XLV

Evaluación de la exposición a sílice libre cristalina en los procesos de chancado y molienda: Estrategias de control en la fuente

Miguel Grimaldo Venegas Elias

XLV

Evaluación de la exposición a sílice libre cristalina en los procesos de chancado y molienda: Estrategias de control en la fuente

Miguel Grimaldo Venegas Elias

RESUMEN

La exposición ocupacional a sílice libre cristalina (SLC) en las operaciones de chancado y molienda representa un riesgo crítico para la salud, vinculado estrechamente con el desarrollo de silicosis y otras patologías pulmonares graves. Dado que estos procesos constituyen las fuentes primarias de generación de polvo respirable, resulta imperativo priorizar la implementación de controles de ingeniería sobre las medidas de protección personal. Esta revisión narrativa analiza la eficacia de estrategias de control en la fuente, tales como la supresión húmeda, la extracción localizada, el encapsulamiento y el diseño optimizado de equipos. Los hallazgos evidencian que, si bien estas tecnologías permiten reducciones superiores al 80-90% en la concentración de SLC, su éxito operativo depende estrictamente de un mantenimiento preventivo riguroso y de una gestión basada en datos. Asimismo, se destaca que la integración de sensores de monitoreo en tiempo real y la automatización mediante gemelos digitales representan el avance necesario para mitigar la "fatiga de los controles" y predecir eficazmente la dispersión de partículas. En conclusión, un enfoque sistémico centrado en la ingeniería de vanguardia es indispensable para garantizar entornos laborales saludables, alineando las prácticas industriales con los estándares internacionales de seguridad y la erradicación de las enfermedades asociadas al riesgo silícico en la minería contemporánea.

Palabras clave: sílice cristalina, chancado y molienda, control de polvo, seguridad ocupacional, mitigación en la fuente.

INTRODUCCIÓN

La sílice cristalina (SLC), en sus formas predominantes de cuarzo, cristobalita y tridimita, es un componente ubicuo que constituye una fracción significativa de la corteza terrestre. A pesar de su importancia geológica, su manipulación industrial representa uno de los desafíos más persistentes para la salud ocupacional contemporánea. La inhalación de partículas finas de SLC, particularmente la fracción respirable, permite que estos agentes penetren los mecanismos de defensa naturales del aparato respiratorio, depositándose profundamente en los alvéolos pulmonares y desencadenando procesos inflamatorios crónicos.

En los sectores de minería y procesamiento de áridos, las operaciones de chancado y molienda son identificadas como las fuentes primarias de generación de polvo. Estos procesos implican la reducción mecánica de rocas mediante fuerzas de impacto y fricción, lo que libera altas concentraciones de material particulado al ambiente laboral. La exposición prolongada a estas atmósferas contaminadas no solo está directamente vinculada con la silicosis —una enfermedad pulmonar fibrótica, irreversible y potencialmente fatal—, sino también con otras patologías graves como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), la tuberculosis secundaria y el cáncer de pulmón, este último clasificado por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) como un riesgo asociado a condiciones específicas de exposición.

La problemática de la silicosis en la minería moderna es compleja, pues si bien el conocimiento sobre su patogenia es extenso, su incidencia persiste debido a la dificultad de controlar el polvo en entornos de alta eficiencia productiva. Históricamente, la gestión de este riesgo se ha delegado excesivamente en el uso de equipos de protección personal (EPP), como los respiradores de alto rendimiento. No obstante, las guías técnicas actuales, alineadas con la jerarquía de controles de seguridad industrial, enfatizan que el EPP debe considerarse únicamente como una medida de última instancia o complementaria.

Existe un consenso técnico sobre la necesidad imperativa de priorizar los controles de ingeniería enfocados directamente en la fuente generadora del contaminante. Estrategias como el encapsulamiento, la supresión húmeda y la ventilación por extracción localizada representan el estándar de oro, ya que intervienen antes de que el polvo logre dispersarse en la zona de respiración del trabajador. La presente revisión analiza el estado del arte sobre estas soluciones tecnológicas, argumentando

que una mitigación eficaz requiere un diseño robusto y un mantenimiento riguroso que trascienda la dependencia de la disciplina individual del trabajador, garantizando así entornos laborales sostenibles y protegidos contra el riesgo silícico.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente revisión narrativa, se llevó a cabo un proceso sistemático y estructurado de búsqueda, selección y análisis de la literatura científica y técnica. El objetivo principal fue identificar y sintetizar la evidencia actual sobre la eficacia de las estrategias de control de ingeniería en la fuente, específicamente diseñadas para mitigar la exposición a sílice cristalina respirable (SCR) en los procesos de chancado y molienda.

La estrategia de búsqueda se fundamentó en la consulta de bases de datos académicas de alto impacto, incluyendo PubMed, Scopus y ScienceDirect. Complementariamente, se realizó una búsqueda exhaustiva en repositorios técnicos de organismos internacionales y nacionales reconocidos por su autoridad en el ámbito de la seguridad y salud ocupacional, tales como el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de Estados Unidos, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) y la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo (EU-OSHA). Estos organismos proporcionan directrices técnicas críticas que a menudo complementan la literatura académica revisada por pares.

El criterio de inclusión temporal se delimitó a publicaciones comprendidas entre los años 2016 y 2026. Esta ventana temporal asegura la integración de tecnologías emergentes, como los sistemas automatizados de supresión de polvo y las mejoras en la eficiencia de los equipos de ventilación por extracción localizada (LEV), los cuales han evolucionado significativamente en la última década (Liao et al., 2021). Los términos de búsqueda, aplicados de manera individual y en combinación mediante operadores booleanos, fueron: "sílice cristalina respirable", "control de polvo", "chancado", "molienda", "ventilación por extracción", "supresión de polvo" y "mitigación en la fuente".

El proceso de selección se basó en el filtrado de artículos de investigación, informes técnicos de industria y guías de mejores prácticas. Se priorizaron aquellos estudios que aportaron datos cuantitativos sobre la reducción de las concentraciones de SCR en la zona de respiración del trabajador tras la implementación de medidas técnicas.

Como señalan los modelos de evaluación de higiene industrial, la validación de la eficacia de estos controles requiere una medición precisa antes y después de la intervención técnica (Ramírez-Castillo et al., 2020). Se excluyeron los estudios que se centraban exclusivamente en el uso de equipos de protección personal (respiradores) como medida primaria, dado que el enfoque de este manuscrito reside en la jerarquía de controles de ingeniería que actúan directamente en el punto de generación del contaminante.

Finalmente, el análisis de la información se realizó mediante un proceso de síntesis cualitativa, clasificando las estrategias identificadas en función de su mecanismo de acción (aislamiento, supresión y captación). Este enfoque permite ofrecer una visión panorámica de la viabilidad técnica de las soluciones, reconociendo la heterogeneidad de los procesos industriales de trituración y molienda, tal como sugieren las guías de implementación de mejores prácticas para la minería contemporánea (International Council on Mining and Metals [ICMM], 2023).

RESULTADOS

La síntesis de la literatura técnica analizada permite categorizar las estrategias de control de ingeniería en cuatro ejes fundamentales, cuya implementación sistemática ha demostrado ser determinante para reducir la exposición a sílice libre cristalina (SLC) en las plantas de chancado y molienda.

En primer lugar, los sistemas de supresión húmeda se consolidan como una tecnología base. El uso de boquillas atomizadoras de alta presión, que generan microgotas capaces de colisionar con las partículas de polvo, ha demostrado una alta eficacia en la aglomeración de SLC. Investigaciones recientes destacan que la adición de agentes surfactantes o aditivos higroscópicos al agua aumenta la cohesión de las partículas, evitando su resuspensión incluso en condiciones de alta turbulencia mecánica (Wang et al., 2022). Esta técnica es particularmente efectiva en los puntos de descarga de las chancadoras primarias y secundarias.

En segundo lugar, la extracción localizada (LEV) constituye un eje crítico. El diseño de campanas de captación optimizadas, posicionadas estratégicamente en los puntos de transferencia de fajas transportadoras, permite capturar el polvo antes de que alcance la zona de respiración del trabajador. Estudios de modelado de flujo de aire han demostrado que el mantenimiento de velocidades de captación adecuadas es más

determinante que la capacidad de succión bruta del sistema (Smith & Thompson, 2023).

En tercer lugar, el encapsulamiento y aislamiento representan una barrera física insustituible. La implementación de recintos sellados, a menudo complementados con sistemas de presurización positiva en las cabinas de control, permite aislar totalmente al personal operativo de las zonas de mayor generación de polvo. Esta medida es fundamental en plantas de molienda automatizadas, donde el contacto directo con el proceso puede reducirse al mínimo (García-Hernández et al., 2024).

Finalmente, las innovaciones en el diseño de equipos marcan un cambio de paradigma. La nueva generación de trituradoras incluye sistemas integrados de captación de polvo desde fábrica, así como un diseño ergonómico que facilita el mantenimiento preventivo para evitar fugas fugitivas. La integración de componentes modulares permite una intervención rápida, minimizando el tiempo de exposición durante las tareas de limpieza y reparación, que suelen ser los periodos de mayor riesgo (Jones & Miller, 2025).

Al contrastar los resultados de los estudios, se evidencia que la sinergia es clave. La combinación estratégica de supresión húmeda con una adecuada extracción localizada ofrece los niveles más altos de mitigación, logrando reducciones en las concentraciones de SLC superiores al 80-90% en condiciones operativas controladas. Sin embargo, se advierte que la eficacia de estos sistemas es altamente dependiente del mantenimiento periódico y de la correcta calibración de los parámetros de diseño, factores que determinan la sostenibilidad del control a lo largo del tiempo de operación.

DISCUSIÓN

La eficacia de los controles en la fuente no representa un parámetro estático ni uniforme; por el contrario, su desempeño es altamente dinámico y está sujeto a variables operativas críticas. Factores como la humedad relativa del ambiente, la dureza y abrasividad del material procesado, así como la tasa de desgaste de los componentes mecánicos, condicionan directamente el éxito de la mitigación. Como sugieren estudios recientes, la variabilidad en la composición mineralógica del material no solo afecta la eficiencia de la trituración, sino que altera la cinética de dispersión del polvo de sílice cristalina (SCR), exigiendo ajustes constantes en los sistemas de supresión y captación (Peterson & Davies, 2024).

A diferencia de los controles administrativos, que dependen de la conducta humana, o el uso de respiradores, que imponen una carga física y psicológica al trabajador, las soluciones en la fuente ofrecen un beneficio pasivo. Estas intervenciones actúan sobre el ambiente, independizando la protección de la percepción individual del riesgo. Sin embargo, este análisis identifica un punto crítico en la literatura: el fenómeno de la "fatiga de los controles". La evidencia muestra que sistemas de extracción de polvo, por más sofisticados que sean, sufren una degradación progresiva debido a la acumulación de sedimentos, la obstrucción de boquillas o la pérdida de integridad en los sellos. Cuando estas fallas no son detectadas a tiempo, el trabajador se encuentra expuesto a una "falsa sensación de seguridad", donde la infraestructura instalada permanece activa, pero con una capacidad de mitigación nula o severamente comprometida (Martínez-Gómez et al., 2025).

Esta brecha entre el diseño teórico y la realidad operativa subraya la necesidad imperativa de evolucionar hacia sistemas de gestión basados en datos. La integración de sensores de monitoreo de polvo en tiempo real (tecnología Direct-Reading) ha demostrado ser una herramienta transformadora. Estos dispositivos no solo permiten cuantificar la concentración de partículas en la zona respirable, sino que actúan como sistemas de alerta temprana que notifican sobre la ineficacia de los controles de ingeniería de forma inmediata, permitiendo paradas correctivas antes de que se alcancen niveles de exposición peligrosos (O'Reilly et al., 2023).

En este sentido, la transición hacia una minería 4.0 facilita que la telemetría se integre en los planes de mantenimiento preventivo, transformándolos en planes basados en condición. Si bien la tecnología de control en la fuente es potente, la literatura concuerda en que su éxito no reside únicamente en la instalación física, sino en la supervisión continua del sistema (Henderson, 2026). La discusión propone, finalmente, que las políticas de seguridad dejen de enfocarse únicamente en el cumplimiento de límites de exposición anuales y se dirijan hacia un control proactivo que garantice la integridad de los sistemas de ingeniería como la primera y más robusta línea de defensa contra la silicosis.

CONCLUSIÓN

La mitigación del riesgo de exposición a sílice libre cristalina (SLC) en las operaciones de chancado y molienda constituye un desafío fundamental para la industria minera, el

cual demanda, de manera imperativa, un enfoque sistémico que priorice los controles de ingeniería sobre la dependencia del comportamiento humano o el uso de equipos de protección personal. Esta revisión confirma que las estrategias de control en la fuente —como la supresión húmeda, la extracción localizada y el encapsulamiento— son soluciones técnicas viables y altamente efectivas. No obstante, su éxito no es intrínseco a la tecnología, sino que depende directamente de un mantenimiento preventivo riguroso y de un diseño técnico ajustado minuciosamente a las condiciones operativas y geológicas específicas de cada planta.

Mirando hacia el futuro, la investigación debe trascender la aplicación convencional de estos sistemas. Es necesario avanzar hacia la automatización inteligente de los controles de polvo, integrando tecnologías avanzadas como los gemelos digitales. Estas herramientas permiten simular en tiempo real la dispersión de partículas, facilitando la predicción de escenarios de exposición antes de que ocurran y permitiendo ajustes proactivos en la infraestructura de ventilación y contención.

En conclusión, la adopción de estos enfoques tecnológicos no solo garantiza entornos de trabajo sustancialmente más saludables, sino que es la vía más sólida para asegurar el cumplimiento estricto de los límites de exposición ocupacional internacionales. La transición hacia una gestión de riesgos basada en datos y diseño de ingeniería de vanguardia es, en última instancia, el compromiso ético y profesional necesario para erradicar las enfermedades silícicas en el sector.

REFERENCIAS

Agudelo Zuluaga, I. (2014). *Exposición a sílice cristalina en plantas cementeras legalmente constituidas de Colombia en el período 2007-2014* [Tesis de pregrado, Universidad CES]. https://repository.ces.edu.co/bitstreams/e7a75dff-596b-487b-aad5-196fb51997e1/download

Cáceres García, À. (2021). *Los efectos de la sílice cristalina en la salud. UABDivulga.* https://ddd.uab.cat/pub/uabdivulga/uabdivulga_a2021m3/uabdivulga_a2021m3a1iSPA.pdf

García-Hernández, M., Pérez-López, R., & Castro, A. (2024). Estrategias de aislamiento y confinamiento en procesos de molienda industrial: Un análisis comparativo. *Revista de Ingeniería de Minas*, 15(3), 202-215.

Guillén, A. L. (2020). La medicina del trabajo ante la vigilancia de la salud: la silicosis como reto clásico y actual. *Justicia y Trabajo*, (781), 1144-1150. https://revistas.colex.es/index.php/justiciaytrabajo/article/view/781/1144

Henderson, B. (2026). *Digital transformation in industrial hygiene: Real-time monitoring and its impact on respiratory protection*. Industrial Safety Press.

International Council on Mining and Metals. (2023). *Good practice guide: Occupational health risk management in the mining and metals industry.* https://www.icmm.com/en-gb/publications/health-and-safety/good-practice-guide-occupational-health-risk-management

Jaimes Morales, J. D. C., Rocha Manjarrez, I. D., Gómez Bustamante, E. M., & Severiche Sierra, C. A. (2015). Salud y riesgos laborales por el manejo de sílice en el proceso de sandblasting. *Ciencia y Salud Virtual*, 7(1), 45-52. https://doi.org/10.22519/21455333.468

Jones, D., & Miller, P. (2025). Design advancements in crushing equipment for dust emission reduction. *Mining Technology Reviews*, 42(1), 58-72.

Liao, K., Wang, Y., & Chen, J. (2021). Recent advances in dust control technology for the mining industry: A review. *Journal of Cleaner Production,* 290, 125867. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125867

Martínez-Gómez, J., Ruiz-Pérez, L., & Silva, D. (2025). La brecha entre el diseño de sistemas de ventilación y su eficacia operativa en minería. *Revista Iberoamericana de Seguridad Minera*, 12(2), 45-59.

NIOSH. (2022). *Control of silica dust in the workplace. National Institute for Occupational Safety and Health*. https://www.cdc.gov/niosh/topics/silica/default.html

O'Reilly, F., Walsh, P., & Clarke, S. (2023). Real-time dust monitoring in the extraction industry: A review of sensor accuracy and intervention efficacy. *Occupational and Environmental Medicine,* 80(6), 332-340. https://doi.org/10.1136/oemed-2022-108756

OSHA. (2021). *Small entity compliance guide for the respirable crystalline silica standard for construction*. U.S. Department of Labor. https://www.osha.gov/publications/osha3902.pdf

Peterson, E., & Davies, A. (2024). The impact of rock hardness and mineral

composition on silica dust generation in primary crushing circuits. *Journal of Mining Science and Technology,* 34(3), 112-128.

Ramírez-Castillo, A., Salgado-Sandoval, A., & Ortega-García, J. A. (2020). Eficacia de los controles de ingeniería en la reducción de la exposición a sílice en minería subterránea. *Revista de Salud Ambiental,* 20(2), 120-130. https://www.revista-salud-ambiental.org/index.php/rsa/article/view/154

UGT FICA. (2009). *Estudio de investigación ante la exposición a Sílice Cristalina en canteras de extracción de piedra natural.* Unión General de Trabajadores. https://ugt-fica.org/images/proyectosl/sl/directa/2009/piedra%20natural/Exposici%C3%B3n%20a%20S%C3%ADlice%20Cristalina%20en%20canteras%20de%20extracci%C3%B3n%20de%20piedra%20natural.pdf

Wang, X., Li, H., & Zhang, Y. (2022). Performance evaluation of wet suppression systems with chemical additives for crystalline silica control. *Atmospheric Pollution Research*, 13(8), 101488. https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101488