



REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 3, Número 1
Enero-Marzo 2026

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, www.omniscens.com

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 1
enero-marzo 2026

Publicación trimestral
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: admin@omniscens.com

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.



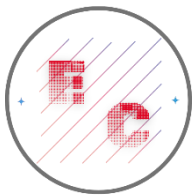
Copyright © 2026: Los autores



9773061781003

Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 3, Núm. 1, enero-marzo 2026, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, admin@omniscens.com, Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 enero 2026.



Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 1, 2026, enero-marzo

DOI: <https://doi.org/10.71112/wz9q4352>

**USO DE MATERIALES DE CONTROL DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN (LCM) EN
LA PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS: ARTÍCULO DE REVISIÓN**

**USE OF LOST CIRCULATION CONTROL (LCM) MATERIALS IN OIL WELL
DRILLING: A REVIEW ARTICLE**

Nicómedes Saavedra-Arancibia

Mirna Villegas

Sara Vladislavic Mendoza

Deyvi Bustamante Pérez

Silverio Arancibia

Bolivia

Uso de materiales de control de pérdidas de circulación (LCM) en la perforación de pozos petroleros: artículo de revisión

Use of lost circulation control (LCM) materials in oil well drilling: a review article

Nicómedes Saavedra Arancibia¹

saavedra.nicomedes@usfx.bo

<https://orcid.org/0009-0003-9354-1606>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

Mirna Villegas

villegas.mirna@usfx.bo;

<https://orcid.org/0009-0000-1039-4259>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

Sara Vladislavic Mendoza

vladislavic.sara@usfx.bo;

<https://orcid.org/0009-0008-7558-1205>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

Deyvi Bustamante Pérez

bustamante.deyvi@usfx.bo @usfx.bo;

<https://orcid.org/0009-0008-6484-7362>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

Silverio Arancibia

arancibia.silverio14@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-1988-1407>

Facultad de Ciencias y Tecnología,
Universidad San Francisco Xavier (USFX),
Sucre, Bolivia

¹ Correspondencia

RESUMEN

La pérdida de circulación durante la perforación de pozos petroleros representa un desafío técnico y económico al comprometer la estabilidad del pozo y la seguridad de la operación. Este estudio tuvo como objetivo revisar críticamente los materiales de control de pérdidas (LCM) empleados entre 2021 y 2025. Se aplicó el protocolo PRISMA 2020 a 171 artículos de Scopus y ScienceDirect, descartando duplicados y criterios de inclusión, y se analizaron 22 estudios mediante Rayyan y VOSviewer. Los resultados mostraron tres grupos de LCM: tradicionales que componen las fibras vegetales y partículas minerales con reducción de filtrado hasta 40 %; híbridos y cementantes que son geles termoestables, EICP, cementos MOS y tixotrópicos con eficacias superiores al 80 % hasta 150 °C y 1000 psi; e inteligentes como las espumas SMP, geles autocurativos, microcápsulas y microesferas elastoméricas con adaptabilidad dinámica, recuperación de forma > 98 % y sellados hasta 8,97 MPa. La discusión evidencia una evolución desde soluciones básicas hacia sistemas híbridos e inteligentes, y destaca la necesidad de incorporar inteligencia artificial para optimizar la selección de LCM en tiempo real. Se concluye que, pese a los avances, es imprescindible estandarizar protocolos de ensayo, validar a escala comercial e integrar herramientas predictivas para un control de pérdidas más eficiente.

Palabras clave: Materiales tradicionales, materiales híbridos, materiales inteligentes polímeros, filtración, estabilidad.

ABSTRACT

Lost circulation during oil well drilling represents a technical and economic challenge, compromising wellbore stability and operational safety. This study aimed to critically review the loss control materials (LCMs) used between 2021 and 2025. The PRISMA 2020 protocol was applied to 171 articles from Scopus and ScienceDirect, discarding duplicates and meeting

inclusion criteria. 22 studies were analyzed using Rayyan and VOSviewer. The results showed three groups of LCMs: traditional ones composed of plant fibers and mineral particles with filtration reduction up to 40%; hybrid and cementitious ones consisting of thermosetting gels, EICP, MOS cements, and thixotropic cements with efficiencies greater than 80% up to 150°C and 1000 psi; and smart systems such as SMP foams, self-healing gels, microcapsules, and elastomeric microspheres with dynamic adaptability, shape recovery >98%, and sealing up to 8.97 MPa. The discussion highlights an evolution from basic solutions to hybrid and smart systems and highlights the need to incorporate artificial intelligence to optimize LCM selection in real time. It is concluded that, despite advances, it is essential to standardize testing protocols, validate on a commercial scale, and integrate predictive tools for more efficient loss control.

Keywords: Traditional materials, hybrid materials, smart polymer materials, filtration, stability.

Recibido: 27 enero 2026 | Aceptado: 9 febrero 2026 | Publicado: 10 febrero 2026

INTRODUCCIÓN

La pérdida de circulación durante las operaciones de perforación de pozos representa uno de los principales desafíos técnicos en la industria del petróleo, siendo responsable de un significativo porcentaje de retrasos, sobrecostos y riesgos operacionales. Este fenómeno ocurre cuando el fluido de perforación se pierde hacia la formación a través de zonas fracturadas, cavernosas o altamente permeables, y puede afectar gravemente la estabilidad del pozo y la seguridad de las operaciones (Azadivash, 2025; Feng et al., 2024). Por lo tanto, el manejo eficiente de este fenómeno no solo es una necesidad técnica, sino una prioridad económica y de seguridad.

Para mitigar esta problemática, se han desarrollado materiales conocidos como Lost Circulation Materials (LCM), los cuales tienen la capacidad de sellar temporal o

permanentemente las zonas de pérdida. Tradicionalmente, estos materiales incluían fibras naturales, hojuelas, y materiales particulados como el carbonato de calcio, serrín o mica. Sin embargo, en los últimos años se han introducido tecnologías avanzadas como los polímeros con memoria de forma, geles autoreparables, microcápsulas encapsuladas, nanomateriales funcionales, y soluciones híbridas que combinan componentes orgánicos e inorgánicos (Kibikas et al., 2024; Yadav et al., 2024). La selección del material más adecuado depende de factores como el tipo de formación, el tamaño y forma de la pérdida, las propiedades reológicas del fluido y las condiciones de presión temperatura del pozo.

La detección temprana y diagnóstico preciso de pérdidas en ambientes complejos (formaciones fracturadas, pozos horizontales, zonas salinas) sigue siendo un reto operacional clave. Estudios como Albattat et al. (2022) y Yang J. et al. (2022) demuestran que diagnósticos inadecuados aumentan el fracaso de las intervenciones, destacando la urgencia de desarrollar herramientas de diagnóstico más precisas y proactivas.

En condiciones extremas como pozos de alta temperatura y alta presión (HTHP) o entornos geotérmicos, los LCM avanzados han mostrado un desempeño superior, incrementando la eficiencia en el control de pérdidas (Belayneh & Aadnøy, 2022). Su capacidad para adaptarse a cambios dinámicos en presión y temperatura los convierte en soluciones estratégicas para operaciones de alto riesgo.

De forma complementaria, se observa una tendencia creciente hacia la digitalización del diseño y selección de LCM, integrando datos de campo con simulaciones computacionales y modelos predictivos. Aunque el enfoque de este artículo no profundiza en la inteligencia artificial, es importante mencionar que herramientas basadas en IA están comenzando a aplicarse, donde la precisión en el control de pérdidas es crítica (Elmousalami & Sakr, 2024).

Los LCM avanzados han demostrado un desempeño superior en condiciones extremas en pozos HTHP, gracias a su capacidad de adaptación a cambios dinámicos de presión y

temperatura, optimizando el control de pérdidas (Belayneh & Aadnøy, 2022). Paralelamente, surge una tendencia hacia la digitalización en el diseño de LCM, integrando datos de campo con modelos predictivos, donde herramientas de IA aunque aún incipientes comienzan a aplicarse para mejorar la precisión en escenarios críticos (Elmousalami & Sakr, 2024).

Este artículo tiene como objetivo presentar una revisión crítica y sistemática sobre los materiales LCM aplicados en la perforación de pozos petroleros, clasificando los tipos de materiales, sus mecanismos de acción, eficacia bajo distintas condiciones operacionales, y las tendencias emergentes en su desarrollo e implementación.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica con el propósito de identificar y analizar los estudios más relevantes relacionados con materiales de control de pérdidas de circulación (LCM) aplicados en perforación de pozos petroleros. Para ello, se consultaron dos bases de datos indexadas: Scopus y ScienceDirect. La búsqueda se efectuó utilizando combinaciones de palabras clave como: “lost circulation materials”, “LCM”, “drilling fluids”, “wellbore stability”, “fluid loss control”, y “oil well drilling”, empleando operadores booleanos como AND y OR para refinar los resultados.

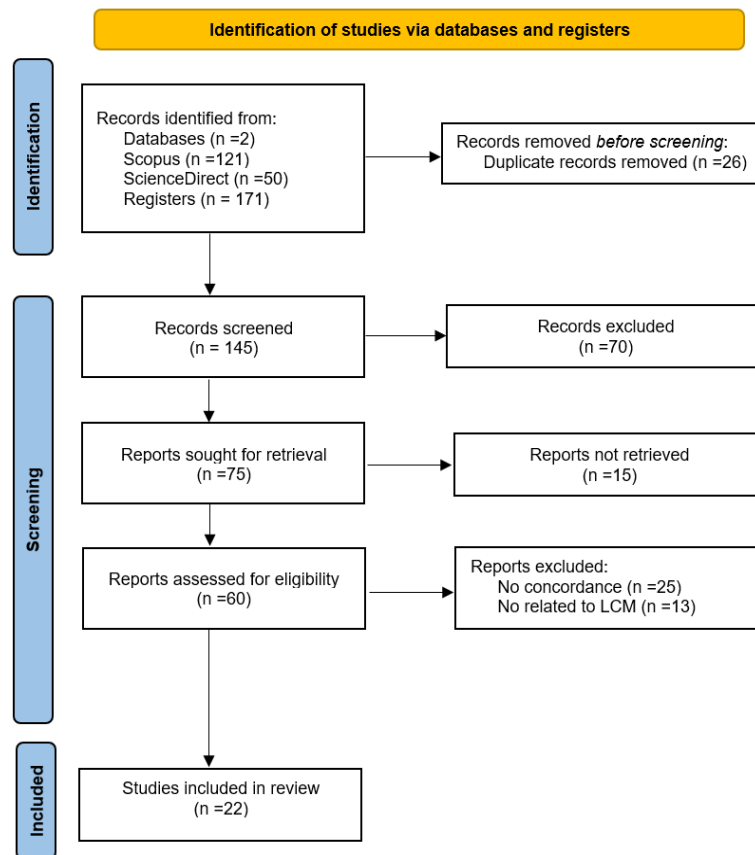
El rango temporal considerado fue entre los años 2021 y 2025, y se establecieron como criterios de inclusión: artículos originales de investigación, en idioma inglés. Se excluyeron artículos de revisión, capítulos de libro y duplicados. Esta búsqueda inicial arrojó un total de 171 artículos. Posteriormente, los artículos fueron exportados al software Rayyan, el cual facilitó el proceso de cribado y la identificación de 26 artículos duplicados, que fueron eliminados. Finalmente, se seleccionaron 22 artículos para su análisis completo, los cuales cumplían con los criterios de inclusión y abordaban directamente la temática del estudio.

Asimismo, se adoptó el protocolo PRISMA 2020 para estructurar el proceso de revisión sistemática, el cual permitió visualizar de forma clara y transparente el flujo de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los artículos (Haddaway et al., 2022). La figura correspondiente al diagrama de flujo PRISMA 2020 (Figura 1) resume cada etapa del proceso, indicando el número de artículos identificados, los duplicados eliminados y los criterios aplicados para la selección final.

Complementariamente, se utilizó el software VOSviewer 1.6.20, para realizar un análisis bibliométrico de los artículos incluidos, construyendo mapas de coocurrencia de palabras clave y redes de coautoría, con el objetivo de visualizar las tendencias temáticas predominantes y las colaboraciones académicas más significativas dentro del campo de estudio.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA 2020



RESULTADOS

En la Tabla 1, se presenta un resumen estructurado de los 22 artículos científicos seleccionados para este estudio. En ella se detallan el título, los autores, el resultado principal, el año de publicación y el Doi. Esta recopilación permite observar de forma comparativa la diversidad de enfoques, materiales utilizados, condiciones de aplicación y efectividad de las soluciones propuestas para el control de pérdidas de circulación en la perforación de pozos petroleros.

Tabla 1.

Artículos incluidos en el estudio

N°	Título	Autores	Resultado	Año	Doi
1	Breakthrough Solutions for Lost Circulation Control in Oilfield Drilling: Unleashing the Power of Biopolymer Modified Graphene and CaCO ₃ synergy	Ahmad, H.M. and Kamal, M.S. and Murtaza, M. and Al Nabbat, Y. and Al Arifi, S. and Mahmoud, M.	La mezcla de grafeno modificado con biopolímeros y CaCO ₃ reduce eficazmente las pérdidas de circulación en perforación petrolera, disminuyendo la filtración en más del 40% frente a métodos convencionales.	2024	10.2523/IPTC-24409-EA
2	Experimental investigation of PAM/PEI polymer mud for reducing lost circulation in high-temperature formations	Anyaezu, T.V.	El estudio demostró que el gel polimérico termoestable PAM/PEI (6% PAM + 1,25% PEI) reduce en un 80% las pérdidas de circulación en pozos petroleros y geotérmicos a 150°C, formando un sello elástico en 17 minutos.	2023	10.1016/j.geothermics.2023.102786
3	The Effect of Sugarcane Fibres and MICA as Loss Circulation	Ayodele, E. and Ezeonu, C. and Amuah, F.	La investigación demostró que la fibra de caña de azúcar local (3g/350ml)	2022	10.2118/211951-MS

	Material in Water Based Mud	and Sangoleye, D. and Ayodele, F.	supera a la mica importada en propiedades reológicas para controlar pérdidas de circulación, con resultados similares en filtrado y viscosidad.		
4	Experimental study on an oil-absorbing resin used for lost circulation control during drilling	Bai, Yingrui and Dai, Liyao and Sun, Jinsheng and Lv, Kaihe and Zhang, Qitao and Shang, Xiaosen and Zhu, Yuecheng and Liu, Chengtong.	La investigación desarrolló una resina autohinchable (2:1:1% de acrilato de butilo/metacrilato de estearilo/p-estirenosulfonato de sodio) que resuelve eficientemente las pérdidas de circulación en fluidos base petróleo.	2022	10.1016/j.petro.2022.110557
5	Incorporating Self-Degradable Fibers into High Performance High Strength Particulates to Combat Losses While Drilling Across Reservoir Section in Extended Reach Well in Middle East Field	Bamiduro, A. and Peres-Demarthon, G. and Phyoe, T.Z. and Pallapothu, S. and Pauferro, P. and Aghaguluyev, J.	El estudio desarrolló una píldora autodegradable a base de fibras y partículas solubles en ácido que demostró capacidad para sellar fracturas de hasta 10 mm soportando 1000 psi, reducir pérdidas de circulación en más del 95% y mantener la integridad del yacimiento.	2024	10.2118/220905-MS
6	A novel temperature-sensitive expandable lost circulation material based on shape memory epoxy foams to prevent losses in geothermal drilling	Cui, Kaixiao and Jiang, Guancheng and Xie, Chunlin and Yang, Lili and He, Yinbo and Shen, Xiulun and Wang, Xingxing	El estudio desarrolló un agente de taponamiento térmicamente sensible (SMP-LCM) basado en espuma epoxi con memoria de forma (SMEF) que demostró capacidad de expansión controlada (hasta 120,2%) y efectivo sellado en	2021	10.1016/j.geothermics.2021.102145

- | | | | | | |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------|
| | | | zonas de alta permeabilidad. | | |
| 7 | Effect of LCM and polymeric additives on mudcake and filtrate rheology parameters | Fritoli, Giovani de Souza and De Lai, Fernando César and Junqueira, Silvio Luiz de Mello | El estudio desarrolló un sistema LCM basado en carbonato de calcio (CaCO_3) y polímeros (CMC/XG) que demostró reducir eficazmente el volumen de filtrado en formaciones porosas. Los resultados mostraron que partículas más pequeñas de CaCO_3 (2-44 μm) y mayores concentraciones de LCM optimizan la formación del revoque, disminuyendo las pérdidas de circulación. | 2021 | 10.1016/j.petrol.2021.108948 |
| 8 | Epoxy resin microencapsulated by complex coacervation as physical-chemical synergetic lost circulation control material | Guo, P. and Qiu, Z. and Zang, X. and Zhong, H. and Zhao, X. and Zhang, Y. and Mu, T. | El estudio desarrolló microcápsulas de resina epoxi (gelatina/goma arábica) que, combinadas con partículas inertes, demostraron un taponamiento sinérgico eficaz: aumentaron la presión de sellado en 22,2% y redujeron las pérdidas de fluido en 50,8%, manteniendo estabilidad térmica hasta 200°C. | 2024 | 10.1016/j.energy.2024.130630 |
| 9 | Rapid bentonite-cement-oil hydration: Implications to fluid loss control | Hafez, Ahmed and Liu, Qi and Finkbeiner, Thomas and Moellendick, Timothy E. and | La investigación desarrolló un sistema combinado de bentonita-cemento-aceite que demostró un control eficiente de pérdidas en fracturas grandes mediante procesos | 2022 | 10.1016/j.petrol.2022.110615 |

- | | | | | | |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------|
| | | Santamarina, J. Carlos | de hidratación acelerada y formación de tapones estables, optimizando el balance entre fluidez y resistencia mecánica. | | |
| 10 | A High Molecular Polymer LCM to Cure Severe Losses While Drilling Shallow Aquifers in UAE | Hamdan, T. and Saraji, R. and Yang, T. and Al-Rahma, R. and Abdullah, D. and Al Nuaimi, M. and Zhou, C. and Hu, X. and Cheng, Y. and Guo, Y. and Zhang, X. | La investigación desarrolló un sistema compuesto de gel ZND y cemento que demostró controlar eficazmente las pérdidas totales en formaciones kársticas complejas (Simsima, EAU), superando a los métodos convencionales al formar un tapón estable que resiste la dilución y aísla los fluidos de perforación. | 2023 | 10.2118/214191-MS |
| 11 | Evaluation of Groundnut Shell and Yam Peel as a Loss Circulation Control Material in Drilling | Ishaku, Y. and Okafor, I. and Jakada, K. and Nzerem, P. and Salihu, A. | El estudio evaluó materiales locales para pérdidas de circulación (cáscara de ñame y mani) que demostraron propiedades reológicas comparables a los materiales importados, reduciendo costos y mejorando la eficiencia en operaciones de perforación según estándares API. | 2023 | 10.2118/217209-MS |
| 12 | Magnesium oxysulfate cement as a fastcuring agent in drilling fluids to solve the severe loss | Jiang, G. and Cui, K. and Dong, T. and Yang, L. and Quan, X. | La investigación desarrolló un sistema de cemento MOS ($\text{MgO-MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) que demostró controlar pérdidas severas en Xinjiang, | 2021 | 10.1080/10916466.2021.1891097 |

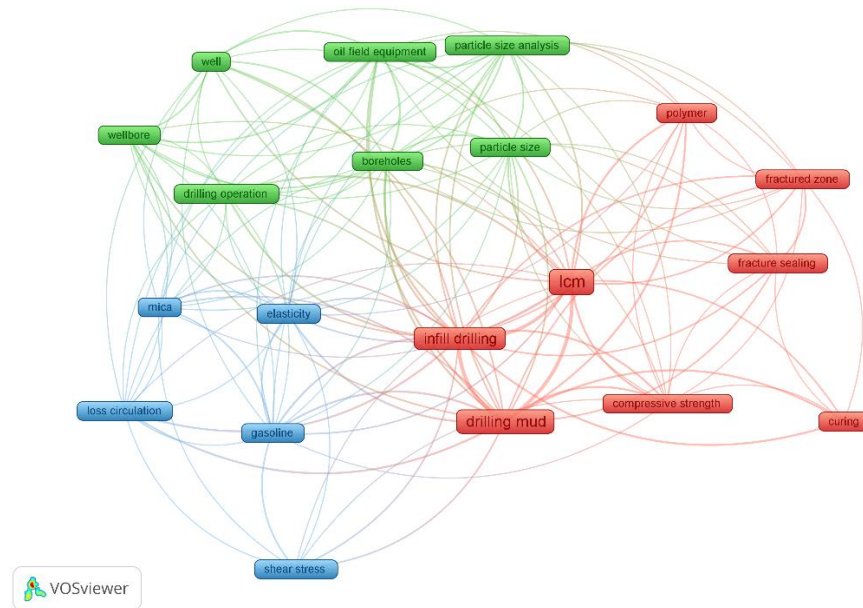
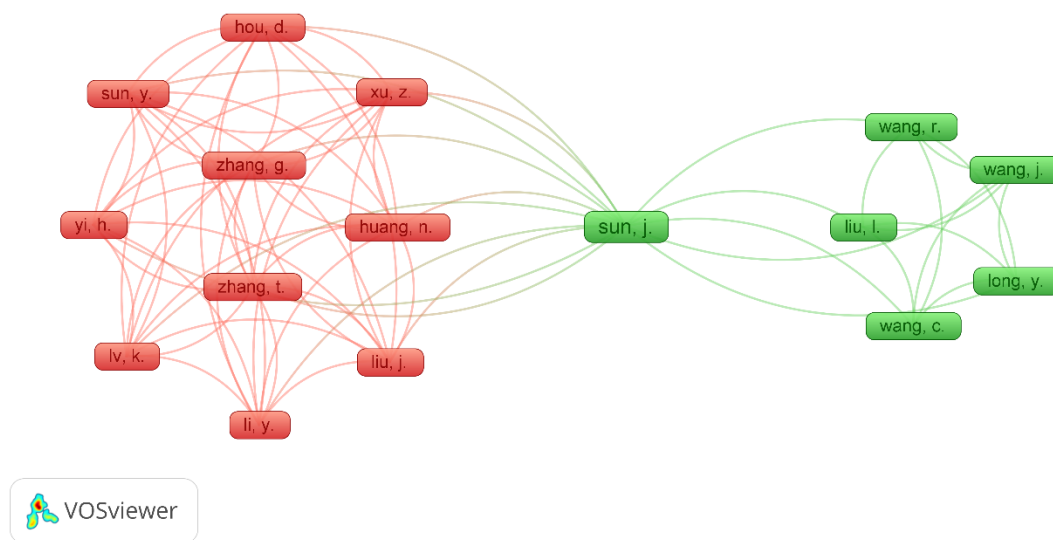
- logrando resistencia a compresión ajustable (>8 MPa) y tiempos de fraguado cortos (50-70°C), ofreciendo una solución ácido-soluble y rentable frente a métodos convencionales.
- 13** Evaluation of shape memory polyurethane as a drilling fluid lost circulation and fracture plugging material Lashkari, R. and Tabatabaei-Nezhad, S.A. and Husein, M.M. El estudio evaluó materiales de poliuretano con memoria de forma (SMPU LCM) que demostraron un 98,3% de recuperación de forma y capacidad para sellar fracturas con presiones de hasta 8,97 MPa, optimizando el taponamiento según la geometría de la fractura y el tipo de densificante utilizado. 2023 10.1016/j.j.geoen.2023.211445
- 14** Research on Silicone Rubber Material as a Lost Circulation Material for Antarctic Drilling Liu, J. and Sun, Y. and Sun, J. and Lv, K. and Huang, N. and Xu, Z. and Zhang, T. and Li, Y. and Zhang, G. and Yi, H. and Hou, D. El estudio desarrolló un LCM de caucho de silicona para condiciones antárticas que demostró mantener estabilidad estructural y propiedades mecánicas a -55°C, sellando eficientemente canales de pérdida en entornos de ultrabaja temperatura donde los LCM convencionales fallan. 2025 10.2118/223630-PA
- 15** Experimental study of a novel oil-based crosslinking-curing Liu, W. and Xu, Q. and Lin, C. and El estudio desarrolló un sistema OBCC-LCM (poliéter-isocianatos) que 2023 10.1080/10916466.2022.2092505

	lost circulation material for shale gas well	Yuan, Z. and Xu, X.	demostró controlar pérdidas en lutitas a 100-150°C, con fraguado ajustable (70-120 min), resistencia de 5.2-6.5 MPa y capacidad para sellar fracturas de 5 mm, superando a LCMs convencionales en perforación de gas de esquisto.		
16	Evaluating sealability of blended smart polymer and fiber additive for geothermal drilling with the effect of fracture opening size	Magzoub, Musaab and Anyaezu, Tobenna and Salehi, Saeed and Li, Guoqiang and Fan, Jizhou and Teodoriu, Catalin and Saleh, Fatemeh K. and Taleghani, Arash Dahi	La investigación evaluó un polímero con memoria de forma (SMP) para controlar pérdidas en pozos geotérmicos, demostrando que una concentración del 3-6% en peso logra sellar fracturas de 1000-3000 µm, mejorando la presión de sellado en 200 psi respecto a métodos convencionales.	2021	10.1016/j.petro.2021.108998
17	Wellbore Strengthening: Palm Date Seeds for Mitigating Circulation Losses and Effect of Salinity on Clay Swelling	Mohamed, A.H. and Sulaimon, A. and Jufar, S. and Manickam, V.	El estudio evaluó semillas de dátil de palma (DS) como material para pérdidas de circulación, demostrando que reducen el filtrado a 4.2-4.8 ml y forman tortas de lodo delgadas (1-3 mm), aunque con menor eficacia que otros LCMs, pero logran retener lodo en columnas de arena a alta profundidad de filtración.	2023	10.2118/217237-MS
18	Lost circulation mitigation using modified enzyme	Tariq, Zeeshan and Mahmoud,	El estudio desarrolló una solución EICP (1M urea/0.9M	2022	10.1016/j.petro.2021.110043

	induced calcite precipitation technique	Mohamed and Alahmari, Manar and Bataweel, Mohamad and Mohsen, Abdul	CaCl ₂ /0.1M MgCl ₂) que demostró reducir la permeabilidad en 99% y la porosidad en 20% en núcleos de caliza, mediante precipitación enzimática de calcita estable, ofreciendo un LCM innovador para controlar pérdidas de circulación.		
19	Highly Thixotropic Engineered Cement Solution Helps Overcome Lost Circulation While Drilling Deepwater Exploration Well	Velasco, A. and Segouffin, J. and Duarte, B. and Simental, S. and Rowe, M. and Major, J. and Toranzo, G.E. and Garcia, S.	El estudio implementó un sistema de cemento tixotrópico (HTEC) que resolvió pérdidas totales (500 Bbl/h) en aguas profundas de México, logrando sellado efectivo tras 7 horas de fraguado y permitiendo reanudar la perforación sin pérdidas adicionales, optimizando costos operativos.	2023	10.2118/216947-MS
20	Preparation and investigation of self-healing gel for mitigating circulation loss	Wang, R. and Wang, C. and Long, Y. and Sun, J. and Liu, L. and Wang, J.	La investigación desarrolló un gel autocurativo (lauril metacrilato-acrilamida-ácido acrílico/Fe ³⁺ /curdlan) que demostró una tenacidad de 30.2 kJ/m ³ y soporte de presión de 2.5 MPa, superando a geles convencionales al adaptarse dinámicamente a fracturas y evitar obstrucciones en entradas.	2023	10.46690/ager.2023.05.05
21	Application of Elastomer Microsphere Particles as Water-	Yang, L. and Ou, Z. and Chang, X. and Wu, J.	El estudio desarrolló microesferas elastoméricas PABD (poli (AMPS-BXSZ-	2025	10.2118/224416-PA

	Based Drilling Fluid Lost Circulation Material	and Chen, H. and Jiang, G. and Ma, J. and Dong, T. and Wu, Y. and Yu, C. and Feng, S.	DMDAAC)) que demostraron sellar eficientemente formaciones porosas (8-180 Darcy) y no consolidadas (malla 40-60) hasta 150°C, combinando alta tenacidad (interacciones iónicas multigradiante) y elasticidad para adaptarse dinámicamente a fracturas bajo presión.		
22	Novel polymeric organic gelator as lost circulation material for oil- based drilling fluids	Yang, Lili and Ma, Jiaying and Chang, Xiangyang and Wu, Yunpeng and Jiang, Guancheng and Qiu, Shixin and Kinkeyi Moukoko, Aurchy Dauriant	El estudio desarrolló un gelificante polimérico (SMHDV) para fluidos base petróleo que demostró reducir la filtración en un 68% a solo 1% de concentración y formar un organogel efectivo (>10%) para sellar fracturas entre 80-150°C, superando a LCMs comerciales como asfalto y carbonato de calcio.	2023	10.1016/j.jgeoen.2023.212414

Las Figuras 2 y 3 muestran los resultados del análisis bibliométrico realizado con el software VOSviewer. La Figura 2 destaca las palabras clave más frecuentes en la literatura revisada, revelando los principales enfoques temáticos sobre materiales LCM. La Figura 3 representa la red de coautoría, ilustrando las colaboraciones entre los autores más influyentes del campo.

Figura 2*Red de búsqueda de la concurrencia de palabras clave***Figura 3***Contribuciones realizadas entre las redes de coautores.*

DISCUSIÓN

Esta revisión sistemática, realizada bajo la metodología PRISMA 2020 y basada en el análisis de 22 estudios, evidencia progresos significativos en el desarrollo de materiales de control de pérdidas (LCM), particularmente en la integración de componentes orgánicos e inorgánicos y la incorporación de tecnologías emergentes. La evolución de estos materiales se categoriza en tres etapas clave: tradicionales, híbridos/avanzados e inteligentes, estos últimos orientados hacia soluciones asistidas por inteligencia artificial. Los hallazgos de los estudios analizados se presentan de manera estructurada para ofrecer una visión integral de sus aportes al campo.

Los materiales tradicionales de control de pérdidas emplean fibras y partículas naturales o inertes, destacándose por su bajo costo y disponibilidad. En el ámbito de fibras vegetales, Ayodele et al. (2022) comprobaron que la fibra de caña de azúcar local iguala o supera a la mica importada en propiedades reológicas, mientras que Ishaku et al. (2023) validaron la eficacia de cáscaras de ñame y maní, y Mohamed et al. (2023) demostraron que las semillas de dátil de palma reducen el filtrado y forman tortas de lodo delgadas. Respecto a partículas minerales, Fritoli et al. (2021) optimizaron el mud cake con CaCO_3 (2–44 μm) y polímeros (CMC/XG), Hafez et al. (2022) taponaron fracturas grandes mediante mezclas de bentonita-cemento-aceite, y Ahmad et al. (2024) lograron reducir la filtración en >40% con grafeno modificado y CaCO_3 .

Los materiales híbridos y sistemas cementantes representan un avance significativo en el control de pérdidas mediante la incorporación de polímeros termoestables, resinas y agentes cementantes. En el ámbito de polímeros y resinas, Anyaezu (2023) desarrolló un gel PAM/PEI que reduce pérdidas en un 80% a 150°C, mientras que Bai et al. (2022) crearon una resina autohinchable efectiva en fluidos base petróleo, y Bamiduro et al. (2024) diseñaron una “píldora” autodegradable con 95% de éxito en sellado de fracturas ≤ 10 mm. En cuanto a

sistemas cementantes, Hamdan et al. (2023) emplearon gel ZND-cemento para formaciones kársticas, Jiang et al. (2021) desarrollaron cemento MOS de fraguado rápido (>8 MPa a $50-70^{\circ}\text{C}$), y Tariq et al. (2022) lograron reducir la permeabilidad en 99% mediante precipitación enzimática de calcita (EICP). Adicionalmente, Velasco et al. (2023) evaluaron con éxito un cemento tixotrópico (HTEC) en aguas profundas, controlando pérdidas de 500 Bbl/h, y Liu et al. (2023) diseñaron un OBCC-LCM para lutitas con fraguado ajustable y resistencia de 5,2-6,5 MPa.

La nueva generación de materiales inteligentes y autorreparables para control de pérdidas incorpora tecnologías innovadoras como memoria de forma, geles autocurativos y microcápsulas, permitiendo adaptación dinámica a variaciones de presión y temperatura. En el ámbito de espumas y poliuretanos con memoria de forma, Cui et al. (2021) desarrollaron SMEF con capacidad de expansión del 120%, mientras que Lashkari et al. (2023) lograron un 98,3% de recuperación de forma y sellado efectivo a 8,97 MPa. En geles autocurativos, Wang et al. (2023) crearon un gel de lauril metacrilato-acrilamida con tenacidad de $30,2 \text{ kJ/m}^3$, y Guo et al. (2024) demostraron que microcápsulas de resina epoxi mejoran la presión de sellado en 22,2% y reducen pérdidas en 50,8%, manteniendo estabilidad hasta 200°C . Finalmente, en soluciones elastoméricas, Magzoub et al. (2021) sellaron fracturas de 1,000-3,000 μm incrementando presión en 200 psi, Yang L. et al. (2025) desarrollaron microesferas PABD para formaciones porosas (8-180 Darcy), Yang L. et al. (2023) crearon el gelificador SMHDV con reducción del 68% en filtración a 1% de concentración, y Liu J. et al. (2025) implementaron caucho de silicona funcional incluso a -55°C .

La adopción de la IA y digitalización en control de pérdidas, aunque emergente, destaca la necesidad crítica de herramientas avanzadas. Elmousalami & Sakr (2024) demuestran que los modelos de machine learning pueden optimizar la selección de LCM en tiempo real, mientras Albattat et al. (2022) y Yang et al. (2022) evidencian que los diagnósticos actuales son

insuficientes, proponiendo big data + sensórica avanzada para mejorarlos. Estos estudios pioneros sientan las bases para sistemas inteligentes de gestión de fluidos.

Esta revisión presenta limitaciones importantes: alcance restringido a publicaciones en inglés (2021-2025), posiblemente omitiendo avances recientes; predominio de estudios a escala de laboratorio (Ayodele et al., 2022; Cui et al., 2021) sin validación en operaciones reales; heterogeneidad en parámetros experimentales (temperatura, presión, tamaño de fractura) que dificulta comparaciones; y aplicaciones de IA aún preliminares (Elmousalami & Sakr, 2024). Pese a esto, los resultados evidencian una transición clara hacia materiales inteligentes, aunque su implementación práctica requerirá superar estas limitaciones.

CONCLUSIONES

El artículo desarrolla una revisión sistemática de la literatura científica sobre materiales para el control de pérdidas de circulación (LCM) en perforación de pozos petroleros, a partir de los reportes indexados en Scopus y ScienceDirect entre 2021 y 2025, seleccionados siguiendo el protocolo PRISMA 2020. De los 171 artículos iniciales identificados, tras cribado y eliminación de duplicados, se analizaron 22 estudios originales que cumplen los criterios de inclusión y aportan datos experimentales sobre eficacia, condiciones operativas y mecanismos de sellado de distintos LCM.

Del análisis de los 22 artículos, 6 corresponden a materiales tradicionales fibras vegetales caña de azúcar, ñame, maní, dátil y partículas minerales CaCO_3 , bentonita, grafeno que demuestran reducciones de filtrado entre 4,2 mL y 40 % frente a métodos convencionales. 8 estudios se centran en sistemas híbridos y cementantes geles termoestables, resinas autohinchables, gel ZND–cemento, MOS, EICP y cemento tixotrópico, con sellados superiores al 80 % bajo temperaturas de hasta 150°C y presiones de hasta 1000 psi.

Finalmente, 8 artículos investigan LCM inteligentes espumas y poliuretanos con memoria de forma, geles autocurativos, microcápsulas y microesferas elastoméricas con adaptabilidad dinámica a fracturas, recuperación de forma > 98 % y presiones de sellado de hasta 8,97 MPa.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés relacionado con esta investigación.

Declaración de contribución a la autoría

Las contribuciones de autoría se describen conforme a la taxonomía CRediT, que contempla 14 roles, reportando únicamente aquellos efectivamente desempeñados por cada autor en la investigación.

Nicómedes Saavedra-Arancibia: Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Visualización, Escritura-borrador original, Redacción-revisión y edición.

Mirna Villegas: Curación de datos, Conceptualización, Análisis formal.

Sara Vladislavic-Mendoza: Curación de datos, Análisis formal, Conceptualización.

Deyvi Bustamante-Perez: Curación de datos, Análisis formal, Conceptualización.

Silverio Arancibia: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que utilizaron inteligencia artificial como apoyo para la elaboración de este artículo y que dicha herramienta no sustituye de ninguna manera el proceso intelectual. Tras rigurosas revisiones con diferentes herramientas, en las que se comprobó la inexistencia de plagio, tal como consta en las evidencias, los autores manifiestan y reconocen que este trabajo es producto de un esfuerzo intelectual propio, que no ha sido escrito ni publicado previamente en ninguna plataforma electrónica ni mediante herramientas de inteligencia artificial.

REFERENCIAS

- Ahmad, H. M., Kamal, M. S., Murtaza, M., Al Nabbat, Y., Al Arifi, S., & Mahmoud, M. (2024). Breakthrough Solutions for Lost Circulation Control in Oilfield Drilling: Unleashing the Power of Biopolymer Modified Graphene and CaCO₃ synergy. International Petroleum Technology Conference, IPTC 2024. <https://doi.org/10.2523/IPTC-24409-EA>
- Albattat, R., AlSinan, M., Kwak, H., & Hoteit, H. (2022). Modeling lost-circulation in natural fractures using semi-analytical solutions and type-curves. Journal of Petroleum Science and Engineering, 216, 110770. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110770>
- Anyaezu, T. V. (2023). Experimental investigation of PAM/PEI polymer mud for reducing lost circulation in high-temperature formations. Geothermics, 114. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102786>
- Ayodele, E., Ezeonu, C., Amuah, F., Sangoleye, D., & Ayodele, F. (2022). The Effect of Sugarcane Fibres and MICA as Loss Circulation Material in Water Based Mud. Society of Petroleum Engineers - SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, NAIC 2022. <https://doi.org/10.2118/211951-MS>
- Azadivash, A. (2025). Lost circulation intensity characterization in drilling operations: Leveraging machine learning and well log data. Heliyon, 11(1), e41059. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41059>
- Bai, Y., Dai, L., Sun, J., Lv, K., Zhang, Q., Shang, X., Zhu, Y., & Liu, C. (2022). Experimental study on an oil-absorbing resin used for lost circulation control during drilling. Journal of Petroleum Science and Engineering, 214, 110557. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110557>
- Bamiduro, A., Peres-Demarthon, G., Phyoe, T. Z., Pallapothu, S., Pauferro, P., & Aghaguluyev, J. (2024). Incorporating Self-Degradable Fibers into High Performance High Strength Particulates to Combat Losses While Drilling Across Reservoir Section in Extended

- Reach Well in Middle East Field. Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2024. <https://doi.org/10.2118/220905-MS>
- Belayneh, M., & Aadnøy, B. (2022). Bridging performances of lost circulation materials (LC-LUBE and mica) and their blending in 80/20 and 60/40 oil-based drilling fluids. *Frontiers in Physics*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1042242>
- Cui, K., Jiang, G., Xie, C., Yang, L., He, Y., Shen, X., & Wang, X. (2021). A novel temperature-sensitive expandable lost circulation material based on shape memory epoxy foams to prevent losses in geothermal drilling. *Geothermics*, 95, 102145. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102145>
- Elmousalami, H., & Sakr, I. (2024). Artificial intelligence for drilling lost circulation: A systematic literature review. *Geoenergy Science and Engineering*, 239, 212837. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212837>
- Feng, Y., Yang, H., Li, X., Zhang, S., Hu, H., & Wang, J. (2024). Interpretable Lost Circulation Analysis: Labeled, Identified, and Analyzed Lost Circulation in Drilling Operations. *SPE Journal*, 29(04), 1692-1709. <https://doi.org/10.2118/218380-PA>
- Fritoli, G. de S., De Lai, F. C., & Junqueira, S. L. de M. (2021). Effect of LCM and polymeric additives on mudcake and filtrate rheology parameters. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108948. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108948>
- Guo, P., Qiu, Z., Zang, X., Zhong, H., Zhao, X., Zhang, Y., & Mu, T. (2024). Epoxy resin microencapsulated by complex coacervation as physical-chemical synergetic lost circulation control material. *Energy*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130630>
- Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18(2), e1230. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>

- Hafez, A., Liu, Q., Finkbeiner, T., Moellendick, T. E., & Santamarina, J. C. (2022). Rapid bentonite-cement-oil hydration: Implications to fluid loss control. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 215, 110615. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110615>
- Hamdan, T., Saraji, R., Yang, T., Al-Rahma, R., Abdullah, D., Al Nuaimi, M., Zhou, C., Hu, X., Cheng, Y., Guo, Y., & Zhang, X. (2023). A High Molecular Polymer LCM to Cure Severe Losses While Drilling Shallow Aquifers in UAE. *Society of Petroleum Engineers - Gas and Oil Technology Showcase and Conference, GOTS 2023*. <https://doi.org/10.2118/214191-MS>
- Ishaku, Y., Okafor, I., Jakada, K., Nzerem, P., & Salihu, A. (2023). Evaluation of Groundnut Shell and Yam Peel as a Loss Circulation Control Material in Drilling. *Society of Petroleum Engineers - SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, NAIC 2023*. <https://doi.org/10.2118/217209-MS>
- Jiang, G., Cui, K., Dong, T., Yang, L., & Quan, X. (2021). Magnesium oxysulfate cement as a fast curing agent in drilling fluids to solve the severe loss. *Petroleum Science and Technology*, 39(7), 216-234. <https://doi.org/10.1080/10916466.2021.1891097>
- Kibikas, W., Nakagawa, S., Ingraham, M., Bauer, S., Chang, C., Dobson, P., Kneafsey, T., & Samuel, A. (2024). Evaluation of Lost Circulation Material Sealing for Geothermal Drilling. *Energies*, 17(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/en17112703>
- Lashkari, R., Tabatabaei-Nezhad, S. A., & Husein, M. M. (2023). Evaluation of shape memory polyurethane as a drilling fluid lost circulation and fracture plugging material. *Geoenergy Science and Engineering*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211445>
- Liu, J., Sun, Y., Sun, J., Lv, K., Huang, N., Xu, Z., Zhang, T., Li, Y., Zhang, G., Yi, H., & Hou, D. (2025). Research on Silicone Rubber Material as a Lost Circulation Material for Antarctic Drilling. *SPE Journal*, 30(1), 144-151. <https://doi.org/10.2118/223630-PA>

- Liu, W., Xu, Q., Lin, C., Yuan, Z., & Xu, X. (2023). Experimental study of a novel oil-based crosslinking-curing lost circulation material for shale gas well. *Petroleum Science and Technology*, 41(15), 1492-1509. <https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2092505>
- Magzoub, M., Anyaezu, T., Salehi, S., Li, G., Fan, J., Teodoriu, C., Saleh, F. K., & Taleghani, A. D. (2021). Evaluating sealability of blended smart polymer and fiber additive for geothermal drilling with the effect of fracture opening size. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 206, 108998. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108998>
- Mohamed, A. H., Sulaimon, A., Jufar, S., & Manickam, V. (2023). Wellbore Strengthening: Palm Date Seeds for Mitigating Circulation Losses and Effect of Salinity on Clay Swelling. *Society of Petroleum Engineers - SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, NAIC 2023*. <https://doi.org/10.2118/217237-MS>
- Tariq, Z., Mahmoud, M., Alahmari, M., Bataweel, M., & Mohsen, A. (2022). Lost circulation mitigation using modified enzyme induced calcite precipitation technique. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 210, 110043. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110043>
- Velasco, A., Segouffin, J., Duarte, B., Simental, S., Rowe, M., Major, J., Toranzo, G. E., & Garcia, S. (2023). Highly Thixotropic Engineered Cement Solution Helps Overcome Lost Circulation While Drilling Deepwater Exploration Well. *Society of Petroleum Engineers - ADIPEC, ADIP 2023*. <https://doi.org/10.2118/216947-MS>
- Wang, R., Wang, C., Long, Y., Sun, J., Liu, L., & Wang, J. (2023). Preparation and investigation of self-healing gel for mitigating circulation loss. *Advances in Geo-Energy Research*, 8(2), 112-125. <https://doi.org/10.46690/ager.2023.05.05>
- Yadav, K., Singhwane, A., Milli, M., Gorhe, N., Srivastava, A. K., & Verma, S. (2024). Shape memory polymers as new advanced loss circulation materials for drilling applications. *Polymer Bulletin*, 81(17), 15293-15317. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05342-6>

- Yang, J., Sun, J., Bai, Y., Lv, K., Zhang, G., & Li, Y. (2022). Status and Prospect of Drilling Fluid Loss and Lost Circulation Control Technology in Fractured Formation. *Gels*, 8(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/gels8050260>
- Yang, L., Ma, J., Chang, X., Wu, Y., Jiang, G., Qiu, S., & Kinkeyi Moukoko, A. D. (2023). Novel polymeric organic gelator as lost circulation material for oil-based drilling fluids. *Geoenergy Science and Engineering*, 231, 212414. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212414>
- Yang, L., Ou, Z., Chang, X., Wu, J., Chen, H., Jiang, G., Ma, J., Dong, T., Wu, Y., Yu, C., & Feng, S. (2025). Application of Elastomer Microsphere Particles as Water-Based Drilling Fluid Lost Circulation Material. *SPE Journal*, 30(3), 1190-1205. <https://doi.org/10.2118/224416-PA>