

## Ceniza de bagazo de caña de azúcar: Materia prima para la síntesis de un vidrio

Zaida Jocelyn Martínez-Hurtado <sup>1</sup>, Claudia Anais Martínez-Dimas <sup>1</sup>, Teresa de Jesús Montalvo-Herrera <sup>1</sup>, Juan Jacobo Ruíz-Valdés <sup>1</sup>, Juan Manuel Hernández-López <sup>1</sup>, Enrique Alfonso López-Guajardo <sup>2</sup>, David Clemente López-Pérez <sup>3</sup>, Astrid Iriana Sánchez-Vázquez <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio Materiales 3, Ingeniería Química, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ciencias Químicas, UANL, Vicente Guerrero s/n, Treviño, 64570 Monterrey, N.L., México

<sup>2</sup> Tecnológico de Monterrey, avenida Eugenio Garza Sada, 2501, 64849, Monterrey, N.L., México

<sup>3</sup> Instituto de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, UANL, Avenida Universidad s/n, Anáhuac, 66455 San Nicolás de los Garza, N.L.

\* Autor de correspondencia: [astrid.sanchezvz@uanl.edu.mx](mailto:astrid.sanchezvz@uanl.edu.mx); Tel.: +52 81 8654 9783

### Desarrollo Sustentable (Materiales Sustentables)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 23 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.526>

**Resumen:** El uso de materias primas convencionales para la elaboración de vidrio representa un alto consumo de recursos naturales y energía. Ante esta problemática, se plantea la utilización de residuos agroindustriales como alternativa sostenible, destacando la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) por su alto contenido de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). No obstante, su aplicación se ve limitada por la presencia de impurezas metálicas como el hierro (Fe), que afectan negativamente las propiedades ópticas del vidrio. En este trabajo se evaluó la viabilidad de formular un vidrio a partir de CBC purificada mediante lixiviación con ácido oxálico, empleando condiciones de 4% p/p, 60 °C y 2 h de reacción. El material resultante se caracterizó mediante FRX, DRX, UV-Vis, SEM y DTA/TGA para determinar su composición química, estructura amorfa y comportamiento térmico. Se obtuvieron vidrios transparentes con menor tonalidad ámbar conforme disminuyó el contenido de Fe, alcanzando una concentración final de 0.24% para la CBC tamizada a malla 200. La formulación incluyó 30% de carbonato de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) como fundente, logrando un buen vaciado. Las propiedades mecánicas fueron evaluadas mediante pruebas de flexión, compresión y dureza, obteniéndose valores comparables al vidrio comercial. La temperatura de transición vítrea estimada fue de 646 °C y se validó mediante recocido térmico. Los resultados obtenidos permiten verificar que la CBC tratada con ácido oxálico constituye una materia prima viable para la obtención de un vidrio amorfo funcional, con propiedades físicas y mecánicas aceptables, y con potencial de aplicación en materiales de uso general, contribuyendo así a la valorización de residuos agroindustriales.

**Palabras clave:** ceniza de bagazo de caña, vidrio, ácido oxálico

## Sugarcane bagasse ash: Raw material for the synthesis of a glass

**Abstract:** The use of conventional raw materials for glass production involves high consumption of natural resources and energy. To address this issue, agro-industrial waste has been proposed as a sustainable alternative, with sugarcane bagasse ash (SCBA) standing out due to its high silica ( $\text{SiO}_2$ ) content. However, its direct application is limited by the presence of metallic impurities, particularly iron (Fe), which negatively affect the optical properties of glass. This work evaluates the feasibility of formulating a glass from SCBA purified through leaching with oxalic acid, under conditions of 4 wt%, 60 °C, and 2 h of reaction. The resulting material was characterized by XRF, XRD, UV-Vis, SEM, and DTA/TGA to determine its chemical composition, amorphous structure, and thermal behavior. Transparent glasses were obtained, showing reduced amber coloration as Fe content decreased, reaching a final concentration of 0.24 wt% for SCBA sieved to mesh 200. The formulation included 30 wt% potassium carbonate ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) as flux, enabling proper flow during casting. Mechanical properties were evaluated through flexural, compressive, and hardness tests, yielding values comparable to commercial glass. The estimated glass transition temperature was 646 °C, validated through thermal annealing. The results demonstrate that SCBA treated with oxalic acid is a viable raw material for the production of functional amorphous glass with acceptable physical and mechanical properties, showing potential for general-purpose applications and contributing to the valorization of agro-industrial waste and the development of more sustainable processes.

**Keywords:** sugarcane bagasse ash, glass, oxalic acid

### Introducción

El uso de materias primas convencionales para la elaboración de vidrio, como arena sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), representa un consumo intensivo de recursos minerales y energéticos (Musgraves *et al.*, 2019). En un contexto global que exige procesos más sostenibles, la sustitución parcial o total de estos insumos por residuos, con potencial valor agregado, ha cobrado relevancia en el ámbito de los materiales. En particular, la ceniza de bagazo

de caña de azúcar (CBC), un subproducto agroindustrial generado en los ingenios azucareros durante la producción de energía ha sido estudiada por su alto contenido de dióxido de silicio (Askeland *et al.*, 2013 y ASTM, 1980).

Diversas investigaciones han reportado la viabilidad técnica de emplear CBC como fuente alternativa de sílice para la síntesis de materiales vítreos (Weyl, 2016). Sin embargo, su aplicación directa puede verse limitada por la presencia de impurezas metálicas, especialmente hierro (Fe), que inducen coloración en el producto final y alteran sus propiedades ópticas (Rincón, 2003). Para superar esta limitación, se han propuesto métodos de purificación como la lixiviación con ácidos orgánicos, capaces de remover selectivamente estos contaminantes sin comprometer la composición silícea del material (Teixeira, *et al.* 2014).

En este trabajo se plantea la utilización de CBC purificada mediante lixiviación con ácido oxálico para la síntesis de un vidrio amorfo. Se evalúan sus propiedades térmicas, ópticas y mecánicas, así como su estabilidad estructural. Esta propuesta busca aprovechar un residuo abundante en la región, reducir la dependencia de recursos minerales y contribuir a la producción de materiales más sostenibles.

## Materiales y Métodos

Como fuente de materia prima se utilizó CBC proveniente del ingenio azucarero “El Mante”, ubicado al sur del estado de Tamaulipas, México. Se manejó el ácido oxálico dihidratado ((COOH)<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O), grado reactivo a 99.58% como agente lixivante y carbonato de potasio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) grado ≥99% como agente fundente.

La metodología se dividió en 3 etapas: Para la primera etapa se realizó una disminución de tamaño de partícula de la CBC por medio de una molienda y tamizado por medio de tres mallas (No. 100, 200 y 400) hasta obtener un tamaño de partícula <45 μm, posteriormente se llevó a cabo una caracterización inicial mediante fluorescencia de rayos-X (FRX) y difracción de rayos-X (DRX). En la segunda etapa se realizó el tratamiento térmico de la CBC en horno eléctrico a 900 °C durante 2 horas para la eliminación de materia orgánica, así como la lixiviación de la ceniza con ácido oxálico para la remoción de hierro (Fe), se realizaron sus respectivas caracterizaciones por absorción atómica de flama (AAF) y fluorescencia de rayos-X (FRX). En la etapa final se realizó la síntesis del vidrio, la cual se realizó a una temperatura máxima de 1450 °C durante 2 horas en horno de alta temperatura. Posteriormente, las muestras fueron enfriadas a temperatura ambiente y recocidas a 600 °C, posteriormente se caracterizó por medio de DRX, DTA/TGA, colorimetría del vidrio y pruebas mecánicas. La Figura 1 resume las etapas del procedimiento experimental propuesto.

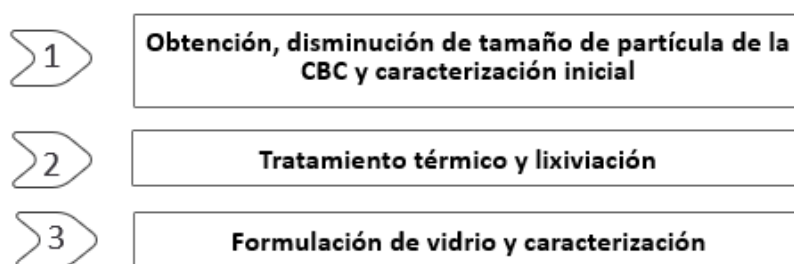


Figura 1. Etapas de procedimiento experimental propuesto

## Resultados y Discusión

### **Etapa 1. Caracterización de la materia prima**

#### *Distribución de tamaño de partícula*

La Figura 2 presenta la distribución del tamaño de partícula de la CBC antes de ser sometida a tratamiento térmico y químico. En la fracción tamizada con malla 100, se observa que el 36% del volumen corresponde a partículas con diámetros entre 149 y 74 μm, el 62% se concentra entre 74 y 35 μm, y únicamente el 1% presenta tamaños inferiores a 35 μm. La predominancia de partículas menores a 149 μm se asocia al proceso de incineración del bagazo durante su aprovechamiento energético, lo cual favorece la fragmentación térmica del material.

Por otra parte, en la fracción correspondiente a malla 200, el 80% del volumen se encuentra en el intervalo de 74 a 35  $\mu\text{m}$ , mientras que el 20% restante corresponde a partículas inferiores a 35  $\mu\text{m}$ . El incremento en la proporción de partículas finas (<35  $\mu\text{m}$ ) se atribuye al efecto del molino vibratorio empleado para optimizar la homogenización del material previo a su caracterización.

#### Fluorescencia de rayos-X (FRX)

El análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX) permitió determinar la composición de óxidos metálicos presentes en la CBC, identificándose al dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) como el componente mayoritario, con una proporción cercana al 68% en peso (ver Tabla 1). Este contenido es comparable al de vidrios comerciales tipo sódico-cálcico, lo que posiciona a la CBC como una materia prima viable para la síntesis de materiales vítreos. (Teixeira, *et al.* 2014)

Cabe señalar que la CBC no presenta óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), el cual cumple la función de fundente esencial en la fabricación convencional de vidrio. No obstante, dicha función puede ser cubierta por otros óxidos alcalinos. En este caso, se propone el uso de carbonato de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) como fuente de óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), el cual no solo actúa como fundente alternativo al  $\text{Na}_2\text{O}$ , sino que además contribuye a mejorar la dureza del vidrio obtenido.

Tabla 1. Composición de CBC determinada por FRX y de un vidrio común (Yahya, *et al.* 2017)

Compuesto	%P/P	
	CBC	Vidrio comercial
$\text{SiO}_2$	68.33	70-75
$\text{Na}_2\text{O}$	0.00	12.5-15
$\text{MgO}$	0.36	1-5
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.52	0.5-2
$\text{CaO}$	15.42	4-10
$\text{K}_2\text{O}$	5.35	0-1
$\text{P}_2\text{O}_6$	2.16	
$\text{TiO}_2$	0.44	
Fe	4.09	
Otros	1.06	

En relación con otros elementos presentes en la CBC, el análisis por FRX reveló un contenido de hierro (Fe) cercano al 4% en peso. Según los criterios establecidos en la normativa nacional para la fabricación de vidrio de uso en construcción, el contenido máximo permitido de Fe en la arena sílica es de 0.3% (Fernandez, 1991). Bajo este parámetro, la CBC no cumple con los requisitos establecidos como materia prima directa. Por esta razón, se implementó un tratamiento de purificación mediante lixiviación con un ácido orgánico, específicamente ácido oxálico, con el fin de reducir la concentración de hierro y mejorar la calidad óptica del material.

#### Difracción de rayos-X (DRX)

El análisis por Difracción de Rayos-X (DRX) se realizó con el objetivo de identificar las fases cristalinas presentes en la CBC y contrastarlas con los resultados obtenidos mediante la caracterización elemental por Fluorescencia de Rayos-X (FRX). En el difractograma de la Figura 3 se observan picos definidos correspondientes a estructuras cristalinas asociadas con los elementos mayoritarios previamente identificados. El silicio (Si) y el oxígeno (O) se detectan en forma de dióxido de silicio, específicamente como cuarzo y tridimita ( $\text{SiO}_2$ ), mientras que el calcio (Ca) se encuentra presente en fase de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).

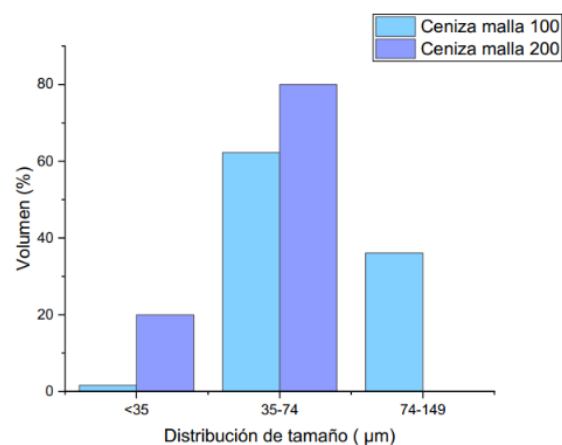


Figura 2. Gráfica de distribución de tamaño de partícula para ceniza malla 100 y ceniza malla 200

Según el diagrama de fases de los polimorfos del dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) (ver Figura 4), a presiones bajas, el cuarzo- $\alpha$  (de estructura cristalina trigonal) es estable a temperaturas inferiores a  $600^\circ\text{C}$ . Al superar esta temperatura, se transforma en cuarzo- $\beta$  con estructura hexagonal, y a partir de  $870^\circ\text{C}$  se favorece la formación de tridimita, también de simetría hexagonal. La detección de estas fases en la CBC sugiere que el material fue expuesto a temperaturas superiores a  $800^\circ\text{C}$  durante el proceso de incineración del bagazo en las calderas, lo cual induce transiciones de fase asociadas a reordenamientos estructurales impulsados por la energía térmica. Por otro lado, la presencia de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) puede atribuirse a la reacción del calcio presente en el material con dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), generado durante la combustión del residuo.

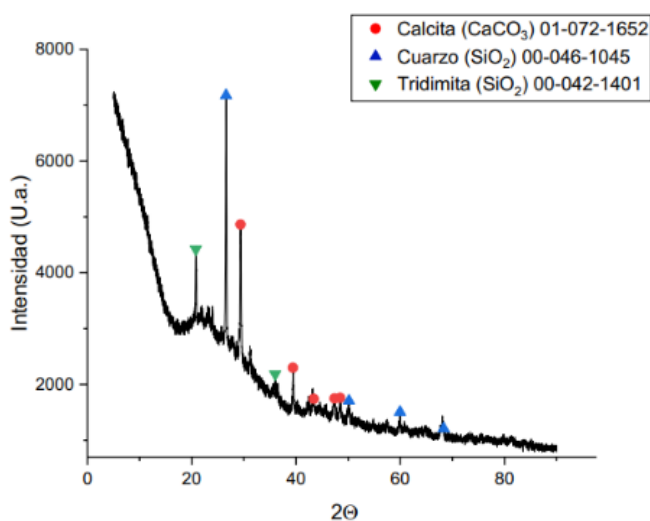


Figura 3. Difractograma de CBC previo a tratamientos

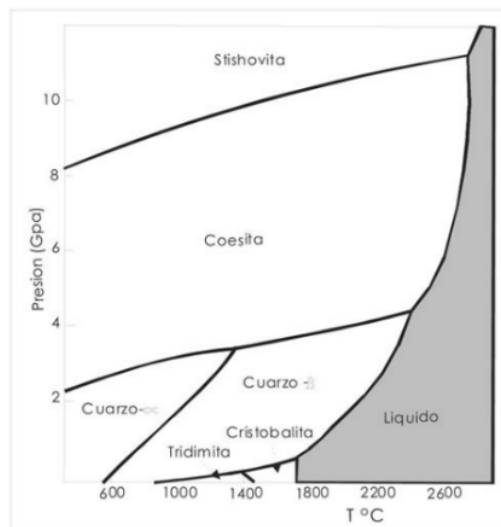


Figura 4. Diagrama de fases de polimorfos del óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ )

## ***Etapa 2. Tratamiento térmico y lixiviación***

Considerando que en ciertos tratamientos aplicados a residuos agroindustriales se ha documentado una remoción eficiente de metales sin necesidad de calcinación previa, se opta por realizar la lixiviación directamente sobre la CBC sin tratamiento térmico. Esta decisión se fundamenta en antecedentes experimentales que indican que la presencia de materia orgánica no representa una limitante significativa para la extracción de hierro (Fe) bajo condiciones adecuadas de concentración, temperatura y tiempo de reacción.

### *Fluorescencia de rayos-X*

Se evaluó la eficiencia del ácido oxálico ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ ) como agente lixivante para la remoción de hierro (Fe) y la modificación de la composición química de la CBC tamizada a malla 100 ( $<149\ \mu\text{m}$ ). Las pruebas se realizaron con concentraciones de 3% y 4% (p/p), a temperaturas de  $60^\circ\text{C}$  y  $90^\circ\text{C}$ , y con tiempos de reacción de 2 y 6 horas. Las Figuras 5 y 6 presentan los resultados de composición elemental de las muestras tratadas bajo estas condiciones.

Se observa que el contenido de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) se incrementa en todas las condiciones evaluadas, alcanzando valores entre 75% y 79.5%. Este aumento se asocia a la eliminación parcial de componentes secundarios sin afectar significativamente el óxido de calcio (CaO), el cual no es solubilizado eficientemente por el ácido oxálico. Asimismo, se registra una disminución en el contenido de óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), lo que implica la necesidad de ajustar su proporción durante la formulación vítrea mediante la adición de carbonato de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), aunque en cantidades menores respecto a otras rutas de tratamiento.

$$-K_L = \frac{V \ln\left(\frac{C_s - C}{C_s}\right)}{t A} \quad (1)$$

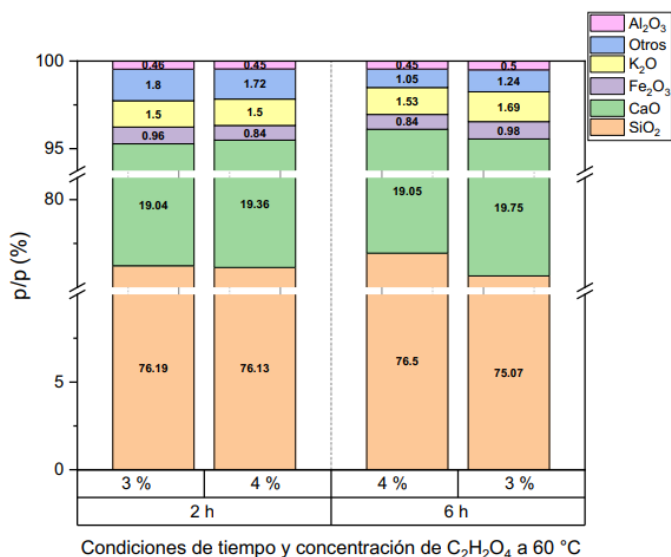


Figura 5. Composición p/p (%) de CBC lixiviada a 60 °C a diferentes condiciones de tiempo y concentraciones de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

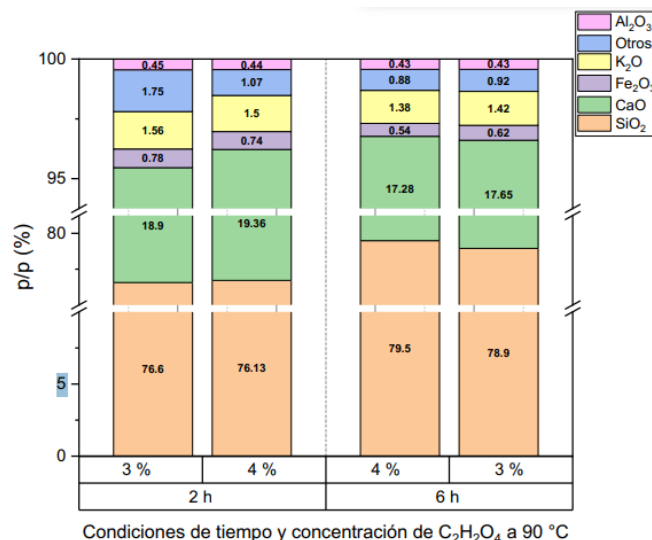


Figura 6. Composición p/p (%) de CBC lixiviada a 90 °C a diferentes condiciones de tiempo y concentraciones de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Una vez establecidas las condiciones óptimas de concentración, temperatura y tiempo (4% de ácido oxálico, 60 °C y 2 h), se procedió a realizar lixivaciones sobre CBC con tamaño de partícula inferior a 74 μm. El objetivo fue evaluar si una reducción en el tamaño de partícula favorece la eficiencia en la remoción de hierro (Fe), al incrementar el área superficial de contacto. La Tabla 2 presenta los resultados correspondientes al contenido de Fe total (expresado en porcentaje en peso) en las muestras lixiviadas bajo dichas condiciones. La cuantificación se realizó mediante espectroscopía de absorción atómica de flama (AAF).

Tabla 2. Resultados de % w/w de Fe presente en ceniza malla 200 (≤ 74 μm) lixiviada con 4% de ácido a 60 °C

Tiempo (h)	Fe presente en CBC lixiviada con C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (%w/w)
2	0.242
6	0.196

La Figura 7 presenta los porcentajes de reducción de hierro obtenidos para CBC con dos tamaños de partícula (<149 μm y <74 μm), bajo condiciones constantes de temperatura, concentración y tiempo de reacción. Se observa que la disminución del tamaño de partícula a <74 μm mejora significativamente la eficiencia en la remoción de Fe, lo cual se atribuye al incremento en el área superficial disponible para la interacción ácido-sólido. Por lo tanto, se establecen como condiciones óptimas para la remoción de hierro (Fe) en la CBC: un tamaño de partícula menor a 74 μm, temperatura de 60 °C, 2 h de reacción y una concentración de 4% de ácido oxálico (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

**Difracción de rayos-X (DRX)**

Se realizó un análisis por Difracción de Rayos X (DRX) a la ceniza resultante después del proceso de lixiviación con ácido oxálico y posterior calcinación, con el propósito de identificar las fases

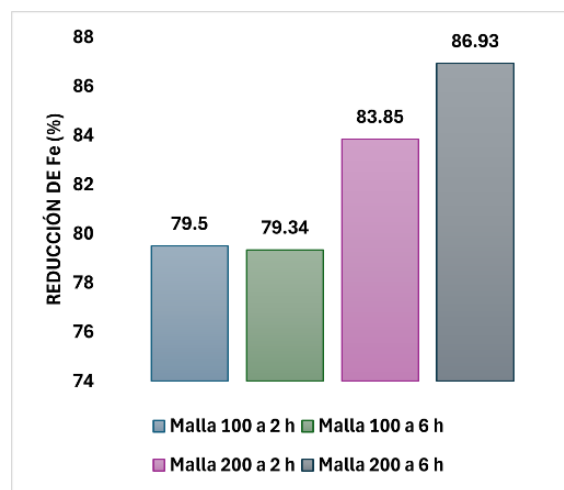


Figura 7. Comparación de reducción de Fe para ceniza malla 100 (tamaño de partícula ≤149 μm) y malla 200 (tamaño de partícula ≤ 74 μm)

cristalinas presentes. La Figura 8 muestra el difractograma correspondiente a la CBC tamizada a malla 200, tratada con una solución al 4% de ácido oxálico ( $C_2H_2O_4$ ), a 60 °C durante 2 h de reacción.

En los difractogramas obtenidos tras la lixiviación con ácido oxálico y posterior calcinación, se identifican principalmente las mismas fases cristalinas previamente observadas en la CBC sin tratamiento (Figura 3), como el cuarzo y la tridimita, los cuales permanecen estables durante el proceso. No se detecta la presencia de wollastonita-2M, lo cual es coherente con los resultados de la caracterización química por FRX, que indican una menor concentración de calcio tras el tratamiento con ácido oxálico.

En cuanto a las fases de hierro, se identifican hematita ( $Fe_2O_3$ ) y wustita (FeO). La proporción relativa de wustita es menor, lo cual puede atribuirse a su mayor susceptibilidad a la descomposición térmica. Por otro lado, la hematita, debido a su estructura más estable, muestra una mayor persistencia bajo las condiciones aplicadas, lo que también se refleja en su menor solubilidad en comparación con la wustita.

### Etapa 3. Caracterizaciones del vidrio.

#### Difracción de rayos-X

La Figura 9 presenta el difractograma del vidrio obtenido a partir de CBC sin tratamiento de lixiviación. Como se observa, no se registran picos definidos que indiquen la presencia de fases cristalinas, lo cual es consistente con la naturaleza amorfa del material, característica típica de los vidrios. Adicionalmente, se identifica una señal difusa en forma de hombro en la región comprendida entre 20° y 30°  $2\theta$ , la cual puede asociarse a la presencia de dióxido de silicio ( $SiO_2$ ), principal componente de la matriz vítrea. Estos resultados confirman que el producto obtenido mediante fusión corresponde efectivamente a un vidrio amorfo.

#### Análisis térmico diferencial y termogravimétrico (DTA/TGA)

La figura 10 muestra los resultados por análisis DTA del vidrio con CBC lixiviada con 4% de ácido oxálico a 60 °C y 2 h de reacción.

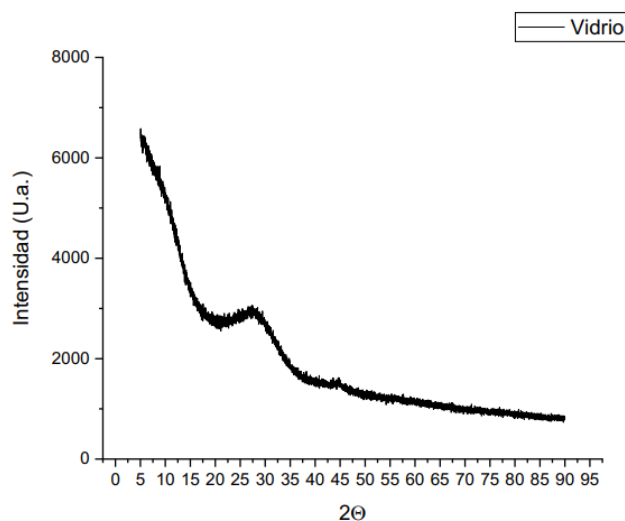


Figura 9. Difractograma del vidrio sin previo tratamiento

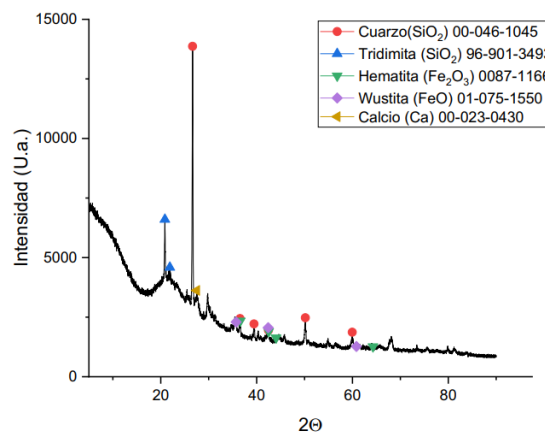


Figura 8. Difractograma CBC lixiviada con 4% de ácido oxálico ( $C_2H_2O_4$ ) a 60 °C y 2 h de reacción

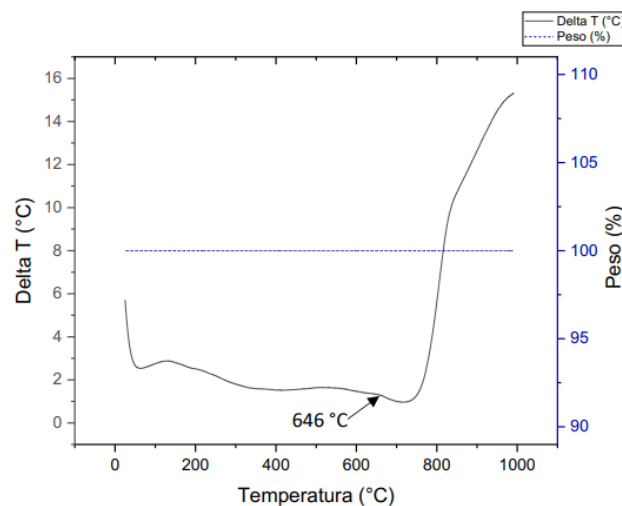


Figura 10. Análisis térmico diferencial para vidrio con CBC lixiviada con 4% de  $C_2H_2O_4$ , 60 °C en 2 h de reacción

Los análisis DTA se realizaron hasta una temperatura máxima de 1000 °C, límite del equipo. En ambos termogramas se observa un pico amplio cercano a 900 °C, correspondiente a la temperatura de cristalización  $T_c$ ; no obstante, este valor no resulta relevante en este estudio, ya que el objetivo es obtener un vidrio amorfo y no un material vitrocerámico.

El enfoque principal fue la determinación de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), parámetro crítico en vidrios, el cual, según diversos reportes en la literatura (Yahya, *et al.* 2017, Fernández, 1991, Pérez Casas, 2018 y Dávalos, *et al.*, 2020) se encuentra típicamente entre 600 y 800 °C para materiales con alto contenido de sílice. Debido a la baja resolución del equipo, se aplicó el cálculo de la derivada sobre el DTA, obteniéndose un  $T_g$  de aproximadamente 646 °C para el vidrio tratado con ácido oxálico.

Con el fin de validar este valor, se realizaron recocidos a 500, 600 y 650 °C. A 650 °C se observó una fase cristalina y a 500 °C se observaron fracturas. A 600 °C se obtuvo un vidrio estable y sin defectos, por lo que se estableció esta temperatura como óptima para el recocido. Por su parte, el análisis termogravimétrico (TGA) no mostró pérdidas de masa, lo cual confirma la estabilidad de la matriz vítrea.

### Colorimetría del vidrio

En la Figura 11 se observan las muestras obtenidas de los vidrios sintetizados a partir de CBC con distintos tamaños de partícula y condiciones de tratamiento. La muestra a) corresponde al vidrio producido sin tratamiento de lixiviación previo, el cual presenta una coloración ámbar evidente a simple vista, atribuida a la presencia de óxido de hierro (III) ( $Fe_2O_3$ ) remanente en la matriz vítrea. Para los vidrios obtenidos a partir de CBC tratada con ácido oxálico [muestras b) a f)], se empleó una concentración del 30% p/p de carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ) como agente fundente. Esta cantidad resultó adecuada para disminuir la viscosidad del fundido, permitiendo un vaciado más eficiente. Esta formulación se fundamenta en que el contenido de óxido de calcio (CaO), que también actúa como fundente, no fue sustancialmente reducido durante la etapa de lixiviación con ácido oxálico.

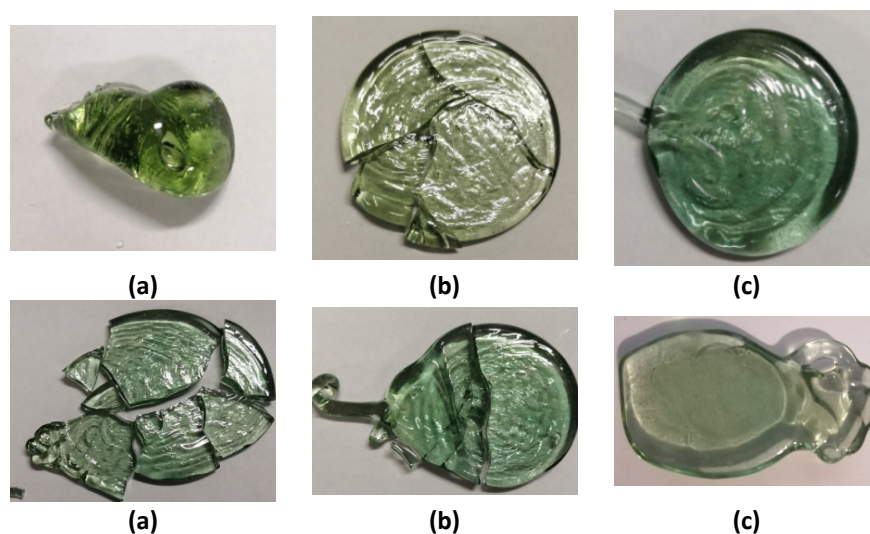


Figura 11. a) Vidrio sin previo tratamiento de lixiviación a la CBC. b) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 100 con 3% de ácido oxálico a 60 °C por 2 h de reacción. c) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 100 con 4% de ácido oxálico a 60 °C por 2 h de reacción. d) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 100 con 3% de ácido oxálico a 60 °C por 6 h de reacción. e) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 100 con 4% de ácido oxálico a 60 °C por 6 h de reacción. f) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 200 con 4% de ácido oxálico a 60 °C por 2 h de reacción

Algunas muestras presentaron inclusiones sólidas visibles, las cuales podrían corresponder a partículas de dióxido de silicio ( $SiO_2$ ) no completamente fundidas. Este defecto se atribuye a la necesidad de acortar el tiempo de fusión para ajustarse a las restricciones de operación en el laboratorio. Asimismo, se observaron fracturas en algunas muestras como consecuencia del choque térmico experimentado durante el enfriamiento rápido desde temperaturas de fusión. Para prevenir este efecto, las últimas muestras fueron sometidas a un proceso de recocido cercano a la temperatura

de transición vítrea determinada previamente mediante DTA/TGA. Este tratamiento permitió un enfriamiento lento y controlado, reduciendo los esfuerzos residuales responsables de las fracturas.

En cuanto a la coloración, los vidrios producidos a partir de CBC lixiviada con ácido oxálico mostraron una tonalidad ámbar tenue en muestras tratadas con 3% de concentración, y un color verde claro en aquellas tratadas con 4%. Estos resultados se correlacionan con una reducción del contenido de hierro superior al 75% para la CBC malla No. 100, y hasta un 83% en malla No. 200, alcanzando concentraciones finales tan bajas como 0.24% en peso. No se observaron diferencias significativas en la coloración entre los tiempos de 2 y 6 h para la malla No. 100; sin embargo, sí se evidenció una mayor reducción de color en la malla No. 200, en concordancia con su mayor eficiencia en la remoción de Fe.

La Tabla 3 presenta los resultados del análisis de colorimetría de los vidrios obtenidos, evaluados mediante el sistema CIELab\*, con el objetivo de cuantificar de manera objetiva el tono y la luminosidad de las muestras. Para fines comparativos, se utilizaron como referencia los valores colorimétricos de un vidrio comercial transparente, mostrados en la Figura 12, lo que permitió establecer diferencias específicas en parámetros de claridad y matiz entre las formulaciones experimentales y un estándar industrial.



Figura 12. Muestra de vidrio comercial

Tabla 3. Colorimetría de sistema CIELab\* para vidrios resultantes

Muestra de vidrio	L*	a*	b*
Comercial	44.11	-1.36	0.88
Sin tratamiento	25.12	-0.47	0.91
3% oxálico, 60°C, 2h, malla 100	42.67	-4.52	6.14
4% oxálico, 60°C, 2h, malla 100	32.16	-3.07	2.28
3% oxálico, 60°C, 6h, malla 100	41.97	-6.1	3.85
4% oxálico, 60°C, 6h, malla 100	36.81	-5.56	3.14
4% oxálico, 60 °C, 2 h, malla 200	28.7	-3.21	2.6

La Tabla 3 muestra diferencias significativas entre el vidrio sin tratamiento y el vidrio comercial, particularmente en el valor de luminancia, donde el vidrio sin tratar presenta un valor de 25.12. En los vidrios obtenidos a partir de CBC tratada, los valores de luminancia aumentan, indicando una mayor transparencia. La interpretación de los parámetros de color se complementa con el diagrama cromático en las Figuras 13 a 15, donde se visualiza el cambio en tonalidad hacia regiones más neutras conforme mejora la remoción de hierro.

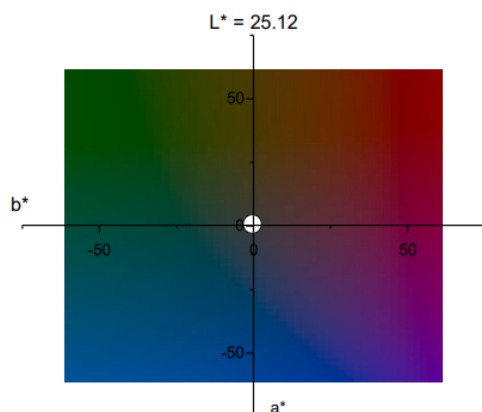


Figura 13. Diagrama cromático para el vidrio con CBC sin previo tratamiento

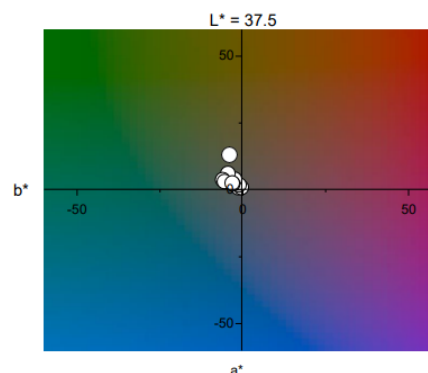


Figura 14. Diagrama cromático para el vidrio con CBC lixiviada

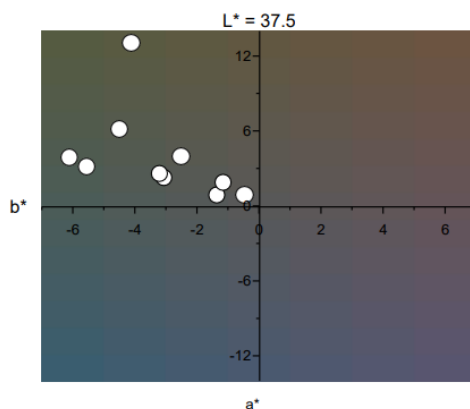


Figura 15. Diagrama cromático para el vidrio con CBC lixiviada

## Pruebas mecánicas

### Pruebas de flexión

Las pruebas de flexión se realizaron utilizando probetas de vidrio con dimensiones de 49 mm de largo, 10 mm de ancho y 4 mm de alto, empleando una máquina universal (Figura 16). Las muestras fueron elaboradas a partir de CBC previamente lixiviada bajo condiciones óptimas: 4% de ácido oxálico, 60 °C y 2 h de reacción. Para la síntesis, se prepararon lotes de 50 g, empleando una formulación con 30% p/p de carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ) como agente fundente.



Figura 16. Prueba de flexión de cuatro puntos al inicio de la prueba (izquierda) y después de alcanzar la fuerza máxima (derecha)

La Tabla 4 presenta los resultados de las pruebas de flexión. Para establecer una comparación directa, se prepararon probetas a partir de un vidrio comercial, el cual fue refundido a 1450 °C durante 2 h y vaciado en el mismo molde utilizado para los vidrios experimentales, manteniendo dimensiones equivalentes.

Tabla 4. Resultados de prueba de flexión

Muestra	Resistencia a la flexión (MPa)	Desplazamiento de flexión a fuerza máxima (mm)
Vidrio comercial	25.42	0.133
Vidrio ( $C_2H_2O_4$ )	24.72	0.132

El vidrio comercial presentó una resistencia a la flexión de 25.4 MPa, mientras que el vidrio sintetizado a partir de CBC lixiviada con ácido oxálico alcanzó un valor de 24.7 MPa, resultado comparable al material de referencia. Asimismo, la deformación máxima antes de la fractura fue de 0.13 mm para ambos casos, lo que indica un comportamiento mecánico similar.

Estos resultados confirman que las condiciones seleccionadas para la lixiviación y síntesis del vidrio no comprometen sus propiedades mecánicas, manteniendo una resistencia a la flexión adecuada en relación con estándares comerciales.

### *Pruebas de dureza*

La Tabla 5 presenta los resultados de las pruebas de dureza realizadas a los vidrios experimentales y al vidrio comercial. Según lo reportado en la literatura, la dureza de los vidrios comerciales se sitúa en un rango de 4.5 a 7 en la escala de Mohs (Moats & Khouribchia, 2009). En este estudio, el vidrio comercial alcanzó una dureza de 7 Mohs, con una dureza absoluta de 100.

En comparación, el vidrio obtenido a partir de CBC tratada con ácido oxálico presentó una dureza de 4 Mohs, correspondiente a una dureza absoluta de 21. Este valor indica que minerales como la apatita (5 Mohs) pueden causar daño a la superficie del vidrio, evidenciando una menor resistencia a la penetración.

Esta diferencia puede atribuirse a una menor proporción de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en la estructura del vidrio, en comparación con materiales comerciales. La reducción relativa de óxidos formadores y el aumento de óxidos modificadores genera una red estructural con mayor cantidad de discontinuidades, lo que disminuye la resistencia mecánica del material.

Tabla 5. Resultados de pruebas de dureza

Muestra	Dureza (Mohs)
Vidrio comercial	7
Vidrio ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ )	4

### *Pruebas de compresión*

Las pruebas de compresión se realizaron utilizando probetas cilíndricas con dimensiones de 19.5 mm de longitud y 15 mm de diámetro. La Tabla 6 presenta los resultados obtenidos para las muestras de vidrio comercial y los vidrios experimentales, reportando tanto la fuerza máxima aplicada (en Newtons) como la resistencia a la compresión calculada (en MPa).

Tabla 6. Resultados de pruebas de compresión

Muestra	Fuerza Max (N)	MPa
Vidrio comercial	6114.95	4.8
Vidrio ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ )	8637.07	6.8

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos para los vidrios experimentales se encuentran en el rango de 4.4 a 6.8 MPa, significativamente inferiores a los reportados en la literatura para vidrios comerciales, los cuales suelen presentar resistencias entre 588 y 1100 MPa (Moats & Khouribchia, 2009). Esta discrepancia puede atribuirse a la presencia de burbujas internas en las probetas, las cuales actuaron como puntos de concentración de esfuerzos, favoreciendo la fractura prematura del material. La formación de dichas burbujas se relaciona posiblemente con el uso de crisoles de alúmina durante la síntesis, ya que este tipo de material contiene poros y microgrietas que pueden retener gases. Estos son liberados gradualmente durante el proceso de fusión, generando inclusiones gaseosas en la matriz vítrea.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la CBC es una materia prima con alto potencial para la síntesis de vidrio, siempre que sea sometida a un proceso de purificación previo. La lixiviación con ácido oxálico al 4%, a 60 °C durante 2 horas, permitió reducir el contenido de hierro (Fe) por debajo del 0.3%, mejorando notablemente la transparencia del vidrio al disminuir la tonalidad ámbar característica de la CBC sin tratar.

La adición de un 30% de carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ) como fundente fue adecuada para facilitar el vaciado del fundido, compensando la reducción de óxidos modificadores tras la purificación. El vidrio obtenido presentó una estructura amorfa confirmada por DRX, así como una temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) estimada en 646 °C, valor validado mediante recocido térmico, lo cual permitió evitar fracturas por choque térmico.

Desde el punto de vista óptico, el análisis colorimétrico mostró un aumento en la luminancia y un desplazamiento hacia tonos más neutros, lo que indica una mejora visual significativa en comparación con el vidrio sin tratamiento. Además, las propiedades mecánicas evaluadas —flexión, dureza y compresión— fueron comparables a las del vidrio comercial refundido. La resistencia a la flexión fue de 24.7 MPa y la dureza alcanzó los 4 Mohs. Las bajas resistencias a compresión observadas podrían explicarse por la presencia de burbujas generadas durante la síntesis.

**Agradecimientos y financiamiento:** Se agradece a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) el respaldo institucional brindado para la realización de este trabajo, así como al personal académico y técnico de la Facultad de Ciencias Químicas por el acompañamiento durante el desarrollo experimental. Asimismo, se reconoce el apoyo del Sistema de Evaluación y Certificación de la Información en Humanidades, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento otorgado a través del programa de becas para estudios de posgrado del Gobierno de México.

## Bibliografía

- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2013). *Ciencia e ingeniería de materiales*. CENGAGE Learning.
- ASTM. (1980). *ASTM C 162-80: Definition of terms relating to glass and glass products*.
- Dávalos, J., Bonilla, A., Villaquirán-Cacedo, M. A., de Gutiérrez, R. M., & Rincón, J. M. (2020). Preparation of glass-ceramic materials from coal ash and rice husk ash: Microstructural, physical and mechanical properties. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.02.002>
- Fernández Navarro, J. (1991). *El vidrio*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
- Moats, M., & Khourabchia, Y. (2009). Effective diffusivity of ferric ions and current efficiency in stagnant synthetic copper electrowinning solutions. *Minerals & Metallurgical Processing*, 26, 179–186. <https://doi.org/10.1007/BF03402537>
- Musgraves, D., Juejun, H., & Laurent, C. (2019). *Springer Handbook of Glass*. Springer Handbooks. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1_50)
- Pérez Casas, J. (2018). *Uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como fuente de  $SiO_2$  para síntesis de materiales vitrocerámicos con aplicaciones en la construcción* (Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León). <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/18639>
- Rincón, J. M. (2003). Materias primas para la industria del vidrio. *Materiales Vítreos y Cerámicos*, 49–74. [https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=SEMINARIO\\_SEM\\_2\\_049.pdf](https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=SEMINARIO_SEM_2_049.pdf)
- Teixeira, S. R., Ferreira, T. F., Souza, A. E., Santos, G. T. A., & Grillo, F. F. (2014). Valorization of sugarcane bagasse ash: Producing glass-ceramic materials. *Journal of Environmental Management*, 134, 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.029>
- Weyl, W. A. (2016). *Coloured Glasses*. Society of Glass Technology.
- Yahya, A. A., Mohamed, M., Azmi, M., & Mahmud, N. (2017). Reducing heavy metal element from coal bottom ash by using citric acid leaching treatment. *MATEC Web of Conferences*, 103, 1–6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710301004>