Research Club Scientia Vol. 4, No 4
Frecuencia: Octubre–Diciembre 2026
ISSN: 3103 - 1315
DOI: https://doi.org/10.65415/7nbg8197

Síntesis de nanopartículas de carbono (Bio-dots) a partir de ceniza de bagazo de caña de azúcar como nano-aditivos antidesgaste: una revisión sistemática de la literatura

Synthesis of Carbon Nanoparticles (Bio-dots) from Sugarcane Bagasse Ash as Anti-Wear Nanoadditives: A Systematic Literature Review

Sintesi di nanoparticelle di carbonio (Bio-dots) a partire dalla cenere di bagassa di canna da zucchero per l'impiego come nanoadditivi antiusura: una revisione sistematica della letteratura

Anthony Miguel Alvarado Nieves[I]
aalvaradon3@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0266-8557
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Williams Wilkin Román Freres[I]
wromanf@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2895-0347
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Snayder Aymar Saldarriaga Pinela[I]
ssaldarriagap@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7883-736X
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

José Alberto Paredes Quimí[I]
jparedesq4@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1829-7361
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Jorge Tomas Holguín Anzules[I]
jholguina7@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-4184
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Correspondencia: aalvaradon3@unemi.edu.ec

Síntesis de nanopartículas de carbono (Bio-dots) a partir de ceniza de bagazo de caña de azúcar como nano-aditivos antidesgaste: una revisión sistemática de la literatura

Artículo de Investigación

***Aceptado:** 27/Noviembre/2026 ***Publicado:** 28/Noviembre/2026

Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Resumen

Las pérdidas por fricción y desgaste en sistemas mecánicos representan entre el 20 % y el 30 % del consumo energético mundial total, un problema habitualmente mitigado con aditivos lubricantes tóxicos y persistentes. Esta revisión sistemática de la literatura analiza si la ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA) puede convertirse en nanopartículas de carbono (Bio-dots) útiles como nano-aditivos antidesgaste, evaluando el coeficiente de fricción (COF), el diámetro de la huella de desgaste (WSD), la rugosidad superficial promedio (Ra) y la estabilidad coloidal. Mediante el protocolo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), se examinaron 15 estudios internacionales arbitrados (2020–2026). Los resultados confirman una brecha concreta: ningún estudio experimental ha sintetizado todavía Bio-dots directamente desde esta ceniza para evaluarlos en un lubricante, por lo que esta revisión integra evidencia indirecta de bagazo crudo, sílice de ceniza y otros nanocarbonos. Aunque la SCBA contiene principalmente sílice (59,2 % a 96,9 %) y superficies hidrofílicas, la evidencia indirecta muestra reducciones del COF hasta 0,085 con carbones activados de bagazo, caídas de hasta 34 % con Bio-dots vegetales en aceite de Pongamia y estabilización en aceite mediante recubrimiento con ácido oleico. Se concluye que la viabilidad de los Bio-dots de SCBA constituye una hipótesis técnicamente fundamentada, pero aún pendiente de validación experimental.

Palabras clave: Bio-dots; ceniza de bagazo de caña de azúcar; coeficiente de fricción; nano-aditivos antidesgaste; estabilidad coloidal.

Abstract

Friction and wear losses in mechanical systems account for 20% to 30% of total global energy consumption, a challenge typically mitigated with toxic and persistent lubricant additives. This systematic literature review examines whether sugarcane bagasse ash (SCBA) can be converted into carbon nanoparticles (Bio-dots) suitable as anti-wear nanoadditives, evaluating coefficient of friction (COF), wear scar diameter (WSD), average surface roughness (Ra), and colloidal stability. Following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) protocol, 15 peer-reviewed international studies (2020–2026) were analyzed. The findings confirm a clear gap: no experimental study has yet synthesized Bio-dots directly from this ash and tested them in a lubricant; accordingly, this review integrates indirect evidence from raw bagasse, ash-derived silica, and other nanocarbons. Although SCBA is predominantly silica (59.2% to 96.9%) with hydrophilic surfaces, indirect evidence shows COF reductions down to 0.085 for bagasse activated carbons, up to 34% COF reduction for plant Bio-dots in Pongamia oil, and oil stabilization via oleic acid coating. Thus, the feasibility of SCBA-derived Bio-dots remains a technically grounded hypothesis awaiting experimental validation.

Keywords: Bio-dots; sugarcane bagasse ash; coefficient of friction; anti-wear nanoadditives; colloidal stability.

Riassunto

Le perdite dovute all'attrito e all'usura nei sistemi meccanici rappresentano tra il 20 % e il 30 % del consumo energetico mondiale complessivo. Questo problema viene comunemente mitigato con additivi lubrificanti tossici e persistenti. La presente revisione sistematica della letteratura analizza la possibilità di ottenere dalla cenere di bagassa di canna da zucchero (SCBA) nanoparticelle di carbonio (Bio-dots) da impiegare come nanoadditivi antiusura. A tal fine, prende in esame il coefficiente di attrito (COF), il diametro dell'impronta di usura (WSD), la rugosità superficiale media (Ra) e la stabilità colloidale.

Seguendo il protocollo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), sono stati esaminati 15 studi internazionali sottoposti a revisione paritaria, pubblicati tra il 2020 e il 2026. Dai risultati emerge una lacuna precisa: nessuno studio sperimentale ha ancora sintetizzato Bio-dots direttamente da questa cenere per valutarne le prestazioni in un lubrificante. La revisione integra quindi evidenze indirette relative alla bagassa grezza, alla silice ricavata dalla cenere e ad altri nanomateriali a base di carbonio.

La SCBA è costituita prevalentemente da silice (dal 59,2 % al 96,9 %) e presenta superfici idrofile. Le evidenze indirette mostrano che il COF può scendere fino a 0,085 con carboni attivi ottenuti dalla bagassa e che i Bio-dots di origine vegetale possono ridurre il COF fino al 34 % nell'olio di Pongamia. Il rivestimento con acido oleico favorisce inoltre la stabilità della dispersione in olio. L'impiego di Bio-dots derivati dalla SCBA come nanoadditivi antiusura costituisce quindi un'ipotesi tecnicamente fondata, ancora da validare sperimentalmente.

Parole chiave: Bio-dots, cenere di bagassa di canna da zucchero, coefficiente di attrito, nanoadditivi antiusura, stabilità colloidale.

1. Introducción

Las pérdidas por fricción y desgaste en sistemas mecánicos representan entre el 20 % y el 30 % del consumo energético mundial total, acelerando el deterioro de las piezas metálicas y elevando las emisiones contaminantes. Para contener estas pérdidas, la industria emplea convencionalmente aditivos químicos basados en zinc, fósforo y azufre, cuya toxicidad y persistencia ambiental impulsan la búsqueda de alternativas más limpias derivadas de biomasa renovable (Gomaa et al., 2025; Kumar et al., 2022; Molza et al., 2024; Shah et al., 2026).

En las zonas azucareras, la quema del bagazo de caña en calderas para generar vapor y electricidad produce alrededor de 25 kg de ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA, por sus siglas en inglés) por cada tonelada procesada. Aunque esta ceniza está compuesta principalmente por sílice amorfa (dióxido de silicio, SiO_2), conserva una fracción de carbono inquemado que puede aprovecharse en nanotecnología bajo un enfoque de economía circular (Jaramillo-Vélez et al., 2025; Ndikumana et al., 2025).

A su vez, las nanopartículas de carbono de origen vegetal menores de 10 nanómetros (nm) conocidas como Bio-dots o puntos de carbono destacan como aditivos lubricantes por su baja toxicidad y forma cuasi-esférica. Al dispersarse en un aceite, reducen el rozamiento porque actúan como pequeños rodamientos entre las piezas metálicas, rellenan los microsurcos de la superficie (efecto mending o autorreparación) y forman una película protectora microscópica (tribofilm) que evita el contacto directo metal-metal (Khan et al., 2026; Kumar et al., 2022; Rahman et al., 2022).

Sin embargo, la literatura científica actual se encuentra fragmentada: unos estudios sintetizan Bio-dots a partir de bagazo crudo para usos ópticos o antimicrobianos, otros extraen sílice de la SCBA para emulsiones o construcción, y otros prueban nanocarbonos en lubricantes usando precursores distintos a esta ceniza. Debido a esta ausencia de estudios directos, la presente revisión integra necesariamente evidencia indirecta procedente de bagazo crudo, sílice extraída de ceniza y otros nanocarbonos para examinar con rigor qué tan plausible es esta ruta (Jaramillo-Vélez et al., 2025; Joseph et al., 2026; Khan et al., 2026; Pandiyan et al., 2020).

En consecuencia, el objetivo general de esta revisión sistemática de la literatura (RSL) es analizar críticamente la evidencia directa e indirecta disponible sobre la conversión de derivados y cenizas de bagazo de caña en Bio-dots y evaluar como hipótesis su posible uso como nano-aditivos antidesgaste, respondiendo a la pregunta orientadora: ¿cómo afecta la adición de nano-puntos de carbono derivados de bagazo de caña a la reducción del coeficiente de fricción (COF) y al desgaste en contactos tribológicos? Como objetivos específicos se plantea sistematizar las rutas de síntesis verde aplicables al bagazo y la SCBA, comparar el desempeño tribológico COF, diámetro de la huella de desgaste (WSD), rugosidad superficial promedio (Ra) y estabilidad coloidal y delimitar los vacíos experimentales pendientes. El artículo se organiza en Metodología, Resultados, Discusión y Conclusiones.

2. Metodología

Se realizó una revisión sistemática de la literatura (RSL) guiada por el protocolo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) sobre artículos revisados por pares publicados entre enero de 2020 y abril de 2026. La búsqueda se ejecutó con fecha de última consulta en noviembre de 2026 en seis plataformas científicas internacionales y repositorios de acceso abierto: Scopus, ScienceDirect, PubMed Central (PMC), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Royal Society of Chemistry (RSC) y Semantic Scholar.

Para combinar una cobertura amplia con acceso garantizado al texto íntegro, la recuperación se organizó en dos vías complementarias. Primero, se aplicó la búsqueda estructurada en las plataformas mencionadas mediante tres niveles de ecuaciones booleanas sobre título, resumen y palabras clave (Tabla 1), lo que arrojó 10 registros pertinentes; al comprobar que la ecuación nuclear no devolvía estudios experimentales en la intersección exacta (SCBA + Bio-dots + tribología), se emplearon dos módulos temáticos complementarios. Segundo, se incorporaron 11

artículos en formato de documento portátil (PDF) localizados mediante búsqueda dirigida y descarga directa desde los portales editoriales abiertos de ScienceDirect, MDPI, RSC Publishing y Semantic Scholar en noviembre de 2026. Para asegurar que no existieran repeticiones entre los 11 archivos PDF y los 10 registros de las plataformas, se consolidaron los 21 registros en una única matriz y se verificó su duplicidad cotejando manualmente el título exacto, la autoría, el año y el identificador de objeto digital (DOI).

Tabla 1

Ecuaciones booleanas empleadas en la estrategia de búsqueda documental

Nivel	Enfoque temático	Ecuación booleana (título, resumen y palabras clave)
Nuclear	Intersección exacta (SCBA + Bio-dots + tribología)	("sugarcane bagasse ash" OR "bagasse ash" OR "SCBA") AND ("carbon dots" OR "carbon quantum dots" OR "bio-dots") AND ("lubricant*" OR "tribolog*" OR "anti-wear" OR "friction")
Módulo A	Síntesis y valorización de bagazo o SCBA	("sugarcane bagasse" OR "bagasse ash") AND ("carbon quantum dots" OR "carbon dots" OR "nano-biochar" OR "silica nanoparticles") AND ("synthesis" OR "hydrothermal" OR "microwave" OR "pyrolysis")
Módulo B	Tribología y estabilidad de nanocarbonos	("carbon dots" OR "carbon quantum dots" OR "biochar" OR "activated carbon") AND ("anti-wear" OR "wear scar" OR "friction coefficient" OR "biolubricant" OR "colloidal stability")

Nota. Elaboración propia. Última consulta realizada en noviembre de 2026 en Scopus, ScienceDirect, PMC, MDPI, RSC y Semantic Scholar. SCBA: ceniza de bagazo de caña de azúcar.

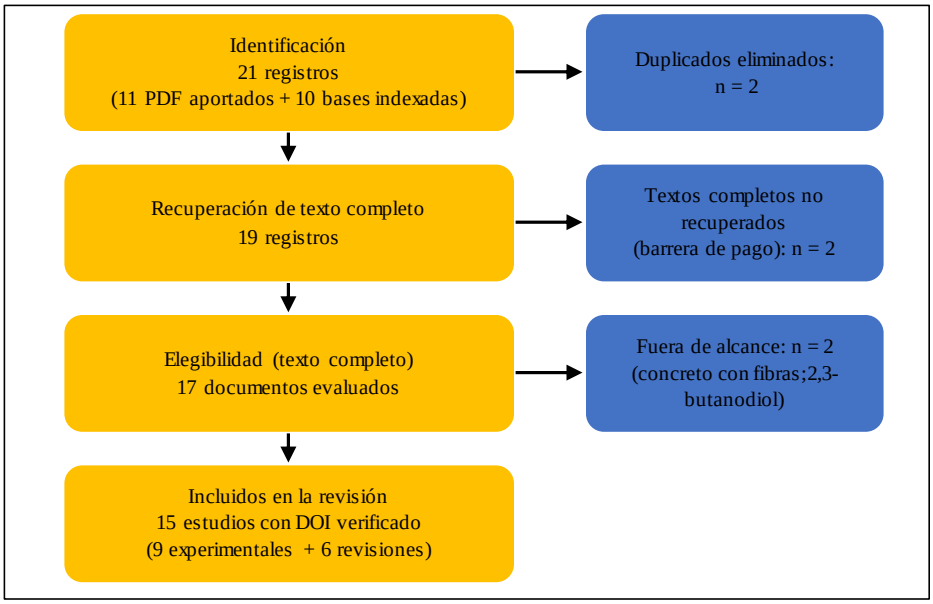
Se incluyeron estudios experimentales y revisiones arbitradas (2020–2026) con texto completo verificable y DOI activo que aportaran datos cuantitativos sobre síntesis de nanocarbonos de caña, estabilización coloidal de nanopartículas de SCBA o desempeño tribológico en lubricantes. Se excluyeron archivos duplicados, documentos cuyo texto completo no pudo recuperarse por barrera de pago editorial, trabajos centrados en fibras macroscópicas para concreto hidráulico y análisis tecno económicos ajenos a la síntesis de nanomateriales.

3. Resultados

3.1 Selección de estudios

La búsqueda combinada reunió 21 registros iniciales (11 artículos descargados en PDF mediante búsqueda dirigida y 10 registros identificados en plataformas). Al cruzar ambas listas por título, autores y DOI se eliminaron 2 registros duplicados, quedando 19 documentos seleccionados para recuperación de texto completo. En la fase de recuperación, 2 documentos no pudieron obtenerse por barrera de pago editorial y se clasificaron como textos completos no recuperados. Los 17 textos completos recuperados se evaluaron en profundidad según los criterios de elegibilidad y se excluyeron 2 por quedar fuera del alcance del estudio (uno sobre fibras de bagazo en concreto hidráulico y otro sobre producción de 2,3-butanodiol). La muestra final quedó conformada por 15 estudios científicos con DOI verificado (9 experimentales y 6 revisiones), cuyo flujo completo se presenta en la Figura 1.

Figura 1
Diagrama de flujo PRISMA de identificación, cribado y selección de estudios.

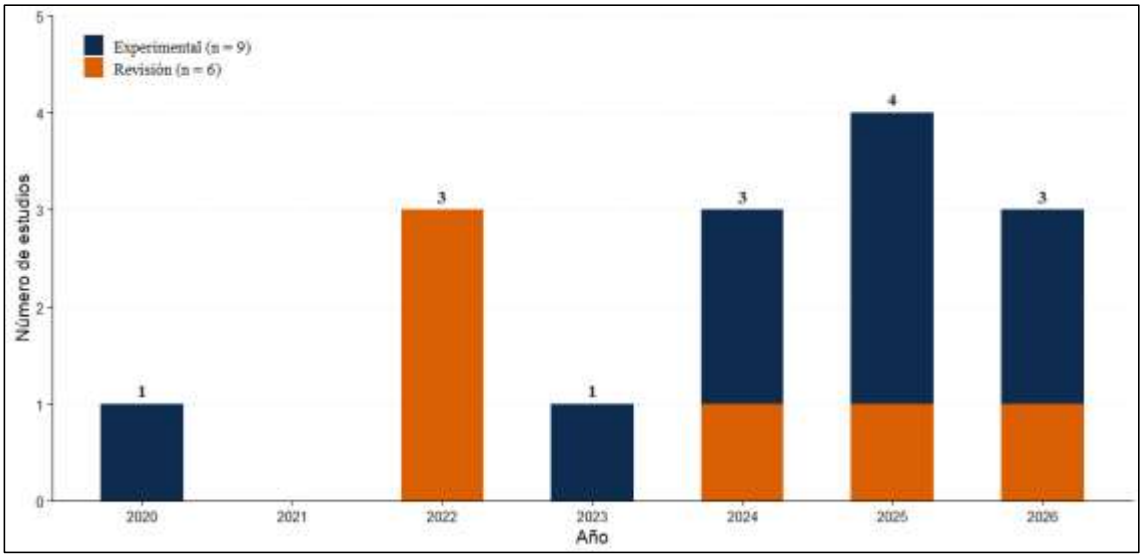


Nota. Elaboración propia siguiendo el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). A su vez se distinguen explícitamente los 2 documentos con barrera de pago editorial (textos completos no recuperados) de los 2 textos completos evaluados y excluidos por quedar fuera de alcance.

3.2 Características generales, año y origen de los estudios

La información científica incluida es reciente ya que 10 de los 15 estudios (66,7%) se publicaron entre 2024 y 2026, lo que evidencia un interés creciente por los nanocarbonos biogénicos en lubricación sostenible. Además, que tres de las seis revisiones aparecieron en 2022, antes de que se multiplicaran los ensayos tribológicos directos con puntos de carbono vegetales a partir de 2023. La Figura 2 resume esta evolución anual diferenciando los trabajos experimentales (60,0%) de las revisiones (40,0%).

Figura 2
Distribución anual de los estudios incluidos según su diseño metodológico



Nota: Elaboración propia a partir de los 15 estudios incluidos (2020–2026). No se registraron trabajos elegibles en 2021.

Por ubicación geográfica, Asia concentra la mayor parte de los estudios (India, China, Tailandia e Irán, con 7 trabajos), seguida de África y Medio Oriente (3), mientras que Europa/Caribe francés, América Latina (Colombia), Norteamérica, Oceanía y una colaboración Corea del Sur–India aportan un estudio cada una. La Tabla 2 sintetiza el perfil y aporte esencial de cada investigación.

Tabla 2

Características generales de los 15 estudios incluidos en la revisión sistemática

Autor y año	País / Región	Diseño	Precursor / Sistema	Aporte principal
Pandiyan et al. (2020)	India / Catar	Experimental	Pulpa de bagazo de caña	Sintetiza Bio-dots hidrotermales menores de 2 nm con grupos oxigenados y nitrogenados.
Jirimali et al. (2022)	Corea del Sur / India	Revisión	Residuos agrícolas y bagazo	Compara rutas verdes de síntesis y estima el costo del biochar de bagazo en 0,93 USD/kg.
Kumar et al. (2022)	India	Revisión	Puntos de carbono en PEG/agua	Sistematiza dopaje, funcionalización y el alto potencial antifricción en medios polares.
Rahman et al. (2022)	EAU / EE. UU.	Revisión	Nanocarbonos en lubricantes	Explica los mecanismos de rodamiento, relleno superficial y formación de tribofilm.
Jiao et al. (2023)	China / Australia	Experimental	Nanofluido de carbono en PEG 400	Alcanza un COF de 0,028 y demuestra que exceder la dosis óptima genera abrasión.
Mod et al. (2024)	Australia	Revisión	Subproductos de caña (SCBA)	Revisa nanomateriales de caña y señala la brecha entre laboratorio e industria.
Molza et al. (2024)	Guadalupe (Francia)	Experimental	Carbón activado de bagazo	Prueba carbones de bagazo en acero y fija umbrales de área superficial y mesoporos.
Pongpanyanate et al. (2024)	Tailandia	Experimental	Bagazo dopado con nitrógeno	Demuestra una ruta con urea y pirólisis a 800 °C para controlar porosidad y dopaje.

Autor y año	País / Región	Diseño	Precursor / Sistema	Aporte principal
Gomaa et al. (2025)	Egipto	Experimental	Óxido de grafeno en aceite mineral	Evalúa dosis óptima y límite de aglomeración en ensayo estándar de cuatro bolas.
Jaramillo-Vélez et al. (2025)	Colombia	Experimental	SCBA modificada con ácido oleico	Extrae sílice de la SCBA y logra estabilidad en aceite mediante recubrimiento lipofílico.
Ndikumana et al. (2025)	Marruecos	Revisión	Bagazo y ceniza (SCBA)	Documenta la variabilidad mineral de la SCBA y su alto contenido de sílice.
Taghipour & Tabandeh (2025)	Irán	Experimental	Nano-biochar de bagazo	Analiza el efecto de la molienda mecánica sobre la conductividad térmica y viscosidad.
Joseph et al. (2026)	India	Experimental	Bagazo crudo (microondas)	Obtiene puntos de carbono en 5 minutos y contrasta su tamaño por TEM y DLS.
Khan et al. (2026)	India	Experimental	Bio-dots en aceite de Pongamia	Valida estabilidad coloidal por un mes y fuerte reducción de fricción y desgaste.
Shah et al. (2026)	EE. UU.	Revisión	Residuos y cenizas en tribología	Analiza sinergias sílice-carbono y retos de estandarización en lubricantes verdes.

Nota. Elaboración propia a partir de los 15 estudios seleccionados. SCBA: ceniza de bagazo de caña de azúcar; PEG: polietilenglicol; COF: coeficiente de fricción; TEM: microscopía electrónica de transmisión; DLS: dispersión dinámica de luz; EAU: Emiratos Árabes Unidos; EE. UU.: Estados Unidos; USD: dólares estadounidenses.

3.3 Categorías temáticas identificadas

El análisis de contenido permitió organizar los hallazgos en cuatro ejes temáticos que recorren la cadena desde el residuo agroindustrial hasta el contacto lubricado. El bloque más abundante corresponde al desempeño tribológico de nanocarbonos (6 estudios), seguido por las rutas de síntesis desde bagazo (5 estudios), mientras que la química de la SCBA y la valorización tribológica de residuos agrupan 2 estudios cada uno (Tabla 3).

Tabla 3

Categorías temáticas derivadas del análisis de contenido

Categoría temática	Enfoque analítico	n	Autores representativos
1. Síntesis y caracterización desde bagazo	Rutas hidrotermales, microondas, pirólisis y dopaje con nitrógeno para controlar tamaño y superficie.	5	Pandiyan et al. (2020); Jirimali et al. (2022); Mod et al. (2024); Pongpanyanate et al. (2024); Joseph et al. (2026).
2. Química de la SCBA y estabilidad en aceite	Proporción sílice/carbono en la ceniza, purificación química y recubrimiento para dispersión oleosa.	2	Jaramillo-Vélez et al. (2025); Ndikumana et al. (2025).
3. Desempeño tribológico en lubricantes	Efecto sobre COF, WSD, pérdida de masa, rugosidad Ra, estabilidad coloidal y mecanismos.	6	Kumar et al. (2022); Rahman et al. (2022); Jiao et al. (2023); Molza et al. (2024); Gomaa et al. (2025); Khan et al. (2026).
4. Propiedades termofísicas y escalamiento	Impacto en viscosidad, transferencia de calor, sistemas híbridos y barreras industriales.	2	Taghipour & Tabandeh (2025); Shah et al. (2026).

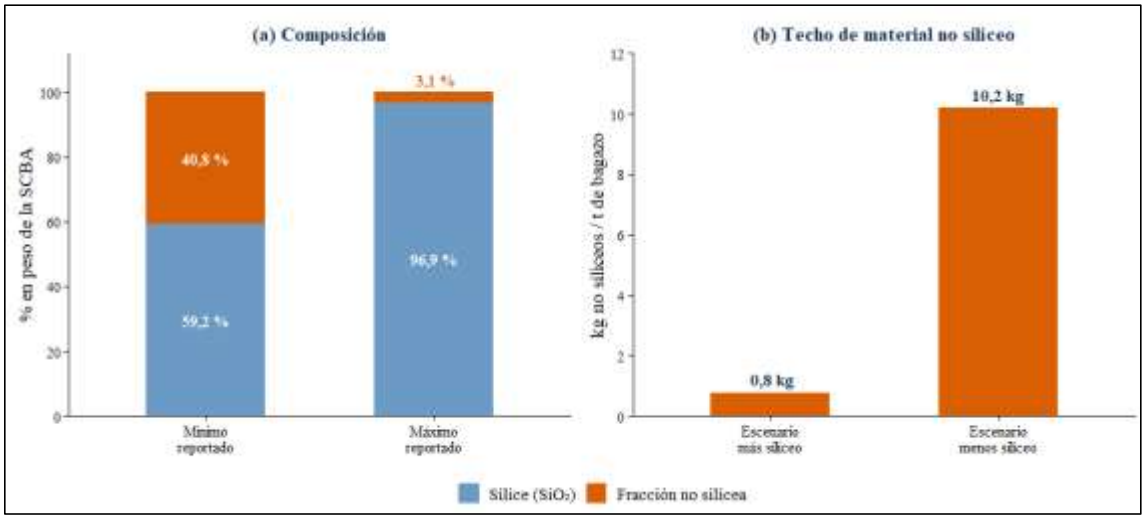
Nota. Elaboración propia. SCBA: ceniza de bagazo de caña de azúcar; COF: coeficiente de fricción; WSD: diámetro de huella de desgaste; Ra: rugosidad superficial promedio.

3.4 Síntesis de hallazgos y respuesta a la pregunta científica orientadora

El primer hallazgo determinante surge de la composición química de la SCBA. Al provenir de la combustión del bagazo en calderas (alrededor de 25 kg de ceniza por tonelada procesada), el residuo está dominado por sílice amorfa (59,2% a 96,9% en peso), de modo que el carbono sin

quemar representa solo una parte de la fracción restante. Para dimensionar este límite físico, la Figura 3 compara los extremos composicionales reportados y muestra que el techo máximo de material no silíceo varía entre 0,8 y 10,2 kg por tonelada de bagazo (Jaramillo-Vélez et al., 2025; Ndikumana et al., 2025).

Figura 3
Composición de la SCBA y techo de material no silíceo por tonelada de bagazo procesado



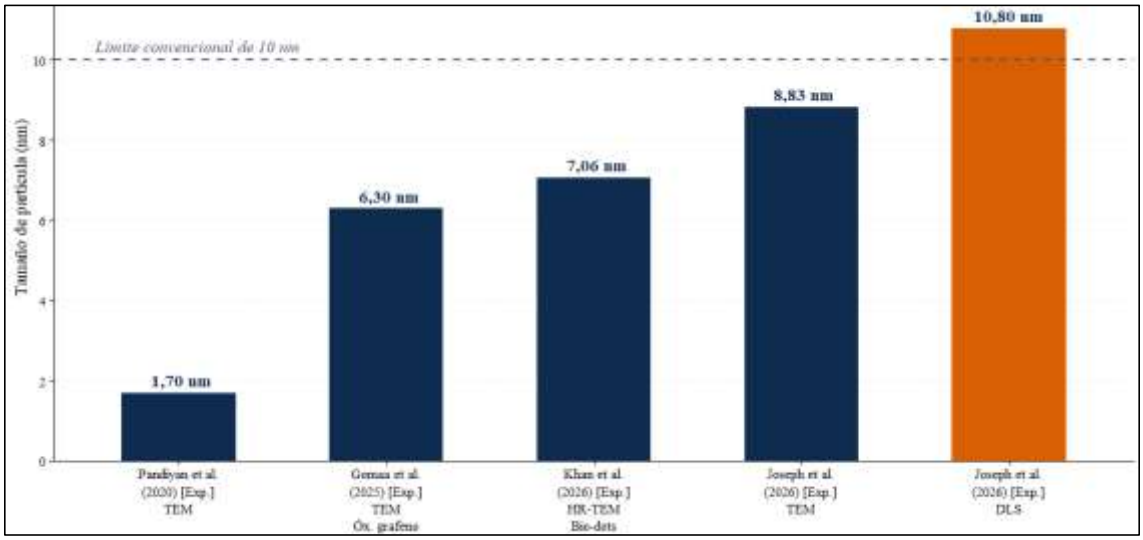
Nota: Elaboración propia. (a) Rangos de sílice (SiO_2) reportados por Ndikumana et al. (2025) y Jaramillo-Vélez et al. (2025). (b) Balance sobre 25 kg de ceniza por tonelada de bagazo; la fracción no silícea (0,8 a 10,2 kg/t) incluye carbono inquemado y óxidos metálicos. SCBA (ceniza de bagazo de caña de azúcar).

En cuanto a la estabilidad coloidal, tanto la sílice extraída de la SCBA (mediante lavados secuenciales con ácido clorhídrico e hidróxido de sodio) como los puntos de carbono de bagazo poseen superficies hidrofílicas, es decir, con afinidad por el agua, lo que provoca que se agrupen y sedimenten en aceites no polares. Sin embargo, recubrir las nanopartículas de SCBA con un 20% en peso (% p/p porcentaje peso/peso, equivalente a gramos de modificador por cada 100 g de mezcla) de ácido oleico invierte su afinidad hacia el aceite (carácter lipofílico) y mantiene dispersiones estables en parafina líquida durante 15 días (Jaramillo-Vélez et al., 2025).

Respecto a la síntesis desde bagazo de caña, los estudios coinciden en que métodos accesibles y de bajo consumo energético como la vía hidrotermal en reactor cerrado o la irradiación en microondas doméstico durante apenas 5 minutos permiten obtener puntos de carbono por debajo de 10 nm, mientras que el tratamiento con urea y pirólisis a 800 °C incorpora nitrógeno para mejorar la porosidad y la reactividad química. En términos económicos, producir biochar de bagazo cuesta alrededor de 0,93 dólares estadounidenses (USD) por kg, cifra competitiva frente a

otros residuos agrícolas como la paja de arroz (Jirimali et al., 2022; Joseph et al., 2026; Mod et al., 2024; Pandiyan et al., 2020; Pongpanyanate et al., 2024).

Debido a que el tamaño nanométrico define si las partículas pueden alojarse en las microirregularidades del metal, la Figura 4 contrasta los diámetros reportados según la técnica de medición. Se observa que, mientras la microscopía electrónica de transmisión (TEM y HR-TEM) confirma partículas sólidas inferiores a 9 nm en todos los casos, la dispersión dinámica de luz (DLS) mide también la capa de líquido adherida alrededor de la partícula, elevando el diámetro aparente justo por encima del límite convencional de 10 nm (Gomaa et al., 2025; Joseph et al., 2026; Khan et al., 2026; Pandiyan et al., 2020).



Nota. Elaboración propia a partir de cuatro estudios experimentales primarios [Exp.]: Pandiyan et al. (2020), Gomaa et al. (2025), Khan et al. (2026) y Joseph et al. (2026). Gomaa et al. (2025) utilizan puntos cuánticos de óxido de grafeno como referencia tribológica en aceite mineral. TEM: microscopía electrónica de transmisión; HR-TEM: TEM de alta resolución; DLS: dispersión dinámica de luz.

Para responder a la pregunta científica orientadora sobre fricción, desgaste y estabilidad, la Tabla 4 reúne los resultados de cinco estudios experimentales primarios y de una revisión bibliográfica previa, diferenciando explícitamente la naturaleza de cada fuente y las condiciones de cada sistema evaluado. En contacto sólido sin aceite, los carbones activados de bagazo con alta área superficial y predominio de poros medianos (mesoporos) reducen el COF en 26,1 % frente al biochar a 800 °C y estrechan la huella de desgaste sobre acero al formar un tribofilm protector. En sistemas líquidos específicos, los Bio-dots vegetales en aceite de Pongamia mantienen una fuerte repulsión eléctrica entre partículas (potencial zeta de −27 mV, señal de buena estabilidad durante un mes sin sedimentación), recortan el COF hasta en 34 % y reducen a la mitad la pérdida de masa por desgaste frente al aceite puro; en aceite mineral, los puntos de óxido de grafeno alcanzan reducciones de 14,6 % en COF y 9,2 % en WSD, mientras que en sistemas polares basados en

polietilenglicol (PEG) las disminuciones reportadas son mayores (Gomaa et al., 2025; Jiao et al., 2023; Khan et al., 2026; Kumar et al., 2022; Molza et al., 2024; Taghipour & Tabandeh, 2025).

Tabla 4

Síntesis cuantitativa del desempeño tribológico, estabilidad coloidal y rugosidad superficial

Estudio y tipo	Nanomaterial y dosis	Fluido de referencia y ensayo	Efecto en COF y desgaste	Estabilidad y Ra
Molza et al. (2024) [Experimental]	Carbón activado de bagazo (sólido)	Ref.: biochar 800 °C (acero AISI 52100; 10 N, 1 Hz, 1000 ciclos)	COF baja de 0,115 a 0,085 (−26,1 %); huella baja de ~250 a ~170 µm.	Ra inicial: 100 nm; tribofilm ~0,2 µm; mesoporos >40 %.
Khan et al. (2026) [Experimental]	Bio-dots vegetales (7,06 nm; 0,10–0,15 % p/p)	Ref.: aceite vegetal de Pongamia puro (ASTM G99, 20–40 N; bloque-anillo, 66,7–133,3 N)	COF reducido hasta 34 %; pérdida de masa por desgaste −50 %.	Potencial zeta −27 mV (estable 1 mes); conductividad térmica +36,1 %.
Gomaa et al. (2025) [Experimental]	Puntos de óxido de grafeno (6,3 nm; 0,10 % p/p)	Ref.: aceite mineral puro (cuatro bolas ASTM D4172, 392 N)	COF reducido en 14,6 %; WSD promedio reducido en 9,2 %.	Aglomeración y abrasión si la dosis supera 1,0–1,5 % p/p.
Kumar et al. (2022) [Revisión]	Puntos de carbono funcionalizados (0,2–2,0 % p/p)	Ref.: PEG-200 y bases acuosas puras (ej. 40 N; ensayos compilados)	COF reducido 35,5 % a 84 %; desgaste reducido 36,4 % a 91 %.	Exige modificación superficial para dispersarse en aceites.
Jiao et al. (2023) [Experimental]	Nanofluido de puntos de carbono (40 % p/p)	Ref.: PEG 400 puro sobre compuesto epoxi/h-BN (900 s)	COF mínimo estable de 0,028 (−50 % frente al PEG 400 puro).	Superar 40 % p/p provoca agregación y desgaste abrasivo.

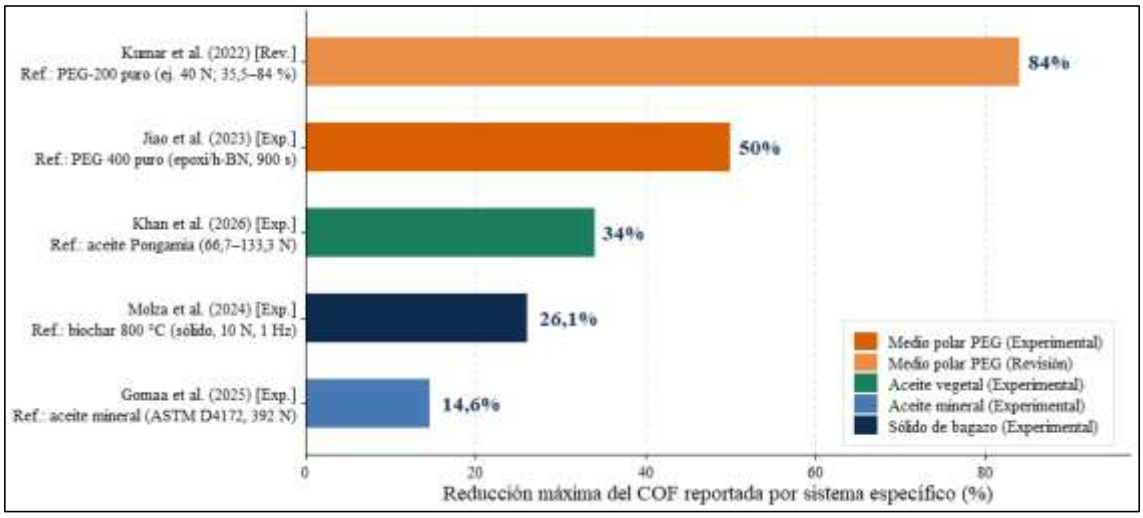
Estudio y tipo	Nanomaterial y dosis	Fluido de referencia y ensayo	Efecto en COF y desgaste	Estabilidad y Ra
Taghipour & Tabandeh (2025) [Experimental]	Nano-biochar de bagazo (molienda mecánica)	Ref.: aceite base lubricante puro (40 y 100 °C)	Mejora transferencia térmica; sin ensayo directo de COF o WSD.	Mayor molienda reduce aglomeración; leve alza de viscosidad.

Nota. Elaboración propia. Se distingue entre estudios experimentales primarios [Experimental] y datos compilados en una revisión previa [Revisión]. Kumar et al. (2022) compila ensayos anteriores a 2022 y no duplica ninguno de los estudios experimentales de 2023–2026 incluidos en esta tabla. % p/p: porcentaje peso/peso (gramos de aditivo por cada 100 g de mezcla); COF: coeficiente de fricción; WSD: diámetro de huella de desgaste; Ra: rugosidad superficial promedio; PEG: polietilenglicol; ASTM: American Society for Testing and Materials (normas estandarizadas de fricción y desgaste); µm: micrómetros.

Para comparar cómo varía la reducción de la fricción según el fluido de referencia y las condiciones de prueba de cada sistema específico, la Figura 5 presenta el máximo descenso del COF diferenciando los cuatro estudios experimentales de los rangos compilados en la revisión de Kumar et al. (2022). Cada barra corresponde a una configuración propia de carga, par de materiales y medio de referencia, por lo que las cifras reflejan el comportamiento de sistemas específicos y no valores intercambiables entre sí (Gomaa et al., 2025; Jiao et al., 2023; Khan et al., 2026; Kumar et al., 2022; Molza et al., 2024).

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1890-1908, ISSN: 3103 – 1315

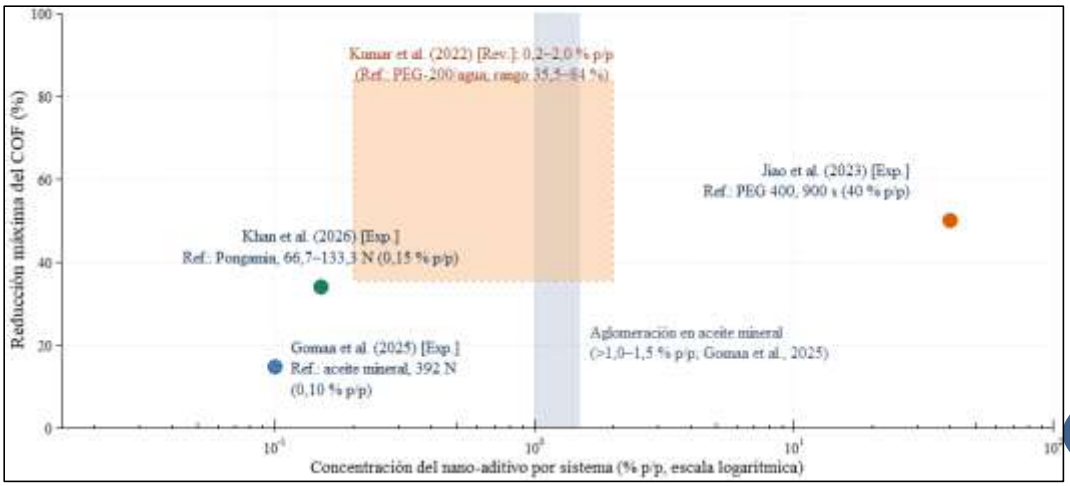
Figura 5
Reducción máxima del coeficiente de fricción según el estudio y el tipo de medio



Nota. Elaboración propia. [Exp.]: dato directo de estudio experimental primario; [Rev.]: dato recuperado de revisión previa sin duplicar ensayos experimentales de esta RSL. En Kumar et al. (2022) se grafica el límite superior del rango compilado en PEG-200 (35,5–84 %). Cada valor se compara frente a su fluido o material de referencia indicado en el eje vertical. COF: coeficiente de fricción; PEG: polietilenglicol; ASTM: American Society for Testing and Materials.

De igual modo, la concentración óptima depende del sistema específico analizado. La Figura 6 relaciona la dosis del nano-aditivo (% p/p, en escala logarítmica) con la reducción máxima del COF junto con el fluido de referencia y la carga de cada ensayo. Mientras que en los sistemas aceitosos evaluados el mejor desempeño se concentra en dosis muy bajas (0,10 % p/p en aceite mineral y 0,15 % p/p en aceite de Pongamia) antes de entrar en aglomeración sobre 1,0–1,5 % p/p, los sistemas polares en PEG admiten concentraciones mucho mayores sin precipitar (Gomaa et al., 2025; Jiao et al., 2023; Khan et al., 2026; Kumar et al., 2022).

Figura 6
Relación entre la concentración del nano-aditivo y la reducción máxima del COF



Nota. Elaboración propia. Los puntos sólidos representan estudios experimentales primarios [Exp.] con su fluido de referencia y condiciones de prueba; el recuadro discontinuo muestra el rango compilado en la revisión [Rev.] de Kumar et al. (2022) sin duplicar ensayos primarios incluidos, y la franja gris indica la zona de aglomeración observada en aceite mineral (>1,0–1,5 % p/p). PEG: polietilenglicol; % p/p: porcentaje peso/peso; COF: coeficiente de fricción.

3.5 Vacíos y tendencias emergentes identificados

La revisión deja al descubierto una brecha científica central: a la fecha, no existe ningún estudio experimental que fabrique Bio-dots directamente a partir de ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA) para probarlos como aditivos antidesgaste en un lubricante. La evidencia disponible cubre las tres piezas del problema por separado, sin unirlas todavía en una misma investigación:

- **Obtención de Bio-dots desde bagazo sin quemar:** existen estudios que producen puntos de carbono menores de 10 nanómetros (nm) a partir de bagazo crudo, pero enfocados en usos ópticos o antimicrobianos, sin ensayos de fricción ni desgaste (Joseph et al., 2026; Pandiyan et al., 2020).
- **Estabilidad de nanopartículas de SCBA en aceite:** se ha demostrado que las nanopartículas extraídas de esta ceniza pueden mantenerse dispersas en aceites si se recubren con ácido oleico, pero esos trabajos obtienen sílice y no puntos de carbono (Jaramillo-Vélez et al., 2025).
- **Pruebas de fricción y desgaste con nanocarbonos:** los experimentos que confirman reducciones claras del rozamiento y el desgaste utilizan carbón activado de bagazo en contacto en seco o Bio-dots obtenidos de otras plantas (Khan et al., 2026; Molza et al., 2024).

A esto se suman dos tareas pendientes en la literatura: por un lado, faltan mediciones estandarizadas de la rugosidad superficial promedio (Ra) antes y después de cada prueba, así como evaluaciones que comprueben si las partículas siguen suspendidas sin asentarse durante más de 30 días frente a cambios reales de temperatura; por otro lado, todavía no se estudia si estos nano-aditivos son compatibles con los demás aditivos que ya traen los lubricantes comerciales cuando trabajan bajo altas presiones.

4. Discusión

En respuesta al objetivo de esta revisión, la evidencia confirma que todavía no existe ningún ensayo que recorra la secuencia completa desde la ceniza de bagazo de caña (SCBA) hasta un lubricante probado en contacto deslizante. Por ello, los argumentos a favor del aprovechamiento de la SCBA provienen de evidencia indirecta obtenida por separado en bagazo crudo, sílice de ceniza y otros nanocarbonos, lo que permite formular la viabilidad de los Bio-dots de SCBA como una hipótesis técnicamente razonable pero pendiente de verificación experimental.

Al analizar los mecanismos en juego, el desempeño antidesgaste de los Bio-dots se explica por la combinación de su tamaño inferior a 10 nm (Figura 4) y su química superficial. Al ser mucho más

pequeños que las crestas microscópicas del acero, se comportan como pequeños rodamientos que suavizan el deslizamiento, rellenan los microsurcos desgastados (efecto mending) y ayudan a consolidar una película protectora de carbono (tribofilm) que separa las superficies metálicas (Gomaa et al., 2025; Joseph et al., 2026; Khan et al., 2026; Rahman et al., 2022).

En los carbones porosos obtenidos de bagazo, la arquitectura interna cumple un papel igual de determinante que la composición química. La literatura sugiere que una red abundante de poros medianos (mesoporos) y elevada área superficial facilita que la partícula se exfolie y se compacte bajo presión formando una capa lubricante continua; por el contrario, un exceso de poros diminutos (microporos) vuelve rígida a la partícula y empeora la fricción (Molza et al., 2024).

Por otro lado, el balance de masa de la SCBA (Figura 3) obliga a replantear cómo se aprovecha este residuo. Como la combustión en caldera consume casi todo el carbono original, la ceniza es ante todo una fuente de sílice; si se añadiera sin depurar a un lubricante, las partículas duras de sílice podrían rayar el metal por abrasión. En cambio, separar primero la sílice, un coproducto comercializable por sí mismo, y recubrir la superficie con ácido oleico resuelve tanto el riesgo abrasivo como la tendencia a flocular (es decir, formar grumos) en medios aceitosos (Jaramillo-Vélez et al., 2025; Joseph et al., 2026; Khan et al., 2026; Kumar et al., 2022; Ndikumana et al., 2025).

El contraste entre sistemas específicos visible en las Figuras 5 y 6 deja además dos lecciones metodológicas prácticas. Primera, las mejoras porcentuales más altas registradas en sistemas polares (PEG) frente a aceites no pueden extrapolarse ni compararse de forma aislada, pues dependen del fluido de referencia, la carga aplicada y la fricción inicial de cada ensayo; por ello, futuros trabajos deben informar siempre el COF absoluto antes y después de la prueba. Segunda, en los aceites evaluados la ventana de dosis útil resultó muy estrecha: añadir demasiado aditivo provoca que las nanopartículas se aglomeren y actúen como abrasivos, revirtiendo el beneficio (Gomaa et al., 2025; Jiao et al., 2023; Khan et al., 2026; Kumar et al., 2022).

Desde el punto de vista práctico, estos hallazgos permiten proponer una ruta experimental de tres pasos para poner a prueba la hipótesis de los Bio-dots de SCBA: primero, un lavado controlado con ácido y base para separar la sílice y aislar el carbono residual; segundo, la transformación de ese carbono (solo o mezclado con bagazo) en Bio-dots mediante calentamiento hidrotermal o en microondas con aporte de nitrógeno; y tercero, un recubrimiento con ácido oleico antes de dispersarlos en un bio-aceite y evaluarlos bajo normas estandarizadas de la American Society for Testing and Materials (ASTM), midiendo la rugosidad superficial promedio (Ra) antes y después de la prueba (Jaramillo-Vélez et al., 2025; Joseph et al., 2026; Pongpanyanate et al., 2024).

Esta revisión debe interpretarse teniendo en cuenta sus limitaciones: dos textos completos no pudieron recuperarse por barrera de pago, la búsqueda abarcó publicaciones de 2020 a 2026 y la diversidad de equipos de ensayo, cargas y fluidos impidió combinar los resultados en un

metaanálisis estadístico. Además, al basarse en evidencia indirecta de precursores análogos, las proyecciones sobre la SCBA no sustituyen la experimentación directa. Estos límites orientan las líneas futuras hacia ensayos con ceniza real de ingenios azucareros, el estudio de combinaciones nanométricas de carbono y sílice, y la evaluación ambiental completa de su producción (Mod et al., 2024; Shah et al., 2026).

En conjunto, la evidencia indirecta reunida respalda como hipótesis de trabajo prometedora la conversión de la ceniza de bagazo de caña en Bio-dots recubiertos para lubricantes más limpios, cuya viabilidad real deberá confirmarse en laboratorio integrando purificación mineral e ingeniería de superficies.

5. Conclusiones

La evidencia indirecta integrada en esta revisión procedente de estudios sobre bagazo crudo, sílice extraída de ceniza y otros nanocarbonos confirma que los puntos de carbono de origen vegetal y los carbones nanoestructurados reducen la fricción y el desgaste en sistemas lubricados específicos al actuar como rodamientos diminutos, rellenar microsurcos y formar películas protectoras. El aporte principal de este trabajo consiste en comprobar de forma verificable que aún no existen estudios experimentales que produzcan Bio-dots directamente desde ceniza de bagazo de caña de azúcar para probarlos en lubricantes, identificando al alto contenido de sílice y a la falta de afinidad natural con el aceite como los dos obstáculos técnicos decisivos.

En consecuencia, la viabilidad de emplear Bio-dots derivados de ceniza de bagazo como nano-aditivos antidesgaste debe entenderse hoy como una hipótesis técnicamente fundamentada, pero pendiente de validación experimental. Los próximos trabajos deberán someter a prueba en laboratorio la secuencia propuesta: extracción previa de sílice, síntesis verde de Bio-dots y recubrimiento con ácido oleico bajo normas estandarizadas de la American Society for Testing and Materials (ASTM), reportando el coeficiente de fricción absoluto, la evolución de la rugosidad superficial promedio, la estabilidad coloidal a mediano plazo y su costo real en formulaciones comerciales.

6. Referencias

Gomaa, I., Elsoudy, S., Elmahgary, M. G., & Abdel-Rehim, A. A. (2025). Reducing friction in machine oil via cesium-hybridized graphene oxide quantum dot additives. *Scientific Reports*, *15*(1), 43584. https://doi.org/10.1038/s41598-025-30201-3

Jaramillo-Vélez, D., Ochoa-Castaño, M., Flórez-Caro, A., Botero, L. D., Ureña-Benavides, E., Valencia-Cardona, R. A., Velásquez-Cock, J. A., & Gómez-Hoyos, C. (2025). Green Synthesis of Silica Nanoparticles from Sugarcane Bagasse Ash for Stable Pickering Oil-in-Water Emulsions. *Molecules*, *30*(22), 4464. https://doi.org/10.3390/molecules30224464

Jiao, C., Cai, T., Chen, H., Ruan, X., Wang, Y., Gong, P., Li, H., Atkin, R., Yang, F., Zhao, H., Nishimura, K., Jiang, N., & Yu, J. (2023). A mucus-inspired solvent-free carbon dot-based nanofluid triggers significant tribological synergy for sulfonated h-BN reinforced epoxy composites. *Nanoscale Advances*, *5*(3), 711-724. https://doi.org/10.1039/d2na00689h

Jirimali, H., Singh, J., Boddula, R., Lee, J.-K., & Singh, V. (2022). Nano-Structured Carbon: Its Synthesis from Renewable Agricultural Sources and Important Applications. *Materials*, *15*(11), 3969. https://doi.org/10.3390/ma15113969

Joseph, J., Ajay, A., Varghese, C., John, B., & Cherian, P. (2026). Sustainable synthesis of carbon dots from sugarcane bagasse for anti-counterfeiting and antimicrobial applications. *Next Materials*, *12*, 102061. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.102061

Khan, M. A., Shetty, A. R., Aroor, G., & Navada, M. K. (2026). Green carbon quantum dots as eco-friendly nano-additives for tribological enhancement of Pongamia oil. *RSC Advances*, *16*(39), 44585-44596. https://doi.org/10.1039/d6ra03760g

Kumar, V. B., Sahu, A. K., & Rao, K. B. S. (2022). Development of Doped Carbon Quantum Dot-Based Nanomaterials for Lubricant Additive Applications. *Lubricants*, *10*(7), 144. https://doi.org/10.3390/lubricants10070144

Mod, B., Baskar, A. V., Bahadur, R., Tavakkoli, E., Van Zwieten, L., Singh, G., & Vinu, A. (2024). From cane to nano: Advanced nanomaterials derived from sugarcane products with insights into their synthesis and applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, *25*(1), 2393568. https://doi.org/10.1080/14686996.2024.2393568

Molza, A., Bilas, P., Nomède-Martyr, N., Césaire, T., Yacou, C., Gaspard, S., & Thomas, P. (2024). Biomass-Derived Carbons as Friction Reducing Additives for Lubricants: Tribological Properties of Biochars and Activated Carbons Obtained from Sugar Cane Bagasse. *Lubricants*, *12*(9), 308. https://doi.org/10.3390/lubricants12090308

Ndikumana, S., Tanane, O., Aichi, Y., Latifa, E. F., & Goudali, L. (2025). Innovative Applications of Sugarcane Bagasse in the Global Sugarcane Industry. *Processes*, *13*(12), 3796. https://doi.org/10.3390/pr13123796

Pandiyan, S., Arumugam, L., Srirengan, S. P., Pitchan, R., Sevugan, P., Kannan, K., Pitchan, G., Hegde, T. A., & Gandhirajan, V. (2020). Biocompatible carbon quantum dots derived from sugarcane industrial wastes for effective nonlinear optical behavior and antimicrobial

activity applications. *ACS Omega*, *5*(47), 30363-30372. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03290

Pongpanyanate, K., Roddecha, S., Piyanirund, C., Phraewphiphat, T., & Hasin, P. (2024). Dispersed MnO2 nanoparticles/sugarcane bagasse-derived carbon composite as an anode material for lithium-ion batteries. *RSC Advances*, *14*(4), 2354-2368. https://doi.org/10.1039/d3ra04008a

Rahman, M. M., Islam, M., Roy, R., Younis, H., AlNahyan, M., & Younes, H. (2022). Carbon nanomaterial-based lubricants: Review of recent developments. *Lubricants*, *10*(11), 281. https://doi.org/10.3390/lubricants10110281

Shah, R., Marussich, K., Kabir, M. H., & Liang, H. (2026). Tribological applications of recycled and waste materials: A review of recent advances and future directions. *Lubricants*, *14*(3), 104. https://doi.org/10.3390/lubricants14030104

Taghipour, A., & Tabandeh, N. (2025). Experimental study on the effect of speed and time parameters on the synthesis of nanoparticles produced from sugarcane bagasse (nano-biochar) using mechanical milling and their impact on the physical and thermal properties of nano-lubricants. *Journal of Energy Conversion*, *12*(1), 1 EP - 15. https://doi.org/10.82377/jeed.2025.2.546