

ORIGINAL

Exposure Analysis of Pulmonary Function Disorders in Workers At PT. X

Análisis de exposición a trastornos de la función pulmonar en trabajadores de PT. X

Esa Risqianti Yana¹  , Syamsiar S. Russeng¹ , Atjo Wahyu¹ , Yahya Thamrin¹ , Suriah¹ 

¹Universidad Hasanuddin, Facultad de Salud Pública. Makassar, Indonesia.

Citar como: Risqianti Yana E, Russeng SS, Wahyu A, Thamrin Y, Suriah. Exposure Analysis of Pulmonary Function Disorders in Workers At PT. X. Salud, Ciencia y Tecnología. 2025; 5:1911. <https://doi.org/10.56294/saludcyt20251911>

Enviado: 28-01-2025

Revisado: 01-04-2025

Aceptado: 30-07-2025

Publicado: 31-07-2025

Editor: Prof. Dr. William Castillo-González 

Autor para la correspondencia: Esa Risqianti Yana 

ABSTRACT

Introducción: una encuesta preliminar en PT X, el mayor productor de cemento en el este de Indonesia, reveló que el deterioro de la función pulmonar se encuentra entre las 10 principales enfermedades de los trabajadores debido a la exposición a altos niveles de polvo de PM2.5 y PM10 que superan el umbral, especialmente en áreas de producción, con un mayor riesgo en los trabajadores que no utilizan equipo de protección personal o fuman.

Método: este estudio cuantitativo observacional transversal midió la exposición al polvo respirable y de cigarrillo y el uso de EPP en trabajadores PT X, verificando la capacidad pulmonar con un espirómetro digital y analizando los datos mediante SPSS utilizando análisis univariado, bivariado y de ruta para evaluar la relación entre las variables.

Resultados: el análisis mostró que la exposición al polvo redujo significativamente la capacidad pulmonar (estimación -0,029, $p = 0,00$), mientras que la actividad física y el uso de EPP la aumentaron con efectos positivos significativos ($p = 0,021$ y $p = 0,00$). Además, la capacidad pulmonar y la actividad física tuvieron un efecto positivo significativo en el deterioro de la función pulmonar, mientras que la edad, el estado nutricional y el tabaquismo no tuvieron un efecto significativo, ni directo ni indirecto, sobre la capacidad pulmonar ($p > 0,05$).

Conclusiones: la implicación es que el aumento de la actividad física y el uso de EPP son importantes para mantener la capacidad pulmonar y prevenir el deterioro de la función pulmonar en los trabajadores expuestos al polvo en el entorno laboral.

Keywords: Dust Exposure; Impaired Lung Function; Pulmonary Capacity; Physical Activity; PPE Use.

RESUMEN

Introducción: una encuesta preliminar realizada en PT X, el mayor productor de cemento del este de Indonesia, reveló que la insuficiencia pulmonar se encuentra entre las diez enfermedades más frecuentes entre los trabajadores debido a la exposición a niveles elevados de PM2,5 y PM10 que superan el umbral, especialmente en las zonas de producción, con un mayor riesgo para los trabajadores que no utilizan equipos de protección individual o que fuman.

Método: este estudio cuantitativo observacional transversal midió la exposición al polvo respirable y al humo del tabaco y el uso de EPI en los trabajadores de PT X, con un control de la capacidad pulmonar mediante un espirómetro digital y un análisis de los datos mediante SPSS utilizando análisis univariantes, bivariantes y de trayectoria para evaluar la relación entre las variables.

Resultados: el análisis mostró que la exposición al polvo disminuyó significativamente la capacidad pulmonar (estimación -0,029, $p = 0,00$), mientras que la actividad física y el uso de EPI aumentaron la capacidad pulmonar con efectos positivos significativos ($p = 0,021$ y $p = 0,00$). Además, la capacidad pulmonar y la

actividad física tuvieron un efecto positivo significativo sobre el deterioro de la función pulmonar, mientras que la edad, el estado nutricional y la exposición al tabaco no tuvieron ningún efecto significativo, ni directa ni indirectamente, a través de la capacidad pulmonar ($p > 0,05$).

Conclusiones: la implicación es que el aumento de la actividad física y el uso de EPI son importantes para mantener la capacidad pulmonar y prevenir el deterioro de la función pulmonar en los trabajadores expuestos al polvo en el entorno laboral.

Palabras clave: Actividad Física; Capacidad Pulmonar; Deterioro de la Función Pulmonar; Exposición al Polvo; Uso de EPI.

INTRODUCCIÓN

La exposición al polvo de cemento contribuye directamente a la disminución de la función pulmonar y al aumento del riesgo de enfermedades respiratorias crónicas como la EPOC y el cáncer de pulmón. El polvo de partículas suspendidas totales (PST) en la industria del cemento puede dañar el sistema inmunitario, disminuir las defensas de las vías respiratorias y reducir la capacidad pulmonar.⁽¹⁾ Los efectos incluyen síntomas como tos, dificultad para respirar y disminución de la resistencia, que reducen la productividad y aumentan el ausentismo. Anderson et al.⁽²⁾ destacaron la importancia de realizar más investigaciones en Indonesia para formular políticas que protejan a los trabajadores de los efectos de la exposición al polvo de la industria del cemento.

Según datos de la Organización Mundial de la Salud, los trastornos de la función pulmonar son una de las principales causas de morbilidad y mortalidad en todo el mundo. El deterioro pulmonar se clasifica como la quinta causa principal de muerte en el mundo y se espera que se convierta en la tercera causa principal de muerte para 2020. Los casos de trastornos de la función pulmonar debido a la exposición al polvo en el entorno laboral en Indonesia tienen una alta prevalencia. Las enfermedades pulmonares ocupacionales, como la neumoconiosis, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y el asma ocupacional, siguen siendo una preocupación importante en la salud y seguridad ocupacional. Los principales factores de riesgo incluyen la exposición a polvos, gases y vapores peligrosos en el lugar de trabajo. Por lo tanto, es importante que los trabajadores y los empleadores implementen medidas preventivas, como el uso de equipo de protección personal (EPP) adecuado y el control de la exposición en el entorno laboral.⁽³⁾

La industria cementera desempeña un papel importante en el desarrollo de la infraestructura nacional, pero su proceso de producción genera importantes emisiones de polvo que afectan negativamente la salud de los trabajadores. El polvo de cemento contiene partículas finas, como sílice cristalina y óxido de calcio, que pueden causar deterioro de la función pulmonar, bronquitis crónica y EPOC.⁽⁴⁾ Las partículas de polvo de tamaño inferior a 1 μm pueden alcanzar los alvéolos, y las de tamaño inferior a 0,1 μm pueden entrar y salir de ellos sin sedimentarse, lo que supone un riesgo de reducir los niveles de oxígeno y la capacidad pulmonar de los trabajadores.⁽⁵⁾ También se confirma que la exposición ocupacional al polvo desencadena anomalías en la función pulmonar. Por esta razón, la aplicación de medidas de mitigación como la filtración de aire y el uso de EPP es muy importante para reducir el riesgo de trastornos respiratorios en la industria del cemento.⁽⁶⁾ La exposición a polvos nocivos, como la sílice libre y el óxido de calcio, puede dañar el tejido pulmonar y aumentar su susceptibilidad a infecciones. Según Raza et al.⁽⁷⁾ los trabajadores de la industria del cemento a menudo reportan síntomas como tos crónica, dificultad para respirar y disminución de la capacidad pulmonar debido a la exposición a dicho polvo. Encontraron que la prevalencia de trastornos respiratorios era mayor en áreas con la mayor exposición al polvo, como la molienda y el empaque. La mitigación mediante una mejor ventilación, el uso de EPP y políticas ambientales estrictas son esenciales para reducir los riesgos para la salud.⁽⁸⁾

La Organización Internacional del Trabajo informa que cada año se producen alrededor de 40 000 nuevos casos de neumoconiosis en todo el mundo. La neumoconiosis es una enfermedad que afecta la función pulmonar causada por la inhalación de polvo mineral, como sílice o amianto, lo que provoca cicatrización pulmonar. Entre el 10 % y el 30 % de las enfermedades profesionales son trastornos pulmonares. La mortalidad laboral por enfermedades respiratorias ocupa el tercer lugar, con un 21 % de los casos.⁽⁹⁾ De estos, alrededor de 1,2 millones de trabajadores mueren por accidentes y enfermedades laborales. Según Agencia de Administración de Seguros de Salud, o en Indonesia esta institución se llama BPJS. Según datos de empleo, en 2020 se produjeron 225 000 accidentes de trabajo y 53 casos de enfermedades profesionales, algunos de los cuales fueron causados por la exposición al polvo y otros factores del entorno de trabajo.⁽¹⁰⁾

Un estudio inicial en PT X, la mayor productora de cemento del este de Indonesia, ubicada en la aldea de Biring Ere, subdistrito de Bungoro, regencia de Pangkep, reveló que el trastorno de la función pulmonar es una de las 10 principales enfermedades que sufren los trabajadores. Con 1571 hectáreas de terreno y 512 trabajadores, la empresa opera todos los días laborables de 8:00 a 16:00 (hora de la India), y produce un promedio de 7,4 millones de toneladas de cemento al año. Se sospecha que la alta exposición al polvo, especialmente en las

áreas de molienda, horno y envasado, es la principal causa de problemas respiratorios, ya que los resultados de las mediciones realizadas con un muestreador de aire de alto volumen Staplex muestran concentraciones de polvo PM_{2,5} y PM₁₀ que superan el valor umbral (NAB). Estas partículas finas pueden penetrar en las vías respiratorias inferiores y causar trastornos de la función pulmonar, especialmente en trabajadores con uso menos constante de equipo de protección individual (EPI) o que presentan otros factores de riesgo, como el tabaquismo. Este estudio tiene como objetivo analizar la relación entre la exposición acumulada al polvo (que se calcula a partir de los niveles de polvo, la duración del trabajo y la permanencia), la edad, el estado nutricional, la actividad física, la exposición al tabaquismo (medida por el índice de exposición al tabaquismo), el uso de equipo de protección personal (EPP), la capacidad pulmonar y el deterioro de la función pulmonar en los trabajadores de PT X en un momento determinado. Por lo tanto, El propósito de este estudio fue explicar la relación entre la exposición al polvo y factores individuales como la edad, el estado nutricional, la actividad física, la exposición al cigarrillo y el uso de equipo de protección personal en los trastornos de la función pulmonar en los trabajadores de PT X.

MÉTODO

Este estudio es un estudio cuantitativo con diseño observacional analítico con enfoque transversal.

Tabla 1. Criterios objetivos e instrumentos de investigación

Variable	Definición operacional (DO)	Criterios objetivos (CO)	Instrumento(s) de investigación
Exposición al polvo	Calculado como: concentración de polvo (mg/m ³) × horas de trabajo/día × días de trabajo/año × años de servicio ÷ 2000	- Bajo: <50 mg/m ³ ·año- Moderado: 50-100- Alto: >100	Herramienta de medición de polvo (STMC Tonasa), equipo de muestreo de aire (por ejemplo, Staplex), datos secundarios
Edad	Medido en años completos desde la fecha de nacimiento hasta la fecha de recopilación de datos	- Adulto joven: 18-35- Adulto de mediana edad: 36-50- Adulto mayor: 51-60	Cuestionario estructurado / entrevista
Estado nutricional	Basado en el índice de masa corporal (IMC)	- Desnutrido: IMC <18,5- Normal: 18,5-24,9- Sobrepeso/Obesidad: ≥25	Báscula de altura y peso, calculadora de IMC, cuestionario
Actividad física	Frecuencia, duración e intensidad semanales de la actividad física no laboral (por ejemplo, ejercicio, caminar, tareas domésticas)	- Ninguno (0)- Leve (1): ≤3x/semana, <30min- Moderado (2): ≥3x/semana, ≥30min- Intenso (3): ≥3x/semana, intenso	Cuestionario de actividad física, entrevista estructurada, hoja de observación
Exposición al tabaquismo	Índice de paquetes-año = (cigarrillos/día × años fumados) ÷ 20	- No fumador: 0- Leve: <10- Moderado: 10-20- Fuerte: >20	Cuestionario sobre el comportamiento de fumar, entrevista estructurada
Uso de EPP	Frecuencia y consistencia en el uso de mascarillas/respiradores protectores	- Uso rutinario: Código 2- Uso ocasional: Código 1	Hoja de observación, cuestionario, entrevista
Capacidad pulmonar	Medido mediante espirometría (COPD-6) para evaluar el FEV1 (volumen espiratorio forzado en 1 segundo)	- Normal: ≥80 %- Obstrucción leve: 70-79 % - Moderado: 51-69 %- Grave: <50 %	Espirómetro COPD-6, 3 lecturas de prueba por persona; se utilizó el mejor resultado
Trastorno de la función pulmonar	Diagnóstico basado en el FEV1 de la espirometría	- Trastorno: FEV1 <80 %- Normal: FEV1 ≥80 %	Prueba de espirometría (COPD-6)

La población en este estudio fueron los 512 trabajadores del área de la fábrica PT X. El tamaño de la muestra se determinó utilizando la fórmula de Lemeshow, asumiendo una prevalencia del 20 %, un nivel de confianza del 95 % (Z = 1,96) y un margen de error del 5 %. Después de ajustar por la población limitada, el tamaño de la muestra fue de 166 encuestados. La técnica de muestreo utilizó un muestreo aleatorio simple, que le dio a cada trabajador que cumplió con los criterios de inclusión la misma probabilidad de ser seleccionado como encuestado. Los criterios de inclusión para este estudio fueron trabajadores empleados en el área de fabricación, de 18 a 60 años de edad, con un mínimo de un año de servicio y dispuestos a participar como encuestados. Los criterios de exclusión incluyeron a trabajadores no expuestos directamente al polvo, aquellos con antecedentes de enfermedad pulmonar crónica o aquellos que se negaron a dar su consentimiento para participar.

La gestión de datos se llevó a cabo en varias etapas: edición para verificar la integridad y consistencia de los datos, codificación para convertir datos cualitativos en cuantitativos, limpieza para eliminar errores o

duplicaciones, y procesamiento y tabulación con el software SPSS para facilitar el análisis. El análisis de datos consta de tres etapas: 1) Univariante, para describir la distribución de cada variable, como la exposición al polvo, la capacidad pulmonar y el deterioro de la función pulmonar; 2) Bivariante con prueba de Chi-cuadrado, para examinar la relación entre dos variables, como la influencia de la edad, el historial laboral, el estado nutricional, la exposición al cigarrillo y el uso de EPI en la capacidad pulmonar y el deterioro; 3) Análisis de ruta, para evaluar las relaciones directas e indirectas entre las variables y el papel mediador de la capacidad pulmonar en relación con la exposición al polvo y el deterioro de la función pulmonar. El análisis bivariante y el análisis de ruta utilizaron valores p con una significancia de $p < 0,05$. Este estudio se adhiere al código ético emitido por la Facultad de Salud Pública de la Universidad Hasanuddin, con número de referencia.429/UN4.14.1/TP.01.02/2025.

RESULTADOS

Esta investigación se llevó a cabo en la zona de producción de PT X, distrito de Bungoro, regencia de Pangkajene e Islas (Pangkep), Célebes Meridional, centro de operaciones de la mayor cementera del este de Indonesia. Si bien el método de muestreo arrojó 166 encuestados, solo 125 pudieron ser estudiados en campo.

Análisis univariado

Exposición al polvo		N	%
Contenido de polvo	5,90 mg/m ³	26	20,8
	10,29 mg/m ³	43	34,4
	17,15 mg/m ³	22	17,6
	22,42 mg/m ³	11	8,8
	30,35 mg/m ³	18	14,4
	37,46 mg/m ³	5	4,0
Horas de trabajo	8 horas/día	125	100
Días laborables por año	250 días/año	125	100
Duración del servicio	>5 años	23	18,4
	5-10 años	23	18,4
	11-15 años	26	20,8
	16-20 años	23	18,4
	21-25 años	13	10,4
	26-30 años	15	12
	31-35 años	1	0,8
Valor acumulativo de la exposición al polvo	36-40 años	1	0,8
	>150	54	43,2
	150-300	30	24
	301-450	18	14,4
	451-600	9	7,2
	601-750	6	4,8
	750-900	4	3,2
	901-1050	2	1,6

Según los datos de los encuestados, que incluyen a 125 trabajadores de PT X (tabla 2), la mayoría de ellos están expuestos a niveles de polvo entre 10,29 mg/m³ y 17,15 mg/m³, con un 34,4 % y un 17,6 % en cada rango respectivo. Todos los encuestados trabajan 8 horas diarias y 250 días al año, y más del 43 % presenta valores acumulados de exposición al polvo superiores a 150. Además, la mayoría de los trabajadores han trabajado durante más de 5 años, con la mayor proporción (20,8 %) en el rango de 11 a 15 años de servicio, lo que indica una exposición prolongada.

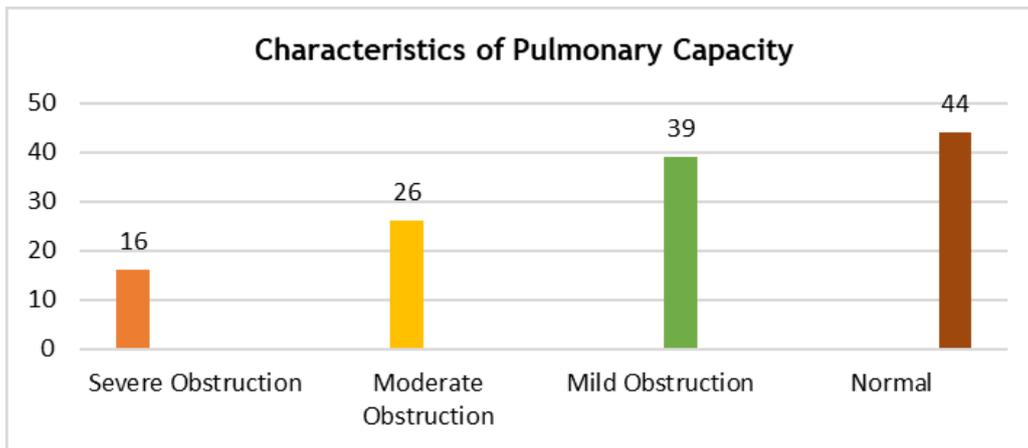


Figura 1. Características de la capacidad pulmonar por encuestados

Según la figura 1, la mayoría de los encuestados tenía una capacidad pulmonar normal (44 personas), mientras que el resto presentaba distintos grados de obstrucción: leve (39), moderada (26) y grave (16). Esto indica que más de la mitad de los trabajadores presentan signos de deterioro de la función pulmonar, y el 52,8 % presenta algún grado de obstrucción.

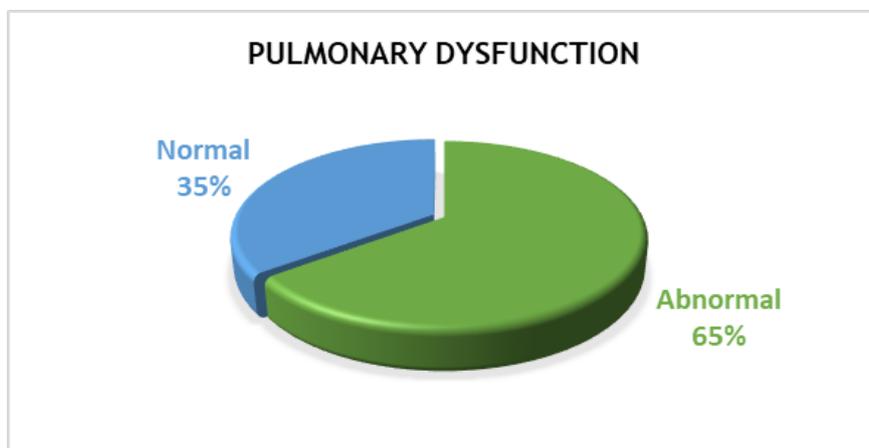


Figura 2. Características de la disfunción pulmonar según los encuestados

La figura 2 muestra que, del total de encuestados, 81 (64,8 %) presentaron disfunción pulmonar, mientras que solo 44 (35,2 %) presentaron función pulmonar normal. Esto indica una alta prevalencia de problemas respiratorios entre los trabajadores, probablemente asociados con la exposición prolongada al polvo industrial en el entorno laboral.

Análisis bivariado

Tabla 3. Relación entre la exposición al polvo y los trastornos de la función pulmonar en trabajadores de PT X

Exposición al polvo	Disfunción pulmonar				Valor p
	Anormal		Normal		
	norte	%	norte	%	
Alto	75	84,30	14	15,70	0,000
Medio	5	38,50	8	61,50	
Bajo	1	4,30	22	95,70	

El análisis de 125 trabajadores de PT X mostró que 81 trabajadores (64,8 %) presentaron función pulmonar anormal, la mayoría (84,3 %) expuesta a altas concentraciones de polvo. En contraste, de los 44 trabajadores con función pulmonar normal, la mayoría (95,7 %) presentó baja exposición al polvo. La prueba de Chi-cuadrado mostró un valor p de 0,00 (<0,05), lo que indica una relación significativa entre el nivel de exposición al polvo y el deterioro de la función pulmonar en los trabajadores.

Tabla 4. Relación entre la edad y los trastornos de la función pulmonar en trabajadores con PT X

Edad	Disfunción pulmonar				Valor p
	Anormal		Normal		
	n	%	n	%	
Fin	15	88,2	2	11,8	0,000
Madya	46	78,0	13	22,0	
Joven	20	40,8	29	59,2	

Los resultados del análisis de 125 trabajadores con función pulmonar anormal mostraron que, de los 81 trabajadores con función pulmonar anormal, la mayoría se encontraba en la edad avanzada (88,2 %) y la mediana edad (78,0 %), mientras que solo el 40,8 % eran jóvenes. Por el contrario, de los 44 trabajadores con función pulmonar normal, la mayoría (59,2 %) eran jóvenes. La prueba de Chi-cuadrado arrojó un valor p de 0,00 (<0,05), lo que indica una asociación significativa entre la edad y el deterioro de la función pulmonar en los trabajadores.

Tabla 5. Relación entre el estado nutricional y los trastornos de la función pulmonar en trabajadores de PT X

Estado nutricional	Disfunción pulmonar				Valor p
	Anormal		Normal		
	n	%	n	%	
Obesidad	22	81,5	5	18,5	0,068
Normal	59	60,2	39	39,8	

Según el análisis estadístico de 125 trabajadores, 81 presentaban función pulmonar anormal y 44 con función pulmonar normal. Entre los trabajadores con trastornos pulmonares, el 81,5 % presentaba obesidad y el 60,2 % tenía un estado nutricional normal. Por otro lado, entre los trabajadores con función pulmonar normal, el 18,5 % presentaba obesidad y el 39,8 % tenía un estado nutricional normal. Los resultados de la prueba de Chi-cuadrado mostraron un valor de p de 0,068 (> 0,05), por lo que se puede concluir que no existe una relación significativa entre el estado nutricional y los trastornos de la función pulmonar en los trabajadores de PT X.

Tabla 6. Relación entre la actividad física y los trastornos de la función pulmonar en trabajadores de PT X

Actividad física	Disfunción pulmonar				Valor p
	Anormal		Normal		
	n	%	n	%	
Sin actividad física	74	77,1	22	22,9	0,000
Hay actividad física	7	24,1	22	75,9	

Según los resultados del análisis estadístico de 125 trabajadores, 81 presentaron función pulmonar anormal y 44, función pulmonar normal. De los trabajadores con función pulmonar anormal, el 77,1 % no realizaba actividad física, mientras que solo el 24,1 % la realizaba. Por el contrario, entre los trabajadores con función pulmonar normal, el 75,9 % realizaba actividad física regularmente y el 22,9 % no la realizaba. Los resultados de la prueba de Chi-Cuadrado mostraron un valor de p de 0,00 (<0,05), lo que indica una relación significativa entre la actividad física y los trastornos de la función pulmonar en los trabajadores de PT X.

Tabla 7. Relación entre la exposición al cigarrillo y los trastornos de la función pulmonar en trabajadores de PT X

Exposición al cigarrillo	Disfunción pulmonar				Valor p
	Anormal		Normal		
	n	%	n	%	
Peso	43	91,5	4	8,5	0,000
Ligero	6	37,5	10	62,5	
Medio	21	56,8	16	43,2	
No Fumar	11	44,0	14	56,0	

Según el análisis estadístico de 125 trabajadores, 81 presentaron función pulmonar anormal y 44, función pulmonar normal. Entre los trabajadores con función pulmonar anormal, el 91,5 % tuvo una exposición intensa al cigarrillo, el 56,8 % una exposición moderada al cigarrillo, el 37,5 % una exposición leve al cigarrillo y el 44,0 % no fumó. Mientras que entre los trabajadores con función pulmonar normal, el 8,5 % tuvo una exposición intensa al cigarrillo, el 43,2 % una exposición moderada al cigarrillo, el 62,5 % una exposición leve al cigarrillo y el 56,0 % no fumó. Los resultados de la prueba de Chi-cuadrado mostraron un valor de p de 0,00 (<0,05), lo que indica una relación significativa entre la exposición al cigarrillo y el deterioro de la función pulmonar en los trabajadores de PT X.

Tabla 8. Relación entre el uso de EPP y los trastornos de la función pulmonar en trabajadores de PT X

Uso EPI	Disfunción pulmonar				Valor p
	Anormal		Normal		
	n	%	n	%	
A veces	11	100	0	0,0	0,008
Rutina	70	61,4	44	38,6	

Según el análisis estadístico de 125 trabajadores, 81 presentaron función pulmonar anormal y 44, función pulmonar normal. De los trabajadores con función pulmonar anormal, el 100 % usaba EPI ocasionalmente, mientras que el 61,4 % lo usaba habitualmente. Por el contrario, entre los trabajadores con función pulmonar normal, el 38,6 % usaba EPI habitualmente. Los resultados de la prueba de Chi-Cuadrado mostraron un valor de p de 0,008 (<0,05), lo que indica una relación significativa entre el uso de EPI y los trastornos de la función pulmonar en los trabajadores de PT X.

Tabla 9. Relación entre la capacidad pulmonar y los trastornos de la función pulmonar en trabajadores de PT X

Capacidad pulmonar	Disfunción pulmonar				Valor p
	Anormal		Normal		
	n	%	n	%	
Obstrucción grave	16	100	0	0,0	0,000
Obstrucción moderada	26	100	0	0,0	
Obstrucción leve	39	100	0	0,0	
Normal	0	0,0	44	100	

Basado según el análisis estadístico de 125 trabajadores, 81 presentaron función pulmonar anormal y 44 con función pulmonar normal. Todos los trabajadores con función pulmonar anormal presentaron obstrucción pulmonar grave (16), moderada (26) o leve (39). Por otro lado, los 44 trabajadores con función pulmonar normal presentaron una capacidad pulmonar normal. Los resultados de la prueba de Chi-Cuadrado muestran un valor de p de 0,00 (<0,05), lo que indica una relación significativa entre la capacidad pulmonar y los trastornos de la función pulmonar en los trabajadores de PT X.

Análisis multivariado

La tabla 10 es el resultado de la prueba de efecto directo en este estudio. El análisis muestra que las variables de edad, estado nutricional y exposición al tabaquismo no tienen un efecto significativo en la Capacidad Pulmonar, con valores p de 0,409, 0,840 y 0,060 respectivamente, así como el estado nutricional en los trastornos de la función pulmonar, por lo que se puede concluir que el estado nutricional no afecta directamente a la Capacidad Pulmonar ni a los trastornos de la función pulmonar. Además, las variables de exposición al polvo, estado nutricional y uso de EPP no tienen un efecto significativo en los trastornos de la función pulmonar con valores p de 0,948, 0,756 y 0,651 respectivamente, por lo que se puede concluir que la exposición al polvo, el estado nutricional y el uso de EPP no tienen un efecto directo en los trastornos de la función pulmonar.

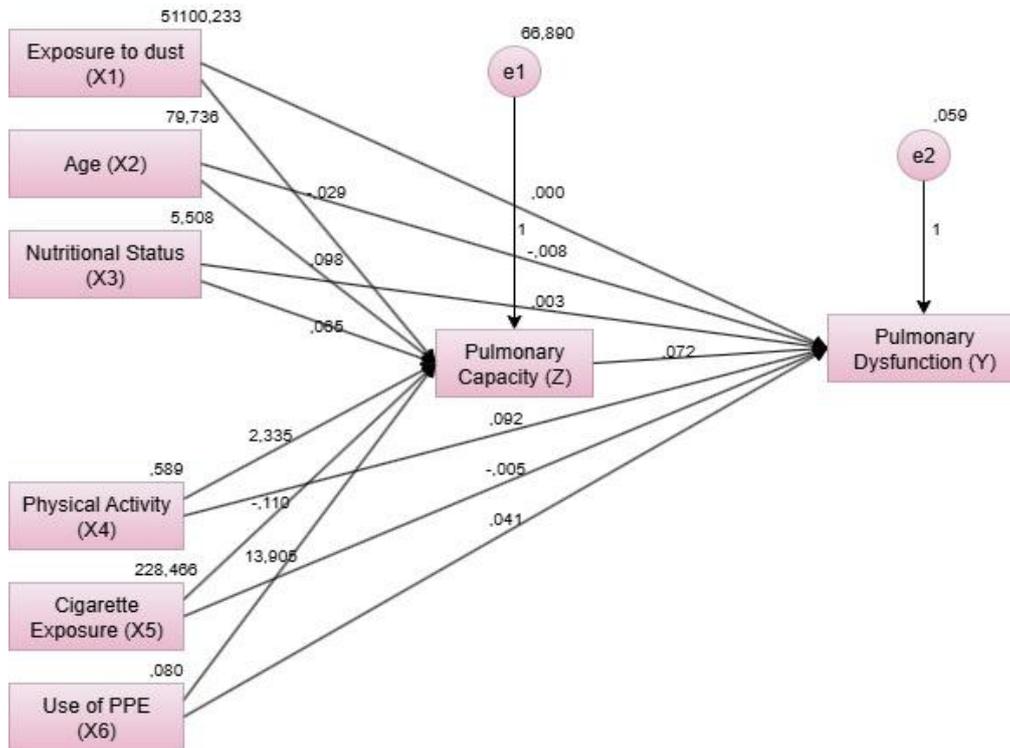


Figura 3. Modelo de análisis de trayectoria

Tabla 10. Prueba de parámetros e hipótesis del efecto directo

Influencia	Estimar	SE	CR	Valor p
Exposición al polvo→Capacidad pulmonar	-0,029	0,005	-5,910	0,000
Edad→Capacidad pulmonar	0,098	0,118	0,825	0,409
Estado nutricional→Capacidad pulmonar	0,065	0,323	0,202	0,840
Actividad física→Capacidad pulmonar	2,335	1,010	2,313	0,021
Exposición al cigarrillo→Capacidad pulmonar	-0,110	0,058	-1,882	0,060
Uso de EPI→Capacidad pulmonar	13,905	2,754	5,049	0,000
Capacidad pulmonar→Disfunción pulmonar	0,072	0,003	26,871	0,000
Exposición al polvo→Disfunción pulmonar	0,000	0,000	0,065	0,948
Edad→Disfunción pulmonar	-0,008	0,004	-2,327	0,020
Estado nutricional→Disfunción pulmonar	0,003	0,010	0,311	0,756
Actividad física→Disfunción pulmonar	0,092	0,031	3,019	0,003
Exposición al cigarrillo→Disfunción pulmonar	-0,005	0,002	-3,056	0,002
Uso de EPI→Disfunción pulmonar	0,041	0,090	0,453	0,651

Por el contrario, la exposición al polvo mostró un efecto negativo significativo en la capacidad pulmonar con un valor estimado de -0,029 CR -5,910 y un valor p de 0,00. Esto indica que cuanto mayor es la exposición al polvo experimentada por los trabajadores, la capacidad pulmonar tiende a disminuir, además de que la edad también muestra un negativo significativo hacia los trastornos de la función pulmonar con un valor estimado de -0,008 CR -2,327 y un valor p de 0,020 que indica que el aumento de la edad de los trabajadores, los trastornos de la función pulmonar tienden a disminuir. Del mismo modo, la exposición al tabaquismo a los trastornos de la función pulmonar muestra un negativo significativo con un valor estimado de -0,005 CR -3,056 y un valor p de 0,002 que indica que el aumento de la exposición al tabaquismo a los trabajadores, los trastornos de la función pulmonar tienden a disminuir.

Mientras tanto, la variable de actividad física en la Capacidad Pulmonar muestra un efecto positivo significativo hacia la Capacidad Pulmonar, con un valor estimado de 2,335 CR 2,313 y un valor p de 0,021, lo que indica que a mayor actividad física de los trabajadores, mayor es el aumento de la Capacidad Pulmonar. Asimismo, el uso de EPP en la nueva capacidad muestra un efecto positivo significativo hacia la Capacidad

Pulmonar, con un valor estimado de 13,905 CR 5,049 y un valor p de 0,00, lo que indica que a mayor uso de EPP por parte de los trabajadores, mayor es el aumento de la Capacidad Pulmonar.

Asimismo, la variable Capacidad Pulmonar muestra un efecto positivo significativo sobre los trastornos de la función pulmonar, con un valor estimado de 0,072 CR 26,871 y un valor p de 0,00. Esto significa que el aumento de la Capacidad Pulmonar percibida por los trabajadores aumentará los trastornos de la función pulmonar, al igual que la actividad física, que muestra resultados positivos significativos con un valor estimado de 0,092 CR 3,019 y un valor p de 0,003. Esto significa que el aumento de la actividad física realizada por los trabajadores aumentará los trastornos de la función pulmonar. Existen varios resultados de relación directa significativa. A continuación, se muestra la construcción del último modelo de análisis de trayectoria, que se puede ver en la figura 4.

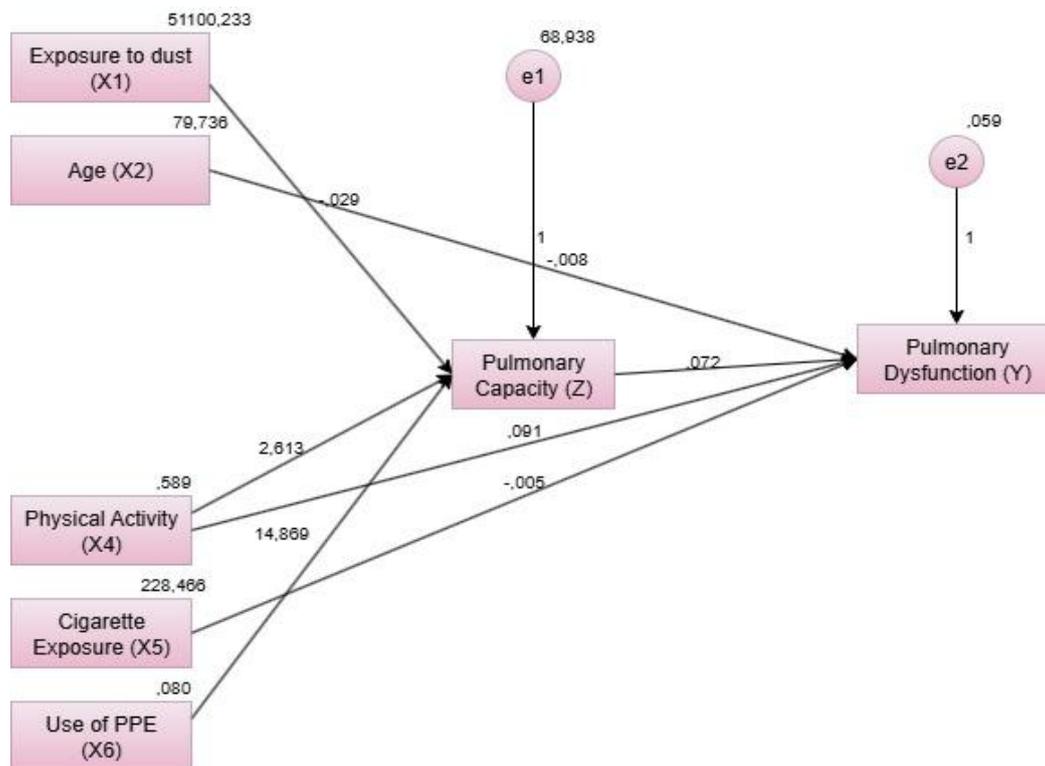


Figura 4. Construcción del último modelo de análisis de trayectoria

Tabla 11. Pruebas de parámetros e hipótesis del efecto indirecto		
Camino de influencia	Coefficiente de trayectoria	Valor p
Exposición al polvo→Capacidad pulmonar→Disfunción pulmonar	-0,002	0,014
Edad→Capacidad pulmonar→Disfunción pulmonar	0,007	0,416
Estado nutricional→Capacidad pulmonar→Disfunción pulmonar	0,005	0,926
Actividad física→Capacidad pulmonar→Disfunción pulmonar	0,167	0,004
Exposición al cigarrillo→Capacidad pulmonar→Disfunción pulmonar	-0,008	0,204
Uso de EPI→Capacidad pulmonar→Disfunción pulmonar	0,994	0,013

El análisis de efectos indirectos revela que la actividad física y el uso de equipo de protección personal (EPP) tienen efectos positivos significativos en la disfunción pulmonar a través de la capacidad pulmonar, como lo indican sus coeficientes de trayectoria (0,167 y 0,994) y valores p bajos (0,004 y 0,013). Esto sugiere que estos dos factores contribuyen significativamente a mejorar la función pulmonar y, a su vez, a reducir la disfunción, lo que enfatiza la importancia de promover estilos de vida activos y el uso constante de EPP en entornos ocupacionales. Por el contrario, los efectos indirectos de la edad, el estado nutricional y la exposición al cigarrillo fueron estadísticamente insignificantes, lo que indica que su influencia en la disfunción pulmonar es demasiado débil o se produce a través de diferentes vías no capturadas en este modelo. Curiosamente, la exposición al polvo muestra un efecto indirecto negativo pequeño pero estadísticamente significativo (coeficiente de

trayectoria = -0,002; $p = 0,014$), lo que sugiere que incluso una exposición mínima al polvo puede perjudicar la función pulmonar, lo que refuerza la necesidad crítica de estrategias de control del polvo. En general, los hallazgos destacan que, si bien algunos factores personales pueden no mediar directamente en la capacidad pulmonar, las intervenciones en el lugar de trabajo centradas en la actividad física y el cumplimiento del uso de EPP pueden desempeñar un papel fundamental en la prevención del deterioro de la salud pulmonar entre los trabajadores.

DISCUSIÓN

El análisis de los efectos indirectos destaca cómo diversos factores, tanto ocupacionales como individuales, contribuyen a la disfunción pulmonar mediante cambios en la capacidad pulmonar, con diversos grados de influencia. La exposición al polvo mostró un efecto indirecto estadísticamente significativo sobre la disfunción pulmonar mediada por la reducción de la capacidad pulmonar (coeficiente de trayectoria = -0,002; $p = 0,014$), lo que refuerza la plausibilidad biológica de que la inhalación prolongada de partículas finas como PM_{10} y el $PM_{2.5}$. Provoca inflamación respiratoria crónica y fibrosis, lo que a su vez deteriora la mecánica pulmonar. Esto concuerda con hallazgos previos que muestran que la exposición prolongada al polvo de cemento reduce significativamente el FEV_1 . Aumenta el riesgo de enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y causa cambios histopatológicos irreversibles en el parénquima pulmonar.⁽¹¹⁾ De acuerdo con el concepto de valor límite umbral (TLV), incluso la exposición marginal más allá de los límites seguros puede causar una disminución progresiva de la capacidad pulmonar, especialmente cuando el equipo de protección personal (EPP) se usa de manera inconsistente. En particular, el uso de EPP demostró el efecto indirecto positivo y estadísticamente significativo más fuerte (coeficiente de trayectoria = 0,994; $p = 0,013$), lo que sugiere que el uso adecuado y constante de EPP es un determinante clave para reducir los efectos adversos de la inhalación de polvo. Esto se alinea con Choudhry et al.⁽¹²⁾ quienes enfatizaron que la efectividad de EPP está determinada no solo por su disponibilidad, sino también por la adherencia, el uso correcto y el mantenimiento. Por lo tanto, en PT X, las políticas estrictas de cumplimiento de EPP y la supervisión de OHS deben considerarse una defensa de primera línea para mitigar los riesgos pulmonares ocupacionales.

Por otro lado, la edad y el estado nutricional no mostraron efectos indirectos significativos (0,007; $p = 0,416$ y 0,005; $p = 0,926$, respectivamente), aunque la edad sigue siendo un determinante conocido del deterioro de la función pulmonar. Los trabajadores mayores de 45 años tienen más probabilidades de experimentar efectos acumulativos de la exposición al polvo, y el envejecimiento natural del tejido pulmonar exacerba aún más el riesgo de disfunción pulmonar. Estudios previos han demostrado que los trabajadores mayores tienen hasta el doble de probabilidades de desarrollar problemas respiratorios cuando se exponen a irritantes en entornos mal ventilados.⁽¹³⁾ Sin embargo, el resultado estadístico no significativo en este estudio podría deberse a efectos superpuestos con otras variables, como la duración del servicio y la salud respiratoria inicial. Mientras tanto, el estado nutricional no emergió como un mediador significativo, lo que puede explicarse por el hecho de que la mayoría de los trabajadores en PT X mantuvieron niveles nutricionales normales debido a la naturaleza físicamente exigente de su trabajo y los rigurosos criterios de selección de salud de la empresa. Esto se alinea con los hallazgos de Chen et al.⁽¹⁴⁾ y Munyra et al.⁽¹⁵⁾ quienes observaron que la obesidad leve o las variaciones en el estado nutricional no afectan significativamente la función pulmonar en poblaciones con buena salud general. Sin embargo, la mala nutrición en sus formas más extremas puede exacerbar las afecciones respiratorias y, por lo tanto, no debe ignorarse por completo en la planificación de la salud ocupacional.

Es importante destacar que la actividad física demostró un efecto indirecto protector significativo (coeficiente de trayectoria = 0,167; $p = 0,004$), lo que respalda la hipótesis de que el ejercicio regular puede preservar una mayor capacidad pulmonar. Esto coincide con los estudios de Huang et al.⁽¹⁶⁾ y Costa et al.⁽¹⁷⁾ que demostraron que los trabajadores activos presentan una mayor fuerza muscular respiratoria, una mayor eficiencia de ventilación y resiliencia a la exposición ocupacional a partículas nocivas. Esto sugiere que los profesionales sanitarios podrían beneficiarse de la integración de programas estructurados de actividad física en sus iniciativas de bienestar laboral para mantener o incluso mejorar los resultados pulmonares de los trabajadores. Por el contrario, la exposición al cigarrillo, a pesar de tener un coeficiente de trayectoria indirecta negativo (-0,008), fue estadísticamente insignificante ($p = 0,204$). Sin embargo, esto no resta relevancia, ya que la evidencia previa muestra que la exposición prolongada al humo del cigarrillo, tanto activa como pasiva, desencadena estrés oxidativo e inflamación crónica, acelerando el deterioro de la función pulmonar.⁽⁵⁾ La falta de significancia en este contexto puede deberse a la exposición superpuesta al polvo y a la falta de información sobre el hábito de fumar entre los encuestados. Sin embargo, la implementación de políticas de lugares de trabajo libres de humo e intervenciones específicas para dejar de fumar sigue siendo un componente necesario de las estrategias de salud respiratoria.

En definitiva, los hallazgos subrayan el papel central de la capacidad pulmonar como variable mediadora. Disminución de la capacidad pulmonar, medida mediante indicadores espirométricos como el FEV_1 —está estrechamente asociada con un mayor riesgo de trastornos pulmonares obstructivos entre los trabajadores

industriales, en particular aquellos en entornos de alto riesgo como las fábricas de cemento.⁽¹⁸⁾ Esto confirma la importancia de la detección temprana mediante espirometrías regulares y respalda la inclusión de la capacidad pulmonar como un factor crítico de salud en los programas de vigilancia ocupacional. Las intervenciones dirigidas a minimizar la exposición al polvo, promover la actividad física, exigir el uso de EPI y prevenir la exposición al tabaco deben priorizarse en el diseño de un sistema integrado de salud ocupacional en PT X. Al identificar y actuar sobre estos factores de riesgo modificables, es posible romper la cadena causal que lleva de la exposición laboral a enfermedades respiratorias irreversibles.

CONCLUSIONES

Con base en los hallazgos y análisis realizados, se puede concluir que proteger la salud pulmonar de los trabajadores en la industria del cemento requiere un enfoque integral y sostenible. Las implicaciones de este estudio subrayan la importancia de fortalecer los programas de Salud y Seguridad Ocupacional (SSO) que no solo se centren en el uso de Equipo de Protección Personal (EPP), sino que también incluyan educación sobre comportamientos saludables, mayor actividad física y la creación de un entorno laboral que fomente un estilo de vida libre de humo. Las empresas necesitan integrar el monitoreo rutinario de la función pulmonar como parte de la detección temprana e implementar intervenciones basadas en evidencia para reducir la exposición a partículas en el lugar de trabajo. Las recomendaciones incluyen aumentar el compromiso de la gerencia con las políticas de SSO, brindar capacitación regular a los trabajadores sobre los riesgos de exposición al polvo y colaborar con profesionales médicos y nutricionistas para fortalecer la resiliencia física de los trabajadores contra los riesgos respiratorios a largo plazo. Se espera que este enfoque multidisciplinario cree un entorno de trabajo saludable, productivo y sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Zhang J, Wang L, Xu D. Ejercicio físico y sus efectos en pacientes con EPOC: Revisión sistemática y metanálisis. *BMC Pulm Med.* 2023;23(1):156.
2. Anderson P, Roberts J, Smith K. El impacto de la exposición al polvo de cemento en la función pulmonar: Una revisión sistemática. *J Occup Health.* 2022;74(3):210-225.
3. Sari DR, Suryani S. Factores de riesgo de trastornos pulmonares en trabajadores: Revisión bibliográfica. *Health Safe Environ J.* 2022;2(2):1-10.
4. Smith A, Johnson P, White D. Estado nutricional y función pulmonar en trabajadores industriales: Un estudio transversal. *Nutr Respir Health.* 2021;14(1):35-42.
5. Slamet S, Kamilla N. Exposición al polvo de cemento y su impacto en la función pulmonar. *Indonesia J Environ Health.* 2017;33(1):77-90.
6. García A, Williams T, Johnson M. Mitigación de la contaminación del aire en plantas de fabricación de cemento. *J Environ Saf.* 2024;80(1):45-60.
7. Raza M, Raza N. Prevalencia de bronquitis crónica y enfermedad pulmonar obstructiva en trabajadores de la industria cementera. *Pak J Public Health.* 2021;20(3):199-212.
8. Al-Neaimi YI, Gomes J, Lavoie JP. Exposición al polvo de cemento y su impacto en la salud respiratoria. *Int J Environ Res Public Health.* 2019;16(4):567.
9. Nazira A, Patel K, Ahmed S. Enfermedades respiratorias ocupacionales en trabajadores de fábricas de cemento. *Middle East J Public Health.* 2022;45(2):98-112.
10. BPJS Ketenagakerjaan. Informe anual de BPJS Ketenagakerjaan 2021. Yakarta: BPJS Ketenagakerjaan; 2021.
11. Debray M, Poussel M, Chary-Valckenaere I, et al. Efectos respiratorios a largo plazo de la exposición al polvo industrial: Una revisión sistemática. *Occup Environ Med.* 2021;78(4):234-241.
12. Choudhry DK, et al. Cumplimiento de la protección respiratoria y resultados pulmonares en trabajadores de fábricas de cemento. *Occup Med Health Aff.* 2021;9(2):295.

13. Jones AR, et al. Deterioro de la función pulmonar relacionado con la edad en trabajadores industriales: Un análisis longitudinal. *J Occup Health Res.* 2021;31(3):215-223.

14. Chen Y, et al. Asociación entre la exposición acumulada a PM2.5 y la función pulmonar en trabajadores del cemento chinos. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(4):1890.

15. Munyra S, et al. Estado nutricional y su asociación con síntomas respiratorios y función pulmonar: Un estudio en el lugar de trabajo. *Int Arch Occup Environ Health.* 2022;95(7):1379-1388.

16. Huang T, Liu X, Wu J. Polvo de cemento y sus efectos en la incidencia de enfermedades pulmonares en trabajadores de fábricas. *Asian J Occup Health.* 2023;77(3):278-290.

17. Costa D, et al. Ejercicio y función pulmonar en entornos laborales: Una revisión de la evidencia. *J Occup Health.* 2021;63(1).

18. Miller MR, Hankinson J, Brusasco V, et al. Estandarización de la espirometría. *Eur Respir J.* 2019;53(5):1802426.

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiamiento para el desarrollo de esta investigación.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Esa Risqianti Yana, Syamsiar S. Russeng, Atjo Wahyu.

Curación de datos: Esa Risqianti Yana.

Análisis formal: Esa Risqianti Yana.

Investigación: Esa Risqianti Yana.

Metodología: Syamsiar S. Russeng, Atjo Wahyu.

Gestión del proyecto: Syamsiar S. Russeng, Atjo Wahyu.

Recursos: Esa Risqianti Yana.

Software: Esa Risqianti Yana.

Supervisión: Syamsiar S. Russeng, Atjo Wahyu.

Validación: Syamsiar S. Russeng, Atjo Wahyu.

Exhibición: Esa Risqianti Yana.

Redacción - borrador original: Esa Risqianti Yana.

Redacción, corrección y edición: Esa Risqianti Yana.