



TÉCNICA PARA EL CONTROL PASIVO DEL POLVO

Efraín Bozo Godoy
Gonzalo Bozo Nalli

Abril 2026

TÉCNICA PARA EL CONTROL PASIVO DEL POLVO

Tabla de Contenido

1.0	INTRODUCCIÓN	2
2.0	DEFINICIÓN	2
3.0	CAMPO DE APLICACIÓN	3
4.0	DEFINICIONES	3
4.1	Generales	3
4.2	Según MINSAL. Norma EN 481 [16] o ISO 7708 [15]	4
4.3	Según el MMA	6
5.0	VELOCIDAD TERMINAL O LÍMITE	6
6.0	MOVIMIENTO DEL AIRE	7
6.1	General	7
6.2	Aire desplazado	8
6.3	Aire Generado o Ingresado	8
6.4	Aire Inducido	9
6.5	Aire inducido y aire a extraer	11
6.6	Desarrollo de Modelo Matemático para Flujos inducidos	11
7.0	TÉCNICA PARA EL CONTROL PASIVO DEL POLVO	14
7.1	Transferencia entre Correas Transportadoras	14
7.2	Descarga de Camión	19
7.3	Correas Transportadoras	21
7.4	Tolva	22
8.0	CONCLUSIONES	24
9.0	REFERENCIAS	26

1.0 INTRODUCCIÓN

El control pasivo del polvo en las transferencias constituye un factor determinante para reducir de manera significativa el aire inducido que se libera al exterior. Este documento presenta una técnica específica de control pasivo basada en estándares reconocidos, incluido el desarrollado por Proconm y publicado por ASME, complementada con diseños exclusivos creados por Proconm. La aplicación eficiente de esta técnica permite minimizar las emisiones de polvo fugitivo, contribuyendo a la protección de la salud de las personas y a la preservación del medio ambiente.

2.0 DEFINICIÓN

Control pasivo. El control pasivo de polvo es una técnica destinada a reducir las emisiones de material particulado al ambiente -o polvo fugitivo- sin requerir consumo de energía. Su principio se basa en confinar y/o sellar eficientemente los puntos de transferencia, ya sean de paredes anchas o angostas, favoreciendo la **recirculación interna del flujo inducido** dentro del volumen de control del sistema. De este modo, se minimiza el flujo de aire fugitivo a niveles despreciables, optimizando el sellado hermético del sistema.

Control activo. El control activo del polvo es un conjunto de técnicas destinadas a disminuir el polvo fugitivo mediante sistemas que requieren consumo de energía. Entre los métodos más utilizados se encuentran la extracción localizada, la supresión o abatimiento de

Técnica para el Control Pasivo del Polvo		Proconm
Efraín Bozo Godoy / Gonzalo Bozo Nalli	Abril 2026	

polvo, la humectación total o focalizada en partículas de mayor tamaño, y el uso de cortinas de agua o de aire.

Control mixto. El control mixto corresponde a la combinación de un sistema pasivo con uno o más sistemas activos. En la práctica, la gran mayoría de los sistemas de control de polvo implementados en la industria operan bajo este enfoque híbrido, ya que permite aprovechar simultáneamente el confinamiento y la estabilización del flujo de aire inducido, junto con la captura o supresión del aire que no logra recircular dentro del sistema.

3.0 CAMPO DE APLICACIÓN

El campo de aplicación abarca el transporte y almacenamiento de material sólido a granel con potencial de emitir polvo o material particulado. Estas emisiones representan un riesgo para la salud de las personas y para el medio ambiente, además de generar pérdidas económicas relevantes, considerando que, en general, el polvo presenta una ley superior al promedio del mineral procesado. Controlar estas emisiones es, por tanto, una necesidad tanto operativa como ambiental.

4.0 DEFINICIONES

4.1 Generales

El diámetro aerodinámico es el diámetro de una esfera de densidad unitaria (1 g/cm^3) que tiene la misma velocidad de sedimentación que

Técnica para el Control Pasivo del Polvo		Proconm
Efraín Bozo Godoy / Gonzalo Bozo Nalli	Abril 2026	

la partícula real en el aire. Es una forma estandarizada de comparar partículas de distinta forma, densidad y rugosidad, usando un parámetro único que describe cómo se comportan aerodinámicamente.

El polvo, o material particulado, corresponde a las partículas sólidas que se pueden dispersar en el ambiente. Su comportamiento depende principalmente del tamaño de las partículas y de la velocidad del viento, factores que determinan si sedimentan a pocos metros del punto de emisión o si pueden ser transportadas a distancias de varios kilómetros, afectando tanto áreas cercanas como zonas más alejadas.

Polvo visible es el mayor a 40 micrones. Como referencia el cabello humano tiene un espesor aproximado de 80 micrones.

4.2 Según MINSAL. Norma EN 481 [16] o ISO 7708 [15]

La fracción inhalable corresponde a las partículas que pueden entrar al organismo a través de la nariz y la boca durante la respiración. Incluye aquellas con diámetros aerodinámicos menores a 100 micrones (también denominadas MPS o TPS), que tienen probabilidad de depositarse en el tracto respiratorio superior.

La fracción torácica corresponde a la fracción másica de las partículas inhaladas que logra penetrar más allá de la laringe y alcanzar la región traqueobronquial. Se define mediante un diámetro

Técnica para el Control Pasivo del Polvo		Proconm
Efraín Bozo Godoy / Gonzalo Bozo Nalli	Abril 2026	

aerodinámico nominal de $11,64 \mu\text{m} \pm 1,5 \mu\text{m}$ (media geométrica), valor que representa el punto de corte asociado al **MP10**.

Este material particulado se considera no sedimentable en condiciones ambientales típicas, y aunque incluye partículas de hasta $10 \mu\text{m}$, una partícula de ese tamaño tiene muy baja probabilidad de llegar a los pulmones profundos, ya que tiende a depositarse en las vías aéreas superiores y medias.

La fracción respirable corresponde a la fracción másica de las partículas inhaladas que logra penetrar hasta las vías respiratorias no ciliadas, es decir, los bronquiolos terminales y los alvéolos pulmonares. Se define mediante un diámetro aerodinámico nominal de $4,25 \mu\text{m} \pm 1,5 \mu\text{m}$ (media geométrica), asociado a los puntos de corte utilizados para MP5 o MP4.

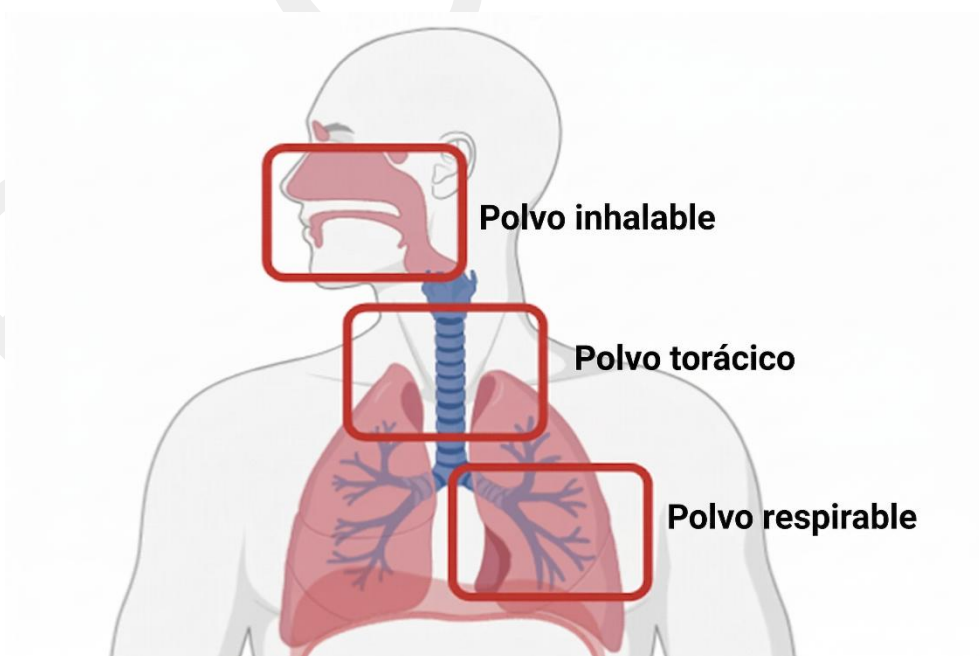


Figura 1. Menor tamaño de partícula, mayor riesgo para la salud

El polvo respirable se considera **silicógeno** cuando contiene 1 % o más de sílice libre cristalina, principalmente en forma de cuarzo o dióxido de silicio (SiO_2). Esta fracción es la responsable del riesgo de silicosis, ya que las partículas respirables de sílice pueden depositarse en los alvéolos y generar daño pulmonar progresivo.

4.3 Según el MMA.

Fracción respirable. MP10. Corresponde a la fracción Torácica según el MINSAL. Regulada por el DS 12 [12]

Fracción fina respirable PM2,5 es el material particulado inferior a 2,5 micrones que llega a los conductos más pequeños del pulmón, los alveolos, por consiguiente, son de mayor riesgo. Fracción fina respirable según DS 12 [13]

5.0 VELOCIDAD TERMINAL O LÍMITE

La velocidad terminal o límite es la velocidad máxima que alcanza un cuerpo moviéndose en el aire bajo la acción de la gravedad. Es decir, cuando la aceleración es cero o la resistencia del aire iguala a la gravedad.

Para obtener la Velocidad Límite (VL) por tamaño de partícula para flujo turbulento, un método preciso es este gráfico publicado por COMET [1], obtenido del estudio de Zender [2].

Técnica para el Control Pasivo del Polvo		Proconm
Efraín Bozo Godoy / Gonzalo Bozo Nalli	Abril 2026	

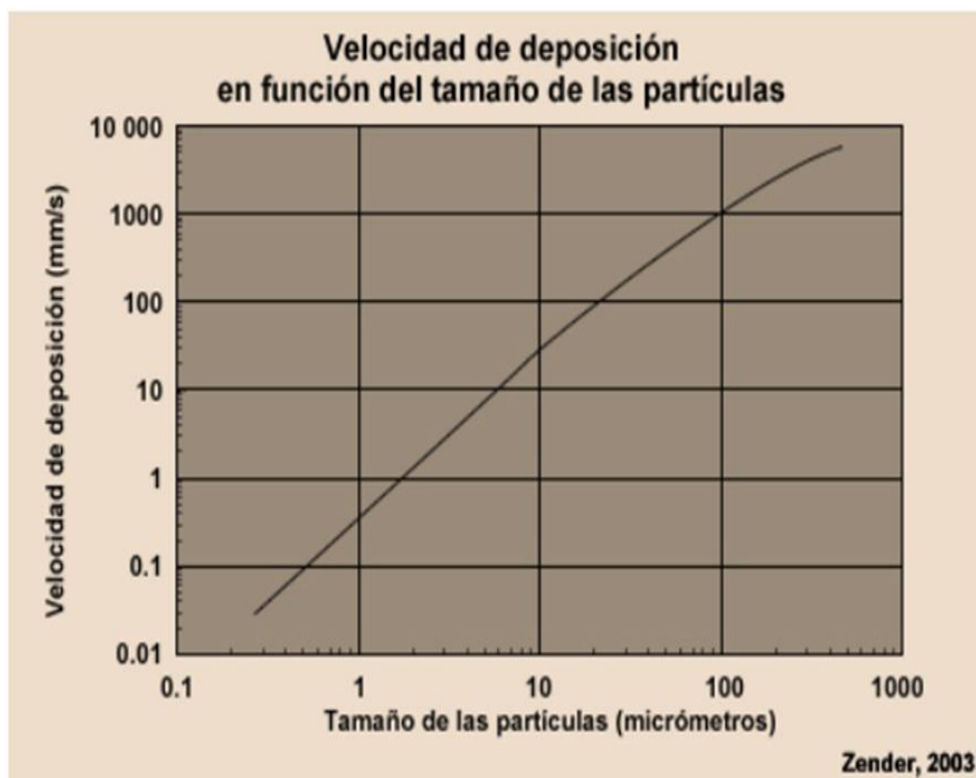


Figura 2. Diagrama de COMET para velocidades límites

Este gráfico muestra que una partícula de 10 micrones requiere una velocidad de 0,03 m/s (0,11 km/h) para mantenerse en suspensión. Por ese motivo, el MP10 es considerado como “no sedimentable”. Ya que requiere de pequeñas velocidades del aire para mantenerse en suspensión además de ser invisible.

6.0 MOVIMIENTO DEL AIRE

6.1 General

Conocer el movimiento del aire con relación al flujo de material es fundamental para controlar y minimizar el polvo fugitivo (que se va al

ambiente). En una transferencia de material es posible encontrar tres movimientos de aire:

- Aire desplazado
- Aire generado o ingresado por equipos
- Aire inducido

6.2 Aire desplazado

El aire desplazado es el principio de Arquímedes aplicado al flujo. Esto es:

$$Q_{dis} = (0.277 \cdot R) / \rho \quad (1)$$

Q_{dis} : Aire desplazado, en m³/s

R: Flujo transportado, en t/h

ρ : Densidad aparente, en kg/m³/h

El aire desplazado está presente principalmente en tolvas y acopios de mineral. Se debe canalizar para que se vaya limpio o filtrado al ambiente cuando sube el nivel del material y permitir ingreso de aire cuando baja el nivel.

6.3 Aire Generado o Ingresado

Este aire es generado por chancadores por diferencia de densidad o tamaño y por el efecto ventilador en el caso del chancador giratorio. Observaciones en terreno, muestran que este efecto ventilador hace recircular el aire en la zona de descarga de camiones.

El aire ingresado desde el exterior corresponde, principalmente, al aire proveniente de sistemas de supresión de polvo.

6.4 Aire Inducido

El aire inducido está presente en toda transferencia de material. Según la norma NIOSH [3] y la publicación de Martin Engineering [4], el aire inducido representa el fenómeno físico que ocurre en una caída de material a granel. Esto es, el material al caer se abre y deja intersticios con presión negativa o vacío en el lugar que antes ocupaba, lo que provoca que el aire circundante sea atraído hacia ese vacío para llenarlo, es lo que se denomina aire absorbido, Q_{ab} . Cuando el material impacta libera todo este aire arrastrado en la trayectoria, que se define como aire inducido, Q_{ind} .

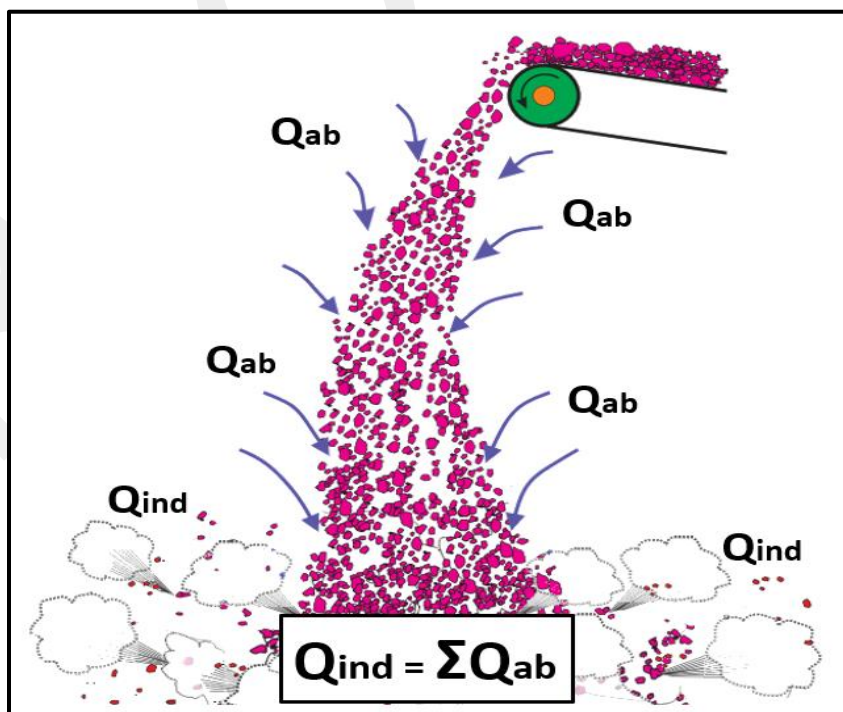


Figura 3. Esquema de la norma NIOSH para el aire inducido [3]

La ecuación de D. Anderson [5] para aire inducido o aire a extraer en un ambiente confinado es:

$$Q_i = k \cdot A_u \sqrt[3]{(R \cdot S^2 / D)} \quad (2)$$

Qi: Flujo aire inducido y a extraer. En m³/s

K: factor de conversión = 0,078

Au: Área abierta en la parte superior del chute o área inducida, en m²

R: Flujo de material, en t/h

S: Altura de caída libre del material, en m

D: Diámetro promedio del material (P50), en m

Para disminuir el aire a extraer, la única variable que se puede controlar en esta ecuación es el área inducida. Esto es, disminuir el área inducida es disminuir el aire a extraer y, consecuentemente, el polvo fugitivo. Es lo que se llama **control pasivo del polvo**.

La ecuación de Anderson es una simplificación de la ecuación de Richard Dennis [6], que utilizó como correa receptora una bandeja sellada longitudinalmente y sin posibilidad de salida de aire por la parte posterior. Por consiguiente, el **control pasivo del polvo** incluye un sellado eficiente de la gualdera longitudinal y transversalmente en la parte posterior.

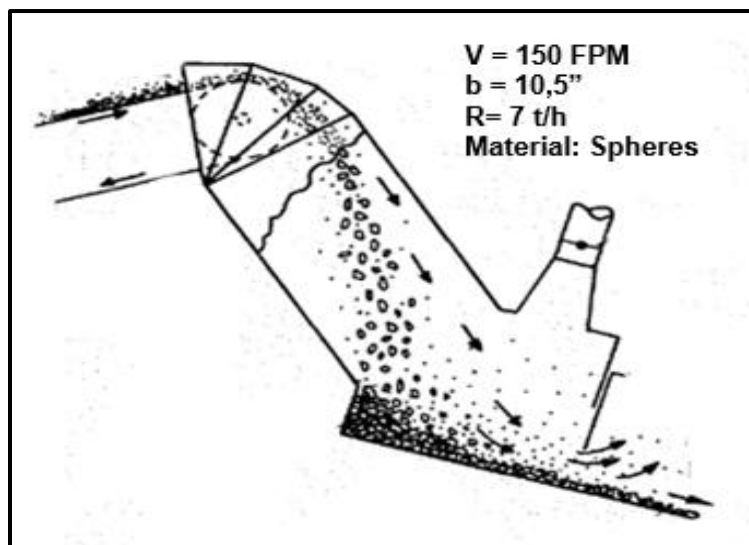


Figura 4. Esquema del modelo utilizado por Richard Dennis [6]

6.5 Aire inducido y aire a extraer.

Históricamente, la industria se ha basado en las simplificaciones de Anderson y Dennis para estimar el aire a extraer. Sin embargo, estos modelos asumen condiciones de confinamiento que no siempre reflejan la dinámica real de una transferencia moderna. Proconm ha desarrollado una metodología que evoluciona estos conceptos, permitiendo por primera vez cuantificar el aire inducido en condiciones sin confinamiento. Este avance cierra la brecha técnica entre la teoría de los años 80 y las exigencias ambientales de la minería del siglo XX.

6.6 Desarrollo de Modelo Matemático para Flujos inducidos

El modelo matemático de Proconm para la cuantificación de aire inducido representa un avance documentado en la ingeniería nacional, habiendo sido:

Técnica para el Control Pasivo del Polvo	Proconm
Efraín Bozo Godoy / Gonzalo Bozo Nalli	Abril 2026

* **Publicado por ASME** (American Society of Mechanical Engineers) y revisado por pares para el congreso IMECE . * **Validado por expertos senior** con trayectoria en el área de control de polvo y manejo de materiales a granel en minería. * **Auditado en su rigor matemático** por un profesor de la Universidad de Chile. * Presentado como una **innovación chilena** capaz de estimar el aire inducido en condiciones sin confinamiento o sin chute.

La ecuación resultante de este análisis matemático, es la siguiente para una correa horizontal:

$$Q_{ind} = \frac{4}{3} H b (V_2 - V_1) \quad (3)$$

Donde,

H: Altura de caída del material [m]

b: Ancho del material [m]

V1: Velocidad en parte inferior o la velocidad de la cinta [m/s]

V2: Velocidad en la parte superior [m/s], considerando el tamaño de la colpa, como se muestra en la Figura 5

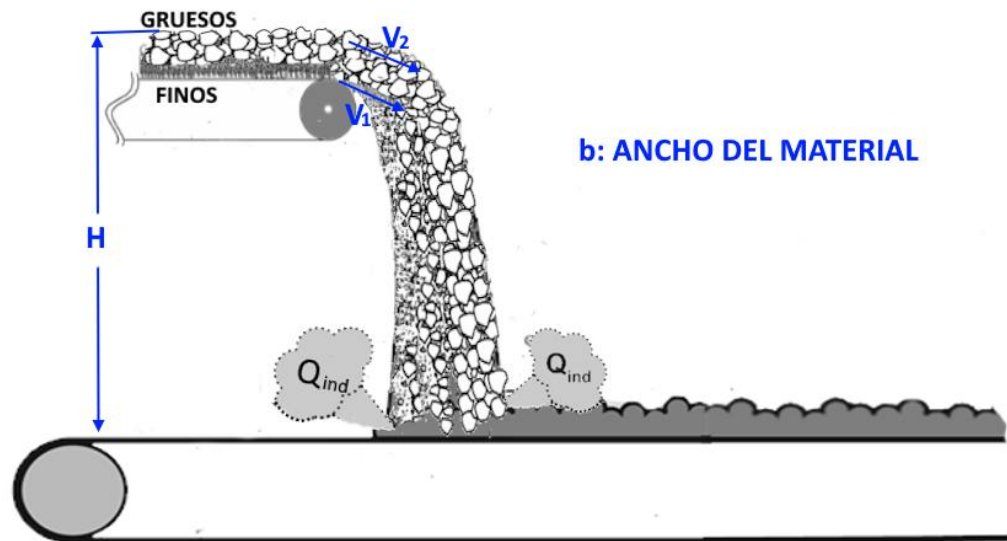


Figura 5. Esquema de la ecuación de Proconm

Ajuste de la ecuación de D. Anderson para cálculo del aire a extraer. Con el aire inducido calculado con la ecuación de Proconm, se calcula el área inducida máxima despejada de la ecuación de D. Anderson. Esta es:

$$A_{u(ls)} = \frac{Q_{ind}^3}{k} \sqrt{\frac{D}{Rs^2}} \quad (4)$$

Con el área inducida real o estimada (A_u) se obtiene la eficiencia de recirculación (E_{fr}). Esto es:

$$E_{fr} = 100 \left(\frac{A_u}{A_{u(ls)}} \right) \quad (5)$$

Finalmente, el aire a extraer (Q_{ext}) está dado por:

$$Q_{ext} = \frac{1}{3} E_{fr} Q_{ind} \quad (6)$$

7.0 TÉCNICA PARA EL CONTROL PASIVO DEL POLVO

7.1 Transferencia entre Correas Transportadoras

General. En una transferencia entre transportadores, el aire desplazado se encuentra presente en los segundos que demora el llenado en la zona de la gualdera de la correa receptora. Por consiguiente, sólo se tiene aire inducido.

La técnica del control pasivo tiene como objetivo sellar la parte superior e inferior de chute para facilitar la recirculación del aire inducido, mejorando la eficiencia de recirculación (E_{fr}) señalada en la ecuación (6) y así extraer menos aire por las campanas.

Para que exista recirculación, no basta sólo el sellado de la transferencia, sino que el chute y la gualdera deben estar diseñados para eliminar todo riesgo de atollo.

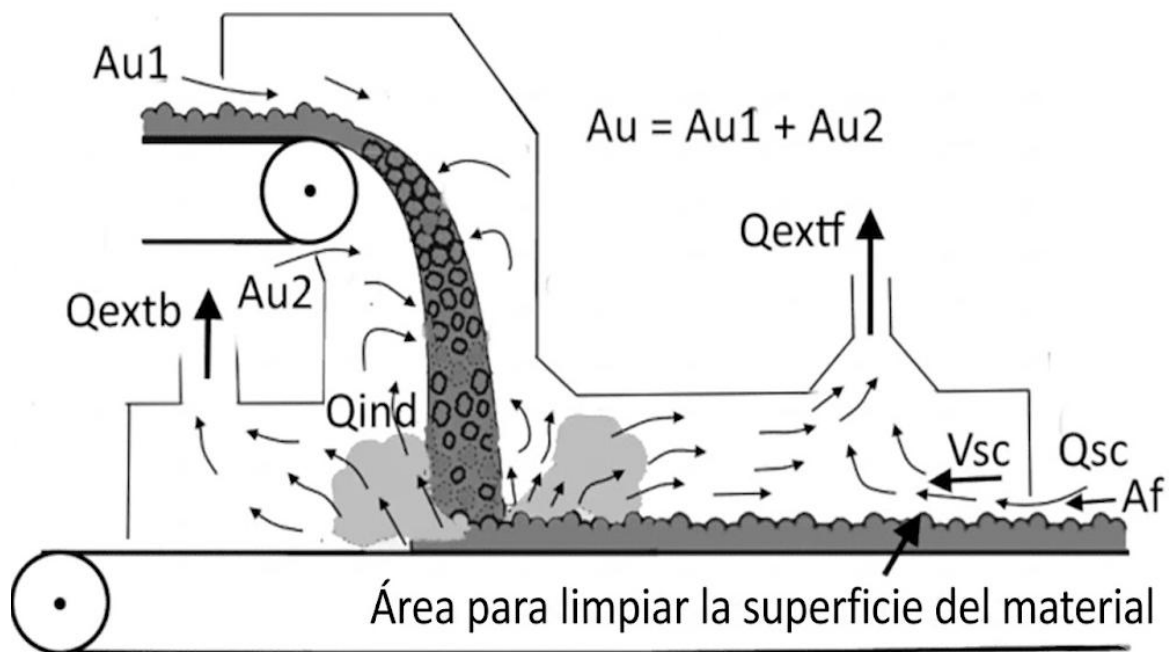


Figure 6. Control pasivo es facilitar recirculación del aire inducido

Sello longitudinal. Desde el año 2015, Proconm tiene patentado un tipo de sello longitudinal [7] que cumple dos importantes postulados:

1. Sobre el sello no debe existir material a presión
2. No debe existir riesgo de atascos permanentes de colpas entre la cinta y la gualdera.

En reunión del Comité del CEMA realizado el año 2017 [8], se definen los mismos postulados ya registrados por Proconm. Un sello más

desarrollado con este concepto permite colocar la plancha de desgaste por el exterior, lo que facilita su inspección y recambio, que se muestra en la siguiente imagen:

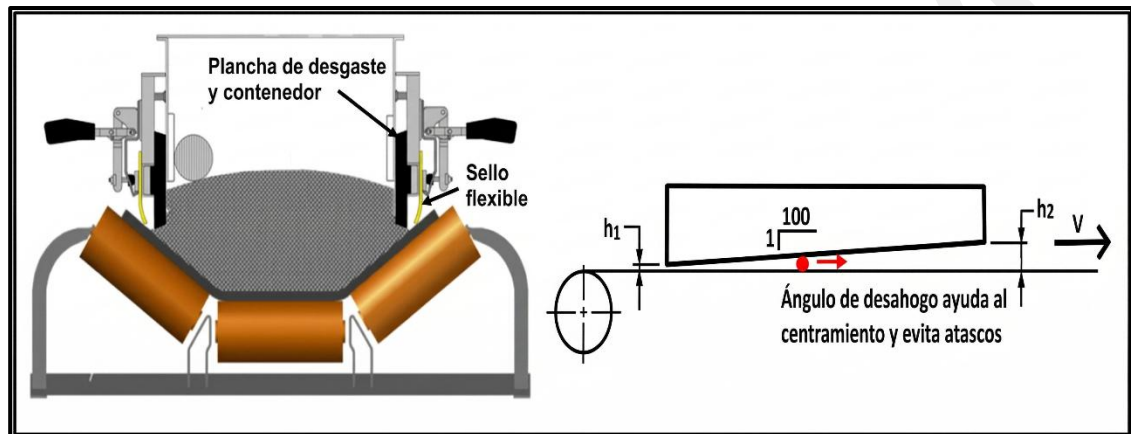


Figure 7. Sello longitudinal para mineral primario y secundario

Sello transversal. Gran parte de las soluciones de sellado convencionales presentan deficiencias estructurales que comprometen su integridad como barrera de confinamiento, resultando en una hermeticidad insuficiente para los estándares actuales de control de emisiones.



Figure 8. Sello transversal tipo existente

Existen algunos sellos que se aproximan a una solución real, ya que sellan sobre el material.



Figura 9. Foto de la NIOSH. Sello transversal existente que va sobre el material

El sello que se propone va sobre el material, con las siguientes características:

- Con doble sello que forma una cámara de aire
- Con pivotes para evitar deterioro
- Flexible para disminuir el roce y ajustarse al material

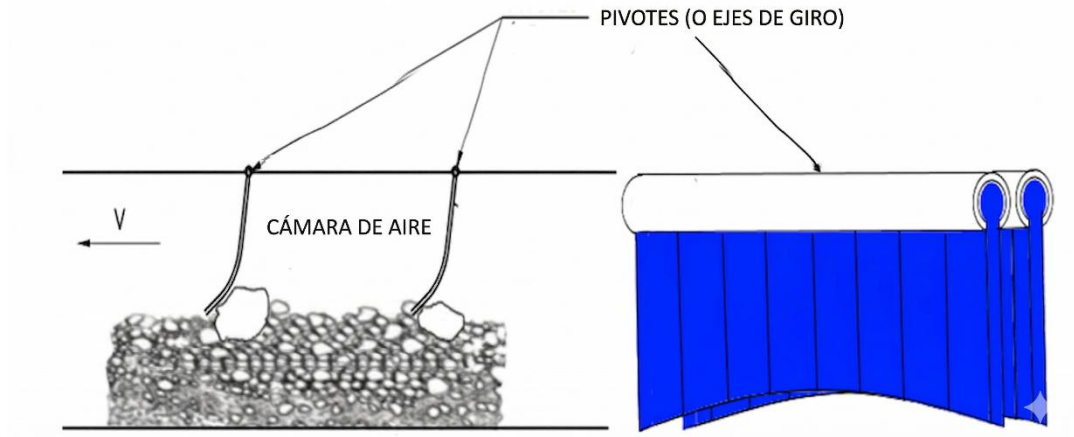


Figura 10. Sello transversal de poliuretano flexible con pivotes

Sello limpiador. El sellado entre el retorno de la cinta y el chute presenta desafíos complejos debido a la oscilación y deformación de la cinta. La propuesta de Procnm se hace cargo de estos problemas. Un sello regulable de poliuretano flexible, probado en terreno que, además, actúa como limpiador secundario o terciario.

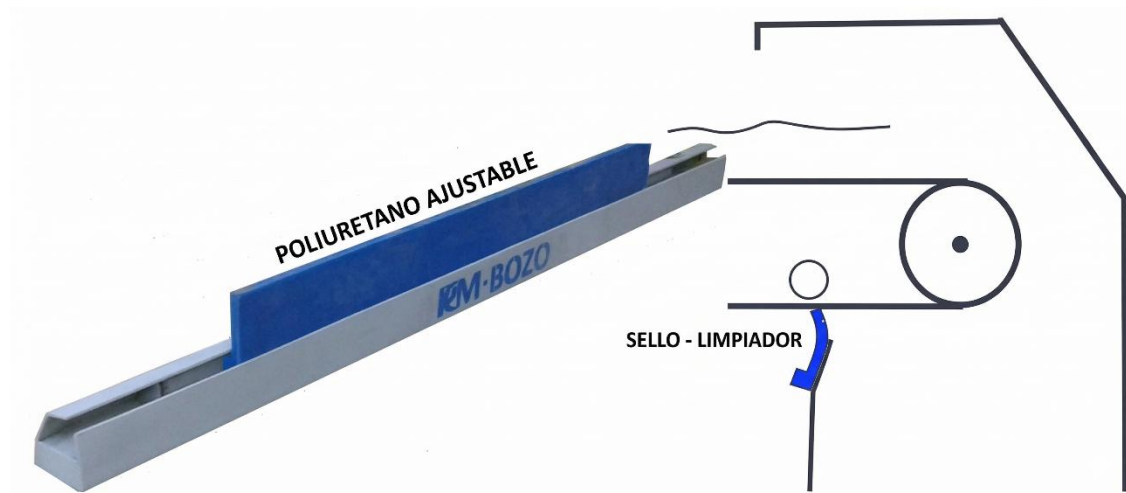


Figura 11. Sello – limpiador regulable y de poliuretano flexible

7.2

Descarga de Camión

Aire inducido. La zona donde descargan los camiones no tiene modelo matemático para el cálculo o estimación del aire inducido. Esto porque el ángulo de descarga y el flujo son variables. Proconm ha desarrollado una ecuación aproximada basada en valores y tiempos promedios. Hay que mostrar esta ecuación sino mejor no nombrarla, omitir la formula resta peso a la información.

Aire desplazado. El aire desplazado también se debe tomar como promedio, de acuerdo con mediciones en terreno, la razón del flujo que sube el nivel por la descarga del camión, versus el flujo que baja por operación del chancador es 20:1.

Confinamiento mixto. En esta zona, se recomienda un confinamiento mixto. Esto es, sumarle al confinamiento pasivo, un confinamiento activo basado en una cortina de agua, agua-aire o aire.

Este proceso de confinamiento activo no dura más allá de 30 segundos.

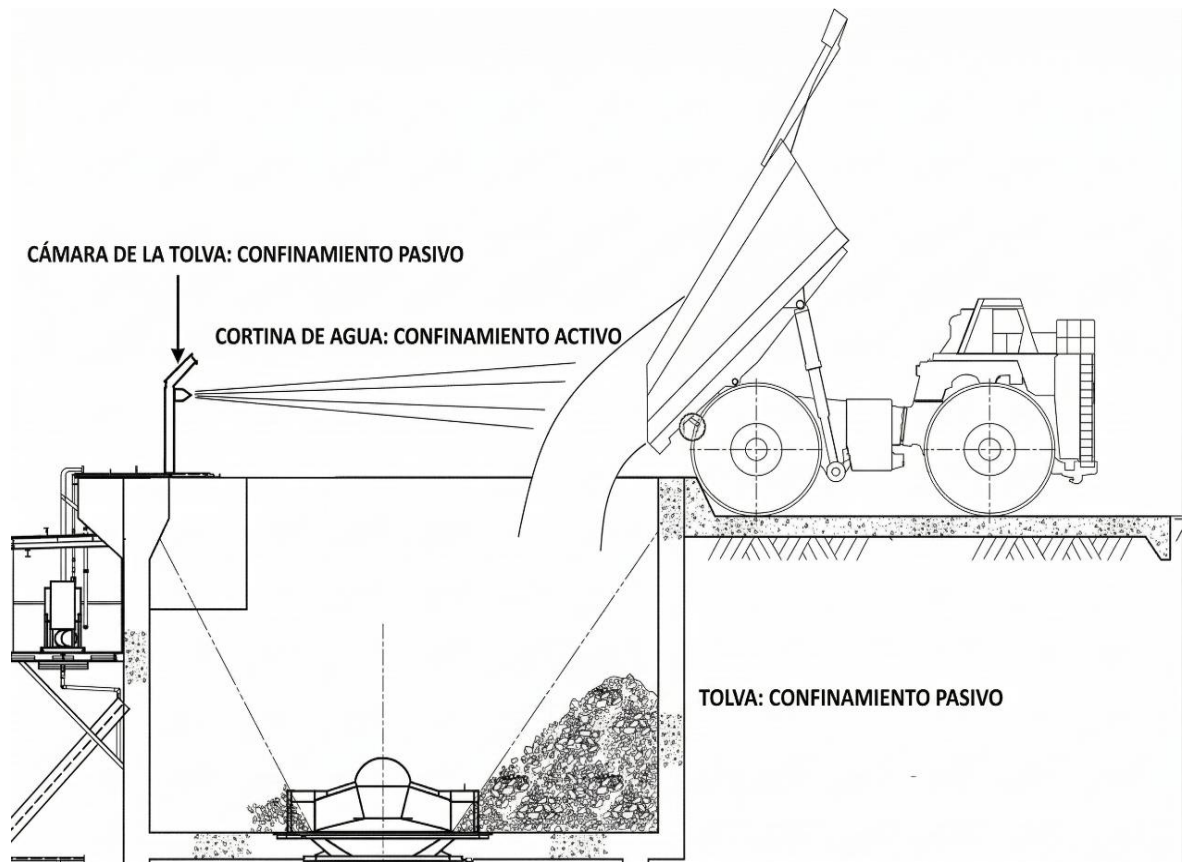


Figura 12. Esquema confinamiento descarga de camión

Confinamiento pasivo. En un lugar sin edificio, el confinamiento pasivo está compuesto por la tolva, el peralte de la tolva y los windfences.

Windfences. Los windfences o cortavientos, son grandes estructuras metálicas con pantallas porosas que tienen como objetivo reducir el polvo atmosférico mediante la disminución de la velocidad de los vientos en 50% en áreas grandes y 80% en áreas localizadas. La

ubicación, tipo y altura de los windfences debe estar sustentada con un estudio de vientos.



Figura 13. Esquema con ubicación de windfences de TRC Raring

7.3 Correas Transportadoras

Confinamiento pasivo. Desde el material que va sobre la superficie de la correa se desprenden partículas, cuyo tamaño depende de la velocidad de la correa. Todo el PM10 se va al ambiente. Es necesario considerar una cubierta hermética o una correa tubular como control pasivo.

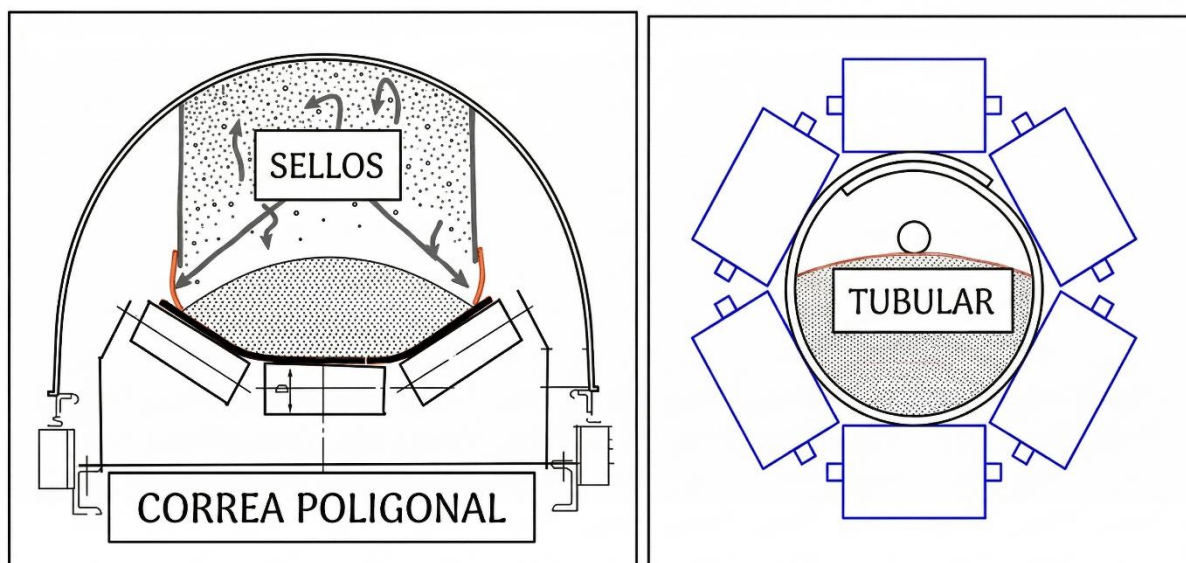


Figura 14. Opciones de control pasivo del polvo

7.4 Tolva

General. En una tolva o acopio de mineral confinado con entrada de material en la parte superior y salida por la parte inferior simultáneamente, el aire inducido recircula en el interior y sólo existe aire desplazado, que sale de la tolva cuando sube el nivel, o ingresa a la tolva cuando baja el nivel del material en su interior. Estas subidas y bajadas de nivel es lo que se denomina factor de fluctuación (FF), en la tolva. Por ejemplo, en una planta concentradora el factor de fluctuación suele ser del orden de 1,2.

Control pasivo. El antiguo colector tipo Reverse Air Jet Collector [9] cumple con los requerimientos definidos, al igual que las bolsas de polvo que se describen en el Foundations [10]. Pero, con limpieza mecánica o con aire comprimido [9].

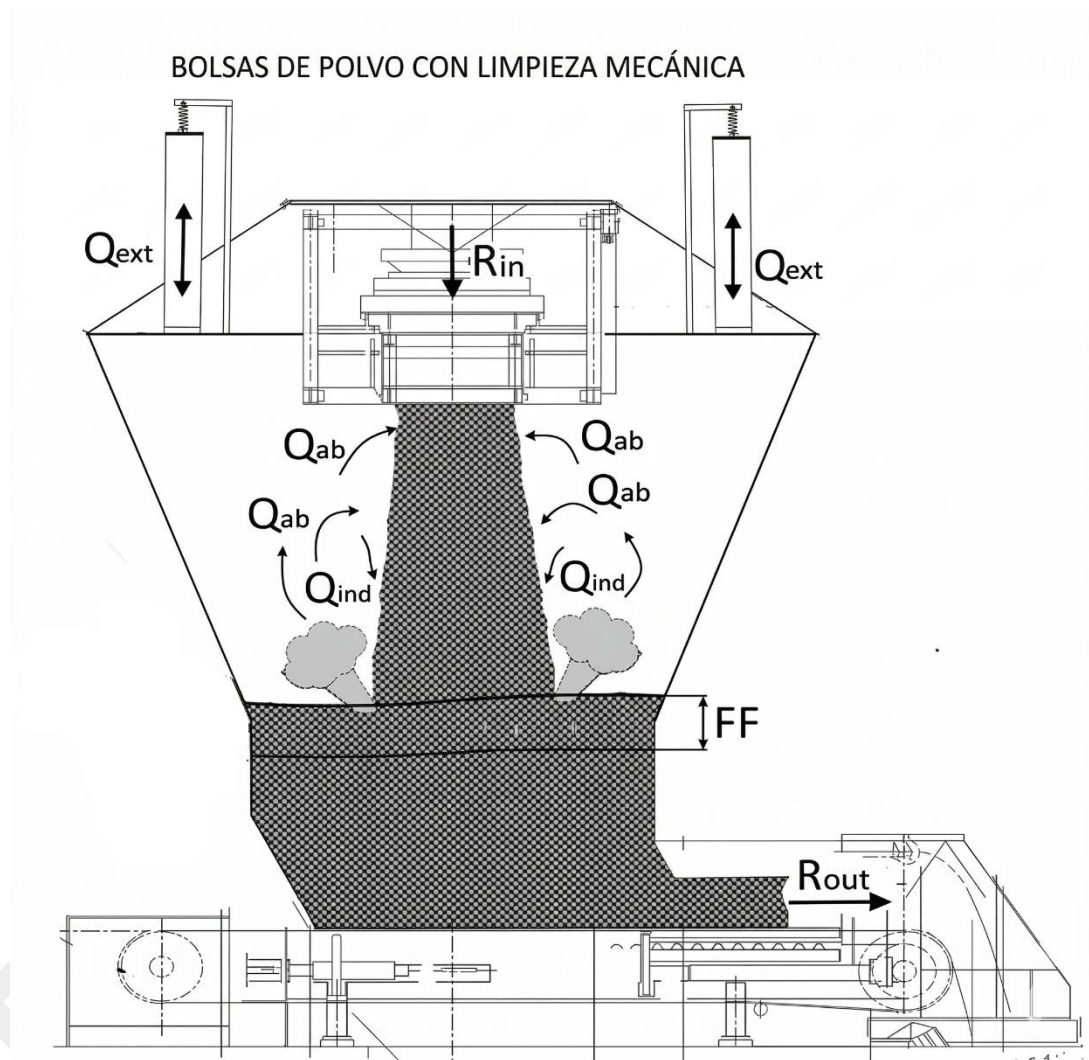


Figura 15. Tolva con bolsas de polvo con limpieza mecánica

Control pasivo + activo. Otra solución mixta para una tolva o acopio es incorporar un sistema de extracción, considerando que debe ingresar aire de reposición cuando el caudal extraído supera al aire

desplazado por el material, o cuando la alimentación se detiene y es necesario permitir la entrada de aire al interior.

8.0 CONCLUSIONES

La técnica para el control pasivo del polvo presentada en este documento representa un cambio de paradigma en el manejo de materiales a granel, integrando rigor científico con soluciones operativas de alta eficiencia. De este análisis se desprenden las siguientes conclusiones fundamentales:

- **Priorización de la Salud y el Entorno:** El control efectivo de las fracciones torácica (MP10), respirable (MP5) y fino respirable (MP2,5) es un imperativo ético y legal, dado el riesgo de enfermedades como la silicosis y el impacto ambiental en las comunidades circundantes.
- **Supremacía del Control Pasivo:** La implementación de sistemas que confinan y sellan los puntos de transferencia permite gestionar el aire inducido sin consumo de energía externo, optimizando la sustentabilidad de la operación.
- **Innovación en la Cuantificación:** El desarrollo del modelo matemático de Proconm, validado ante ASME, resuelve la brecha técnica en la estimación del aire inducido en condiciones de flujo libre, permitiendo diseños de ingeniería basados en datos precisos y no en supuestos genéricos.

Técnica para el Control Pasivo del Polvo		Proconm
Efraín Bozo Godoy / Gonzalo Bozo Nalli		Abril 2026

- **Sinergia entre Teoría y Hardware:** La eficiencia de recirculación (Efr) solo se alcanza mediante el uso de componentes de sellado y limpieza diseñados bajo principios aerodinámicos, garantizando que lo calculado en el modelo se replique fielmente en la operación real.
- **Hacia un Estándar de Excelencia:** El control de emisiones no debe verse solo como una mitigación de riesgos, sino como una oportunidad para reducir la pérdida de mineral de alta ley y mejorar la visibilidad y seguridad en las áreas de trabajo.

9.0

REFERENCIAS

[1] El Polvo Atmosférico. Publicado por COMET, Cooperative Program for Operational Meteorology, Education and Training de USA.

[2] Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) Model: Description and 1990s Dust Climatology. Publicado el 2003 en el Journal of Geophysical Research por: Charles S. Zender, Huisheng Bian, and David Newman

[3] Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing. Publicado por la norma NIOSH.

[4] Daniel Marshall and Greg Boggis, "Facts Concerning Dust and Air", Martin Engineering

[5] D. M. Anderson, "Dust control design by the air induction technique," Ind. Med. Surgery 33: 68 (1964)

[6] Richard Dennis & David V. Bubenick, "Fugitive Emissions Control for Solid Materials Handling Operations", Journal of the Air Pollution Control Association: (1983)

[Control de Emisiones Fugitivas Dennis](#)

[7] SEAA: Sistema de Encerramiento Anti-Atascos para Gualderas. Invento desarrollado por Proconm para resolver problema de atascos entre la cinta y la gualdera. Con patente registrada el año 2020

[Sistema de Encerramiento Anti-Atascos](#)

Técnica para el Control Pasivo del Polvo		Proconm
Efraín Bozo Godoy / Gonzalo Bozo Nalli	Abril 2026	

[8] Agenda of the CEMA Engineering Conference Bulk Conveyor Accessories Committee Meeting. Publicado por CEMA el año 2017.

[Bulk-Accessories-Committee-Meeting-Agenda-Set.pdf](#)

[9] Limpiador y Sellador desarrollado por Proconm para el control pasivo del polvo. Con patente registrada el año 2018.

[Limpiador y Sellador. Innovación Chilena](#)

[10] Martin Engineering. “Foundations the Practical Resource for Total Dust & Material Control”. Fourth Edition (2009).

[11] Charles E. Billings, Richard Dennis & Leslie Silverman, “Performance of Three Types of Fabric Dust Collectors”, Harvard University School of Public Health: 1954.

[12] Decreto 12. Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Respirable MP 10. Publicado el 04 de junio del 2022 por el Ministerio del Medio Ambiente.

[13] Decreto 12. Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Respirable Fino MP 2,5. Publicado el 09 de mayo del 2011 por el Ministerio del Medio Ambiente.

[14] Decreto 594. Aprueba Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo. Publicada el 29 de abril del 2000 por el Ministerio de Salud.

[15] ISO 7708:1995. Air quality - Particle Size Fraction Definitions for Health-Related Sampling.

Técnica para el Control Pasivo del Polvo		Proconm
Efraín Bozo Godoy / Gonzalo Bozo Nalli	Abril 2026	

[16] EN 481: 1995. Workplace Atmospheres - Size Fraction Definitions for Measurement of Airborne Particles.

[17] Bozo, Efrain, & Bozo, Gonzalo. (2024). Development and application of a mathematical model for the quantification of induced air and its extraction at bulk material transfer points. ASME IMECE 2024