

Materiales cerámicos con incorporación de biomasa previamente utilizada en adsorción

Ceramic materials incorporating spent biosorbent biomass

Doctoranda:

Cecilia MAZZOLA

<https://orcid.org/0009-0001-6662-4866>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Grupo de Estudios Ambientales (GEA), San Nicolás, Buenos Aires, Argentina.

cmazzola@frsn.utn.edu.ar

Directora:

Nancy QUARANTA

Resumen

La biosorción constituye una alternativa sustentable para la remoción de metales pesados presentes en efluentes acuosos mediante el empleo de residuos agroindustriales como materiales adsorbentes. Sin embargo, la disposición final de los biosorbentes agotados representa una limitación para su aplicación, especialmente cuando la recuperación del metal no resulta económicamente viable. En este contexto, la incorporación de biomasa contaminada en matrices cerámicas surge como una estrategia de valorización que permite simultáneamente gestionar un residuo y favorecer la inmovilización de los contaminantes.

En este trabajo se evaluó la fabricación de ladrillos cerámicos incorporando cáscaras de maní previamente utilizadas como biosorbente de Cu(II), Zn(II) y Ni(II). Las biomásas contaminadas fueron incorporadas en un 10% en volumen en matrices de arcilla, elaborándose formulaciones con biomasa sin contaminar y con cada uno de los metales evaluados. Las piezas fueron conformadas mediante prensado uniaxial y sinterizadas a 1000°C. Los materiales obtenidos fueron caracterizados mediante ensayos físicos, mecánicos y ambientales.

La incorporación de biomasa incrementó la porosidad y absorción de agua de los ladrillos, manteniendo valores adecuados de resistencia mecánica. Los ensayos de lixiviación evidenciaron reducciones superiores al 98% en la liberación de los metales respecto a la biomasa original, demostrando una elevada eficiencia de inmovilización durante el proceso térmico. Asimismo, los ensayos ecotoxicológicos mostraron una marcada disminución de la biodisponibilidad de los contaminantes luego de su incorporación en la matriz cerámica.

Los resultados obtenidos demuestran que la fabricación de materiales cerámicos con biosorbentes agotados constituye una alternativa viable para la valorización de residuos agroindustriales y la disposición segura de biomasa contaminada.

Palabras clave: Cerámicos; Biomásas contaminadas; Inmovilización de metales pesados

Abstract

Biosorption is a sustainable alternative for the removal of heavy metals from aqueous effluents through the use of agro-industrial wastes as adsorbent materials. However, the final disposal of spent biosorbents represents a limitation for their practical application, particularly when metal recovery is not economically feasible. In this context, the incorporation of contaminated biomass into ceramic matrices emerges as a valorization strategy that enables both waste management and pollutant immobilization.

This work evaluates the manufacture of ceramic bricks incorporating peanut shells previously used as biosorbents for Cu(II), Zn(II) and Ni(II). Contaminated biomasses were incorporated at 10 vol.% into clay matrices, producing formulations with uncontaminated biomass and biomass containing each of the evaluated metals. The samples were uniaxially pressed and sintered at 1000°C. The obtained materials were characterized through physical, mechanical, and environmental tests.

The incorporation of biomass increased the porosity and water absorption of the bricks while maintaining suitable mechanical properties. Leaching tests showed reductions higher than 98% in metal release compared with the original biomass, demonstrating the high efficiency of the thermal process in immobilizing the contaminants. Additionally, ecotoxicological assays revealed a significant reduction in contaminant bioavailability after incorporation into the ceramic matrix.

The results demonstrate that the production of ceramic materials containing spent biosorbents is a viable alternative for agro-industrial waste valorization and the safe management of contaminated biomass.

Keywords: Ceramics; Contaminated biomass; Heavy metal immobilization

Introducción

La contaminación de los recursos hídricos por metales pesados constituye una problemática ambiental de creciente preocupación debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación. Entre las tecnologías disponibles para el tratamiento de efluentes, la biosorción ha despertado un importante interés por su simplicidad, bajo costo y elevada eficiencia, especialmente cuando emplea residuos agroindustriales como materiales adsorbentes. Esta estrategia permite remover metales presentes en soluciones acuosas mediante mecanismos fisicoquímicos asociados a los grupos funcionales presentes en la biomasa (Ahmaruzzaman, 2011; Imran-Shaukat et al., 2022; Mathew et al., 2023; Syeda et al., 2022).

Una vez finalizado el proceso de biosorción, la biomasa cargada con los metales retenidos se convierte en un residuo que requiere una gestión adecuada. Cuando la recuperación del metal adsorbido no resulta técnica o económicamente viable, la disposición final de este material representa un desafío ambiental, ya que una gestión inadecuada podría provocar la liberación de los contaminantes nuevamente al ambiente. En este contexto, resulta de interés desarrollar alternativas que permitan valorizar esta biomasa residual y garantizar la inmovilización de los metales retenidos.

La incorporación de biomasa contaminada como agente formador de poros en matrices cerámicas constituye una estrategia alineada con los principios de la economía circular. Durante la cocción, la fracción orgánica se degrada y genera una estructura más porosa, mientras que los metales pueden quedar inmovilizados dentro de la matriz cerámica, reduciendo su movilidad y minimizando el riesgo de liberación al ambiente. Diversos estudios han demostrado que residuos orgánicos y subproductos industriales pueden emplearse exitosamente para fabricar cerámicos porosos con propiedades físicas y mecánicas adecuadas, al tiempo que se favorece la estabilización de contaminantes durante la sinterización (Salleh et al., 2021; Simón et al., 2023).

En este trabajo se evaluó la fabricación de ladrillos cerámicos porosos incorporando cáscaras de maní previamente utilizadas como biosorbente para la remoción de iones Cu(II), Zn(II) y Ni(II) de soluciones acuosas. Se analizaron las propiedades físicas y mecánicas de los materiales obtenidos, así como el impacto ambiental asociado a la incorporación de la biomasa contaminada, con el fin de determinar la viabilidad de esta alternativa como estrategia de valorización e inmovilización de metales pesados.

Desarrollo

Las cáscaras de maní utilizadas como biosorbente para la remoción de iones Cu(II), Zn(II) y Ni(II) fueron previamente molidas hasta obtener una granulometría inferior a 1 mm. Una vez finalizado el proceso de biosorción, la biomasa contaminada se recuperó por filtración y se secó en estufa a 100°C hasta masa constante para su incorporación en las matrices cerámicas.

Se elaboraron cinco formulaciones: arcilla pura (A), utilizada como referencia, arcilla con 10% en volumen de cáscaras de maní sin contaminar (CM) y arcilla con 10% en volumen de cáscaras de maní contaminadas con cobre (CMCu), cinc (CMZn) y níquel (CMNi). En todos los casos se incorporó un 8% de humedad en peso y las probetas se conformaron mediante prensado uniaxial a 25 MPa en moldes de 70 * 40 mm, resultando con un espesor aproximado de 16 mm. Posteriormente, las piezas se secaron durante 24 h a temperatura ambiente y 7 días en estufa a 100°C, para finalmente ser sinterizadas a 1000°C con una velocidad de calentamiento de 1 °C/min y un tiempo de permanencia de 3 h a la temperatura máxima.

Los ladrillos cerámicos obtenidos fueron caracterizados desde el punto de vista físico, mecánico y ambiental. Las propiedades tecnológicas se determinaron mediante los ensayos de pérdida de peso por calcinación (PPC) y variación volumétrica permanente (VVP), calculadas a partir de las variaciones de masa y dimensiones de las probetas antes y después de la sinterización, así como mediante la determinación de la porosidad aparente y absorción de agua, de acuerdo con la norma ASTM C20-00.

El comportamiento mecánico se evaluó mediante ensayos de módulo de rotura por flexión, conforme a la norma IRAM 11827, y resistencia a la compresión, de acuerdo con la norma IRAM 12586. El desempeño ambiental se analizó mediante ensayos de lixiviación para determinar la inmovilización de Cu(II), Zn(II) y Ni(II) en la matriz cerámica y ensayos de ecotoxicidad utilizando ryegrass como especie indicadora, usando de base la norma IRAM 29114, con el objetivo de verificar la ausencia de efectos tóxicos asociados a los materiales obtenidos.

Resultados

Con el objetivo de evaluar la viabilidad de incorporar biomasa contaminada en la fabricación de ladrillos cerámicos, los resultados se organizaron en tres secciones: caracterización física, evaluación mecánica y desempeño ambiental. En esta primera instancia se presentan, resumidas en la Tabla 1, las propiedades físicas de las distintas formulaciones elaboradas.

Muestra	PPC [%]	VVP [%]	Porosidad [%]	Absorción [%]
A	5,4	-13,1	26,6	14,0
CM	7,2	-14,2	30,9	17,5
CMCu	7,2	-13,0	28,4	15,4
CMZn	7,2	-13,6	29,1	16,2
CMNi	7,1	-12,8	28,7	15,5

Tabla 1. Propiedades físicas de los materiales cerámicos obtenidos

La incorporación de un 10% en volumen de cáscaras de maní produjo un incremento de la porosidad aparente y de la absorción de agua respecto a la muestra de referencia (A). Este comportamiento se atribuye a la degradación térmica de la biomasa durante la cocción, que genera una red de poros en el interior de la matriz cerámica, en concordancia con lo informado para residuos agroindustriales utilizados como agentes formadores de poros (Salleh et al., 2021). Las formulaciones elaboradas con cáscaras de maní previamente utilizadas como biosorbentes de Cu(II), Zn(II) y Ni(II) presentaron valores de porosidad aparente entre 28,4 y 29,1% y absorciones de agua entre 15,4 y 16,2%, similares a los obtenidos para la muestra con cáscaras de maní sin contaminar (CM). Estos resultados indican que la presencia de los metales adsorbidos no modificó significativamente el comportamiento de la biomasa como agente formador de poros ni el desarrollo de la microestructura durante la sinterización.

En cuanto a la pérdida de peso por calcinación (PPC), las formulaciones con incorporación de biomasa presentaron valores cercanos al 7%, superiores a los registrados para la arcilla de referencia, como consecuencia de la combustión de la materia orgánica presente en las cáscaras de maní. Asimismo, la variación volumétrica permanente (VVP) mostró que las contracciones sufridas varían entre 12,8 y 14,2%, sin diferencias relevantes entre las formulaciones con biomasa contaminada y la biomasa sin contaminar, evidenciando que la incorporación de los metales adsorbidos no afectó de manera apreciable la estabilidad dimensional del material durante el proceso de sinterización.

El comportamiento mecánico de las matrices cerámicas obtenidas se evaluó mediante ensayos de resistencia a la compresión y módulo de rotura por flexión. En la Figura 1 se presentan los valores obtenidos para las distintas formulaciones elaboradas.

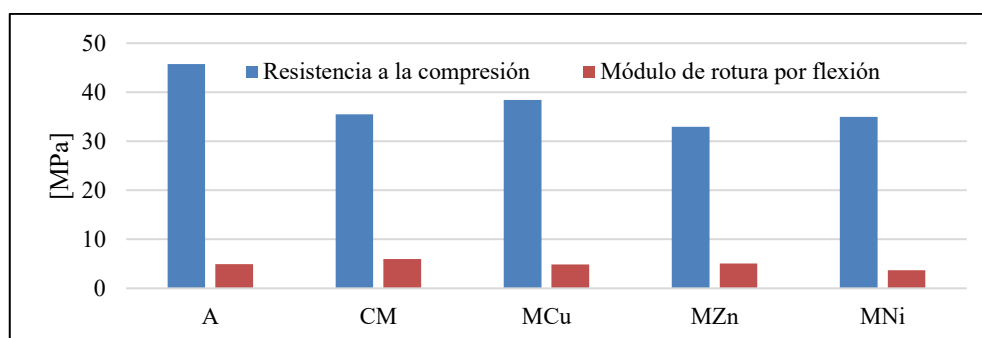


Figura 1. Propiedades mecánicas de los materiales cerámicos obtenidos

La incorporación de cáscaras de maní produjo una disminución de la resistencia a la compresión respecto a la muestra de referencia (A), comportamiento consistente con el incremento de la porosidad generado durante la sinterización. La muestra de arcilla presentó una resistencia de 45,8 MPa, mientras que las formulaciones con biomasa registraron valores comprendidos entre 32,9 y 38,4 MPa. Asimismo, las diferencias de resistencia entre las formulaciones con biomasa acompañan las variaciones de porosidad determinadas, observándose que las muestras con menor porosidad presentaron las mayores resistencias a la compresión. En todos los casos, los valores obtenidos superaron los requisitos establecidos por la norma ASTM C62 para unidades de albañilería sólida de arcilla, demostrando que la incorporación de biomasa contaminada no compromete la aptitud estructural de los materiales desarrollados.

En cuanto al módulo de rotura por flexión, los valores obtenidos oscilaron entre 3,7 y 6,0 MPa, sin observarse una tendencia definida asociada a la incorporación de biomasa contaminada. En conjunto, estos resultados indican que la presencia de Cu(II), Zn(II) y Ni(II) adsorbidos sobre las cáscaras de maní no produjo modificaciones significativas en esta propiedad de los ladrillos respecto a la incorporación de biomasa sin contaminar.

El desempeño ambiental fue evaluado mediante ensayos de lixiviación y de ecotoxicidad. El análisis de lixiviados se utilizó para determinar la capacidad de inmovilización de los metales, comparando la movilidad de los iones Cu(II), Zn(II) y Ni(II) antes y después de su incorporación en la matriz cerámica. Los lixiviados obtenidos a partir de las cáscaras de maní utilizadas como biosorbente evidenciaron la presencia de los metales previamente adsorbidos, mientras que en los ladrillos cerámicos elaborados con dichas biomazas se observó una marcada disminución de su liberación, con concentraciones inferiores al límite de cuantificación del método utilizado para Cu(II) y Ni(II), y muy bajas para Zn(II). Estos resultados, resumidos en la Tabla 2, indican una elevada eficiencia del proceso de sinterización para inmovilizar los metales retenidos por la biomasa dentro de la matriz cerámica.

Iones metálicos	Biomasa [mg/L]	Ladrillo [mg/L]	Reducción [%]
Cu(II)	182,1	<0,005	>99,99
Zn(II)	22,1	0,3	98,50
Ni(II)	21,8	<0,05	>99,8

Tabla 2. Concentración de metales en los lixiviados de la biomasa y de los ladrillos cerámicos obtenidos

La marcada reducción de la concentración de metales en los lixiviados evidencia que la incorporación de biomasa contaminada en matrices cerámicas constituye una estrategia efectiva para disminuir la movilidad de los contaminantes retenidos durante el proceso de biosorción. Durante la etapa de sinterización, la combustión de la fracción orgánica de la biomasa y la consolidación de la matriz cerámica favorecen el encapsulamiento de los elementos metálicos, limitando su liberación posterior al medio. Este comportamiento ha sido reportado previamente para biosorbentes agotados incorporados en materiales cerámicos, donde el proceso térmico permitió obtener productos estables con elevada capacidad de inmovilización de metales (Simón et al., 2023).

Los ensayos de ecotoxicidad permitieron evaluar la disponibilidad biológica de los metales presentes en la biomasa antes y después de su incorporación en la matriz cerámica. La Figura 2 presenta el porcentaje de inhibición de la elongación radicular (% IR) de ryegrass obtenido para los elutriados de las cáscaras de maní contaminadas y de los ladrillos cerámicos elaborados con dichas biomazas.

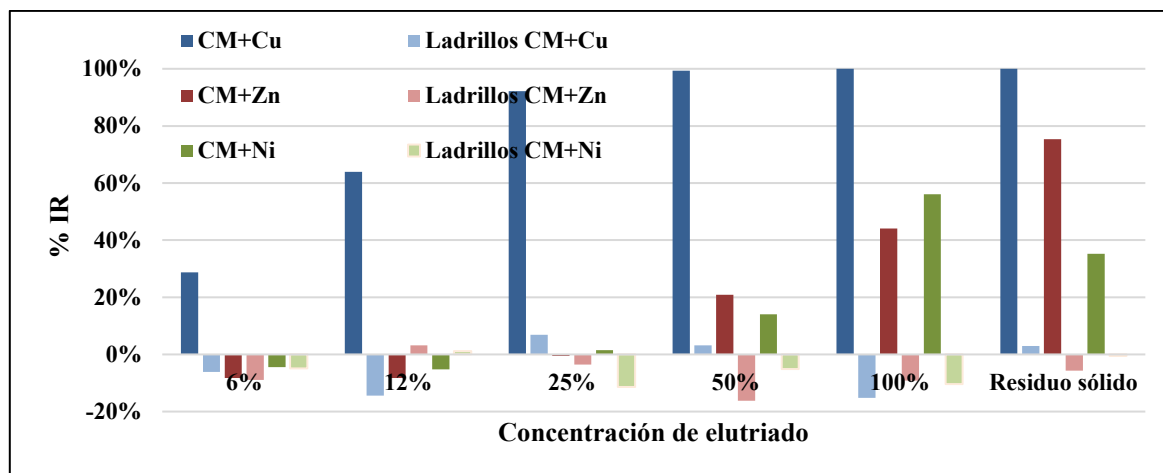


Figura 2. Resultados de ecotoxicidad de las biomazas contaminadas y de los ladrillos cerámicos obtenidos

Las cáscaras de maní utilizadas como biosorbentes presentaron un efecto inhibitorio dependiente de la concentración del elutriado, particularmente en el caso de Cu(II), donde se alcanzó una inhibición cercana al 100% en las mayores concentraciones evaluadas. Asimismo, las biomazas contaminadas con Zn(II) y Ni(II) mostraron un incremento de la inhibición con el aumento de la concentración del extracto, evidenciando la biodisponibilidad de los metales retenidos por el biosorbente y su impacto negativo.

En contraste, los elutriados obtenidos a partir de los ladrillos cerámicos con biomasa inmovilizada presentaron valores de inhibición cercanos a cero para todas las concentraciones evaluadas, sin diferencias significativas respecto al control. Estos resultados demuestran que el proceso de sinterización reduce la disponibilidad de los metales adsorbidos, complementando los resultados obtenidos mediante los ensayos de lixiviación y confirmando la capacidad de la matriz cerámica para estabilizar los metales contenidos en la biomasa contaminada.

Conclusiones

La incorporación de un 10% de cáscaras de maní, tanto sin contaminar como previamente utilizadas como biosorbentes de Cu(II), Zn(II) y Ni(II), modificó las propiedades físicas de las matrices cerámicas, incrementando la porosidad y la absorción de agua respecto al ladrillo elaborado como referencia sólo con arcilla. La presencia de los metales adsorbidos no produjo modificaciones significativas en el comportamiento físico de los materiales, manteniéndose el efecto formador de poros asociado a la biomasa.

Desde el punto de vista mecánico, la incorporación de biomasa produjo una disminución de la resistencia a la compresión respecto a la muestra de arcilla pura, comportamiento asociado al aumento de la porosidad generado durante la cocción. Sin embargo, todas las formulaciones presentaron valores adecuados de resistencia mecánica, demostrando que la incorporación de biomasa contaminada no compromete la aptitud tecnológica de los ladrillos cerámicos obtenidos.

Los ensayos ambientales evidenciaron la elevada eficiencia del proceso de sinterización para inmovilizar los metales retenidos por la biomasa. La marcada reducción de Cu(II), Zn(II) y Ni(II) en los lixiviados, junto con la ausencia de efectos ecotoxicológicos significativos en los ladrillos obtenidos, demuestra que la incorporación de biosorbentes agotados en matrices cerámicas constituye una alternativa viable para la valorización de residuos agroindustriales y la disposición segura de biomasa contaminada.

Utilización de IA generativa / herramientas IA

Declaro la utilización de la herramienta IA Chat GPT para su uso en control y revisión ortográfica de la redacción tanto en español como en inglés. Confirmando que luego de la utilización, los contenidos obtenidos fueron revisados, constatados y editados, asumiendo plena responsabilidad por el contenido presentado en el presente trabajo.

Referencias

Ahmaruzzaman, M. (2011). *Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals*. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166(1–2), 36–59.

<https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.04.005>

ASTM C20-00 (2020). ASTM International. *Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water*.

Imran-Shaukat, M., Wahi, R. y Ngaini, Z. (2022). *The application of agricultural wastes for heavy metals adsorption: A meta-analysis of recent studies*. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100902.

<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100902>

IRAM 11827 (1996). Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). *Cerámicos para revestimientos de pisos y paredes. Determinación de la resistencia a la flexión*.

IRAM 12586 (2004). Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). *Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros. Método de ensayo de resistencia a la compresión*.

IRAM 29114 (2008). Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). *Método de ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga (Lactuca sativa L.)*.

Mathew, S., Soans, J. C., Rachitha, R., Shilpalekha, M. S., Gowda, S. G. S., Juvvi, P. y Chakka, A. K. (2023). *Green technology approach for heavy metal adsorption by agricultural and food industry solid wastes as bio-adsorbents: a review*. *Journal of Food Science and Technology*, 60, 1923–1932. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05486-1>

Salleh, S. Z., Awang Kechik, A., Yusoff, A. H., Taib, M. A. A., Mohamad Nor, M., Mohamad, M., Tan, T. G., Ali, A., Masri, M. N., Mohamed, J. J., Zakaria, S. K., Boon, J. G., Budiman, F. y Teo, P. T. (2021). *Recycling food, agricultural, and industrial wastes as pore-forming agents for sustainable porous ceramic production: A review*. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127264>

Simón, D., Gass, S., Quaranta, N., y Cristóbal, A. (2023) *Production of fired clay bricks as a safe removal method for spent adsorbents from sunflower and corn residues*. *Journal of Cleaner Production*, 426, 139138.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139138>

Syeda, H. I., Sultan, I., Razavi, K. S. y Yap, P.-S. (2022). *Biosorption of heavy metals from aqueous solution by various chemically modified agricultural wastes: A review*. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102446.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102446>