

# Residuo de bagazo cerveceros como fuente de obtención de nanopartículas mesoporosas de sílice

Nikte Yoliztli Martínez Palma<sup>1\*</sup>, Erika Berenice León Espinoza<sup>2</sup>, Mónica Araceli Camacho González<sup>1</sup>, Carlos Alfredo Zamora Valencia<sup>1</sup>, Minerva Rentería Ortega<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Tecámac. Departamento de Procesos Industriales. Tecámac, Estado de México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/TES de San Felipe del Progreso. San Felipe del Progreso, México.

\*Autor de correspondencia

nmartinezp@uttecamac.edu.mx, erikab.le@sfelipeprogreso.tecnm.mx, acamachog.uttecamac.edu.mx, charlyzam010@gmail.com, minerva.ro@sfelipeprogreso.tecnm.mx

## RESUMEN

El bagazo de cebada, principal residuo sólido de la industria cervecera, es el resultado de un proceso biotecnológico complejo que involucra la acción enzimática y microbiológica durante la fermentación de los azúcares del mosto. Este proceso transforma los componentes del grano, generando etanol y dióxido de carbono, y dejando como subproducto una matriz lignocelulósica rica en proteínas, polisacáridos y minerales, entre ellos el silicio. Debido a su origen biotecnológico, el bagazo conserva una composición química estable y funcional que lo convierte en una materia prima viable y sostenible para la obtención de nanopartículas mesoporosas de sílice mediante enfoques de química verde. Esta revisión bibliográfica resalta su utilidad como materia prima para la obtención de este material que en los últimos años se ha destacado por sus prometedoras aplicaciones en medicina, energía y catálisis. Estas nanopartículas destacan por su estructura porosa y alta biocompatibilidad. El bagazo cervecero por su contenido de sílice se posiciona como una alternativa competitiva frente a otras fuentes naturales, como la cáscara de arroz. Este enfoque no solo impulsaría la economía circular y las tecnologías verdes, sino que también transformaría un residuo abundante en materiales de alto valor agregado, con potencial para aplicaciones biomédicas e industriales.

**Palabras clave:** residuo, bagazo, cerveza, nanopartículas, mesoporosas



## ABSTRACT

Barley bagasse, the main solid residue of the brewing industry, is the result of a complex biotechnological process involving enzymatic and microbiological activity during the fermentation of wort sugars. This process transforms the grain components, generating ethanol and carbon dioxide, and leaving as a byproduct a lignocellulosic matrix rich in proteins, polysaccharides, and minerals, including silicon. Due to its biotechnological origin, the bagasse retains a stable and functional chemical composition, making it a viable and sustainable raw material for the production of mesoporous silica nanoparticles through green chemistry approaches. This literature review highlights its potential as a feedstock for obtaining this material, which in recent years has gained prominence for its promising applications in medicine, energy, and catalysis. These nanoparticles are notable for their porous structure and high biocompatibility. Owing to its silica content, brewer's bagasse stands out as a competitive alternative to other natural sources, such as rice husk. This approach would not only promote circular economy and green technologies but also transform an abundant residue into high value-added materials with potential biomedical and industrial applications.

**Keywords:** waste, bagasse, beer, nanoparticles, mesoporous

# 1

## INTRODUCCIÓN

La generación creciente de residuos agrícolas e industriales constituye un desafío global, agravado por el constante aumento de la población. Esta realidad exige explorar estrategias innovadoras para su revalorización y conversión en productos de mayor valor agregado. Dentro de este marco, la industria cervecera emerge como una de las fuentes más relevantes de residuos con potencial de aprovechamiento, gracias a su composición rica en compuestos útiles y su disponibilidad a gran escala.

La cerveza es la tercera bebida más consumida a nivel mundial, solo después del agua y el té, su producción global estimada en el año 2022 fue de 1890 millones de hectolitros, siendo México el cuarto productor mundial (BarthHaas 2023). El bagazo de cebada es un subproducto de la industria cervecera que se genera en grandes cantidades y que constituye un problema am-

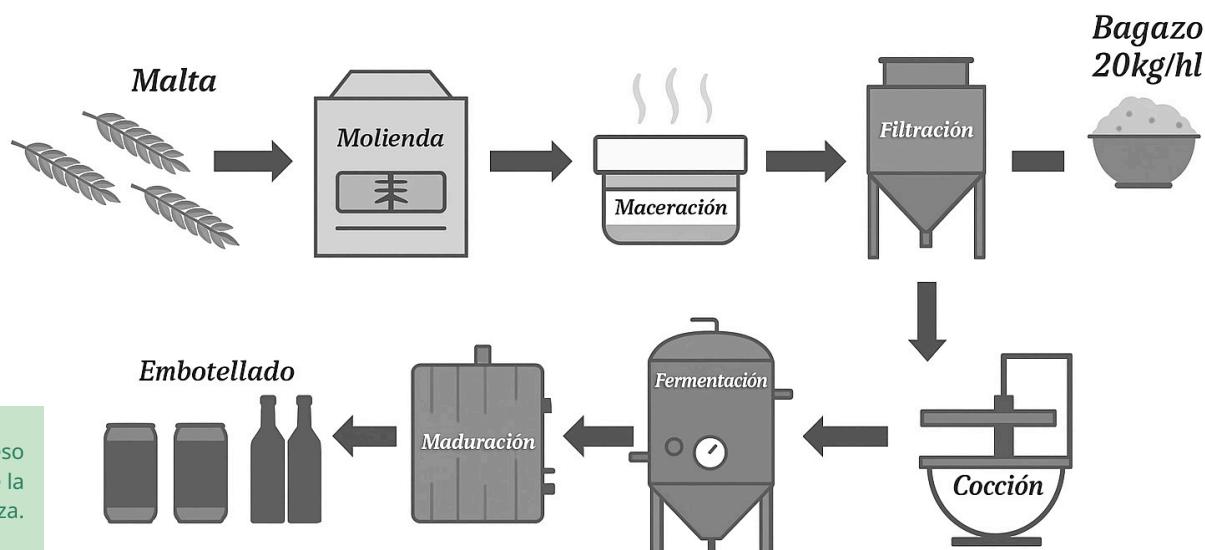


biental si no se gestiona adecuadamente. Es rico en componentes lignocelulósicos y minerales, incluyendo el silicio, el cuál puede ser extraído como dióxido de silicio mediante tratamientos térmicos y químicos para emplearlo como precursor en la síntesis de nanopartículas mesoporosas de sílice (MSNs). Este enfoque no solo agrega valor a un desecho agrícola, sino que también promueve una economía circular en la industria de materiales avanzados.

# 2

## EL BAGAZO DE CEBADA COMO RESIDUO DE LA INDUSTRIA CERVECERA

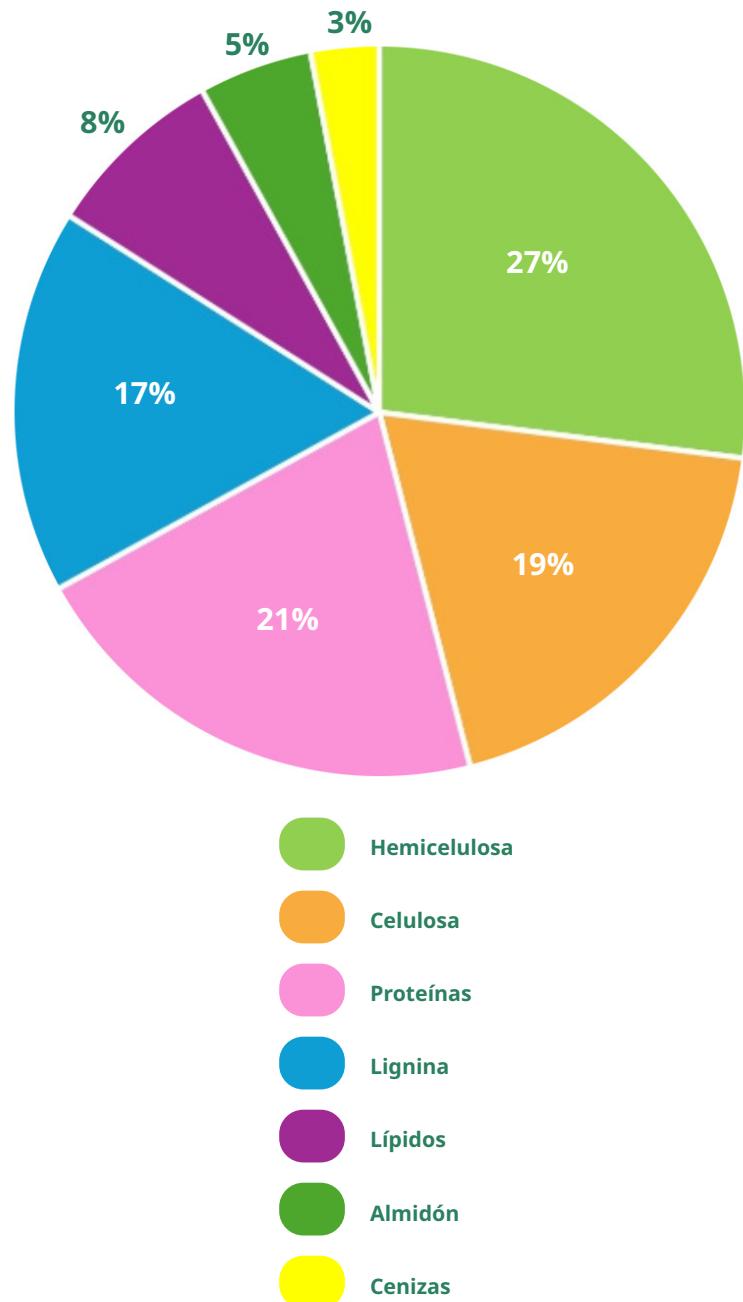
Para la elaboración de la cerveza se requieren cuatro componentes principales; agua, malta, lúpulo y levadura. Las operaciones unitarias básicas que comprenden el proceso de elaboración de la cerveza se muestran en la Figura 1 y son: malteado, molienda, maceración, filtración, cocción, fermentación, maduración y envasado (Suárez 2013).



El 85% de los residuos sólidos generados durante la elaboración de la cerveza corresponden al bagazo generado en la etapa de filtración, su producción mundial anual se estima entre 36 y 40 millones de toneladas. Esta cifra se basa en la generación aproximada de 20 kg de bagazo por cada hectolitro de cerveza producido, considerando que la producción global de cerveza en 2021 fue de 1.89 mil millones de hectolitros (Aradwad et al. 2025). En México, la industria cervecera genera anualmente entre 1 y 2.4 millones de toneladas de bagazo de cebada, convirtiéndose en uno de los principales residuos agroindustriales del país (Noro 2023, Universidad Autónoma de Querétaro 2022). Esta alta producción lo convierte en un problema, pues su composición rica en azúcares y humedad facilita la proliferación de microorganismos patógenos, elevando los niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) hasta un 60%, lo que representa un incremento en los costos por un mayor consumo de materiales, transporte, energía de secado y mano de obra en la disposición de este biorresiduo (Villanueva et al. 2021).

El grano de cebada se compone de tres partes: germen (embrión), endospermo (aleurona y endospermo amiláceo) y cubiertas del grano, estas últimas se pueden dividir de adentro hacia afuera en la cubierta de la semilla (testa), las capas del pericarpio y la cáscara (Mussatto et al. 2006). Durante el proceso de malteado se liberan azúcares fermentables y no fermentables, proteínas solubles, polipéptidos y aminoácidos; dando lugar al mosto. Después del malteado, los componentes insolubles presentes en la cubierta del grano, pericarpio y cáscara permanecen en el bagazo (Lynch et al. 2016). La composición química del bagazo está en función de diversos factores como variedad de cereal, tiempo de cosecha, condiciones de malteado y molienda, en la Figura 2 se muestra la distribución promedio de los componentes de acuerdo a lo reportado por

diferentes autores (Santos et al. 2003, Carvalheiro et al. 2004, Silva et al. 2004, Mussatto y Roberto 2006, Celus et al. 2006, Jay et al. 2008, Robertson et al. 2010, Waters et al. 2012 y Meneses et al. 2013), en donde predomina el contenido de hemicelulosa, celulosa, proteínas y lignina. Estos compuestos convierten al bagazo en una materia prima interesante para productos alimenticios y no alimenticios.



**Figura 2.**  
Composición química  
porcentual del  
bagazo.

## 3

## APLICACIONES DEL BAGAZO



La mayoría del bagazo producido a nivel nacional se tira directamente al medio ambiente generando problemas de contaminación y una parte se emplea como alimento para animales siendo esta la principal alternativa para deshacerse de él de manera rápida. Sin embargo, dicho residuo es una materia prima de interés para su aplicación en diferentes áreas debido a su bajo precio, disponibilidad durante todo el año y valiosa composición química (Mussatto et al. 2016).

Se han desarrollado alimentos para animales como aves de corral, cerdos y peces. En el caso de los productos para consumo humano se ha incorporado el bagazo como harina en productos de panificación como panes, bizcochos, galletas, muffins, pasteles, waffles, panqueques, tortillas, snacks, donas y brownies (Oyedeleji y Jianping 2023).

Otra propuesta de uso es como materia prima para la producción de energía por conversión termoquímica (pirólisis ó combustión); y también la producción de biogás y etanol (Mussatto et al. 2016). También se ha propuesto como sustrato en procesos biotecnológicos como cultivo de hongos del género *Aspergillus*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium* y *Rhizopus* (Sodhi et al. 1985), producción de enzimas como  $\alpha$ -amilasas, celulasas, lacasas y furanosidasas (Mussatto et al. 2016), así como también ácido ferúlico, ácido p-cumárico, xilosa, arabinosa, xilitol y arabitol (Carvalheiro et al. 2005). Por otro lado, el bagazo también se ha empleado para la producción de papel debido a su naturaleza fibrosa (Ishiwaki et al. 2000).

Como se describe en los párrafos anteriores la mayoría de las aplicaciones del bagazo se centran en sus componentes principales, dejando de lado otros con igual valor económico y comercial como lo son los minerales, en especial el silicio.

## 4 EL SILICIO COMO COMPONENTE DEL BAGAZO DE CEBADA

El silicio está presente en la tierra (corteza terrestre) en un 27.7% en peso, superado solo por el oxígeno con un 46.6%. A pesar de su abundancia geológica, en los seres vivos se encuentra en cantidades traza como oligoelemento, siendo las plantas donde se encuentra en mayor cantidad (Henstock et al. 2015). Es el mineral más abundante en cereales como arroz, avena y trigo integral, pero el contenido presente en la cebada es particularmente alto, en promedio posee 3800 mg/kg variando según el tipo de malta y las

condiciones de cultivo (Ma et al. 2003). La mayor cantidad de silicio se encuentra en la cáscara en forma de sílice (Kunze 1996) y se ha demostrado que alrededor del 90% queda retenido en el bagazo que se genera después del procesamiento de la cerveza (Casey y Bamforth 2010).

En los últimos años este mineral ha cobrado gran importancia dentro del área de la nanotecnología por la relevancia que tienen los materiales nanoporosos de sílice (Pal et al. 2020).

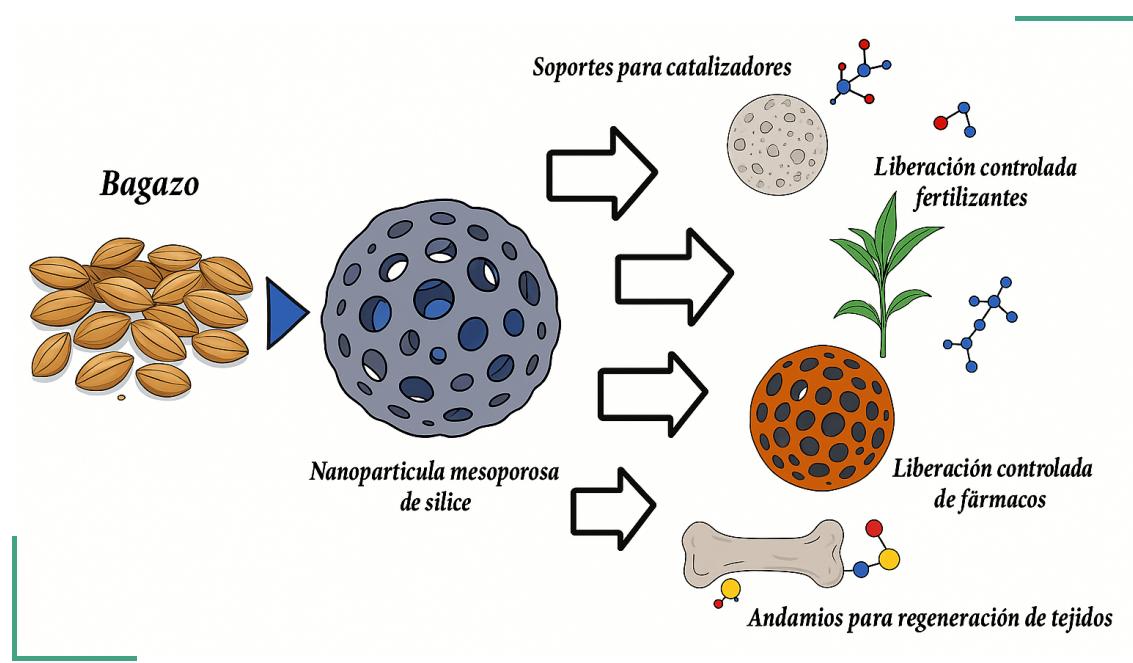
## 5 NANOPARTÍCULAS MESOPOROSAS DE SÍLICE

Las nanopartículas mesoporosas de sílice (MSNs) fueron sintetizadas por primera vez en 1992 por Mobil Research and Development Corporation a partir de geles de aluminosilicato (Beck et al. 1992), esta familia de materiales se caracteriza por poseer una distribución ordenada de poros de tamaño homogéneo de entre 2 y 20 nm, elevado volumen de poro ( $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ ), gran área superficial ( $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ ) y alta densidad de grupos silanol en su superficie los cuales favorecen los procesos de funcionalización (Manzano y Vallet 2020). Otra característica relevante de este nanomaterial es la buena biocompatibilidad que presentan, el silicio es reconocido como seguro por la FDA (Food and Drug



Administration), las MSNs han exhibido in vivo una degradación total después de su administración y la consecuente excreción principalmente a través de heces y orina (Liu et al. 2011). Dichas propiedades han propiciado que las MSNs cobren gran relevancia en el área biológica (Figura 3) para administración de fármacos, liberación controlada de fertilizantes, soporte para catalizadores, construcción de andamios para ingeniería de tejidos, acarreo de genes y biodetección

permitiendo encapsular una amplia variedad de moléculas terapéuticas de pequeño tamaño hasta macromoléculas como ácidos nucleicos: ADN (ácido desoxirribonucleico), ARNm (ácido ribonucleico mensajero) y ARNip (ácido ribonucleico de interferencia) o las herramientas empleadas para la edición genética basada en CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats por sus siglas en inglés) (Hug et al. 2025).



**Figura 3.**  
Aplicaciones  
biológicas de las  
MSN's.

## 6

## EL BAGAZO DE CEBADA COMO FUENTE DE OBTENCIÓN DE MSNs

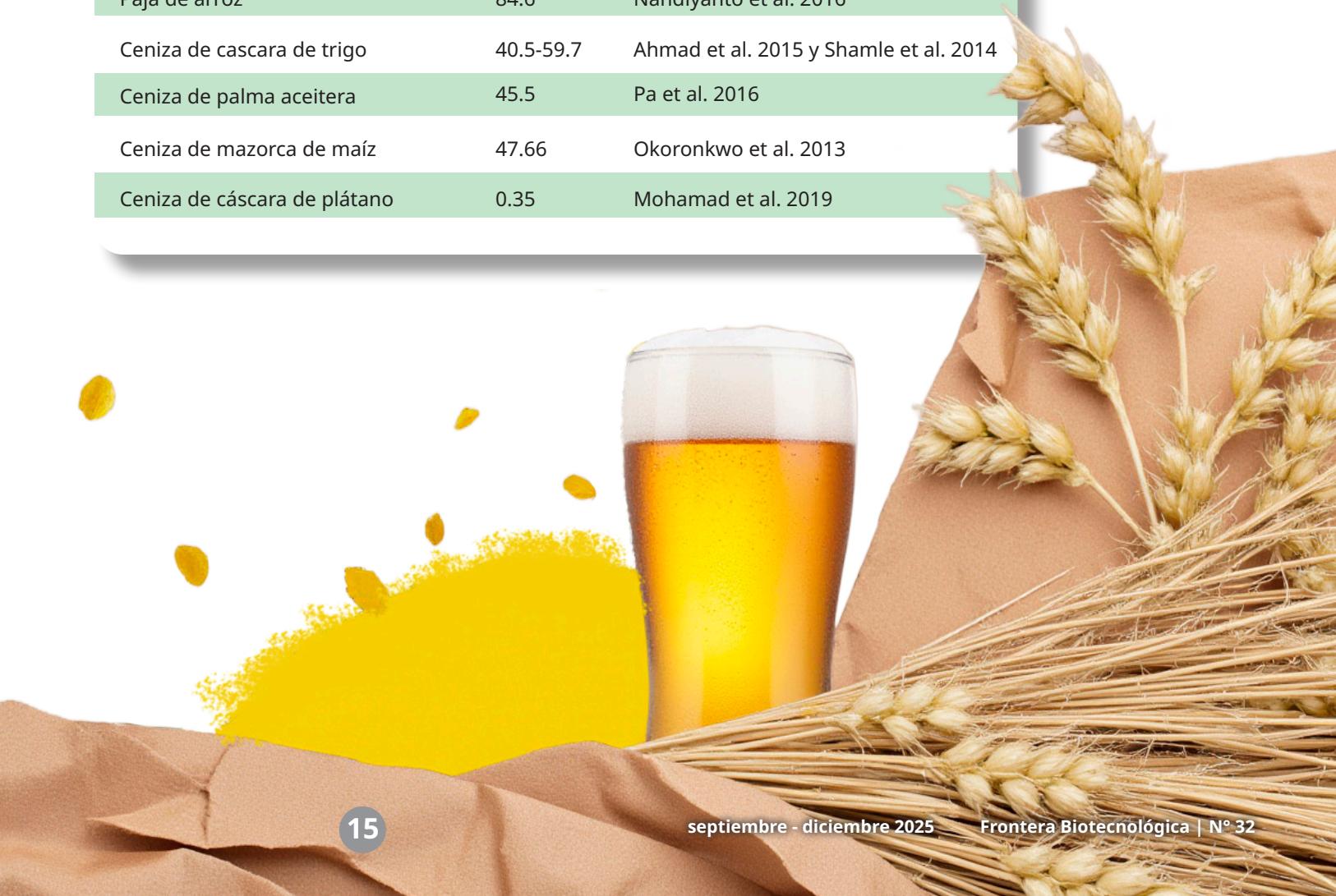
Los métodos convencionales para la síntesis de nanopartículas mesoporosas de silice (MSNs) suelen basarse en procesos químicos de alta pureza que emplean precursores como el ortosilicato de tetraetilo (TEOS) o el silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), así como agentes estructurantes y solventes orgánicos que resultan tóxicos y costosos. Estas rutas requieren condiciones de reacción controladas, altas temperaturas y tiempos prolongados, lo que incrementa el consumo energético y genera desechos químicos difíciles de tratar, impactando negativamente al medio ambiente (Rahman y Padavettan 2012). En contraste, las técnicas basadas en química verde

emplean residuos agroindustriales ricos en sílice de bajo costo. Este enfoque reduce significativamente los costos de producción, elimina el uso de reactivos peligrosos y minimiza la generación de contaminantes, convirtiendo desechos abundantes en materiales de alto valor agregado. Además del beneficio económico, esta metodología promueve la sostenibilidad ambiental y el aprovechamiento integral de subproductos agrícolas (Duque 2020). En este contexto, se han planteado investigaciones donde se emplean diversas fuentes naturales. En la Tabla 1, se muestran las cenizas de residuos agrícolas que por su alto contenido de sílice se han empleado para la obtención de este nanomaterial.



Residuo	Contenido de sílice (%)	Fuente
Ceniza de bagazo de caña de azúcar	55-88.7	Chindaprasirt et al. 2020
Ceniza de hoja de bamboo	49.9	Rangaraj et al. 2017
Ceniza de cascara de arroz	86-97	Gomes et al. 2016 y Le et al. 2013
Paja de arroz	84.6	Nandiyanto et al. 2016
Ceniza de cascara de trigo	40.5-59.7	Ahmad et al. 2015 y Shamle et al. 2014
Ceniza de palma aceitera	45.5	Pa et al. 2016
Ceniza de mazorca de maíz	47.66	Okoronkwo et al. 2013
Ceniza de cáscara de plátano	0.35	Mohamad et al. 2019

**Tabla 1.** Residuos agrícolas empleados como fuente para la obtención de MSNs



La mayoría de los trabajos se centran en la utilización de la cáscara de arroz y uno de los resultados más importantes reportados es la capacidad de controlar el tamaño y la morfología de las MSNs mediante la optimización de parámetros de síntesis. Estudios han mostrado que es posible obtener nanopartículas con diámetros menores a 100 nm y una alta área superficial específica ( $>200 \text{ m}^2/\text{g}$ ), lo que resulta particularmente atractivo para aplicaciones en almacenamiento de energía, liberación controlada de fármacos y catálisis heterogénea (Kharissova et al. 2013).

Asimismo, se ha documentado que las MSNs derivadas de cáscara de arroz presentan una estructura ordenada con poros de tamaño mesoscópico (2–50 nm), y que su composición quí-

mica puede ser modificada funcionalizando la superficie mediante técnicas post-síntesis, lo cual amplía sus aplicaciones potenciales (Iqbal et al. 2021).

Si bien se ha demostrado que la cáscara de arroz es una fuente adecuada para la obtención de MSNs por química verde, la demanda de aplicaciones en las que se pueden utilizar son demandadas y en este sentido el bagazo de la cebada cervecera (cenizas) podría ser una alternativa por su contenido de sílice que se estima entre 44.33 y 54.53 % (Farias et al. 2017), así como por la alta cantidad que se genera a nivel mundial.

## CONCLUSIÓN

El bagazo cervecero, generado en grandes cantidades por la industria cervecera, representa una alternativa sostenible y de alto potencial para la obtención de nanopartículas mesoporosas de sílice (MSNs). Su riqueza en silicio, disponibilidad constante y bajo costo lo convierten en un recurso estratégico para el desarrollo de materiales avanzados sin recurrir a métodos contaminantes. La posibilidad de transformar este biorresiduo en un nanomaterial de alto valor agregado promueve el aprovechamiento integral de subproductos agroindustriales, fomentando la economía circular y tecnologías verdes. Así, el uso del bagazo no solo permite reducir el impacto ambiental asociado a su desecho, sino que también abre nuevas oportunidades en áreas como la medicina, la energía y la biotecnología.



# REFERENCIAS

- Ahmad Alyosef H, Schneider D, Wassersleben S, Roggendorf H, Weib M, Elert A (2015) Meso/macroporous silica from miscanthus, cereal remnant pellets, and wheat straw. *ACS Sustain Chem Eng* 3(9):2012–2021.
- Aradwad P, Raut S, Abdelfattah A, Rauh C, Sturm B (2025) Brewer's spent grain: Unveiling innovative applications in the food and packaging industry. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 24(3): 70150.
- BarthHaas (2023). The BarthHaas Report 2022/2023: Hops 2022—BarthHaas report on hop growing and the hop market. BarthHaas GmbH & Co. KG.
- Beck JS, Vartuli JC, Roth WJ, Leonowicz ME, Kresge CT, Schmitt KD (1992) A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates. *J Am Chem Soc* 114(27):10834–10843.
- Carvalheiro F, Duarte LC, Lopes S, Parajó JC, Pereira H, Gírio FM (2005) Evaluation of the detoxification of brewery's spent grain hydrolysate for xylitol production by Debaryomyces hansenii CCM 941. *Process Biochem* 40(3–4):1215–1223.
- Carvalheiro F, Esteves M, Parajó J, Pereira H, Gírio F (2004) Production of oligosaccharides by autohydrolysis of brewery's spent grain. *Bioresour Technol* 91(1):93–100.
- Casey T R & Bamforth C W (2010) Silicon in beer and brewing. *J Sci Food Agric* 90(5), 784–788.
- Celus I, Brijs K, Delcour JA (2006) The effects of malting and mashing on barley protein extractability. *J Cereal Sci* 44(2):203–211.
- Chindaprasirt P, Rattanasak U (2020) Eco-production of silica from sugarcane bagasse ash for use as a photochromic pigment filler. *Sci Rep* 10(1):9890.
- Duque-Acevedo M, Belmonte-Ureña LJ, Cortés-García FJ, Camacho-Ferre F (2020) Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. *Glob Ecol Conserv* 22:e00902.
- Farías RD, Martínez García C, Cotes Palomino T, Martínez Arellano M (2017) Effects of wastes from the brewing industry in lightweight aggregates manufactured with clay for green roofs. *Materials* 10(5):527.
- Gomes GMF, Philippsen C, Bard EK, Dalla Zen L, de Souza G (2016) Rice husk bubbling fluidized bed combustion for amorphous silica synthesis. *J Environ Chem Eng* 4(2):2278–2290.
- Henstock JR, Canham LT, Anderson SI (2015) Silicon: The evolution of its use in biomaterials. *Acta Biomater* 11:17–26.
- Hug TB, Jeeja PAK, Dam SK, Das SS, Vivero-Escoto JL (2025) Recent applications of mesoporous silica nanoparticles in gene therapy. *Adv Healthc Mater* 2404781.
- Iqbal M, Abbas Q, Rehman MAU (2021) Synthesis and applications of mesoporous silica nanoparticles derived from biomass: A review. *Nanomaterials* 11(3):613.
- Ishiwaki N, Murayama H, Awayama H, Kanauchi O and Sato T (2000) Development of high value uses of spent grain by fractionation technology. *Tech QMaster Brew Assoc Am* 37:261–265.
- Jay AJ, Parker ML, Faulks R, Husband F, Wilde P, Smith AC (2008) A systematic micro-dissection of brewers' spent grain. *J Cereal Sci* 47(3):357–364.
- Kharissova OV, Kharisov BI, Oliva González CM, Méndez UO, López EL (2013) Silicon nanoparticles from rice husk via magnesiothermic reduction: Synthesis and characterization. *RSC Adv* 3(41):19102–19110.
- Kunze W (1996) Technology Brewing and Malting. VLB, Berlin. 726 p
- Le VH, Thuc CNH, Thuc HH (2013) Synthesis of silica nanoparticles from Vietnamese rice husk by sol-gel method. *Nanoscale Res Lett* 8:58.
- Liu T, Li L, Teng X, Huang X, Liu H, Chen D (2011) Single and repeated dose toxicity of mesoporous hollow silica nanoparticles in intravenously exposed mice. *Biomaterials* 32(6):1657–1668.
- Lynch K, Steffen E and Arendt E (2016) Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. *J. Inst. Brew* 122(4), 553–568.
- Ma JF, Higashitani A, Sato K, Takeda K (2003) Genotypic variation in silicon concentration of barley grain. *Plant Soil* 249(2):383–387.
- Manzano M and Vallet M (2020) Mesoporous silica nanoparticles for drug delivery. *Adv Funct Mater* 30(2):1902634
- Meneses N, Martins S, Teixeira J and Mussatto S (2013) Influence of extraction solvents on the recovery of antioxidant phenolic compounds from brewer's spent grains. *Sep. Purif. Technol.* 108, 152–158
- Mohamad D, Osman N, Nazri M, Mazlan A, Hanafi M, Esa Y and Sapawe N (2019) Synthesis of mesoporous silica nanoparticle from banana peel ash for removal of phenol and methyl orange in aqueous solution. *Materials Today: Proceedings*, 19, 1119–1125.
- Mussatto SI, Dragone G, Roberto IC (2006) Brewers' spent grain: Generation, characteristics and potential applications. *J Cereal Sci* 43(1):1–14.
- Nandiyanto ABD, Rahman T, Fadhlullah MA, Abdullah AG, Hamidah I, Mulyanti B (2016) Synthesis of silica particles from rice straw waste using a simple extraction method. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 128(1):012040.
- Noro. (2023, 14 de septiembre). Residuos de cerveza: alimento y energía. Recuperado de <https://noro.mx/sinaloa/residuos-cerveza-alimento-y-energia/>
- Okoronkwo E, Imoisili P, Olusunle S (2013) Extraction and characterization of amorphous silica from corn cob ash by sol-gel method. *Chem Mater Res* 3(4):68–72.
- Oyedele A and Jianping W (2023) Food-based uses of brewers spent grains: Current applications and future possibilities. *Food Biosci* 54 (2023): 102774.
- Pa FC, Chik A, Bari MF (2016) Palm ash as an alternative source for silica production. *MATEC Web Conf* 78:01062.
- Pal N, Lee JH, Cho EB (2020) Recent trends in morphology-controlled synthesis and application of mesoporous silica nanoparticles. *Nanomaterials* 10(11):2122.
- Rangaraj S, Venkatachalam R (2017) A lucrative chemical processing of bamboo leaf biomass to synthesize biocompatible amorphous silica nanoparticles of biomedical importance. *Appl Nanosci* 7(3):145–153.
- Rahman IA, Padavettan V (2012) Synthesis of silica nanoparticles by sol-gel: Size-dependent properties, surface modification, and applications in silica-polymer nanocomposites—A review. *J Nanomater* 2012:132424.
- Robertson J, I'Anson K, Treimo J, Faulds C, Brocklehurst T, Eijink V and Waldron K W (2010) Profiling brewers' spent grain for composition and microbial ecology at the site of production. *LWT Food Sci. Technol.* 43, 890–896.
- Santos M, Jiménez J, Bartolomé B, Gómez-Cordovés C and del Nozal M (2003) Variability of brewer's spent grain within a brewery. *Food Chem.* 80,17–21.
- Shamle NJ, Dados CJ, Iwoh SE, Nangbes JG, Awode AU (2014) Comparative assessment of the yields of silica from husk ashes of Digitaria exilis (acha), wheat, and rice.
- Silva J, Sousa S, Rodrigues J, Antunes H, Porter J, Gonçalves I and Ferreira-Dias S (2004) Adsorption of acid orange 7 dye in aqueous solutions by spent brewery grains, *Sep. Purif. Technol.* 40, 309–315.
- Sodhi HS, Garcha HS and Kiran U (1985) Screening of mycoflora of spent-up brewers' grains for aflatoxin production. *J Res Punjab Agric Univ* 22:331–336.
- Suárez Díaz, M. 2013. Cerveza, componentes y propiedades. [Tesis de pregrado] España: Universidad de Oviedo
- Universidad Autónoma de Querétaro (2022) Aprovechamiento del bagazo cervecero en la industria alimentaria y energética. Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Querétaro. Recuperado de <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/9647/5/FQLIN-289595.pdf>
- Villanueva CIC, Tovar CDG (2021) Bagazo de malta (BSG): Biorresiduo con potencial aplicación a nivel funcional, material y energético. *Prospectiva* 19(1).
- Waters D, Jacob F, Titze J, Arendt E and Zannini E (2012) Fibre, protein and mineral fortification of wheat bread through milled and fermented brewer's spent grain enrichment. *Eur. Food Res. Technol.* 235, 767–778.