

Residuos del procesado de carbón: una alternativa de gestión para la región carbonífera

Coal processing waste: a management alternative for the coal region

Aime Joselyn Garcia Lugo¹, Jorge Carlos Ríos Hurtado¹, Sergio Enrique Flores Villaseñor¹, Gloria Ivone Dávila Pulido²

¹Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia, Carretera 57 Km 5, Coahuila Monclova. (866)639 03 30

²Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela superior de ingeniería, Blvd. Adolfo López Mateos, Coahuila Nueva Rosita. (861)614 12 48

Autor de correspondencia: Aime Joselyn Garcia Lugo¹

aime.lugo@uadec.edu.mx ; 8666517545

RESUMEN

El carbón es un recurso natural ampliamente utilizado en todo el mundo como fuente de energía primaria, combustible doméstico e industrial, reductor en procesos metalúrgicos, entre otros. Sin embargo, la extracción y combustión de carbón generan una cantidad significativa de residuos anuales en todo el planeta, que varían en tamaño y composición. Entre estos residuos se encuentran los finos de carbón, partículas pequeñas resultantes del proceso de trituración y limpieza del carbón, lodos, cenizas volantes, y muchos más. Históricamente se han catalogado como desechos, han generado un gran interés en los últimos años debido a su potencial para ser reutilizados en una gran variedad de procesos y al poder convertirse en recursos valiosos en diversas industrias. En este artículo, se plasma un panorama general acerca de los diversos usos que se les dan a los residuos finos de carbón en el mundo y cómo están contribuyendo a una economía más sostenible.

Palabras clave: Residuos, carbón, aplicaciones, contaminación, energía.

ABSTRACT

Coal is a natural resource widely used around the world as a source of primary energy, domestic and industrial fuel, reductant in metallurgical processes, among others. However, the extraction and combustion of coal generates a significant amount of annual waste around the world, which varies in size and composition. Among these wastes are coal fines, small particles resulting from the coal crushing and cleaning process, sludge, fly ash, and many more. Historically categorized as wastes, they have generated great interest in recent years due to their potential to be reused in a wide variety of processes and to be converted into valuable resources in various industries. This article provides an overview of the various uses of fine carbon residues around the world and how they are contributing to a more sustainable economy.

Keywords: Waste, coal, applications, pollution, energy.

INTRODUCCION

En la actualidad el uso de nuevas tecnologías para llevar a cabo los procesos mineros ha traído consigo el incremento de partículas finas de carbón, las cuales son descartadas en el procesamiento del mineral debido a la dificultad de separación (Carrizales y col., 2021).

El carbón producido por el sector minero debe ser lavado para elevar su calidad y eliminar impurezas que contenga el mineral. Los desechos producidos por la planta de lavado de carbón a menudo contienen pirita, ésta puede oxidarse y producir drenaje ácido de mina si se expone a la atmósfera (Daza y col., 2018).

Las minas de carbón generan una gran variedad de desechos, entre los cuales encontramos: desechos de sobrecarga, roca hospedante, relaves, productos derivados del petróleo, aceite de desecho y polvos, este último en general es representado por sedimentos. Estos desechos incluyen azufre, carbón y una pequeña cantidad de metales, los cuales pueden beneficiar o perjudicar según la aplicación que se les dé a dichos materiales.

Los residuos de carbón se generan en grandes cantidades, hasta 750 millones de toneladas anuales son generadas en todo el mundo y al menos el 75% de estos residuos no son gestionados correctamente. Es por esto por lo que se tiene gran abundancia de este tipo de materiales, y debido al hecho de que son considerados como residuos, son de bajo costo operacional (Eteba y col., 2023).

En la obtención carbón para coquización, energía y otros fines, generan residuos del enriquecimiento del carbón como lodos, tortas, colas de flotación y lodos finos, cuya composición, además de la materia orgánica, contiene del 20 al 80% en peso de materia mineral, hasta un 95% en peso de agua, lo que dificulta su uso posterior. Los desechos de la industria del carbón ocupan la cuarta categoría de

riesgo de desechos debido a sus propiedades acumulativas en el suelo, materia particulada en el aire y filtración por agua, por el contexto anterior es necesario buscar darles un segundo uso a dichos residuos, disminuyendo así su acumulación en el medio, al mismo tiempo remediar y mejorar procesos en distintas áreas (Zapata y col., 2005).

Revisión bibliográfica

La siguiente investigación se inició con una revisión bibliográfica acerca de los usos que se les dan a los residuos de carbón en todo el mundo, se utilizó el software de Litmaps, el cual tiene como finalidad recopilar de una base de datos, los artículos que son más afines a bibliografía que se utilizara en este artículo. La Figura 1 muestra el diagrama de árbol que arroja el sistema acercade la revisión bibliográfica sugerida, en donde se muestra una amplia literatura acerca del tema que se aborda en este artículo.



Figura 1. Sugerencia de revisión bibliográfica a partir de Litmaps (elaboración propia)

1. Combustión y generación de energía

La combustión y generación de energía a partir de residuos de carbón mineral ha sido un tema de gran interés en las últimas décadas debido a la necesidad de encontrar fuentes de energía más sostenibles y menos perjudiciales para el medio ambiente, estos residuos pueden ser de diferentes tipos, como cenizas volátiles, escorias, gases de escape y lodos de carbón (Calderón, 2002). El carbón mineral es un recurso fósil ampliamente utilizado en la generación de electricidad, pero su combustión también conlleva importantes impactos ambientales y emisiones de gases de efecto invernadero (Xing y col., 2019).

El carbón mineral es una fuente de energía fósil ampliamente explotada en todo el mundo. Cada año se generan 750 millones de toneladas de cenizas de carbón en todo el mundo, los principales países productores de este tipo de materiales generan un gran volumen de cenizas volátiles, las cuales son una de las mayores fuentes de residuos sólidos de esta industria (Asociación de desarrollo de cenizas de Australia, s/n). Se produce la energía eléctrica a través de una serie de pasos, en primer lugar, el carbón se quema en grandes calderas, después, en este proceso, el agua se convierte en vapor, el cual es el encargado de impulsar una turbina (Galetoric & Muñoz, 2011), ésta gira a una gran velocidad y de esta manera produce electricidad (Chávez, 2022), en la Figura 2 se observa el diagrama simplificado de dicho proceso. En la actualidad el 41% de carbón se utiliza para la producción de energía eléctrica (Hester & Harrison, 2018). Sin embargo, la combustión de carbón mineral también tiene desventajas significativas. Uno de los principales problemas es la emisión de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2), que contribuyen al cambio climático y la lluvia ácida. Estos gases también están asociados con problemas de salud en humanos y daños al medio ambiente (Huang y col., 2020).

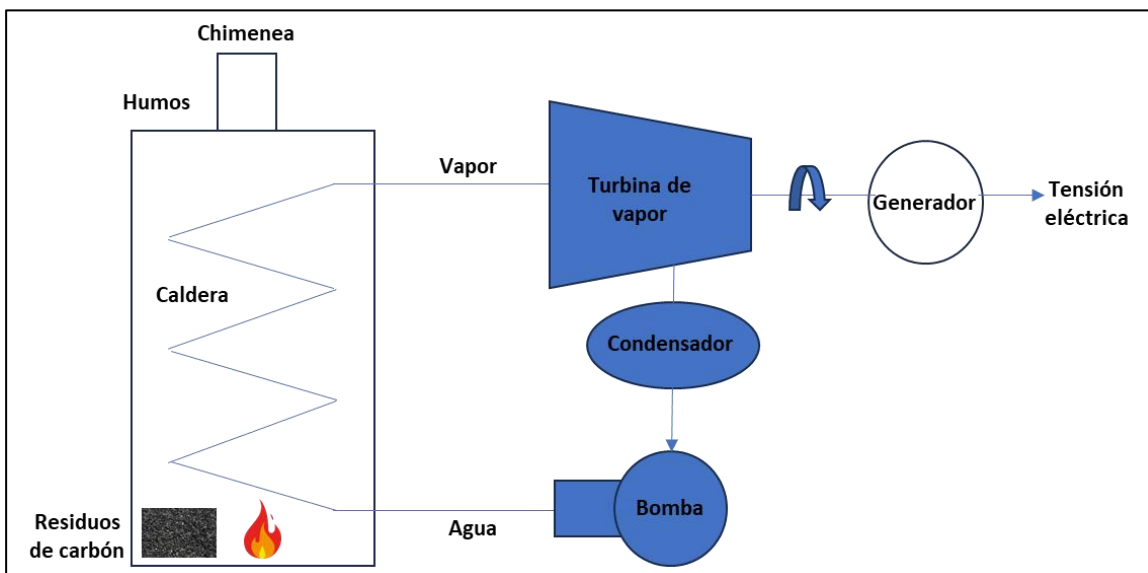


Figura 2. Diagrama de la generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos de carbón mineral

Fuente: Adaptada de la página web Electrónica, Electricidad y comunicaciones
<https://egresadoselectronicaunc.blogspot.com/2015/09/central-termoelectrica-de-rio-turbio.html>

Las cenizas volátiles son uno de los principales residuos de la combustión de carbón. Se producen cuando el carbón se quema en las calderas de las centrales eléctricas y se capturan antes de que lleguen a la atmósfera (Yousuf y col., 2020).

Los gases de escape también son una forma de residuo que se puede aprovechar. Estos gases se utilizan al igual que las cenizas volátiles para la generación de electricidad, en donde son usados para suministrar el calor a una caldera, lo que produce una gran cantidad de vapor de agua que posteriormente es llevado a la turbina generadora de energía eléctrica (Sánchez y col., 2023).

Además de generar energía a partir de residuos de carbón, es importante considerar la integración de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono para mitigar las emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente (Zhang y col., 2021). La captura de carbono generado durante la combustión antes de que éste llegue a la atmósfera, y su posterior almacenamiento subterráneo o utilización en aplicaciones industriales, tales como obtención de otro tipo de gases. Esta

tecnología es crucial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir el cambio climático (Castiblanco & Milquez, 2021).

Aunque los residuos finos de carbón son partículas pequeñas, todavía contienen energía aprovechable. En algunos lugares como Sudáfrica y China, estos residuos se utilizan como combustible para diferentes usos. Se han desarrollado tecnologías avanzadas que permiten la obtención de este tipo de combustibles a partir de residuos sólidos finos de carbón mineral, tal como el método Fischer-Tropsch (FT) (Rojas, 2008), el cual es un proceso importante para el uso de recursos de carbono no derivados del petróleo, como lo son los residuos finos de carbón mineral para la producción sostenible de combustibles líquidos limpios (Subramanian y col., 2018).

Por todo lo anterior, se puede concluir que este tipo de residuos es viable en cuanto a su uso en la elaboración de energía eléctrica y combustibles, sin embargo, en los últimos estudios se están buscando nuevas áreas de oportunidad para la aplicación de estos materiales, debido que las propiedades cambian de acuerdo con el tipo de carbón del cual provienen, del lugar y el tiempo en el que se generen, entre otros.

2. Adsorción y tratamiento de aguas residuales

La adsorción de contaminantes y tratamiento de aguas residuales utilizando residuos de procesamiento de carbón mineral como adsorbente, es un área inmensa que requiere de actualización constante.

Debido al creciente aumento de la población y desarrollo urbano de las ciudades, la búsqueda de agua a niveles más profundos trae consigo su contaminación natural debido a la disociación de diversos contaminantes como metales. Por ello en la actualidad se plantean distintos procesos, cada uno con sus ventajas y desventajas, sin embargo, la adsorción se plantea como el método más eficiente (Himanshu, 2018).

La adsorción es la técnica más conveniente y eficiente para la eliminación de contaminantes emergentes de soluciones acuosas en comparación de otros métodos, tales como filtración, intercambio iónico, membranas, entre otras; algunas de sus ventajas son que utilizan una amplia gama de adsorbentes, es considerado un proceso de operación simple, tiene rango de pH alto, cuenta con un alto rendimiento, bajo costo, cinética rápida y es un proceso selectivo según el adsorbente que se utilice (García y col., 2012).

Los residuos de carbón mineral muestran propiedades adsorbentes únicas que los convierten en candidatos prometedores para la eliminación de contaminantes del agua, en la Figura 3 se ejemplifica el proceso de adsorción de contaminantes en agua.

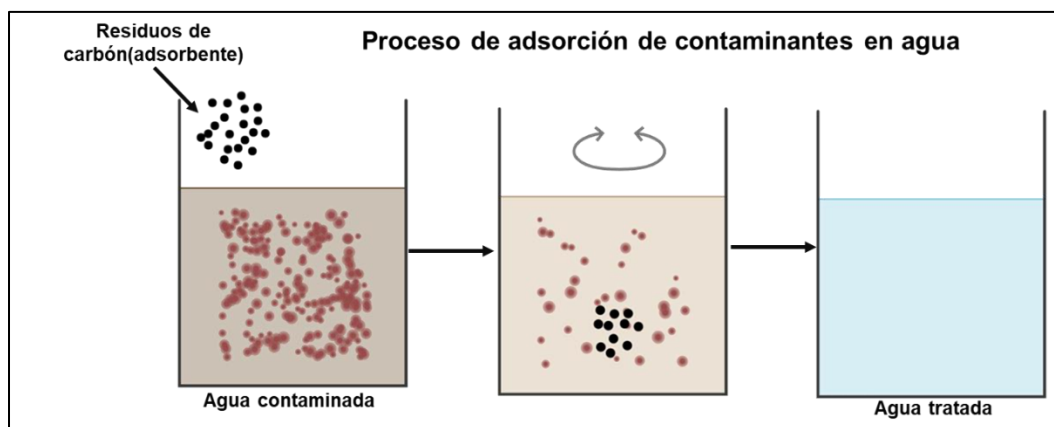


Figura 3. Proceso de adsorción de contaminantes en agua, tratamiento de agua con residuos de carbón.

Fuente: Elaboración propia

Los residuos finos de carbón poseen propiedades de adsorción que pueden ser aprovechadas para el tratamiento de aguas residuales, la cual se ha puesto a prueba actualmente para mejorar la gestión de residuos en el medio que son desechados. Estos materiales se pueden usar en sistemas de filtración y purificación de agua para eliminar compuestos orgánicos, metales pesados y otras sustancias tóxicas. Este proceso contribuye a la preservación del agua y al bienestar de la salud humana.

Cualquier material carbonoso que cuente con una alta concentración de carbono tiene la capacidad de ser transformado en carbón activado, utilizando soluciones químicas de apoyo. Estos materiales poseen una gran área superficial y una estructura porosa, lo que les permite adsorber contaminantes de forma efectiva (Mushtaq y col., 2019).

A continuación, en la Tabla 1 se muestra la comparación de remoción de distintos indicadores de contaminación en agua residual proveniente de la industria textil a partir de un material adsorbente proveniente de carbón bituminoso (Himashu, 2018).

Tabla 1. Comparación del porcentaje de remoción de diferentes indicadores de contaminación en agua de industria a partir de residuos de carbón bituminoso (Himashu, 2018).

Indicadores de contaminación	Unidades de concentración	Máximo porcentaje de remoción
Oxígeno disuelto (BOD)	Ppm	91.9
Turbidez	FAU	16
Coloración	Pt.	26.9

Esto corrobora la utilidad de este tipo de materiales cuando se aplican en procesos de remoción de contaminantes, así como también la eliminación de los indicadores de contaminación que existe en las aguas provenientes de la industria. Por otro lado, debido a su alta eficiencia y su capacidad para absorber una amplia variedad de sustancias (adsorbatos), así como su valor económico en el mercado, los residuos se utilizan extensamente en la eliminación de contaminantes presentes en procesos industriales. En la literatura se ha documentado el uso de dichos materiales para remover distintos contaminantes (Cahill, 2021), en la Tabla 2 se puede observar un resumen de dichos autores.

Tabla 2. Uso de residuos de carbón como material adsorbente en medio acuoso (elaboración propia).

Autor	Adsorbente	Adsorbato	Condiciones y resultados
Díaz Ignacio G. 2018	Carbón mineral (lignito)	Diesel	Carbonización a 490 °C por 1 hora, activación química con ácido fosfórico al 86.6%, pH 5, se logró un 49.4% de adsorción en una concentración inicial de 255 mg/L de diésel.
Dobrosz Gómez y col., 2018	Carbón de origen bituminoso	Cromo hexavalente	Condiciones óptimas del proceso a un pH 2 a 40 °C y con una dosis de adsorbente de 6 g/L lograron la remoción del 100% de cromo en un tiempo máximo de 60 minutos.
Huang y col., 2019	Carbón bituminoso	Azul de metileno	Sin modificación, tamaño de partícula de -74 µm, parámetros óptimos 2g de adsorbente en 50 ml de solución a 100 mg/L durante 2.5 horas a 313°K, logro una remoción de 96.5%.
Regassa y col., 2021	Carbón activado derivado del lignito	Cromo hexavalente	Se utilizaron 3.5 g de adsorbente, tiempo de contacto 4 horas, pH 1 y se logró una remoción del 98% a una concentración inicial de 20ppm.
Marín y Vásquez 2019	Carbón mineral modificado con disulfuro de carbón e hidróxido de sodio	Plomo y cadmio	Durante las pruebas, se utilizó un pH de 6, se logró una remoción de 99,75 % y 99,85 % para plomo y cadmio en solución acuosa en 100 minutos.

Abundancia y bajo costo son algunas de las muchas ventajas de utilizar este tipo de materiales. La utilización de estos residuos para la adsorción permite brindarles una oportunidad de uso en lugar de ser depositados en vertederos, contribuyendo a la gestión sostenible de los desechos (Mushtaq y col., 2019), además de todas las ventajas mencionadas anteriormente, este tipo de materiales muestran

capacidad de adsorción de distintos contaminantes, lo que los vuelve atractivos para tratamiento de efluentes contaminados.

III. Producción de briquetas y aglomerados

Los residuos finos de carbón pueden ser aglomerados en forma de briquetas o bloques compactos. Esto representa una estrategia clave en la gestión de residuos y la disminución de la contaminación ambiental. Los aglutinantes influyen de forma directa en el proceso de aglomeración ya que mantienen unidas las partículas para su tránsito y almacenamiento dentro de las briquetas (Alsaqoor y col., 2022). Estas briquetas ampliamente utilizadas para proporcionar energía en diferentes procesos industriales (Balseca y col., 2018).

El proceso de producción de briquetas y aglomerados, los cuales pueden ser pellets o aglomeración esférica; pueden variar su calidad, y esto dependerá directamente de la resistencia que presente la briqueta. Por ejemplo, las briquetas que se producen con carbón de bajo rango son mejoradas con aglutinantes, y esto eleva su calidad (Uwaoma y col., 2022). Este proceso se centra en diferentes etapas, las cuales incluyen la preparación de los residuos, la aglomeración, la compactación y por último el secado de la briqueta.

1. Preparación: Los residuos de carbón mineral se colectan, se someten a un proceso de limpieza y análisis químico y mineralógico, lo cual asegura la factibilidad a la hora de elaborar la briqueta.
2. Aglomeración: Después de que los residuos son sometidos a limpieza, se mezclan con aglomerantes, los cuales pueden ser naturales o químicos, como almidón, melaza, arcillas, bentonita, alquitrán de hulla o cemento. Siendo los aglomerantes naturales la mejor opción debido a su relación respetuosa con el medio ambiente.
3. Compactación: Las briquetas se producen mediante diferentes tipos de prensas con diferentes dimensiones, esto dependerá del producto final que

se requiera. La presión adecuada garantiza la formación de bloques densos y resistentes, además del uso de aditivos como cera y parafina para mejorar la compresión de la briqueta.

4. Secado o curación: Las briquetas se someten a una curación, el cual es un proceso de secado posterior a la formación de la briqueta, en él se puede hacer variante el tiempo, y la temperatura dependiendo de los materiales que se utilizaron durante el proceso (Leokaoke y col., 2018).

En la literatura se han encontrado diversos autores, los cuales han mostrado la eficacia e importancia de las briquetas y aglomerantes elaborados a partir de residuos de carbón mineral, la lista se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Elaboración de briquetas a partir de residuos de carbón (elaboración propia).

Autor	Residuo	Aglomerante	Condiciones	Resultados
Naisiri y col 2023	Residuos de Kehrizak en Teherán	Bentonita	Compresión 110°C por 20 s 53.3% materia volátil	Reducción del consumo de energía, y disminución de la densidad del pellet.
Adeleke y col 2021	Finos de carbón y biomasa	Brea y melaza	97% finos, 3% biomasa; curados por 120 min de 200-300°C; 8% brea y 7% melaza	Alto índice de reactividad y de resistencia a la caída.
Vershinina y col 2023	Limo de carbón con paja	Aceite de compresor residual	90% limo de carbón y 10%paja	Temperaturas de ignición de 350 a 610°C; al añadir almidón como aglomerante se disminuyó la calidad de la briqueta en todos los ámbitos.
Mursito y col 2020	Carbón de baja calidad y biomasa	Estiércol de vaca y melaza	Contenido total de azufre de 1 a 1.14% en peso	Reducción de contenido de azufre en la briqueta de biocarbón producidas entre un 38 y un 58%

Manyuchi y col 2018	Finos de carbón con aserrín	Melaza	Compresión a 250°C, con contenido de aserrín del 5 al 25%, y melaza de 0 al 8% en peso.	Briqueta de alto poder calorífico 26 MJ/kg, carbono fijo del 76%, alta resistencia a la compresión.
--------------------------------	-----------------------------	--------	---	---

Como se puede observar en la Tabla 3, existen diversos aglomerantes y condiciones para la obtención de las briquetas, lo que genera que las propiedades mecánicas sean diferentes de acuerdo con estos parámetros.

Con esto se concluye que la elaboración de briquetas a partir de residuos para aplicarlas como fuente de energía es viable de acuerdo con la literatura analizada, logrando así, la aplicación de dichos materiales.

IV. Mejora de suelos agrícolas

Debido su composición, y los elementos que se encuentran presentes en ellos, los residuos de carbón muestran propiedades las cuales los vuelven factibles en la utilización de remediación de suelos.

Los residuos son utilizados para mejorar la estructura de los suelos, aumentar la capacidad de retención de agua, mejorar la estabilidad de los agregados, diversidad microbiana, aumenta la porosidad y la capacidad de intercambio catiónico, entre otros (Amoah y col., 2020).

Además, contribuyen a la mitigación de la erosión del suelo y promueven el crecimiento de plantas, fungiendo como nutrientes secundarios de las mismas, en la Figura 4 se observa el ejemplo de tratamiento de suelos erosionados con residuos de carbón.



Figura 4. Proceso de tratamiento de suelos erosionados mediante residuos de carbón mineral.

Fuente: Elaboración propia, adaptada de

https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.scielo.org.bo%2Fscielo.php%3Fscript%3Dsci_arttext%26pid%3DS2519-53522020000100002&psig=AOvVaw0-82CLdYDITgdFjPU9vcWG&ust=1700065862596000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBMQjhqxqFwoTCMjGsYD1w4IDFQAAAAAdAAAAABAF

Se han llevado a cabo diferentes investigaciones acerca del mejoramiento y cambio de los suelos usando como material acondicionador los residuos de carbón mineral, estos trabajos se enlistan en la Tabla 4, esta es una práctica que ha ganado interés en la actualidad en el área de agricultura moderna (Panda y col., 2018).

Tabla 4. Mejora de suelo agrícola con residuos de carbón mineral (elaboración propia).

Autor	Residuo	Tipo de suelo	Condiciones	Resultados
Zeba y col 2019	Cenizas volantes	Agrícola (tomate y berenjena)	Del 12 al 15% de residuos en suelo, con contenidos de nitrógeno, fosforo y potasio	Mejora de la propiedades fisicoquímicas, actividad microbiana y contenido de carbono en suelo, además de aumentar a 82.2% el porcentaje de germinación del cultivo.
Zhu y col 2019	Cenizas volátiles	Macetas con plantas en invernadero	20% de ceniza en suelo	Densidad de suelo disminuyo 28.5%, pH disminuyó de 8.40 a 8.23 capacidad de intercambio catiónico de 2.12 a 4.68 cmol/kg, y aumento de capacidad

				de retención de agua de 29 a 44%.
Hu y col 2021	Cenizas volátiles	Agrícola contaminado con metales pesados	0.4 % de fertilizante orgánico y 4% de ceniza volante, colocadas en muestras de tierra tomadas de 0 a 20 cm	Reducción eficaz de cadmio, cobre y plomo del 47.6, 48.09 y 62.73% respectivamente.
Zhao y col 2023	Ganga de procesamiento de carbón	Suelo agrícola de Yangling, China.	Los mejores resultados se obtuvieron con 10% de residuo en suelo, y curar las muestras durante 28 días	Mejoró la dispersividad del suelo y estabilidad de retención de agua.

Algunas de las ventajas de trabajar en esta área con este tipo de residuos, es el aumento de la fertilidad de suelos; las cenizas de carbón aportan nutrientes esenciales como calcio, potasio y fósforo al suelo, lo que mejora su fertilidad y proporciona un buen entorno para el desarrollo de cultivos y plantas.

La aplicación de este tipo de materiales en el suelo ayuda también a reducir la erosión, esto en consecuencia de aumentar la cohesión del suelo y su retención de agua (Palomares, 2021).

Para llevar a cabo la aplicación de este tipo de materiales al suelo que se desea remediar, se utilizan distintas técnicas, las principales son la mezcla directa con el suelo, este proceso consta en colocar las cenizas de carbón directamente con el suelo en dosis variables, esto permite la liberación gradual de nutrientes a través del tiempo. Otra técnica utilizada es el compostaje, el cual consta básicamente de combinar los residuos con materiales orgánicos creando una composta enriquecida con los minerales provenientes de la materia orgánica (García y col., 2020; Navarro & Navarro s/n).

Por todos los beneficios que se describen en la sección anterior, se considera a este tipo de materiales como aptos para utilizarse en el proceso de remediación de suelos erosionado, o en el más fácil de los casos, cuando se desee mejorar las propiedades del suelo a tratar.

V. Materia prima en la industria del cemento

Los residuos del procesado de carbón pueden actuar como materia prima en la producción de cemento, ya que es considerada una alternativa adecuada para la gestión de dichos materiales (Amiri y col., 2022). Algunas plantas de cemento utilizan estos residuos como fuente de carbono y energía durante el proceso de fabricación de cemento y hormigón, reduciendo la necesidad de utilizar recursos naturales no renovables y disminuyendo las emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente.

La industria del cemento es una de las mayores consumidoras de recursos naturales y emisoras de dióxido de carbono (CO_2) a nivel global. La necesidad de obtener un cemento con mayor resistencia y durabilidad para su aplicación en la construcción lleva a la investigación a probar este tipo de mezclas y técnicas mediante la modificación de la composición del cemento (Arribas y col., 2018).

Los residuos del procesamiento de carbón mineral incluyen varios subproductos, entre los cuales se tienen cenizas volátiles, las escorias, finos y los lodos de carbón. Cada uno de estos subproductos tiene propiedades físicas y químicas únicas que los hacen adecuados para su utilización en la industria del cemento (Rodríguez y col., 2021).

Algunos de los beneficios de utilizar este tipo de materiales en el cemento son la reducción de emisiones de CO_2 , además de la reutilización a gran escala de este tipo de residuos a nivel global, ya que estos generan daños a la salud, contaminación al agua, aire y contaminación visual en el medio en el que se acumulen (Yagüe y col., 2018). Además, este tipo de materiales confiere características las cuales mejoran las propiedades del cemento con la adición controlada se mejoran la durabilidad y la resistencia (Angaspilco y col., 2021).

La utilización de residuos del procesamiento de carbón mineral en la producción de cemento implica su incorporación en la etapa de molienda o como parte de la

mezcla cruda en la producción de clinker. Diferentes tecnologías y métodos han sido desarrollados para garantizar una incorporación efectiva y eficiente de estos residuos en el proceso de fabricación de cemento (Cazazola y col., 2019).

La adición de este tipo de residuos se ha investigado por distintos autores, los cuales se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Autores que han modificado el cemento con residuos de carbón mineral (elaboración propia).

Autor	Residuo	Cemento	Condiciones	Resultado
Amozaudeh y Modarre 2018	Cenizas	Polvo de horno de cemento	mezcla libre de aditivos o de referencia y las mezclas con 1% y 2% de contenido de cemento, curado.	Mejora en las propiedades mecánicas del cemento
Amiri y col., 2022	Residuos de lavado de carbón	Portland	El valor óptimo de la relación agua/cemento, contenido de cemento, volumen de grava y residuos de carbón es 0,44, 304 kg/m ³ , 954 kg/m ³ y 36,95 kg/m ³ , respectivamente.	Optimización del material, absorción de agua en estas condiciones es de aproximadamente 46,30 MPa y 7,41%, respectivamente
Rodríguez y col., 2021	Residuos de lavado de carbón	Eco cementos	Activación térmica por encima de los 600 °C, con una temperatura óptima en torno a los 800 °C, durante 1 a 3 horas.	Los cementos adicionados cumplen con las especificaciones para cementos Tipo II/A, alcanzando resistencias a la compresión relativa de hasta 0,99%. Se obtuvo una buena correlación entre las resistencias a la compresión y el contenido amorfo de los residuos activados térmicamente.
Yagüe y col., 2018	Desechos de relave de carbón mineral	Puzolánico	Activaron térmicamente a 600 °C, durante dos horas en un horno eléctrico	Los residuos de carbón presentaron actividad puzolánica suficientemente buena para ser utilizados como adición puzolánica en cementos industriales, enfatizando el potencial de este proceso para la

				eliminación de residuos contaminados del medio ambiente.
Chhaiba y col., 2018	Residuos de carbón bituminoso	Portland	Tamaños de partículas inferiores a 45 μm de residuos, peletización en crisoles de platino a 1400°C por 30 min.	Mejoró la resistencia a la compresión (38Mpa)

Por todo lo expuesto en la sección anterior se deduce que este tipo de materiales, mejoran la calidad, durabilidad, resistencia entre otras propiedades de los cementos, por ende, lo hace una técnica viable para la utilización de estos residuos.

CONCLUSIONES

La aplicación de residuos del procesamiento de carbón mineral es de suma importancia debido a los múltiples usos y beneficios que brinda en los diferentes sectores, abordando problemas medioambientales, así como también económicos, ya que este tipo de materiales contienen componentes químicos y físicos que pueden ser utilizados en otras áreas como material de alto valor, además, estos les brindan potencial para ser reutilizados de manera eficaz y sostenible.

Este tipo de materiales contribuye directamente a la sostenibilidad y a la conservación de recursos naturales, al reutilizar estos residuos como materias primas en diversas industrias, se reduce el impacto sobre los recursos naturales existentes, y a su vez contribuye significativamente a la reducción de la cantidad de residuos destinados a vertederos o su gestión inadecuada. En lugar de acumular estos residuos, se les brinda un segundo uso al ser transformados en productos beneficiosos y evitando posibles impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública.

Las líneas de investigación en un futuro enfocado a la sustentabilidad y mitigación del cambio climático que se vive actualmente se verán dirigidas a buscar

soluciones y aplicaciones innovadoras para este tipo de residuos, obteniendo materiales de alto valor, aplicables a la captura de contaminantes en el agua, aire y suelo; siendo esta la aplicación medioambiental con mayor relevancia hasta el momento.

REFERENCIAS

Adeleke, A., Odusote, J., Ikubanni, P., Agboola, O., Balogun, A., Lasode, O. (2021). Tumbling strength and reactivity characteristics of hybrid fuel briquette of coal and biomass wastes blends. *Alexandria Engineering Journal*, 60(5): 4619–4625. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.069>

Alsaqoor, S., Borowski, G., Alahmer, A., Beithou, N. (2022). Using of adhesives and binders for agglomeration of particle waste resources. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(3): 124–135. <https://doi.org/10.12913/22998624/149456>

Amiri, H., Azadi, S., Karimaei, M., Sadeghi, H., Farshad D. (2022). Multi-objective optimization of coal waste recycling in concrete using response surface methodology. *Journal of Building Engineering*, 45: 103472. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103472>

Amoah, C., Kwiatkowska, J., Thornton, S., Fenton, O., Malina, G., Szara, E. (2020). Restoration of soil quality using biochar and Brown Coal Waste: A Review. *Science of The Total Environment*, 722: 137852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137852>

Amouzadeh M., Modarres, A. (2018). Emulsified cold recycled mixtures using cement kiln dust and coal waste ash-mechanical-environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 199: 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.155>

Angaspilco M., Bocanegra, J., Muñoz, S., Torres, J., & Villanueva, C. (2021). Uso de cenizas de carbón para mejorar la resistencia a la compresión del concreto: Use of coal ash to improve the compressive strength of concrete. *Revista Ciencia Nor@ndina*, 4(2): 47–60. <https://doi.org/10.37518/2663-6360X2021v4n2p47>

Arribas, I., Vegas, I., García, V., Vigil, R., Martínez, S., Frías, M. (2018). The deterioration and environmental impact of binary cements containing thermally activated coal mining waste due to calcium leaching. *Journal of Cleaner Production*, 183: 887–897. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.127>

Asociación de desarrollo de cenizas de Australia, utilización de la combustión de carbón. Disponible en línea: <http://www.adaa.asn.au/resource-utilisation/ccp-utilisation>

Balseca, O., López, S., Viteri, E., Analuisa, D., & Hernández, E. (2018). Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café como biocombustible sólido. *Polo del Conocimiento*, 3(7): 420-452. DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/pc.v3i7.565>

Cahill, J. (2021). *Coal fly ash beneficiation for reuse and removal of Boron, Cadmium, Chromium, Copper, and Selenium in wastewater treatment*. Tesis de maestría. JB Speed School of Engineering. Documento 3905. <https://doi.org/10.18297/etd/3905>

Calderón, J. (2022). *Propuesta para implementar estrategias de obtención de energía a partir de residuos sólidos en Colombia*. Tesis de especialidad. Fundación Universidad de América. Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8950>

Carrizales, Y., y col., (2021). Análisis de la distribución de partículas ultrafinas en la flotación de carbón y su relación con las variables metalúrgicas: recuperación y contenido de cenizas. *Cienciacierta*. <https://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/cc65/analisisdeladistribucion.pdf>

Castiblanco, O., & Milquez, H. (2021). Estudio y simulación de un gasificador con captura de CO₂ para la producción de hidrógeno azul partiendo de carbón colombiano. *Revista UIS Ingenierías*, 20(4): 91–100. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n4-2021007>

Cazazola, T., Cechini, J., Quihillalt, M. (2019). *Evaluación de aptitud del uso de residuos de la industria tabacalera en la industria del cemento*. Trabajo final de grado. Pontificia Universidad Católica Argentina. <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/11399>

Chávez, E. (2022). *Carbón mineral y biocarbón: de la revolución industrial a la captura de carbono*. *Vista de Carbón mineral y biocarbón: De la revolución industrial a la captura de carbono*. <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/179/108>

Chhaiba, S., Blanco, M., Diouri, A., Bougarrani, S. (2018). Characterization and hydration of cements and pastes obtained from raw mix containing Moroccan oil shale and coal waste as a raw material. *Construction and Building Materials*. 189: 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.014>

Daza, J., Orrego, J., Piñeres, J., Fernández H. (2018). Preparación y caracterización de carbones activados a partir de un carbón mineral de la cuenca del Cesar (Colombia). *Revista politécnica*. 14(26): 75-88. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v14n26a7>

Díaz, G. (2018). *Experimentación de la adsorción de un coque proveniente de una mina de carbón*. Tesis de grado. Ciudad de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/16149>

Dobrosz, I., Gómez, M., Camilo, S. (2018). Optimización del proceso de adsorción de Cr (VI) sobre carbón activado de origen bituminoso. *Información tecnológica*. 29(6): 43-56. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000600043>

Eteba, A., Bassyouni, M. & Saleh, M. (2023). Utilization of chemically modified coal fly ash as cost-effective adsorbent for removal of hazardous organic wastes. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 20: 7589–7602. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04457-5>

Galetovic, A., & Muñoz, C. (2011). Carbón versus viento. Los costos de generar electricidad incluyendo las externalidades ambientales. *El trimestre económico*. 78(312), 753-779. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-718X2011000400753&lng=es&tlng=es.

García, B., Rigoberto M., Quevedo, J., & Socorro, A. (2020). Prácticas para el aprovechamiento de residuos sólidos en plantaciones bananeras y resultados de su implementación. *Revista Universidad y Sociedad*. 12(1): 280-291 http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S221836202020000100280&lng=es&tlng=pt.

García, N., Villanueva, P., Campos, E., & Velázquez, A. (2012). Análisis de la adsorción como método de pulimento en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de Estudios Territoriales*. 14(1): 109-129. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40123894007>

Hester, R. y Harrison, R. (2018). Coal in the 21st century: Energy needs, chemical and environmental controls. *Royal Society of Chemistry, Issues in Environmental Science and Technology*. 45: 224 Pp.

Himanshu P. (2018). Charcoal as an adsorbent for textile wastewater treatment. *Separation Science and Technology*. 53:(17), 2797-2812. DOI: 10.1080/01496395.2018.1473880

Hu, X., Huang, X., Zhao, H., Liu, F., Wang, L., Zhao, X., Gao, P., Li, X., Ji, P. (2021). Possibility of using modified fly ash and organic fertilizers for remediation of

heavy-metal-contaminated soils. *Journal of Cleaner Production*. 284, 124713. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124713>

Huang, B., y col., (2019). *Adsorption of methylene blue on bituminous coal: adsorption mechanism and molecular simulation*. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.9b01812>

Huang, TY; Chiueh, PT; Lo, SL. *Impactos medioambientales y de costes en el ciclo de vida de la reutilización de cenizas volantes*.

Leokaoke, N., Bunt, J., Neomagus, H., Waanders, F., Strydom, C., & Mthombo, T. (2018). Manufacturing and testing of briquettes from inertinite-rich low-grade coal fines using various binders. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 118(1): 83-88. <https://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n1a10>

Manyuchi, M., Mbohwa, C., Muzenda, E. (2018). Value addition of coal fines and sawdust to briquettes using molasses as a binder. *South African Journal of Chemical Engineering*, 26: 70–73. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.09.004>

Marín, N. and Vásquez, Y. (2019). *Evaluación de la capacidad de remoción de plomo y cadmio en soluciones acuosas utilizando resinas de carbón mineral*. Tesis de grado.

Mursito, A., Widodo, D., (2020). Characterization of bio-coal briquettes blended from low quality coal and biomass waste treated by Garant® bio-activator and its application for fuel combustion. *Int J Coal Sci Technol*. 7: 796–806. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00309-0>

Mushtaq, F., Zahid, M., Bhatti, I. A., Nasir, S., Hussain, T. (2019). Possible applications of coal fly ash in wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*. 240: 27–46. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.054>

Nasiri, S., Hajinezhad, A., Kianmehr, M. H., Tajik, S. (2023). Enhancing municipal solid waste efficiency through refuse derived fuel pellets: Additive analysis, die retention time, and temperature impact. *Energy Reports*. 10, 941–957. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.07.039>

Navarro, G., & Navarro, S. (n.d.). *Fertilizantes. Química y acción*. 2ª edición. Mundipersa.
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=1yjFEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Mezcla+Directa+con+el+Suelo:+Las+cenizas+de+carb%C3%B3n+se+mezclan+directamente+con+el+suelo+en+dosis+apropiadas,+lo+que+permite+la+liberaci%C3%B3n+gradual+de+nutrientes+a+lo+largo+del+tiempo+y+mejora+las+caracter%](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=1yjFEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Mezcla+Directa+con+el+Suelo:+Las+cenizas+de+carb%C3%B3n+se+mezclan+directamente+con+el+suelo+en+dosis+apropiadas,+lo+que+permite+la+liberaci%C3%B3n+gradual+de+nutrientes+a+lo+largo+del+tiempo+y+mejora+las+caracter%20)

C3%ADsticas+f%C3%ADsicas+del+suelo.&ots=c6W74wQKA3&sig=3kXPIF3ooKT07TM8Hih7AXk3AQY#v=onepage&q&f=false

Palomares, D. (2021). *Análisis del nutriente vegetal fosforo en los suelos amazónicos del departamento del Caquetá*. Monografía. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/43181>

Panda, R., Biswal, T. (2018). Impact of fly ash on soil properties and productivity. *International Journal of Agriculture. Environment and Biotechnology*. <https://doi.org/10.30954/0974-1712.04.2018.8>

Regassa, B., Beteley, T., Tariku, A., Bayisa, D. (2021). Investigation of the adsorption performance of acid treated lignite coal for Cr (VI) removal from aqueous solution. *Environmental challenges*. 4(100091). isn 2667-0100, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100091>.

Rodríguez, J., Frías, M., Tobón, J. (2021). Eco-efficient cement based on activated coal washing rejects with low content of kaolinite. *Construction and Building Materials*. 274: 122118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122118>

Rojas, M., (2008). Perspectivas de procesamiento y uso del carbón mineral peruano. *Ingeniería Industrial*, (26): 231-250.

Sánchez, C., Torres, A., Álvarez, H., Flores, E., Teran, C., Tejada, A. (2023). Gestión de base de datos del control de un generador de energía termoeléctrica mediante proceso de tratamiento de agua de río. *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*.

Subramanian, V., Cheng, K., Wang, Y. (2018). Fundamentally understanding fischer-tropsch synthesis. *Encyclopedia of Interfacial Chemistry*: 107–114. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.13530-9>

Usmani, Z., Kumar, V., Gupta, P. y col., (2019). Enhanced soil fertility, plant growth promotion and microbial enzymatic activities of vermicomposted fly ash. *Sci Rep* 9, 10455 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46821-5>

Uwaoma, R., Henning, C., Bunt, J., Leokaoke, N., Neomagus, H. (2022). Comparison of industrial wastes as a binder in the agglomeration of coal fines. *Results in Engineering*. 16, 100729. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100729>

Vershinina, K., Dorokhov, V., Romanov, D. y col., (2023). Ignición, combustión y propiedades mecánicas de briquetas de lodo de carbón y residuos de petróleo, biomasa, turba y almidón. *Valor de la biomasa residual* 14: 431–445. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01883-x>

Xing, Y., Guo, F., Xu, M., Gui, X., Li, H., Li, G., Xia, Y., Han, H. (2019). Separación de carbono no quemado de cenizas volátiles de carbón: una revisión. *Tecnología en polvo*. 353: 372–384.

Yagüe, S., Sánchez, I., Vigil, R., García, R., Zapardiel, A., Frías, M. (2018). *Coal-mining tailings as a pozzolanic material in cements industry*. *Minerals*. 8(2):46. <https://doi.org/10.3390/min8020046>

Yousuf, A., Omer Manzoor, S., Youssouf, M., A. Malik, Z., Sajjad Khawaja, K. (2020). Fly Ash: Production and Utilization in India - An Overview. *Journal of Materials and Environmental Science*: 911–921.

Zapata Benabithé, Z., y col., (2005). *Producción de carbón activado a partir de carbón sub-bituminoso en reactores de lecho fluidizado por proceso autotérmico*. *Dyna*, 72(147): 47-56.

Zhang, J., Zuo, J., Ai, W., Zhang, J., Zhu, D., Miao, S., Wei, C. (2021). Preparation of mesoporous coal-gasification fine slag adsorbent via amine modification and applications in CO₂ Capture. *Applied Surface Science*. 537, 147938. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147938>

Zhao, G., Wu, T., Ren, G., Zhu, Z., Gao, Y., Shi, M., Ding, S., Fan, H. (2023). Reusing waste coal gangue to improve the dispersivity and mechanical properties of dispersive soil. *Journal of Cleaner Production*. 404, 136993. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136993>

Zhu, D., Miao, S., Xue, B. y col., (2019). Effect of coal gasification fine slag on the physicochemical properties of soil. *Water air soil pollute*. 230, 155. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4214-x>