Assessment of Atmospheric Dust Retention by *Pinus radiata* and *Pinus montezumae* in Mining-Influenced Areas of Cajamarca, Peru

Tonny Paul Ramirez Julca[1]; Nilso Aguilar Cotrina[2]; Gladys Sandi Licapa-Redolfo[3]; Edilberto Gastolomendo-Malimba[4]
[1,2,3]Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú; [4]Área Forestal y Sistemas de Información Geográfica, Cooperativa Agraria Atahualpa Jerusalén de Trabajadores Ltda. - Granja Porcón, Perú; N00206323@upn.pe; *N00326798@upn.pe; gladys.licapa@upn.edu.pe; edilbertogastolomendo@granjaporcon.com*

Abstract– ***The present study addresses atmospheric sedimentable dust pollution as a relevant environmental problem in mining influenced areas, due to its effects on air quality, forest ecosystems, and human health. The objective was to evaluate the efficiency of atmospheric sedimentable dust capture using forest biofilters of Pinus radiata and Pinus montezumae in the Pampa Caballero sector, Granja Porcón, Cajamarca, during 2025, with the aim of generating technical information to support environmental mitigation strategies. The study was conducted under a quantitative, non-experimental, and descriptive approach, using the gravimetric method to determine the average flux of particulate matter (PMF) retained on needles and bark of georeferenced trees. The results indicate that Pinus radiata exhibited higher capture efficiency, accounting for 59.7% and 73.0% of the sedimentable dust, compared to 40.3% and 27.0%, respectively, recorded for Pinus montezumae. The highest PMF values were observed in individuals located near the roadway, such as samples M1 and M4, revealing a decreasing depositional gradient toward the interior of the forested area. It is concluded that Pinus radiata has a greater capacity for retaining sedimentable particles than Pinus montezumae, mainly due to its spatial location relative to emission sources, supporting its use as an efficient forest biofilter for mitigating atmospheric dust in high-Andean mining environments***

Keywords-- ***Pinus radiata; Pinus montezumae; particulate matter; gravimetric method; atmospheric dispersion..***

Evaluación de la Retención de polvo atmosférico sedimentable por *Pinus radiata* y *Pinus montezumae* en zonas de influencia minera, Cajamarca, Perú

Tonny Paul Ramirez Julca[1]; Nilso Aguilar Cotrina[2]; Gladys Sandi Licapa-Redolfo[3]; Edilberto Gastolomendo-Malimba[4]
[1,2,3]Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú; [4]Área Forestal y Sistemas de Información Geográfica, Cooperativa Agraria Atahualpa Jerusalén de Trabajadores Ltda. - Granja Porcón, Perú; N00206323@upn.pe; *N00326798@upn.pe; gladys.licapa@upn.edu.pe; edilbertogastolomendo@granjaporcon.com*

Resumen– ***El presente estudio aborda la contaminación por polvo atmosférico sedimentable como un problema ambiental relevante en zonas de influencia minera, debido a sus efectos sobre la calidad del aire, los ecosistemas forestales y la salud humana. El objetivo fue evaluar la eficiencia de captura del polvo atmosférico sedimentable mediante biofiltros forestales de Pinus radiata y Pinus montezumae en el sector Pampa Caballero, Granja Porcón, Cajamarca 2025, con el propósito de generar información técnica que contribuya a estrategias de mitigación ambiental. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, no experimental y descriptivo, utilizando el método gravimétrico para determinar el flujo promedio de material particulado (FMP) retenido en acículas y corteza de árboles georreferenciados. Los resultados indican que el Pinus radiata presentó una mayor eficiencia de captura, concentrando el 59.7% y 73.0% del polvo sedimentable frente al 40.3% y 27.0%, respectivamente, registrados en Pinus montezumae. Los mayores valores de FMP se observaron en individuos próximos a la carretera, ¡como las muestras M1 y M4, evidenciándose un gradiente deposicional decreciente hacia al interior del área forestal. Se concluye que el Pinus radiata posee una mayor capacidad de retención de partículas sedimentables en comparación con el Pinus montezumae, principalmente debido a su ubicación espacial a las fuentes emisoras, lo que respalda su uso como biofiltro forestal eficiente para la mitigación del polvo atmosférico en entornos mineros altoandinos.***

Palabras clave-- Pinus radiata; Pinus montezumae; material particulado; método gravimétrico; dispersión atmosférica.

I. Introducción

Con el avance industrial, la expansión urbana y el desarrollo de infraestructuras han tensionado la capacidad de regulación ambiental. La polución por material de partículas y polvos atmosféricos sedimentables constituye uno de los desafíos más serios. La creciente actividad minera exige un enfoque sostenible que combine monitoreo continuo y sistemas de información geográfica para la mitigación.

A escala global, la OMS señala que alrededor del 99% de la población reside en zonas donde el material particulado supera los valores guía recomendados [1] [2]. Esto se relaciona con fuentes como combustibles fósiles, procesos industriales y transporte urbano, responsables de gran parte del material particulado fino a nivel mundial [3]. Asimismo, múltiples ciudades, especialmente en regiones de ingresos bajos y medianos, registran valores muy superiores al límite anual de 5 µg/m³ para material particulado fino [4].

La reducción progresiva de las áreas verdes, resultados de la expansión urbana y deforestación disminuye la capacidad natural de filtración de partículas. Esto reduce la deposición seca y favorece la resuspensión de polvo en zonas urbanas densificación, agravando las concentraciones de material particulado. Estudios en regiones tropicales demuestran que la pérdida de bosques modifica directamente los niveles de material particulado, sobre todo en áreas deforestadas para agricultura o expansión urbana [5].

Por otro lado, la degradación ambiental (deforestación, fragmentación de hábitats) contribuye tanto a la emisión directa de partículas como a la pérdida de servicios ecosistémicos que regulan la calidad del aire. En regiones con alta presión antrópica, la degradación del paisaje incrementa la exposición a partículas finas y gruesas, especialmente cuando está vinculada a incendios o agricultura intensiva [6]. Estas dinámicas no solo aumentan las emisiones, sino que reducen la capacidad de los ecosistemas para capturar contaminantes, exacerbando los riesgos sanitarios.

El Perú no es ajeno a esta problemática. La minería a cielo abierto, el transporte pesado y la erosión natural de los suelos contribuyen significativamente a la emisión de material particulado Reportes oficiales indican aumentos continuos en regiones altoandinas, sobre todo en época seca [7]. A pesar de que existen iniciativas de reforestación de la familia Pinaceae, la investigación sobre su efectividad para atrapar partículas sigue siendo limitada.

En Cajamarca, la minería se posiciona como la más productiva del país [8], donde la actividad extractiva crea entornos propicios para la dispersión de partículas [9]. La inclinación del terreno, los vientos persistentes y los suelos áridos favorecen la resuspensión de partículas hacia áreas cercanas a la actividad minera. Si bien se han realizado plantaciones de *Pinus radiata* y Pinus montezumae para reforestación y estabilización del suelo, aún faltan estudios que analicen su efectividad retenedora en condiciones reales de actividad minera [7]. Esta disparidad científica respalda la necesidad de explorar su capacidad como barreras naturales para la mitigación ambiental.

El monitoreo del polvo atmosférico sedimentable (PAS) es una herramienta fundamental para evaluar la magnitud de la

deposición de partículas en zonas de influencia minera, donde la remoción del suelo, la voladura, el tránsito de maquinaria pesada y el acarreo de materiales generan incrementos significativos de partículas gruesas en suspensión. El monitoreo gravimétrico de deposición, los cuales permiten cuantificar la carga de partículas acumuladas sobre una superficie expuesta durante un período determinado, proporcionando un indicador directo de la presión atmosférica de polvo en el entorno. En la captura del material particulado se efectuó mediante la extracción directa de acículas de *Pinus radiata* y *Pinus montezumae*, las cuales actúan como superficies receptoras naturales debido a su morfología y alta capacidad de interceptación. De acuerdo con lineamientos internacionales para muestreos ambientales de campo, es indispensable asegurar la trazabilidad de las muestras mediante protocolos estandarizados de etiquetado, transporte, almacenamiento y acondicionamiento previo al análisis, con el fin de garantizar la integridad del material recolectado y la confiabilidad de los resultados obtenidos. Estos principios metodológicos, establecidos por organismos de referencia como la US Environmental Protection Agency, proporcionan un marco robusto para validar procedimientos de muestreo ambiental basados en captación directa y análisis gravimétrico en laboratorio. La aplicación de estos procedimientos en áreas mineras permite identificar zonas críticas de deposición, establecer patrones de dispersión y evaluar la eficacia de barreras naturales o artificiales para mitigar el transporte de partículas hacia ecosistemas vulnerables y asentamientos cercanos [10].

Para caracterizar los patrones de dispersión son esenciales las bases de datos meteorológicos del SENAMHI, que brindan registros históricos de viento. Esta información permite modelar las trayectorias de las partículas, identificar corredores de contaminación y ubicar estaciones de muestreo según la influencia de las corrientes de aire [11].

La vegetación arbórea puede funcionar como un filtro natural para partículas atmosféricas, atrapándolas en sus hojas, sobre todo en coníferas, cuyas características morfológicas favorecen la adherencia de las partículas [7]. Las acículas que tienen cutícula cerosa, su organización en fascículos y un follaje denso mejoran la eficiencia en la captura de material particulado tanto finas como gruesas.

El software ArcGIS-Pro se utiliza para modelar la dispersión espacial de contaminantes, incorporando elevación, fuentes de emisión, patrones de viento y vegetación [9]. Esto permite delimitar zonas de muestreo críticas. El método gravimétrico, mediante lavado, filtrado, secado y pesaje de acículas bajo condiciones controladas, proporciona una medición directa de la masa de partículas atrapadas, siendo útil para evaluar la eficiencia de las especies [10].

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo poner en estudio el monitoreo inteligente del polvo atmosférico sedimentable (PAS) mediante las especies forestales de *Pinus radiata* y *Pinus montezumae* dentro del sector forestal Centro poblado la Shoclla, dentro del área de la Cooperativa Agraria Atahualpa Jerusalén de Trabajadores Ltda. - Granja Porcón, Cajamarca, utilizando el método gravimétrico y el software ArcGIS para la ubicación y generación de mapas de dispersión; se pretende posicionar a la especie Pinus como la electa para la captación de material particulado de PAS, a su vez, contribuir a la planificación de estrategias de prevención e implementar a esta vegetación como mitigación a las partículas generadas en estos procesos de la región. El estudio se orienta a proporcionar información clave para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y conservación de la vida de ecosistemas vulnerables en Cajamarca.

II. METODOLOGÍA

A. Tipo de metodología

El presente estudio adopta un enfoque metodológico cuantitativo, de tipo no experimental, descriptivo [12], basado en los principios de medición gravimétrica y en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la evaluación de la dispersión del material particulado en la zona de estudio. El método principal es la determinación del material particulado polvo atmosférico sedimentable retenida en las acículas de *Pinus radiata* y *Pinus montezumae*, se empleó un procedimiento controlado de lavado, filtración y secado para cuantificar la acumulación de partículas atmosféricas. De manera complementaria, el análisis espacial permitió integrar datos de interpolación dirección y velocidad del viento provenientes de estaciones meteorológicas oficiales, generando modelos de transporte y deposición de partículas mediante herramientas SIG [13]. Este tipo de metodología ha sido ampliamente aplicada en estudios de monitoreo de calidad del aire y evaluación ambiental en regiones expuestas a fuentes de emisión minera y urbana [14], [15].

B. Ubicación y recolección de muestras

El estudio se desarrolló en el sector forestal de Pampa Caballero, ubicado en el Centro Poblado La Shoclla, área perteneciente al predio de la Cooperativa Agraria Atahualpa Jerusalén de Trabajadores Ltda. - Granja Porcón, como se muestra en la Figura 1, en el distrito, provincia y departamento de Cajamarca. Este sector se caracteriza por presentar áreas con influencia directa e indirecta de actividades mineras a cielo abierto, las cuales generan emisiones continuas de material particulado, especialmente durante la temporada seca. La selección del área se fundamentó en tres criterios principales: (i) proximidad a zonas de emisión minera, (ii) presencia de plantaciones consolidadas de *Pinus radiata* y *Pinus montezumae*, y (iii) accesibilidad para la instalación de puntos de muestreo y desplazamiento seguro del equipo investigador.

TABLA I
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE MONITOREO EN PLANTACIONES DE *Pinus radiata* Y *Pinus montezumae*

Variable	Unidades	Valor	
		Mínimo	Máximo
Altitud	msnm	3510	3550
Área	ha	38.24	
Perímetro	km	3.027	

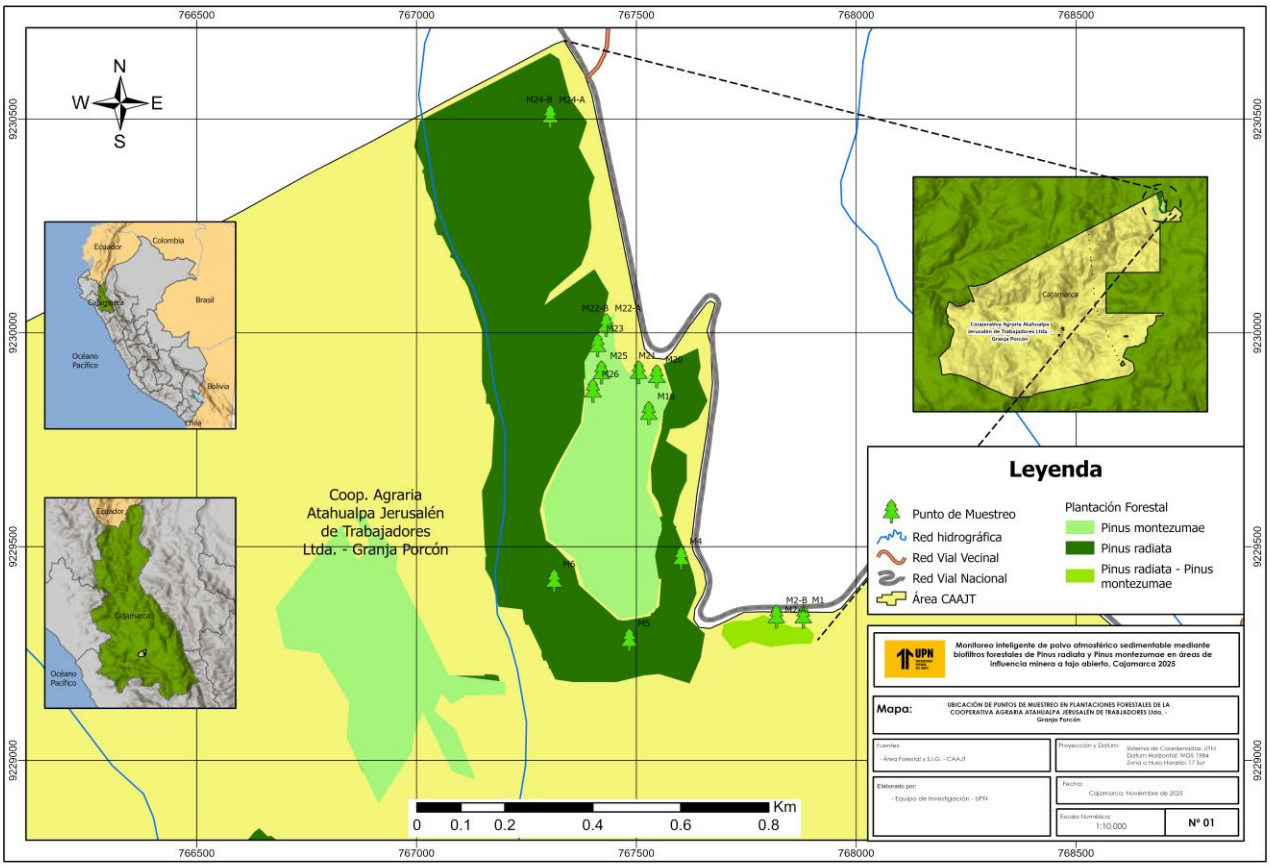


Fig. 1 Ubicación de puntos de muestreo en plantaciones forestales de la Cooperativa Agraria Atahualpa Jerusalén de Trabajadores Ltda. – Granja Porcón.

C. *Muestreo de Pinus radiata*

Para la recolección de muestras de *Pinus radiata,* árboles de edad avanzada (30 años) se seleccionaron 10 árboles distribuidos estratégicamente dentro del área de influencia minera como se muestra en la Figura 2. La separación entre árboles se mantuvo de manera uniforme, asegurando una distancia mínima constante entre cada punto de muestreo, con el fin de evitar interferencias entre micro zonas y garantizar la representatividad espacial del material particulado retenido. Cada árbol fue georreferenciado mediante un GPS de mano, registrándose coordenadas UTM con una precisión promedio de 3 metros. Las muestras recolectadas comprendieron acículas de (7 a 9 cm) y corteza de (8 a 13 cm). Finalmente, los puntos de monitoreo se codificaron utilizando el sistema correlativo, permitiendo un control adecuado del flujo de información desde campo hasta el laboratorio.



Fig. 2 *Pinus radiata* de avanzada edad.

D. *Muestreo de Pinus montezumae*

Para la recolección de muestras de *Pinus montezumae*, árboles de crecimiento joven de aproximadamente 30 años se seleccionaron 16 árboles distribuidos en la zona de estudio, como se muestra en la Figura 3, manteniendo un distanciamiento uniforme similar al aplicado en el muestreo de *Pinus radiata*. La elección de estos árboles se basó en su accesibilidad, representatividad dentro de la plantación y su exposición directa a las corrientes de viento predominantes, lo

cual es fundamental para la captación de material particulado atmosférico. Cada árbol fue georreferenciado mediante un GPS portátil, registrándose coordenadas UTM y altitud con una precisión adecuada. Las muestras recolectadas comprendieron acículas de (13 a 24 cm) y corteza de (4.5 a 17 cm). Se identificaron utilizando el código correlativo con el objetivo de mantener un control riguroso de la trazabilidad desde el muestreo en campo hasta el procesamiento en laboratorio.



Fig. 3 *Pinus montezumae* de avanzada edad.

E. Procedimiento del método gravimétrico en muestras

El análisis gravimétrico aplicado en este estudio se desarrolló íntegramente en laboratorio, siguiendo un protocolo basado en el método de separación inercial/filtración (gravimetría) para la determinación de material particulado. Este procedimiento constituye al método para la medición de material particulado adoptado por la normativa peruana mediante el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM estandarizado para determinar la masa de material particulado retenida en las acículas de *Pinus radiata* y *Pinus montezumae*. Este procedimiento garantiza la precisión, repetibilidad y confiabilidad de los resultados, permitiendo cuantificar de manera directa la acumulación de partículas atmosféricas adheridas a la superficie foliar.

1) Preparación inicial de muestras: Una vez en laboratorio, las acículas recolectadas fueron etiquetadas según su código de campo (M1–M9/M24 para *Pinus radiata* y M10–M26 para *Pinus montezumae*) y almacenadas en condiciones ambientales controladas.

2) Lavado controlado para la extracción del material particulado: Con el fin de remover exclusivamente el material particulado atmosférico depositado en las acículas, se aplicó un proceso de lavado estandarizado mediante agitación suave. Para esto: Las acículas se colocaron en un vaso de precipitación previamente lavado y secado; se añadió un volumen conocido de agua destilada; el sistema se sometió a agitación manual durante 5 minutos, evitando desprender estructuras vegetales; el agua resultante, ahora conteniendo el PM adherido, fue filtrada cuidadosamente para su recuperación.

3) Filtración del material particulado: El agua de lavado se hizo pasar por filtros de papel de porosidad fina, previamente acondicionados. Tras la filtración: Los filtros fueron colocados en la estufa a 100 °C por 24 horas; luego se dejaron en el desecador hasta peso estable; finalmente, se pesaron para registrar el peso final de la muestra.

4) Tamizado: Posteriormente, el material retenido fue sometido a un tamizado utilizando tamices N° 50 y N° 200, lo que permitió separar fracciones gruesas y finas para asegurar que únicamente el material particulado atmosférico correspondiera al análisis gravimétrico.

Para calcular el factor de conversión se aplicó la ecuación número 1:

$$F_{MP} = \frac{\sum Wi \times 1000 = W}{A \times T} \dots (1)$$

Donde:

- W: Peso en miligramos (mg)
- $\sum Wi$: Sumatoria de Pesos (g)
- T: Tiempo total evaluado (años)
- A: Área efectiva de deposición (cm^2)
- F_{MP}: Flujo de deposición promedio

F. Ecuación para estimar la carga acumulada y la tasa anual de deposición de material particulado

Para un periodo multianual prolongado, se recomienda estimar la carga acumulada considerando la tasa anual promedio de deposición, tal como se muestra en la ecuación número 2.

$$MP_{30} = F_{MP} \times A \times T \dots (2)$$

Donde:

- MP_{30}: Carga total acumulada de material particulado en 30 años
- F_{MP}: Flujo de deposición promedio
- T: Tiempo total evaluado (años)
- A: Área efectiva de deposición (cm^2)

G. Análisis de dispersión de partículas

El análisis de dispersión de partículas consiste en separar y caracterizar los tamaños que componen una muestra mediante procesos físicos que evitan la aglomeración y permiten que cada partícula se comporte de manera independiente; para ello, la muestra se prepara y se desintegra manualmente y luego se somete a agitación mecánica para lograr la completa separación; posteriormente la mezcla se lava a través de tamices N° 50 y N° 200 para clasificar las fracciones gruesas y finas, recolectando y pesando cada una.

III. RESULTADOS

A. Resultado del método gravimétrico

Tras el lavado, filtración, secado y tamizado de las acículas y tronco de las especies de interés, se obtuvo el peso final del material particulado recuperado (W), lo que permitió determinar el factor de conversión y ajustarlo a un estándar evaluado por la OMS.

Los valores de las Tablas 2 y 3 corresponden únicamente al material particulado retenido en partes específicas de la planta, por lo que representan una medición parcial de la deposición atmosférica; sin embargo, permiten interpretar el comportamiento del flujo de deposición promedio de material particulado (FMP) según el tamaño de partícula, la altura de muestreo y la superficie de retención. Los mayores valores de FMP indican mayor eficiencia de captura y evidencian un gradiente vertical de deposición. Dado que el FMP está definido, los valores pueden extrapolarse para estimar la deposición anual mediante $MP_a = FMP \times A \times T$, enfoque coherente con los Estudios de Impacto Ambiental y la evaluación de impactos acumulativos.

Considerando que las muestras de acículas y corteza presentan una longitud promedio de 10 cm, los valores de FMP representan una deposición localizada; no obstante, pueden interpolar mediante una extrapolación lineal asumiendo una distribución homogénea. Así, el flujo determinado puede escalarse a una mayor longitud o superficie efectiva para estimar la carga anual de material particulado mediante $MP_a = FMP \times A \times T$, permitiendo comparaciones con otros estudios y la proyección de impactos a largo plazo.

A partir de los valores de FMP acumulados en 30 años y las áreas efectivas de deposición, se estimó la masa anual retenida, obteniéndose valores de MP_a entre 0.5 y 10 mg/año por fracción vegetal de 10 cm. Los mayores valores se asociaron a mayor exposición y cercanía a fuentes emisoras, evidenciando que el FMP es el factor dominante. En comparación con estándares de Estudios de Impacto Ambiental, la deposición se mantiene dentro de rangos aceptables, aunque su acumulación prolongada explica las cargas observadas en varias décadas.

El flujo de material particulado (FMP) se calculó a partir de las masas retenidas en los tamices de 50 y 200 µm y el área efectiva de deposición, mediante la relación $FMP_{30a} = (M_{50} + M_{200})/A$. Los resultados muestran que el FMP depende principalmente de la carga atmosférica y del nivel de exposición, registrándose valores más altos en *Pinus radiata* que en *Pinus montezumae*. Asimismo, se observó una mayor contribución de partículas finas en muestras con mayor FMP, coherente con patrones de deposición asociados a actividades mineras y de tránsito.

TABLA II
CONCENTRACIÓN DEL FLUJO DE DEPOSICIÓN PROMEDIO EN *Pinus radiata*

M	Código	Tipo	Área efectiva de M (cm^2)	Altura de muestreo (m)	297µm	74µm	F_{MP}
M1	B	Acícula	18	10	1.19188	2.6705	8.6706
M2	B	Acícula	20	10	0.7447	0.6974	2.3613
	E	Acícula	16	12	0.3036	1.1541	3.1133
M4	B	Acícula	20	4	0.7560	6.3446	14.9013
M5	A	Acícula	22	6	0.6328	1.0784	2.6268
M6	A	Acícula	22	4.5	0.0989	1.3700	2.2548
M24	A	Acícula	34	1	0.4841	1.0879	1.5444
	B	Acícula	20	14	0.3364	0.2472	0.9773

En la Tabla 2, se presentan los valores más representativos, en la estandarización de la FMP en las muestras de *Pinus radiata* [15]. Los resultados muestran que tanto las acículas como el tronco de *Pinus radiata* presentan una acumulación significativa en la concentración del Flujo de deposición promedio. Asimismo, se observa que los mayores valores corresponden a muestras ubicadas más cerca de la zona de influencia y de la carretera, lo que evidencia que la exposición directa a fuentes emisoras incrementa notablemente la deposición de material particulado [16], así como se muestra en la Figura 4. Este comportamiento coincide con patrones conocidos de dispersión y acumulación en ecosistemas próximos a corredores mineros y vehiculares. Lo que refuerza la teoría de la especie como barrera natural para la contención de la dispersión de material particulado.



Fig. 4 *Pinus radiata* con altas concentraciones de polvos.

TABLA III
CONCENTRACIÓN DEL FLUJO DE DEPOSICIÓN PROMEDIO EN *Pinus montezumae*

M	Código	Tipo	Área efectiva de M (cm^2)	Altura de muestreo (m)	297µm	74µm	F_{MP}
M18	B	Acícula	57	3	0.1998	1.7402	1.1436
M20	A	Acícula	21	2	0.4838	0.4996	1.5547
M21	A	Acícula	33	2	0.9000	0.9100	1.8145
M22	A	Acícula	31	2	0.4813	0.4356	0.9935
	B	Acícula	38	2	0.7451	1.1011	1.6390
M23	A	Acícula	16	2	0.2641	0.1755	0.9255
M25	A	Acícula	23	2	0.3247	0.7714	1.6153
M26	B	Acícula	11	4	0.2351	0.2412	1.4934

Los resultados de la Tabla 3 evidencian que el nivel de exposición encontrado en la especie *Pinus montezumae* se mantuviera dentro de lo permisible [17], mostrando concentraciones acordes a su nivel de exposición y a las condiciones climatológicas. Asimismo, las acículas de *Pinus montezumae* presentan valores que evidencian la retención de polvos sedimentarios atmosféricos como se muestra en la Figura 5, lo cual se relaciona directamente con su morfología: acículas largas, con cutícula cerosa y superficie rugosa que incrementan la adherencia de partículas finas.

La corteza posee una estructura fisurada, ofrece menor área expuesta al flujo directo del viento y, por ello, retiene menos material particulado. También se observa que las muestras tomadas entre los 2 y 4 metros de altura registran los mayores niveles de deposición, coincidiendo con la franja donde los árboles jóvenes concentran mayor densidad foliar y donde la turbulencia del viento favorece la deposición de partículas.

Es importante destacar que los árboles menos expuestos y lejanos a la red vial presentan valores dentro del estándar esperado. Esta diferencia espacial confirma el efecto protector de las primeras filas de la especie, que reciben mayor carga de partículas.

Finalmente, estos resultados refuerzan la teoría de que esta especie funciona como una barrera natural efectiva, reduciendo la propagación del material particulado hacia áreas internas y mostrando un alto potencial como medida de mitigación ambiental.



Fig. 5 *Pinus montezumae* con altas concentraciones de polvos

B. Resultado de la interpolación de partículas sedimentables

El resultado de la interpolación espacial del flujo de material particulado sedimentable (FMP) para *Pinus radiata* y *Pinus Montezumae* permite identificar patrones claramente definidos de distribución y acumulación de partículas en el área de estudio. El modelo interpolado evidencia un gradiente deposicional controlado principalmente por la proximidad a la red vial y por la disposición espacial de los individuos dentro de la plantación forestal.

En *Pinus radiata*, la superficie interpolada muestra núcleos bien definidos de alta deposición de partículas en las zonas adyacentes a la carretera nacional, destacando los sectores correspondientes en los puntos M2, M3 y M4. Estas áreas, representadas por tonalidades cálidas en el mapa, concentran los valores máximos de FMP y reflejan la función de esta especie como barrera inicial de interceptación del polvo atmosférico generado por el tránsito vehicular y la resuspensión de partículas del suelo. A medida que se incrementa la distancia respecto a la vía, el modelo interpolado evidencia una disminución progresiva del flujo de partículas, observándose valores bajos a moderados en los sectores más internos a la plantación, como los asociados a los puntos M5, M6 y M7.

Por su parte, la interpolación correspondiente a *Pinus montezumae* revela una distribución más homogénea y, en general, valores inferiores a FMP en comparación con el *Pinus radiata* como se muestra en la Figura 6. Los mayores niveles de deposición se concentran en los individuos ubicados en las primeras líneas de exposición cercanos a la carretera; sin embargo, estos no alcanzan las magnitudes observadas en el *Pinus radiata*. en las áreas más alejadas de la fuente emisora, representadas por puntos como M22 y M24, el modelo interpolado muestra valores consistentemente bajos, lo que evidencia una menor influencia directa del flujo de partículas sedimentables.

En conjunto, los resultados de la interpolación confirman la exposición, mientras que el *Pinus montezumae* presenta una existencia de un patrón espacial decreciente de deposición de menor carga deposicional en sectores más protegidos. partículas desde el borde vial hacia el interior del área forestal.

Este comportamiento resalta el papel de la estructura y composición de la plantación como un mecanismo efectivo de atenuación del polvo sedimentable, donde el *Pinus radiata* actúa como la principal especie interceptora en zonas de mayor exposición, mientas que el *Pinus montezumae* presenta una menor carga deposicional en sectores más protegidos.

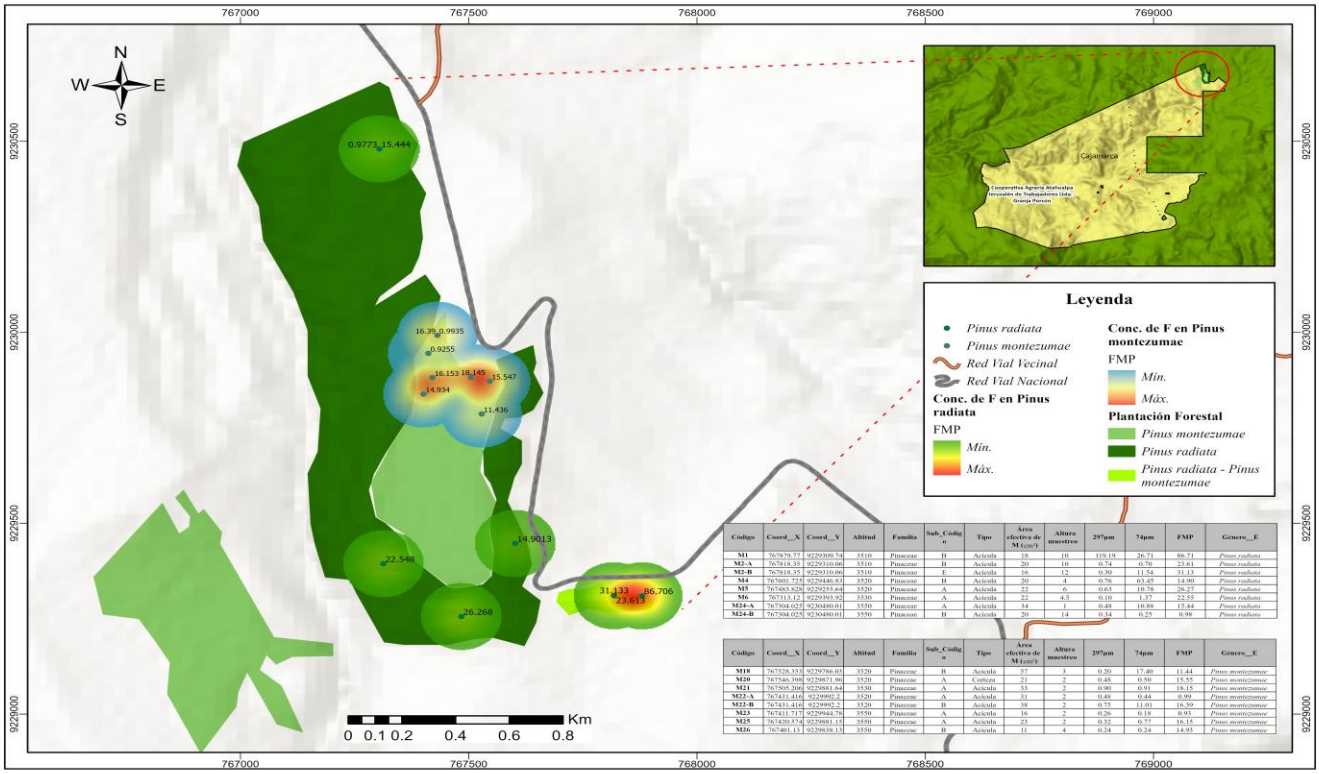


Fig. 6 Mapa concentración de partículas sedimentable

C. *Comparación de retenciones entre acículas y corteza*

La evaluación comparativa entre acículas y corteza permite identificar qué órgano del árbol retiene con mayor eficiencia de captar el material particulado, mostrando cuál es más "eficiente" por las partículas en suspensión.

La retención promedio del flujo de material particulado muestra una marcada predominancia en las acículas en ambas especies evaluadas. En *Pinus radiata,* las acículas concentran el 89.2% de la captación total, mientras que la corteza aporta solo el 10.8%. De manera similar, la especie *Pinus montezumae,* las acículas representan el 87% de la retención, frente al 12.8% correspondiente a la corteza, como se muestra en la Figura 7.

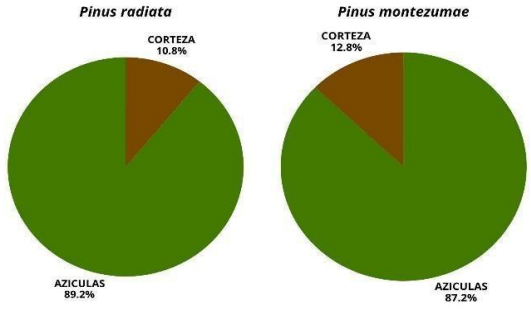


Fig. 7 Comparación de captación material particulado por los órganos de la especie.

Este comportamiento indica que la mayor eficiencia de captura del material particulado se asocia principalmente a la densidad foliar, la disposición de las acículas y la presencia de cutícula cerosa que favorecen la interceptación y retención de partículas atmosféricas. No obstante, la corteza contribuye de forma secundaria probablemente debido a su microestructura rugosa e irregular superficial, lo que permite la adhesión de partículas más gruesas. No obstante, los resultados evidencian que, aunque ambos tejidos participan en la captura de material particulado, las acículas constituyen el principal autor en las presentes condiciones ambientales evaluadas

D. *Comparación de retenciones entre especies*

Realizar una comparativa entre especies nos permite evaluar la capacidad relativa de cada una para actuar como barrera biológica, identificando qué pinus ofrece un mayor potencial para mitigar la dispersión de partículas provenientes de actividades mineras y tráfico vehicular.

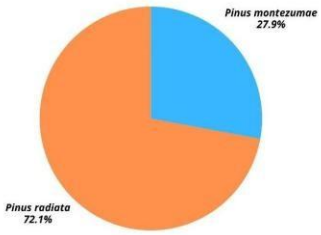


Fig. 8 Porcentaje de acumulación de material particulado por especie.

La Figura 8, muestra la distribución porcentual de la acumulación total del flujo de material particulado registrado en las dos especies presentes en el área de estudio. Los resultados evidencian que *Pinus radiata* concentra el 72,1 % del material particulado retenido, mientras que *Pinus montezumae* representa el 27,9 %. Esta diferencia podría estar relacionada con las características morfológicas y estructurales propias de cada especie, las cuales pueden influir en la interceptación y deposición del material particulado transportado por el viento. Sin embargo, es importante señalar que la investigación no tuvo como finalidad establecer una comparación de la eficiencia de ambas especies como biofiltros ni determinar cuál presenta mayor capacidad de captura. La inclusión de *Pinus radiata y Pinus montezumae* responde a su presencia y distribución en el área de estudio, por lo que la diferencia porcentual presentada se interpreta únicamente como una descripción de la cantidad de material particulado retenido durante el periodo de evaluación.

VI. Discusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten confirmar que las plantaciones de *Pinus radiata* y *Pinus montezumae* desempeñan un papel relevante en la retención de material particulado atmosférico (MP), particularmente en zonas de influencia minera, donde las emisiones generadas por las actividades extractivas, el transporte de materiales y el tránsito vehicular constituyen fuentes persistentes de contaminación atmosférica [1]. La capacidad de estas especies para interceptar partículas atmosféricas refuerza su importancia como componentes funcionales del paisaje en áreas sometidas a presiones antrópicas intensas.

La acumulación de material particulado observada en ambas especies concuerda con investigaciones previas que destacan a las coníferas como interceptores altamente eficientes de partículas atmosféricas. Esta eficiencia se atribuye principalmente a la morfología de sus acículas, la disposición helicoidal del follaje y la elevada densidad de copa, características que incrementan la superficie de contacto con el aire y favorecen los procesos de deposición seca [10]. En este sentido, tanto *Pinus radiata* como *Pinus montezumae* presentan atributos estructurales que potencian la captura de partículas sedimentables y en suspensión, consolidando su función como barreras biológicas frente a la dispersión de contaminantes.

En este contexto, los valores de FMP indicados en la Tabla 3 representan el flujo de deposición promedio de partículas sedimentables retenidas por *Pinus montezumae*, lo que permite estimar la intensidad de la deposición atmosférica de partículas en función del tipo de tejido vegetal, la altura del muestreo y la captación efectiva. Es importante señalar que la concentración F debe interpretarse como relacionada con las partículas depositadas sobre los tejidos vegetales y no como una fracción directa del flujo atmosférico. Al analizar el comportamiento según el tipo de tejido vegetal, se observa que las acículas presentan, en general, valores de FMP más altos en comparación con la corteza, lo que indica una mayor eficiencia de captura y retención de partículas sedimentadas. En particular, Percy y Ferretti [18] señalan que la disposición en espiral de las acículas y su elevada rugosidad favorecen la deposición seca de partículas, incrementando los valores de flujo de material particulado retenido. De manera complementaria, Janhäll [19] destaca que la estructura foliar de especies coníferas actúa como un sumidero efectivo de contaminantes atmosféricos. En el presente estudio, los valores de FMP observados en las acículas de *Pinus montezumae* fueron, en general, superiores a los registrados en la corteza, lo que confirma una mayor eficiencia de captura de partículas sedimentables. En particular, los elevados valores registrados en los códigos M21, M23 y M25 indican zonas o períodos con mayores cargas de deposición atmosférica de partículas.

Este comportamiento sugiere que la captura del material particulado ocurre predominantemente a nivel del follaje, donde la alta densidad de acículas, su mayor superficie expuesta y la presencia de cutículas cerosas favorecen la interceptación de partículas transportadas por el aire. No obstante, la corteza cumple un rol complementario en el proceso, asociado a su microestructura rugosa e irregular. Este patrón es consistente con hallazgos previos sobre deposición diferencial en especies leñosas, donde distintos tejidos del árbol contribuyen de manera integrada, aunque no equivalente, a la retención de contaminantes atmosféricos [14].

Si bien la corteza presenta valores de FMP relativamente más bajos en comparación con las acículas, cumple un rol fundamental como registro deposicional integrador a largo plazo. Las plantaciones de pino evaluadas presentan una antigüedad aproximada de 30 años, lo que, sumado a su baja rotación, permite la acumulación progresiva de partículas sedimentables durante periodos prolongados. En este sentido, Adriano [20] señala que la corteza de los árboles actúa como un reservorio estable de contaminantes atmosféricos, reflejando procesos de deposición crónica. De manera complementaria, Kabata-Pendias [21] destacan que los tejidos leñosos integran la señal deposicional a lo largo del tiempo, mientras que los tejidos foliares responden de forma más inmediata a cambios en la carga atmosférica. Asimismo, Percy y Ferretti [18] indican que, en coníferas, las acículas presentan una mayor sensibilidad a las variaciones temporales de la deposición de partículas, mientras que la corteza registra de manera más estable la exposición acumulada.

Durante el muestreo se observó la presencia de musgos epífitos y líquenes en la corteza de los pinos, los cuales actúan como un multiplicador de la capacidad de biofiltración atmosférica. Estos organismos facilitan la acumulación y retención a largo plazo del material particulado en la corteza, incrementando la eficiencia del sistema epífito como sumidero biológico de contaminación atmosférica. Esta condición convierte a las plantaciones forestales evaluadas en

importantes reservorios de material particulado atmosférico, tal como se evidencia en la Figura 9, donde se observa una especie con alta concentración de material particulado en asociación con musgos.



Fig. 9 Corteza de *Pinus radiata* cubierta con musgos producto de la alta concentración de polvo sedimentable.

Aunque la acumulación observada en la corteza es menor en comparación con las acículas, resulta significativa desde una perspectiva temporal, ya que este tejido actúa como un sumidero pasivo a largo plazo que integra la exposición histórica a contaminantes atmosféricos. De igual manera, Kabata-Pendias [21] documenta este comportamiento en áreas afectadas por emisiones industriales y minero metalúrgicas, donde la corteza refleja la deposición acumulada de contaminantes orgánicos persistentes

Es importante señalar que el muestreo se realizó durante la temporada de lluvias, lo que pudo haber reducido parcialmente la cantidad real de material particulado retenido, debido a los procesos naturales de lavado atmosférico. Diversos estudios indican que la acumulación de material particulado tiende a duplicarse o incluso triplicarse durante la temporada seca, cuando la resuspensión de polvo y la mayor estabilidad atmosférica favorecen la permanencia de partículas en el aire [4]. Por lo tanto, los niveles registrados en esta investigación podrían representar un escenario conservador respecto a los valores esperables en períodos sin precipitaciones.

En relación con la altura de muestreo, los flujos deposicionales más altos registrados a 2 m de altura evidencian la influencia de fuentes de emisión cercanas al nivel del suelo, tales como la resuspensión de polvo contaminado, el tránsito vehicular y las emisiones difusas provenientes de actividades industriales o mineras. Este patrón es consistente con lo reportado por Weinstein y Davison [22], quienes señalan que las partículas sedimentables presentan gradientes verticales decrecientes con la altura, especialmente en ambientes dominados por fuentes de emisión superficiales, donde la deposición es más intensa en los estratos inferiores.

Finalmente, el análisis del material particulado sedimentable en función de su tamaño (297 µm y 74 µm) sugiere que la fracción más gruesa contribuye de manera significativa al FMP total, lo cual es característico de partículas asociadas a procesos mecánicos como la erosión del suelo y las actividades de extracción. No obstante, la presencia relativa de partículas de menor tamaño evidencia la coexistencia de fracciones con tiempos de residencia atmosférica más prolongados, capaces de transportar oligoelementos y metales absorbidos hacia las superficies vegetales. En este sentido, Kabata-Pendias [21] señalan que las partículas finas presentan una mayor afinidad por la adsorción de metales traza, favoreciendo su transferencia a los tejidos vegetales, mientras que Adriano [20] destaca su rol en la acumulación progresiva de metales en sistemas suelo-planta expuestos a deposición atmosférica crónica.

V. Conclusiones

El análisis comparativo del flujo de material particulado retenido por ambas especies sugiere que *Pinus radiata* presenta una mayor eficiencia global de captura en relación con *Pinus montezumae*, lo que nos puede indicar su potencial como barrera biológica frente a la dispersión de partículas en entornos influenciados por actividades mineras y tráfico vehicular.

La evaluación por órganos vegetales se estima que las acículas constituyen el principal componente en la retención del material particulado, concentrando la mayor proporción del flujo interceptado, debido a su elevada densidad foliar y a una mayor superficie de contacto con el material particulado transportado por el aire.

Si bien la contribución de la corteza es menor en términos porcentuales, su participación es constante y relevante, lo que sugiere que este órgano podría presentar comportamientos equivalentes bajo condiciones metodológicas distintas. En consecuencia, la corteza debe ser considerada como un componente clave para estudios posteriores orientados a evaluar mecanismos específicos de captura superficial. Los resultados obtenidos están condicionados por el tipo de equipamiento y la metodología empleada para la medición del flujo de material particulado, por lo que el uso de instrumentación alternativa o técnicas de muestreo con mayor resolución podría generar variaciones en los valores de retención observados.

Finalmente, se reconoce que en la fase final del muestreo puede producirse una superposición de pérdidas de material particulado, principalmente en las acículas, donde el desprendimiento es más probable debido a su mayor capacidad de captación y exposición directa a factores ambientales. Este efecto debe ser considerado al interpretar la eficiencia real de retención del sistema atmosférico.

Referencias

[1] «Informe Nacional sobre el Estado del Ambiente 2020-2024 | SINIA». Accedido: 29 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://sinia.minam.gob.pe/documentos/informe-nacional-estado-ambiente-2020-2024

[2] «WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide». Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

[3] J. Lelieveld, K. Klingmüller, A. Pozzer, R. T. Burnett, A. Haines, y V. Ramanathan, «Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission

removal on public health and climate», *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 116, n.º 15, pp. 7192-7197, abr. 2019, doi: 10.1073/pnas.1819989116.
[4] «Ambient (outdoor) air pollution». Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health
[5] N. Wolff, Y. Masuda, E. Meijaard, J. Wells, y E. Game, «Impacts of tropical deforestation on local temperature and human well-being perceptions», *Global Environmental Change*, vol. 52, pp. 181-189, jul. 2018, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2018.07.004.
[6] secretariat, «Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services | IPBES secretariat». Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.ipbes.net/node/35274
[7] A. Sæbø, R. Popek, B. Nawrot, H. M. Hanslin, H. Gawronska, y S. W. Gawronski, «Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces», *Science of The Total Environment*, vol. 427-428, pp. 347-354, jun. 2012, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.084.
[8] CEPLAN, «Observatorio Nacional de Prospectiva». Accedido: 29 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://observatorio.ceplan.gob.pe
[9] J. Oppong, «How to Create an Air Pollution Map Using ArcGIS Pro», Geography Realm. Accedido: 29 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.geographyrealm.com/air-pollution-map-arcgis-pro/
[10] O. US EPA, «EPA Advances Comprehensive PFAS Strategy with Legally Defensible, Practical, Scientifically Sound Drinking Water Protections». Accedido: 29 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/newsreleases/epa-advances-comprehensive-pfas-strategy-legally-defensible-practical-scientifically
[11] «MEMORIA ANUAL 2023 - SENAMHI | SINIA». Accedido: 29 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://sinia.minam.gob.pe/normas/memoria-anual-2023-senamhi
[12] «Cost-Benefit Analysis in the Selection of Efficient Multipollutant Strategies: Journal of the Air & Waste Management Association: Vol 56, No 4». Accedido: 2 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10473289.2006.10464524
[13] N. Talib, N. Sallehuddin, N. Sa'aid, y N. Md Saad, «PM2.5 Pollutant Distributions in Years 2016 and 2019 Using GIS Spatial Analyst», 2020, pp. 167-179. doi: 10.1007/978-981-15-3434-8_15.
[14] S. GUMMENENI *et al.*, *NOVEL STRATEGIES FOR ASSESSMENT OF AMBIENT AIR QUALITY USING GIS AND ONLINE POLLUTION MONITORING TOOLS*. 2004.
[15] B. B. Moura *et al.*, «Assessment of Seasonal Variations in Particulate Matter Accumulation and Elemental Composition in Urban Tree Species», 20 de febrero de 2024, *Social Science Research Network, Rochester, NY*: 4733284. doi: 10.2139/ssrn.4733284.
[16] F. Bustillos, M. Cerecedo, E. Peraza, M. López, M. Vega, y A. Campos, «Pinus halepensis Mill. COMO INDICADOR DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN UNA ZONA INDUSTRIAL URBANA», *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 2, pp. 79-86, may 2019, doi: 10.29298/rmcf.v2i7.563.
[17] S. Michael *et al.*, «Atmospheric Transport and Deposition of Mineral Dust to the Ocean: Implications for Research Needs», *Environmental science & technology*, vol. 46, pp. 10390-404, sep. 2012, doi: 10.1021/es300073u.
[18] K. E. Percy y M. Ferretti, «Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts», *Environmental Pollution*, vol. 130, n.º 1, pp. 113-126, jul. 2004, doi: 10.1016/j.envpol.2003.10.034.
[19] S. Janhäll, «Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion», *Atmospheric Environment*, vol. 105, pp. 130-137, mar. 2015, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.01.052.
[20] D. C. Adriano, *Trace Elements in the Terrestrial Environment*. New York, NY: Springer, 1986. doi: 10.1007/978-1-4757-1907-9.
[21] A. Kabata-Pendias, *Oligoelementos en suelos y plantas*. doi: 10.1201/b10158.
[22] L. H. Weinstein y A. W. Davison, «Uptake, transport and accumulation of inorganic fluorides by plants and animals.», en *Fluorides in the environment: effects on plants and animals*, en CABI Books. , 2004, pp. 21-55. doi: 10.1079/9780851996837.0021.