

Obtención de sílice amorfa a partir de cascarilla de arroz colombiana: demostración en proceso escalado

Amorphous silica production from Colombian rice husk: demonstration in scaled-up process Products

Santiago Mesa¹   Daniela Jaramillo¹  Laura C. Uran¹  Carlos Andrés Vélez² 

¹Grupo Catalizadores y Adsorbentes, Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas, Medellín, Colombia.

²Unidad Técnica y de Innovación, Silicatos para la Industria SPIN S.A.S, Sabaneta, Colombia.

Resumen

Introducción: la agroindustria produce grandes cantidades de desechos, lo que genera retos ambientales, de salud y económicos. Entre estos, la cascarilla de arroz, un residuo de la industria alimentaria, se destaca por su potencial como fuente de silicio. Gracias a su contenido de silicio, la cascarilla de arroz ofrece una oportunidad única para la producción de energía sostenible y la obtención de productos de alto valor agregado, como el óxido de silicio amorfo (SiO₂). Sin embargo, la optimización de los procesos para su conversión eficiente sigue siendo un desafío..

Objetivo: optimizar la concentración de ácido nítrico para el pretratamiento de la cascarilla de arroz colombiana, con el fin de producir SiO₂ amorfo de alta pureza, y demostrar la viabilidad de este proceso a escala mayor.

Métodos: se desarrolló un proceso en dos etapas que incluyó el tratamiento de la cascarilla de arroz con ácido nítrico, seguido de una calcinación a 620 °C. La concentración de ácido nítrico se optimizó para obtener la mayor pureza de SiO₂. La caracterización del material se realizó mediante análisis termogravimétrico (TGA), difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos X (XRF) y adsorción-desorción de nitrógeno. Para evaluar la escalabilidad del proceso, se replicó el tratamiento en una escala mayor utilizando la concentración óptima de ácido.

Resultados: el proceso optimizado utilizando una concentración de ácido nítrico de 0.2 M produjo un SiO₂ amorfo con una pureza del 94.9 % y un área superficial de 298 m²/g. Al escalar el proceso, se logró un SiO₂ con una pureza de 95.5 %, confirmando la viabilidad de la metodología para aplicaciones industriales.

Conclusiones: el tratamiento de cascarilla de arroz con ácido nítrico, seguido de calcinación, demuestra ser un enfoque efectivo y escalable para la obtención de SiO₂ amorfo de alta pureza. Este proceso no solo tiene aplicaciones industriales potenciales, sino que también proporciona una solución sostenible para la valorización de los desechos agroindustriales, contribuyendo a la economía circular.

Palabras clave: óxido de silicio, cascarilla de arroz, caracterización de materiales, proceso de escalamiento.

¿Cómo citar?

Mesa, S., Jaramillo, D., Uran, L.C., Vélez, C.A. Obtención de sílice amorfa a partir de cascarilla de arroz colombiana: demostración en proceso escalado. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(3)e-21514396

<https://doi.org/10.25100/iyc.v26i3.14396>

Recibido: 26-08-24

Evaluado: 09-09-24

Aceptado: 30-09-24

Online: 08-11-24

Correspondencia

santiago.mesa@udea.edu.co



Abstract

Introduction: the agroindustry generates significant waste, posing environmental, health, and economic challenges. Among these, rice husk, a byproduct of the food industry, stands out due to its potential as a source of silicon. Due to its silicon content, rice husk offers a unique opportunity for sustainable energy production and the extraction of high-value products, such as amorphous silicon dioxide (SiO₂). However, optimizing processes for its efficient conversion remains a challenge.

Objective: the aim of this study was to optimize the nitric acid concentration for the pretreatment of Colombian rice husk in order to produce high-purity amorphous SiO₂ and demonstrate the feasibility of scaling up the process.

Methods: a two-stage process was developed, which involved treating rice husk with nitric acid, followed by calcination at 620 °C. The nitric acid concentration was optimized to achieve the highest SiO₂ purity. Material characterization was performed using thermogravimetric analysis (TGA), X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), and nitrogen adsorption-desorption. To assess the scalability of the process, the treatment was replicated on a larger scale using the optimized acid concentration.

Results: the optimized process using a nitric acid concentration of 0.2 M yielded amorphous SiO₂ with a purity of 94.9% and a surface area of 298 m²/g. When scaled up, the process achieved SiO₂ with a purity of 95.5%, confirming the feasibility of the methodology for industrial applications.

Conclusions: the treatment of rice husk with nitric acid followed by calcination proves to be an effective and scalable approach for producing high-purity amorphous SiO₂. This process not only holds potential for industrial applications but also provides a sustainable solution for valorizing agroindustrial waste, contributing to the circular economy.

Keywords: silicon oxide, Rice husk, Materials characterization, Upscaling process.

¿Por qué se realizó?

Este trabajo se realizó porque estábamos explorando las posibilidades de obtener productos de valor agregado a partir de la cascarilla de arroz. Entre las posibilidades estaba la ruta para obtener materiales carbonosos mediante pirólisis, o materiales ricos en silicio mediante un proceso termoquímico. Decidimos probar la segunda ruta para obtener óxido de silicio amorfo. Siguiendo esta ruta, ampliamos el proceso utilizando ácido nítrico, que está disponible comercialmente en el contexto colombiano.

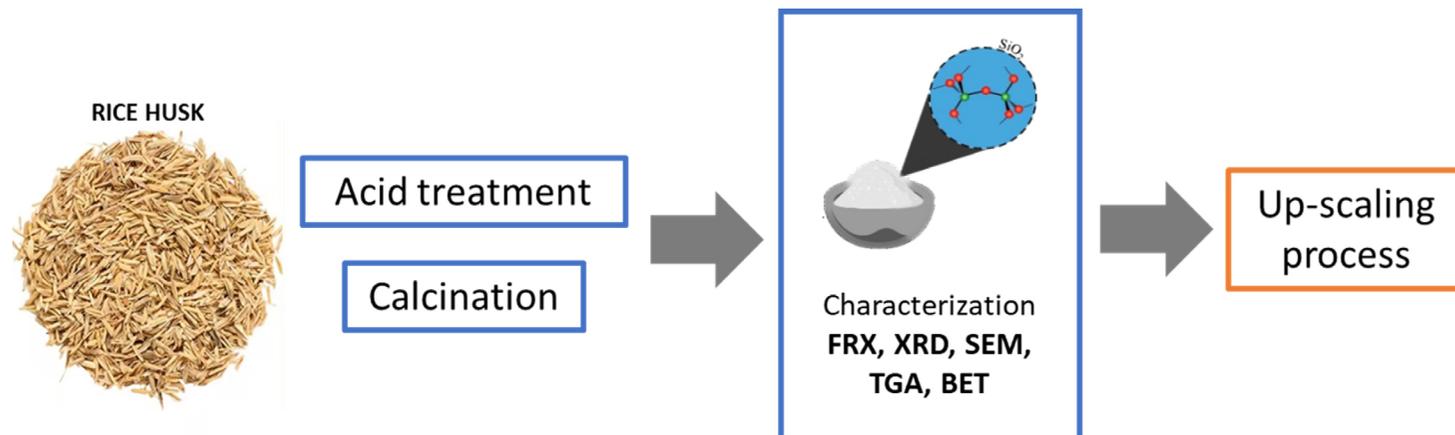
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Obtuvimos silicio amorfo con una pureza >95% mediante un proceso termoquímico. En este proceso, encontramos que usar una concentración de ácido nítrico tan baja como 0,2M era suficiente para alcanzar esa pureza. Además, el proceso de ampliación se implementó con éxito procesando 2 kg de cascarilla de arroz, lo que llevó a un silicio amorfo de >95% y un área superficial >290 m²/g

¿Qué proporcionan estos resultados?

Los resultados de este estudio demuestran la viabilidad de utilizar cáscaras de arroz para producir óxido de silicio amorfo de alta pureza mediante un proceso termoquímico con ácido nítrico. El logro de una pureza superior al 95 % a una concentración baja de 0,2 M indica tanto eficiencia como rentabilidad. El éxito del proceso de ampliación para procesar 2 kg de cáscaras de arroz valida su aplicabilidad industrial. Además, el material resultante cuenta con una gran superficie de más de 290 m²/g, lo que aumenta su potencial para diversas aplicaciones. En general, esta investigación destaca la valorización sostenible de las cáscaras de arroz como un recurso valioso.

Graphical Abstract



Introducción

La agroindustria, la integración de la agricultura y la industria para la producción de alimentos o materias primas, genera importantes residuos que causan desafíos ambientales, sanitarios y económicos. Los problemas incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero, el cambio climático, la contaminación de las fuentes de agua y las enfermedades respiratorias causadas por la contaminación del aire. Sin embargo, estos residuos de biomasa tienen un potencial sin explotar para la producción de energía o productos de valor añadido (1) y el interés reciente se ha centrado en el desarrollo de tecnologías para su valorización biológica, química o térmica, ofreciendo materias primas de bajo costo y fácilmente disponibles (2). Esta utilización es crucial para hacer que la actividad industrial sea más sostenible.

En este contexto, el arroz es un alimento básico producido en todo el mundo, que produce cáscara de arroz como subproducto, que constituye el 20 % del producto total y contiene silicio en forma de valiosa sílice (SiO_2) (3). Con una producción mundial de arroz que supera los 500 millones de toneladas anuales (4), la abundancia de cáscara de arroz presenta una atractiva oportunidad para la producción sostenible de materiales o compuestos a base de silicio. Desde la década de 1980, se han explorado varias aplicaciones, incluida la fabricación de cemento y caucho, la extrusión de polímeros con fibras naturales, la producción de materiales aislantes y el uso de cáscaras de arroz como combustible para secar arroz y obtener energía para otros fines (5).

Estudios recientes han propuesto métodos sostenibles para la producción de óxido de silicio (SiO_2) respetuosos con el medio ambiente, ganando importancia tanto en aplicaciones científicas como industriales (6, 7). Los tratamientos químicos, que a menudo implican pretratamientos en medios básicos y ácidos, se emplean con frecuencia para recuperar el SiO_2 de las cáscaras de arroz. Estos pretratamientos suelen eliminar las impurezas y disolver los elementos no deseados de las cáscaras. A continuación, mediante la calcinación en atmósferas oxidantes a temperaturas entre 500 y 900 °C, se elimina la materia orgánica dando lugar a una sílice de alta pureza con una estructura amorfa o cristalina en función de la temperatura de calcinación (8, 9). Este método

exhibe un resultado bien establecido, lo que hace que las cáscaras de arroz sean una fuente alternativa viable para aplicaciones industriales de óxido de silicio. A pesar de que existe un método bien establecido para obtener óxido de silicio a partir de la cáscara de arroz, el uso de algunos ácidos fuertes (es decir, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico) está restringido en muchos países. Por lo tanto, para una posible ampliación del proceso es necesario utilizar un ácido altamente disponible comercialmente, como el ácido nítrico.

En este trabajo se implementó una metodología sencilla para la obtención de óxido de silicio amorfo utilizando como fuente la cáscara de arroz colombiana. Mediante el uso de la metodología propuesta, se optimizó la concentración de ácido nítrico comercial de alta disponibilidad para el pretratamiento de la cascarilla de arroz y se caracterizaron los materiales obtenidos después de la calcinación. Se encontró que una concentración de ácido de 0,2 M era suficiente para alcanzar un contenido optimizado de óxido de silicio. Así, se llevó a cabo un proceso de escalado para tratar 2 kg de cáscara de arroz para producir un óxido de silicio amorfo con una pureza del 95,5 % y 298 m²/g de superficie superficial.

Metodología

Para el proceso se utilizó cáscara de arroz (comprada en una tienda agrícola local), ácido nítrico (50% p/p) y agua desionizada. Para producir los óxidos de silicio amorfos, las cáscaras de arroz se lavaron utilizando diferentes soluciones de ácido nítrico (0,2 M, 0,5 M, 1,0 y 2,0 M) durante dos horas empleando un agitador magnético. Para todos los experimentos se utilizaron 25 mL de solución ácida por gramo de cascarilla de arroz. Posteriormente, las cáscaras tratadas se recuperaron por filtración y se lavaron con agua desionizada hasta obtener un pH neutro. Finalmente, las cáscaras lavadas se calcinaron con una mufla, a una rampa de calentamiento de 10 °/min hasta 620 °C, durante tres horas. La figura 1 muestra el proceso para obtener óxido de silicio amorfo.

La cáscara de arroz se caracterizó mediante análisis termogravimétricos (TGA) utilizando un equipo TGA 5500 de TA Instruments. El SiO₂ amorfo obtenido se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) a través el uso de un equipo JEOL JSM 6490 LV. Los análisis de rayos X de fluorescencia (FRX) se llevaron a cabo utilizando un equipo de longitud de onda dispersiva de PANalytical reference Zetium 4kW. Las mediciones de difracción de rayos X (DRX) se realizaron utilizando un XPert PANalytical Empyrean Serie II. Finalmente, se determinó el área superficial de los materiales mediante isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno utilizando Micromeritics, instrumento ASAP 2020 PLUS.

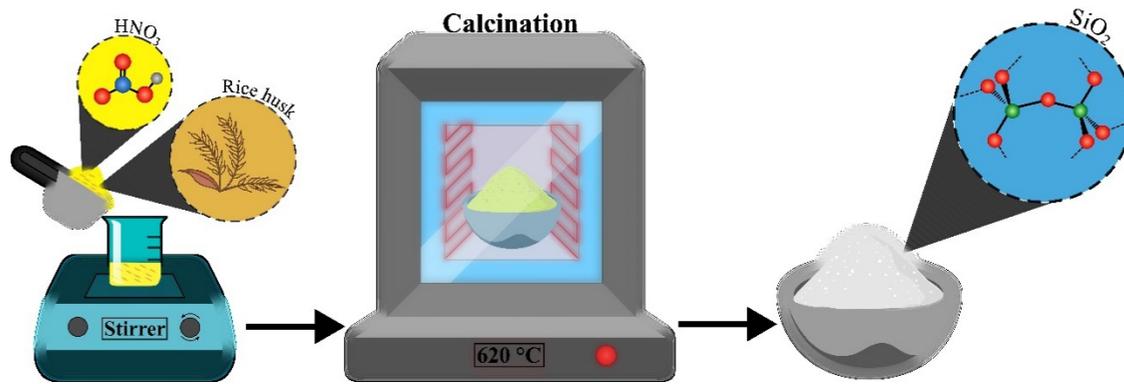


Figura 1. Representación esquemática de la metodología propuesta para el tratamiento de la cascarilla de arroz.

Con base en los resultados obtenidos a escala de laboratorio, se llevó a cabo un procedimiento de escalado empleando un mezclador de 80 litros de capacidad. En el proceso se emplearon 2 kg de cáscara de arroz y 50 L de solución acuosa de HNO_3 a 0,2 M. La mezcla se agitó con una batidora industrial en un tiempo determinado. La cascarilla de arroz tratada se recuperó por filtración y se lavó con agua hasta obtener un pH neutro. Finalmente, la cáscara obtenida se calcinó para obtener el óxido de silicio amorfo.

Resultados y discusión

Con el fin de evaluar el efecto de la concentración de ácido nítrico (HNO_3) utilizada para lavar la cáscara, se realizaron análisis termogravimétricos para determinar la cantidad de cenizas en cada uno de los materiales. La Figura 2 muestra los análisis de TGA de las cáscaras de arroz después de cada tratamiento con ácido. Se puede observar que el perfil de descomposición de los materiales no cambia significativamente después del tratamiento. En términos generales, se encontró que una tendencia creciente en el contenido de cenizas al aumentar la concentración del tratamiento ácido. Así, para un tratamiento ácido de 2.0 M se encontró un porcentaje final de 16.5 % mientras que para un tratamiento ácido de 0.2 M el porcentaje de peso final fue de 14.4 %. Esto se puede atribuir a la heterogeneidad inherente de la materia orgánica y a la eliminación de impurezas con el tratamiento ácido, lo que resulta en un ligero aumento en el porcentaje final de cenizas obtenidas.

Por otro lado, los perfiles térmicos mostraron una primera pérdida de peso en el rango de 25 – 100 °C que corresponde a la pérdida de humedad. La pérdida de peso posterior entre 240 y 343 °C está relacionada con la descomposición de la celulosa y la hemicelulosa presentes en las cáscaras. Luego, se observa una tercera zona entre 360 y 620 °C y se atribuye a la descomposición de la lignina y a la formación final de cenizas (10). La última descomposición térmica (360 – 620 °C) de la cáscara de arroz ácida no tratada difiere de las tratadas. Por lo tanto, la descomposición térmica se produce rápidamente para la cáscara de arroz no tratada. En este sentido, el tratamiento ácido elimina principalmente la hemicelulosa (11) más que la lignina, por lo que las muestras tratadas contienen más lignina en comparación con la muestra bruta. Por lo tanto, la mayor estabilidad térmica de las muestras tratadas podría atribuirse a un mayor porcentaje de lignina.

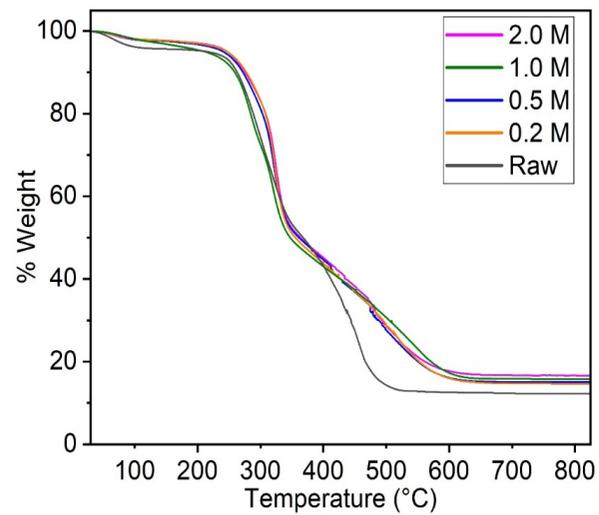


Figura 2. Perfiles de TGA obtenidos para las cáscaras de arroz

Con el fin de confirmar el carácter amorfo de la sílice obtenida, se realizaron análisis de difracción de rayos X (Figura 3) para la muestra no tratada, la muestra tratada de 0,2 M y la tratada con la condición severa (2,0 M). Los resultados de la DRX muestran que los materiales obtenidos presentan una estructura cristalina amorfa correspondiente al SiO_2 . Además, no existe relación entre el ordenamiento de la estructura y la concentración de HNO_3 utilizada para el tratamiento, lo cual es consistente con los hallazgos de otros autores (12, 13, 14).

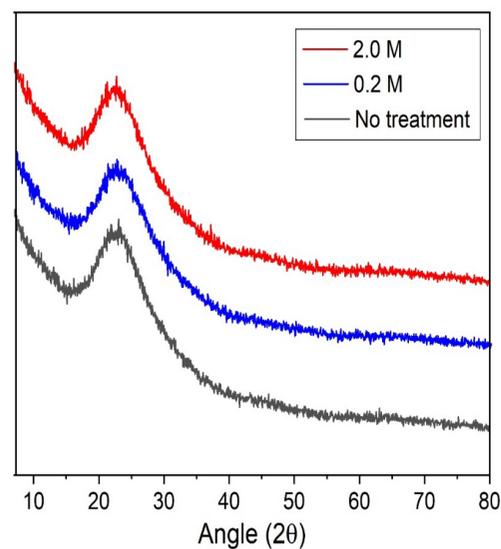


Figura 3. Patrones XRD de la sílice obtenida.

Del mismo modo, el contenido de SiO_2 se determinó mediante XRF como se muestra en la Figura 4. El contenido de SiO_2 varía de 90,0 a 94,9 % dentro de las muestras, como se muestra en la Figura 4A. En términos generales, el uso de un tratamiento ácido previo a la calcinación de la cáscara de arroz resulta en un aumento del contenido de SiO_2 debido al efecto de lixiviación que el ácido tiene sobre otros óxidos metálicos (Figura 4B) (15, 16).

Se encontró que no hay un aumento significativo del contenido de SiO_2 al aumentar la concentración de ácido nítrico más allá de 0,2 M. En este sentido, el contenido de SiO_2 en la muestra tratada con 0,2 M fue de 94,7 %, mientras que la tratada con 2,0 M fue de 94,9 %. En este contexto, se puede encontrar que la concentración de soluciones ácidas (es decir, HCl , HNO_3 y H_2SO_4) para el tratamiento de la cáscara de arroz varía entre 0,01 M y 3,0 M dependiendo del tipo de cáscara de arroz y del pretratamiento previo a la calcinación (17, 18, 19). Este amplio rango encontrado para las concentraciones de ácido se debe principalmente a la presencia de óxidos de potasio, magnesio y calcio en la cáscara de arroz derivados del tipo de fertilizante y suelo utilizado en las plantaciones de arroz (20, 21). Para el caso de la cáscara de arroz colombiana, el fertilizante más común utilizado es el KCl (22), por lo que este es el compuesto principal que debe eliminarse de la cáscara de arroz. Esto concuerda con el gran contenido de potasio que se encuentra en las cenizas no tratadas, como se muestra en la Figura 4B.

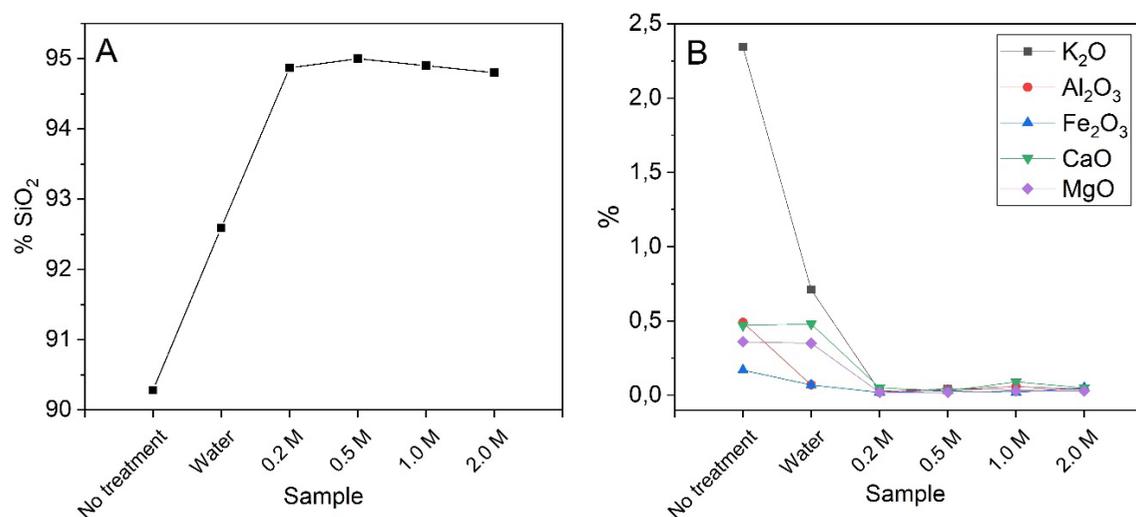


Figura 4. XRF da como resultado términos de contenido de silicio (A) y otros óxidos metálicos (B).

Por otro lado, la superficie de los materiales se obtuvo por adsorción-desorción de nitrógeno. Los resultados se muestran en la Figura 5A. En consecuencia, se obtuvo una superficie de 81 m^2/g para la muestra sin ningún tratamiento, mientras que para las cenizas tratadas los valores variaron de 299 a 338 m^2/g , dependiendo de la concentración de HNO_3 utilizada para el pretratamiento. Se observó que el tratamiento ácido tuvo una gran influencia en la superficie de los materiales obtenidos. Esto se correlaciona con la presencia de potasio en las muestras. Como se mencionó anteriormente, la cáscara contiene una cantidad sustancial de potasio, que puede disociarse a bajas temperaturas para producir potasio elemental. Este proceso provoca la

fusión de la superficie, lo que resulta en el atrapamiento de carbono dentro de la masa fundida. Como resultado, se elimina el contacto directo con el aire, evitando la oxidación durante la calcinación posterior. Por lo tanto, el alto contenido de K_2O en la muestra de cáscara de arroz sin tratar promueve la formación de partículas sinterizadas y dificulta la creación de una estructura altamente porosa (23, 24). Además, la formación de una estructura porosa debido a la calcinación promovió la alta área superficial como se muestra en los análisis SEM (Figura 5B).

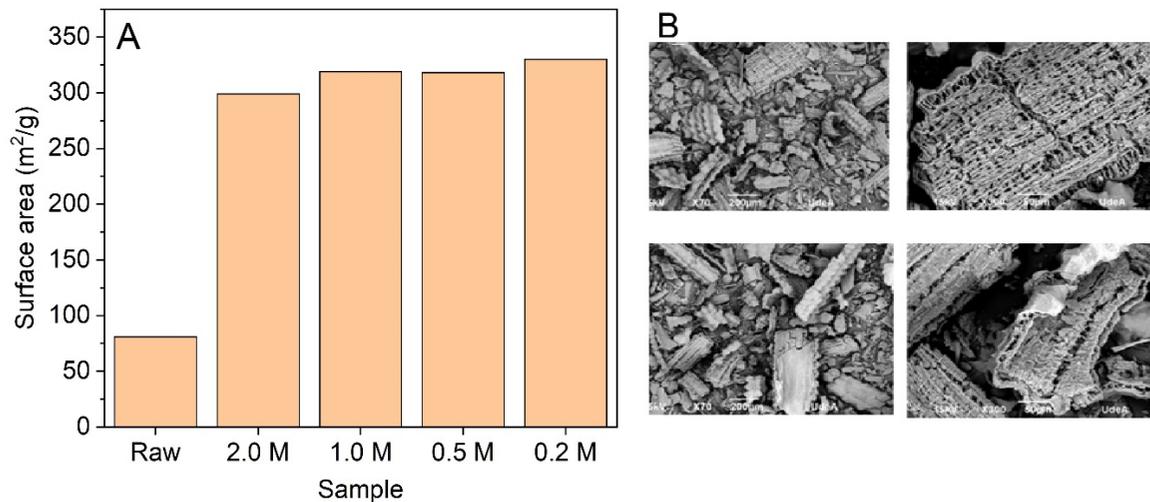


Figura 5. Superficies BET de las muestras (A) e imágenes SEM de las cenizas obtenidas (B)

Teniendo en cuenta los resultados presentados anteriormente se realizó un proceso de escalamiento. Para ello se utilizó un mezclador de 80 litros de capacidad para procesar 2 kg de cascarilla de arroz utilizando una solución 0,2 M HNO_3 , como se muestra en la Figura 6A. Para evaluar el efecto del tiempo de procesamiento en el contenido de silicio, se tomó una muestra del tanque cada 2 horas, se calcinó más y se analizó utilizando FRX. Los resultados se muestran en la Figura 6B. A un tiempo de procesamiento de 2 horas se encontró un contenido de 95,5 % de SiO_2 dentro de la muestra. Por el contrario, a las 6 horas de procesamiento, el contenido de SiO_2 alcanza el 95,9%. Por lo tanto, no hay una influencia importante del tiempo de procesamiento en el contenido de SiO_2 después de dos horas de tratamiento. Además, se encontró un ligero aumento en el contenido de SiO_2 en las cenizas utilizando el proceso de escalado (95,5 %), en comparación con el obtenido en el laboratorio (94,9 %). Esto se debe probablemente al alto torque y resistencia del agitador utilizado en el tanque (Figura 6A) que permite la ruptura de las cáscaras y mejora la penetración del ácido. Además, se encontró que se obtuvo un óxido de silicio amorfo (Figura 6C) con una superficie de 280 m²/g.

Estos resultados demuestran que el proceso termoquímico propuesto para la obtención de sílice amorfa a partir de cascarilla de arroz colombiano es factible utilizando ácido nítrico de 0,2 M, lo que le otorga un potencial para un proceso escalable.

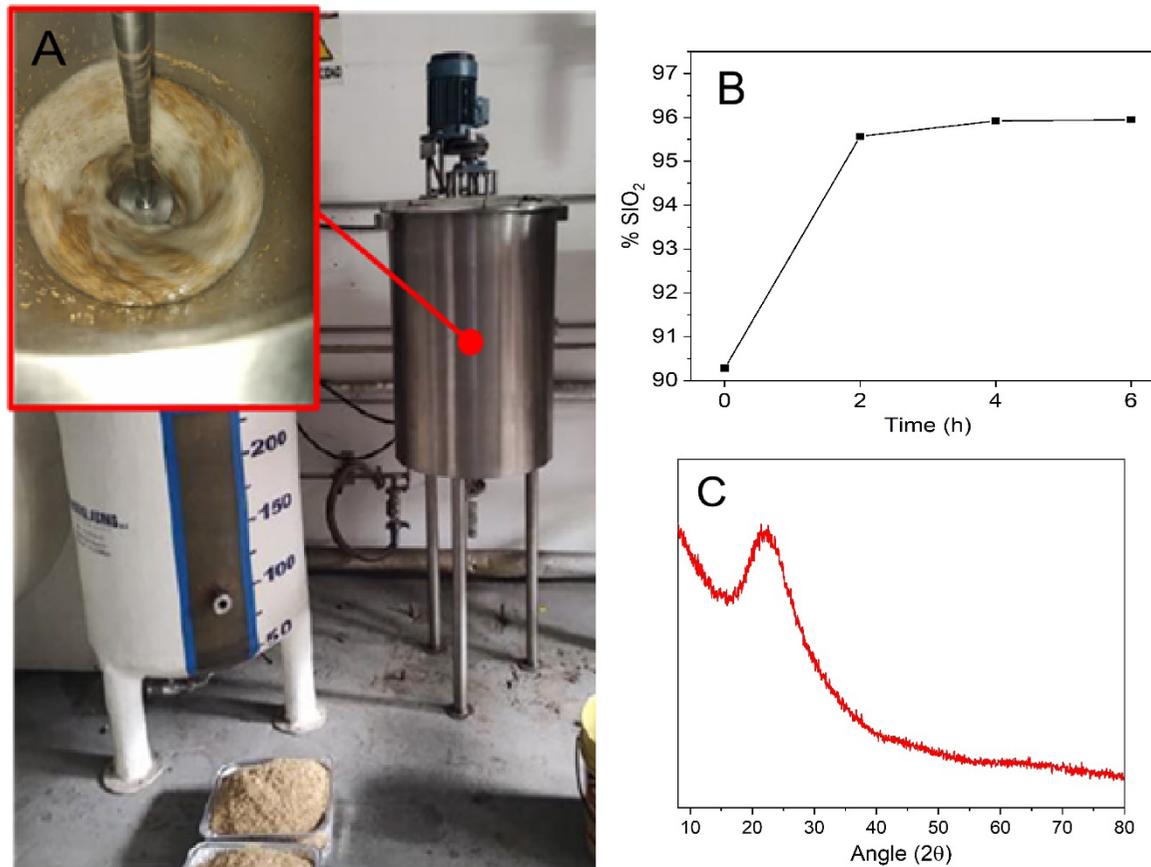


Figura 6. Proceso de escalado para la obtención de óxido de silicio (A), contenido de óxido de silicio de los materiales resultantes (B), patrón XRD del material obtenido (C).

Conclusiones

Este estudio evaluó los efectos de las diferentes concentraciones de HNO₃ utilizadas para lavar la cáscara de arroz sobre las propiedades térmicas y estructurales de los materiales resultantes. El análisis de TGA mostró que el aumento de la concentración de ácido nítrico condujo a un mayor contenido de cenizas, revelando la eliminación de impurezas y un ligero aumento en el porcentaje final de cenizas obtenidas.

El análisis de DRX confirmó que la sílice obtenida de las muestras de cáscara de arroz tratadas y no tratadas exhibió una estructura cristalina amorfa, sin relación significativa entre el grado de ordenamiento y la concentración de HNO₃ utilizada. El análisis XRF demostró que el contenido de SiO₂ varió entre 90,0 % y 94,9 %, sin un aumento significativo más allá de una concentración de HNO₃ de 0,2 M. El tratamiento ácido aumentó efectivamente el contenido de SiO₂ mediante la lixiviación de otros óxidos metálicos, lo que destaca el potencial de optimización de la concentración para obtener la máxima eficiencia.

Los resultados de la adsorción-desorción de nitrógeno indicaron que la superficie de los óxidos de silicio obtenidos aumentó significativamente con el tratamiento ácido, oscilando entre 299 y 338 m²/g, en comparación con los 81 m²/g de las muestras no tratadas. Este aumento se atribuye a la reducción de la sinterización inducida por el potasio y a la formación de una estructura porosa durante la calcinación, como confirman los análisis SEM.

Se implementó con éxito un proceso de escalado utilizando un mezclador de 80 litros de capacidad y HNO₃ de 0,2 M, lo que demostró que un tiempo de procesamiento de 2 horas era suficiente para lograr un contenido óptimo de SiO₂. El proceso escalado produjo sílice amorfa con un contenido de SiO₂ ligeramente superior (95,5 %) y una superficie de 280 m²/g, lo que valida la viabilidad y escalabilidad del proceso termoquímico.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de este trabajo a través del proyecto 82347 financiado por la convocatoria 890-2020 de Minciencias.

Declaración de contribución de autoría de CRediT

Conceptualización – Ideas: Daniela Jaramillo, Santiago Mesa; **Curación de datos:** Santiago Mesa Espinal; **Análisis formal:** Santiago Mesa, Daniela Jaramillo, Laura C. Urán. **Adquisición de financiación:** Santiago Mesa. **Investigación:** Santiago Mesa, Daniela Jaramillo, Carlos Vélez. **Metodología:** Daniela Jaramillo. **Administración de proyectos:** Santiago Mesa, Laura Urán. **Recursos:** Santiago Mesa. **Supervisión:** Laura Urán, Carlos Vélez. **Validación:** Santiago Mesa. **Visualización – Preparación:** Santiago Mesa, Daniela Jaramillo. **Redacción – borrador original – Preparación:** Daniela Jaramillo. **Escritura – revisión y edición – Preparación:** Santiago Mesa, Daniela Jaramillo.

Implicaciones éticas: los autores no tienen ningún tipo de implicación ética que deba ser declarada en la redacción y publicación de este artículo.

Conflicto de intereses: los autores no declaran.

Financiación: esta investigación fue financiada por Minciencias convocatoria 890 2020, proyecto 82349

Referencias

1. Song Y, Maskey S, Lee YG, Lee DS, Nguyen DT, Bae HJ. Optimización de los procesos de bioconversión de la cáscara de arroz en productos de valor añadido: D-psicosa, bioetanol y ácido láctico. *Bioresour Technol.* 2024 Mar;395:130363.
2. Shukla SS, Chava R, Appari S, A B, Kuncharam BVR. Uso sostenible de la cáscara de arroz para la producción más limpia de productos de valor agregado. *J Environ Chem Eng.* 2022 Feb; 10(1):106899.
3. Sun L, Gong K. Materiales a base de silicio a partir de cáscaras de arroz y sus aplicaciones. *Ind Eng Chem Res.* 2001 Dic 1; 40(25):5861–77.
4. Wang X, Chang X, Ma L, Bai J, Liang M, Yan S. Tendencias mundiales y regionales de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la producción, el comercio y el consumo de arroz. *Evaluación de Impacto Ambiental Rev.* 2023 Jul;101:107141.
5. Rajamani S, Kolla SSN, Gudivada R, Raghunath R, Ramesh K, Jadhav SA. Valorización de la cáscara de arroz para productos químicos de valor agregado y materiales funcionales. *Int J*

Environ Res. 2023 Feb 2; 17(1):22.

6. Daulay A, Andriyani, Marpongahun, Gea S. Síntesis y aplicación de nanopartículas de silicio preparadas a partir de cáscara de arroz para baterías de iones de litio. Estudios de caso en ingeniería química y ambiental. Diciembre de 2022;6:100256.
7. Tharani D, Ananthasubramanian M. Influencia de los procesos de pretratamiento en la pureza y las características de la sílice extraída de la cáscara de arroz. Biomasa Converss Biorefin. 4 de junio de 2024; 14(11):12517–29.
8. Nzereogu PU, Omah AD, Ezema FI, Iwuoha EI, Nwanya AC. Extracción de sílice de la cáscara de arroz: revisión exhaustiva y aplicaciones. Avances híbridos. Diciembre de 2023;4:100111.
9. Fernandes IJ, Moraes CAM, Egea JRJ, Sousa VC. Producción y caracterización de materiales de sílice a partir de cenizas de cáscara de arroz mediante diferentes procesos de combustión. Tecnología de pólvora 2024 marzo;436:119473.
10. Genieva SD, Turmanova SCh, Dimitrova AS, Vlaev LT. Caracterización de la cáscara de arroz y los productos de su degradación térmica en atmósfera atmosférica o nitrogenada. J Therm Calorim Anal. 22 de agosto de 2008; 93(2):387–96.
11. Ang TN, Ngoh GC, Chua ASM. Estudio comparativo de diversos reactivos de pretratamiento sobre cáscara de arroz y evaluación de cambios estructurales de la cáscara de arroz pretratada optimizada. Bioresour Technol. 2013 Mayo; 135:116–9.
12. Ajeel S abualnoun, Sukkar KA, Zedin NK. Extracción de sílice amorfa de alta pureza a partir de cáscara de arroz mediante proceso químico. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 1 de julio de 2020; 881(1):012096.
13. Irzaman I, Cahyani I, Aminullah A, Maddu A, Yuliarto B, Siregar U. Propiedades de biosílice de la cáscara de arroz utilizando varias concentraciones de HCl y fuentes de frecuencia. Egipto J Chem. 1 de febrero de 2020; 63(2):363–71.
14. Nayak PP, Datta AK. Síntesis de Nanopartículas de SiO₂ a partir de Ceniza de Cáscara de Arroz y su Comparación con Sílice Amorfa Comercial a través de la Caracterización de Materiales. Silicio. 15 de abril de 2021; 13(4):1209–14.
15. Librea JT, Dacanay FD, Martin ZZ, Díaz LL. Efecto del pretratamiento con agua y ácido sobre las propiedades fisicoquímicas de la cáscara de arroz para la extracción de sílice. IOP Conf ser mater Sci Eng. 2019 1 de mayo; 540(1):012007.
16. Zarib NSM, Abdullah* SA, Jamil NH. Extracción de sílice de la cáscara de arroz mediante tratamiento de lixiviación ácida. En 2019. págs. 175-83.
17. Bakar RA, Yahya R, Gan SN. Producción de sílice amorfa de alta pureza a partir de cáscara de arroz. Procedia Chem. 2016; 19:189–95.
18. Santana Costa JA, Paranhos CM. Evaluación sistemática de la producción de sílice amorfa a partir de cenizas de cáscara de arroz. J Clean Prod. 2018 Agosto; 192:688–97.

19. Chandrasekhar S, Pramada PN, Praveen L. Efecto del tratamiento con ácidos orgánicos en las propiedades de la sílice de la cáscara de arroz. *J Mater Sci.* 25 de diciembre de 2005; 40(24):6535–44.
20. França A, Schultz J, Borges R, Wypych F, Mangrich A. Ceniza de cáscara de arroz como materia prima para la síntesis de silicio y potasio Fertilizante de liberación lenta. *J Braz Chem Soc.* 2017;
21. Flores CG, Schneider H, Dornelles JS, Gomes LB, Marcilio NR, Melo PJ. Síntesis de zeolita potásica a partir de cenizas de cáscara de arroz como fuente de silicio. *Clean Eng Technol.* 2021 Oct;4:100201.
22. DANE. Boletín de Insumo Agrícolas. Bogotá; 2017.
23. S. Chandrasekhar, P. N. Pramada y J. Majeed, "Efecto de la temperatura de calcinación y la velocidad de calentamiento en las propiedades ópticas y la reactividad de la ceniza de cáscara de arroz", *J Mater Sci*, 2006; 41; 7926–7933.
24. Kwan WH, Wong YS. Cenizas ácidas de cáscara de arroz lixiviadas (ARHA) en hormigón: una revisión. *Mater Sci Energy Technol.* 2020; 3:501–7.