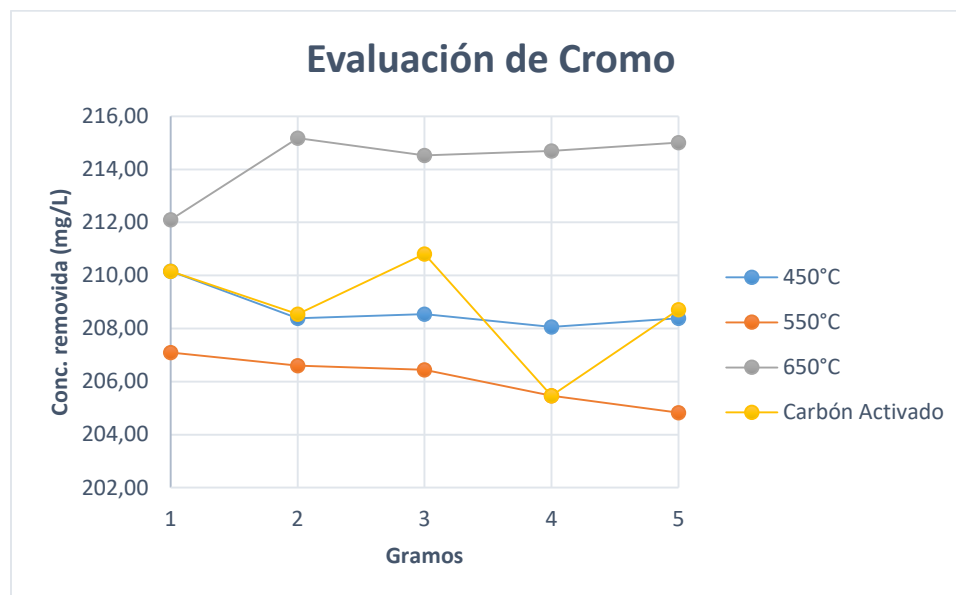
Tabla 22. Concentración de cromo removida por biochar.

Evaluación de Cromo	Concentración de Cromo removida (mg/L)		
Temperatura	450°C	550°C	650°C
Solución en 1 gramo	210,16	207,09	212,10
Solución en 2 gramos	208,38	206,60	215,17
Solución en 3 gramos	208,54	206,44	214,53
Solución en 4 gramos	208,06	205,47	214,69
Solución en 5 gramos	208,38	204,83	215,01

Fuente: Autores

La siguiente gráfica muestra el comportamiento de la capacidad de adsorción en función de la carga, para biochar y carbón activado.

Grafica 2. Evaluación de cromo en función de la carga óptima.



Fuente: Autores

7.2.3. Cobre

Como se propuso en la metodología, la solución madre de Nitrato de Cobre se puso en contacto con cada una de las cargas de biochar (450, 550, y 650°C) y carbón activado (1, 2, 3, 4 y 5 gramos de cada medio), y se realizó el filtrado de cada uno de estos, con el fin de determinar la cantidad de EDTA a utilizar para la titulación, como se muestra a continuación. Los resultados de concentración para la solución madre usada para el carbón activado es la misma que se tiene en cuenta para el biochar.

Para el cálculo de concentración fueron tenidos en cuenta la cantidad total de mililitros de EDTA utilizados, la normalidad del EDTA, el peso atómico del cobre y los equivalentes de este. Como se muestra en la siguiente memoria de cálculo:

$$3,5ml * \frac{1L}{1000ml} * \frac{1,33eq}{L} * \frac{51,99g}{2eq} = 0,012g * \frac{1000mg}{1g} = \frac{121,01mg}{L}$$

El resultado obtenido es dado en concentración (mg/L), pues los datos presentados fueron siempre en referencia al volumen total de la solución metálica (1L).

La tabla 23 muestra los volúmenes de EDTA usados para la titulación del ion cobre usando carbón activado como medio absorbente.

Tabla 23. Volumen de EDTA utilizado en la determinación de Cobre en Carbón Activado.

NITRATO DE COBRE			
Evaluación de carbón activado	Volumen de EDTA utilizado (ml)		
Solución madre	3,5	3,9	3,6
Solución en 1 gramo	3,5	3,3	3,5
Solución en 2 gramos	3,1	3,3	3,3
Solución en 3 gramos	3,0	3,0	3,1
Solución en 4 gramos	2,8	3,0	2,9
Solución en 5 gramos	3,0	3,0	2,9

Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos en la tabla 23 y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta, la tabla 24 muestra las concentraciones de ion cobre y la concentración promedio del mismo.

Tabla 24. Concentración de Cobre en Carbón Activado.

Evaluación de carbón activado	Concentración de Cobre (mg/L)			Concentración promedio de Cobre (mg/L)
Solución madre	121,01	134,84	124,46	126,8
Solución en 1 gramo	121,01	114,09	121,01	118,7
Solución en 2 gramos	107,18	114,09	114,09	111,8
Solución en 3 gramos	103,72	103,72	107,18	104,9
Solución en 4 gramos	96,81	103,72	100,26	100,3
Solución en 5 gramos	103,72	103,72	100,26	102,6

Fuente: Autores

En la tabla 25 se muestra la concentración removida de ion cobre que fue determinada de la misma manera que en los otros iones metálicos

Tabla 25. Concentración de Cobre removida en Carbón Activado.

Evaluación de carbón activado	Conc. removida (mg/L)
Solución madre	126,8
Solución en 1 gramo	8,1
Solución en 2 gramos	15,0
Solución en 3 gramos	21,9
Solución en 4 gramos	26,5
Solución en 5 gramos	24,2

Fuente: Autores

En la tabla 26 se encuentra la cantidad de EDTA (en ml) utilizada para la titulación, con biochar como medio adsorbente. Se tiene en cuenta la misma metodología.

Tabla 26. Volumen de EDTA utilizado para la determinación de Cobre en Biochar.

NITRATO DE COBRE									
Evaluación de Biochar	Volumen de EDTA utilizado (ml)								
	450°C			550°C			650°C		
Solución en 1 gramo	2,1	2,1	2,0	2,5	2,7	2,6	2,8	2,8	3,0
Solución en 2 gramos	2,0	2,0	2,0	2,7	2,8	2,7	2,6	2,7	2,8
Solución en 3 gramos	2,0	2,0	1,8	2,4	2,7	2,5	2,3	2,4	2,3
Solución en 4 gramos	1,7	1,6	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1
Solución en 5 gramos	1,7	1,7	1,7	1,6	1,7	2,0	1,5	1,6	1,4

Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos en la tabla 26, y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta, en la tabla 27 y 28 se reportan las concentraciones de cobre y la concentración promedio de cobre usando biochar como medio adsorbente.

Tabla 27. Concentración de Cobre en Biochar.

NITRATO DE COBRE									
Evaluación de Biochar	Concentración de Cobre (mg/L)								
	450°C			550°C			650°C		
Solución en 1 gramo	72,60	72,60	69,15	86,43	93,35	89,89	96,81	96,81	103,72
Solución en 2 gramos	69,15	69,15	69,15	93,35	96,81	93,35	89,89	93,35	96,81
Solución en 3 gramos	69,15	69,15	62,23	82,98	93,35	86,43	79,52	82,98	79,52
Solución en 4 gramos	58,77	55,32	51,86	55,32	58,77	62,23	65,69	69,15	72,60
Solución en 5 gramos	58,77	58,77	58,77	55,32	58,77	69,15	51,86	55,32	48,40

Fuente: Autores

Tabla 28. Concentración promedio de Cobre en Biochar.

Evaluación de Cobre	Concentración promedio de Cobre (mg/L)		
	450°C	550°C	650°C
Temperatura			
Solución en 1 gramo	71,45	89,89	99,11
Solución en 2 gramos	69,15	94,50	93,35
Solución en 3 gramos	66,84	87,59	80,67
Solución en 4 gramos	55,32	58,77	69,15
Solución en 5 gramos	58,77	61,08	51,86

Fuente: Autores

En la tabla 29 se muestra la concentración removida de ion cobre que fue determinada de la misma manera que en los otros iones metálicos

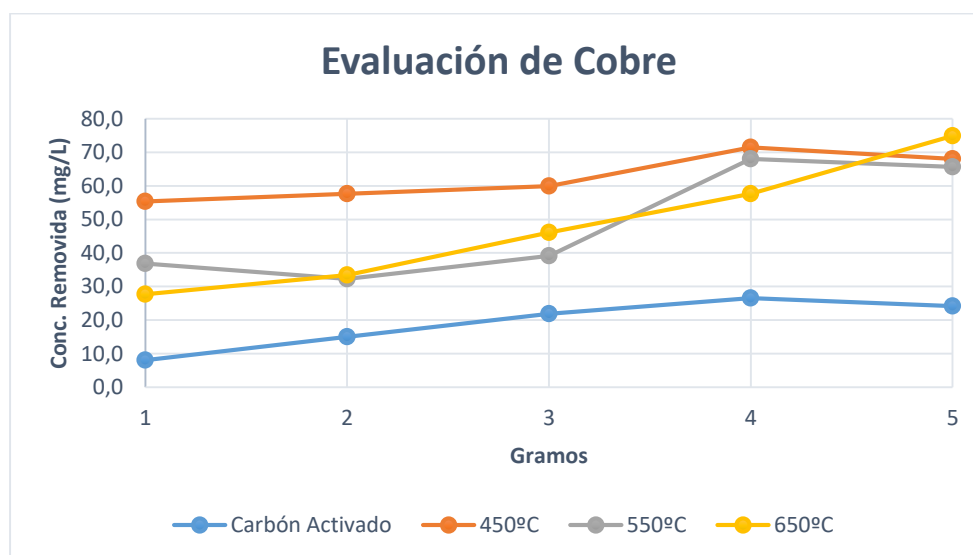
Tabla 29. Concentración de Cobre removida en Biochar.

<i>Evaluación de Cobre</i>	<i>Concentración de Cobre removida (mg/L)</i>		
	<i>450°C</i>	<i>550°C</i>	<i>650°C</i>
Temperatura			
Solución en 1 gramo	55,32	36,88	27,66
Solución en 2 gramos	57,62	32,27	33,42
Solución en 3 gramos	59,93	39,18	46,10
Solución en 4 gramos	71,45	67,99	57,62
Solución en 5 gramos	67,99	65,69	74,91

Fuente: Autores

La siguiente grafica muestra el comportamiento de la capacidad de adsorción en función de la carga, para biochar y carbón activado.

Grafica 3. Evaluación de Cobre para Biochar y Carbón Activado.



Fuente: Autores

7.2.4. Níquel

Como se propuso en la metodología, la solución madre de Cloruro de Níquel se puso en contacto con cada una de las cargas de biochar (450, 550, y 650°C) y carbón activado (1, 2, 3, 4 y 5 gramos de cada medio), y se realizó el filtrado de cada uno de estos, con el fin de determinar la cantidad de EDTA a utilizar para la titulación, como se muestra a continuación. Los resultados de concentración para la solución madre usada para el carbón activado es la misma que se tiene en cuenta para el biochar.

Para el cálculo de concentración fueron tenidos en cuenta la cantidad total de mililitros de EDTA utilizados, la normalidad del EDTA, el peso atómico del níquel y los equivalentes de este. Como se muestra en la siguiente memoria de cálculo:

$$2,7ml * \frac{1L}{1000ml} * \frac{1,33eq}{L} * \frac{58,69g}{2eq} = 0,105377g * \frac{1000mg}{1g} = \frac{105,38mg}{L}$$

El resultado obtenido es dado en concentración (mg/L), pues los datos presentados fueron siempre en referencia al volumen total de la solución metálica (1L).

En la tabla 30 se reportan los volúmenes de EDTA usados en la titulación para determinar la concentración del ion Níquel usando como medio absorbente el carbón activado

Tabla 30. Volumen de EDTA utilizado para la determinación de Níquel en Carbón Activado.

CLORURO DE NÍQUEL			
Evaluación de carbón activado	Volumen de EDTA utilizado (ml)		
Solución madre	2,7	2,6	2,6
Solución en 1 gramo	2,5	2,5	2,5
Solución en 2 gramos	2,5	2,5	2,3
Solución en 3 gramos	2,1	2,0	1,9
Solución en 4 gramos	2,4	2,3	2,1
Solución en 5 gramos	2,1	2,0	2,0

Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos en la tabla 30 y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta, la tabla 31 muestra las concentraciones de Níquel usando carbón activado como medio absorbente.

Tabla 31. Concentración de Níquel en Carbón Activado.

Evaluación de carbón activado	Concentración de Níquel (mg/L)			Concentración de Níquel (mg/L)
Solución madre	105,38	101,48	101,48	102,8
Solución en 1 gramo	97,57	97,57	97,57	97,6
Solución en 2 gramos	97,57	97,57	89,77	95,0
Solución en 3 gramos	81,96	78,06	74,15	78,1
Solución en 4 gramos	93,67	89,77	81,96	88,5
Solución en 5 gramos	81,96	78,06	78,06	79,4

Fuente: Autores

En la tabla 32 se muestra la concentración removida de ion Níquel que fue determinada de la misma manera que en los otros iones metálicos.

Tabla 32. Concentración de Níquel removida en Carbón Activado.

<i>Evaluación de carbón activado</i>	<i>Conc. removida (mg/L)</i>
Solución madre	102,8
Solución en 1 gramo	5,2
Solución en 2 gramos	7,8
Solución en 3 gramos	24,7
Solución en 4 gramos	14,3
Solución en 5 gramos	23,4

Fuente: Autores

En la tabla 33 se reportan los volúmenes de EDTA (en ml) utilizada para la titulación, para el ion Níquel con biochar como medio adsorbente.

Tabla 33. Volumen de EDTA utilizado en la determinación de Níquel en Biochar.

CLORURO DE NÍQUEL									
<i>Evaluación de Biochar</i>	<i>Volumen de EDTA utilizado (ml)</i>								
	<i>450°C</i>			<i>550°C</i>			<i>650°C</i>		
Solución en 1 gramo	2,3	2,4	2,5	2,2	2,3	2,2	2,6	2,5	2,7
Solución en 2 gramos	2,5	2,6	2,5	2,3	2,2	2,1	2,7	2,6	2,5
Solución en 3 gramos	2,5	2,5	2,4	2,1	2,2	1,9	2,1	2,1	2,2
Solución en 4 gramos	2,7	2,6	2,5	2,0	2,0	1,9	1,5	1,4	1,6
Solución en 5 gramos	1,8	1,7	2,0	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,7

Fuente: Autores

Con base en los resultados de la tabla 33 y 34 de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta, la tabla 34 muestra los resultados de las concentraciones de ion Níquel y la concentración promedio usando biochar como absorbente.

Tabla 34. Concentración de Níquel en Biochar.

CLORURO DE NÍQUEL									
<i>Evaluación de Biochar</i>	<i>Concentración de Níquel (mg/L)</i>								
	<i>450°C</i>			<i>550°C</i>			<i>650°C</i>		
Solución en 1 gramo	89,77	93,67	97,57	85,86	89,77	85,86	101,48	97,57	105,38
Solución en 2 gramos	97,57	101,48	97,57	89,77	85,86	81,96	105,38	101,48	97,57
Solución en 3 gramos	97,57	97,57	93,67	81,96	85,86	74,15	81,96	81,96	85,86
Solución en 4 gramos	105,38	101,48	97,57	78,06	78,06	74,15	58,54	54,64	62,45
Solución en 5 gramos	70,25	66,35	78,06	70,25	66,35	66,35	62,45	62,45	66,35

Fuente: Autores

Tabla 35. Concentración promedio de Níquel en Biochar.

<i>Evaluación de Níquel</i>	<i>Concentración promedio de Níquel (mg/L)</i>		
	<i>450°C</i>	<i>550°C</i>	<i>650°C</i>
Temperatura			
Solución en 1 gramo	93,67	87,16	101,48
Solución en 2 gramos	98,87	85,86	101,48
Solución en 3 gramos	96,27	80,66	83,26
Solución en 4 gramos	101,48	76,76	58,54
Solución en 5 gramos	71,55	67,65	63,75

Fuente: Autores

En la tabla 32 se muestra la concentración removida de ion Níquel que fue determinada de la misma manera que en los otros iones metálicos.

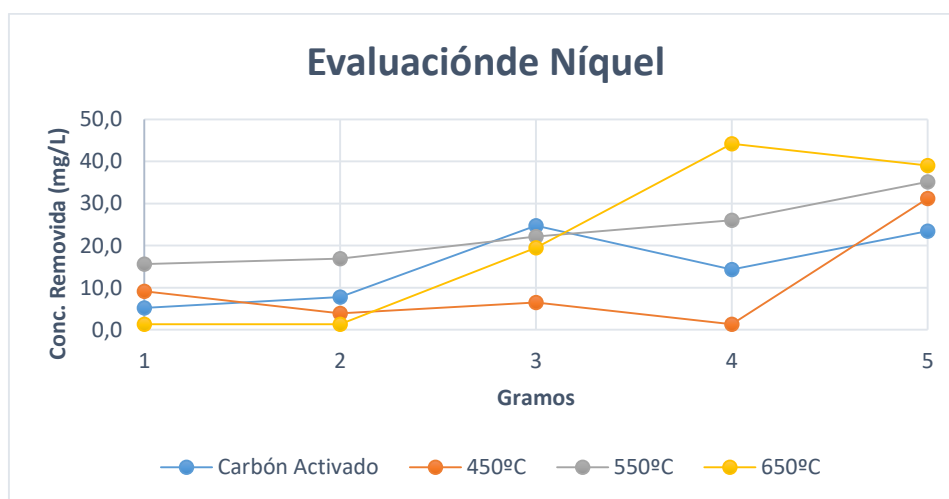
Tabla 36. Concentración de Níquel removida en Biochar.

<i>Evaluación de Níquel</i>	<i>Concentración de Níquel removida (mg/L)</i>		
	<i>450°C</i>	<i>550°C</i>	<i>650°C</i>
Temperatura			
Solución en 1 gramo	9,11	15,61	1,30
Solución en 2 gramos	3,90	16,91	1,30
Solución en 3 gramos	6,50	22,12	19,51
Solución en 4 gramos	1,30	26,02	44,23
Solución en 5 gramos	31,22	35,13	39,03

Fuente: Autores

La siguiente grafica muestra el comportamiento de la capacidad de adsorción en función de la carga, para biochar y carbón activado.

Grafica 4. Evaluación de Níquel en Biochar y Carbón Activado.



Fuente: Autores

7.3. FASE TRES

Después de finalizar la fase dos de la metodología, se procede a la realización de la fase tres, la cual se basa en la evaluación de la concentración de cada metal con respecto al tiempo de contacto con el medio adsorbente, como se estableció en la metodología. Para el cálculo de la concentración removida, se tiene en cuenta el valor de la concentración inicial (solución madre) expuesta en la FASE DOS, para cada metal respectivamente.

7.3.1. Evaluación de Cinc con respecto al tiempo

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en la evaluación de cinc con respecto al tiempo de contacto con el medio adsorbente a una temperatura determinada. (Se tomó la cantidad del medio adsorbente de cada temperatura que presentó mejor eficiencia). El cálculo de concentración se realizó de la misma manera que en la Fase Dos.

En la tabla 37 se observa el volumen de EDTA utilizado, para la determinación de Cinc en función del tiempo en los diferentes absorbentes donde C.A es Carbón Activado, B-450 Biochar producido a 450 °C, B-550 Biochar producido a 550 °C y B-650 Biochar producido a 650°C.

Tabla 37. Volumen de EDTA en función del tiempo para la determinación de cinc

	<i>Tiempo (min)</i>								
	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>	<i>80</i>	<i>100</i>	<i>120</i>	<i>140</i>	<i>160</i>	<i>180</i>
C.A	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,5
B-450°C	0,2	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4
B-550°C	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6
B-650°C	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4
	Volumen utilizado EDTA (ml)								

Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos en la tabla 37 y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta en la FASE DOS, la tabla 38 muestra los resultados de la concentración de cinc en función del tiempo en los diferentes absorbentes.

Tabla 38. Concentración de Cinc en función del tiempo.

	<i>Tiempo (min)</i>								
	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>	<i>80</i>	<i>100</i>	<i>120</i>	<i>140</i>	<i>160</i>	<i>180</i>
C.A	13,04	17,39	13,04	13,04	13,04	17,39	17,39	26,09	21,74
B-450°C	8,70	21,74	26,09	21,74	21,74	17,39	17,39	21,74	17,39
B-550°C	13,04	21,74	21,74	21,74	21,74	17,39	17,39	21,74	26,09
B-650°C	13,04	17,39	13,04	17,39	17,39	17,39	21,74	21,74	17,39
	Concentración (mg/L)								

Fuente: Autores

En la tabla 39 se observa la concentración de cinc removida la cual es determinada de la misma forma que se realizó en la fase 2, es decir la diferencia entre la concentración inicial y la concentración final.

Tabla 39. Concentración de Cinc removida en función del tiempo.

	<i>Tiempo (min)</i>								
	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>	<i>80</i>	<i>100</i>	<i>120</i>	<i>140</i>	<i>160</i>	<i>180</i>
C.A	244,96	240,61	244,96	244,96	244,96	240,61	240,61	231,91	236,26
B-450°C	249,30	236,26	231,91	236,26	236,26	240,61	240,61	236,26	240,61
B-550°C	244,96	236,26	236,26	236,26	236,26	240,61	240,61	236,26	231,91
B-650°C	244,96	240,61	244,96	240,61	240,61	240,61	236,26	236,26	240,61
	Concentración removida (mg/L)								

Fuente: Autores

La siguiente grafica muestra el comportamiento de la capacidad de adsorción en función del tiempo, para biochar y carbón activado.

Grafica 5. Evaluación del Cinc con respecto al tiempo.



Fuente: Autores

7.3.2. Evaluación de Cromo con respecto al tiempo

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en la evaluación de cromo con respecto al tiempo de contacto con el medio adsorbente a una temperatura determinada. (Se tomó la cantidad del medio adsorbente de cada temperatura que presentó mejor eficiencia). El cálculo de concentración se realizó de la misma manera que en la Fase Dos.

En la tabal 40 se observa el volumen de Sulfato de Manganeso utilizado, para la determinación de EDTA que no reacciono para la determinación de Cromo en función del tiempo.

Tabla 40. Volumen de MnSO₄ utilizado en la determinación de cromo en función del tiempo.

	Tiempo (min)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
C.A	3,1	3,1	3	3	2,8	2,6	1	0,5	0,5
B-450°C	1,4	1,5	0,2	2,8	0,2	0,2	0,6	0,2	0,2
B-550°C	0,8	1,4	1,2	1,3	1,3	13	0,5	0,2	0,2
B-650°C	1,0	1,1	1,0	1,6	1,6	0,6	0,7	2,0	1,5
	Volumen utilizado (ml)								

Fuente: Autores

Como se expuso en la memoria de cálculo de la FASE DOS, las tablas 41 y 42 muestran la cantidad de equivalentes de Sulfato de Manganeso y Cromo, respectivamente, para el cálculo de la concentración de este metal.

Tabla 41. Equivalentes de MnSO₄ en la determinación de cromo en función del tiempo.

	Tiempo (min)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
C.A	2,E-03	2,E-03	2,E-03	2,E-03	2,E-03	1,E-03	6,E-04	3,E-04	3,E-04
B-450°C	8,E-04	8,E-04	1,E-04	2,E-03	1,E-04	1,E-04	3,E-04	1,E-04	1,E-04
B-550°C	4,E-04	8,E-04	7,E-04	7,E-04	7,E-04	7,E-03	3,E-04	1,E-04	1,E-04
B-650°C	6,E-04	6,E-04	6,E-04	9,E-04	9,E-04	3,E-04	4,E-04	1,E-03	8,E-04
	Equivalentes MnSO ₄								

Fuente: Autores

Tabla 42. Equivalentes de cromo en la determinación en función del tiempo.

	Tiempo (min)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
C.A	2,E-02	2,E-02	2,E-02	2,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02
B-450°C	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02
B-550°C	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	2,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02
B-650°C	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02	3,E-02
	Equivalentes Cr								

Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos anteriormente, y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta, la tabla 43 reporta las concentraciones de cromo en función del tiempo.

Tabla 43. Concentración de cromo en función del tiempo.

	<i>Tiempo (min)</i>								
	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>	<i>80</i>	<i>100</i>	<i>120</i>	<i>140</i>	<i>160</i>	<i>180</i>
C.A	215,50	215,50	215,98	215,98	216,95	217,92	225,68	228,11	228,11
B-450°C	223,74	223,26	229,56	216,95	229,56	229,56	227,62	229,56	229,56
B-550°C	226,65	223,74	224,71	224,23	224,23	167,48	228,11	229,56	229,56
B-650°C	225,68	225,20	225,68	222,77	222,77	227,62	227,14	220,83	223,26
Concentración Cr (mg/L)									

Fuente: Autores

En la tabla 44 se observa la concentración de cromo removida la cual es determinada de la misma forma que se realizó en la fase 2 es decir la diferencia entre la concentración inicial y la concentración final.

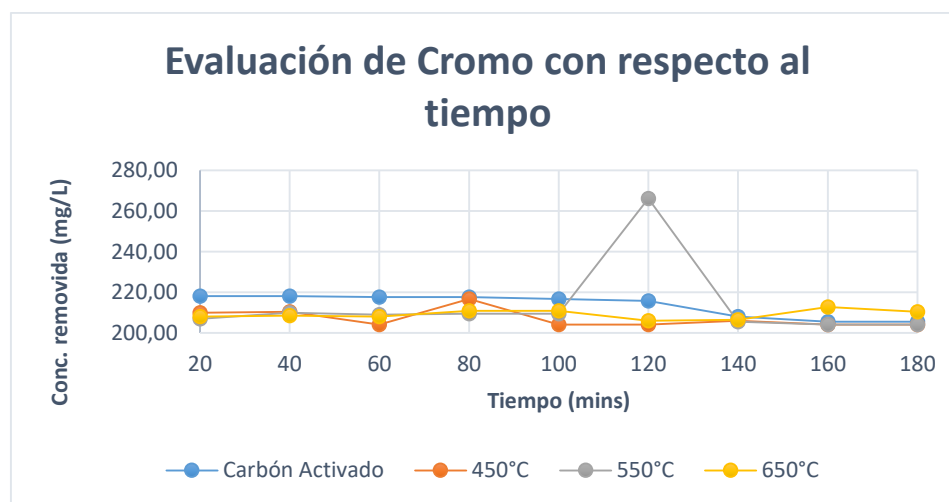
Tabla 44. Concentración de cromo removida en función del tiempo.

	<i>Tiempo (min)</i>								
	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>	<i>80</i>	<i>100</i>	<i>120</i>	<i>140</i>	<i>160</i>	<i>180</i>
C.A	218,08	218,08	217,60	217,60	216,63	215,66	207,90	205,47	205,47
450°C	209,84	210,32	204,02	216,63	204,02	204,02	205,96	204,02	204,02
550°C	206,93	209,84	208,87	209,35	209,35	266,10	205,47	204,02	204,02
650°C	207,90	208,38	207,90	210,81	210,81	205,96	206,44	212,75	210,32
Concentración Cr removida (mg/L)									

Fuente: Autores

La siguiente grafica muestra el comportamiento de la capacidad de adsorción en función del tiempo, para biochar y carbón activado.

Grafica 6. Evaluación del cromo en función del tiempo.



Fuente: Autores

7.3.3. Evaluación de Cobre con respecto al tiempo

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en la evaluación de cobre con respecto al tiempo de contacto con el medio adsorbente a una temperatura determinada. (Se tomó la cantidad del medio adsorbente de cada temperatura que presentó mejor eficiencia). El cálculo de concentración se realizó de la misma manera que en la Fase Dos.

En la tabla 45 se observa el volumen de EDTA utilizado, para la determinación de Cobre en función del tiempo para los diferentes adsorbentes.

Tabla 45. Determinación de Cobre con respecto al tiempo.

	Tiempo (min)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
C.A	1,3	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2
B-450°C	1,2	1,0	1,0	0,6	0,6	0,9	1,0	0,9	0,8
B-550°C	0,8	0,7	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6
B-650°C	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,3
	Volumen utilizado EDTA (ml)								

Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos anteriormente, y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta en la FASE DOS, la tabla 46 reporta los siguientes resultados de concentración de cobre en función del tiempo.

Tabla 46. Concentración de Cobre en función del tiempo.

	Tiempo (min)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
C.A	44,95	41,49	38,03	38,03	41,49	41,49	38,03	41,49	41,49
B-450°C	41,49	34,57	34,57	20,74	20,74	31,12	34,57	31,12	27,66
B-550°C	27,66	24,20	20,74	24,20	13,83	17,29	20,74	17,29	20,74
B-650°C	24,20	20,74	17,29	13,83	13,83	17,29	20,74	20,74	10,37
	Concentración de cobre (mg/L)								

Fuente: Autores

En la tabla 47 se observa la concentración de cobre removida la cual es determinada de la misma forma que se realizó en la fase 2 es decir la diferencia entre la concentración inicial y la concentración final.

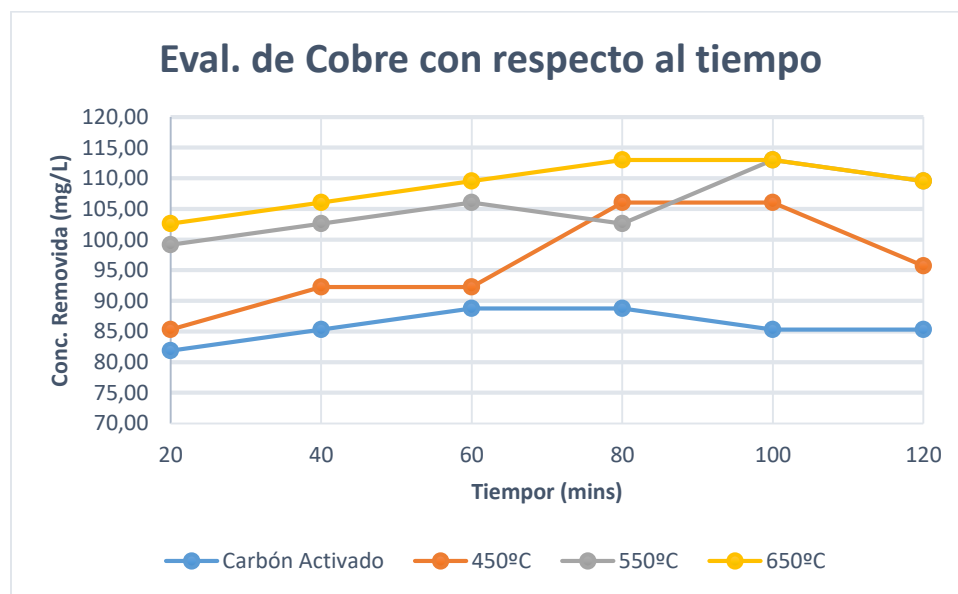
Tabla 47. Concentración de Cobre removida en función del tiempo.

	<i>Tiempo (min)</i>								
	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>	<i>80</i>	<i>100</i>	<i>120</i>	<i>140</i>	<i>160</i>	<i>180</i>
C.A	81,85	85,31	88,77	88,77	85,31	85,31	88,77	85,31	85,31
450°C	85,31	92,23	92,23	106,06	106,06	95,68	92,23	95,68	99,14
550°C	99,14	102,60	106,06	102,60	112,97	109,51	106,06	109,51	106,06
650°C	102,60	106,06	109,51	112,97	112,97	109,51	106,06	106,06	116,43
Concentración removida de cobre (mg/L)									

Fuente: Autores

La siguiente grafica muestra el comportamiento de la capacidad de adsorción en función del tiempo, para biochar y carbón activado.

Grafica 7, Evaluación de remoción del Cobre con respecto al tiempo.



Fuente: Autores

7.3.4. Evaluación de Níquel con respecto al tiempo

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en la evaluación de cinc con respecto al tiempo de contacto con el medio adsorbente a una temperatura determinada (Se tomó el medio adsorbente de cada temperatura con mayor eficiencia).

En la tabla 48 se observa el volumen de EDTA utilizado, para la determinación de Níquel en función del tiempo para los diferentes absorbentes.

Tabla 48. Determinación de Níquel en función del tiempo.

	Tiempo (min)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
C.A	1,0	0,8	1,6	1,3	1,2	1,1	1,2	1,3	1,3
B-450°C	1,0	0,8	0,6	1,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
B-550°C	0,9	0,6	0,8	0,7	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9
B-650°C	0,5	0,8	1,0	0,7	0,7	0,6	0,8	0,8	0,8
	Volumen utilizado EDTA (ml)								

Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos en la tabla 48 y de acuerdo a la memoria de cálculo expuesta en la FASE DOS, la tabla 49 muestra las concentraciones de Níquel en función del tiempo para los diferentes absorbentes.

Tabla 49. Concentración de Níquel en función del tiempo.

	Tiempo (min)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
C.A	39,03	31,22	62,45	50,74	46,83	42,93	46,83	50,74	50,74
B-450°C	39,03	31,22	23,42	39,03	46,83	46,83	46,83	46,83	46,83
B-550°C	35,13	23,42	31,22	27,32	35,13	35,13	39,03	35,13	35,13
B-650°C	19,51	31,22	39,03	27,32	27,32	23,42	31,22	31,22	31,22
	Concentración de Níquel (mg/L)								

Fuente: Autores

En la tabla 50 se observa la concentración de Níquel removida la cual es determinada de la misma forma que se realizó en la fase 2 es decir la diferencia entre la concentración inicial y la concentración final

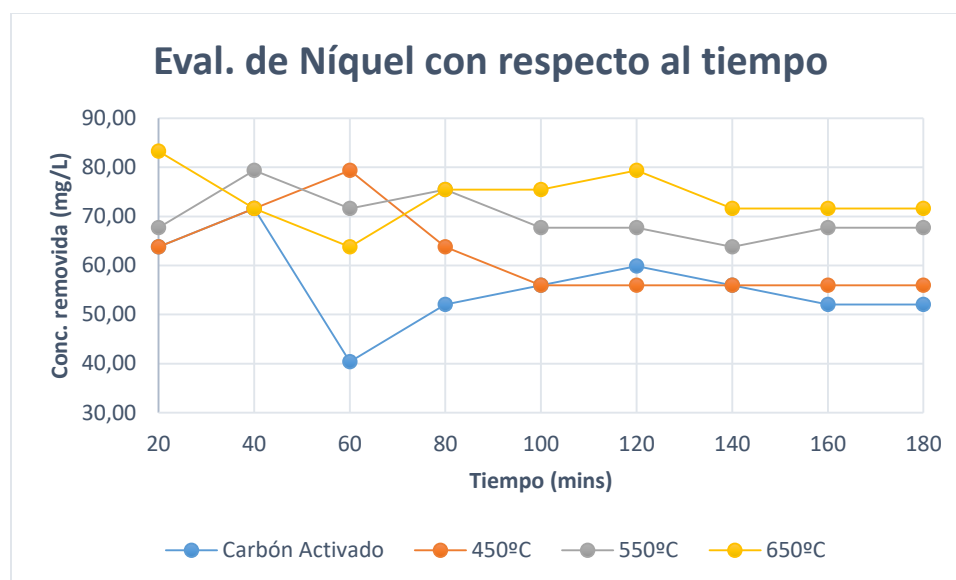
Tabla 50. Concentración de Níquel removida en función del tiempo.

	Tiempo (min)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
C.A	63,77	71,58	40,35	52,06	55,97	59,87	55,97	52,06	52,06
B-450°C	63,77	71,58	79,38	63,77	55,97	55,97	55,97	55,97	55,97
B-550°C	67,67	79,38	71,58	75,48	67,67	67,67	63,77	67,67	67,67
B-650°C	83,29	71,58	63,77	75,48	75,48	79,38	71,58	71,58	71,58
	Concentración removida de Níquel (mg/L)								

Fuente: Autores

La siguiente grafica muestra el comportamiento de la capacidad de adsorción en función del tiempo, para biochar y carbón activado.

Grafica 8. Evaluación de Níquel en función del tiempo.



Fuente: Autores

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La cascarilla de arroz fue sometida a un proceso de calentamiento a 105°C durante 24 horas (de 9AM del 01/09/2016 a 9AM del 02/09/2016), con el fin reducir la humedad el cual es una variable que se debe controlar para el proceso de pirólisis ya que al aumentar la humedad se afecta los rendimientos del biochar, al observar los biochar producido a diferentes temperaturas se observó cómo varia la granulometría y el color en el biochar producido a 650 °C .

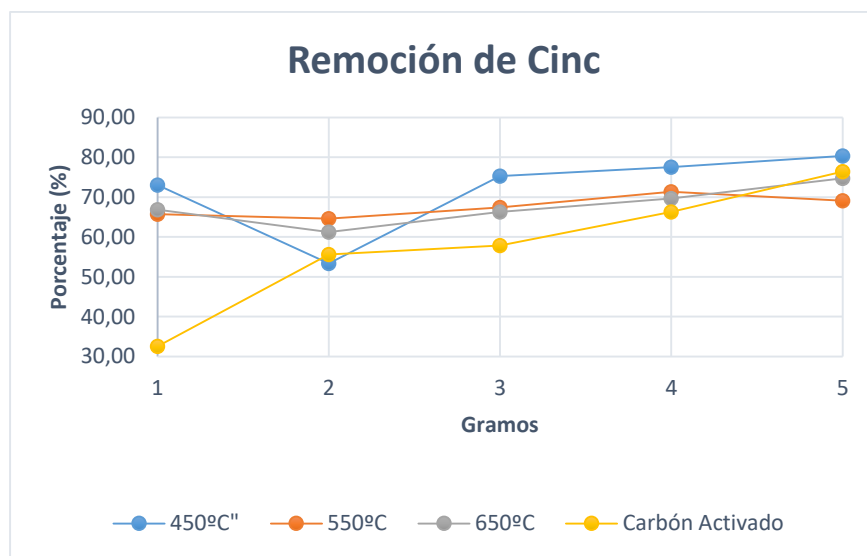
Por otro lado, la estandarización de las soluciones metálicas y la concentración real del EDTA difieren de las concentraciones teóricas con base en los cálculos realizados para la preparación de las mismas, lo cual es común debido a factores inherentes a las sustancias como humedad porcentaje de pureza, tiempo de almacenamiento, etc., lo importante es conocer con exactitud la concentración inicial de las respectivas soluciones a usar y eso lo establecemos realizando los procesos de estandarización de las soluciones.

En cuanto a la eficiencia de remoción de los diferentes metales se establece en porcentajes ya que es la manera de medir una eficiencia o rendimiento, los porcentajes se sacan teniendo en cuenta la concentración inicial y la final, no consideramos la eficiencia en masa ya que es un sistema solido líquido. A continuación discutiremos cada los porcentajes de remoción de los diferentes metales en función de la carga y del tiempo que fueron los objetivos planteados en el proyecto.

De acuerdo a los resultados reportados y estableciendo los respectivos porcentajes de remoción se elaboraron las graficas que describen el comportamiento de los diferentes metales en función de la carga y del tiempo de contacto por lo que la discusión de los resultados se enfoca en estos dos aspectos que fueron el eje central de los objetivos de este trabajo.

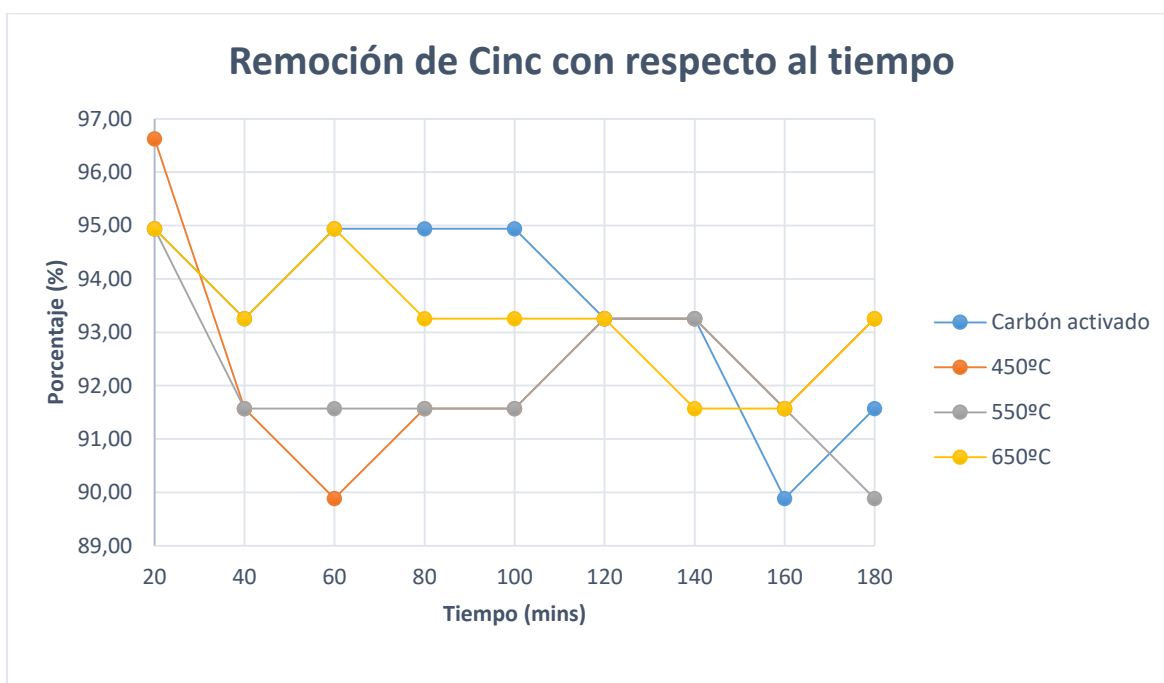
El proceso de remoción de cinc, en función de la carga óptima y el tiempo de contacto.

Grafica 9. Porcentaje de remoción de cinc en función de la carga.



Fuente: Autores

Grafica 10. Porcentaje de remoción de cinc en función del tiempo.



Fuente: Autores

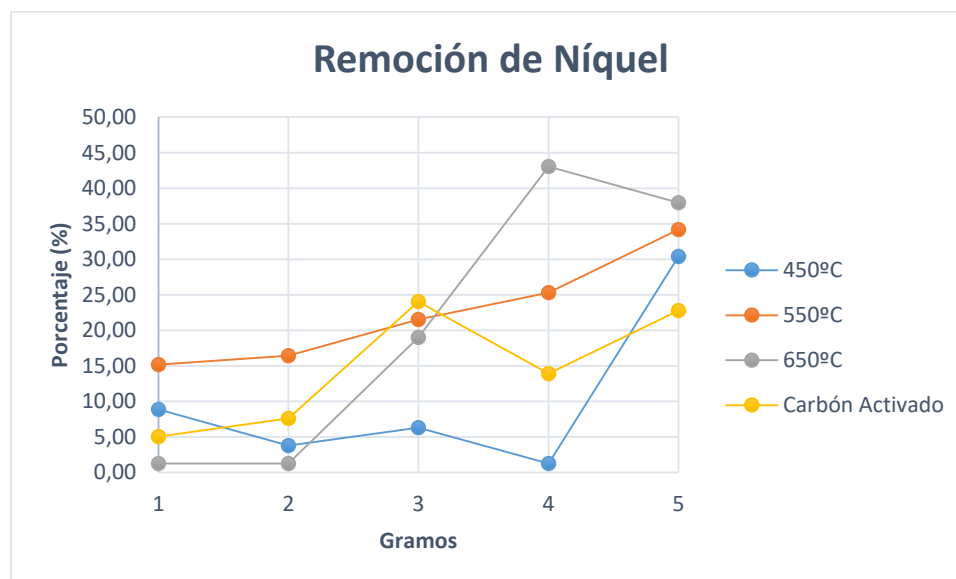
Como se puede observar en las gráficas expuestas, el carbón activado presentó un menor porcentaje de remoción de cinc frente al biochar de distintas temperaturas, exceptuando el de 450°C. Así mismo, se determina que para este material a medida que se aumentaba la carga, también lo hacía su porcentaje de remoción de cinc. El biochar que presentó mejor eficiencia en la remoción de cinc fue el producido a 450°C, el cual se obtuvo un porcentaje de remoción a partir de los 3 gr mayor al 75%, sin embargo en 1 gr también se presentó un alto grado de remoción, siendo 2 gr el punto más bajo de eficiencia, superando apenas el 50%. Para los biochar producidos a 550 y 650°C, el comportamiento fue similar, aunque se evidenció que para el biochar 550°C el pico de remoción se presentó en los 4 gr, descendiendo a partir de este punto, por lo cual se determinó que para esta temperatura, 4 gr es la carga óptima. Por el contrario, el tope de remoción del biochar 650°C fue en los 5 gr, presentando un ascenso en la remoción desde los 2 gr hasta el punto mencionado, es posible que el grado de remoción siga aumentando a medida que los gramos de carga también lo hagan. En general para el biochar, la menor eficiencia en función de la carga se presentó en los 2 gr, pues en las tres temperaturas de producción, fue allí donde se observó un menor grado de remoción.

La remoción de cinc en función del tiempo, mostro el mayor porcentaje de remoción en los primeros minutos de contacto (20 min) para los cuatro medios evaluados, siendo el biochar de 450°C quien presentó un porcentaje superior. A partir de este tiempo, se evidenció una disminución en la efectividad de los medios, esto debido a que el medio puede presentar una colmatación en los primeros minutos de contacto, lo cual indica que para un alto porcentaje de eficiencia, el tiempo de contacto no debe ser muy elevado. De igual manera, es necesario aclarar que el proceso en general

es eficiente en su evaluación en función del tiempo, debido a que la variación de los datos no es considerable. Los valles del proceso son pequeños si se tiene en cuenta que el porcentaje de remoción más bajo es de 89%.

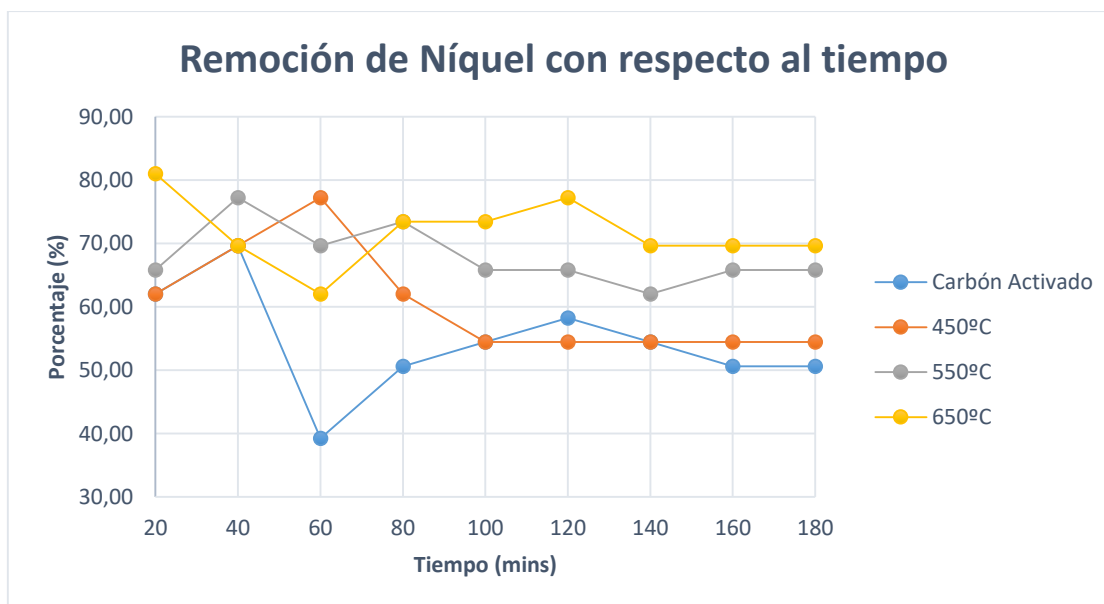
El proceso de remoción de níquel, en función de la carga óptima y el tiempo de contacto, obtuvo los siguientes porcentajes:

Grafica 11. Porcentaje de remoción de níquel en función de la carga.



Fuente: Autores

Grafica 12. Porcentaje de remoción de níquel en función del tiempo.



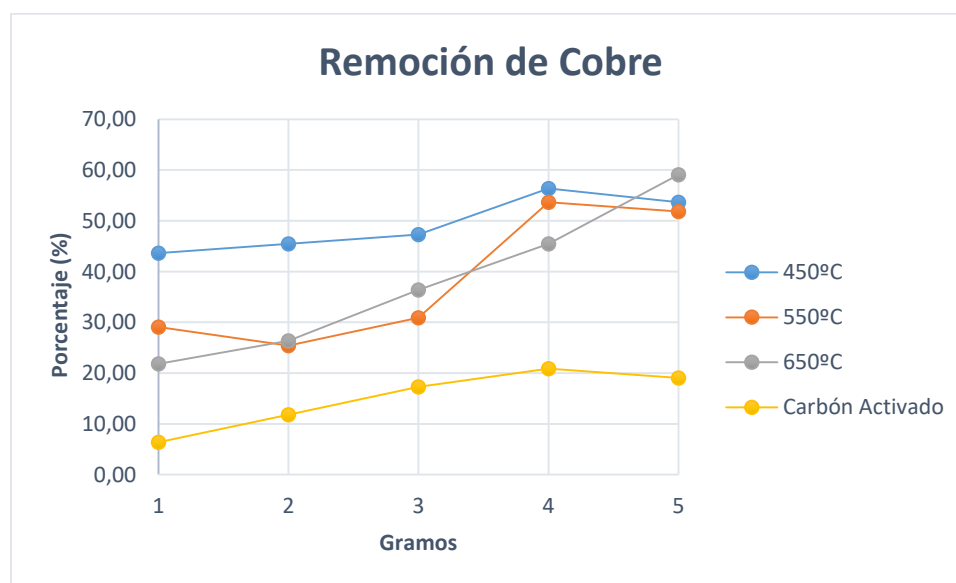
Fuente: Autores

La grafica 11, en función de la carga muestra que el Carbón Activado presentó su mejor porcentaje de remoción en 3 gr, superando al biochar en las tres temperaturas, sin embargo antes y después de este valor de carga, estuvo por debajo del biochar. El biochar de 450°C muestra un ascenso considerable a partir de los 4 gr, siendo el mejor punto en 5 gr, lo cual puede indicar que si esta carga aumenta, así mismo lo hará el porcentaje de remoción. El biochar de 550°C mostro un comportamiento de crecimiento y menos variable en cuanto a efectividad, determinando que a mayor carga de biochar, mayor la eficiencia de remoción de níquel. Finalmente el biochar producido en 650°C comenzó con un bajo porcentaje de remoción para los primeros valores de carga, y finalmente mostro una mayor variación con respecto a los demás medio filtrantes, alcanzando su pico en 4 gr y un porcentaje de remoción de 43%, siendo finalmente el mejor de los cuatro medios filtrantes.

En función del tiempo, en los primeros minutos de contacto se presentó un alto porcentaje de remoción de níquel. Desde el minuto 80, el biochar producido a 650°C estuvo por encima de los demás medios en porcentaje de remoción, siendo el que mejor rendimiento tuvo de todos los medios filtrantes. Con respecto al níquel, el carbón activado fue el medio que presentó el rendimiento más bajo, presentando sus mejores resultados en los primeros minutos (40 min), a partir de allí presentó una disminución considerable y apenas aumento poco su eficiencia al final del tiempo total. Finalmente el medio más recomendable para la remoción de níquel será el biochar producido a 650°C, pues sus altos porcentajes de adsorción perduraron a través de las 3 horas de estudio.

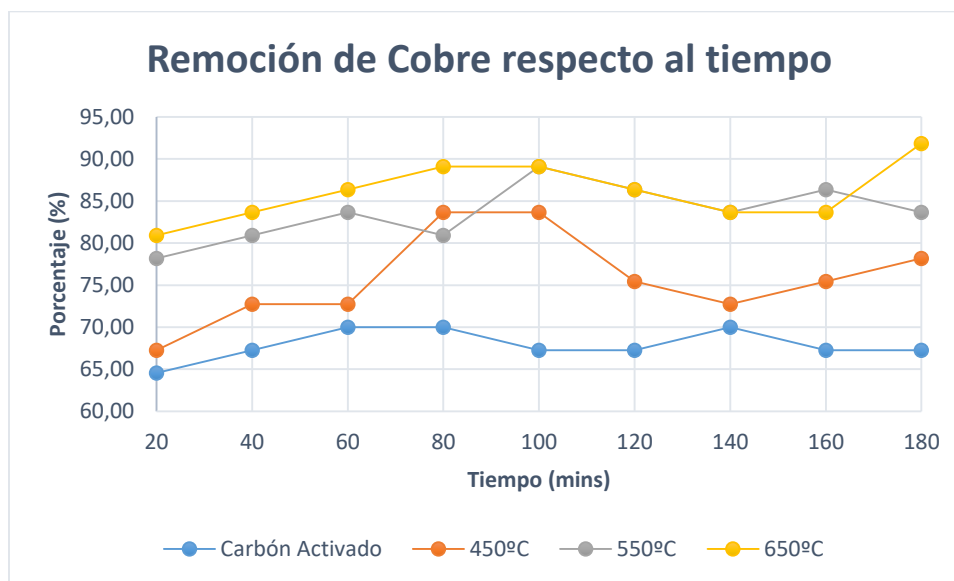
El proceso de remoción de cobre, en función de la carga óptima y el tiempo de contacto, obtuvo los siguientes porcentajes:

Grafica 13. Porcentaje de remoción de cobre en función de la carga.



Fuente: Autores

Grafica 14. Porcentaje de remoción de cobre en función del tiempo.

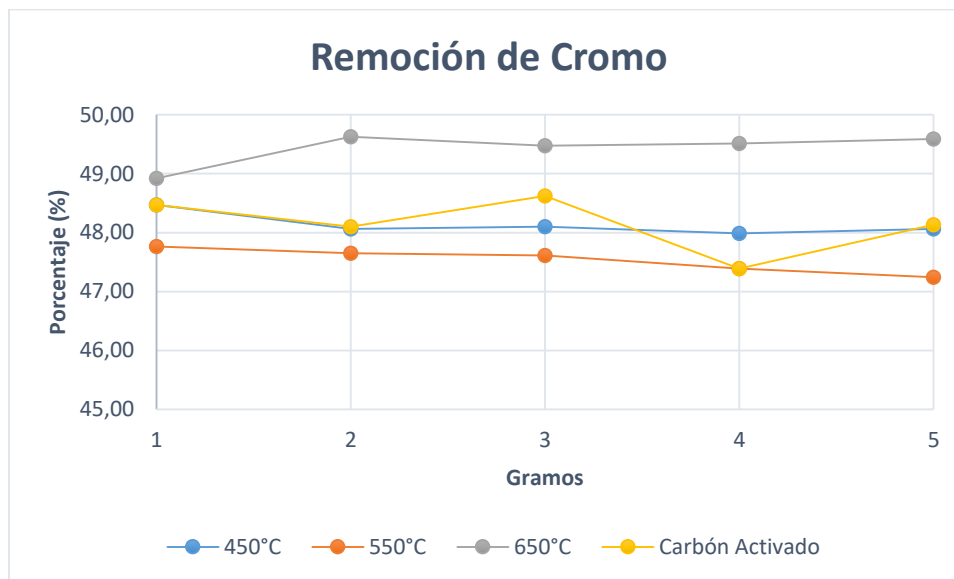


Fuente: Autores

En la remoción de cobre en función de la carga, carbón activado presentó resultados inferiores con respecto a los demás medios, superando apenas el 20%, y siendo muy inferior en comparación con el biochar. El biochar producido a 650°C presentó un comportamiento en ascenso entre carga y remoción, siendo en 5 gr el punto más alto, estando por encima de los otros tres medios, lo cual indica que a mayor carga, mayor porcentaje de remoción de acuerdo a la gráfica 13. En 550°C, se evidenció una mayor variación de porcentaje removido teniendo su punto más alto en 4 gr, a partir allí donde se presenta un pequeño descenso, con lo cual se determina que es este su punto de colmatación de acuerdo a la gráfica 13. Finalmente, el biochar producido a 450°C fue el que estuvo siempre por encima de los demás medios, presentando el mejor rendimiento de remoción de cobre, con porcentaje máximo de 56%, e igualmente presentó un pequeño descenso a partir de los 4 gr. La remoción de cobre en función del tiempo presentó los resultados más bajos con el carbón activado, teniendo un porcentaje menor al 70%, mostrando gran inferioridad con respecto al biochar producido a diferentes temperaturas. Para el biochar, a diferencia del níquel y el cinc, los mejores rendimientos para las tres temperaturas se observaron entre los 80 y los 100 minutos, exceptuando el de 650°C, que al final de las 3 horas tuvieron un aumento considerable y el punto más alto de todo el proceso, y presentó un mejor rendimiento y menos variable.

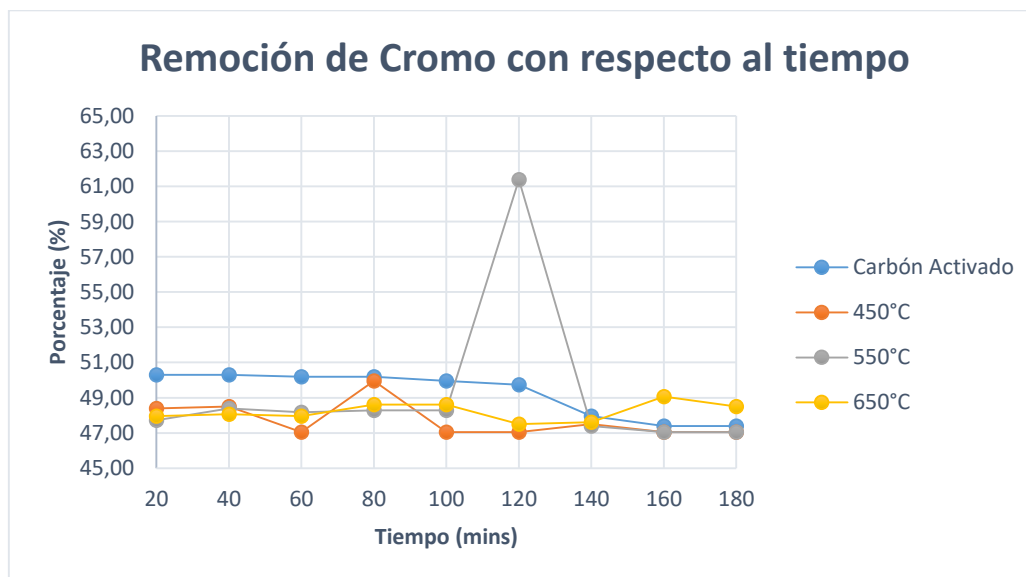
El proceso de remoción de cromo, en función de la carga óptima y el tiempo de contacto, obtuvo los siguientes porcentajes:

Grafica 15. Porcentaje de remoción de cromo en función de la carga.



Fuente: Autores

Grafica 16. Porcentaje de remoción de cromo en función del tiempo.



Fuente: Autores

Como se puede observar en la gráfica, el proceso en general no presentó variaciones notorias, es decir los datos obtenidos para la evaluación de la carga óptima no posee picos en ninguno de los medios adsorbentes, agregado a esto se observa que el medio de biochar a 650°C presentó los porcentajes de remoción más altos, sobre los tres medios restantes, siendo este el valor más alto en

cada una de las cantidades presentes (1g, 2g, 3g, 4g, 5g), siendo el valor en 5gr el más alto de todos, sin embargo también se observa que ninguno de los resultados supera el 50% por lo que no se considera una eficiencia muy alta, sin dejar de lado que remueve éste metal, por otro lado, el carbón activado y los medios de Biochar a 450 y 550°C, tienen un comportamiento bastante similar, aunque el último presenta un descenso mínimo en las cantidades más grandes. Es necesario aclarar que al tener contacto con el Sulfato de Manganeso ($MnSO_4$) utilizado como titulante, el cromo pasa de un estado trivalente a uno hexavalente, de manera que todos los cálculos para la determinación de las concentraciones luego del contacto con los medios se realizaron con el estado hexavalente, exceptuando la solución madre.

En función del tiempo, así como en la evaluación de la carga óptima no se presentan variaciones considerables, exceptuando en un punto; cumplidas las dos horas, el medio filtrante de Biochar a 550°C presentó el punto más alto de la tercera fase en cuanto al cromo, debido a que exhibe un pico importante, con una efectividad de casi el 62%, por lo que sin duda este es el medio que presentó mejor rendimiento, agregado a esto, tanto los resultados en un tiempo diferente de este medio, así como los medios restantes no superan el 50% de eficiencia. Para el caso específico del carbón activado, este presenta un descenso en la parte final por lo que es probable que se deba a la colmatación del medio.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

El biochar producido a partir de cascarilla de arroz presentó distintas características en textura y color, como se ve en la tabla 4, esto se debe a la diferencia de temperatura en la producción de los mismos. Los rendimientos en la producción de Biochar están promediando el 20 al 25 % rangos normales en la producción de biochar por pirolisis

Se determinó la carga óptima para cada uno de los medios adsorbentes en cada una de las soluciones metálicas, con el fin de utilizar dicho valor de carga en la FASE TRES. En la remoción de cinc en función de la carga, los valores óptimos para todos los medios fueron de 5 gr, exceptuando en 550°C que fue de 4gr, presentado allí el mayor porcentaje de remoción. En general, el medio más eficiente para la remoción de cinc fue el biochar producido a 450°C en 5 gr con un valor de remoción del 80%, sin embargo el carbón activado y el biochar de 650°C presentaron porcentajes cercanos.

La remoción de cinc en función del tiempo, fue más efectiva en los primeros 20 minutos de contacto del medio con la solución metálica, teniendo un mejor resultado con el biochar de 450°C y un porcentaje de 96%, sin embargo la diferencia entre el mayor porcentaje de remoción y el menor, no es elevado, por lo cual la adsorción del cinc no se ve afectada considerablemente por el factor tiempo de contacto.

En función de la carga, la remoción de níquel presentó mejor desempeño en el biochar de 650°C con 4 gr, no obstante ninguno de los valores en carga de cada uno de los medios supera el 50%, por lo cual la adsorción de este metal no se considera viable la utilización de biochar.

Al igual que el cinc, el níquel presentó un mayor valor de adsorción en los primeros minutos (de 20 a 40 min), siendo el biochar a 650°C el medio de mayor eficiencia en este proceso. En función del tiempo, la eficiencia del carbón activado estuvo por debajo de la capacidad adsorbente del biochar en sus distintas temperaturas, por lo cual se puede concluir que la afinidad del níquel es más alta por el biochar de cascarilla de arroz que por el carbón activado.

El procedimiento de adsorción de cobre, nos mostró un resultado con mucha diferencia entre el carbón activado y el biochar, siendo el primero muy inferior en cuanto al porcentaje de remoción en cada una de las cargas evaluadas con respecto a los otros medios tenidos en cuenta. Por otro lado, el proceso en general solo se hace viable a partir de los 4 gr para el biochar, pues en esta cantidad el porcentaje de eficiencia supera el 50%. A pesar que el mayor valor de remoción se observó en el biochar producido a 650°C y 5 gr, los resultados de esta misma carga para los otros medios de distinta temperatura son muy cercanos al considerado el mejor. En función del tiempo, se concluye que la solución de cobre debe ser expuesta a un tiempo de contacto alto (80 a 100 min), no obstante el mayor porcentaje de remoción se presentó a las tres horas con el biochar de 650°C, superando el 92%.

Debido a que la determinación para la concentración de cromo se realizó por retroceso con Sulfato de Manganeso ($MnSO_4$), se puede considerar que el Cromo +3 cambie en un estado a Cromo +6, es necesario realizar un estudio más detallado en función de este metal. El Biochar cumplió con remover un porcentaje del compuesto contaminante, por lo que la utilización de este medio se hace viable para éste y los demás metales presentados, aunque se deja a criterio el uso del mismo, ya que si se prevé hacer un uso industrial, y el volumen a remover es muy alto, será necesario realizar otros estudios que permitan establecer el uso eficiente de este medio filtrante.

Teniendo en cuenta el tema económico en el uso de este medio, es necesario especificar que compuesto será removido, debido a que el medio tiene más afinidad por unos que por otros, como se vio en el porcentaje de remoción de cada uno, algunos apenas superaban el 50% mientras que otros tenían una efectividad que superaba el 80%, por lo que dependiendo de la cantidad que se quiera remover, se hace uso de la cantidad necesaria de Biochar, a una temperatura determinada, o ya sea con un tiempo específico, de manera que no se realice Biochar en cantidades excesivas y puedan reducirse los costos de operación.

Finalmente se concluye que en general el biochar producido a diferentes temperaturas fue mucho más efectivo que el medio adsorbente comercial conocido como carbón activado, la afinidad de los metales por material producido a partir de cascarilla de arroz es grande, es entonces factible la utilización de este medio para la adsorción de los metales de interés (cinc, cobre, cromo y níquel),

de manera que el medio adsorbente conocido como Biochar puede utilizarse en procesos de tratamiento de agua donde se encuentren concentraciones de metales pesados que deban ser removidos, de acuerdo a los resultados obtenidos.

9.2. Recomendaciones

Ya que el proceso se realizó teniendo en cuenta variables como presión y temperatura, sería recomendable explorar el proceso, con estudios enfocados en la influencia que tiene el área superficial del Biochar sobre la adsorción de compuestos metálicos y como varía dependiendo con la temperatura de producción.

Se recomienda realizar el análisis con una solución mezcla de metales para ver la selectividad del biochar y comprobar la afinidad de los diferentes metales evaluados.

Se sugiere realizar la determinación de los metales usando otro tipo de método cuantitativo como por ejemplo adsorción atómica o espectrofotometría para corroborar los datos establecidos en este trabajo.

Realizar un estudio detallado de la adsorción de cromo ya que es un metal que se oxida rápidamente.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abezna, D. (Junio de 2012). Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Obtenido de http://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_202695/PFC_DanielPacoAbenza.pdf
- AgroWaste. (2013). Pirólisis. Obtenido de <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/PIROLISIS.pdf>
- Agua. (2013). Obtenido de <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>
- Ahmad, M., Upamali, A., Lim, E., Jung, Zhang, M., Bolan, N., . . . Sik Ok, Y. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 19-33.
- Aqaltda. (s.f.). Obtenido de www.aqaltda.com/antracita
- Aydiner, C., Sen, U., Koseoglu-Imer, D., & Dogan, E. (2016). Hierarchical prioritization of innovative treatment systems for sustainable dairy wastewater management. *Journal of Cleaner Production*, 4605-4617.
- Badwinfilter. (s.f.). Obtenido de www.baldwinfilter.com/literature/Spanish/TechTips/201502TechTipsS.pdf
- Barakat, M. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 361-377.
- Beesley, L., & Marmiroli, M. (2011). The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution*, 474-480.
- Botero, B. U. (25 de Octubre de 2010). Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>
- Botini, M., Pereira Tangerino, E., & Sanchez, I. (2012). Synthetic non-woven fabrics & sand vertical filtration columns as a slow filtration pre-treatment system. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 40-51.
- Bvsde. (s.f.). Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/desinfeccion/capitulo5.pdf>
- Carvalho, I., Fernandes, R., Calijuri, M., & da Fonseca, A. (2012). Rainwater treatment in airports using slow sand filtration followed by chlorination: Efficiency and costs. *Resources, Conservation and Recycling*, 124-129.
- Carvalho, S., Zanini, J., Isique, W., Minillo, A., Pereira Tangerino, E., Pine, J., & Sanchez, I. (2014). Antrazine herbicide removal through a combination of slow sand filtration and granular activated carbon filters. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 125-134.
- Castro, C., Gonzalez, C., Sanchez, G., Gomez, C., Molina, F., & Velasquez, L. E. (2013). Control de Fasciola hepatica en el agua de consumo animal a traves de filtracion rapida y lenta. *Revista EIA*, 133-141.
- Cuevas, J. (s.f.). Pirolisis y Gasificacion. Obtenido de https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jaimefa/jaimecuevas/clase8.pdf
- Diamadopoulos, E., Agrafioti, E., & Kalderis, D. (2014). Ca and Fe modified biochars as adsorbents of arsenic and chromium in aqueous solutions. *Journal of Environmental Management*, 444-450.

- Diop, C., Diarra, M., Sonko, M., Tine, M., Matty, F., da Silva, A., . . . Tine, A. (2014).
Experimental study of slow sand filtration for the treatment of various wastewaters in tropical environment. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 2828-2841.
- Ecured. (2015). Obtenido de http://www.ecured.cu/Aguas_residuales
- EcuRed. (2015). Obtenido de <http://www.ecured.cu/Metales>
- EcuRed. (2015). Obtenido de www.ecured.cu/Granulometría
- EcuRed. (2015). Obtenido de <http://www.ecured.cu/Arena>
- EcuRed. (2015). Obtenido de <http://www.ecured.cu/Grava>
- Environmental Protection Agency. (s.f.). *The Brownfields and Land Revitalization Technology Support Center*. Obtenido de Glossary: <https://brownfieldstsc.org/glossary.cfm?q=1>
- Fao. (s.f.). Obtenido de www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del.../es/
- Garzon-Zuñiga, M., Buelna, G., & Moeller-Chavez, G. (2012).
La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 153-161.
- Gong, Y., Huang, Y., Lv, H., & Tang, J. (2015).
Preparation and characterization of a novel graphene/biochar composite for aqueous phenanthrene and mercury removal. *Biosource Technology*, 355-363.
- Green Facts. (s.f.). Obtenido de <http://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/contaminante.htm>
- Gonzalez, M. (08 de Noviembre de 2010). La Guía de la química. Obtenido de <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/adsorcion>
- Hernández, Y. (8 de septiembre de 2011). Iqtermodinamica. Obtenido de <http://iqtermodinamica.blogspot.com.co/2011/09/la-presion-de-vacio-explicada-que-es-el.html>
- Hoinkis, J., Deowan, S., Panten, V., Figoli, A., Huang, R. R., & Drioli, E. (2012).
Membrane Bioreactor (MBR) Technology - a Promising Approach for Industrial Water Reuse. *Procedia Engineering*, 234-241.
- Huff, M., & Lee, J. (2016).
Biochar-surface oxygenation with hydrogen peroxide. *Journal of Environmental Management*, 17-21.
- Inyang, M., & Dickenson, E. (2015).
The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere*, 232-240.
- Klug, M. (2012).
Pirolisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química PUCP*, 37-40.
- Latorre, J., Sanchez, L., & Valencia-Zuluaga, V. (2009).
Mejoramiento de la calidad del agua de riego por filtración en múltiples etapas (FiME). *Agronomía Colombiana*, 407-415.
- Lee, E., & Oki, L. (2013).
Slow sand filters effectively reduce *Phytophthora* after a pathogen switch from *Fusarium* and a simulated pump failure. *Water Research*, 5121-5129.

- LEGACY. (8 de Septiembre de 2001). Obtenido de http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/thermal/temperature_sp_06sep01.html
- Liu, Y., Tan, X., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 70-85.
- Lourenço, N., Franca, R., Moreira, M., Gil, F., Viegas, C., & Pinheiro, H. (2015). Comparing aerobic granular sludge and flocculent sequencing batch reactor technologies for textile wastewater treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 57-63.
- Maldonado, V. (s.f.). Filtración. Obtenido de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoII/nueve.pdf>
- Maravic, N., Seres, Z., Takaci, A., Nikolic, I., Soronja-Simovic, D., Jokic, A., & Hodur, C. (2016). Treatment of vegetable oil refinery wastewater using alumina ceramic membrane: optimization using response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, 3132-3137.
- Ministerio de Ambiente. (Junio de 2004). Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia. Obtenido de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PLAN_NACIONAL_DE_MANEJO_DE_AGUAS_RESIDUALES_MUNICIPALES_EN_COLOMBIA.pdf
- Mohan, D., Kumar, H., Sarswat, A., Alexandre-Franco, M., & Pittman Jr, C. (2014). Cadmium and lead remediation using magnetic oak wood and oak bark fast pyrolysis biochars. *Chemical Engineering Journal*, 513-528.
- Mohan, D., Sarswat, A., Sik Ok, Y., & Pittman Jr, C. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review. *Bioresource Technology*, 191-202.
- Montoya, J. I. (2014). Pirolisis rápida de biomasa. Medellín.
- Organizacion Panamericana de la Salud. (s.f.). Filtración Lenta. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/desinfeccion/capitulo5.pdf>
- Pereira Tangerino, E., Melo, L., Medri, R., & Sanchez, I. (2013). Evaluación del desempeño de filtración en múltiples etapas usando carbon activado granular y mantas sintéticas no tejidas. *Interciencia*, 726-732.
- Pérez, L., Rodríguez, O., Reyna, S., Sánchez-Salas, J., Lozada, D., Quiroz, M., & Bandala, E. (2015). Oil refinery wastewater treatment using coupled electrocoagulation and fixed biological processes. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1-8.
- Pontificia Universidad Católica del Perú. (s.f.). *Química General*. Obtenido de Soluciones Buffer o Amortiguadoras: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/368-soluciones-buffer-o-amortiguadoras.html>
- QuimiNet. (22 de Julio de 2011). QuimiNet. Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/que-es-la-galvanoplastia-y-el-proceso-de-plateado-2555766.htm>

Ramírez-Medina, L. (2011).

Filtración lenta con arena para el tratamiento de agua en comunidades rurales. Avances. Refertil. (2014). Obtenido de <http://www.refertil.info/sme/es/que-es-el-biochar-y-como-se-hace>

Santos, S., & Boaventura, R. (2015).

Treatment of a simulated textile wastewater in a sequencing batch reactor (SBR) with addition of a low-cost adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 74-82.

Sik Ok, Y., Rajapaksha, A., Chen, S., Tsang, D., Zhang, M., Vithanage, M., . . . Bolan, N. (2016). Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: Potential and implication of biochar modification. *Chemosphere*, 276-291.

Sun, H., Ren, X., & Wang, F. (2015).

The changes in biochar properties and sorption capacities after being cultured with wheat for 3 months. *Chemosphere*, 2257-2263.

Thiel, I. (s.f.). Obtenido de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/MetalesPes.htm>

Varela, O., Rivera, E., Huang, W., Chien, C., & Wang, Y. (2013). Agronomic properties and characterization of rice husk and wood biochars and their effect on the growth of water spinach in a field test. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 251-266.

Welcher, F. (1958). *The Analytical Uses of Ethylenediamine Tetraacetic Acid*. New York, USA: D. Van Nostrand Company, INC.

Zahra, N. (2012). Lead Removal from Water by Low Cost Adsorbents: A Review. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, 1-8.

Zhao, F., Weng, F., Xue, G., Jiang, Q., & Qiu, Y. (2016).

Filtration performance of three dimensional fabric filter in a membrane bioreactor for wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 17-26.

Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A., Chen, H., Zhang, M., & Cao, X. (2014).

Biochar-supported zerovalent iron for removal of various contaminants from aqueous solutions. *Bioresource Technology*, 538-542.