

Remoción de arsénico en soluciones acuosas mediante biocarbón derivado del bambú *Guadua inermis*

Arsenic removal from aqueous solutions by biochar derived from *Guadua inermis* bamboo

Alcantara-Martinez, N.^{1*}, Volke-Sepulveda, T.², Orozco-Gutierrez, G.^{3*},
De la Mora-Orozco, C.⁴

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, Coyoacán. C.P 04510, Ciudad de México, México.

² Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, San Rafael Atlixco 186, Iztapalapa. C.P 09340, Ciudad de México, México.

³ Campo Experimental Tecmán, Área forestal. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km. 35, Carretera Colima-Manzanillo, Tecmán, C. P 28100, Colima, México.

⁴ Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, Programa de Manejo Integral de Cuencas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Interior del parque los Colmos s/n. Guadalajara. C.P 44660, Jalisco, México.

RESUMEN

La contaminación con arsénico (As) es un gran problema a nivel mundial que requiere del desarrollo de tecnologías sustentables para remover As principalmente de los recursos hídricos. Una de estas tecnologías es la adsorción con biocarbón, la cual ha demostrado ser efectiva para remover arsenato (As(V)) y arsenito (As(III)) del agua. Debido a sus características, las especies leñosas de bambú son un cultivo que puede ser aprovechado para la elaboración de biocarbón con fines de adsorción de contaminantes. En el presente estudio, se determinaron parámetros fisicoquímicos de un biocarbón derivado del bambú mexicano *Guadua inermis*, y se evaluó la capacidad de adsorción de As en soluciones acuosas contaminadas con As(V), a través de un estudio cinético y con diferentes concentraciones de As(V). Los resultados demostraron que el biocarbón presenta un área superficial de 230 m² g⁻¹ y un contenido de materia orgánica de 86.9 %. Además, alcanzó un tiempo de equilibrio de alrededor de tres horas, logrando remover el 68.9 % del As inicial, y puede remover 37-68 % de As en soluciones contaminadas con 5-50 mg As(V) L⁻¹. Estos hallazgos contribuyen a la caracterización de la capacidad de adsorción de As, del biocarbón elaborado con el bambú *G. inermis*, estableciendo las bases para la investigación y aprovechamiento sustentable de la especie con fines biotecnológicos, y contribuyendo al desarrollo de tecnologías para garantizar agua libre de As.

PALABRAS CLAVE: *Guadua inermis*, bambú, arsénico, biocarbón, adsorción.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Alcantara-Martinez, N., Volke-Sepulveda, T., Orozco-Gutierrez, G., De la Mora-Orozco, C. (2025). Arsenic removal from aqueous solutions by biochar derived from *Guadua inermis* bamboo. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1912. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1912>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: December 13th 2024.

Accepted/Aceptado: August 25th 2025.

Available on line/Publicado: September 17th 2025.

*Corresponding Author:

Nemi Alcántara-Martínez. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, Coyoacán. C.P 04510, Ciudad de México, México. Teléfono: (+52) 5581888522. E-mail: ilhui@ciencias.unam.mx | **Gabriela Orozco-Gutierrez.** Campo Experimental Tecmán, Área forestal. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km. 35, Carretera Colima-Manzanillo, Tecmán, C. P 28100, Colima, México. Teléfono: 018000882222/(+52) 3121936314. E-mail: orozco.gabriela@inifap.gob.mx

ABSTRACT

Arsenic (As) contamination is a significant global issue that demands the development of sustainable technologies to remove As, particularly from water resources. One such technology is adsorption by biochar, which has been demonstrated to be effective for arsenate (As(V)) and arsenite (As(III)) removal. Due to its unique properties, bamboo species have emerged as a promising source for biochar production for remediation purposes. In this study, we determined the physicochemical properties of a biochar derived from the Mexican bamboo *Guadua inermis* and evaluated its As adsorption capacity in aqueous solutions contaminated with As(V). The evaluation included kinetic studies and solutions with varying initial concentrations of As(V). The results showed that the biochar has a surface area of $230 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ and an organic matter content of 86.9 %. Moreover, it reached equilibrium within approximately three hours, removing 68.9 % of the initial As. Additionally, it removed 37-68 % of As from solutions containing $5\text{-}50 \text{ mg L}^{-1}$ of As(V). These findings contribute to the characterization of the As adsorption capacity of biochar derived from *G. inermis* bamboo, laying the groundwork for research and sustainable utilization of the species for biotechnological purposes, while also contributing to the development of technologies to ensure As-free water.

KEY WORDS: *Guadua inermis*, bamboo, arsenic, biochar, adsorption.

Introducción

Los niveles crecientes de arsénico (As) en el agua potable es un tema de gran preocupación a nivel mundial, ya que el As es un metaloide altamente tóxico para los seres vivos y carcinógeno para los humanos (Huang *et al.*, 2015; IARC, 2012). En más de 120 países se han reportado concentraciones de As en agua superiores al límite permisible para asegurar una buena calidad del agua ($10 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$), establecido por la Organización Mundial de la Salud (Alchouron *et al.*, 2022; OMS, 2023). Entre los países más afectados se encuentra México, con regiones que reportan agua potable contaminada con niveles de As que van de 14.7 a $1004 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ (Colín-Torres *et al.*, 2014; Monroy-Torres *et al.*, 2009; Osuna-Martínez *et al.*, 2021).

Actualmente, se desarrollan diferentes métodos para remover el As del agua. Uno de ellos es la remoción de As mediante diferentes tipos de adsorbentes, por ejemplo, el biocarbón, el cual se produce mediante pirólisis de materiales orgánicos en un ambiente sin o con bajo contenido de oxígeno y a temperaturas inferiores a $800 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Amen *et al.*, 2020). En general,

el biocarbón se caracteriza por tener una gran área superficial específica, sitios de adsorción abundantes, grupos funcionales orgánicos cargados, grupos aromáticos, pH neutro a alcalino y una capacidad de intercambio catiónico relativamente alta (Ahmad *et al.*, 2016; Duwiejuah *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2016), lo que contribuye a su capacidad de adsorber diversidad de contaminantes, tales como metales, metaloides, azul de metileno, compuestos nitrogenados, fosfatos y compuestos aromáticos, entre otros (Alchouron *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2016; Zhang & Gao 2013). Adicionalmente, la producción de biocarbón es una tecnología económica, amigable con el medio ambiente, y en muchos casos sostenible, ya que puede ser elaborado a partir de residuos de cultivos, evitando su desperdicio.

En la última década, el bambú se ha considerado como una planta adecuada para la producción de biocarbón, debido a su amplia distribución, importancia económica, y características morfológicas. Su cultivo presenta diversos beneficios, tales como un rápido crecimiento, de entre 30-60 cm por día, una cosecha anual sin necesidad de replantar para su regeneración, y culmos (tallos) que crecen y maduran rápido, lo que permite un suministro continuo de material para diversos fines, entre ellos, la elaboración de biocarbón (Bian *et al.*, 2020; Chaturvedi *et al.*, 2023). Recientemente, se ha demostrado el potencial de algunos biocarbones derivados de bambú para eliminar del agua, las formas iónicas del As más comunes en sistemas acuosos, el arsenato (As(V)) y arsenito (As(III)) (Alchouron *et al.*, 2021; Pinisakul *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2023). Por ejemplo, el biocarbón elaborado del bambú *Guadua chacoensis* ha demostrado remover más del 90 % de As(V) en solución (Alchouron *et al.*, 2021). No obstante, en comparación con otras fuentes de biocarbón como cascara de arroz, y otros elementos inorgánicos como plomo, la investigación sobre la remoción de As con biocarbón derivado de bambú, aún es muy escasa. Dado que las especies de bambú presentan diferencias morfológicas y en su composición celular, es fundamental caracterizar individualmente la capacidad de adsorción de As de cada biocarbón, a fin de evaluar su potencial para aplicaciones específicas (Alfei & Pandoli, 2024; Vithanage *et al.*, 2017).

El bambú del género *Guadua*, perteneciente a la subfamilia Bambusoideae, es un cultivo de importancia ecológica y económica en diversos países de América, sus especies se distribuyen desde México hasta Argentina y son consideradas leñosas por tener culmos con paredes celulares gruesas debido a un alto contenido de lignina (Gutiérrez & De Lira Fuentes, 2020; Pérez-Alquicira *et al.*, 2021). *Guadua inermis* es una especie nativa de México que se distribuye en los estados de Campeche, Chiapas, Oaxaca, Tabasco y Veracruz. Se utiliza en la construcción, como fuente de combustible y en la elaboración de artesanías, entre otros usos. Se trata de un bambú de hábito cespitoso, sin espinas o con espinas poco desarrolladas, que presenta entrenudos sólidos, cilíndricos, de 11 a 23 cm de longitud. Sus culmos de color verde blancuzco, alcanzan entre 4 a 12 m de altura y un diámetro de 2 a 10 cm. Se caracterizan por ser fuertemente asimétricos, densamente pubescentes y sólidos (no huecos). Esta última característica podría representar una ventaja para la producción de biocarbón, al estar asociada con un mayor contenido de lignina (Orozco-Gutiérrez *et al.*, 2022; Pérez-Alquicira *et al.*, 2021; Ramírez-Ojeda *et al.*, 2023). Los residuos sólidos generados durante la industria de *G. inermis* podrían utilizarse para la producción de biocarbón, contribuyendo al uso sustentable de esta especie en las regiones donde se cultiva y al desarrollo de tecnologías para limpiar agua contaminada con As u otros contaminantes. Por lo

anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de remoción de As de un biocarbón producido a partir de *G. inermis*, en un sistema acuoso, a través de un estudio de adsorción en función del tiempo (cinética) y de diferentes concentraciones iniciales de As(V).

Material y Métodos

Reactivos y Equipos

Para los experimentos de adsorción de As, se utilizaron los reactivos arsenato de sodio ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), ácido nítrico concentrado (HNO_3 , 69 %, ACS) y solución concentrada de $1000 \mu\text{g As mL}^{-1}$ (Instra-Analyzed ®). Todos los reactivos fueron de grado reactivo y obtenidos de J.T. Baker. La cuantificación de As se realizó en un espectrómetro de absorción atómica (AA-6300, Shimadzu, Kyoto, Japón). El agua desionizada (18 M Ω) se obtuvo con un sistema PureLab-Q (Elga).

Producción y Caracterización Química del Biocarbón

El biocarbón se elaboró a partir de culmos de plantas de bambú sobremaduro de cinco años de edad, de la especie leñosa mexicana *G. inermis*. Las plantas se obtuvieron de la parcela del campo experimental Tecomán del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Colima, México. El biocarbón fue elaborado mediante pirólisis lenta en un horno pirolítico vertical con dimensiones de 85 cm de altura por 56 cm de diámetro. Este horno fue diseñado para la elaboración en lotes pequeños (menos de 20 kg), lo cual resulta adecuado para ser utilizado en comunidades rurales, facilitando el aprovechamiento de la biomasa generada por la poda de la especie.

Para el proceso, se pesaron aproximadamente 16 kg de biomasa de culmos con un contenido de humedad del 10-12 %, determinado conforme al método ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). Los culmos, de entre 1 y 1.5 pulgadas de diámetro, se cortaron en segmentos de 20 cm y se colocaron en un contenedor metálico cilíndrico interno con capacidad de 83 L, dentro del horno pirolítico. Posteriormente, se aplicó una rampa de calentamiento escalonada, alcanzando temperaturas de 100, 180, 250, 350 y finalmente 550 °C, la cual se mantuvo durante tres horas. La temperatura fue monitoreada con un pirómetro, registrando valores de entre 500 y 560 °C durante el periodo de mantenimiento. Como combustible, se utilizó bambú en la base de un contenedor metálico externo de mayor tamaño. Finalizado el proceso, se obtuvieron ~ 4.8 kg de biocarbón, el cual se denominó BG y se almacenó a temperatura ambiente (Gutiérrez & De Lira Fuentes, 2020).

El biocarbón BG se caracterizó fisicoquímicamente conforme a los siguientes estándares de medición. El valor de pH se determinó mediante el método ASTM D 1293-18 (ASTM, 2018), mientras que el contenido de carbono se determinó con el método ASTM D6866 (ASTM, 2022). El área superficial se midió con base en el método ASTM D-4607-14 (ASTM, 2021), y el contenido de materia orgánica (OM) se calculó según el método UNE 103204 (Campillo & Rodríguez, 2004).

La concentración de elementos inorgánicos se determinó de acuerdo con las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. El nitrógeno inorgánico (N), el fósforo extraíble (P) y el potasio (K) se cuantificaron mediante los métodos AS-08 (procedimiento micro-Kjeldahl), AS-10 y AS-13, respectivamente (NOM, 2002). La conductividad eléctrica (EC) se midió con un medidor multiparamétrico (PCSTestr35, Oaklon), siguiendo las especificaciones del fabricante.

Experimentos de adsorción de Arsénico

Trozos pequeños de BG (<1 cm) se trituraron y se filtraron a través de mallas tamizadoras No. 20 y 12 para recuperar partículas con un tamaño de entre 0.8-1.7 mm. Con el objetivo de descartar impurezas, las partículas recuperadas se sumergieron en agua desionizada y aquellas que precipitaron se seleccionaron para secarse a 60 °C durante 72 horas. Una vez seco, se utilizaron 50-100 mg de BG para los experimentos de adsorción (Wang *et al.*, 2013).

Para evaluar la capacidad de adsorción de As por BG, se llevaron a cabo dos experimentos: 1) Adsorción en función del tiempo (un estudio cinético) y 2) Adsorción en función de la concentración inicial de As(V). El As(V) fue suministrado como $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Estudio cinético

El estudio cinético se llevó a cabo utilizando el siguiente método. Se añadieron 25 mL de una solución con 10 mg L⁻¹ de As(V) y un pH ajustado a 7, en tubos de polipropileno de baja densidad (Falcon) de 50 mL para equilibrar 50 mg de adsorbente durante 5, 15, 30, 60, 120, 180, 240 ó 360 minutos en un agitador a 200 rpm y 25 °C (Alchouron *et al.*, 2020). Después de cada tiempo de exposición, las soluciones se filtraron con papel Whatman (No. 2) y se almacenaron a temperatura ambiente hasta la cuantificación del As. Se incluyeron un mínimo de 3 réplicas independientes y 2 muestras de control que consistieron en 25 mL de solución libre de As(V) con 50 mg de adsorbente, por cada tiempo evaluado. Los datos experimentales de adsorción de As se analizaron y ajustaron con el modelo de pseudo-segundo orden.

Adsorción en función de la concentración de As(V)

La capacidad de adsorción de As por BG se evaluó en soluciones contaminadas con 5, 10, 25 ó 50 mg L⁻¹ de As(V) y un pH ajustado a 7. Cincuenta mL de las soluciones adicionadas con As(V) se añadieron en matraces de 200 mL con 100 mg de biocarbón (adsorbente), y se expusieron a agitación a 300 rpm y 25 °C, durante 60 minutos (Alchouron *et al.*, 2020). Después del tiempo de exposición, las soluciones se filtraron con papel Whatman (No. 2) y se almacenaron a temperatura ambiente hasta la cuantificación del As. Se incluyeron un mínimo de 3 réplicas independientes por cada concentración de As(V) evaluada, y se analizaron 2 muestras control que consistieron en 50 mL de solución libre de As(V) y 100 mg de adsorbente. Los datos experimentales de adsorción de As se analizaron y graficaron para obtener el mejor modelo de ajuste.

Análisis de Adsorción de Arsénico

Cuantificación de Arsénico

Las soluciones recuperadas después del tiempo de agitación se filtraron con membranas de nitrocelulosa (0.45 μm , Whatman) antes de cuantificar la concentración de As en la solución mediante espectrometría de absorción atómica (EAA) con el método de flama, utilizando una longitud de onda de 193.7 nm, con una mezcla de aire-acetileno (3.7 L min^{-1}) y una abertura de quemador de 0.2 nm. En cada lectura y cálculo de concentración de As, se utilizó una curva estándar de As (0, 5, 10, 20, 30, 50 y 60 $\mu\text{g As mL}^{-1}$), preparada con una solución concentrada de As (1000 $\mu\text{g As mL}^{-1}$). Todo el material de vidrio utilizado para la preparación de muestras y curvas estándar se sumergió previamente en una solución de HNO_3 al 10 % (v/v) durante 12 horas (Alcántara, 2013; Alcántara-Martínez *et al.*, 2016).

Estimación de Adsorción y Remoción de Arsénico

A partir de los resultados de concentración de As (mg L^{-1}) en las soluciones, se estimó la adsorción y porcentaje de remoción de As en cada tratamiento (diferentes tiempos y concentraciones evaluadas) utilizando las Ecuaciones 1 y 2, respectivamente:

$$q = \frac{(c_o - c_f) \times V}{P} \quad (1)$$

$$\% \text{ de remoción de As} = \frac{(c_o - c_f)}{c_o} \times 100 \quad (2)$$

Donde la adsorción (q) es la cantidad de As adsorbida por el adsorbente (mg g^{-1}) en función de la concentración de As (q_e) o tiempos de exposición (q_t), C_o y C_f son la concentración inicial y final de As(V) (mg L^{-1}) respectivamente, mientras que V es el volumen total (L) de la solución, y P es el peso (g) del biocarbón. El porcentaje de la remoción de As es una estimación de la cantidad de As removido por el adsorbente, en relación con la cantidad de As(V) inicial en la solución (Lyu *et al.*, 2022; Rahman *et al.*, 2022).

Modelo cinético

Para estimar el tiempo de equilibrio en la adsorción de As y obtener parámetros cinéticos,

se ajustaron los datos al modelo de pseudo-segundo orden con la siguiente ecuación 3 (Mamtimin et al., 2023):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{(K_2 q_{e-cal}^2)} + \frac{t}{q_{e-cal}} \quad (3)$$

Donde K_2 es la constante de velocidad de pseudo-segundo orden (g/mg·min), q_{e-cal} representa la cantidad máxima de As que el biocarbón puede adsorber cuando se alcanza el equilibrio en el sistema de adsorción (mg g⁻¹), t es el tiempo (minutos) y q_t es la cantidad de As adsorbido por el absorbente en cada tiempo de muestreo (mg g⁻¹), calculada de acuerdo con la ecuación 1. La ecuación lineal 3 se representó gráficamente como t/q_t versus t . A partir de los valores de la pendiente e intersección en el eje y, se estimaron los parámetros cinéticos (K_2 y q_{e-cal}) (Ho et al., 2001; Mamtimin et al., 2023).

Resultados y Discusión

El biocarbón derivado de bambú ha demostrado potencial para eliminar del agua elementos inorgánicos tales como cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), zinc (Zn), fluor (F) y As, moléculas como azul de metileno, N-nitrosodimetilamina, tetraciclina, nitrato, amonio, fosfato (PO₄³⁻) y compuestos aromáticos, entre otros (Alchouron et al., 2022; Chen et al., 2022; Tan et al., 2012; Wendimu et al., 2017; Yang et al., 2016; Zhou et al., 2014). Entre los contaminantes inorgánicos, el As ha sido uno de los menos estudiados. En el presente estudio, el biocarbón elaborado del bambú *G. inermis* (BG), mostró una alta remoción de As en soluciones contaminadas con As(V).

Caracterización del Biocarbón

El rendimiento obtenido de la elaboración del biocarbón de *G. inermis* fue de 27–30 %, similar al reportado para biocarbones derivados de *Guadua angustifolia* (27–40 %) (Gutiérrez & De Lira Fuentes, 2020; Hernández-Mena et al., 2014), y dentro del rango observado para otras fuentes vegetales (Amen et al., 2020). En comparación con biocarbones elaborados a partir de otras biomásas, se ha reportado que el biocarbón de bambú presenta rendimientos competitivos y un alto contenido de carbono, debido probablemente a una elevada cantidad de lignina. Además, la temperatura utilizada en este estudio, inferior a 700 °C, pudo haber favorecido el rendimiento obtenido (Kim et al., 2020; Odega et al., 2023).

Entre sus características, el biocarbón BG presenta un alto contenido de OM, C y una gran área superficial (Tabla 1). La OM se origina de la descomposición térmica de celulosa, hemicelulosa y lignina durante la pirólisis, compuestos abundantes en los culmos del género *Guadua* (Kim *et al.*, 2020). La composición de la biomasa también determina, en conjunto con la temperatura de pirólisis, otras propiedades físicas, como el área superficial del biocarbón. En el caso de BG, esta área es mayor que la reportada para otros biocarbones prístinos derivados de bambú, como *Bambusa beecheyana* ($191.9 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) y *G. chacoensis* ($6.7 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), así como de otras fuentes vegetales, incluyendo especies leñosas como pino o roble, con valores entre 2.04 y $6.6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Alchouron *et al.*, 2021; Pinisakul *et al.*, 2023; Vithanage *et al.*, 2017).

El contenido de C se encuentra dentro del rango reportado para biocarbones de bambú, de entre 33-82 % (Alchouron *et al.*, 2020; Gutiérrez & De Lira Fuentes, 2020; Hernandez-Mena *et al.*, 2014), mientras que el contenido de P y K, que forman parte del residuo mineral del biocarbón, puede derivar del alto contenido de sílice, característico de los culmos del bambú (Alchouron *et al.*, 2021; Alfei & Pandoli, 2024). En conjunto, estos resultados sugieren que el biocarbón BG posee características favorables para la adsorción de As. No obstante, se recomiendan estudios adicionales enfocados en la caracterización de los grupos funcionales presentes en su superficie, a fin de conocer mejor su influencia en el proceso de adsorción y en la estructura del biocarbón BG.

El biocarbón de *Guadua inermis* muestra una adsorción rápida

Se evaluó la adsorción de As por BG en un estudio cinético. Los resultados se ajustaron bien al modelo de pseudo-segundo orden, lo cual sugiere que la adsorción de As está principalmente influenciada por interacciones químicas entre As(V) y la superficie del biocarbón (Rahman *et al.*, 2022). El ajuste con el modelo linealizado donde q_t (mg g^{-1}) es la cantidad de As adsorbido en el tiempo (t), mostró un valor de correlación alto ($R^2 \geq 0.99$) (Figura 1). El valor calculado de $q_{e-\text{cal}}$ es de 3.856 mg g^{-1} , y representa la cantidad máxima de As que el biocarbón puede adsorber cuando se alcanza el equilibrio, coincidiendo con el valor experimental cuando la concentración de As adsorbido ya no incrementa a partir de las 3 horas ($3.55 \pm 0.6 \text{ mg g}^{-1}$), correspondiente a 68.9 % de remoción de As (Figura 1).

El biocarbón BG mostró una cinética de adsorción que podría considerarse rápida, alcanzando el equilibrio dentro de las primeras ocho horas, específicamente en un tiempo de tres horas (Alchouron *et al.*, 2022). Este resultado sugiere una eliminación eficiente de As en poco tiempo, una característica común entre los biocarbones derivados de plantas leñosas, como madera de pino, roble japonés y bambú (Alchouron *et al.*, 2020; Lyu *et al.*, 2022). Tiempos de equilibrio cortos, entre una y cinco horas, se han reportado para otros biocarbones prístinos derivados de bambú en la remoción de As(V) ó As(III) en soluciones acuosas (Alchouron *et al.*, 2020; Lyu *et al.*, 2022; Pinisakul *et al.*, 2023). En general, estos biocarbones han mostrado tiempos de equilibrio reducidos, a pesar de la variedad de condiciones experimentales utilizadas (Tabla 2). Por ejemplo, el biocarbón elaborado de *G. chacoensis*, alcanzó el equilibrio en 1 hora, cuando se expuso a una concentración de 10 mg L^{-1} de As(V) (Alchouron *et al.*, 2020), mientras que un

biocarbón derivado del bambú *B. beecheyana* mostró un equilibrio en 5 horas en una solución con 0.05 mg L^{-1} de As(V) (Pinisakul et al., 2023).

No obstante, las diferencias observadas en el porcentaje de remoción entre distintos biocarbones podrían atribuirse no solo a la diversidad de factores experimentales, sino también a las características morfológicas particulares de cada especie de bambú. Por ejemplo, aunque *G. inermis* y *G. chacoensis* pertenecen al mismo género y ambas se consideran especies de bambú leñoso, los culmos sólidos característicos de *G. inermis* podrían contribuir significativamente a la generación de una gran área superficial (Tabla 1), así como a otras propiedades estructurales que favorecen la adsorción de As (Pérez-Alquicira et al., 2021; Ramírez-Ojeda et al., 2023).

En este estudio, BG no solo demostró una capacidad para remover As en un tiempo relativamente corto (Figura 1B), sino que también presentó una notable remoción del 54 % en los primeros 30 minutos, alcanzando un 67.2 % al cabo de una hora (Figura 1A). Aunque se observa que BG alcanza el equilibrio aproximadamente a las tres horas, aparentemente la remoción de As no mostró un incremento relevante a partir de la primera hora. Por lo anterior, las pruebas con diferentes concentraciones de As(V) se realizaron en un tiempo de una hora.

Diversos estudios cinéticos reportan un efecto importante de la adición de compuestos en la estructura del biocarbón sobre su capacidad y velocidad de adsorción de As (Benis et al., 2020; Rahman et al., 2022; Van et al., 2015). En particular, la incorporación de compuestos con Fe, combinación de Ca, Mg y Al, o quitosán, puede incrementar significativamente la tasa de remoción de As de biocarbón de bambú (Alchouron et al., 2020; Lyu et al., 2022; Pinisakul et al., 2023). Para una caracterización más precisa del tiempo de remoción de As por BG, se recomienda estudiar el efecto de diversos parámetros experimentales, entre ellos, la modificación de su estructura con compuestos principalmente basados en Fe.

El biocarbón de *Guadua inermis* remueve un alto porcentaje de As

La remoción de As por BG se evaluó en soluciones con diferentes concentraciones de As(V) que van de 5 a 50 mg L^{-1} , durante 1 hora. Los resultados muestran un ajuste lineal de los datos de adsorción (q_e) en función de la concentración inicial de As(V) (Figura 2B), lo que indica que la cantidad de As adsorbido aumenta proporcionalmente al incremento en la concentración inicial de As en la solución (C_0). Esto sugiere que los datos no se ajustan al modelo de isothermas Langmuir, usualmente utilizado para estimar la capacidad máxima de adsorción de As bajo condiciones de equilibrio, es decir cuando la cantidad de As adsorbido por el biocarbón permanece constante (Vithanage et al., 2017). La linealidad observada concuerda con lo reportado para otros biocarbones derivados de bambú y otras fuentes, las cuales presentan una aparente tendencia lineal a concentraciones iniciales por debajo de 50 mg L^{-1} de As(V). Sin embargo, estos mismos estudios indican que la adsorción alcanza el equilibrio en concentraciones mayores a ese valor (Alchouron et al., 2020; Rahman et al., 2022). Por lo tanto, es necesario estudiar la adsorción de BG, en soluciones con concentraciones iniciales de As(V) superiores a 50 mg L^{-1} , para encontrar el mejor ajuste no lineal del modelo de isothermas y estimar la capacidad máxima de adsorción de BG.

No obstante, los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el biocarbón BG adsorbe concentraciones de As dentro del rango reportado para otros biocarbones probados en soluciones con As(V) (2.59-868 mg g⁻¹). En particular, BG mostró un valor máximo de adsorción de 16.0 ± 1.2 mg g⁻¹, muy similar a los reportados para algunos biocarbones mejorados en su superficie, como biocarbón de cáscara de arroz-Fe (17 mg g⁻¹), álamo- AIOOH (17 mg g⁻¹), residuos de trigo-Bi₂O₃ (16.21 mg g⁻¹), roble rojo- Fe⁰ (15.58 mg g⁻¹), entre otros (Bakshi *et al.*, 2018; Samsuri *et al.*, 2013; Zhang & Gao 2013; Zhu *et al.*, 2016).

La notable capacidad de adsorción de As del biocarbón prístino BG, podría atribuirse a las propiedades estructurales conferidas por el bambú. Principalmente, un alto contenido de compuestos lignocelulósicos (lignina, celulosa y hemicelulosa), se relaciona con la generación de una superficie grande debido a la gran cantidad de microporos, y con un alto porcentaje de OM (Chaturvedi *et al.*, 2023; Dong *et al.*, 2014). En particular, el alto porcentaje de OM presente en BG, podría participar en procesos redox que modulan el estado de oxidación del As (por ejemplo, la oxidación de As(III) a As(V)), al actuar como donadora y aceptora de electrones, influyendo de esta manera en las interacciones entre el As y los grupos químicos presentes en la superficie (Dong *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2020). Adicionalmente, en comparación con otras fuentes vegetales como plantas leñosas o residuos vegetales, el bambú, contiene lignina en mayor cantidad y con más grupos hidroxilo fenólicos, y más sílice en los culmos que permanece después de la pirólisis y pueden influir positivamente en la adsorción de As (Alchouron *et al.*, 2020; Chaturvedi *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2014; Sharma *et al.* 2018; Pinisakul *et al.*, 2023). Estas características podrían explicar la alta remoción de As por BG, la cual alcanzó un 68 % al exponerse a una solución con 50 mg L⁻¹ de As(V) (Figura 2A), indicando una remoción mayor que la reportada para biocarbones prístinos producidos de otras fuentes, como álamo del género *Populus*, cáscara de arroz, y residuos sólidos urbanos, con porcentajes de remoción de < 10.5 %, 25 % y 55 %, respectivamente (Agrafioti *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2020).

En contraste, algunos biocarbones prístinos derivados de bambú han mostrado porcentajes de remoción menores a 50 %. Por ejemplo, un biocarbón producido de biomasa de bambú puede remover 5 % de As(V) en una solución compleja con Pb(II), Cr(VI), PO₄³⁻, azul de metileno y 21 mg L⁻¹ de As(V) (Zhou *et al.*, 2014), mientras que otro derivado de bambú removió aproximadamente un 25 % de As(III) en una solución mixta con 80 mg L⁻¹ de As(III)-Cd(II) (Lyu *et al.*, 2022). Al tratarse de bambú como fuente del biocarbón, las características distintivas como superficie porosa, y el contenido de lignina y sílice podrían ser similares a BG. Sin embargo, diversos factores experimentales podrían influir en el proceso de adsorción de manera importante, tales como concentración de As en la solución, forma química del metaloide, temperatura, pH, tiempo de contacto, y la presencia de iones adicionales al As en la solución, entre otros (Amen *et al.*, 2020; Srivastav *et al.*, 2022; Vithanage *et al.*, 2017). Por mencionar un ejemplo, se ha reportado que una alta cantidad de fósforo puede reducir la remoción de As(V) en más del 50 %, ya que el As(V) y PO₄³⁻ compiten por los mismos sitios de adsorción (Alchouron *et al.*, 2021).

Otros factores determinantes en la eficiencia de adsorción son las condiciones en las cuales se lleva a cabo la pirólisis para producir el biocarbón, entre ellas, la temperatura. Los biocarbones producidos mediante pirólisis lenta a baja temperatura (300-600 °C), como es el caso de BG,

en general tienen baja hidrofobicidad y aromaticidad, y un contenido alto de grupos funcionales C=O y C-H que promueven la adsorción de contaminantes (Amen *et al.*, 2020; Vithanage *et al.*, 2017). La temperatura también influye en características como el área superficial y el contenido de carbono, que presentan valores elevados en BG, y también podrían favorecer su desempeño como adsorbente. Por ejemplo, el biocarbón prístino elaborado de *G. chacoensis* con menor área superficial ($6.7 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) y contenido de carbono (33 %) removió alrededor de 30 % menos As que BG, al cabo de 2 horas, en condiciones experimentales similares (Alchouron *et al.*, 2020).

En conjunto, los resultados de este estudio demuestran el potencial de BG para remover al menos 37 % del metaloide presente en el agua, bajo las condiciones experimentales utilizadas, sin la adición de compuestos en su estructura, lo cual reduce los costos y complejidad en su producción.

Con la finalidad de complementar la caracterización de la capacidad de adsorción de As por BG, se recomienda profundizar en el estudio de diversos factores experimentales que influyen en la capacidad de adsorción. Un ejemplo de lo anterior sería la modificación de la temperatura en el proceso de adsorción. Se ha reportado que el aumento de temperatura puede mejorar significativamente la adsorción de varios tipos de biocarbones, por ejemplo, el biocarbón derivado del bambú *G. chacoensis*, aumentó 3.5 veces su capacidad de adsorción de As (mg g^{-1}) cuando la temperatura se incrementó de 25°C a 40°C , en una solución con 600 mg L^{-1} de As(V) (Alchouron *et al.*, 2020). Adicionalmente, la modificación de la superficie de BG con compuestos específicos podría potenciar su capacidad adsorbente, como se ha observado en biocarbones derivados de bambú que alcanzaron aumentos de remoción de As de entre 19.7 y 236 % (Alchouron *et al.*, 2020; Lyu *et al.*, 2022; Pinisakul *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2014).

Limitaciones y Perspectivas

Hasta donde sabemos, este es el primer estudio que evalúa la adsorción de As por un biocarbón derivado de *G. inermis*, un bambú nativo de México, obtenido mediante pirólisis lenta, con un método accesible y adaptable a comunidades rurales. No obstante, es importante considerar que las propiedades del biocarbón podrían variar según el lote de plantas, lo que podría afectar su eficacia. Por ello, se recomienda evaluar en futuras investigaciones la influencia de estas variaciones y establecer rangos de eficacia en la adsorción.

Respecto a la cuantificación de As, la técnica utilizada en este estudio (EAA) puede presentar limitaciones en su sensibilidad, lo cual podría influir en la detección precisa de concentraciones muy bajas del contaminante. Por lo tanto, sería conveniente incorporar métodos analíticos complementarios más sensibles, como la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), que permitan ampliar el rango de condiciones evaluadas. A pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos evidencian un potencial de adsorción relevante, lo que destaca la importancia de entender los mecanismos involucrados. Para ello, se requieren estudios estructurales del biocarbón mediante técnicas como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) o espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS), que identifiquen grupos funcionales; análisis de isothermas y cinéticas bajo diferentes condiciones experimentales (pH,

temperatura, concentraciones altas y bajas de As, presencia de otros metales, o modificación superficial del material); así como evaluar la liberación de potenciales subproductos en el proceso de adsorción. Estos estudios permitirían proyectar el desempeño del biocarbón en condiciones ambientales o de contaminación diversas. Una vez caracterizado, su aplicación podría escalarse a sistemas prácticos, como biofiltros reutilizables operados en columnas de flujo continuo, donde se estime el volumen tratado antes de requerir regeneración. Finalmente, para validar el uso del biocarbón de *G. inermis* como una alternativa sostenible para la remediación de cuerpos de agua contaminados con As, será clave integrar investigaciones técnicas, económicas y sociales.

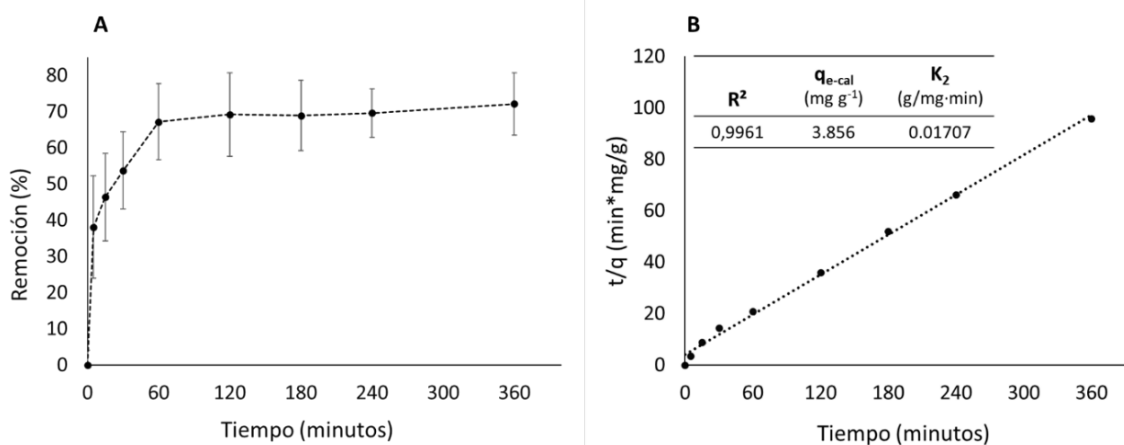


Figura 1. Adsorción de As por BG en función del tiempo.

A) Porcentaje de remoción en el tiempo. **B)** Ajuste lineal del modelo pseudo-segundo orden, de la adsorción en diferentes tiempos. Se muestran los parámetros cinéticos calculados. R^2 : coeficiente de correlación; q_{e-cal} : cantidad máxima de As que el biocarbón puede adsorber cuando se alcanza el equilibrio; K_2 : constante de velocidad de pseudo-segundo orden.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

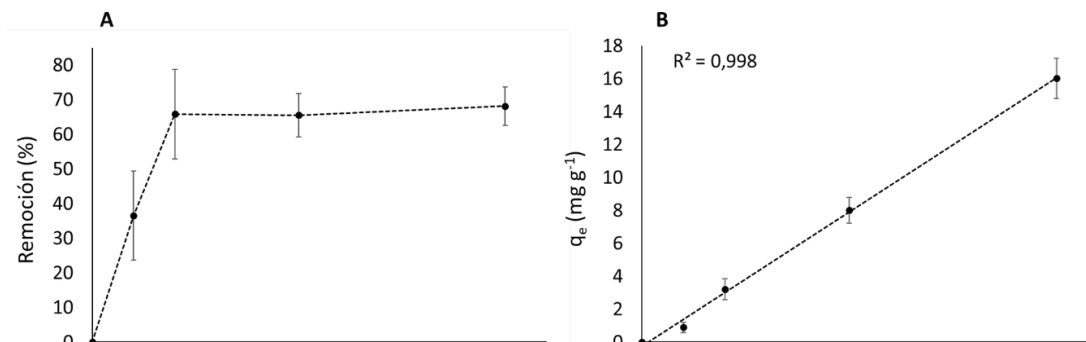


Figura 2. Adsorción de As por BG en función de la concentración inicial de As(V).

A) Porcentaje de remoción en cada una de las concentraciones de As(V) evaluadas (C_0). **B)** Aumento de la adsorción (q_e) con respecto al aumento de la concentración inicial de As (C_0).

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

Tabla 1. Valores de parámetros fisicoquímicos de BG.

pH	C.E.	N	C	C:N	Área superficial	OM	P	K
	dS/m	%			m ² g ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	
6.41	2.35	0.66	50.54	76.34	230	86.94	8532.8	312.60

EC = conductividad eléctrica. **N**= nitrógeno, **C**=carbono. **C:N**= proporción carbono nitrógeno. **OM**= materia orgánica. **P**= fósforo. **K**= potasio.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

Tabla 2. Comparación de variables experimentales y parámetros de adsorción de As, entre estudios de biocarbones prístinos derivados de bambú, en soluciones contaminadas con As.

Especie iónica de As	Concentración de As inicial (mg L ⁻¹)	pH inicial	Adsorción máxima de As (mg g ⁻¹)	Máxima remoción de As (%)	Tiempo de equilibrio	Especie de bambú utilizada	Referencia
As(V)	10	7	3.86	68.9	3 h	<i>G. inermis</i>	Este estudio
As(V)	10	7	~2.2	~45	1 hr	<i>G. chacoensis</i>	Alchouron <i>et al.</i> , 2020
As(V)	21	ND	ND	<5	ND	ND (biomasa de bambú)	Zhou <i>et al.</i> , 2014
As(V)	0.05	7	<0.001	ND	5 hr	<i>Bambusa beecheyana</i>	Pinisakul <i>et al.</i> , 2023
As(III)	ND	4.5 y 5	~15	~20	100 min	ND (biomasa de bambú)	Lyu <i>et al.</i> , 2022

ND: No definido.

Fuente: Own elaboration based on results and published papers.

Conclusiones

Las cinéticas rápidas y las altas capacidades de adsorción son dos características objetivo para la caracterización de un biocarbón. El presente estudio demuestra la habilidad del biocarbón derivado de *G. inermis*, para remover un alto porcentaje de As del agua en un tiempo considerado rápido, contribuyendo al conocimiento sobre la capacidad de adsorción de As de este biocarbón en un sistema acuoso. Para un completo conocimiento sobre la eficacia y mecanismos implicados en la remoción de As por BG, se sugiere estimar la capacidad máxima de adsorción de As(V) y As(III) en diferentes condiciones experimentales, así como caracterizar la composición química de su estructura. En conjunto, estos estudios podrían sentar las bases para la producción de sistemas de purificación de agua a nivel casero y potencialmente industrial, basados en biocarbón de bambú.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, NAM y GOG; desarrollo de la metodología, NAM y GOG; validación experimental, NAM, GOG y TVS; análisis de resultados, NAM; Manejo de datos, NAM;

escritura y preparación del manuscrito, NAM y GOG; redacción, revisión y edición, NAM, GOG, TVS y CMO; administrador de proyectos, GOG y TVS; adquisición de fondos, NAM, GOG y TVS.

Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) número de convenio 2157899 y el Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), a través del proyecto número 1645034390, titulado Viabilidad y factibilidad en la propagación, conservación, establecimiento y manejo sostenible de cinco especies nativas de bambú leñoso en la región Pacífico-Centro de México.

Agradecimientos

Los autores agradecen al departamento de Biotecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, por el acceso al equipo para cuantificar As y al grupo de trabajo del Laboratorio 108 de Residuos Sólidos, por el espacio otorgado para realizar parte del proyecto. Asimismo, se agradece la colaboración del Laboratorio de Suelos del INIFAP, Centro Experimental Tecmán, por su apoyo en la caracterización del biocarbón.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Agrafioti, E., Kalderis, D., & Diamadopoulos, E. (2014). Ca and Fe modified biochars as adsorbents of arsenic and chromium in aqueous solutions, *Journal of environmental management*, 146, 444-450. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.029>
- Ahmad, M., Ok, Y. S., Kim, B. Y., Ahn, J. H., Lee, Y. H., Zhang, M., ... & Lee, S. S. (2016). Impact of soybean stover-and pine needle-derived biochars on Pb and As mobility, microbial community, and carbon stability in a contaminated agricultural soil. *Journal of environmental management*, 166, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.006>
- Alcántara, M. N. (2013). Respuesta antioxidantes de *Acacia farnesiana* (L) Willd abjo condiciones de estrés por arsenato [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa]. [Index Catalog // UAM](#)
- Alcántara-Martínez, N., Rivera-Cabrera, F., Guizar, S., Anicacio-Acevedo, B.E., Buendía-González, L., & Volke-Sepúlveda, T. (2016). Tolerance, arsenic uptake and oxidative stress

- in *Acacia farnesiana* under arsenate-stress. *International Journal of Phytoremediation*. 18, 671–678. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1118432>
- Alchouron, J., Fuentes, A.L.B., Musserc, A., Vegaa, A.S., Mohand, D., Pittman, ChU., Mlsna, T.E., & Navarathna Ch. (2022). Arsenic removal from household drinking water by biochar and biochar composites: A focus on scale-up. Sustainable Biochar for Water and Wastewater Treatment. In Mohan, D., Pittman Jr, C., & Mlsna, T. E. Sustainable biochar for water and wastewater treatment. (pp. 277-320). Ed. Elsevier.
- Alchouron, J., Navarathna, C., Rodrigo, P.M., Snyder, A., Chludil, H. D., & Vega, A.S. (2021). Household arsenic contaminated water treatment employing iron oxide/bamboo biochar composite: An approach to technology transfer. *Journal of Colloid and Interface Science*, 587, 767-779. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.11.036>
- Alchouron, J., Navarathna, Ch., Chludil, H. D., Dewage, N. B., Perez, F., Hassan E. B., Pittman, ChU., Vega, A.S., & Mlsna, T. E. (2020). Assessing South American *Guadua chacoensis* bamboo biochar and Fe₃O₄ nanoparticle dispersed analogues for aqueous arsenic (V) remediation. *Science of The Total Environment*, 706, 135943. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135943>
- Alfei, S., & Pandoli, O.G. (2024). Bamboo-Based Biochar: A Still Too Little-Studied Black Gold and Its Current Applications. *Journal of Xenobiotics*, 14(1), 416-451. <https://doi.org/10.3390/jox14010026>
- Amen, R., Bashir, H., Bibi, I., Shaheen, S.M., Niazi, N.K., Shahidet, M., Hussain, M. M., Antoniadis, V., Shakoor, M. B., Al-Solaimani, S. G., Wang, H., Bundschuh, J., & Rinklebe, J. (2020). A critical review on arsenic removal from water using biochar-based sorbents: the significance of modification and redox reactions. *Chemical Engineering Journal*, 396, 125195. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125195>
- ASTM International. (2022). *Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis* (ASTM D6866-22). <https://www.astm.org>
- ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal* (ASTM D 1762). <https://www.astm.org>
- ASTM International. (2018). *Standard Test Methods for pH of Water* (ASTM D-1293). www.astm.org
- Bakshi, S., Banik, C., Rathke, S.J., & Laird, D.A. (2018). Arsenic sorption on zero-valent iron-biochar complexes. *Water research*, 137, 153-163. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.021>
- Benis, K.Z., Damuchali, A.M., Soltan, J., & Mc Phedran, K.N. (2020). Treatment of aqueous arsenic—A review of biochar modification methods. *Science of The Total Environment*, 739, 139750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139750>
- Bian, F., Zhong, Z., Zhang, X., Yang, Ch., & Gai, X. (2020). Bamboo—An untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, 246, 125750. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125750>
- Campillo, J. H., & Rodríguez, A.R. (2004). Determinación del contenido de materia orgánica en suelos. *Revista Digital Del Cedex*, 134, 55.
- Chaturvedi, K., Singhwane, A., Dhangar, M., Mili, M., Gorhae, N., Naik, A., N. Prashant, N., A. K. Srivastava A.K., & Verma, S. (2023). Bamboo for producing charcoal and biochar for

- versatile applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(14), 15159-15185. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03715-3>
- Chen, H., Gao, Y., Li, J., Fang, Z., Bolan, N., Bhatnagar, A., Gao, B., Hou, D., Wang, S., Song, H., Yang, X., Shaheen, S.M., Meng, J., Chen, W., Rinklebe, J., & Wang, H. (2022). Engineered biochar for environmental decontamination in aquatic and soil systems: a review. *Carbon Research*, 1(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s44246-022-00005-5>
- Colín-Torres, C.G., Murillo-Jiménez, J. M., Del Razo, L.M., Sánchez-Peña, L.C., Becerra-Rueda, O.F., & Marmolejo-Rodríguez, A. J. (2014). Urinary arsenic levels influenced by abandoned mine tailings in the Southernmost Baja California Peninsula, Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(5), 845-854. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9603-x>
- Dong, X., Ma, L.Q., Gress, J., Harris, W., & Li, Y. (2014). Enhanced Cr (VI) reduction and As (III) oxidation in ice phase: important role of dissolved organic matter from biochar. *Journal of hazardous materials*, 267, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.027>
- Duwiejuah, A. B., Abubakari, A. H., Quainoo, A. K., & Amadu, Y. (2020). Review of biochar properties and remediation of metal pollution of water and soil. *Journal of Health and Pollution*, 10(27), 200902. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.27.200902>
- Gutiérrez, G. O., & de Lira Fuentes, R. C. (2020). Elaboración de biocarbón para el aprovechamiento de residuos proveniente de las podas de bambú (*Guadua angustifolia*). *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 7(1), 1-9.
- Huang, L., Wu, H., & van der Kuip, T. J. (2015). The health effects of exposure to arsenic-contaminated drinking water: a review by global geographical distribution. *International journal of environmental health research*, 25(4), 432-452. <https://doi.org/10.1080/09603123.2014.958139>
- Ho, Y. S., Ng, J. C. Y., & McKay, G. (2001). Removal of lead(ii) from effluents by sorption on peat using second-order kinetics. *Separation Science and Technology*, 36(2), 241-261. <https://doi.org/10.1081/SS-100001077>
- Hernandez-Mena, L. E., Pécoraa, A. A., & Beraldob, A.L. (2014). Slow pyrolysis of bamboo biomass: analysis of biochar properties. *Chemical Engineering Transactions*, 37, 115-120. <http://dx.doi.org/10.3303/CET1437020>
- International Agency for Research on Cancer [IARC]. (2012). Arsenic, metals, fibres, and dusts. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. World Health Organization. <https://publications.iarc.who.int/120>
- Kim, H. B., Kim, J. G., Kim, T., Alessi, D. S., & Baek, K. (2020). Mobility of arsenic in soil amended with biochar derived from biomass with different lignin contents: Relationships between lignin content and dissolved organic matter leaching. *Chemical Engineering Journal*, 393, 124687. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124687>
- Liu, Z., Fei, B., & Jiang, Z. (2014). Combustion characteristics of bamboo-biochars. *Bioresource technology*, 167, 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.023>
- Lyu, P., Lianfang, L., Xiaoya, H., Guanghui, W., & Changxiong, Z. (2022). Pre-magnetic bamboo biochar cross-linked CaMgAl layered double-hydroxide composite: High-efficiency removal of As (III) and Cd (II) from aqueous solutions and insight into the mechanism of simultaneous purification. *Science of The Total Environment*, 823, 153743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153743>

- Mamtimin, X., Song, W., Wang, Y., & Habibul, N. (2023). Arsenic adsorption by carboxylate and amino modified polystyrene micro-and nanoplastics: kinetics and mechanisms. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 44878-44892. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25475-x>
- Monroy-Torres, R., Macias, A.E., Gallaga-Solorzano, J.C., Santiago-García, E.J., & Hernández, I. (2009). Arsenic in Mexican children exposed to contaminated well water. *Ecology of food and Nutrition*, 48(1), 59-75. <https://doi.org/10.1080/03670240802575519>
- NOM-021-RECNAT-2000. (2002). *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis* (NOM-021-RECNAT-2000). <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Odega, C.A., Ayodele, O.O., Ogutuga, S.O., Anguruwa, G.T., Adekunle, A.E., & Fakorede, C.O. (2023). Potential application and regeneration of bamboo biochar for wastewater treatment: A review. *Advances in Bamboo Science*, 2, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2022.100012>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2023, October 01). Arsenic in drinking water. Geneva. <https://www.who.int/>
- Orozco-Gutiérrez, G., Flores-Garnica, J. G., & Ramírez-Ojeda, G. (2022). Determinación de la distribución potencial de bambú *Guadua inermis* en México: Determinación de la distribución potencial de bambú *Guadua inermis* en México. *e-CUCBA*, (19), 105-111. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi19.269>
- Osuna-Martínez, C.C., Armienta, M.A., Bergés-Tiznado, M.E., & Páez-Osuna, F. (2021). Arsenic in waters, soils, sediments, and biota from Mexico: An environmental review. *Science of the Total Environment*, 752, 142062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142062>
- Pérez-Alquicira, J., Aguilera-Lopez, S., Rico, Y., & Ruiz-Sanchez, E. (2021). A population genetics study of three native Mexican woody bamboo species of *Guadua* (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae: Guaduinae) using nuclear microsatellite markers. *Botanical Sciences*, 99(3), 542-559. <https://doi.org/10.17129/botsci.2795>
- Pinisakul, A., Kruatong, N., Vinitnantharat, S., Wilamas, P., Neamchan, R., Sukkhee, N., Werner, D., Wilamas, P., & Sanghaisuk, S. (2023). Arsenic, iron, and manganese adsorption in single and binary heavy metal solution systems by bamboo-derived biochars. *J. Carbon Res*, 9(2), 40. <https://doi.org/10.3390/c9020040>
- Rahman, MdA., Lamb, D., Rahman, M. M., Bahar, MdM., & Sanderson, P. (2022). Adsorption–Desorption Behavior of Arsenate Using Single and Binary Iron-Modified Biochars: Thermodynamics and Redox Transformation. *ACS omega*, 7(1), 101-117. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04129>
- Ramírez-Ojeda, G., Orozco-Gutiérrez, G., Ruiz-Sánchez, E., Flores-Garnica, G., & Rubio-Camacho, E. A. (2023). Descriptores ecológicos y aptitud ambiental de 10 especies de bambú en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIRPAC. https://www.researchgate.net/publication/373173458_DESCRIPTORES_ECOLOGICOS_Y_APTITUD_AMBIENTAL_DE_10_ESPECIES_DE_BAMBU_DE_MEXICO
- Sharma, B., Shah, D. U., Beaugrand, J., Janeček, E. R., Scherman, O. A., & Ramage, M. H. (2018). Chemical composition of processed bamboo for structural applications. *Cellulose*, 25, 3255-3266. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1789-0>
- Samsuri, A. W., Sadegh-Zadeh, F., & Seh-Bardan, B. J. (2013). Adsorption of As (III) and As (V)

- by Fe coated biochars and biochars produced from empty fruit bunch and rice husk. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 981-988. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.08.009>
- Srivastav, A. L., Pham, T. D., Izah, S. C., Singh, N., & Singh, P. K. (2022). Biochar adsorbents for arsenic removal from water environment: a review. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 108(4), 616-628. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03374-6>
- Tan, Z., Xiang, J., Su, S., Zeng, H., Zhou, C., Sun, L., Hu, S., & Qiu, J. (2012). Enhanced capture of elemental mercury by bamboo-based sorbents. *Journal of hazardous materials*, 239, 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.053>
- Van, Vinh N., Zafar, M., Behera, S. K., & Park, H. S. (2015). Arsenic (III) removal from aqueous solution by raw and zinc-loaded pine cone biochar: equilibrium, kinetics, and thermodynamics studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 1283-1294. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0507-1>
- Vithanage, M., Herath, I., Joseph, S., Bundschuh, J., Bolan, N., Ok, Y., Kirkham M.B., & Rinklebe J. (2017). Interaction of arsenic with biochar in soil and water: a critical review. *Carbon*, 113, 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.11.032>
- Wang, W., Wang, X., Wang, X., Yang, L., Wu, Z., Xia, S., & Zhao, J. (2013). Cr (VI) removal from aqueous solution with bamboo charcoal chemically modified by iron and cobalt with the assistance of microwave. *Journal of Environmental Sciences*, 25(9), 1726-1735. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60247-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60247-2)
- Wendimu, G., Zewge, F., & Mulugeta, E. (2017). Aluminium-iron-amended activated bamboo charcoal (AIAABC) for fluoride removal from aqueous solutions. *Journal of Water Process Engineering*, 16, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.12.012>
- Xu, Y., Xie, X., Feng, Y., Ashraf, M. A., Liu, Y., Su, C., Qian, K., & Liu, P. (2020). As (III) and As (V) removal mechanisms by Fe-modified biochar characterized using synchrotron-based X-ray absorption spectroscopy and confocal micro-X-ray fluorescence imaging. *Bioresource technology*, 304, 122978. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122978>
- Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Huang, H., Lu, K., Guo, X., He, L., Lin, X., Che, L., Ye, Z., & Wang, H. (2016). Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 974-984. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4233-0>
- Zhang, Z., Yin, N., Du, H., Cai, X., & Cui, Y. (2016). The fate of arsenic adsorbed on iron oxides in the presence of arsenite-oxidizing bacteria. *Chemosphere*, 151, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.065>
- Zhang, M., & Gao, B. (2013). Removal of arsenic, methylene blue, and phosphate by biochar/ AlOOH nanocomposite. *Chemical Engineering Journal*, 226, 286-292. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.077>
- Zheng, X., Wu, Q., Huang, C., Wang, P., Cheng, H., Sun, C., Zhu, J., Xu, H., Ouyang, K., Guo, J., & Liu, Z. (2023). Synergistic effect and mechanism of Cd (II) and As (III) adsorption by biochar supported sulfide nanoscale zero-valent iron. *Environmental Research*, 231, 116080. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116080>
- Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A.R., Chen, H., Zhang, M., & Cao, X. (2014). Biochar-supported zerovalent iron for removal of various contaminants from aqueous solutions. *Bioresource technology*, 152, 538-542. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.021>

Zhu, N., Yan, T., Qiao, J., Cao, H. (2016). Adsorption of arsenic, phosphorus and chromium by bismuth impregnated biochar: adsorption mechanism and depleted adsorbent utilization. *Chemosphere*, 164, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.036>