



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

Influencia del tiempo y dosis de carbón de pirólisis de neumáticos usados y activado químicamente, sobre el porcentaje de remoción de arsénico

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA**

AUTORES: Br. Baca García Fernando Junior
Br. Silva Chacon Marisela

ASESOR: Dr. Vega González, Juan Antonio

TRUJILLO – PERÚ

2024

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE

SECRETARIO

ASESOR

DEDICATORIA

ESTA TESIS LO DEDICO A DIOS

A Dios por haberme dado una hermosa familia, porque siempre estuvo presente y guiándome por un buen camino.

A MIS PADRES

AMERICO SILVA, por el apoyo incondicional, por las enseñanzas, los consejos y por estar en los momentos más difíciles de mi vida y sé que desde el cielo me seguirás cuidando y guiando para seguir adelante con mis metas y proyectos.

ADELA CHACON, que desde el cielo me cuidas, me proteges y estas presente en cada momento de mi vida.

Eternamente les estaré agradecida.

A MI HERMANA

THALIA SILVA, por tu motivación, por tus consejos y por estar siempre conmigo en los momentos más difíciles de mi vida.

A MIS HERMANOS

WILLIAN y HECTOR, por el apoyo incondicional y la confianza que depositaron en mi les estaré infinitamente agradecida por todo lo que han hecho por mí.

Silva Chacon Marisela

DEDICATORIA

ESTA TESIS LO DEDICO A DIOS

Por ser mi guía y fortaleza en permitirme llegar con su voluntad y amor en este momento tan especial de mi vida.

A MI MADRE

JUANA GARCIA JUAREZ, por apoyo y consejos que siempre fueron de suma importancia en el transcurso de los días, como también por inculcarme los buenos valores, la valentía, la honestidad, el amor incondicional y la perseverancia, y por todo esto y mucho mas les dedico este logro a mis amados padres, como una meta mas conquistada. Orgullosos de tenerlos con vida y que estén a mi lado en este momento tan importante.

A MIS HERMANOS

Porque siempre han estado a mi lado y me brindaban su apoyo incondicional, como también fueron un ejemplo a seguir en lo profesional. Gracias a ustedes querida familia por ser mi inspiración y mi fortaleza para poder lograr esta meta de mi vida.

Baca García Junior

AGRADECIMIENTO

Al personal docente y administrativo de la Escuela Profesional de Ing. Metalúrgica de la Universidad Nacional de Trujillo por brindarnos la información vital durante nuestra preparación académica para afrontar los temas cotidianos del área minero metalúrgica.

Igualmente agradecemos profundamente al Dr. Ing. Juan Vega González por brindarnos toda la orientación durante el desarrollo de la presente investigación y respaldo en este trabajo de examen.

Al laboratorio donde realizamos las presentes pruebas de investigación junto con el apoyo de practicantes, Procesamiento de Minerales, nuestro sincero agradecimiento.

Baca Garcia, Junior

Silva Chacon Marisela

Atte.: Los autores

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE	vi
LISTADO DE TABLAS.....	ix
LISTADO DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPITULO I.....	1
Introducción	1
1.1 Realidad problemática	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Fundamento teórico	23
1.4. Justificación	33
1.5. Problema	33
1.6. Hipótesis	33
1.7. Objetivos	34
1.7.1 Objetivo General.....	34
1.7.2 Objetivos Específicos.....	34
CAPÍTULO II	35

Material y Métodos	35
2.1. Material de estudio.....	35
2.1.1. Población.....	35
2.1.2. Muestra	35
2.2. Métodos y técnicas.....	35
2.3. Tipo de investigación.....	36
2.3.1. Según el propósito: Aplicada	36
2.3.2. Según el diseño de investigación: Experimental, de tipo correlacional – causal.....	36
2.4. Diseño experimental	36
2.4.1. Determinación de los niveles	37
2.4.1.1. Determinación de los Niveles	37
2.4.1.2. Matriz de Diseño.....	38
Tabla 5.....	38
2.5. Material, equipos e instrumentos de medición.	38
2.5.1. Materiales.....	38
2.5.2. Equipos	39
2.5.3. Instrumentos.....	39
2.6. Procedimiento experimental:	40
CAPÍTULO III.....	44
Resultados Experimentales	44

3.1. Resultados	44
CAPÍTULO IV	48
Discusión de resultados.....	48
CAPÍTULO V.....	52
Conclusiones y recomendaciones.....	52
5.1. Conclusiones	52
5.2. Recomendaciones.....	53
REFERENCIAS.....	54
APÉNDICES	62
Anexo B: Reporte de análisis químico de soluciones después de adsorción con carbón activado de pirólisis.....	67
Anexo C: Fotografías.....	68

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: <i>Cambios según la temperatura</i>	27
Tabla 2: Análisis químico del mineral	35
Tabla 3: Variables independientes y sus niveles en escala natural para la remoción de As.....	37
Tabla 4 Variables independientes y sus niveles en escala natural para la rremoción As.....	37
Tabla 5: <i>Diseño experimental bifactorial</i>	38
Tabla 6: Análisis de negro de humol	44
Tabla 7: Remoción promedio de As (%) mediante uso de negro de humo de pirólisis de NFU.	44
Tabla 8: Resultados de remoción de As (%) con negro de humo.....	45
Tabla A-1: Resultados de remoción de As (%) con negro de humo.....	62

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Esquema secuencial de pruebas experimentales.....	43
Figura 2: Efecto principal de remoción de As (%) variando dosis de negro de humo de NFU..	46
Figura 3: Efecto principal de remoción de As (%) variando el tiempo de contacto (h)	46
Figura 4: Interacción dosis(g/L) y el tiempo de contacto (h) para remoción de As.....	47
Figura 5: Interacción de tiempo de contacto (h) y dosis (g/L) para remoción de As (%)......	47
Figura B-1: Diagrama de Pareto.....	63
Figura C-1: Gráfica de normalidad referente a la remoción As (%)......	64
Figura C-2: Gráfica de normalidad referente a la remoción de As (%)......	64
Figura C-3: Gráfica de residuos referente a la remoción de As (%)......	65

RESUMEN

Se investigaron la influencia de las variables dosis (g/L) y tiempo de contacto (h), de carbón de pirólisis de neumáticos usados (NFU) activado químicamente para la remoción de arsénico de un efluente ácido generado a nivel laboratorio.

Para la remoción de arsénico se utilizó un diseño bifactorial con la variable dosis de carbón activado con los niveles: 1, 2 y 3 (g/L); tiempo de contacto con los niveles: 0.5, 1.5, 3, 6 y 24 h, el carbón llamado negro de carbón o negro de humo se obtuvo del proceso de pirólisis de neumáticos usados de la empresa ECOMASERG, se activó con ácido nítrico y utilización de hidróxido de calcio.

Los resultados obtenidos muestran el mayor valor obtenido de remoción de arsénico fue de 47.25% con dosis de 3 g/L y tiempo de contacto 24 horas, el menor valor fue de 17.46% con dosis de 1 g/L y 0.5 horas de contacto.

Según el análisis de varianza, con un nivel de significancia de 95%, la dosis (g/L) de carbón de pirólisis con valor-P=0.00, el tiempo de contacto (h) valor-P=0.00, la interacción de variables tiene un valor-P= 0.493, por lo que se concluyó que las variables estudiadas influyen significativamente en la remoción de arsénico del efluente generado a nivel laboratorio con relave minero en medio ácido con pH =4.

Palabras clave: remoción de arsénico, negro de humo, pirólisis, adsorción.

ABSTRACT

The influence of the variables dose (g/L) and contact time (h) of chemically activated used tire pyrolysis charcoal (NFU) on the removal of arsenic from an acid effluent generated at laboratory level was investigated.

For arsenic removal, a bifactorial design was used with the variable dose of activated carbon with levels: 1, 2 and 3 (g/L); contact time with levels: 0.5, 1.5, 1, 3, 6 and 24 h, the carbon called carbon black or carbon black was obtained from the pyrolysis process of used tires of the company ECOMASERG, activated with nitric acid and use of calcium hydroxide.

The results obtained show that the highest arsenic removal value obtained was 47.25% with a dose of 3 g/L and a contact time of 24 hours; the lowest value was 17.46% with a dose of 1 g/L and 0.5 hours of contact.

According to the analysis of variance, with a significance level of 95%, the dose (g/L) of pyrolysis coal with P-value=0.00, the contact time (h) P-value=0.00, the interaction of variables has a P-value=0.493, so it was concluded that the variables studied significantly influence the removal of arsenic from the effluent generated at laboratory level with mine tailings in acid medium with pH =4.

Key words: arsenic removal, carbon black, pyrolysis, adsorption.

CAPITULO I

Introducción

1.1 Realidad problemática

La economía circular es una tendencia mundial en todos los sectores productivos y/o donde se generan residuos, se vienen desarrollando investigaciones en diversas áreas con resultados prometedores.

Los neumáticos fuera de uso (NFU), son residuos abundantes y que genera el reciclaje ilegal, alto impacto en el ambiente y afecta a las personas que residen a los alrededores donde se realiza el proceso de reciclaje.

Los NFU contienen entre sus componentes principales caucho, alambre de hierro y aditivos, siendo el alambre muy atractivo por los recicladores ilegales, debido que al quemar los neumáticos va a quedar el hierro libre para poder ser comercializada, pero en el proceso de quemado se produce grandes emisiones de CO₂, CO, SO₂, entre otros, además de grandes cantidades de humos que afectan la salud de las personas.

Desde fines del siglo pasado se han realizado investigaciones con procesos alternativos para poder recuperar el caucho y el hierro de los neumáticos como es el caso del proceso de pirólisis, que consiste en reactores que funcionan entre 400 y 800 °C en atmósfera inerte, generando la carbonización de los residuos de caucho y emisión de gases que se luego condensados para la obtención de combustibles. El reúso del material carbonizado denominado char se está buscando darle usos adicionales como materia prima para la obtención de caucho, obtener la activación con la finalidad de darle uso como absorbente.

Por otro lado, los efluentes generados por la oxidación de minerales con arsénico, como arsenopirita, enargita, entre otros, ocasionan la contaminación al medio ambiente, con la

contaminación de aguas subterráneas y ríos que en su recorrido van afectando a la vegetación, animales que luego ingresan en la cadena trófica afectando al ser humano.

La empresa ECOMASERG tiene una planta piloto donde realiza pruebas de pirólisis con NFU, residuos orgánicos de mercados, plásticos, donde se generan productos como residuos carbonizados (char), fuel oil, gases y hierro.

Con esta investigación se pretende utilizar el char obtenido de la pirólisis de NFU mediante activación química con ácido nítrico, y utilizarlo como adsorbente de un metal obtenido a una determinada concentración en agua destilada para evaluar la dosis(g/l) del char activado y el tiempo de contacto en la el porcentaje de remoción de arsénico.

1.2. Antecedentes

En la búsqueda bibliográfica se encontró la siguiente información:

Numerosas tecnologías pueden eliminar el As del agua potable. La adsorción es la opción más atractiva para los sistemas de tratamiento de agua descentralizados (DWTS) para comunidades pequeñas y aplicaciones domésticas porque es confiable, asequible y ambientalmente aceptable. Los adsorbentes sostenibles de bajo costo hacen que la adsorción sea más atractiva para DWTS para abordar algunos de los problemas relacionados con el agua de las pequeñas comunidades. Esta revisión contiene información detallada sobre la clasificación y la toxicidad de las especies de As y las diferentes opciones de tratamiento, incluido el intercambio iónico, las tecnologías de membrana, la coagulación-floculación, la oxidación y la adsorción, y su eficacia bajo varios parámetros de proceso (Neisan et al., 2023).

Reciclaje químico por pirólisis del plástico, los residuos se han considerado un enfoque potencial. Sin embargo, se ha prestado poca atención a la reutilización de los residuos de carbón

generados. La preparación de materiales a partir de residuos carbonizados obtenidos de la pirólisis se ha convertido en una tarea esencial. El objeto de este trabajo es la preparación de carbones activados a partir de la carbonilla (char) resultante de la pirólisis de una mezcla sucia y húmeda de plástico. Los materiales porosos se han aplicado a la adsorción de CO₂. Se investigaron métodos de activación física y química para modificar las propiedades de la textura de la superficie. Las muestras activadas preparadas por activación química con KOH (relación carbón: KOH 2:1; área de superficie, 487,0 m² ·g⁻¹) exhibieron la mayor cantidad de CO₂ adsorción (~49 mg·g⁻¹). La temperatura de activación se exploró entre 680 y 840 °C. Para la activación física, un aumento en la temperatura de activación disminuye la adsorción (Ligero et al., 2023).

LA investigación de compuestos porosos jerárquicos derivados de material Char de neumático usados para captura de CO₂:KN co-dopado, intensificación de procesos y análisis termodinámico. El dopaje KN preciso intensifica significativamente la capacidad de adsorción del CO₂ de carbón de neumático usado de 0,45 a 2,60 mmol/g (1 bar, 0 °C), un aumento de 4,78 veces. Los estudios termodinámicos han demostrado que el modelo de Langmuir describe con precisión el proceso y reacción de adsorción, que tiene lugar espontáneamente a temperaturas inferiores a 80,52 °C. Este trabajo presenta un proceso eficiente para la mejora char de neumáticos usados, y un método novedoso de co-tratamiento de residuos y CO₂ (H. Wang et al., 2023).

En la investigación “Revalorización de un residuo de carbón pirolítico de plásticos posconsumo en carbón activado para la Adsorción de plomo en agua”, se centra en el uso de un carbón producido durante la pirólisis de una mezcla de plásticos no reciclables como un precursor para la preparación de carbón activado poroso con alto desarrollo de adsorción y absorción de plomo en el agua. Se utilizó activación física y química para mejorar la porosidad, el área superficial y la química superficial del carbón. Los materiales finales de carbón activado se

caracterizaron a través de isothermas de adsorción N₂, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía infrarroja transformada de Fourier, análisis del contenido de metales por espectroscopía de masas de plasma acoplado inductivamente y pH de punto cero de carga. El char nativo mostró adsorción de 348 mg Pb·g⁻¹ y lixiviación considerablemente alta de carbono, principalmente orgánico, 12%. Después de la estabilización con lavado con HCl y la activación con activadores de carácter básico, es decir, CO₂, NaOH y KOH, se obtuvieron adsorbentes más estables, sin lixiviación orgánica y con una estructura porosa desarrollada, siendo el orden de efectividad de activación KOH (487 m² · g⁻¹) > NaOH (247 m² · g⁻¹) > CO₂ (68 m² · g⁻¹). La activación con KOH resultó en la remoción más efectiva de Pb en agua con una saturación adsorción de 747 mg Pb·g⁻¹ (Solís et al., 2022).

En la investigación “Efectos sinérgicos y antagónicos de la co-pirolisis de plásticos y rastrojos de maíz para producir carbonilla y carbón activado”, se estudiaron las propiedades fisicoquímicas del char y el carbón activado producidos a partir de la co-pirolisis de rastrojo de maíz (CS) y plásticos, poliestireno (PS) y tereftalato de polietileno (PET). Se realizó un análisis de gas no isotérmico de los volátiles utilizando un espectrómetro de masas en línea para correlacionar la degradación térmica de los subproductos gaseosos con la formación de poros en los materiales carbonizados. Los hallazgos determinaron que la adición de PS o PET promueve la formación del producto de carbón sólido con tamaños de poro o áreas superficiales superiores al promedio en comparación con las muestras de control. La adición de PET al rastrojo de maíz aumenta el área de superficie del carbón formado. El carbón formado a partir de una relación de masa CS:PET de 1:1 produjo carbón con un área superficial de 423,8 ± 24,8 m²/ga 500 °C y una duración de 2 h, como la cantidad de PET disminuyó, mostrando una tendencia del PET a aumentar el área superficial de los materiales carbonizados sinérgicamente. La adición de PS al rastrojo de

maíz promovió la formación de carbonilla con, en promedio, tamaños de poro más grandes que las muestras de carbonilla de control. Los materiales carbonizados se activaron químicamente con hidróxido de potasio, y el carbón activado que se formó tenía áreas de superficie más bajas pero grupos funcionales de superficie comparables a las muestras de control. Las pruebas de adsorción de Vanilina mostraron que el carbón activado del rastrojo de maíz se desempeñó mejor en la eliminación del 95% de la vainillina después de 2 h. Por el contrario, el carbón activado de los productos carbonizados producidos a partir de la co-pirólisis de rastrojo de maíz y poliestireno o rastrojo de maíz y tereftalato de polietileno eliminó el 45 % y el 46 % de la vainillina después de 2 h, respectivamente. Los hallazgos sugieren que los plásticos tienen una relación sinérgica en la producción de precursores de carbón con porosidad mejorada, pero que afectan de manera antagonista las propiedades adsorbentes del carbón activado (Gale et al., 2022).

En la investigación “Caracterización y uso del char producido a partir de pirólisis de posconsumo mixto de plástico desperdiciado”, los residuos de plástico (polipropileno (PP), poliestireno (PS) y film de polietileno (PE)). El producto sólido de la pirólisis está caracterizado y probado para su uso como adsorbente de plomo presente en medios acuosos. La temperatura de pirólisis tiene una gran influencia en el rendimiento del producto sólido, disminuyendo cuando la temperatura aumenta. El mayor rendimiento es a partir de la pirólisis a menor temperatura (450 °C), llegando casi al 14%. Los resultados de la caracterización sólida del producto revelan que el contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno disminuye con el aumento de temperatura de pirólisis. Además, tanto el contenido de cenizas como el de volátiles están relacionados con la temperatura pirólisis, el contenido de ceniza es mayor cuando la temperatura es mayor, mientras a mayor temperatura se obtiene menor contenido de volátiles. Con respecto a la superficie específica, una mayor temperatura de pirólisis mejora las propiedades del producto sólido como un

adsorbente. La capacidad de adsorción aumenta cuando aumenta la temperatura de pirólisis, con el valor más alto de 7.91 mg/g para el sólido obtenido en la pirólisis a 550 °C. Además, la capacidad de adsorción aumenta cuando la concentración inicial de plomo se eleva, alcanzando un valor máximo cercano a los 26 mg/g para una concentración inicial de 40 mg/L. El modelo Sips es el que mejor reproduce los resultados experimentales del estudio de adsorción de equilibrio de procesos (Martín-Lara et al., 2021).

El estudio de la adsorción de As (III) por un nuevo biomaterial procedente de la pirólisis de quitina. Para obtener la máxima superficie, la quitina-carbón se trata con ácido nítrico. Entonces, una especie de nuevo bio-material se prepara mediante la carga de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el carbón obtenido por pirólisis de quitina, llamado $(\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-char})$. Espectroscopia IR antes y después del tratamiento de carbonizarse por pirólisis revelan al menos tres patrones distintos de cambios máximos. La adsorción, se realizó el estudio a diferentes dosis, pH e iones coexistentes en el medio, y se hizo por lotes. La cinética de adsorción sigue dos ecuaciones de primer orden. Los estudios cinéticos arrojan un equilibrio óptimo a tiempo de 2 h con una dosis de adsorbente de 0,4 g/L y una concentración de 10 mg/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Usando solo 0,4 g/L de carbón, la capacidad máxima de remoción es de alrededor del 99,8%. El resultado indica que el $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-char}$ tiene una alta capacidad de adsorción en el proceso de eliminación de arsénico(III) (Z. Yang et al., 2021).

Primero se aplicó un proceso integrado de filtración y electrosorción para permitir la eliminación de arsénico de alto rendimiento para la remediación de aguas subterráneas. Se utilizó un filtro compuesto de biocarbón de cáscara de arroz y dióxido de manganeso activo (BC activo) para la oxidación de As (III) a As (V) y la eliminación inicial de As (III, V). Posteriormente, se aplicó electrosorción por desionización capacitiva (CDI) como postratamiento para mejorar la remoción de arsénico. El método BC activo exhibió tasas de eliminación rápidas de 0,75 y 0,63 g

mg⁻¹ h⁻¹ y altas capacidades máximas de eliminación de 40,76 y 48,15 mg g⁻¹ para As(III) y As(V), respectivamente. Es importante destacar que los experimentos de columna demostraron que la capacidad de eliminación de arsénico en el filtro BC activo fue de 2,88 mg g⁻¹, que fue 72 veces mayor que la de BC. Los resultados se debieron a la alta eficiencia (94%) de la transformación redox de As(III) a As(V). La eliminación por electroabsorción de arsénico se controló aún más cambiando el voltaje en CDI. Con un paso de carga de 1,2 V, la concentración total de arsénico se puede reducir a 0,001 mg L⁻¹ con un bajo consumo de energía de 0,0066 kW-h. Además, el sistema integrado puede eliminar el As de las aguas subterráneas reales para alcanzar el valor de referencia de la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua potable (Cuong et al., 2022).

La utilización y minimización de las existencias de llantas gastadas se ha vuelto más viable por pirólisis y activación para producir carbones activados de bajo costo, se ha demostrado que los carbones (STPC), particularmente el alto contenido de Zn, afectan su activación y posterior utilización. No obstante, poca investigación ha examinado exactamente cómo estos aditivos afectan la activación y, en última instancia, qué ocurre con el Zn durante el proceso de activación. Este artículo presenta un estudio sistemático del efecto de Zn, ZnO y ZnS sobre las propiedades físicas de STPC y sus mecanismos de transformación durante la activación del CO₂. Las muestras de STPC lavado con ácido con y sin adición de ZnO y ZnS se activaron utilizando un reactor de lecho fijo en CO₂ al 66,7 % v/v durante 3 h a 850, 950, 1000 y 1050 °C. En estas condiciones, tanto el ZnO como el ZnS actuaron como catalizadores durante la activación, aumentando el área superficial, el volumen de los poros y el quemado. Durante la activación, el ZnO se redujo con C para formar Zn elemental y el ZnS se descompuso térmicamente para liberar Zn y S. El análisis termogravimétrico de Zn y sus compuestos por encima de 600 °C, por separado y mezclado con

carbón lavado con ácido, bajo CO₂ confirma que ZnO y ZnS se disocian para liberar Zn(v) que luego reacciona con CO₂ o S para reformar ZnO o ZnS. Sin embargo, el Zn se elimina progresivamente del carbón activado a temperaturas entre 950 °C y 1050 °C. Estos resultados tienen implicaciones directas para la utilización de SPTC como materia prima para el carbón activado y la producción de carbones activados cargados con Zn (Jones et al., 2021)

La aplicación de biocarbón de lodos de depuradora como adsorbente para la eliminación de contaminantes ha recibido especial atención debido a su bajo costo y funcionalidad superficial. En esta investigación, lodo-neumático biocarbón compuesto (STB) se preparó con éxito a través de co-pirólisis a 300, 500 y 700 °C, respectivamente. El cadmio (Cd) y la tetraciclina (TC) fueron seleccionados como contaminantes objetivo. Los resultados indicaron que STB tiene el área de superficie más alta (49.71 m²/g), más minerales inorgánicos (Caolinita) así como propiedades fisicoquímicas relativamente estables con 10% de partículas neumáticos (TP) a 700 °C. Los resultados de adsorción indicaron que la ecuación de pseudo-segundo orden y el modelo de isoterma de Langmuir podrían describir mejor la adsorción de Cd 2p y TC por STB. La capacidad máxima de adsorción de Cd 2p y TC fue de 50,25 mg/g y 90,09 mg/g, respectivamente. El mecanismo principal del proceso de adsorción de STB para Cd implica principalmente la adsorción de unión de aniones y el intercambio iónico. El mecanismo principal del proceso de adsorción de STB para TC implica principalmente la formación de complejos y el intercambio catiónico. El presente estudio podría establecer una base científica para futuras investigaciones sobre el reciclaje de lodos de depuradora y llantas (Fan et al., 2021).

Recientemente, el reciclaje de desperdiciar llantas ha causado una preocupación generalizada por sus problemas ambientales. La experiencia de la responsabilidad del productor y el sistema tributario es de gran beneficio para los países en desarrollo. El artículo también explica

los esfuerzos del gobierno chino para centrarse en establecer y perfeccionar desperdiciar neumático sistema de tratamiento mediante el fortalecimiento de la legislación. Las principales razones, como el mercado inmaduro, la política no uniforme y los impuestos repetidos para las dificultades de supervivencia de desperdiciar neumático. Se resumen las empresas de reciclaje en China. Entre numerosos métodos de recursos, pirólisis ha sido considerado como un proceso termoquímico prometedor para hacer frente a la desperdiciar llantas. A diferencia de otras revisiones similares que se centran principalmente en su fase líquida, se ha prestado especial atención al carbón sólido, pirólisis de negro de humo, debido a su amplia aplicación y utilización de alto valor en el futuro. Resumimos la investigación disponible sobre la aplicación de pirólisis negro de humo como alternativa al negro de humo comercial en la fabricación de caucho, como carbón activado en el control de la contaminación y como biocarbón para la mejora del suelo. El análisis de los datos disponibles reveló que 1) se ha establecido básicamente la influencia de la temperatura y el tiempo; 2) el tipo de catalizador, la dosis y la selección del reactor deben ajustarse de acuerdo con la demanda del producto; 3) el decapado se ha convertido en el medio principal para mejorar pirólisis negro carbón; 4) el tipo de modificador y el método de modificación deben ajustarse de acuerdo con las características específicas de las materias primas y deben combinarse con los resultados experimentales para realizar la utilización de recursos y aprovechar al máximo su valor económico (Xu et al., 2020).

La chatarra de neumático es un sólido desperdiciar que se puede utilizar potencialmente como materia prima para la producción de combustibles líquidos a través del proceso termoquímico como pirólisis catalítico. Sin embargo, sigue siendo un desafío desarrollar un catalizador eficiente y rentable para la industria catalítica. Pirólisis de neumático. En este estudio, pirólisis de neumático chatarra a 500 °C con el biocarbón producido a partir de la gasificación de

madera de álamo a 850 °C. El catalizador de biocarbón afectó significativamente la evolución de los volátiles y las propiedades del carbón, mientras que tuvo un ligero impacto en los rendimientos de los productos de gas, alquitrán y carbón. El catalizador de biocarbón cataliza el craqueo del limoneno, un producto líquido principal en el alquitrán, para formar significativamente más propano en gases y alcanos o alquenos en el alquitrán. Además, la interacción entre el biocarbón con los compuestos orgánicos que contienen oxígeno promovió la reacción de recondensación, lo que incrementó el contenido de oxígeno en el carbón, pero el catalizador del biocarbón no influyó en la evolución de los compuestos aromáticos. Además, el catalizador pirólisis también hace que el catalizador de biocarbón sea más deficiente en oxígeno y más resistente a la oxidación. La conclusión de todos los resultados mostró que el biocarbón, que se produjo a partir de la gasificación de la madera de álamo, puede ser un catalizador potencial para la pirólisis de neumático (Chao et al., 2020)

La elución del contenido metálico del tallo de algodón (CS) y su co-pirólisis con desperdiciar llantas(WT) se investigó en un reactor de lecho fijo. Se utilizó ácido clorhídrico (HCl) para la lixiviación y se observó una eliminación exitosa de metales del tallo de algodón. Se lograron eficiencias de remoción de 86%, 58%, 48%, 58% y 35% para los metales potasio, calcio, magnesio, sodio y hierro, respectivamente. Pirólisis y co-pirólisis usando varias proporciones de mezcla de tallo de algodón crudo (R-CS) y lavado con ácido (W-CS) con desperdiciar neumático se llevaron a cabo a 550 °C. La co-pirólisis de W-CS con WT no solo dio como resultado un mayor rendimiento de líquido con menores rendimientos de carbón y gas, sino que también mejoró la calidad del aceite pirolítico, lo que demuestra la aparición de un fuerte efecto sinérgico positivo. La adición de WT redujo los compuestos oxigenados, la densidad y el contenido de agua del aceite, mientras que el pH y el poder calorífico aumentaron en comparación con los aceites pirolíticos R-

CS y W-CS. El área porcentual relativa de los hidrocarburos aumentó al 65 % en la copirólisis de WT con W-CS en comparación con el 47 % de R-CS en una proporción de mezcla óptima (CS:WT 1:3). Asimismo, se observó una reducción un 19% mayor de compuestos oxigenados en los aceites copirólíticos W-CS y WT. La copirólisis de WT con R-CS y W-CS dio como resultado una mejor calidad del aceite. Sin embargo, el efecto sinérgico fue menos significativo para R-CS, lo que sugiere que la presencia de metales intrínsecos en R-CS obstaculizó la aparición de efectos sinérgicos (Khan et al., 2020)

La investigación de “Pirólisis de residuos de biomasa y plásticos para la producción de biocarbón y su uso para la eliminación de metales pesados de la solución acuosa”, los experimentos por lotes de Fe, Ni, Cu, Cr, Cd y Pb con biochars y el plástico. Se llevaron carbones para determinar los efectos de varios parámetros experimentales (materia prima, tiempo de contacto, dosis de adsorbente, pH y temperatura de pirólisis). Los modelos de sorción isotérmica demostraron que las capacidades de sorción de biochars son más altas en comparación con el plástico. La máxima eficiencia de eliminación mostrada por biochars y el plástico carbonizados a pH 4 fue 99,86% y 99,93%, respectivamente. Ambos materiales de carbono son por lo tanto reconocidos como un material de control de contaminantes eficiente y amigable con el medio ambiente en varios parámetros estudiados (Singh et al., 2021).

En este estudio, banda de rodadura de neumático (TT) y pared lateral (SW) de desperdicio de neumático fueron utilizados por separado como materia prima para tratamiento de pirólisis, y los carbonizados resultantes se caracterizaron a fondo para explotar las aplicaciones potenciales. Los resultados analíticos muestran que los SW contenían mayor cantidad de carbono fijo (27,55%) y contenido de carbono (82,30%) que los de TT (15,21% y 56,56% respectivamente). Los resultados de TGA indicaron que 400–600 °C es el principal rango de temperatura de

descomposición para ambas alimentaciones. Los rendimientos de carbón mostraron una tendencia decreciente y se estabilizaron a 500 °C, y se logró un mayor rendimiento de carbón de TT que de SW. Por su parte, los carbonizados de TT presentaron mayor área superficial (121,47 m²/g) que los de SW (44,72 m²/g), que podría ser un buen adsorbente o un precursor del carbón activado. Los resultados de FTIR mostraron que el principal grupo funcional de superficie de TT-500 era CO/COC de alcoholes, cetonas o éter, mientras que SW-500 de fenoles, alcoholes y ácidos carboxílicos. Cuando se comparó con productos comerciales, SW-500 mostró mejores propiedades que las de un negro de carbón (N660, 10 µm) en términos de calidad de carbón y contenido de cenizas. Este estudio sugirió que al pirolizar las distintas secciones del desperdiciar neumático es un enfoque prometedor para producir caracteres para aplicaciones más específicas (M. Wang et al., 2019).

El artículo presenta los resultados experimentales del estudio del efecto de los aditivos y dopantes más utilizados (prometedores en términos ambientales) sobre el retardo de ignición de los lodos combustibles preparados a base de residuos de procesamiento de carbón y petróleo. Hemos estudiado los aditivos orgánicos más habituales: aceites vegetales (coco, colza, oliva), combustibles forestales (hojas caídas y hojarasca de pino), componentes de la madera (corteza de roble, aserrín, carbón), residuos vegetales (algas, residuos de girasol, paja), glicerol, trementina, etanol, tiza, cartón y motor neumático pirólisis residuo. Los componentes principales de los combustibles en suspensión eran residuos del procesamiento del carbón (tortas de filtración de carbón coquizable), agua y aceite de turbina usado. Hemos realizado un análisis comparativo de los tiempos de retardo de encendido y las temperaturas umbral (mínimas) de encendido. También se han estudiado las temperaturas máximas de ignición de los combustibles en suspensión. Los experimentos involucraron gotas de combustible con un tamaño (radio) de 1 mm. Las temperaturas

de combustión variaron dentro del rango de 700 a 900 °C. Es razonable agregar 10–20% en peso de tortas de filtración para usar grandes volúmenes de los desechos acumulados del procesamiento del carbón y retener los indicadores reológicos y de rendimiento energético de la lechada. Se estableció que el uso de aceites de colza y coco, carbón, residuo carbonoso de motor neumático pirólisis, la paja, los desechos de girasol y la trementina pueden disminuir de manera más efectiva el retraso de la ignición y la temperatura mínima de ignición del combustible en suspensión (Vershina et al., 2019).

Se ha demostrado que los materiales carbonosos tienen una alta actividad catalítica para la eliminación de alquitrán del gas de síntesis producido a partir de la gasificación de biomasa. El reformado y la gasificación simultáneos de pirólisis los gases y el carbón podrían tener un papel importante en el aumento de la producción de gas y la disminución del alquitrán en el producto de gas de síntesis. Este estudio investiga el uso de carbón de neumáticos como catalizador para la producción de gas de síntesis rico en H₂ y la reducción de alquitrán durante el reformado por pirólisis de biomasa utilizando un reactor de lecho fijo de dos etapas. La muestra de biomasa se pirolizó bajo nitrógeno a una pirólisis temperatura de 500 °C, el evolucionado pirólisis los volátiles se pasaron a una segunda etapa con vapor y los gases se reformaron en presencia de carbón de neumáticos como catalizador. Se investigó la influencia de la temperatura del lecho del catalizador, la relación vapor/biomasa, el tiempo de reacción y los metales de las cenizas de los neumáticos. La influencia de la actividad catalítica de los minerales de cenizas de neumáticos en la composición del gas de síntesis y la descomposición del alquitrán durante el reformado con vapor de la biomasa fue significativa ya que la eliminación de minerales condujo a una disminución en el rendimiento de H₂. El aumento de la tasa de inyección de vapor y la temperatura de reformado resultó en un aumento en la producción de H₂ a medida que se mejoraron las reacciones de reformado con vapor

y gasificación del carbón. El máximo H₂ se obtuvo un contenido en el producto de gas de síntesis de 56 % en volumen a una temperatura de reformado de 900 °C y con una relación de masa de vapor a biomasa de 6 (g/g). La investigación adicional de la influencia de la relación biomasa:vapor en la calidad del gas de síntesis mostró que la relación molar H₂:CO aumentó de 1,8 (relación vapor:biomasa; 1,82 g/g) a 3 (relación vapor:biomasa; 6 g/g) (Al-Rahbi & Williams, 2017).

Este artículo tiene como objetivo el desarrollo sostenible de carbones activados para aplicaciones de valor agregado de la desperdiciar neumático pirólisis producto, neumático carbonizado, para hacer pirólisis económicamente favorable. Se han investigado dos parámetros del proceso de activación, la temperatura de activación (900, 925, 950 y 975 °C) y el tiempo de residencia (2, 4 y 6 h) con vapor como agente activador. Las propiedades de textura de los carbones activados de carbón para neumáticos producidos se han caracterizado mediante experimentos de adsorción-desorción de nitrógeno a -196 °C. El proceso de activación ha resultado en la producción de carbones activados mesoporosos confirmados por la existencia de bucles de histéresis en las curvas de adsorción-desorción de N₂ y las curvas de distribución del tamaño de poro obtenidas del método BJH. El área de superficie BET, el volumen total de poros y el volumen de mesoporos de los carbones activados del carbón de neumáticos se han mejorado a 732 m² /g, 0,91 cm³/g y 0,89 cm³/g, respectivamente. Se ha observado que el área superficial BET, el volumen de mesoporos y el volumen total de poros aumentaron linealmente con el quemado durante la activación en el rango de parámetros experimentales estudiados. Por lo tanto, se ha introducido el área superficial normalizada por rendimiento, definida como el área superficial del carbón activado por gramo del precursor, para optimizar las condiciones de activación. En consecuencia, las condiciones de activación optimizadas se han demostrado como una temperatura de activación de 975 °C y un tiempo de activación de 4 h (Hadi et al., 2016)

Los caracteres fueron producidos a partir de la pirólisis de desperdicio de neumáticos, combustible derivado rechazado y biomasa en forma de huesos de dátil. Los resultados mostraron que los rendimientos de alquitrán de hidrocarburo disminuyeron significativamente con todos los materiales de carbón utilizados en comparación con los experimentos catalíticos sin carbón. Por ejemplo, a una temperatura de craqueo de 800 °C, el rendimiento total de alquitrán de hidrocarburo del producto disminuyó en un 70 % con carbón de neumáticos, un 50 % con carbón RDF y un 9 % con carbón de huesos de dátiles de biomasa en comparación con el carbón sin carbón. Hubo un aumento consiguiente en el rendimiento total de gas. El análisis de la composición del alquitrán mostró que el contenido de compuestos fenólicos disminuyó y los hidrocarburos aromáticos policíclicos aumentaron en el alquitrán producto a temperaturas de carbonización más altas (Al-Rahbi et al., 2016)

El char de pirólisis de neumático (TPC), producido durante la fabricación pirólisis aceite de desperdiciar neumático, se utilizó como materia prima para preparar carbones activados (AC) por activación con KOH. Se utilizaron relaciones ponderales (W) de KOH a TPC entre 0,5 y 6, y temperaturas de activación de 600 a 800 °C (Acosta et al., 2016).

En este trabajo el beneficio a través de pirólisis se estudia ya que las fibras están formadas por polímeros con una pequeña cantidad de caucho debido a que este último es difícil de separar. Los experimentos se realizaron a tres temperaturas (400, 550 y 900°C) en un horno horizontal. Los tres productos -gas, petróleo y char- obtenidos de la pirólisis fue investigado. La composición del gas se analizó mediante cromatografía de gases. El aceite fue estudiado por cromatografía de gases y espectroscopia infrarroja. La estructura porosa del carbón se determinó por adsorción de N₂. Además, se estudió la topografía de los chars mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) (Fernández et al., 2012).

La preocupación por la protección del medio ambiente ha aumentado a lo largo de los años desde un punto de vista global. Hasta la fecha, el predominio de la separación por adsorción en la química ambiental sigue siendo una atención y consideración estética en el extranjero, debido a su bajo costo inicial, simplicidad de diseño, facilidad de operación, insensibilidad a sustancias tóxicas y eliminación completa de contaminantes incluso de soluciones diluidas. Con el renacimiento del modelado de isotermas, ha habido un interés cada vez mayor en este campo de investigación. Confirmando la afirmación, este artículo presenta una revisión del estado del arte del modelado de isotermas de adsorción, sus características fundamentales y derivaciones matemáticas. Además, el avance clave de las funciones de error, se han destacado y discutido sus principios de utilización junto con las comparaciones de modelos de isoterma linealizados y no lineales. En conclusión, la expansión de las isotermas no lineales representa una herramienta potencialmente viable y poderosa, que conduce a una mejora superior en el área de la ciencia de la adsorción (Foo & Hameed, 2010).

Se obtuvieron carbones con diferentes porosidades activando el carbonizado a diferentes grados de quemado. A diferencia de los carbones de grado comercial que generalmente son microporosos, los poros de los carbones de carbón para llantas están compuestos principalmente de mesoporos que tienen un tamaño medio de 500 Å. Tanto el área superficial como el volumen de los poros de los carbones aumentan con el grado de activación y alcanzan un máximo con un quemado del 43 %, por encima del cual la porosidad disminuye con una mayor activación. La adsorción de azul de metileno a partir de soluciones acuosas muestra una cobertura monocapa del adsorbato sobre la superficie del carbón y un acceso completo del adsorbato a todos los poros, lo que genera una alta capacidad de decoloración por unidad de área de los carbones (Lin & Teng, 2002)

El caucho de los desechos de neumáticos se ha utilizado para preparar adsorbentes carbonosos y los productos obtenidos se han probado como adsorbentes de mercurio en solución acuosa. Los adsorbentes han sido preparados mediante la aplicación de tratamientos térmicos, químicos y combinados (térmico y químico o viceversa). El caucho de los neumáticos ha sido: calentado a 400 o 900 °C durante 2 h en N₂, tratado químicamente con una solución de H₂SO₄, HNO₃ o H₂SO₄/HNO₃ durante 24 h, y en dos pasos sucesivos se ha calentado primero a 400 °C durante 2 h en N₂ y luego tratado con H₂SO₄/HNO₃ solución durante 24 h, o viceversa. Los tratamientos efectuados al caucho de los neumáticos disminuyen el contenido de carbono y el contenido de hidrógeno. El contenido de oxígeno y el contenido de nitrógeno aumentan para los productos tratados químicamente. El tratamiento térmico del caucho de los neumáticos da como resultado un mayor desarrollo de área superficial, microporosidad y mesoporosidad que los tratamientos químicos. Estos tratamientos, sin embargo, producen una gran creación de macroporos. En comparación con el caucho inicial, el proceso de adsorción del mercurio es más rápido cuando el material se calienta o se trata con H₂SO₄, HNO₃ o 1:3 solución de H₂SO₄/HNO₃. La capacidad de adsorber mercurio es mayor para los productos calentados que para los tratados químicamente. La adsorción máxima de mercurio es de 211 mg g⁻¹. La constante Kf de la ecuación de Freundlich es tan alta como 108,9 mg.g⁻¹ (Scopus - Detalles del documento - Adsorción de mercurio por adsorbentes carbonosos preparados a partir de caucho de residuos de neumáticos Registrado, s. f.)

La muestra de neumáticos de motocicleta usados para determinar particularmente el efecto de la temperatura, el tamaño de la alimentación y el tiempo aparente de residencia del vapor en la pirólisis rendimientos de los productos y sus composiciones. El rendimiento líquido máximo de 49% en peso se obtuvo en una pirólisis final a temperatura de 475 °C, tamaño de alimentación de

4 cm³, con un tiempo de residencia de 5 s bajo atmósfera de N₂ en un sistema de reactor de calentamiento de tubo de fuego de lecho fijo. Los estudios cromatográficos y espectroscópicos de los líquidos muestran que pueden utilizarse como combustibles líquidos y materias primas químicas, con un poder calorífico de 42,00 MJ/kg (Rofiquil Islam et al., 2008)

El caucho de los neumáticos se puede utilizar como precursor para la producción de carbones activados de alta calidad. Sin embargo, existe la preocupación de que las impurezas inorgánicas presentes en la alimentación de caucho puedan restringir su uso en aplicaciones en fase líquida con requisitos de alta pureza. Este artículo presenta una investigación de la presencia y lixiviación de especies inorgánicas a partir de carbones activados derivados de desperdicio de neumático. Para el propósito de este trabajo, se produjeron varios carbones, se caracterizaron por su área de superficie BET y se analizaron por su composición inorgánica. Posteriormente, se realizaron una serie de pruebas para evaluar la lixiviación de diferentes especies inorgánicas en solución a varios valores de pH y dosis de carbono. Los resultados mostraron que los carbones derivados del caucho contenían concentraciones elevadas de azufre y zinc, así como trazas de otros metales como plomo, cadmio, cromo y molibdeno. Los niveles inorgánicos se vieron significativamente afectados por las condiciones de producción, particularmente el grado de activación del carbón y la naturaleza del agente de gasificación. Sin embargo, las pruebas de lixiviación mostraron que la disponibilidad de estas especies en condiciones de pH neutro era muy limitada. Los resultados demostraron que, al utilizar dosis de carbón comparables a las empleadas en las obras de tratamiento de agua, sólo los niveles de azufre superaron, en algunas ocasiones, los estándares de calidad basados en la salud propuestos para el agua potable (San Miguel et al., 2002)

El dinámico aumento de la fabricación de productos de caucho, en particular los que se utilizan en la industria del automóvil, es responsable de una gran cantidad de residuos,

principalmente en forma de neumáticos usados, de los que se producen más de 17 millones de toneladas al año en todo el mundo (Sienkiewicz et al., 2012).

La preparación de carbones activados mesoporosos altamente desarrollados de fuente renovable *Arundo donax* Linn se realizó utilizando $H_4P_2O_7$ como activador, la temperatura de activación y el tiempo de remojo en las propiedades (rendimiento, área de superficie BET, volumen de poro y grupo funcional de superficie) del carbón activado. El carbón activado óptimo (ALAC) se caracterizó por micrografía electrónica de barrido (SEM), N_2 isothermas de adsorción/desorción, espectrometría de fotoelectrones de rayos X (XPS) y experimentos de adsorción de oxitetraciclina (OTC). Los resultados mostraron que el desarrollo de poros fue significativo a temperaturas >400 °C y alcanzó un área de superficie BET máxima ($1463 \text{ m}^2/\text{g}$) a 600 °C y un volumen total de poros máximo ($1,24 \text{ cm}^3/\text{g}$) a 500 °C. Con una tasa de impregnación baja de $0,4$, el área de superficie BET y el volumen de poro podrían alcanzar hasta $1150,69 \text{ m}^2/\text{g}$ y $0,59 \text{ m}^3/\text{gramo}$. Tanto el área de superficie BET como el volumen de poros aumentaron inicialmente seguido de una disminución después de alcanzar un máximo, con el área de superficie máxima obtenida a una relación de impregnación de $0,75$ y el volumen de poros máximo a $1,0$. (Sun et al., 2013)

Los carbones activados se produjeron a partir de desperdiciar llantas utilizando un método de activación química. El proceso de producción de carbón consistió en la impregnación con hidróxido de potasio (KOH) seguido de pirólisis en N_2 a $600-900$ °C durante $0-2$ h. El método de activación puede producir carbones con un área superficial (SA) y un volumen total de poros de hasta $470 \text{ m}^2/\text{g}$ y $0,57 \text{ cm}^3/\text{g}$, respectivamente. La influencia de diferentes parámetros durante la activación química, tales como pirólisis temperatura, tiempo de retención y KOH/neumático Se exploró la proporción, el rendimiento de carbono y las características de la superficie, y se recomendaron las condiciones óptimas de preparación. El volumen de poro de los carbones

resultantes generalmente aumenta con la cantidad de carbón gasificado por KOH y sus derivados, mientras que el SA aumenta con el grado de gasificación para alcanzar un valor máximo y luego disminuye con la gasificación adicional (Teng et al., 2000)

El objetivo principal de este estudio fue evaluar el riesgo ambiental de los chars derivados de la pirólisis de mezclas de pino, plásticos y llantas usadas, mediante el estudio de su potencial de lixiviación y ecotoxicidad. Se establecieron relaciones entre la composición química y la ecotoxicidad para identificar los contaminantes responsables de la toxicidad. Dado que los contaminantes metálicos fueron el foco del presente estudio, se aplicó un paso de lavado con EDTA a los carbonizados para eliminar selectivamente los metales que pueden ser responsables de la toxicidad observada. Los resultados indicaron que la introducción de biomasa en la pirólisis, la materia prima mejoró la acidez de los carbones y promovió la movilización de compuestos inorgánicos. Caracteres resultantes de la pirólisis de mezclas de pino y plásticos no produjeron eluatos ecotóxicos. Se encontró una relación entre las concentraciones de zinc en los eluatos y su ecotoxicidad para carbones obtenidos de mezclas con llantas. Se encontró una reducción significativa de la ecotoxicidad cuando los carbonizados se trataron con EDTA, lo que se debió a una reducción significativa del zinc en los carbonizados después del lavado con EDTA (Bernardo et al., 2012)

Se realizaron pruebas de cinética de adsorción y equilibrio para investigar el mecanismo de eliminación y difusión de los iones de cobre (II) en el carbón pirolítico de neumáticos obtenido de una planta industrial. Los datos de equilibrio experimental se han analizado utilizando modelos de isothermas de Langmuir, Freundlich y Redlich-Peterson. La precisión del ajuste de los modelos de isoterma a los datos de equilibrio experimental se evaluó utilizando el análisis de error de suma de cuadrados (SSE). El modelado de la isoterma de adsorción mostró que la expresión de Redlich-

Peterson produce el mejor ajuste entre los datos experimentales y predichos. Los datos de la cinética del lote obtenidos a diferentes concentraciones de iones de cobre en la solución y también a diferentes masas de carbón de neumáticos se analizaron utilizando el modelo de difusión intrapartícula. En las gráficas del modelo de difusión intrapartícula, Se obtuvieron tres secciones lineales distintas para cada operación por lotes. Un parámetro de tasa de difusión intrapartícula, k , se deriva de las gráficas de cobre adsorbido frente a la raíz cuadrada del tiempo. Los datos indicaron el potencial del carbón pirolítico de neumáticos para la eliminación de cobre de los efluentes acuáticos y el mecanismo de adsorción de iones de cobre en el carbón de neumáticos se puede describir mediante el modelo de difusión intrapartícula (Shahtalebi et al., 2013)

El presente trabajo está dedicado al estudio de la descontaminación de residuos carbonizados obtenidos en la co-pirolisis de plásticos, biomasa y residuos de neumáticos, se evaluó la composición mineral de los carbonizados tratados y no tratados. Los resultados obtenidos en este estudio indican que el hexano es el solvente de extracción más eficiente para ser utilizado en la descontaminación orgánica de carbonizados obtenidos en la co-pirolisis de plásticos, llantas y biomasa. Los compuestos que se eliminan del char durante el proceso de descontaminación son principalmente hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos, por lo que se trata de un material que puede valorizarse para ser utilizado como combustible y/o como materia prima para la industria química orgánica (Bernardo et al., 2012)

Las composiciones y propiedades de los gases derivados, aceites pirolíticos y carbón sólido se determinaron en relación a temperaturas de pirólisis de hasta 720 °C ya velocidades de calentamiento entre 5 y 80 °C min⁻¹. A medida que se incrementó la temperatura de pirólisis, el porcentaje de masa de carbón sólido disminuyó, mientras que el gas y los productos derivados del petróleo aumentaron hasta 600 °C, después de lo cual hubo un cambio mínimo en el rendimiento

del producto, las llantas de desecho produjeron aproximadamente 55% de petróleo, 10% de gas y 35% carbonizarse. Hubo un pequeño efecto de la velocidad de calentamiento sobre el rendimiento del producto. Los gases fueron identificados como H^2 , CO, CO_2 , C_4H_6 , CH_4 y C_2H_6 , con concentraciones más bajas de otros hidrocarburos gaseosos (Williams et al., 1990)

La despolimerización es de naturaleza radical libre y requiere un agente de transferencia de cadena eficaz para evitar el endurecimiento del vulcanizado y aumentar la velocidad de despolimerización. El producto, denominado "Caucho de desecho despolimerizado" (DSR), debería ser útil, particularmente como ingrediente de compuestos de caucho y como diluyente de aceite combustible (Crane & Kay, 1975).

La destilación destructiva (carbonización) es un método factible para eliminar llantas de desecho. Se produjo, recuperó y analizó productos sólidos, líquidos y gaseosos. Se demostró que las cantidades de los diversos productos dependían bastante de la temperatura de prueba (WOLFSON et al., 1969)

El vertedero de llantas usadas que se generan cada año en los Estados Unidos se está convirtiendo cada vez más en una solución inaceptable. Un mejor enfoque, desde un punto de vista ambiental y económico, es reprocesar térmicamente las llantas en productos valiosos como carbón activado, otras formas sólidas de carbón (carbono negro, grafito y fibras de carbono) y combustibles líquidos. En este estudio, se produjeron carbones activados de área superficial alta ($>800 \text{ m}^2/\text{g}$ de producto sólido) con rendimientos relativamente altos mediante pirólisis de neumáticos a hasta $900 \text{ }^\circ\text{C}$, seguido de activación en CO_2 a la misma temperatura. Las áreas superficiales de estos materiales son comparables con las de los carbones activados comerciales. La eficiencia del proceso de activación (ganancia de superficie específica/pérdida de masa) fue máxima (hasta $138 \text{ m}^2/\text{g}$ de neumático original) cuando se utilizaron piezas grandes de material de

neumático (~170 mg). Se descubrió que el pretratamiento con oxígeno de los neumáticos mejora tanto el rendimiento como el área superficial del producto de carbono. El tratamiento de neumáticos a alta presión a bajas temperaturas (<400 °C) es un enfoque alternativo si el objetivo principal es la recuperación de negro de humo o fuel oil (Teng et al., 1995).

La conversión de llantas de desecho a carbón activado. Hemos tenido éxito en este empeño, produciendo carbones con áreas superficiales superiores a 500 m²/g y volúmenes significativos de microporos. Los triturados de neumáticos se pirolizaron en reactores por lotes y los carbonizados de pirólisis se activaron por reacción con vapor sobrecalentado. Los productos sólidos de pirólisis y activación se estudiaron con técnicas de adsorción de nitrógeno. Sugerimos que el proceso de activación consiste en la formación de microporos, seguida de la ampliación de poros. Las condiciones de proceso utilizadas en este estudio son un buen punto de partida para optimizar un proceso para convertir neumáticos en carbón activado ((Merchant & Petrich, 1993).

1.3. Fundamento teórico

A medida que el mundo se enfrenta a una cantidad cada vez mayor de residuos, los empresarios y las administraciones públicas buscan mejores métodos para controlar y eliminar los residuos sólidos, están buscando mejores métodos para supervisar y eliminar los residuos sólidos, incluida una increíble variedad de plásticos y materiales compuestos. La gasificación y la pirólisis están despertando un gran interés en algunas regiones del mundo, aunque se trata de estrategias naturales, pretenden reducir drásticamente el volumen de residuos al tiempo que crean energía, al tiempo que se produce energía, los financiadores interesados en apoyar estas prácticas especialmente en los países en vías de desarrollo, revisar las iniciativas anteriores y el efecto de los resultados en los residuos locales.

Tecnologías de gasificación y pirólisis:

La gasificación y la pirólisis son ciclos energéticos que tratan de reducir el volumen de los residuos convirtiéndolos en gas o combustible mediante la combustión. La gasificación de residuos se considera un tipo de combustión como un tipo de quema por la Asociación Europea y la Organización de Seguridad Natural de EE.UU. (según los artículos del reglamento Orden 2010/35/CE de la UE). EU Mandate 2010/75EU Craftmanship 3.40; USA 40 CFR §60.51a, respectivamente) ya que incluye el tratamiento en caliente de los residuos por regla general, provoca la ignición de los gases subsiguientes (ya sea in situ o como combustible disperso).

a) La gasificación

Los residuos fuertes se exponen a altas temperaturas (en general, más de 600°C) en un clima casi sin oxígeno. Los niveles de oxígeno se mantienen bajos para evitar una combustión rápida; en general, la parte de carbono de los residuos sólidos se desintegra en gas de síntesis y un residuo sólido. A fin de cuentas, la parte de carbono de los residuos sólidos se descompone en gas combinado (syngas) y un residuo sólido conocido como escoria, restos o acumulación de carbono. Debe tenerse en cuenta que las tareas casi sin oxígeno o sin oxígeno condiciones (promovido por numerosos proveedores) son difíciles de realizar durante tareas a escala empresarial. El syngas se compone básicamente de monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono, con sustancias extrañas (Arena, 2012); además, tiene un valor calorífico adecuado para ser calcinado y transformado en energía, aunque requiere un alto nivel de control de la contaminación. Con frecuencia, las plantas de tratamiento no generan la energía suficiente para ser económicamente rentables.

Los bioproductos obtenidos de estos ciclos incluyen emisiones atmosféricas, escoria (un tipo de residuo fuerte), cenizas volantes del equipo de control de la contaminación (que requieren

un tratamiento excepcional debido a su nocividad), y depósitos de fluidos y de aguas residuales (Arena, 2012)

b) Pirólisis

La pirólisis es la descomposición del carbón con temperaturas en un clima sin oxígeno. Debido a la refinación dañina del carbón, se adquieren gases inflamables, aceites y acumulaciones. El deterioro que se produce puede lograrse mediante una serie bastante enrevesada de respuestas de sustancias y procesos de movimiento de materia e intensidad. Asimismo, puede caracterizarse como el paso previo a la gasificación y la ignición. (V, 2018).

En el momento en que se crea en una estructura escandalosa dejando sólo carbono como acumulación, se conoce como carbonización. A través de la pirólisis podemos obtener diferentes elementos auxiliares que son valiosos en el espacio de la innovación. Los elementos de pirólisis generalmente producen gases fuertes, por ejemplo, carbono, fluido y gases no condensables como H_2 , CH_4 , C_nH_m , CO , CO_2 y N_2 . Como la etapa de fluido se extrae del gas de pirólisis justo durante su enfriamiento, en ciertas aplicaciones, estas dos corrientes se pueden utilizar juntas mientras proporcionan singas calientes directamente al quemador o a la cámara de oxidación (V, 2018).

Otra definición, la pirólisis es el deterioro sintético de la materia natural provocado por el calentamiento sin oxígeno ni reactivos diferentes, aparte del humo potencialmente acuoso. La pirólisis, sólo deja carbono como acumulación, se denomina carbonización. La pirólisis es un caso excepcional de termólisis. Un ejemplo de pirólisis es la destrucción de neumáticos usados. En esta circunstancia única, la pirólisis es la degradación del elástico del neumático por calor sin oxígeno. (Pirólisis, s. f.).

En todos los procesos de utilización y transformación del carbón se produce algún tipo de pirólisis. Por ejemplo, la gasificación está relacionada con la pirólisis. La pirólisis es un método

excepcionalmente antiguo, que se remonta a los 100 años, es del siglo XVIII, cuando se permitía la partición de hidrocarburos. (Pirólisis - Ingeniería Química, s. f.)

Etapas del proceso:

El proceso consta de 3 etapas claramente diferenciadas:

1. En esta primera etapa se produce una desintegración lenta con el desarrollo de cantidades modestas de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano. Esto es el resultado de la ruptura de enlaces debido a la gran temperatura a la que se realiza el ciclo y además un resultado de la llegada de gases retenidos en el carbono.

2. Esta etapa posterior se conoce como deterioro cálido dinámico. Los incrementos de temperatura y la discontinuidad más profunda del átomo de carbono se producen con el desarrollo de hidrocarburos condensables y alquitranes. Esta etapa comienza en torno a los 360 °C y se cierra cuando se han alcanzado temperaturas de unos 560 °C.

3. La etapa final, se realiza sobre los 600 °C, y esta etapa se caracteriza por la eliminación escalonada de hidrógeno y otros heteroátomos.

Factores que influyen en la pirosis

Durante la pirólisis, los componentes sean gaseosos o líquidos varían entre 25 a 70% en peso. Estas cuantificaciones dependen de muchos factores y variables que se detallan a continuación:

Temperatura y velocidad de calentamiento

El carbón experimenta diversos cambios físicos y de sustancia cuando la temperatura se amplía desde la envolvente hasta el límite más lejano de la última etapa, en torno a los 1000 °C. En caso de que la temperatura de respuesta sea demasiado baja, las respuestas de desintegración no se producirán en el grado adecuado y el rendimiento de gases y alquitranes será deficiente y,

de este modo, el rendimiento de estos elementos será bajo. A temperaturas de respuesta elevadas, se producirá una desintegración en caliente de los alquitranes y, de este modo, el rendimiento en fluidos será escaso. (Pirólisis - Ingeniería Química, s. f.)

Por lo tanto, hay una temperatura adecuada donde se produce el rendimiento máximo. Seguido, se muestra la tabla 1 donde se indica los cambios que se llevan a cabo según rangos de temperatura:

Tabla 1

Cambios según la temperatura

Temperatura (°C)	Cambios
100	Se libera el agua fisisorbida
100-250	Descarboxilación térmica de carbones de bajo rango
200-400	Pérdida de especies de bajo peso molecular
375-700	Destrucción térmica de la estructura del carbón. Formación de metano y otros alcanos, aromáticos y compuestos con nitrógeno.
1000	La pirólisis se completa.

Fuente: (Pirólisis - Ingeniería Química, s. f.)

c) Tipos de pirólisis:

c.1. Pirólisis anhidra

La pirólisis es generalmente anhidra (sin agua). Esta peculiaridad se produce sistemáticamente cuando un compuesto sólido regular se calienta adecuadamente, por ejemplo, cocinándolo a fuego lento o cocinándolo. (Aunque estos ciclos se producen en un clima convencional, las capas externas del material retienen el oxígeno en su interior. El ciclo también se produce cuando se quema un combustible sólido moderado, como la madera. De hecho, las

llamaradas de un incendio de madera se deben a la combustión de los gases desprendidos por la pirólisis, no al inicio de la madera propiamente dicha.

Uno de los primeros usos modernos de la pirólisis anhidra es la obtención de carbón vegetal por pirólisis de la madera. Más recientemente, la pirólisis se ha utilizado en gran medida para convertir completamente el carbón en carbón de coque para la metalurgia, especialmente en la fabricación de acero.

Se recuerda que la pirólisis anhidra se produce durante la catagénesis, la transformación del kerógeno en derivado del petróleo.

En numerosas aplicaciones modernas, este ciclo se completa bajo tensión y a temperaturas superiores a 430°C. La pirólisis anhidra también puede utilizarse para obtener un combustible fluido similar al gasóleo a partir de biomasa resistente o plásticos. El procedimiento más conocido utiliza tiempos de inicio extremadamente bajos (menos de dos segundos) y temperaturas que oscilan entre 350 y 500°C (Pirólisis, s. f.).

c.2. La pirólisis y el tratamiento de residuos

El uso de la pirólisis para el tratamiento de residuos ha adquirido reconocimiento en la industria junto con otros avances de alto nivel en el tratamiento de residuos, pero no mata los residuos, sino que los convierte en carbón, agua, otros residuos fluidos, partículas y metales pesados, cenizas... venenosos de vez en cuando; llenando el aire de sustancias generalmente inocuas a excepcionalmente nocivas y, por lo tanto, disminuyendo su volumen Este horrible refinamiento hace claramente inimaginable la reutilización.

La pirólisis también puede utilizarse como un tipo de tratamiento en caliente para reducir el volumen de residuos y producir energía como efecto secundario. También se ha utilizado para producir combustible para motores diésel a partir de residuos plásticos (Pirólisis, s. f.)

c.3. Pirólisis acuosa

El término pirólisis se utiliza a veces para aludir además a la termólisis a la vista del agua, por ejemplo, la rotura por vapor de la gasolina o la despolimerización en caliente de depósitos naturales en petróleo crudo ligero (Pirólisis, s. f.). o también conocida como la termólisis que se da en presencia de agua, como por ejemplo como el craqueo por vapor de agua del petróleo o la despolimerización térmica de los residuos orgánicos en crudo pesado (V, 2018).

c.4. Pirólisis al vacío

En la pirólisis al vacío, el material natural se calienta al vacío para reducir el riesgo de ebullición y evitar reacciones sintéticas desfavorables.(Pirólisis, s. f.)

c.5. Ejemplos de pirólisis:

Pirólisis de biomasa: con esta pirólisis es factible obtener combustible a partir de granos de café, mezclas fenológicas preventivas del cáncer y polifenoles de palo de azúcar.

Pirólisis de alcanos: este caso se denomina también ruptura o deterioro, que puede ser en caliente, sinérgico y mediante tratamiento con hidrógeno.

Pirólisis del petróleo: a causa del petróleo, los alcanos se exponen a altas temperaturas creando hidrocarburos.

Pirólisis de los plásticos: a través de este ciclo, en el que la intensidad ayuda a descomponer los materiales en gas, se ha podido concebir la separación del plástico en sus elementos fundamentales. Los gases adquiridos pueden infundirse directamente en motores para la creación de energía, lo que disminuye la contaminación de los plásticos, ya que pueden utilizarse como sustancia natural para esta interacción.

Pirólisis de la madera: es la descomposición de la madera por el calentamiento de hasta 450° C sin acceso del aire con la formación de los productos gaseosos y líquidos, así como del residuo sólido, que es carbón vegetal.

d) Activación química:

La activación química con $ZnCl_2$ fue utilizada hasta los años 1970, luego para la activación química se han realizado diversas investigaciones con reactivos químicos como H_3PO_4 , HCl, HNO_3 , $FeCl_2$, NaOH, KOH (Demir, 2023), (F. Yang et al., 2022), (Khangwichian et al., 2021).

La activación es el proceso de aumentar el área superficial del carbón durante el calentamiento en presencia de agentes activadores. Los carbones activados (CA) se pueden usar en aplicaciones como adsorbentes, baterías, supercondensadores y catalizadores. Varios agentes activadores como el vapor (Narani et al., 2020), el dióxido de carbono (Li et al., 2016) y el hidróxido de potasio (KOH) (Martínez et al., 2013), se puede utilizar para activar char.

Hay dos rutas para la activación:

(1) activación física, donde no se requiere un pretratamiento del carbón, y la activación generalmente se realiza usando vapor, CO_2 u oxidación cíclica (Williams, 2013). La oxidación cíclica implica múltiples ciclos de oxidación controlada y desorción térmica (del O_2 absorbido) para producir AC. La segunda ruta consta de

(2) activación química, en la que el material carbonizado se trata previamente con catalizadores para reducir la temperatura y el tiempo de activación (F. Wang et al., 2020).

La impregnación de desechos de neumáticos con un reactivo sintético posiblemente puede eliminar la materia inorgánica de los desechos de neumáticos, aumentar la anchura de los poros, desarrollar aún más el contenido relativo de carbono y aumentar la superficie particular de los neumáticos (Choi et al., 2014). Un amplio surtido de especialistas en la promulgación de sustancias

se ha propuesto en la escritura para los artículos de carbono iniciado, como hidróxidos básicos (NaOH /KOH), ácidos inorgánicos (H_3PO_4 , HCl y H_2SO_4) o $ZnCl_2$ (Antoniou et al., 2014). Algunos componentes metálicos y no metálicos de los residuos de carbón de neumático pueden descomponerse en HCl, y el contenido de residuos del carbón de neumático modificado con HCl también disminuye en función de las necesidades. La capa exterior del neumático carbonizado alterado con H_2SO_4 deja al descubierto algunas superficies libres. Dado que el H_2SO_4 hace que las áreas de la fuerza para una diferencia, unos pocos poros en el interior del carbón iniciado se cruz-conectados por la erosión corrosiva, de modo que las pequeñas asociaciones de poros se convierten en poros más grandes, que construye la región de la superficie particular. Después de la impregnación con NaOH, la naturaleza del carbón de neumático se mejoró, por ejemplo, el contenido de azufre en la base soluble lavada cambió el carbón de neumático disminuyó esencialmente, sin embargo, el contenido de oxígeno se amplió. La región superficial fue de 215 m²/g con una expansión en la proporción de microporos. Los atributos de carbón activado de carbón de neumáticos con NaOH y KOH la disposición se contabilizaron y su región de superficie particular llegó a 738 m²/g y 951 m²/g, por separado. La tasa de expulsión de escombros y azufre en el cambio de neumáticos chamuscados se investigó utilizando HCl y HF bajo las condiciones de manipulación de ultrasonidos. Los desechos en el carbón de neumático se componían principalmente de óxidos metálicos, sulfuros y sílice. El carbón de neumático cambiado creado era como el carbón comercial oscuro en cuanto a propiedades superficiales, porosidad y morfología, que podría ser un elemento electivo al carbón comercial oscuro N326 para hacer elástico el neumático. Sólo 1,2 en peso. El % de residuos en el chamuscado se contabilizó con filtrado de HCl. Tras la actualización con HCl, la región de superficie particular fue de 76,3 m²/g y se extrajo una gran parte de las partes de escombros. También se utilizó el corrosivo nítrico (HNO_3) como

un activador cíclico para construir el área de superficie particular de neumáticos a 750 m²/g, lo que da una referencia a la innovación de promulgación de la quema de neumáticos.

Cada compuesto utilizado influye en el deterioro pirolítico y dificulta el desarrollo del alquitrán, mejorando así el rendimiento del carbono. Gracias a las propiedades de deshidrogenación de los reactivos utilizados, las reacciones de reticulación promueven la formación de una matriz rígida, haciéndolas también menos propensas a cualquier pérdida adicional de volátiles y contracción de volumen tras la carbonización. Al final del proceso, el agente químico usado debe eliminarse mediante lavado; en la mayoría de los casos, el carbón activado es apto para su uso en esta etapa. Durante la activación química, la sustancia sin refinar se impregna con el agente activador, generalmente KOH y H₃PO₄; ZnCl₂ no se utiliza debido a las preocupaciones ecológicas con respecto a las emanaciones de Zn al medio ambiente. La preparación y disposición de H₃PO₄, un dispositivo de contacto materia prima vs solución y un marco de recuperación y reutilización de H₃PO₄.

El mecanismo de desarrollo de poros durante la activación química no es el mismo que el de la física. Depende de la forma en que el agente se infiltra en la estructura de carbono, pasando como una disposición para la mejora de la porosidad, aunque diferentes peculiaridades están involucradas. En el momento en que el producto se elimina del producto químico incorporado en la estructura de carbono, los intersticios creados constituyen la nueva porosidad de las muestras. Por lo tanto, el rendimiento de carbono tiende a ser mayor que en la activación física, ya que no se requiere una combustión excesiva de carbono para la creación de poros. La reacción de activación depende en gran medida de la concentración del agente químico, el grado de mezcla, la temperatura y la duración de la activación (para los tres agentes activadores más comunes, se prefiere ZnCl₂ a temperaturas <500 °C, H₃PO₄<450 °C y KOH>700 °C (Antoniou et al., 2014).

1.4. Justificación

Desde el punto de vista técnico, la presente investigación se justifica por encontrar alternativas de reúso de neumáticos usados mediante el producto de la pirólisis que es el carbón o negro de humo aplicado a absorber metales en aguas contaminadas.

Desde el punto de vista económico, se busca disminuir costos utilizando materiales desechados como son los neumáticos usados para el tratamiento de efluentes contaminados.

El estudio del carbón de pirólisis de neumáticos usados y activado químicamente que esta dentro de la economía circular del caucho, con un enfoque en la disminución del arsénico presente en aguas contaminadas por efluentes generados en forma natural o por las diversas industrias, es de importancia realizar esta investigación, que se realizará con una solución preparada a nivel de laboratorio con arsénico sintetizado, y con el carbón de pirólisis obtenido de la empresa ECOMASERG.

Los resultados nos brindarán información sobre el posible uso del carbón obtenido de la pirólisis de los neumáticos usados en la disminución del arsénico por adsorción.

1.5. Problema

¿Cómo influye el tiempo y dosis de carbón de pirólisis de neumáticos usados y activado químicamente, sobre el porcentaje de remoción de arsénico?

1.6. Hipótesis

A medida que se incrementa la dosis y tiempo de contacto del carbón de pirólisis de neumáticos usados y activado químicamente aumentará el porcentaje de remoción de arsénico.

1.7. Objetivos

1.7.1 Objetivo General

Determinar la influencia del tiempo y dosis de carbón de pirólisis de neumáticos usados y activado químicamente sobre el porcentaje de remoción de arsénico.

1.7.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar el carbón de pirólisis de neumáticos usados, carbono fijo, volátiles y cenizas.
- b) Activar en forma química el carbón obtenido por pirólisis de neumáticos usados
- c) Determinar la dosis de carbón activado químicamente que presenta mayor porcentaje de remoción de arsénico.
- d) Determinar el tiempo de contacto que se obtiene mayor remoción de arsénico.

CAPÍTULO II

Material y Métodos

2.1. Material de estudio

2.1.1. Población

El material de estudio son los efluentes con contenido de arsénico, y el carbón obtenido por pirólisis de neumáticos usados.

2.1.2. Muestra

Carbón de pirólisis de neumáticos usados obtenido de la empresa ECOMASERG.

Estuvo constituida por 5 kg de muestra obtenida de varios cilindros donde tienen almacenado el carbón de pirólisis de neumáticos usados.

Tabla 1

Análisis químico – negro de humo de pirólisis

Elemento	C	Volátiles	Cenizas	S
Unidades	(%)	(%)	(%)	(%)
Ley	79.18	5.89	14.93	1.52

2.2. Métodos y técnicas

Se desarrollará la metodología Analítica - Inductiva - Deductiva ya que se tendrá como punto de partida los datos obtenidos en un trabajo experimental a nivel de laboratorio, los cuales pueden ser afectados a nivel pilotaje o industrial tomando en consideración la base científica en la cual se tendrán que manipular otras variables como la granulometría del negro de humo, la temperatura de pirólisis, el lavado previo de los neumáticos usados, mezcla con neumáticos usados con plásticos.

2.3. Tipo de investigación

2.3.1. Según el propósito: Aplicada

Porque se buscó disminuir la concentración de arsénico de aguas contaminadas utilizando negro de humo obtenido a partir de pirólisis de neumáticos usados y activados químicamente, con la aplicación de los conocimientos técnicos adquiridos y de esta manera contribuir al enriquecimiento del desarrollo cultural y científico.

2.3.2. Según el diseño de investigación: Experimental, de tipo correlacional – causal

Debido a que las variables del estudio, como el tiempo de contacto y dosis de carbón de pirólisis de neumáticos usados activado y químicamente, sobre el porcentaje de remoción de arsénico se modificaron experimentalmente, los datos recopilados utilizando las notas de las pruebas de laboratorio.

Correlacional - causal, porque la evaluación del tiempo de contacto y dosis de carbón como variables independientes, es causal determinante para obtener remociones de arsénico como variable dependiente.

2.4. Diseño experimental

El diseño experimental a usar será el modelo bifactorial para la remoción de As y el modelo de cinco niveles para el tiempo de contacto, ambas con dos réplicas. Las variables investigadas fueron:

A) Variables independientes:

- Dosis de carbón (g/L): 1, 2, 3
- Tiempo de contacto (h): 0.5, 1.5, 3, 6, 24

B) Variables dependientes:

- Remoción de As (%)

C) Variables paramétricas:

- Velocidad de agitación: 100 rpm.
- Concentración de As: 2.651 ppm
- pH natural de la solución preparada: 4

2.4.1. Determinación de los niveles

2.4.1.1. Determinación de los Niveles

- Para la dosis de carbón, 3 niveles: 1, 2, 3 g/L.
- Para tiempo de contacto, 5 niveles: 0.5, 1.5, 3, 6, 24 h.

Tabla 2

Variables independientes y sus niveles en escala natural para la remoción de As (%).

Variable	Factores
Dependiente	Remoción de arsénico (%)
Independiente	Dosis de carbón activado (g/L) Tiempo de contacto (h)

Tabla 4

Disposición general para diseño bifactorial y orden de prueba para la remoción As (%)

Factor	Niveles				
	1	2	3	4	5
Dosis (g/L)	1	2	3		
Tiempo (h)	0.5	1.5	3	6	24

2.4.1.2. Matriz de Diseño

El diseño experimental usado fue el modelo bifactorial completo de dos factores con 5 niveles para tiempo de remoción y 3 niveles para dosis de carbón activado químicamente, se hizo el tratamiento de datos mediante el análisis de varianza para cada factor y para la iteración de los factores, usando software Minitab versión 19.

Para el estudio se realizó un diseño bifactorial, $N = 2$ como se esquematiza en tabla 4,

Se consideró realización de 15 ensayos con 2 réplicas

Total de ensayos = 30

Tabla 5

Diseño Experimental Bifactorial para la remoción de arsénico

Dosis (g/L)	Tiempo de contacto (h)					Totales Y _i	Promedio Ŷ _i
	0.5	1.5	3	6	24		
1	Y111, Y112,	Y121, Y122,	Y131, Y132,	Y141, Y142,	Y151, Y152,	y1	Ŷ1
2	Y211, Y212,	Y221, Y222,	Y231, Y232,	Y241, Y242,	Y251, Y252,	y2	Ŷ2
3	Y311, Y312,	Y321, Y322,	Y331, Y332,	Y441, Y442,	Y551, Y552,	y3	Ŷ3
Totales Y _j	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅		
Promedio	Ŷ1	Ŷ2	Ŷ3	Ŷ4	Ŷ5		

2.5. Material, equipos e instrumentos de medición.

2.5.1. Materiales

2.5.1.1. Materiales de laboratorio

- ✓ Carbón de pirólisis de neumáticos usados
- ✓ Bandejas de acero inoxidable
- ✓ Vasos de precipitación de 1000 ml
- ✓ Tubos de centrifuga de 50 ml.

✓ Mallas ASTM # 4 y # 10

✓ Brochas

Reactivos

✓ Agua destilada

✓ Solución estándar de arsénico a 1000 ppm

✓ Ácido nítrico.

✓ Hidróxido de calcio.

2.5.2. Equipos

✓ Horno tipo mufla de 0 a 1000 °C, marca Schemin.

✓ Balanza Analítica marca Sartorius de precisión +- 0,01 g.

✓ Estufa de secado Schemim. 30°C a 300°C

✓ Agitador de tamices Rot-ap

2.5.3. Instrumentos

✓ Espátula de acero inoxidable

✓ Tenazas de acero

2.6. Procedimiento experimental:

a) Muestreo de carbón de pirólisis

Se realizó el muestreo de 5 kg de carbón obtenido por pirólisis de la empresa ECOMASERG, ubicado en el Parque industrial de la Esperanza, Trujillo.

Las muestras serán transportadas a laboratorio de Procesamiento de Minerales de la escuela de Ing. Metalúrgica de la Universidad Nacional de Trujillo.

b) Caracterización inicial carbón de pirólisis

El carbón de pirólisis se procederá a lavar con agua destilada por tres veces y seguido a secar en estufa marca Schemin a 80 °C por 24 horas. Luego se tamizará usando los tamices con malla # 10 (2.0 mm) y # 4 (4.756 mm). Una muestra de 50 gramos se pulveriza y se analiza por carbono fijo, volátiles y cenizas.

c) Tratamiento con ácido nítrico:

El carbón procedente de la pirólisis se tratará con HNO₃ con una concentración de 10 % en peso, (dato en base a resultados preliminares para otros productos de pirólisis). La mezcla, con una proporción sólido/líquido de 1:5, se someterá a mezcla durante 1 h y, a continuación, se recogerán los sólidos por filtración, se lava con agua desionizada hasta que el filtrado de un resultado neutro a pH y se seca hasta peso constante a unos 105 °C. El carbón se tamiza, y la fracción de tamaño de partícula de 10 a 30 mallas para las siguientes pruebas.

Preparación de 100 ml de HNO₃ al 10%(1.11) en peso, partir de HNO₃ al 67%(ρ=1.4g/cm³)

$$C1 * 1.4 * \rho * V1 = C2 * 1.11 * V2$$

$$V_{\text{HNO}_3} = 12.2 \text{ ml}$$

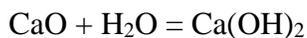
Agregar 12.2 ml HNO₃ (67%) y aforar hasta 100 ml con agua destilada, para obtener al 10% de HNO₃.

d) La preparación de carbones cargados con Ca(OH)₂

Se utiliza por cada diez gramos de carbón tratado con HNO₃ en una botella de vidrio sellada se empapan en 100 mL de soluciones de Ca(OH)₂ con una concentración de 0,10 % en peso, durante 1 h a 100 °C y después se desprecintaron, evaporaron y secaron hasta peso constante a unos 105 °C.

Así, se desarrolla carbón con una capacidad de base (es decir, el contenido de Ca(OH)₂ en el carbón es 10 mg/g) se desarrolla mediante la adición de Ca(OH)₂.

Preparación de 300 ml Ca(OH)₂ al 0.1%, se requiere 0.3 g Ca(OH)₂



Masa molar Ca(OH)₂ = 74.08 g/mol

Masa molar CaO = 56.08 g/mol

$$0.3\text{g Ca(OH)}_2 / 74.08 \text{ g/mol} = 0.0040496 \text{ mol Ca(OH)}_2$$

$$\text{Entonces: } 0.0040496 \text{ mol Ca(OH)}_2 * 56.08 \text{ g/mol CaO} = 0.227 \text{ g CaO}$$

Por lo tanto agregar 0.227 g CaO y aforar con agua destilada hasta 300 ml de volumen, para obtener 0.1 % Ca(OH)₂

e) Reactivos y Equipo

Todos los reactivos fueron de calidad AR. Las soluciones de alimentación se preparan mediante la dilución de las soluciones madre, y su pH se ajusta a 4,0 con ácido nítrico (0,1 N) o hidróxido de sodio (0,1 N).

Se utilizó una solución generada de un relave minero, mediante lixiviación con agua destilada.

f) Preparación de solución de arsénico:

Se usó 2 ml de solución estándar de arsénico (1000 ppm As) y se agregó en un litro de agua destilada, para obtener una concentración de 2.651 ppm As. Se obtuvo una muestra de 15 ml para análisis por espectrometría de absorción atómica para corroborar la concentración preparada.

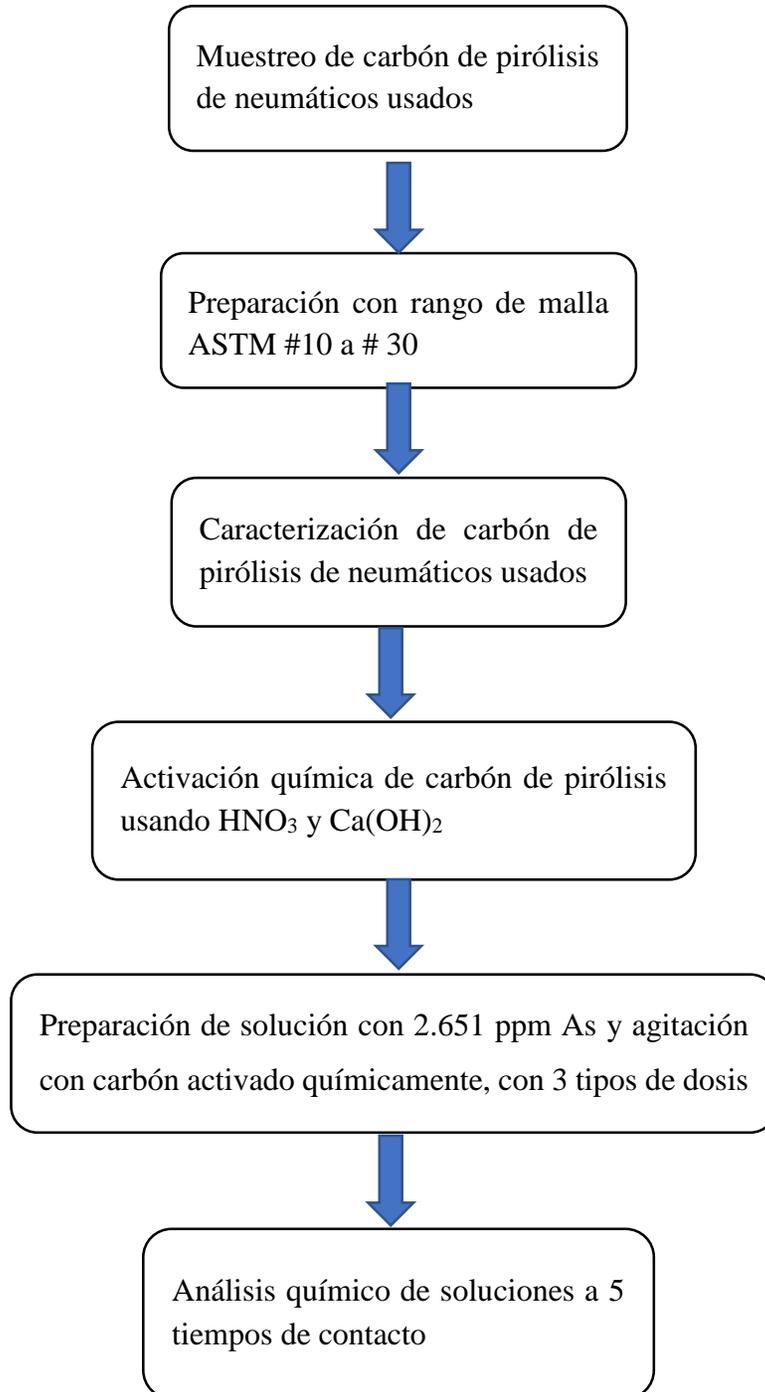
Pruebas de remoción de arsénico:

A la solución preparada de arsénico de 2.651 ppm, se colocó en un vaso de precipitado, se agregó carbón de pirólisis activado químicamente con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en dosis de 1, 2 y 3 g/L, y se agitó a 100 RPM en el banco de agitadores, se realizó controles a 0.5, 1.5, 3, 6 y 24 horas de agitación, obteniendo 30 ml por cada tiempo, y se analizó mediante Espectrometría de absorción atómica por arsénico.

Con los resultados obtenidos se evaluó el porcentaje de remoción de arsénico, mediante el software Minitab versión 19.

Figura 1

Esquema secuencial de pruebas experimentales



CAPÍTULO III

Resultados Experimentales

3.1. Resultados

Se presenta los resultados de las pruebas realizadas:

Tabla 6

Análisis de negro de humo

Elemento	C	Volátiles	Cenizas	S
Unidades	(%)	(%)	(%)	(%)
Composición	79.18	5.89	14.93	1.52

Tabla 7

Remoción promedio de As (%) mediante uso de negro de humo de pirólisis de NFU

Dosis (g/L)	Tiempo de contacto (h)					Totales Y _i	Promedio Ŷ _i
	0.5	1.5	3	6	24		
1	17.465	25.141	33.459	37.099	39.864	153.029	30.606
2	24.104	27.725	32.874	42.456	44.379	171.539	34.308
3	25.934	30.347	38.834	44.191	47.248	186.554	37.311
Totales Y _j	67.503	83.214	105.168	123.746	131.492		
Promedio	22.501	27.738	35.056	41.249	43.831		

Tabla 8*Resultados de remoción de As (%) con negro de humo*

Muestra	Dosis (g/L)	Tiempo de contacto (h)	As (ppm)	Remoción As (%)
Solución inicial	0	0	2.651	0
Blanco - 24 h	0	0	0.010	0
M1-0.5h	1	0.5	2.163	18.408
M1-1.5h	1	1.5	2.018	23.878
M1-3h	1	3	1.732	34.666
M1-6h	1	6	1.63	38.514
M1-24h	1	24	1.581	40.362
M2-0.5h	2	0.5	2.043	22.935
M2-1.5h	2	1.5	1.984	25.160
M2-3h	2	3	1.865	29.649
M2-6h	2	6	1.536	42.060
M2-24h	2	24	1.444	45.530
M3-0.5h	3	0.5	1.986	25.085
M3-1.5h	3	1.5	1.813	31.611
M3-3h	3	3	1.585	40.211
M3-6h	3	6	1.52	42.663
M3-24h	3	24	1.416	46.586
M1R-0.5h	1	0.5	2.213	16.522
M1R-1.5h	1	1.5	1.951	26.405
M1R-3h	1	3	1.796	32.252
M1R-6h	1	6	1.705	35.685
M1R-24h	1	24	1.6074	39.366
M2R-0.5h	2	0.5	1.981	25.273
M2R-1.5h	2	1.5	1.848	30.290
M2R-3h	2	3	1.694	36.100
M2R-6h	2	6	1.515	42.852
M2R-24h	2	24	1.505	43.229
M3R-0.5h	3	0.5	1.941	26.782
M3R-1.5h	3	1.5	1.88	29.083
M3R-3h	3	3	1.658	37.458
M3R-6h	3	6	1.439	45.719
M3R-24h	3	24	1.3809	47.910

Figura 2

Efecto principal de remoción de As (%) variando dosis de negro de humo de NFU

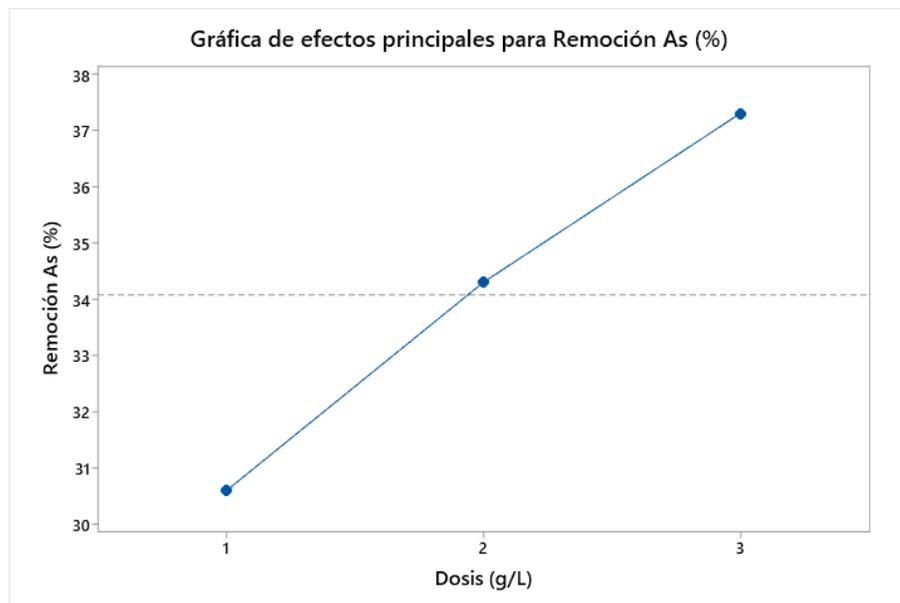


Figura 3

Efecto principal de remoción de As (%) variando el tiempo de contacto (h)

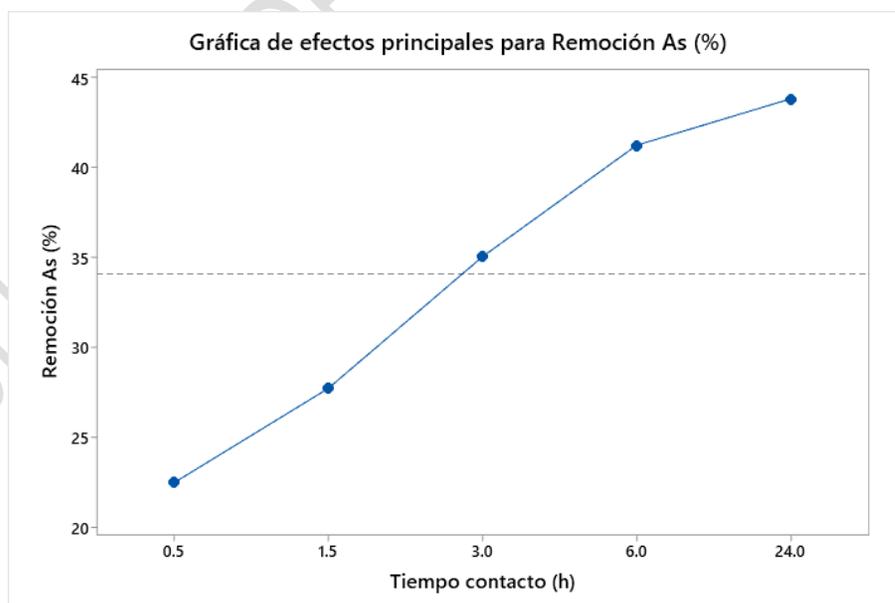


Figura 4

Interacción de dosis (g/L) y tiempo de contacto (h) para remoción de As (%)

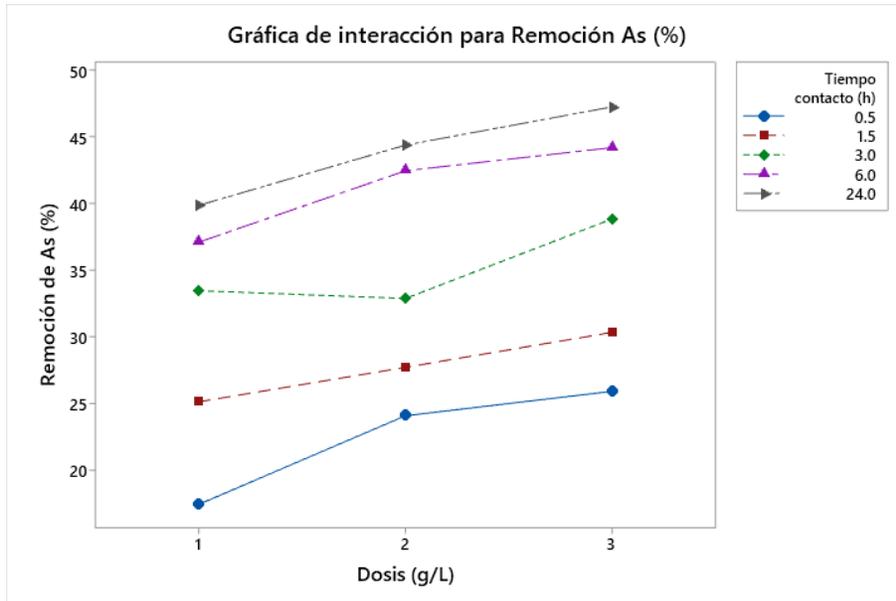
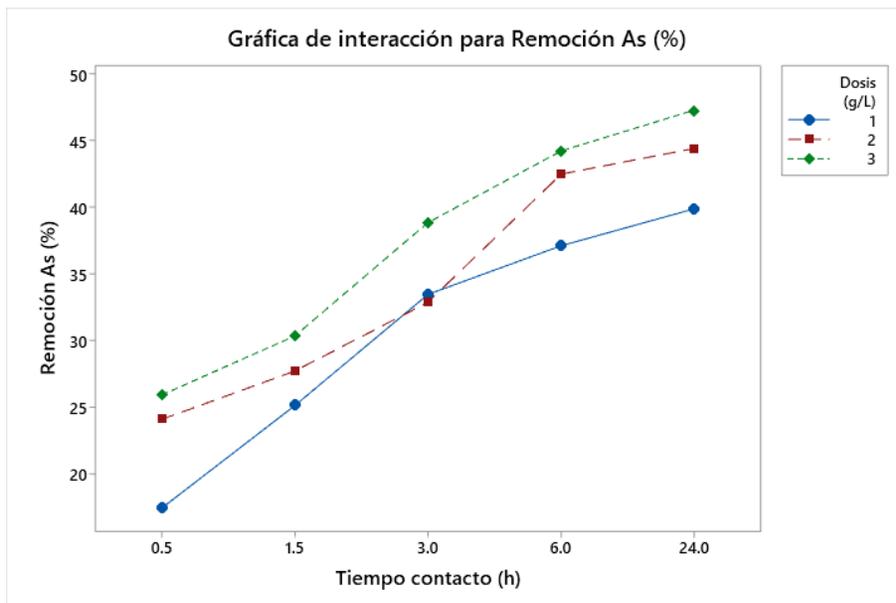


Figura 5

Interacción de tiempo de contacto (h) y dosis (g/L) para remoción de As (%)



CAPÍTULO IV

Discusión de resultados

La pirólisis, fenómeno fisicoquímico donde se produce descomposición de la materia orgánica mediante temperaturas en ausencia de oxígeno y puede actuar un gas de arrastre (N_2 , helio, CO_2) (Martínez et al., 2013), para esta situación, el debilitamiento caliente del elástico de los neumáticos descuidados, en donde tres (3) resultados de la carga subatómica más baja que el elástico se consiguen, un fuerte carbonoso conocido como carbono oscuro u oscuro del carbón, un combustible fluido, comprendiendo principalmente de mezclas dulce-olientes y alifáticas conocidas como parte fluida y una combinación incondensable de gases, conocidos como división vaporosa. (Martínez et al., 2019)

En la tabla 6, se muestran los resultados del análisis químico del negro de humo, que es residuo del proceso de pirólisis de neumáticos usados, se puede observar que presenta 79.18% de carbono fijo, 5.89% de material volátil, 14.93% de cenizas y 1.52% de azufre. Corrobora con la investigación realizada por Miguel et al., donde realizó la pirólisis de varios tipos de neumáticos, obteniendo entre de 82 y 87 % de carbono, en azufre entre 0.83 a 1.86 %, en cenizas entre 10.2 a 22.5% (Miguel et al., 2002), de igual forma otras investigaciones indican que le principal inconveniente del negro de carbón o negro de humo es el alto porcentaje de cenizas, y que para disminuir se puede hacer con lavado con ácido clorhídrico y podría logra disminuir del 22,5% al 8,4% de cenizas en el caso de su investigación realizada. (Grisales, s. f.)

En la Tabla 7, se presenta los resultados promedios de las Remoción promedio de As (%) mediante uso de negro de humo de pirólisis de neumáticos usados (NFU), donde se varió la dosis del negro de humo de 1 g/L, 2 g/L y 3 g/L, y a tiempo de contacto de 0.5, 15, 3, 6 y 24 horas. El mayor porcentaje de adsorción de arsénico fue de 47.248 % con dosis de 3 g/L y 24 horas de

contacto (mezcla), el menor porcentaje de 17.465 % con dosis de 1 g/L y 0.5 horas de contacto. En la Tabla 8, se presenta los resultados en forma completa, donde se puede observar que la concentración inicial de arsénico fue de 2.651 ppm y el blanco fue realizado con agua destilada y con dosis de negro de humo de 1 g/L y 24 horas de contacto, se detectó arsénico en el blanco, esto puede indicar que hay transferencia del negro de humo a la solución; esto corrobora con lo que menciona en la hoja técnica de negro de humo de Carbón Continental, donde indica que según Ley de Cumplimiento del Agua Potable Segura y de las Sustancias Tóxicas de California de 1986 (Proposición 65): ciertos metales, incluyendo el arsénico, cadmio, plomo, mercurio y níquel, pueden estar presentes sobre y/o en el negro de humo (CB-SDS2021Spa. Pdf, 2021)

En la figura 2, se puede observar la gráfica principal de remoción de arsénico en función de la dosis de negro de humo, donde se muestra una pendiente positiva, con tendencia ascendente lo que nos indica que si seguimos incrementado la dosis de carbón-negro de humo entonces la adsorción va seguir incrementándose, con dosis de 1 g/L se adsorbió 30.6058 %, con dosis de 2 g/L se adsorbió 34.3078 % y con dosis de 3 g/L se adsorbió 37.3108 % de arsénico. En una investigación de revisión indican que después de una cuidadosa activación física o química, el carbón activado derivado de neumáticos demostró ser aplicable a: (1) almacenamiento de combustible gaseoso, (2) adsorción de COV, (3) adsorción de mercurio, cloruro mercúrico, arsénico, dioxinas y furanos, (4) adsorción de NO_x, SO₂ y CO₂ (Kuśmierek et al., 2021). En el estudio “Eliminación de As(III) y As(V) utilizando carbón activado derivado de neumáticos de caucho modificado con compuesto de alúmina”, obtuvieron entre 52 a 57% de remoción de As(III), con dosis de hasta 8g/L (Karmacharya et al., 2016). En diversos estudios sobre absorbentes que se utilizan para absorber arsénico, consideran la presencia de carbono sea de obtención inorgánica

u orgánica, además de utilizar zeolitas naturales, que tienen las propiedades de adsorber el arsénico (Neisan et al., 2023).

En la figura 3, se observa la remoción de arsénico variando el tiempo de contacto, donde se muestra que hasta la hora 6 presenta una curva ascendente pronunciada, luego hay una tendencia a formar una asíntota a las 24 horas, a la 0.5 horas se obtuvo 22.50%, a 1.5 horas se obtuvo 27.74%, a 3 horas se obtuvo 35.05%, a las 8 horas se obtuvo 41.25% y a las 24 horas 43.83% de remoción de arsénico, se puede hasta las 8 horas aumentaba entre 5 y 7%, luego el incremento entre 8 y 24 horas fue de 2.58%. En otras investigaciones obtuvieron 52% de remoción en 180 minutos, pero que fue con mayor dosis de carbón activado y modificado con alúmina (Singh et al., 2021).

En la figura 4 y 5, se presenta las gráficas de interacción de dosis (g/L) de carbón activado con el tiempo de contacto versus la remoción de arsénico. Hay una diferencia marcada en cuanto a las dosis de carbón activado, se observa que 1 g/L hay una remoción de 17.47% de As, con dosis de 2 g/L hay una remoción de 24.10% de As, con 3 g/L hay una remoción de 25.93% de As, siendo la diferencia 6.63% entre 1 y 2 g/L y 1.83% de diferencia entre 2 y 3 g/L. Esta diferencia se mantiene entre 2 y 3 g/L a lo largo del tiempo, mientras que entre 1 y 2 g/L a las 3 horas tienen similar remoción de As, luego se mantiene la diferencia como en las primeras horas. En investigaciones similares encontraron un rápida adsorción al inicio seguido de lenta aproximación al final del proceso de adsorción (Karmacharya et al., 2016).

El pH de las pruebas fue al pH natural del efluente, que se mantuvo en pH igual 4. Y Karmacharya en la revisión publicada indica que las especies de arseniato existen en fase acuosa como H_3AsO_4 a un pH inferior a 2,2, H_2AsO_4^- a un pH entre 2,2 y 6,98, HAsO_4^{2-} a un pH entre 6,98 y 11,5 y AsO_4^{3-} a un pH superior a 11,5 ; mientras que las especies de arsenito existen como

H_3AsO_3 neutro en un rango de pH entre 1 y 9 y AsO_2^- en un pH superior a 9. El proceso de adsorción está altamente influenciado por la densidad de carga superficial del adsorbente (Karmacharya et al., 2016).

El análisis de varianza indica que las variables estudiadas dosis de adsorbente (g/L) y tiempo de contacto (h), así como la interacción de las variables con un nivel de significancia de 0.05, se obtienen $P_{\text{value}} < 0.05$, por lo que se las variables influyen significativamente en la remoción de arsénico de un efluente con pH 4, utilizando como adsorbente carbón activado químicamente obtenido a partir de negro de humo de pirólisis de neumáticos usados.

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

En base a los resultados experimentales obtenidos para la adsorción de arsénico con carbón activado químicamente a partir de pirólisis de neumáticos usados, se concluye que conforme se incrementa la dosis del carbón activado y el tiempo de contacto el porcentaje de remoción se incrementa.

Se caracterizó el carbón de pirólisis de neumáticos usados (NFU), donde se obtuvo 79.18% C, 5.89% volátiles, 14.93% cenizas, 1.52% azufre, y según la revisión bibliográfica esta en el rango para dichos residuos denominados negro de carbón o negro de humo.

Se procedió a realizar la activación química mediante el ácido nítrico y el uso de hidróxido de calcio, mostrando una mayor porosidad mediante el uso de estereoscopio, por lo que se concluye que la activación química ayuda a cambiar la textura del negro de carbón.

Se determinó en bases a los resultados experimentales que la dosis (g/L) de carbón activado de pirólisis de neumáticos usados con la que se obtiene el mayor porcentaje de remoción de arsénico siendo 47.25%, se concluye que a mayor dosis de carbón activado de pirólisis se obtendrá mayor remoción de arsénico.

En base a los resultados experimentales obtenidos para el tiempo de contacto (h), en la remoción de arsénico usando carbón activado de pirólisis, se concluye que a mayor tiempo de contacto mayor remoción de arsénico, y según la curva observada el tiempo óptimo sería de 8 horas.

Según el análisis de varianza, con un nivel de significancia de 95%, la dosis (g/L) de carbón de pirólisis con valor-P=0.00, el tiempo de contacto (h) valor-P=0.00, la interacción de variables

tiene un valor-P= 0.493, por lo que se concluye que las variables estudiadas influyen significativamente en la remoción de arsénico del efluente en medio ácido con pH =4.

5.2.Recomendaciones

Evaluar la remoción de arsénico a pH neutro y pH alcalino, utilizando carbón de pirólisis activado químicamente.

Probar con otros activadores químicos como NaOH para la remoción de arsénico.

Evaluar el área superficial del carbón activado y de otros activadores.

Realizar mayor caracterización del carbón activado de pirólisis.

REFERENCIAS

- Karmacharya, M. S., Gupta, V. K., Tyagi, I., Agarwal, S., & Jha, V. K. (2016). Removal of As(III) and As(V) using rubber tire derived activated carbon modified with alumina composite. *Journal of Molecular Liquids*, 216, 836-844. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.02.025>
- Kuśmierek, K., Świątkowski, A., Kotkowski, T., Cherbański, R., & Molga, E. (2021). Adsorption on activated carbons from end-of-life tyre pyrolysis for environmental applications. Part I. preparation of adsorbent and adsorption from gas phase. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 157, 105205. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105205>
- Martínez, J. D., Cardona-Uribe, N., Murillo, R., García, T., & López, J. M. (2019). Carbon black recovery from waste tire pyrolysis by demineralization: Production and application in rubber compounding. *Waste Management*, 85, 574-584. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.016>
- Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., & Mastral, A. M. (2013). Waste tyre pyrolysis – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 179-213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>
- Miguel, G. S., Fowler, G. D., Dall'Orso, M., & Sollars, C. J. (2002). Porosity and surface characteristics of activated carbons produced from waste tyre rubber. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77(1), 1-8. Scopus. <https://doi.org/10.1002/jctb.518>
- Neisan, R. S., Saady, N. M. C., Bazan, C., Zendejboudi, S., Al-nayili, A., Abbassi, B., & Chatterjee, P. (2023). Arsenic Removal by Adsorbents from Water for Small Communities' Decentralized Systems: Performance, Characterization, and Effective Parameters. *Clean Technologies*, 5(1), 352-402. Scopus. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol5010019>

- Pirólisis—Ingeniería Química. (s. f.). Recuperado 8 de mayo de 2023, de <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirolisis>
- Acosta, R., Fierro, V., Martínez de Yuso, A., Nabarlatz, D., & Celzard, A. (2016). Tetracycline adsorption onto activated carbons produced by KOH activation of tyre pyrolysis char. *Chemosphere*, *149*, 168-176. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.093>
- Al-Rahbi, A. S., Onwudili, J. A., & Williams, P. T. (2016). Thermal decomposition and gasification of biomass pyrolysis gases using a hot bed of waste derived pyrolysis char. *Bioresource Technology*, *204*, 71-79. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.016>
- Al-Rahbi, A. S., & Williams, P. T. (2017). Hydrogen-rich syngas production and tar removal from biomass gasification using sacrificial tyre pyrolysis char. *Applied Energy*, *190*, 501-509. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.099>
- Antoniou, N., Stavropoulos, G., & Zabaniotou, A. (2014). Activation of end of life tyres pyrolytic char for enhancing viability of pyrolysis – Critical review, analysis and recommendations for a hybrid dual system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 1053-1073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.143>
- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, *32*(4), 625-639. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
- Bernardo, M., Gonçalves, M., Lapa, N., Barbosa, R., Mendes, B., & Pinto, F. (2012). Characterization of chars produced in the co-pyrolysis of different wastes: Decontamination study. *Journal of Hazardous Materials*, *207-208*, 28-35. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.115>
- Choi, G.-G., Jung, S.-H., Oh, S.-J., & Kim, J.-S. (2014). Total utilization of waste tire rubber through pyrolysis to obtain oils and CO₂ activation of pyrolysis char. *Fuel Processing Technology*, *123*, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.02.007>
- Crane, G., & Kay, E. L. (1975). Scrap tire disposal process. *Rubber Chemistry and Technology*, *48*(1), 50-61. Scopus. <https://doi.org/10.5254/1.3545039>

- Cuong, D. V., Wu, P.-C., Liou, S. Y. H., & Hou, C.-H. (2022). An integrated active biochar filter and capacitive deionization system for high-performance removal of arsenic from groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, 423. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127084>
- Demir, U. (2023). Determination of various properties of obtained activated carbon from high sulfur coal by chemical activation methods. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 371-379. Scopus. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.795203>
- Fan, X., Zhang, J., Xie, Y., Xu, D., Liu, Y., Liu, J., & Hou, J. (2021). Biochar produced from the co-pyrolysis of sewage sludge and waste tires for cadmium and tetracycline adsorption from water. *Water Science and Technology*, 83(6), 1429-1445. Scopus. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.058>
- Fernández, A. M., Barriocanal, C., & Alvarez, R. (2012). Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres. *Journal of Hazardous Materials*, 203-204, 236-243. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.014>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Gale, M., Nguyen, P. M., & Gilliard-Abdulaziz, K. L. (2022). Synergistic and Antagonistic Effects of the Co-Pyrolysis of Plastics and Corn Stover to Produce Char and Activated Carbon. *ACS Omega*. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04815>
- Hadi, P., Yeung, K. Y., Guo, J., Wang, H., & McKay, G. (2016). Sustainable development of tyre char-based activated carbons with different textural properties for value-added applications. *Journal of Environmental Management*, 170, 1-7. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.005>

- Jones, I., Preciado-Hernandez, J., Zhu, M., Zhang, J., Zhang, Z., & Zhang, D. (2021). Utilisation of spent tyre pyrolysis char as activated carbon feedstock: The role, transformation and fate of Zn. *Waste Management*, *126*, 549-558. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.031>
- Khan, S. R., Zeeshan, M., & Masood, A. (2020). Enhancement of hydrocarbons production through co-pyrolysis of acid-treated biomass and waste tire in a fixed bed reactor. *Waste Management*, *106*, 21-31. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.010>
- Khangwichian, W., Pattamasewe, S., Laungphairojana, A., Leesing, R., Hunt, A. J., & Ngernyen, Y. (2021). Preparation of activated carbons from hydrolyzed dipterocarpus alatus leaves: Value added product from biodiesel production waste. *Nihon Enerugi Gakkaishi/Journal of the Japan Institute of Energy*, *100*(10), 219-224. Scopus. <https://doi.org/10.3775/JIE.100.219>
- Li, W., Huang, C., Li, D., Huo, P., Wang, M., Han, L., Chen, G., Li, H., Li, X., Wang, Y., & Wang, M. (2016). Derived oil production by catalytic pyrolysis of scrap tires. *Chinese Journal of Catalysis*, *37*(4), 526-532. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)60998-6](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)60998-6)
- Ligero, A., Calero, M., Pérez, A., Solís, R. R., Muñoz-Batista, M. J., & Martín-Lara, M. Á. (2023). Low-cost activated carbon from the pyrolysis of post-consumer plastic waste and the application in CO₂ capture. *Process Safety and Environmental Protection*, *173*, 558-566. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.041>
- Lin, Y.-R., & Teng, H. (2002). Mesoporous carbons from waste tire char and their application in wastewater discoloration. *Microporous and Mesoporous Materials*, *54*(1-2), 167-174. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(02\)00380-3](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(02)00380-3)
- Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., & Mastral, A. M. (2013). Waste tyre pyrolysis – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *23*, 179-213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>

- Martín-Lara, M. A., Piñar, A., Ligeró, A., Blázquez, G., & Calero, M. (2021). Characterization and use of char produced from pyrolysis of post-consumer mixed plastic waste. *Water (Switzerland)*, 13(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w13091188>
- Merchant, A. A., & Petrich, M. A. (1993). Pyrolysis of scrap tires and conversion of chars to activated carbon. *AIChE Journal*, 39(8), 1370-1376. Scopus. <https://doi.org/10.1002/aic.690390814>
- Narani, S. S., Abbaspour, M., Mir Mohammad Hosseini, S. M., Aflaki, E., & Moghadas Nejad, F. (2020). Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119151>
- Neisan, R. S., Saady, N. M. C., Bazan, C., Zendejboudi, S., Al-nayili, A., Abbassi, B., & Chatterjee, P. (2023). Arsenic Removal by Adsorbents from Water for Small Communities' Decentralized Systems: Performance, Characterization, and Effective Parameters. *Clean Technologies*, 5(1), 352-402. Scopus. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol5010019>
- Pirólisis*. (s. f.). Recuperado 8 de mayo de 2023, de <https://www.quimica.es/enciclopedia/Pir%C3%B3lisis.html>
- Pirólisis—Ingeniería Química*. (s. f.). Recuperado 8 de mayo de 2023, de <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirólisis>
- Rofiqul Islam, M., Haniu, H., & Rafiqul Alam Beg, M. (2008). Liquid fuels and chemicals from pyrolysis of motorcycle tire waste: Product yields, compositions and related properties. *Fuel*, 87(13-14), 3112-3122. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.036>
- San Miguel, G., Fowler, G. D., & Sollars, C. J. (2002). The leaching of inorganic species from activated carbons produced from waste tyre rubber. *Water Research*, 36(8), 1939-1946. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00422-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00422-5)

- Shahtalebi, A., Sarrafzadeh, M. H., & McKay, G. (2013). An adsorption diffusion model for removal of copper (II) from aqueous solution by pyrolytic tyre char. *Desalination and Water Treatment*, 51(28-30), 5664-5673. Scopus. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.769659>
- Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*, 32(10), 1742-1751. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>
- Singh, E., Kumar, A., Mishra, R., You, S., Singh, L., Kumar, S., & Kumar, R. (2021). Pyrolysis of waste biomass and plastics for production of biochar and its use for removal of heavy metals from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 320. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124278>
- Solís, R. R., Martín-Lara, M. Á., Ligeró, A., Balbís, J., Blázquez, G., & Calero, M. (2022). Revalorizing a Pyrolytic Char Residue from Post-Consumer Plastics into Activated Carbon for the Adsorption of Lead in Water. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(16). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app12168032>
- Sun, Y., Yue, Q., Gao, B., Wang, Y., Gao, Y., & Li, Q. (2013). Preparation of highly developed mesoporous activated carbon by H4P2O7 activation and its adsorption behavior for oxytetracycline. *Powder Technology*, 249, 54-62. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.07.029>
- Teng, H., Lin, Y. C., & Hsu, L. Y. (2000). Production of activated carbons from pyrolysis of waste tires impregnated with potassium hydroxide. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50(11), 1940-1946. Scopus. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464221>
- Teng, H., Serio, M. A., Wójtowiec, M. A., Bassilakis, R., & Solomon, P. R. (1995). Reprocessing of Used Tires into Activated Carbon and Other Products. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 34(9), 3102-3111. Scopus. <https://doi.org/10.1021/ie00048a023>

- V, G. B. (2018, noviembre 18). *Pirólisis / Qué es, definición, tipos, proceso, ejemplos, importancia*. Euston96. <https://www.euston96.com/pirolisis/>
- Vershinina, K. Y., Shlegel, N. E., & Strizhak, P. A. (2019). Impact of environmentally attractive additives on the ignition delay times of slurry fuels: Experimental study. *Fuel*, 238, 275-288. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.132>
- Wang, F., Gao, N., Quan, C., & López, G. (2020). Investigation of hot char catalytic role in the pyrolysis of waste tires in a two-step process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 146, 104770. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104770>
- Wang, H., Qiu, G., Niu, Y., Chen, L., Li, Y., Guo, S., Zhang, Y., Wu, J., & Guo, F. (2023). Hierarchical porous composites derived from spent tire char for CO₂ capture: K-N co-doped, process intensification and thermodynamic analysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.05.049>
- Wang, M., Zhang, L., Li, A., Irfan, M., Du, Y., & Di, W. (2019). Comparative pyrolysis behaviors of tire tread and side wall from waste tire and characterization of the resulting chars. *Journal of Environmental Management*, 232, 364-371. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.091>
- Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. *Waste Management*, 33(8), 1714-1728. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.003>
- Williams, P. T., Besler, S., & Taylor, D. T. (1990). The pyrolysis of scrap automotive tyres. The influence of temperature and heating rate on product composition. *Fuel*, 69(12), 1474-1482. Scopus. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(90\)90193-T](https://doi.org/10.1016/0016-2361(90)90193-T)
- WOLFSON, D., BECKMAN, J., WALTERS, J., & BENNETT, D. (1969). DESTRUCTIVE DISTILLATION OF SCRAP TIRES. *U S Bur Mines-Report Investigations 7302*. Scopus.

- Xu, J., Yu, J., Xu, J., Sun, C., He, W., Huang, J., & Li, G. (2020). High-value utilization of waste tires: A review with focus on modified carbon black from pyrolysis. *Science of the Total Environment*, 742. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140235>
- Yang, F., Cao, S., Tang, Y., Yin, K., Gao, Y., & Pang, H. (2022). HCl-activated porous nitrogen-doped carbon nanopolyhedras with abundant hierarchical pores for ultrafast desalination. *Journal of Colloid and Interface Science*, 628, 236-246. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.07.153>
- Yang, Z., Yan, G., Song, Z., Zhang, J., Wang, C., Yu, Z., Bai, Z., Zhuang, G., & Liang, F. (2021). Study on adsorption of as(III) by a new bio-material from chitin pyrolysis. *Water (Switzerland)*, 13(21). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w13212944>

APÉNDICES

Apéndice AP: Análisis de Varianza

Tabla A-1

Análisis de varianza de variables independientes para remoción As (%)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	2190.06	156.433	35.55	0.000
Lineal	6	2155.87	359.312	81.65	0.000
Dosis (g/L)	2	225.60	112.800	25.63	0.000
Tiempo contacto (h)	4	1930.27	482.568	109.65	0.000
Interacciones de 2 términos	8	34.19	4.273	0.97	0.493
Dosis (g/L)*Tiempo contacto (h)	8	34.19	4.273	0.97	0.493
Error	15	66.01	4.401		
Total	29	2256.07			

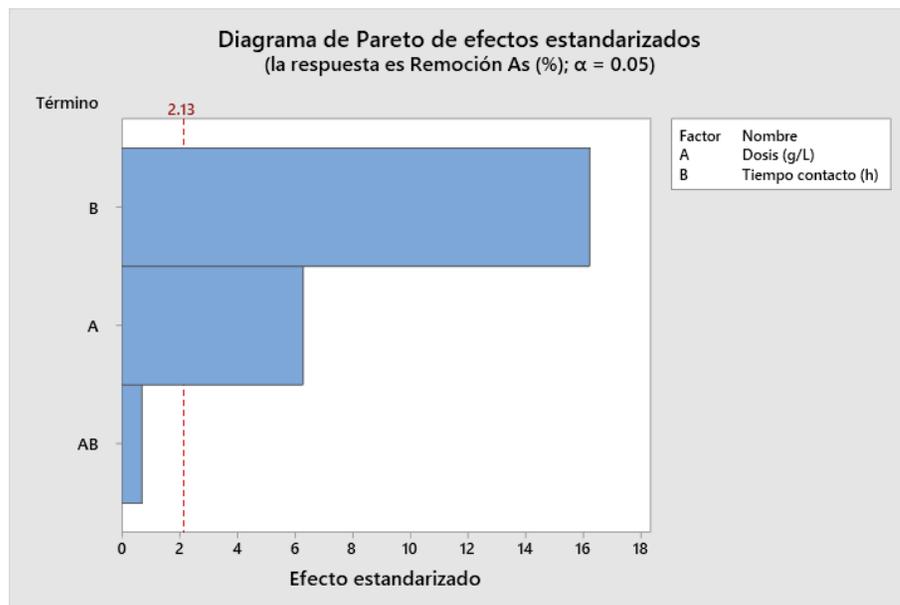
Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2.09783	97.07%	94.34%	88.30%

Apéndice B: Diagrama de Pareto

Figura B-1

Diagrama de Pareto para remoción de As (%)



Apéndice C: Gráfica de normalidad y Residuos

Figura C-1

Gráfica de normalidad referente a la remoción As (%)

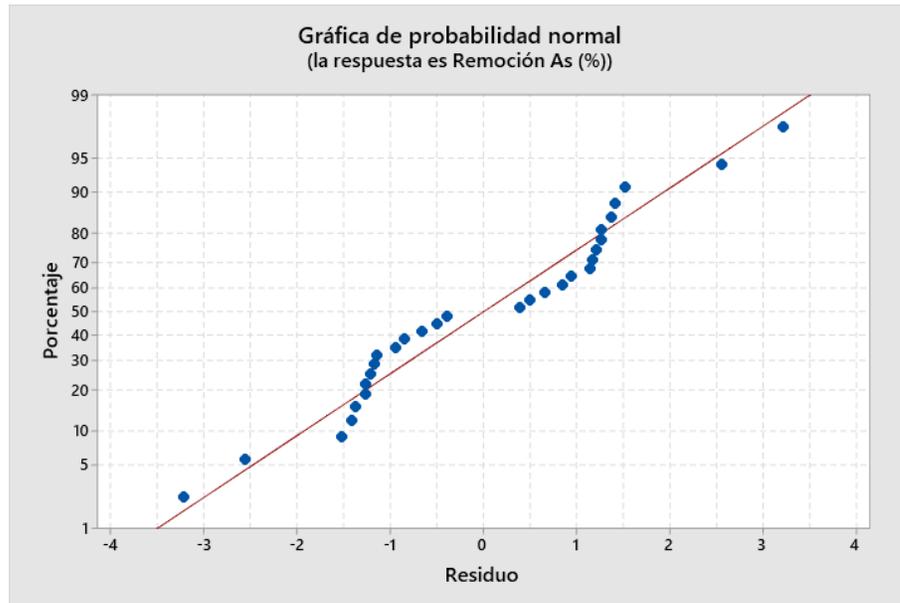


Figura C-2

Gráfica de normalidad referente a la remoción de As (%)

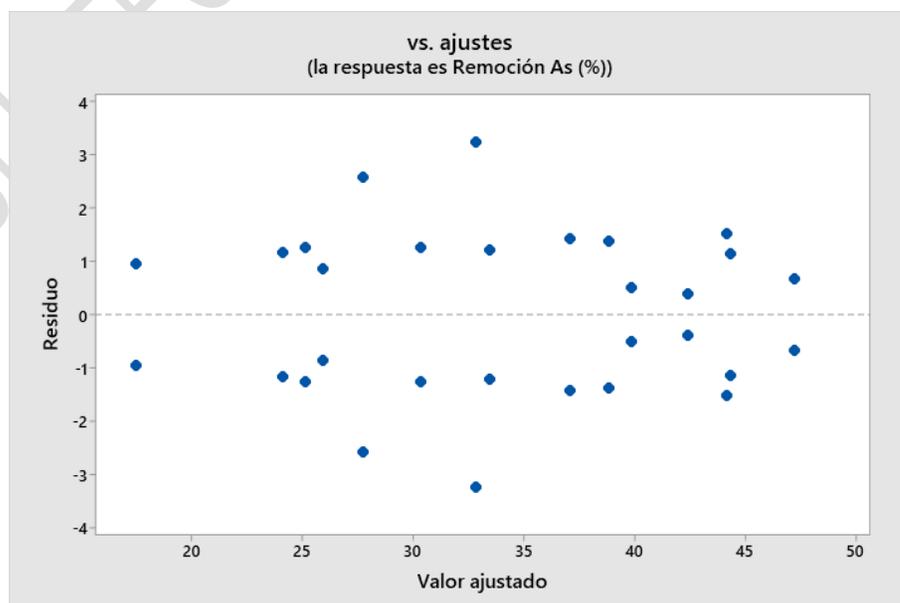
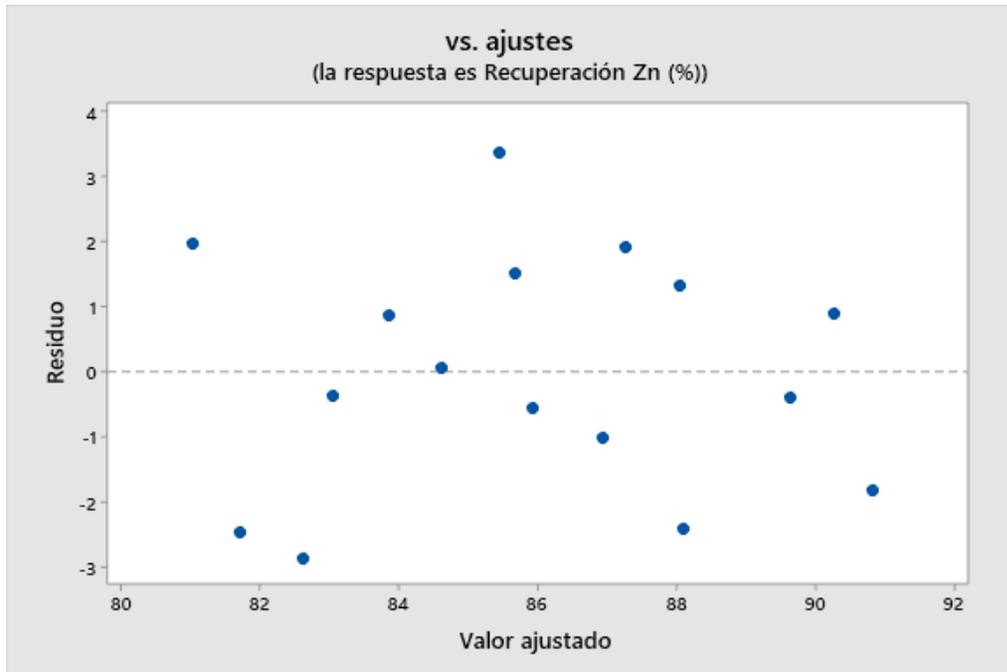


Figura C-3

Gráfica de Residuos referente a la remoción de As (%)



Anexo A. Análisis de carbón de pirólisis de neumáticos usados

Tabla A-1

Composición química del negro de humo de pirólisis

Elemento	C	Volátiles	Cenizas	S
Unidades	(%)	(%)	(%)	(%)
Composición	79.18	5.89	14.93	1.52

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

N°	Muestra	+ 3.6 mm. (%)	- 3.6 mm. + 1 mm. (%)	- 1 mm. (%)
1	CARBÚM - BIO CARBÓN	81.13	16.98	1.89
2	CARBÚM - NEGRO DE HUMO	0.57	6.82	92.61
3	NEUMÁTICO - NEGRO DE HUMO	1.16	26.25	72.59

ANÁLISIS INMEDIATO

N°	Muestra	Ceniza (%)	Materia Volátil (%)	Carbon Fijo (%)
1	CARBÚM - BIO CARBÓN	16.29	19.31	64.4
2	CARBÚM - NEGRO DE HUMO	15.07	5.37	79.56
3	NEUMÁTICO - NEGRO DE HUMO	14.93	5.89	79.18

BIBLIOTECA DE INGENIERIA U. C. U.

**Anexo B: Reporte de análisis químico de soluciones después de adsorción con carbón
activado de pirólisis**



LABMINPERÚ
Laboratorio Químico Metalúrgico

INFORME DE ENSAYO N° 250923-0213

<p>Cliente : _____</p> <p>Producto descrito como : _____</p> <p>Identificación de la muestra : _____</p> <p>Cantidad de la muestra : _____</p> <p>Característica de la muestra : _____</p> <p>Presentación de la muestra: _____</p> <p>Tipo de análisis : _____</p> <p>Fecha de recepción : _____</p> <p>Fecha de ensayo : _____</p>	<p>MARISELA SILVA CHACÓN – FERNANDO JUNIOR BACA GARCÍA</p> <p>SOLUCIÓN VARIAS 20 ml. Aprox Otros Botella de Plástico Lote 25/09/2023 Del 25/09/2023 al 28/09/2023</p>
--	---

RESULTADOS:

Código	As (ppm)
Solución Inicial	2.651
Blanco - 24 h	0.010
M1-0.5h	2.163
M1-1.5h	2.018
M1-3h	1.732
M1-6h	1.630
M1-24h	1.581
M2-0.5h	2.043
M2-1.5h	1.984
M2-3h	1.865
M2-6h	1.536
M2-24h	1.444
M3-0.5h	1.986
M3-1.5h	1.813
M3-3h	1.585
M3-6h	1.520

Código	As (ppm)
M3-24h	1.416
M1R-0.5h	2.213
M1R-1.5h	1.951
M1R-3h	1.796
M1R-6h	1.705
M1R-24h	1.607
M2R-0.5h	1.981
M2R-1.5h	1.848
M2R-3h	1.694
M2R-6h	1.515
M2R-24h	1.505
M3R-0.5h	1.941
M3R-1.5h	1.880
M3R-3h	1.658
M3R-6h	1.439
M3R-24h	1.381



CRISTIAN HUILCAS
Ingeniero Metalúrgico
CIP N° 233661

Trujillo, 28 de setiembre del 2023

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.
La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección solo podrá ser realizada por LABMIN PERÚ S.A.C reemplazándolo por uno nuevo.
Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurridos los 14 días calendario partir de la fecha de recepción, caso contrario se procederá a rechazarlas.

ventas@labminperu.com	LABMIN PERÚ S.A.C Urb. Parque Industrial F-1 Lte 12, LaEsperanza – Trujillo Tlf: 968184381	F-001-Ver 00
-----------------------	--	--------------

Anexo C: Fotografías

Fotografía 1



Pesado de carbón obtenido de pirólisis

Fotografía 2



Lavado de carbón con agua destilada

Fotografía 3



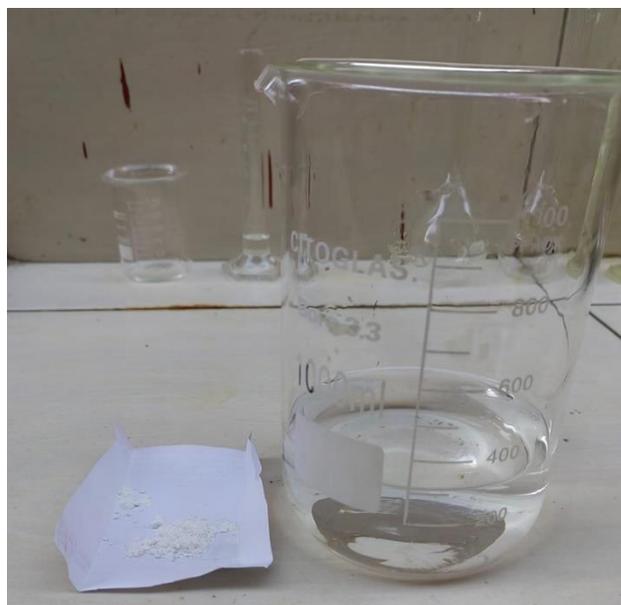
Preparación de ácido nítrico.

Fotografía 4



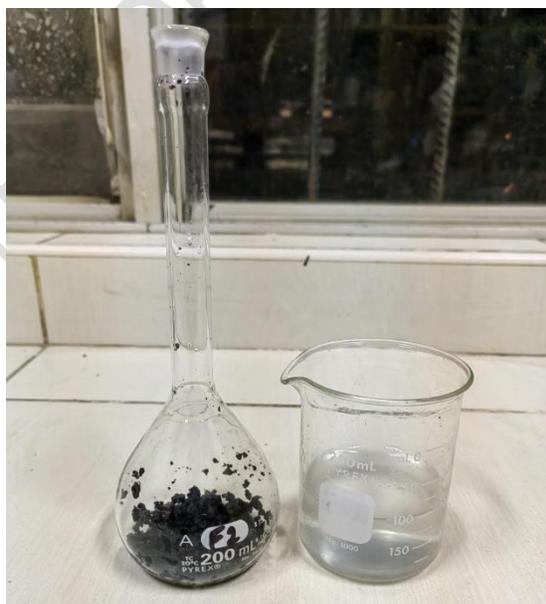
Activación química con ácido nítrico

Fotografía 5



Preparación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Fotografía 6



Mezclado con carbonato de sodio

Fotografía 7



Secado de muestras con carbonato de sodio

Fotografía 8



Carbón activado obtenido

Fotografía 9



Tamizado por malla 30 de carbón activado

Fotografía 10



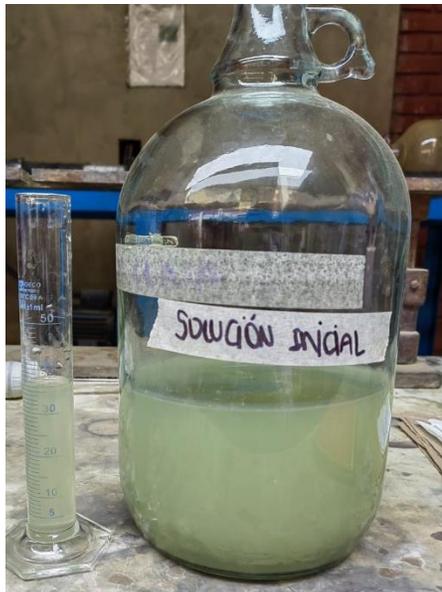
Densidad aparente de carbón de pirólisis (0.47 g/ml)

Fotografía 11



Porosidad de carbón activado de pirólisis

Fotografía 12



Solución inicial con arsénico, obtenido de lixiviación de relave minero

Fotografía 13



Solución diluida con arsénico

Fotografía 14



Dosificación de carbón activado a la solución para adsorción de Arsénico

Fotografía 15



Pruebas de adsorción de arsénico con carbón activado

Fotografía 14



Carbón activado después de adsorción de arsénico., se mantiene compacto.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

RECTORADO

UNT

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

DECLARACIÓN JURADA

Los AUTORES suscritos en el presente documento DECLARAMOS BAJO JURAMENTO que somos los responsables legales de la calidad y originalidad del contenido del Proyecto de Investigación Científica, así como, del Informe de la Investigación Científica realizado.

“Influencia del tiempo y dosis de carbón de pirólisis de neumáticos usados y activado químicamente, sobre el porcentaje de remoción de arsénico”

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

INFORME FINAL DE INVESTIGACION CIENTÍFICA

PROY DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN ()

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO) ()

(PREGRADO)

PROYECTO DE TESIS PREGRADO ()

TESIS PREGRADO (X)

PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA ()

TESIS

MAESTRÍA ()

PROYECTO DE TESIS

DOCTORADO ()

TESIS

DOCTORADO ()

Equipo Investigador Integrado por:

Table with 7 columns: N°, APELLIDOS Y NOMBRES, FACULTAD, DEP. ACADÉMICO, CATEGORÍA DOCENTE ASESOR, CÓDIGO Docente asesor Número Matrícula del estudiante, Autor Coautor asesor. Rows include Baca García Fernando Junior and Silva Chacon Marisela.

Trujillo, 11. de Enero del 2024

[Handwritten signature]

DNI: 70010178

Firma

Baca García Fernando Junior

[Handwritten signature]

DNI: 70856567

Firma

Silva Chacon Marisela

Este formato debe ser llenado, firmado, adjuntado al final del documento del PIC, del Informe de Tesis, Trabajo de Investigación respectivamente

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-No





UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

RECTORADO

UNT

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
 CARTA DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TRABAJO DE
 INVESTIGACIÓN EN REPOSITORIO DIGITAL RENATI-SUNEDU

Trujillo, 11 de Enero del 2024

Los autores suscritos del INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Titulado: **“Influencia del tiempo y dosis de carbón de pirólisis de neumáticos usados y activado químicamente, sobre el porcentaje de remoción de arsénico”**

AUTORIZAMOS SU PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL, REPOSITORIO RENATI-SUNEDU, ALICIA-CONCYTEC, CON EL SIGUIENTE TIPO DE ACCESO:

- A. Acceso Abierto:
- B. Acceso Restringido (datos del autor y resumen del trabajo)
- C. No autorizo su Publicación

Si eligió la opción restringido o NO autoriza su publicación sírvase justificar: Se va a publicar artículo de investigación en revista indexada.

ESTUDIANTES DE PREGRADO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN TESIS
 ESTUDIANTES DE POSTGRADO: TESIS MAESTRÍA TESIS DOCTORADO
 DOCENTES: INFORME DE INVESTIGACION OTROS

N°	APELLIDOS Y NOMBRES	FACULTAD	CONDICIÓN (NOMBRADO, CONTRATADO, EMÉRITO, estudiante, OTROS)	CÓDIGO Docente asesor Número Matrícula del estudiante	Autor Coautor asesor
	Baca García Fernando Junior	INGENIERÍA	BACHILLER	1011500416	AUTOR
	Silva Chacon Marisela	INGENIERÍA	BACHILLER	1021500215	AUTOR

DNI: 70010178

Firma

Baca García Fernando Junior

DNI: 70856567

Firma

Silva Chacon Marisela

Este formato debe ser llenado, firmado Y adjuntado en et informe de Tesis y/o Trabajo de Investigación respectivamente.

¹ Este formato en el caso de Informe de investigación científica docente debe ser llenado, firmado, escaneado y adjuntado en el sistema de www.picfedu.unitru.edu.pe



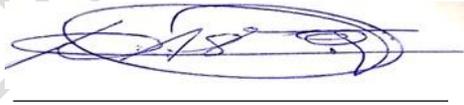
Habiéndose hecho las correcciones y recomendaciones emitidas por el Jurado calificador, se declara expedito el presente trabajo.

Por tanto, se autoriza continuar los trámites para la obtención del Título correspondiente.



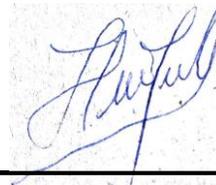
Dr. LUIS A. ALVARADO LOYOLA

Presidente



Ms. ALDO ROGER CASTILLO CHUNG

Secretario



Dr. JUAN ANTONIO VEGA GONZALEZ

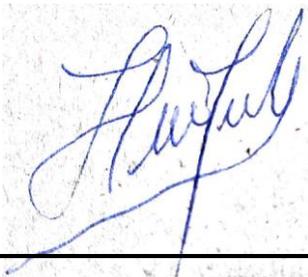
Asesor

Anexo 01

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

N° 028-2024-C.E/FAC.ING.-UNT

- 1) Investigador (es):
Baca Garcia Fernando Junior DNI: 70010178 CÓDIGO: 1021500215
Silva Chacon Marisela DNI: 70856567 CÓDIGO: 1011500416
- 2) Asesor: Vega Gonzalez Juan Antonio DNI 18212091 CÓDIGO 5842
- 3) Finalidad del trabajo de Investigación: Título Profesional
- 4) Programa o escuela: Ingeniería Metalúrgica
- 5) Título del trabajo de Investigación: Influencia del tiempo y dosis de carbón de pirólisis de neumáticos usados y activado químicamente, sobre el porcentaje de remoción de arsénico
- 6) Fecha de sustentación y aprobación del trabajo de Investigación: 8/02/2024
- 7) Fecha de evaluación de originalidad con depósito: 10/02/2024
- 8) Número de trabajo revisado por herramienta Turnitin: 2291191359
- 9) Porcentaje de reporte de similitud: 18%
- 10) Condición: Aprobado



Ing. Vega Gonzalez Juan Antonio
Asesor
Código: 5842



Mg. Ing. Luis Alberto Julca Verastegui
Pdte. del Comité de Ética
Código: 5159