PROCONM
TRANSPORTE LIMPIO

FUNDAMENTOS DE LA SUPRESIÓN DE POLVO
EFICIENCIA ESPERADA DE LA NEBLINA SECA

Efraín Bozo Godoy
Javiera Muñoz Sepúlveda

Noviembre 2024

PROCONM

FUNDAMENTOS DE LA SUPRESIÓN DE POLVO
EFICIENCIA ESPERADA DE LA NEBLINA SECA

Tabla de Contenido

1.0 INTRODUCCIÓN 2

2.0 TEORÍA DE LA SUPRESIÓN 2

2.1 Granulación 2
2.2 Supresión o Abatimiento 3
2.3 Neblina seca 3

3.0 ETAPAS DE LA SUPRESIÓN 4

3.2 Etapa 1: Colisión o humectación 4
3.3 Etapa 2: Aglomeración 6
3.4 Etapa 3: Recepción 7
3.5 Etapa 4: Mantención 7

4.0 EFICIENCIA DE LA SUPRESIÓN 8

4.1 Velocidad Limite o Terminal 8
4.2 Tiempo de Caída para la Velocidad Límite 8
4.3 Teoría de la Eficiencia Compuesta 10
4.4 Estudio sobre Eficiencia de Abatimiento (Etapas 1 y 2) 10
4.5 Criterio de Probabilístico para Abatimiento (Etapas 1 y 2) 13
4.6 Eficiencia para Etapa 3: Recepción 14
4.7 Eficiencia para Etapa 4: Mantención 15
4.8 Ejemplo de Cálculo de Eficiencia Caso Real 16

5.0 AUMENTAR LA EFICIENCIA 18

5.1 Transferencia entre Transportadores 18
5.2 Descarga de Camiones 19

6.0 ANALISIS Y CONCLUSIONES 20

7.0 REFERENCIAS 21

PROCONM

1.0 INTRODUCCIÓN

El polvo fugitivo en la minería representa un problema significativo a nivel mundial debido a su impacto en la salud, el medio ambiente y la eficiencia operativa. Además, las empresas se ven afectadas por la pérdida de mineral o por la llegada al proceso de partículas de tamaño que comprometen la recuperación.

Ya en 1957 [1] se afirmaba que “en todos los países mineros del mundo, la silicosis sigue constituyendo uno de los más graves y costosos problemas de higiene laboral que enfrenta la industria, y quizás el más difícil de resolver”. La realidad es que, más de 60 años después, el problema sigue presente.

Estudio y presentación realizada en Viña del Mar con datos duros sobre la silicosis —muertes por cada 100.000 habitantes— indican que en nuestro continente no se ha avanzado en el compromiso de erradicar esta enfermedad para el año 2030 [2].

Esto permite concluir que las medidas actuales para el control del polvo no tienen la eficiencia requerida o no cumplen con los estándares ambientales.

Probablemente, el método más antiguo y utilizado para controlar el polvo en las operaciones mineras y de procesamiento de minerales es el uso de sistemas de supresión o abatimiento, especialmente la neblina seca [3], diseñada para actuar sobre partículas invisibles y muy pequeñas.

2.0 TEORÍA DE LA SUPRESIÓN

2.1 Granulación

La Granulación es el proceso mediante el cual se combinan distintas partículas de polvo para lograr tamaños mayores. Este proceso se considera el opuesto a la conminución. La granulación puede llevarse a cabo de dos maneras: mediante compactación en seco o utilizando una solución líquida como aglutinante.

PROCONM

2.2 Supresión o Abatimiento

La supresión o abatimiento es un tipo de granulación húmeda que fue concebido para actuar sobre el polvo que ya se desprendió del material para aglomerar y abatir las partículas utilizando la pulverización húmeda con agua y aire. En esencia, el agua actúa como aglutinante permitiendo que las partículas se unan o aglomeren y se vuelvan más pesadas hasta vencer la velocidad límite y caer o abatir.

2.3 Neblina seca

La neblina o niebla seca es supresión que se realiza con millones de gotas submicroscópicas con tamaño promedio de 9 a 10 micrones. La niebla seca requiere agua blanda, dada la baja disponibilidad de las boquillas se ha llegado a plantear la necesidad de osmosis inversa para tratar el agua.



Figura 01: Neblina seca direccionada para disminuir la cama de polvo

3.0 ETAPAS DE LA SUPRESIÓN

Este sistema de abatimiento se divide en 4 etapas:

1. Colisión o humectación
2. Aglomeración
3. Recepción
4. Mantención

3.2 Etapa 1: Colisión o humectación

La colisión es el choque de una gota de agua con una partícula de polvo de diferente o igual tamaño. Esta colisión es totalmente aleatoria, puede ser por impacto, por intercepción o se puede considerar del tipo browniano.



Figura 02: Formas de colisión [3]

Una gota de agua puede colisionar con los siguientes tamaños de partículas:

a) Con partículas de mayor tamaño
b) Con partículas de similar tamaño
c) Con partículas más pequeñas

a) Colisión con partículas de mayor tamaño o humectación. Si la gota de agua es de menor tamaño que la partícula de polvo, la impactará mojando su superficie en la zona del impacto.



Figura 03: Colisión gota con partícula de mayor tamaño

b) **Colisión con partículas de similar tamaño o unión**. Si la gota de agua es de similar tamaño que la partícula de polvo, se producirá una unión después de la colisión.

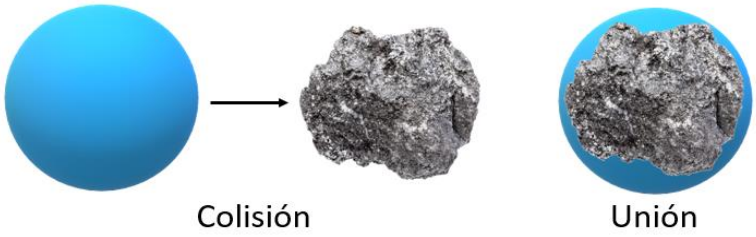


Figura 04: Colisión gota con partícula de similar tamaño

c) **Colisión con Partículas Pequeñas**. Si la gota de agua es de mayor tamaño que la partícula de polvo, no se producirá la colisión porque la tensión superficial de la gota lo impedirá.

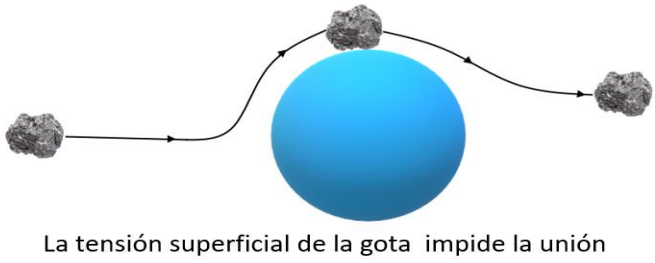


Figura 05: Colisión gota con partícula de menor tamaño

Surfactante. El uso de un surfactante o tensioactivo ayuda a reducir la tensión superficial de las gotas de agua, facilitando así la unión de partículas de menor tamaño que la gota de agua. Es una buena solución si no afecta el proceso.



Figura 06: Colisión gota con tensioactivo y partícula de menor tamaño

3.3 Etapa 2: Aglomeración

La unión y la humectación crean un ambiente cohesivo que facilita la unión de una parte significativa de ellas entre sí o con otras partículas no humectadas. El objetivo es aumentar su peso ejemplificado en la Figura 07 para superar las corrientes de aire presentes dentro del confinamiento para alcanzar o superar la fuerza de sustentación y permitir la decantación o abatimiento de los aglomerados.

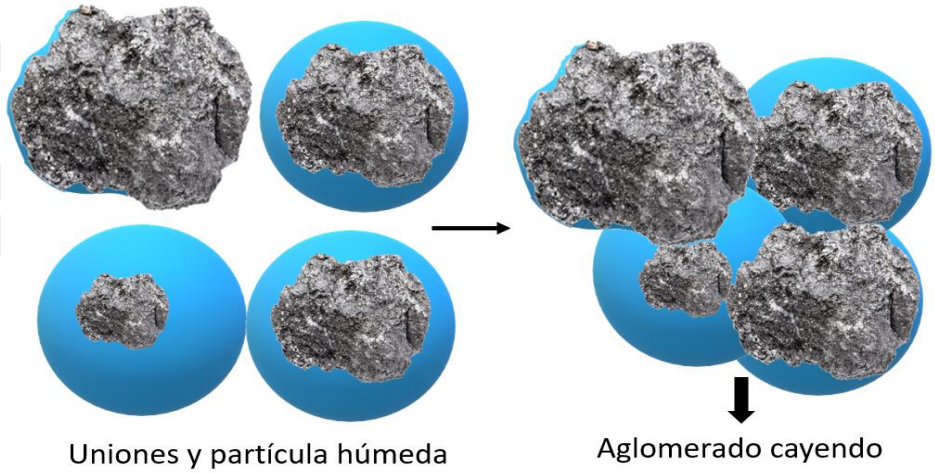


Figura 07: Aglomeración y abatimiento

3.4 Etapa 3: Recepción

Para que las partículas que han decantado se adhieran a la superficie irregular del mineral, se deben cumplir dos condiciones:

- La velocidad relativa sobre la superficie del material al interior de la gualdera (Vri = Vc - Va) debe ser igual o menor que la velocidad de sedimentación del aglomerado (Vt).
- La superficie del mineral debe estar en condiciones de receptividad, es decir, debe estar relativamente húmeda o mojada.

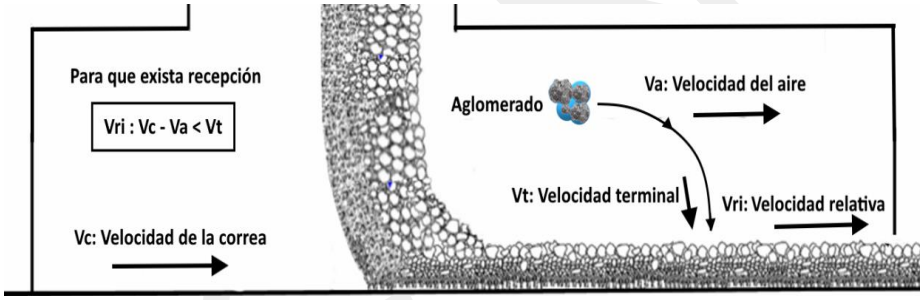


Figura 08: Requisitos para la recepción

3.5 Etapa 4: Mantención

Después de la recepción, las partículas o los aglomerados deben permanecer en el material durante el mayor tiempo posible. Este problema se presenta principalmente a la salida de la gualdera cuando la superficie del material tiene una mayor velocidad relativa (Vrs), como se muestra en la siguiente Figura 09.

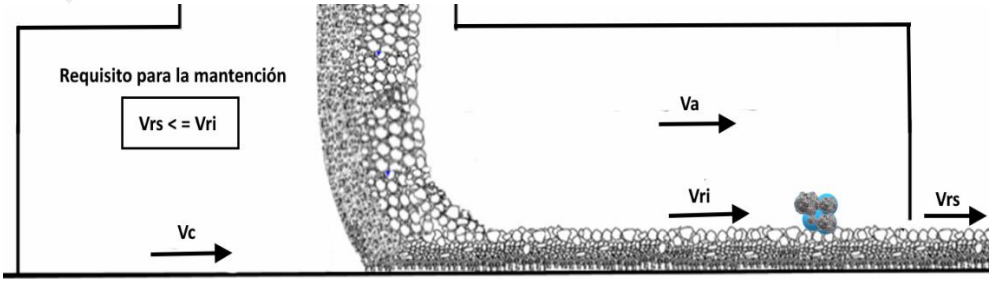


Figura 09: Requisitos para la recepción

4.0 EFICIENCIA DE LA SUPRESIÓN

4.1 Velocidad Limite o Terminal

El gráfico de COMET [4] entrega velocidades de deposición de partículas en flujo turbulento, construido a partir del modelo de Zender [5].

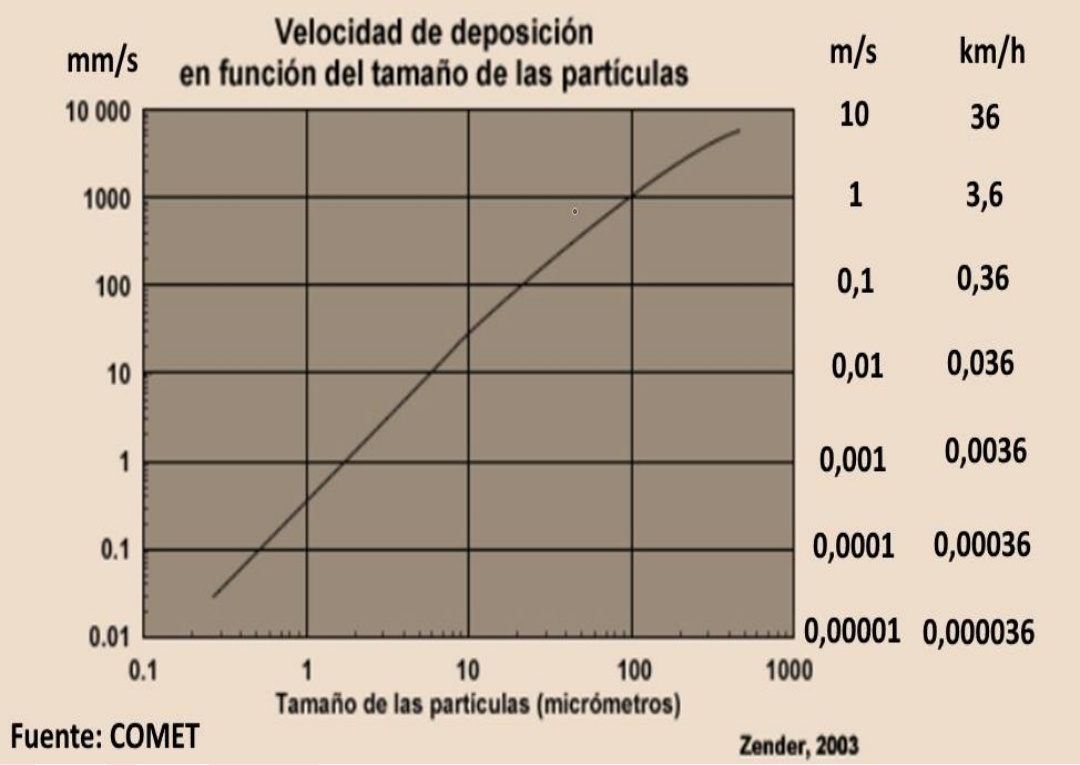


Figura 10: Diagrama de COMET - Zender

4.2 Tiempo de Caída para la Velocidad Límite

Con la velocidad límite (Vl), el tiempo de caída (Tc) se obtiene de:

$$Tc = H/Vl$$

Donde H es la altura desde que cae la partícula hasta el fondo.

Suponiendo un metro de altura de caída, se construyó la siguiente Tabla:

Tiempo de Caída desde 1 m de Altura a Velocidad Límite en Flujo Turbulento			
Tamaño de partícula en µm	Velocidad límite mm/s	Velocidad límite km/h	Tiempo de caída en segundos
1	0,4	0,001	2.857
2,5	2	0,007	500
5	7	0,025	143
10	30	0,108	33
20	90	0,324	11
30	200	0,720	5
40	300	1,080	3,3
50	400	1,440	2,5
60	500	1,800	2,0
70	600	2,160	1,7
80	700	2,520	1,4
90	900	3,240	1,1
100	1.000	3,600	1,0
200	2.500	9,000	0,4
300	4.000	14,400	0,3
500	6.000	21,600	0,2
1.000	10.000	36,000	0,1

Tabla 01: Tiempo de caída a 1 m de altura en flujo turbulento

Por ejemplo, si una partícula o un aglomerado tiene un tamaño de 100 µm y la velocidad dentro de la gualdera es de 1 m/s, alcanzará su velocidad límite y el tiempo de caída será de 1 segundo.

Para una velocidad de 1 m/s, las partículas menores a 100 µm no sedimentarán, mientras que las de mayor tamaño lo harán en un tiempo menor al indicado en la tabla.

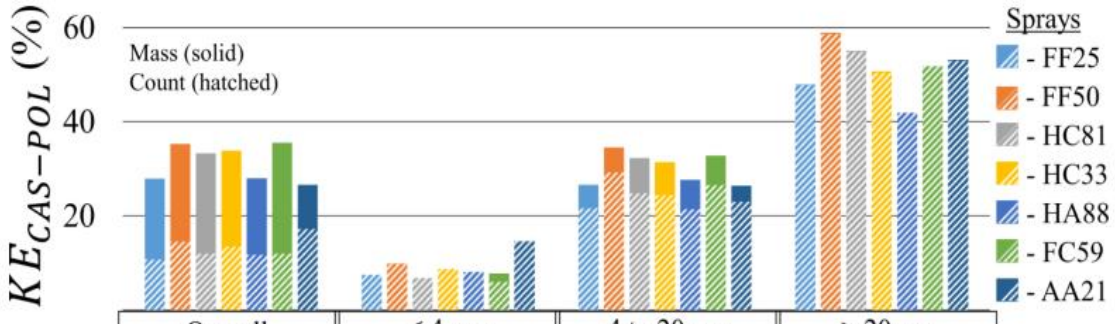
4.3 Teoría de la Eficiencia Compuesta

Según la teoría de la eficiencia compuesta, para calcular la eficiencia de un proceso que tiene múltiples etapas, se utiliza la eficiencia individual de cada etapa. La eficiencia total del proceso se obtiene multiplicando las eficiencias de cada etapa. Por consiguiente, si tenemos 4 etapas, la eficiencia total (Et) está dada por:

$$Et = E1 \times E2 \times E3 \times E4$$

4.4 Estudio sobre Eficiencia de Abatimiento (Etapas 1 y 2)

Un estudio de la Universidad de Gotemburgo [6] entrega eficiencia de abatimiento por masa de partículas (KEMass) y por conteo de partículas (KEcount) abatidas.



	Overall		≤ 4 µm		4 to 20 µm		> 20 µm	
	Particle Size							
	KE_{Mass}	KE_{Count}	KE_{Mass}	KE_{Count}	KE_{Mass}	KE_{Count}	KE_{Mass}	KE_{Count}
FF25	27.9	10.7	6.2	7.5	26.6	21.6	47.9	47.8
FF50	35.3	14.5	9.9	9.8	34.6	29.2	58.9	58.6
HC81	33.3	12.0	5.3	6.8	32.3	24.8	55.0	54.8
HC33	33.9	13.5	6.5	8.8	31.4	24.4	50.7	50.5
HA88	28.0	11.8	7.3	8.1	27.7	21.4	40.1	42.0
FC59	35.6	12.0	7.8	6.0	32.8	26.6	51.4	51.8
AA21	26.6	17.2	13.5	14.6	26.4	23.0	53.2	53.0

Tabla 02: Eficiencia de abatimiento

Nota; El particulado ≤ 4 µm corresponde a la fracción respirable (que llega a los pulmones) según la norma NIOSH.

Consideraciones del estudio

Se dice que este tipo de operación minera genera polvo de carbón flotante, de diámetro < 75 µm. Es decir, la velocidad del aire al interior del túnel es de ≈ 2,5 km/h (0,7 m/s).

El monitor de aerosol en tiempo real CAS-POL mide partículas entre 0,5 µm y 50 µm.

Se utilizaron 7 diferentes tipos de aspersores.

A mayor presión, menor tamaño de partícula y mayor eficiencia.

El aspersor se ubicó en la misma dirección y sentido del flujo de aire según muestra la Figura 11 y también se midió contraflujo.

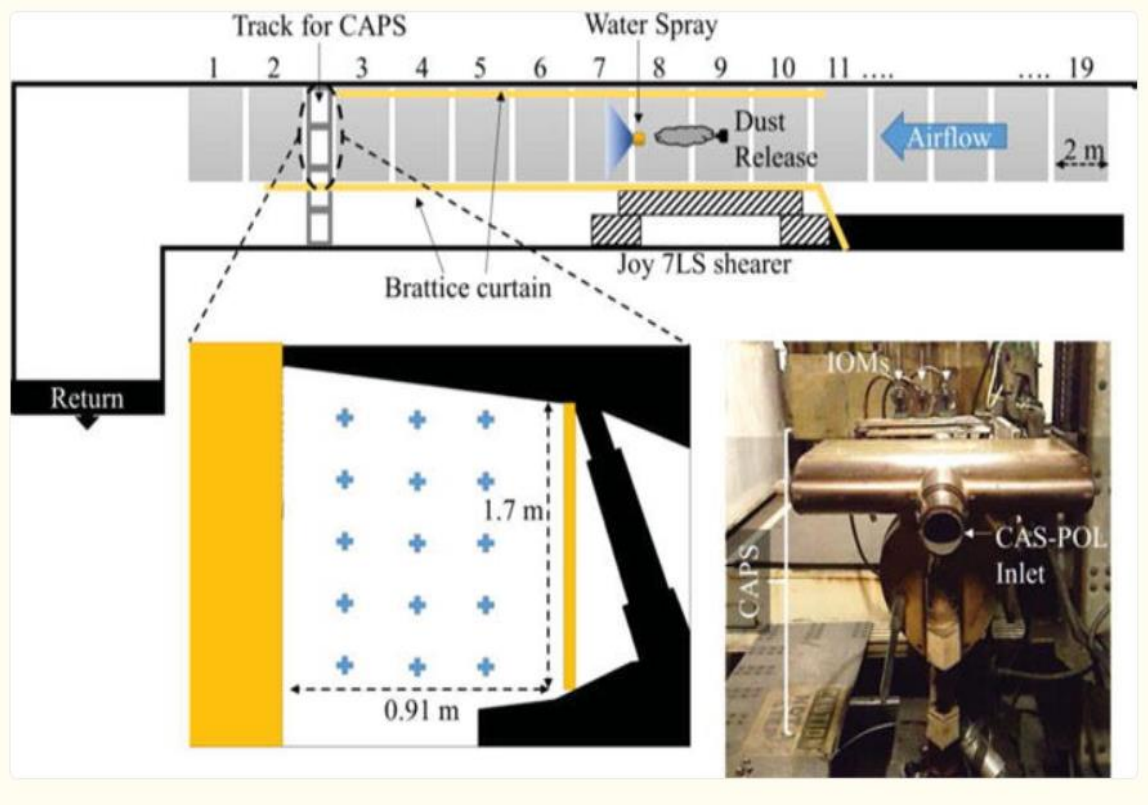


Figura 11: Disposición de los aspersores

Análisis de los resultados

1. Considerando sólo las etapas 1 y 2, la eficiencia total esperada de la supresión para partículas inferiores a 50 µm fluctúa entre 26% y 36%.

2. El abatimiento es más eficiente en partículas mayores. Es decir, la humectación con neblina seca tiene mayor impacto positivo en las partículas mayores a 20 µm, entre 40% y 60%.

3. Aunque el monitor mide partículas hasta 50 µm, la tendencia es que para partículas mayores a 50 µm la eficiencia superará el 60%.

4. Para la fracción respirable, que puede llegar a los pulmones, ≤ 4 µm la eficiencia fluctúa entre 5% y 14%.

5. El aspersor FF50 (abanico plano de 50º) es el más eficiente para partículas mayores a 4 µm.

6. El aspersor AA51 (cono lleno de 21º) es el más eficiente para partículas inferiores a 4 µm.

7. Los flujos en el mismo sentido o inverso es una situación no favorable para lograr una mayor eficiencia de abatimiento.

8. No se analizó la disposición de los aspersores actuando como cortina agua-aire

Conclusiones

1. Para obtener una eficiencia aceptable para la fracción que afecta la salud y el medioambiente (MP10) es necesario mejorar las condiciones de aplicación. Esto es, aumentar el tiempo de exposición.

2. Para partículas mayores, la supresión es una buena solución, más aún si se logra aumentar el tiempo de exposición.

PROCONM

3. La disposición de los aspersores actuando también como cortina agua-aire disminuye la presión y velocidad de la nube provocando una turbulencia favorable que aumenta el tiempo de exposición y, por ende, la eficiencia de abatimiento. La Figura 12 muestra una disposición recomendada de los aspersores en la descarga de camiones.



Figura 12: Disposición de los aspersores actuando como cortina

4.5 Criterio de Probabilístico para Abatimiento (Etapas 1 y 2)

Proconm ha analizado la eficiencia esperada de la neblina seca en proyectos para Salares Norte y Centinela, aplicando un criterio probabilístico. Considerando experiencias posteriores, nuevas referencias y un tiempo de exposición relativamente fijo de 3 segundos, en la Tabla 03, Proconm, entrega este criterio actualizado para estimar las eficiencias de abatimiento en las etapas 1 y 2.

Eficiencia Esperada para 3 s de Exposición		
Velocidad aire	Eficiencia Etapa 1 x Etapa 2, %	
m/s	≤ 20 µm	> 20 µm
0 - 0,5	90	100
0,5 - 1	60	90
1 - 1,5	50	80
1,5 - 2	40	60
2 - 2,5	30	40
2,5 - 3	20	30
> 3	10	10

Tabla 03: Eficiencia esperada para 3 segundos de exposición (Proconm)

4.6 Eficiencia para Etapa 3: Recepción

Para estimar la eficiencia de la Etapa 3, se propone la siguiente Tabla basada en la Velocidad relativa (Vr). En una gualdera la Vr está dada por:

Vr = Velocidad de la correa – Velocidad del aire interior gualdera

Después de una descarga de camión cuando el chancador está en operación, la velocidad relativa es negativa

PROCONM

Eficiencia Esperada para Etapa 3: Recepción		
Velocidad relativa	Superficie	Eficiencia de
m/s		recepción, %
≤ 0	Húmeda	100
0 - 0,5	Húmeda	90
0,5 - 1	Húmeda	80
1 - 1,5	Húmeda	70
1,5 - 2	Húmeda	60
2 - 2,5	Húmeda	50
2,5 - 3.0	Húmeda	40
> 3.0	Húmeda	30
≤ 0	Seca	90
0 - 0,5	Seca	70
0,5 - 1	Seca	60
1 - 1,5	Seca	50
1,5 - 2	Seca	40
2 - 2,5	Seca	30
2,5 - 3.0	Seca	20
> 3.0	Seca	10

Tabla 04: Eficiencia esperada para Etapa 3. Recepción (Proconm)

4.7 Eficiencia para Etapa 4: Mantención

Después de la transferencia, las condiciones del material deben permitir que los aglomerados se mantengan en el material por un tiempo mínimo.

En una gualdera la velocidad de mantención (Vm) está dada por:

$$Vm = Vc – Vr$$

En la descarga de camiones, la Vm se considera igual a la Vr

Eficiencia Esperada para Etapa 4: Mantención		
Vm	Estado superficie	Eficiencia de
m/s	del material	mantención, %
< 1	Húmeda	100
1 - 2	Húmeda	90
2 - 3	Húmeda	80
> 3	Húmeda	60
< 1	Seca	60
1 - 2	Seca	40
2 - 3	Seca	20
> 3	Seca	10

Tabla 05: Eficiencia esperada para Etapa 4. Mantención (Proconm)

4.8 Ejemplo de Cálculo de Eficiencia Caso Real

En mediciones realizadas para Antucoya, se construyó una Línea Base y un Mapa de Riesgo, también se midieron los flujos y el material particulado al interior de gualderas en el área de chancado secundario. [7].

La correa CV004 recibe el bajo tamaño de los harneros. Por tanto, tiene mucho fino. Posteriormente descarga en la correa CV010 que transporta el material al chancado terciario. En el siguiente diagrama se muestra esta realidad.

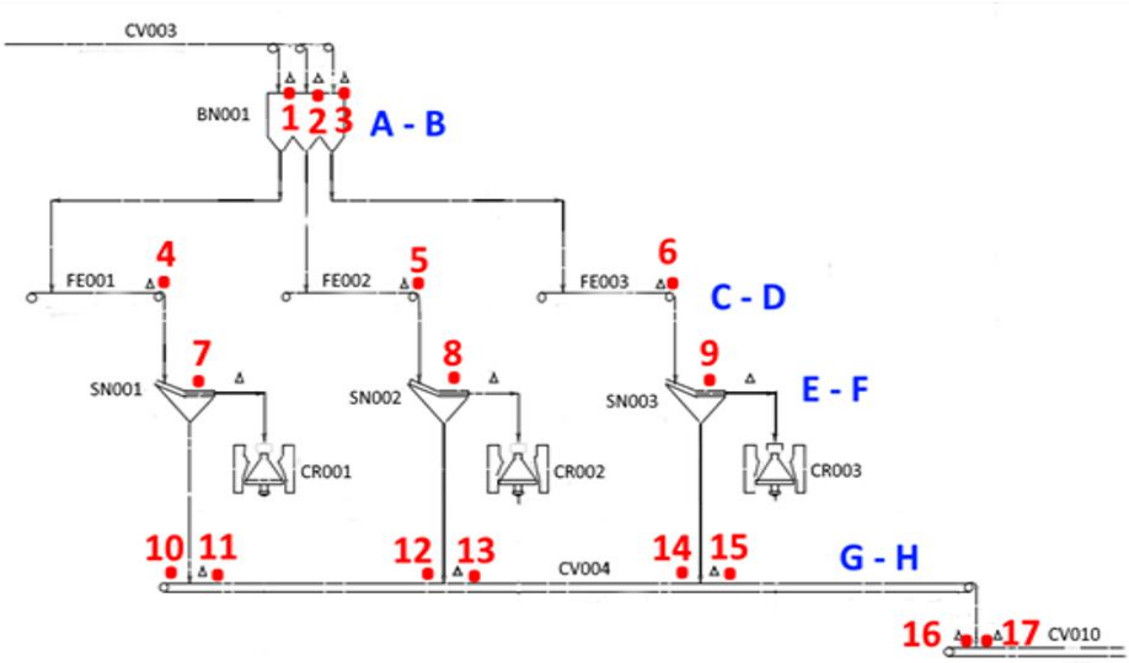


Figura 13: Diagrama chancado secundario Antucoya

La velocidad promedio medida en la parte frontal (17) es de 2 m/s y en la parte posterior (16) es de 1 m/s. La velocidad de la correa CV010 es de 5 m/s. Hoy tiene aspersores tipo neblina seca. En la Tabla de cálculo se considera superficie del mineral seca y húmeda.

Particulado	Eficiencias para mineral con superficie seca, %			
	Etapas 1 y 2	Etapa 3	Etapa 4	Total
≤ 20 µm	40	20	20	1,6
> 20 µm	60	20	20	2,4

Particulado	Eficiencias para mineral con superficie húmeda, %			
	Etapas 1 y 2	Etapa 3	Etapa 4	Total
≤ 20 µm	40	40	80	12,8
> 20 µm	60	40	80	19,2

Tabla 06: Eficiencias transferencia CV004/CV010 de Antucoya

5.0 AUMENTAR LA EFICIENCIA

El uso de la supresión o de neblina seca por sí sola no garantiza una eficiencia aceptable. Por lo tanto, es necesario aumentar el tiempo de exposición y reducir la velocidad del aire. A continuación, se presentan dos ejemplos de aplicación que cumplen con este requisito.

5.1 Transferencia entre Transportadores

En primer lugar, es necesario implementar un control pasivo del polvo de manera eficiente para reducir el flujo y, por lo tanto, la velocidad del aire. La cortina de agua detiene las partículas, lo que permite un mayor tiempo de exposición para que sean abatidas por los supresores, aumentando así la eficiencia de las etapas 2 y 3. Además, la humectación de la superficie con la cortina fija los finos sobre las colpas, lo que incrementa la eficiencia de las etapas 3 y 4.

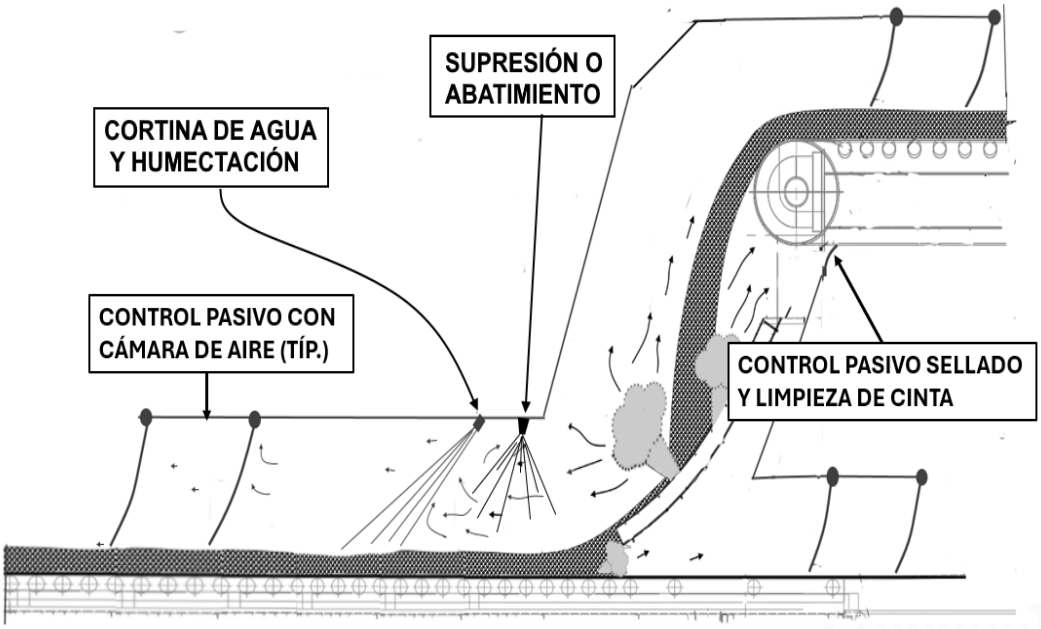


Figura 14: Diagrama transferencia con cortina-humectación y abatimiento

5.2 Descarga de Camiones

En la descarga de camiones, se utiliza una cortina de agua sobre los supresores, lo que permite detener o reducir la velocidad de la nube de polvo y aumentar el tiempo de exposición del particulado a la neblina seca. Los supresores, además de abatir el polvo, funcionan como una cortina complementaria a las boquillas tipo abanico regulable.

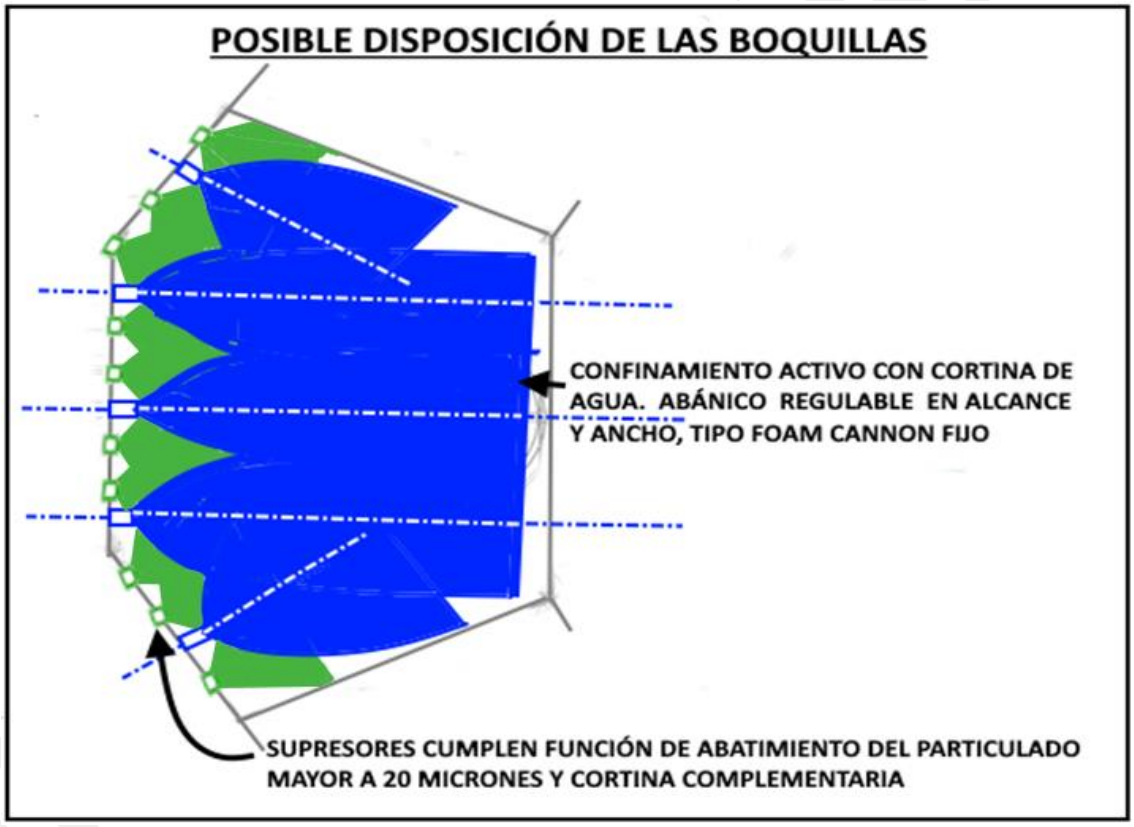


Figura 15: Diagrama descarga de camiones cortina y abatimiento

Si se incluye la humectación durante la descarga del camión, se favorece que una cantidad significativa de finos se adhiera a las colpas húmedas. Esto es, se aumenta la eficiencia global del control de polvo. La Figura 16 muestra diagrama propuesto por Proconm para la descarga de camiones con estos conceptos.

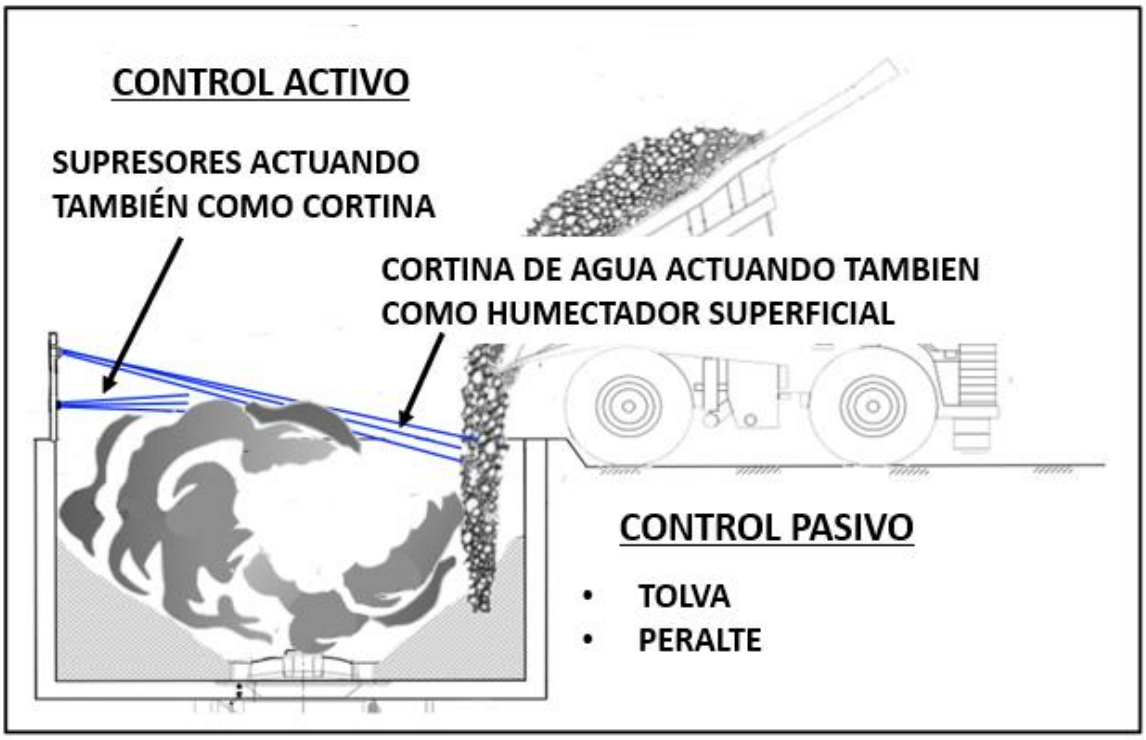


Figura 16: Diagrama propuesto por Proconm para proyectos entre los años 2021 y 2024

6.0 ANALISIS Y CONCLUSIONES

La supresión es un proceso para el control local del polvo que tiene baja eficiencia si solo actúa como abatimiento. Los supresores que también funcionan como cortinas tienen una eficiencia significativamente superior.

Además, al combinar el abatimiento con métodos de control pasivo y activo del polvo, la eficacia del sistema aumenta considerablemente. En el caso de la descarga de camiones, esta aplicación se hace necesaria, ya que sin duda permitiría cumplir con el marco regulatorio ambiental.

Asimismo, si se incorpora humectación superficial, una mayor cantidad de finos se mantendrán adheridos a las colpas, favoreciendo el control del polvo aguas abajo y distribuyendo los finos en los acopios o pilas.

La supresión es más eficiente en partículas de mayor tamaño, que generalmente son las requeridas en el proceso ya que suelen tener una mayor ley. Es decir, su aplicación puede generar un retorno significativo si se siguen las recomendaciones proporcionadas en el presente documento.

7.0 REFERENCIAS

[1] Guía para la Prevención y la Supresión de Polvo, en la Minas, Túneles y Canteras. Emitido por la Oficina Internacional del Trabajo (International Labour Office, ILO), en Ginebra año 1965. Versión en inglés, Ginebra 1957. Publicado en la web de la OIT, Organización Internacional del Trabajo, 1965.
Guía para Prevención y Supresión de Polvo en Minas

[2] PLANESI ¿Meta Real o Utopía?. Emitido y publicado por Proconm. Exposición realizada en Viña de Mar, en el III Congreso de Feria de Correas Transportadoras, año 2021, organizado por Mentoris.
PLANESI ¿Meta Real o Utopía?

[3] Sistemas de Supresión de Polvos por Niebla Seca Dry Fog, en la página web de Industrial System.
Supresion por niebla seca

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

[5] 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

[6] Comparison of the CAS-POL and IOM samplers for determining the knockdown efficiencies of water sprays on float coal dust. Clara E. Seaman, Michael R. Shahan, Timothy W. Beck & Steven E. Mischler. Publicado por Journal of Occupational and Environmental Hygiene.

[7] 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. Manuscript submitted for publication, ASME IMECE 2024.

PROCONM