

**ELABORACIÓN DE UN PROTOTIPO DE DEPURADOR HÚMEDO PARA LA  
REDUCCIÓN DE GASES CONTAMINANTES EN CHIMENEA DE HORNO DE  
PANADERÍA A LEÑA ARTESANAL EN YARADA LOS PALOS  
DEVELOPMENT OF A WET SCRUBBER PROTOTYPE FOR REDUCING  
POLLUTANT GASES FROM THE CHIMNEY OF A TRADITIONAL WOOD-FIRED  
BAKERY OVEN IN YARADA LOS PALOS**

**Autores:** <sup>1</sup>Gina Milagros Arocutipa Phatti, <sup>2</sup>Alex Junior Caceres Calizaya, <sup>3</sup>Rebeca Jesusa Coaquira Mamani y <sup>4</sup>Miguel Fernando Llanos Chacolla.

<sup>1</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8567-7851>

<sup>2</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-3724-3818>

<sup>3</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0008-0003-3823-3919>

<sup>4</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-3835-2598>

<sup>1</sup>E-mail de contacto: [gmarocutipap@unjbg.edu.pe](mailto:gmarocutipap@unjbg.edu.pe)

<sup>2</sup>E-mail de contacto: [ajcaceresc@unjbg.edu.pe](mailto:ajcaceresc@unjbg.edu.pe)

<sup>3</sup>E-mail de contacto: [rcoaquirama@unjbg.edu.pe](mailto:rcoaquirama@unjbg.edu.pe)

<sup>4</sup>E-mail de contacto: [mllanosc@unjbg.edu.pe](mailto:mllanosc@unjbg.edu.pe)

Afiliación: <sup>1\*2\*3\*4\*</sup>Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

Artículo recibido: 28 de Julio del 2026.

Artículo revisado: 28 de Julio del 2026.

Artículo aprobado: 28 de Julio del 2026.

<sup>1</sup>Estudiante de la carrera profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

<sup>2</sup>Estudiante de la carrera profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

<sup>3</sup>Estudiante de la carrera profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

<sup>4</sup>Estudiante de la carrera profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

### **Resumen**

El presente estudio tuvo como objetivo diseñar y construir un prototipo de depurador húmedo a escala de laboratorio para reducir las emisiones de gases contaminantes y material particulado generados por la combustión de leña en hornos artesanales de panadería, evaluando su eficiencia de remoción y el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos del agua utilizada en el proceso de depuración. La investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental cuantitativo, empleando un Diseño Completamente Aleatorizado con cuatro tratamientos definidos según el número de aspersores utilizados: sin aspersores, un aspersor, dos aspersores y tres aspersores, con tres repeticiones por tratamiento. Se construyó un prototipo de depurador húmedo conectado a una cámara de combustión artesanal, utilizando una carga constante de leña y un tiempo de operación de una hora por ensayo. Asimismo, se evaluaron parámetros como el potencial de hidrógeno, la turbidez, la conductividad eléctrica y los sólidos resultaron evidenciar diferencias estadísticamente significativas entre

los tratamientos, observándose que el incremento del número de aspersores mejoró progresivamente la eficiencia de remoción del material particulado. El tratamiento con tres aspersores alcanzó la mayor eficiencia de remoción, con un valor de 78,75 %. Se concluye que el prototipo de depurador húmedo constituye una alternativa tecnológica viable y de bajo costo para reducir las emisiones contaminantes generadas por hornos artesanales a leña.

**Palabras clave:** Gases contaminantes, Material particulado, Hornos, Depuración, Aspersores.

### **Abstract**

This study aimed to design and construct a laboratory-scale wet scrubber prototype to reduce emissions of polluting gases and particulate matter generated by wood combustion in artisanal bakery ovens. The study evaluated the scrubber's removal efficiency and the behavior of the physicochemical parameters of the water used in the treatment process. The research

employed a quantitative experimental approach, using a Completely Randomized Design with four treatments defined by the number of sprinklers used: no sprinklers, one sprinkler, two sprinklers, and three sprinklers, with three replicates per treatment. A wet scrubber prototype was built and connected to an artisanal combustion chamber, using a constant wood load and an operating time of one hour per trial. Parameters such as pH, turbidity, electrical conductivity, and solids were evaluated. The results showed statistically significant differences between treatments, with increasing the number of sprinklers progressively improving the particulate matter removal efficiency. The treatment with three sprinklers achieved the highest removal efficiency, at 78.75%. It is concluded that the wet scrubber prototype constitutes a viable and low-cost technological alternative for reducing pollutant emissions generated by artisanal wood-fired ovens.

**Keywords:** Pollutant gases, Particulate matter, Ovens, Purification, Sprinklers.

### **Sumário**

Este estudo teve como objetivo projetar e construir um protótipo de lavador de gases úmido em escala laboratorial para reduzir as emissões de gases poluentes e material particulado gerados pela combustão de madeira em fornos de padarias artesanais. O estudo avaliou a eficiência de remoção do lavador e o comportamento dos parâmetros físicoquímicos da água utilizada no processo de tratamento. A pesquisa empregou uma abordagem experimental quantitativa, utilizando um delineamento inteiramente casualizado com quatro tratamentos definidos pelo número de aspersores utilizados: sem aspersores, um aspersor, dois aspersores e três aspersores, com três repetições por tratamento. Um protótipo de lavador de gases úmido foi construído e conectado a uma câmara de combustão artesanal, utilizando uma carga constante de madeira e um tempo de operação de uma hora por ensaio. Parâmetros como pH, turbidez, condutividade elétrica e sólidos foram avaliados. Os resultados mostraram diferenças

estatisticamente significativas entre os tratamentos, com o aumento do número de aspersores melhorando progressivamente a eficiência de remoção de material particulado. O tratamento com três aspersores alcançou a maior eficiência de remoção, de 78,75%. Conclui-se que o protótipo de lavador de gases úmido constitui uma alternativa tecnológica viável e de baixo custo para reduzir as emissões de poluentes geradas por fornos artesanais a lenha.

**Palavras-chave:** Gases poluentes, Material particulado, Fornos, Purificação, Aspersores.

### **Introducción**

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales y de salud pública a nivel mundial esto se debe a la elevada emisión del material particulado y de los gases contaminantes que han sido originados por las actividades industriales, transporte, generación de energía y combustión de biomasa. La organización Mundial de la Salud ha señalado que la exposición continua a estos contaminantes como el material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y los diversos compuestos orgánicos generados durante los procesos de la combustión incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias, cardiovasculares e incluso mortalidad prematura (World Health Organization, 2021).

Asimismo, cuantiosos estudios indican que la combustión de la biomasa sigue siendo una importante fuente de emisiones atmosféricas (Rosales et al., 2021; Ozgen et al., 2020). Entre las diferentes fuentes de contaminación por combustión de la biomasa destacan los hornos artesanales que son alimentados con leña, ampliamente utilizados para la producción de pan y los alimentos. Durante su funcionamiento se generan emisiones de partículas fina, carbono

negro, compuestos orgánicos volátiles y monóxido de carbono como consecuencia de la combustión incompleta de la madera. Estas emisiones afectan directamente la calidad del aire exterior como a la salud de la población que se encuentre cerca del establecimiento en este caso de las panaderías (Lima et al., 2020; Rosales et al., 2021). En América Latina, la contaminación atmosférica ocasionada por una parte por el uso de combustión de biomasa de leña sigue representando un desafío para la gestión ambiental debido a la amplia utilización de la leña como combustible doméstico y comercial. En cuantiosos países de la región aún perduran hornos, cocinas, sistemas tradicionales de combustión que generan elevadas concentraciones de partículas finas y de gases contaminantes, perjudicando a las poblaciones y trabajadores expuestos de manera continua. Diferentes estudios desarrollados en Brasil, Perú y otros países latinoamericanos evidencian que las emisiones provenientes de la combustión de madera componen una fuente muy importante de PM<sub>2.5</sub> (Lima et al., 2020; Burrowes et al., 2020).

En el caso de Perú, la problemática adquiere especial relevancia debido al amplios usos de biomasa en las zonas rurales y periurbanas, así como en las actividades comerciales donde aún prevalecen hornos y cocinas que son alimentadas con leña. Estudios hechos en Puno evidenciaron que las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> dentro de las viviendas que utilizan biomasa superan ampliamente los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud exponiendo de forma permanente a los habitantes y trabajadores a contaminantes que son dañinos para la salud (Kephart et al., 2020; Burrowes et al., 2020). De igual forma investigaciones que han sido desarrolladas en ciudades peruanas como Cusco evidenciaron que las concentraciones de material particulado

siguen excediendo los valores guía internacionales, siendo así un problema para la salud de las personas (Warthon et al., 2025). En el contexto local, se usa biomasa para los hornos de las panaderías en Tacna por tal motivo es importante crear tecnologías para evitar que los gases contaminantes y material particulado salga al medio ambiente.

La problemática también involucra la salud de los trabajadores y de las poblaciones ubicadas en las inmediaciones de estos establecimientos. Durante el uso de los hornos artesanales, los gases y partículas emitidas por las chimeneas pueden incorporarse al aire y contribuir a deterioro de su calidad especialmente cuando no hay sistemas de tratamiento de emisiones. Diversas investigaciones han evidenciado que la exposición continua al material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>), al monóxido de carbono y a otros contaminantes que son generados por la combustión de la biomasa incrementando el riesgo de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, además también de perjudicar la calidad de vida de las poblaciones (World Health Organization, 2021; Kephart et al., 2020).

Frente a esta problemática los depuradores húmedos son la alternativa tecnológica ampliamente utilizada para el control de las emisiones atmosféricas. Su principio de funcionamiento trata de poner en contacto los gases contaminantes y el material particulado conectada con el sistema de depuración que generalmente es agua, ayudando así a la captura de gases contaminante y partículas suspendidas mediante mecanismos de impacto. Estudios experimentales realizados que han sido utilizados con sistemas de depuración húmeda reportan eficiencias importantes en la remoción de los materiales particulados generados las combustiones de la biomasa (Hang et al., 2023).

En concordancia con esta problemática, el presente estudio tiene como objetivo diseñar y construir un prototipo de depurador húmedo a escala de laboratorio considerando así las condiciones de operación de un horno de panadería artesanal a leña y el principio de absorción de contaminantes en medio líquido; comparar las concentraciones de contaminantes gaseosos antes y después de la implementación del prototipo para determinar su porcentaje de remoción; y analizar la variación de los parámetros fisicoquímicos del agua de lavado, tales como el pH, la turbidez, la conductividad eléctrica y los sólidos suspendidos, con el fin de evaluar la capacidad de captación de contaminantes del sistema propuesto. Se espera que los resultados obtenidos ayuden en la evidencia científica para el desarrollo de tecnologías de control de emisiones de bajo costo que contribuyan a disminuir la contaminación atmosférica generada por hornos artesanales de leña.

### **Materiales y Métodos**

El estudio se llevó a cabo en dos espacios. El primero correspondió al Laboratorio de Aguas de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG), mientras que el segundo se ubicó en un entorno doméstico de la ciudad de Tacna, específicamente en los palos Pozo IRHS 162, Parcela 34. Para iniciar el proceso, se realizó una inspección directa del horno de la panadería, con la finalidad de identificar detalladamente sus características de operación, el tipo de combustible de biomasa utilizado, las dimensiones estructurales de la chimenea y el comportamiento dinámico de las emisiones gaseosas, de acuerdo con los criterios de caracterización de fuentes fijas (Maquera, 2024, p. 53). Los materiales fueron seleccionados con el propósito de garantizar la resistencia del sistema. Se utilizó un cilindro pequeño como

componente principal, tuberías de PVC, una bomba hidráulica sumergible de tamaño reducido, acoples herméticos y tres boquillas de aspersión fina, con la finalidad de maximizar el área interfacial de contacto mediante la generación de microgotas. Una vez transcurrida la hora de operación, se retiró el disco de algodón, el cual fue secado nuevamente y pesado para determinar, mediante la diferencia de peso, la masa de material particulado retenido. Asimismo, se recolectó una muestra final de 500 mL de agua de lavado, en la cual se determinaron nuevamente los mismos parámetros fisicoquímicos evaluados inicialmente, empleando un procedimiento idéntico.

Para evaluar la transferencia de masa y la retención de contaminantes en la fase líquida, se determinaron secuencialmente el pH, la turbidez, la conductividad eléctrica y los sólidos suspendidos totales. Para la medición del pH, se transfirió una alícuota de 30 mL de la muestra recolectada y se utilizó un pH-metro previamente calibrado con soluciones de pH 4, 7 y 10. El electrodo fue introducido en la muestra hasta obtener una lectura estable, momento en el que se registró el valor correspondiente. Para medir la turbidez, se transfirió una alícuota de 30 mL de la muestra a una celda espectrométrica limpia, seca y libre de burbujas de aire. La lectura se efectuó en un turbidímetro calibrado y el valor se registró directamente en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Para determinar la conductividad eléctrica, se vertió una alícuota de 50 mL de la muestra en un recipiente limpio y se introdujo la sonda de un conductímetro previamente calibrado (American Public Health Association et al., 2023). En el caso de los sólidos suspendidos totales (SST), se filtró un volumen de 100 mL de agua a través de un papel filtro analítico previamente acondicionado y

pesado en una balanza de precisión, con el fin de obtener su masa inicial. Posteriormente, el filtro con el residuo retenido fue sometido a secado térmico en una estufa a una temperatura de entre 103 y 105 °C hasta alcanzar un peso constante. Después, se enfrió en un secador y se determinó su masa final para calcular la concentración de sólidos en mg/L mediante diferencia gravimétrica (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2025).

Para la construcción del prototipo, se instaló una columna de tubería de PVC como cuerpo principal del depurador húmedo, conectada en su parte inferior a la salida de la cámara de combustión artesanal de barro. En la parte superior de la columna se ubicaron los aspersores, los cuales fueron alimentados mediante una bomba de presión externa que permitió la recirculación continua del agua de lavado. Antes del inicio de cada ensayo, se pesó una masa fija de 4 kg de leña seca, la cual fue colocada e incinerada en la cámara de combustión durante el tiempo total de operación establecido, correspondiente a una hora. El humo generado ascendió a través de la columna de PVC y posteriormente entró en contacto con el agua dispersada, de acuerdo con la cantidad de aspersores establecida en cada tratamiento. De esta manera, se buscó determinar su impacto y favorecer la captura del material particulado mediante mecanismos de impacto e interceptación.

Antes de iniciar la combustión, se recolectaron muestras iniciales de 500, 1000 y 1500 mL de agua de lavado, en las cuales se determinaron los parámetros de pH, turbidez, conductividad eléctrica (C.E.) y sólidos suspendidos totales (SST). De manera simultánea, se colocó un disco de algodón previamente secado y pesado en el punto de salida del sistema, con el

propósito de cuantificar el material particulado que no fue retenido por el depurador. Una vez transcurrida la hora de operación, se retiró el disco de algodón, el cual fue secado nuevamente y pesado para determinar la masa de material particulado retenido mediante la diferencia de peso. Asimismo, se recolectaron muestras finales de 500, 1000 y 1500 mL de agua de lavado, en las cuales se determinaron nuevamente los mismos parámetros físicoquímicos evaluados inicialmente, utilizando un procedimiento idéntico.

Este procedimiento se repitió en cada uno de los cuatro tratamientos evaluados: T0, sin aspersores y considerado como control; T1, con un aspersor; T2, con dos aspersores; y T3, con tres aspersores. Durante los ensayos se mantuvieron constantes la masa de leña, el tipo de cámara de combustión y el tiempo de operación. Cada tratamiento contó con tres repeticiones. La investigación fue de tipo experimental y se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo. Se empleó un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA) para evaluar la eficiencia de un prototipo de depurador húmedo en la reducción del material particulado procedente de la combustión de leña. Se establecieron cuatro tratamientos en función del número de aspersores activos, manteniendo el mismo tipo de motor o bomba como condición constante del sistema.

El tratamiento T0 correspondió al control sin aspersores; el T1 utilizó un aspersor; el T2 empleó dos aspersores; y el T3 incorporó tres aspersores. Los caudales estimados de agua fueron de 0,0; 0,5; 1,0 y 1,5 L/h, respectivamente, con un tiempo constante de operación de una hora por ensayo. Se realizaron tres repeticiones para cada tratamiento, con lo cual se obtuvieron 12 unidades experimentales (Darbandi et al., 2024). Adicionalmente, se

evaluaron los parámetros fisicoquímicos del agua de lavado utilizada en el sistema de aspersión, mediante la determinación de sus valores antes y después de la aplicación de cada tratamiento. Para determinar los sólidos suspendidos totales (SST) presentes en el agua de lavado, se empleó el método gravimétrico mediante filtración. Para ello, se utilizó un papel filtro previamente secado y pesado, a través del cual se filtró un volumen conocido de la muestra de agua. El papel filtro con los sólidos retenidos fue secado en una estufa a una temperatura de entre 103 y 105 °C hasta alcanzar un peso constante y, posteriormente, fue pesado nuevamente. La concentración de SST se calculó a partir de la diferencia entre el peso final y el peso inicial del papel filtro, y se expresó en mg/L. Este procedimiento se aplicó tanto a la muestra inicial como a la muestra final del agua de lavado en cada una de las 12 unidades experimentales (American Public Health Association et al., 2023).

La población estuvo constituida por las emisiones gaseosas y el material particulado generados durante la combustión controlada de biomasa leñosa utilizada como fuente de calor en hornos artesanales de panadería. La muestra correspondió al humo generado experimentalmente mediante la combustión controlada de 4 kg de leña seca por ensayo, en una cámara de combustión artesanal de barro conectada al prototipo de depurador húmedo, durante un tiempo de operación de una hora. La masa de leña se mantuvo constante en todas las unidades experimentales y únicamente variaron el número de aspersores activos, el caudal de agua asperjada y, en consecuencia, el tratamiento aplicado. Se evaluaron cuatro tratamientos en función del número de aspersores activos: T0, sin aspersores y considerado como control; T1, con un aspersor; T2, con dos aspersores; y T3, con tres

aspersores. Cada tratamiento contó con tres repeticiones, por lo que se obtuvo un total de 12 unidades experimentales.

**Tabla 1.** Tratamiento y repeticiones para el desarrollo de la investigación.

| Tratamientos | Cantidad de aspersores en uso | Repeticiones |    |
|--------------|-------------------------------|--------------|----|
|              |                               | R1           | R2 |
| T0           | 0                             |              |    |
| T1           | 1                             |              |    |
| T2           | 2                             |              |    |
| T3           | 3                             |              |    |

Fuente: Elaboración propia.

### Resultados y Discusión

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable de remoción de material particulado (humo) en función del tratamiento evaluado. Se observó un valor F de 2652.79 ( $p < 0.05$ ), lo que indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia de remoción entre los cuatro tratamientos analizados.

Con el propósito de identificar específicamente entre qué tratamientos se presentaron diferencias significativas en la eficiencia de remoción, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey. Los resultados presentados en la Tabla 3 muestran la conformación de cuatro grupos homogéneos distintos —A, B, C y D—, lo que evidencia que cada tratamiento difirió estadísticamente de los demás. El tratamiento T0, correspondiente al sistema sin aspersores, registró la menor eficiencia de remoción, con un valor de 0,00 %, mientras que el tratamiento T3, equipado con tres aspersores, alcanzó la mayor eficiencia, con un 78,75 %. Estos resultados confirman que el incremento del número de aspersores y, consecuentemente, del caudal de agua asperjada mejoró progresivamente la capacidad del depurador húmedo para retener el material particulado.

**Tabla 3.** Prueba de comparación múltiple de Tukey para la remoción de humo por tratamiento.

| Tratamiento         | Número de casos | Media de remoción (%) | Grupo homogéneo |
|---------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| T0: sin aspersores  | 3               | 0,00                  | A               |
| T1: un aspersor     | 3               | 30,59                 | B               |
| T2: dos aspersores  | 3               | 61,17                 | C               |
| T3: tres aspersores | 3               | 78,75                 | D               |

Fuente: Elaboración propia.

En relación con el pH del agua de lavado, el análisis de varianza presentado en la Tabla 4 mostró una razón F de 176,08 y un valor de significación inferior a 0,05. Por consiguiente, se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, lo que indica que la cantidad de aspersores utilizados influyó en el comportamiento del pH del agua después del proceso de depuración.

**Tabla 4.** Análisis de varianza para el pH del agua de lavado por tratamiento.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|---------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre tratamientos  | 14,087            | 3  | 4,696          | 176,08  | < 0,001 |
| Error intragrupo    | 0,213             | 8  | 0,027          | —       | —       |
| Total, corregido    | 14,300            | 11 | —              | —       | —       |

Fuente: Elaboración propia.

La prueba de comparación múltiple de Tukey confirmó la formación de cuatro grupos homogéneos diferenciados. Como se observa en la Tabla 5, el tratamiento T0 presentó el valor de pH más bajo, con una media de 3,60, lo que correspondió a la condición de mayor acidificación. En contraste, el tratamiento T3 mostró un pH de 6,47, valor más próximo a la neutralidad. Este comportamiento sugiere que, en el tratamiento de control, caracterizado por

la presencia de agua estática y la ausencia de dispersión activa, el contacto prolongado y concentrado con los gases ácidos producidos durante la combustión favoreció una mayor acidificación. En los tratamientos con aspersión activa, la recirculación y la dilución del agua atenuaron este efecto.

**Tabla 5.** Prueba de comparación múltiple de Tukey para el pH por tratamiento.

| Tratamiento         | Número de casos | Media del pH | Grupo homogéneo |
|---------------------|-----------------|--------------|-----------------|
| T0: sin aspersores  | 3               | 3,60         | A               |
| T1: un aspersor     | 3               | No reportada | B               |
| T2: dos aspersores  | 3               | No reportada | C               |
| T3: tres aspersores | 3               | 6,47         | D               |

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la turbidez del agua de lavado, el análisis de varianza registró una razón F de 601,93 y un valor de significación inferior a 0,05, como se muestra en la Tabla 6. Este resultado permitió establecer que existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, por lo que la cantidad de aspersores activos tuvo una influencia directa sobre la turbidez registrada en el agua utilizada durante el proceso de depuración.

**Tabla 6.** Resumen del análisis de varianza para la turbidez por tratamiento.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|---------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre tratamientos  | No reportada      | 3  | No reportado   | 601,93  | < 0,001 |
| Error intragrupo    | No reportada      | 8  | No reportado   | —       | —       |
| Total, corregido    | No reportada      | 11 | —              | —       | —       |

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de la prueba de Tukey presentados en la Tabla 7, se identificaron cuatro grupos homogéneos claramente diferenciados. El tratamiento T0 presentó la menor turbidez, con una media de 19,33 NTU, mientras que el tratamiento T3

registró la mayor turbidez, con 82,67 NTU. Este incremento indica que, a medida que aumentó el número de aspersores y el caudal de agua

dispersada, también aumentó la cantidad de partículas capturadas y mantenidas en suspensión en el agua de lavado.

**Tabla 7. Prueba de comparación múltiple de Tukey para la turbidez por tratamiento.**

| Tratamiento         | Número de casos | Turbidez media (NTU) | Grupo homogéneo |
|---------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| T0: sin aspersores  | 3               | 19,33                | A               |
| T1: un aspersor     | 3               | 39,67                | B               |
| T2: dos aspersores  | 3               | 69,33                | C               |
| T3: tres aspersores | 3               | 82,67                | D               |

Fuente: Elaboración propia.

Para la conductividad eléctrica, el análisis de varianza presentado en la Tabla 8 mostró una razón F de 2025,49 y un valor de significación inferior a 0,05. En consecuencia, se confirmaron diferencias estadísticamente

significativas entre los tratamientos evaluados, lo que demuestra que la modificación del número de aspersores y del caudal de agua tuvo efectos sobre la concentración de iones disueltos en el agua de lavado.

**Tabla 8. Análisis de varianza para la conductividad eléctrica por tratamiento.**

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|---------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| Entre tratamientos  | 98.236,30         | 3  | 32.745,40      | 2025,49 | < 0,001 |
| Error intragrupo    | 129,33            | 8  | 16,17          | —       | —       |
| Total, corregido    | 98.365,70         | 11 | —              | —       | —       |

Fuente: Elaboración propia.

La prueba de comparación múltiple de Tukey permitió identificar cuatro grupos homogéneos claramente diferenciados. El tratamiento T0 registró la conductividad eléctrica más alta, con una media de 407,00  $\mu\text{S/cm}$ , mientras que el tratamiento T3 presentó el valor más bajo, con 154,00  $\mu\text{S/cm}$ . La tendencia decreciente

observada conforme aumentó el número de aspersores fue consistente con un efecto de dilución. Al incrementarse el volumen de agua en circulación, disminuyó la concentración de iones disueltos por unidad de volumen, a pesar de que el contacto total del agua con los gases de combustión fue mayor.

**Tabla 9. Prueba de comparación múltiple de Tukey para la conductividad eléctrica por tratamiento.**

| Tratamiento         | Número de casos | Conductividad media ( $\mu\text{S/cm}$ ) | Grupo homogéneo |
|---------------------|-----------------|------------------------------------------|-----------------|
| T3: tres aspersores | 3               | 154,00                                   | A               |
| T2: dos aspersores  | 3               | 251,67                                   | B               |
| T1: un aspersor     | 3               | 286,67                                   | C               |
| T0: sin aspersores  | 3               | 407,00                                   | D               |

Fuente: Elaboración propia.

Para la variable sólidos suspendidos totales, el análisis de varianza presentado en la Tabla 10 registró una razón F de 14.109,24 y un valor de significación inferior a 0,05. Este resultado confirmó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, lo que evidencia que la cantidad de aspersores activos produjo

variaciones importantes en la concentración de sólidos suspendidos en el agua de lavado. La prueba de comparación múltiple de Tukey evidenció la formación de cuatro grupos homogéneos claramente diferenciados. El tratamiento T0 registró la concentración más alta de sólidos suspendidos totales, con una media de 49,06 mg/L, mientras que el

tratamiento T3 presentó la concentración más baja, con 6,51 mg/L. Las medias de pH correspondientes a T1 y T2, así como las sumas de cuadrados del ANOVA de turbidez, no

estaban incluidas en la información proporcionada, por lo que se identificaron como datos no reportados.

**Tabla 10.** *Análisis de varianza para los sólidos suspendidos totales por tratamiento.*

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | Razón F   | Valor p |
|---------------------|-------------------|----|----------------|-----------|---------|
| Entre tratamientos  | 3.307,21          | 3  | 1.102,40       | 14.109,24 | < 0,001 |
| Error intragrupo    | 0,63              | 8  | 0,08           | —         | —       |
| Total, corregido    | 3.307,84          | 11 | —              | —         | —       |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11.** *Prueba de comparación múltiple de Tukey para los sólidos suspendidos totales por tratamiento.*

| Tratamiento         | Número de casos | Media de SST (mg/L) | Grupo homogéneo |
|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| T3: tres aspersores | 3               | 6,5133              | A               |
| T2: dos aspersores  | 3               | 14,7567             | B               |
| T1: un aspersor     | 3               | 34,0233             | C               |
| T0: sin aspersores  | 3               | 49,0633             | D               |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10, el total corregido se ajustó a 3.307,84, debido a que corresponde a la suma de 3.307,21 y 0,63.

### Conclusiones

Respecto a la evaluación de la eficiencia de remoción de material particulado mediante el método gravimétrico, se concluye que el incremento en el número de aspersores activos mejora progresivamente la capacidad del prototipo de depurador húmedo para retener material particulado proveniente de la combustión de leña. El tratamiento T3 (3 aspersores) alcanzó la mayor eficiencia de remoción (78.75%), seguido por T2 (61.17%) y T1 (30.59%), frente al tratamiento control T0, que no registró remoción alguna (0.00%). El análisis estadístico (ANOVA,  $F = 2652.79$ ;  $p < 0.05$ ) y la prueba de Tukey confirmaron que los cuatro tratamientos difieren significativamente entre sí, evidenciando que el caudal de agua asperjada es un factor determinante en la eficiencia de captación de material particulado. Por último, podemos concluir que los resultados obtenidos evidencian que la implementación de

sistemas de depuración húmeda puede constituir una alternativa tecnológica accesible para disminuir el impacto ambiental generado por las emisiones provenientes de hornos artesanales a leña.

### Referencias Bibliográficas

- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA Press. <https://www.standardmethods.org/>
- Arango, L., García, G., & Muñoz, J. (2022). *Afectaciones de la harina en el sistema respiratorio en empleados de la panadería Chaco Pan* [Tesis doctoral, Corporación Universitaria Minuto de Dios]. <https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/d9b35b9d-8490-4644-8e02-b895766347f1/content>
- Burrowes, V., Piedrahita, R., Pillarisetti, A., et al. (2020). Comparison of next-generation portable pollution monitors to measure exposure to PM<sub>2.5</sub> from household air pollution in Puno, Peru. *Indoor Air*, 30(3), 445–458. <https://doi.org/10.1111/ina.12638>

- Cunuay, A. (2023). *Evaluación de la calidad de aire de la emisión de gases producidos por la quema de leña para la producción de carbón, comunidad Pupana Norte, cantón Saquisilí* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Cotopaxi. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/f392c1ab-779b-4ac3-83f6-b2a910652500>
- Darbandi, T., Risberg, M., & Westerlund, L. (2024). Effect of operation conditions on particulate matter removal by a packed-bed wet scrubber for a small-scale biofuel boiler. *Thermal Science and Engineering Progress*, 47, 102290. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102290>
- Hang, L., Um, D., Srean, A., Kong, S., Try, P., Chhe, D., Taing, C., Yim, R., Hata, M., Amin, M., Phairuang, W., & Furuuchi, M. (2023). Determination of air pollutants removal efficiency by wet packed scrubber system. *Key Engineering Materials*, 972, 73–78. <https://doi.org/10.4028/p-fUuA4w>
- Kephart, J., et al. (2020). Household air pollution exposure and associations with household characteristics among biomass cookstove users in Puno, Peru. *Environmental Research*, 191, 110028. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110028>
- Lima, F., Perez-Martinez, P., Andrade, M., Kumar, P., & Miranda, R. (2020). Characterization of particles emitted by pizzerias burning wood and briquettes: A case study at São Paulo, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07508-6>
- Maquera, A. (2024). *Evaluación de las emisiones de gases contaminantes generados por la combustión de biomasa en hornos de* Spatiotemporal analysis and development of the first predictive model (2017–2020) *Sustainability*, 17(2), 394. <https://doi.org/10.3390/su17020394>
- panificación en la ciudad de Tacna [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio Institucional de la UNJBG. <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/4141>
- Portillo, H. (2025). *Desarrollo tecnológico de la industria panificadora y los niveles de contaminación ambiental en la Provincia Constitucional del Callao, Lima–Perú, 2023*. <https://hdl.handle.net/20.500.11818/10166>
- Rosales, C., Jung, J., & Cayetano, M. (2021). Emissions and chemical components of PM2.5 from simulated cooking conditions using traditional cookstoves and fuels under a dilution tunnel system. *Aerosol and Air Quality Research*, 21. <https://doi.org/10.4209/aaqr.200581>
- United States Environmental Protection Agency. (1988). *User's guide to SDM: A shoreline dispersion model*. Office of Air Quality Planning and Standards, Emissions, Monitoring, and Analysis Division. EPA-450/4-88-017. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000J3QB.TXT?ZyActionD=ZyDocument>
- United States Environmental Protection Agency. (2025). *Monitoring by control technique: Wet scrubber for particulate matter*. <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-wet-scrubber-particulate-matter>
- Warthon, B., Miranda, I., Quispe, I., et al. (2025). A comprehensive assessment of PM2.5 and PM10 pollution in Cusco: World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Gina Milagros Arocutipá Phatti, Alex Junior Cáceres Calizaya, Rebeca Jesusa Coaquira Mamani y Miguel Fernando Llanos Chacolla.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Declaraciones éticas y editoriales del artículo</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Contribución de los autores (Taxonomía CRediT)</b><br>Gina Milagros Arocutipá Phatti: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio<br>Alex Junior Caceres Calizaya: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.<br>Rebeca Jesusa Coaquira Mamani: curación y organización de los datos, participación en la recolección de información, validación de los resultados obtenidos y elaboración de representaciones gráficas y visualización de los datos.<br>Miguel Fernando Llanos Chacolla: provisión de recursos académicos y materiales para el desarrollo del estudio, apoyo en la administración del proyecto investigativo y revisión editorial del manuscrito antes de su publicación. |
| <b>Declaración de conflicto de intereses</b><br>Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Declaración de financiamiento</b><br>La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Declaración del editor</b><br>El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Declaración de los revisores</b><br>Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Declaración ética de la investigación</b><br>Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Declaración sobre el uso de inteligencia artificial</b><br>Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Disponibilidad de datos</b><br>Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

