



ARTICULO ORIGINAL

Uso de Líquenes como Bioindicadores de Contaminación Atmosférica en la Comunidad Nativa Atahualpa, Satipo (Perú)

Use of Lichens as Bioindicators of Air Pollution in the Native Community of Atahualpa, Satipo (Peru)

Rodolfo Doria ^{1*}, Marcelo Yauri ¹, Daniel Susanibar-Sandoval ²

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad del aire en la comunidad nativa de Atahualpa mediante el uso de líquenes como bioindicadores. Se implementó una metodología basada en el cálculo del Índice de Pureza Atmosférica (IPA), estableciendo puntos de muestreo según la distancia a la ciudad (7 punto en total). Se registró solo una especie de líquen *Parmeliopsis sp* con valores de IPA que reflejan una buena calidad del aire (IPA = 25), con presencia abundante de líquenes en diversas áreas de estudio. Esto se relaciona con la baja actividad industrial y la conservación del entorno natural en la comunidad, donde predominan prácticas tradicionales. Los hallazgos subrayan la importancia de los líquenes como herramientas eficientes para el monitoreo ambiental y sugieren que la comunidad de Atahualpa mantiene un equilibrio sostenible con su entorno. Se concluye que preservar esta condición es fundamental ante posibles presiones futuras derivadas de actividades antropogénicas.

Palabras clave: Bioindicadores, Calidad de Aire, Líquenes, Monitoreo Ambiental.

ABSTRACT

The research aimed to assess air quality in the native community of Atahualpa by using lichens as bioindicators. A methodology based on the calculation of the Atmospheric Purity Index (IPA) was implemented, establishing sampling points according to the distance to the city (7 points in total). Only one species of lichen *Parmeliopsis sp.* was recorded with IPA values that reflect good air quality (IPA = 25), with abundant presence of lichens in various study areas. This is related to the low industrial activity and the conservation of the natural environment in the community, where traditional practices predominate. The findings underline the importance of lichens as efficient tools for environmental monitoring and suggest that the community of Atahualpa maintains a sustainable balance with its environment. It is concluded that preserving this condition is essential in the face of possible future pressures derived from anthropogenic activities.

Keywords: Bioindicators; Air Quality; Lichens; Environmental Monitoring.

¹ Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, La Merced, Perú.

² Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú.

*Autor de correspondencia.
E-mail:
73524404@uniscjsa.edu.pe

Recibido: 30 de noviembre de 2024
Aprobado: 10 de diciembre de 2024
Publicado: 25 de diciembre de 2024

Para citar este artículo:

Doria R., Yauri M., Susanibar-Sandoval, D. (2024). Uso de Líquenes como Bioindicadores de Contaminación Atmosférica en la Comunidad Nativa Atahualpa, Satipo (Perú). *Yotantsipanko*, 4(2), 11-22. <https://doi.org/10.54288/yotantsipanko.v4i2.44>



Introducción

La calidad del aire es un aspecto fundamental para la salud ambiental y humana, particularmente en áreas donde las comunidades dependen directamente de los recursos naturales para su subsistencia (Asta et al., 2002; Borghi et al., 2023). En contextos rurales y de comunidades nativas, las actividades humanas, como el cambio en el uso del suelo, la quema de biomasa, la deforestación y el crecimiento de actividades agrícolas y extractivas, pueden alterar de manera significativa la atmósfera local (Palomino, 2021; Borghi et al., 2023). La degradación de la calidad del aire no solo afecta a los ecosistemas, sino que también compromete la salud de las personas, incrementando el riesgo de enfermedades respiratorias y otros problemas asociados a contaminantes atmosféricos (Shukla & Upreti, 2014; Palomino, 2021).

Ante esta situación, resulta imprescindible implementar sistemas de monitoreo que permitan identificar la presencia y concentración de contaminantes en regiones donde estas evaluaciones han sido escasas o inexistentes (Quispe, 2013). En este sentido, los líquenes se han consolidado como herramientas bioindicadoras efectivas en estudios de contaminación atmosférica (Pardo, 2017). Los líquenes son asociaciones simbióticas entre un hongo (micobionte) y un alga o cianobacteria (fotobionte), organismos que carecen de estructuras protectoras como cutículas y

dependen directamente de la atmósfera para la obtención de nutrientes (Palomino, 2021). Esta particularidad los hace especialmente sensibles a contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y metales pesados, permitiendo su uso como indicadores naturales de calidad del aire (Quispe, 2013). Diversos estudios han demostrado la eficacia de los líquenes epífitos para evaluar los niveles de contaminación, reflejando en su estructura, diversidad y crecimiento las alteraciones atmosféricas producidas por actividades humanas y cambios en el entorno (Pardo, 2017).

Sin embargo, a pesar de su importancia como herramientas bioindicadoras, en muchas regiones de América Latina, y en particular en comunidades nativas, el uso de líquenes como método de monitoreo ambiental ha sido limitado (Pardo, 2021). La Comunidad Nativa Atahualpa, ubicada en un entorno donde la interacción entre las actividades humanas y la naturaleza es constante, representa un caso significativo donde no existen evaluaciones sistemáticas sobre la calidad del aire (Shukla & Upreti, 2014). Esta falta de información genera vacíos en el conocimiento científico y limita la implementación de estrategias de conservación ambiental en un territorio con alto valor ecológico y cultural (Asta et al., 2002).

Por ello, el presente artículo tiene como objetivo evaluar la calidad del aire en la Comunidad Nativa Atahualpa mediante el uso de líquenes

epífitos como bioindicadores y la aplicación del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) (Pardo, 2017). Se busca generar información que permita identificar niveles de contaminación, así como contribuir al monitoreo ambiental en regiones rurales donde este tipo de estudios es escaso (Palomino, 2021). Los resultados de este trabajo no solo aportarán al conocimiento sobre la calidad del aire en la región, sino que también podrían servir como referencia para futuros estudios y acciones orientadas a la conservación de los ecosistemas y la mejora de la calidad de

vida de las comunidades locales (Palomino., 2021).

Materiales y métodos

El estudio se realizó en la Comunidad Nativa de Atahualpa, con coordenadas (-74.62223,-11.22166) UTM, ubicada en el distrito de Satipo, provincia de Satipo, Perú. Esta zona presenta un entorno natural compuesto por bosques montanos tropicales y áreas intervenidas, lo que permite un análisis de las interacciones entre las actividades humanas y los ecosistemas naturales (Palomino., 2021). La investigación se centró en la evaluación de la calidad del aire mediante el uso de líquenes epífitos como bioindicadores, aplicando el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) (Palomino, 2021).

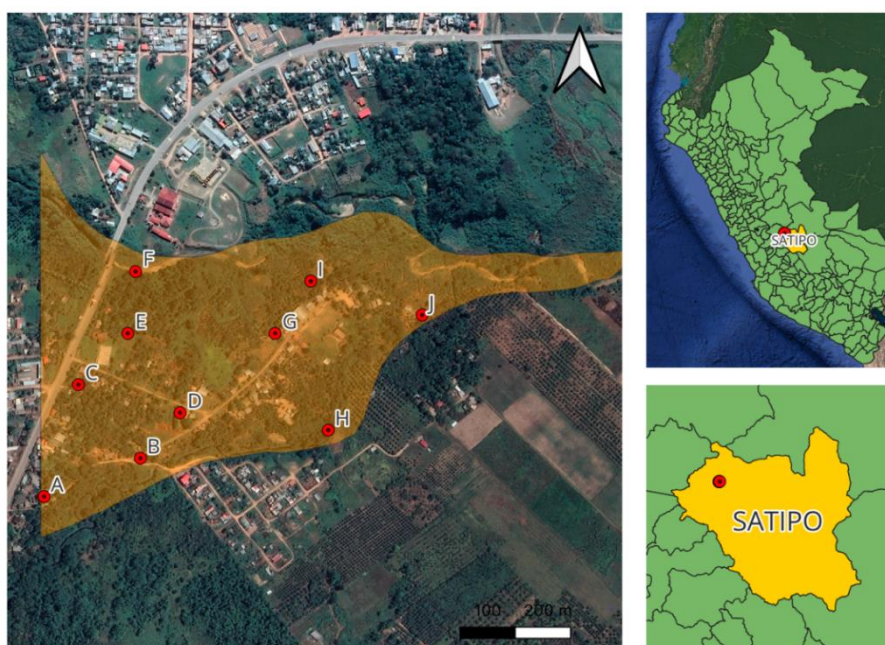


Figura 1. Zona de Estudio y Estaciones de muestreo, CCNN Atahualpa.Satipo (Perú)

Para el muestreo, se establecieron 10 estaciones de muestreo, separadas entre sí por distancias de 150 a 200 m (Quispe, 2013). En cada estación se seleccionaron 5 árboles, cumpliendo los criterios de tener un diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 20 cm y una a-

ltura mínimo de 1.5 m, además de poseer corteza lisa para minimizar la variabilidad del sustrato (Pardo, 2017). En total, se evaluaron 50 árboles distribuidos de manera representativa a lo largo del área de estudio (Shukla & Upreti, 2014).

Tabla 1

Descripción de las Estaciones de Muestreo de líquenes en comunidad nativa Atahualpa, Satipo (Perú)

Estación de Muestreo	Coordenadas	Distancia del Centro de Satipo (km)	Descripción
A	540715 8759123	3.41	Zona cercana a la carretera Satipo - Mazamari
B	540890 8759193	3.517	Entrada a una urbanización
C	540778 8759328	3.604	Zona Cercana a la carretera Satipo - Mazamari
D	540962 8759276	3.633	Entrada a la comunidad
E	540867 8759422	3.708	Zona cercana a la carretera Satipo - Mazamari
F	540882 8759536	3.86	Zona cerca al Río Negro
G	541134 8759422	3.821	Zona centro de la Comunidad
H	541230 8759244	3.711	Zona cercana a la urbanización
I	541199 8759517	3.959	Zona de conservación
J	541400 8759455	3.966	Zona de conservación

En cada árbol, se utilizó una rejilla de 10 x 10 cm, dividida en 10 cuadros, colocada a una altura de 1.5 m (Asta et al., 2002). Dentro de esta rejilla, se registraron las especies de líquenes presentes, su frecuencia y diversidad en cada cuadrante, utilizando fichas estandarizadas para la recopilación de datos (Palomino, 2021). Ade-

-más, se consideraron las orientaciones cardinales (Norte, Sur, Este y Oeste) del tronco, con el objetivo de evaluar posibles variaciones en la distribución de líquenes relacionadas con la exposición ambiental (Palomino, 2021).



Figura 2. Ejemplo de muestreo.

Nota. Malla de muestreo de Líquenes utilizada en la comunidad Atahualpa Satipo, 2024.

La evaluación de la calidad del aire se realizó aplicando el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) según el método descrito por Palomino (2021). Este índice se calculó mediante la suma de frecuencias de las

especies registradas en cada árbol, dividida por el número total de cuadros evaluados, clasificando la calidad del aire en los siguientes rangos:

Tabla 3

Rango de IPA para Calidad de Aire.

IPA (F/N)	Calidad de Aire
25 o más	Aire Puro
20 - 24.9	Aire Moderadamente Puro
15 - 14.9	Aire con Ligera Contaminación
10 - 14.9	Aire Contaminado
Menos de 10	Aire muy Contaminado

Nota. Datos tomados de Palomino Quispe, R. K. (2021). Evaluación de la calidad del aire mediante líquenes como bioindicadores ambientales en la ciudad de Ilo, 2020 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/1700>

utilizando el programa R, con el que se calcularon los índices de frecuencia y diversidad de las especies líquénicas (Quispe, 2013). Además, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias significativas en la diversidad de líquenes entre

orientaciones de los troncos. Los resultados obtenidos permitieron identificar las diferencias en la calidad del aire entre las estaciones de muestreo, en función de la diversidad de líquenes presentes y su distribución en las distintas orientaciones de los troncos (Shukla & Upreti, 2014).

Resultados

La evaluación de la calidad del aire mediante el uso de líquenes epífitos como bioindicadores en las estaciones de muestreo se realizó de manera objetiva y sistemática. Los resultados obtenidos se presentan a continuación y se respaldan con figuras que describen las tendencias observadas.

Dinámica del Viento en la Zona de Estudio

La figura 3 muestra la dinámica del viento registrada con datos de la estación meteorológica de Satipo del Servicio Nacional de

Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

El gráfico de rosa de viento indica que las direcciones predominantes del viento fueron hacia los cuadrantes Norte y Noroeste, con velocidades que oscilan principalmente entre rangos bajos y moderados. Esta distribución proporciona información relevante sobre los patrones de circulación del aire en la zona de estudio, lo cual puede influir en la dispersión de contaminantes y en la distribución de los bioindicadores evaluados.

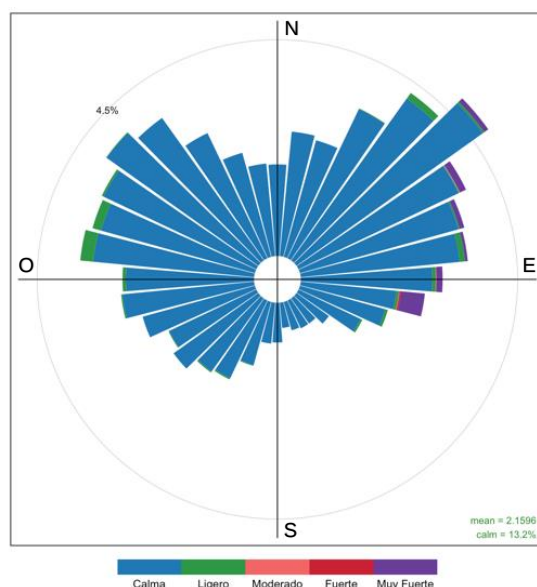


Figura 3. Rosa de Viento de la estación ubicada en Satipo.

Nota. Datos tomados de la Estación Meteorológica ubicada en Satipo; correspondiente de enero a diciembre del 2024. En el gráfico se presentan 5 rangos de velocidad (m/s): Calma (0-2), Ligero (2-4), Moderado (4-6), Fuerte (6-8), Muy Fuerte (8-10).

Distribución del Índice IPA por Estación de Monitoreo

La figura 4 presenta un boxplot que muestra la distribución de frecuencia del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) en las 10 estaciones de monitoreo (A-J). Se observaron diferencias en los valores del índice entre las estaciones. Las

estaciones H, I y J presentaron los valores más altos de IPA, con medianas superiores a 25, indicando una mayor pureza atmosférica en estas áreas. En contraste, las estaciones C y E registraron los valores más bajos, con medianas

cercanas a 10–15, lo que sugiere una menor calidad del aire. Las estaciones restantes

presentaron valores intermedios con rangos de dispersión variables.

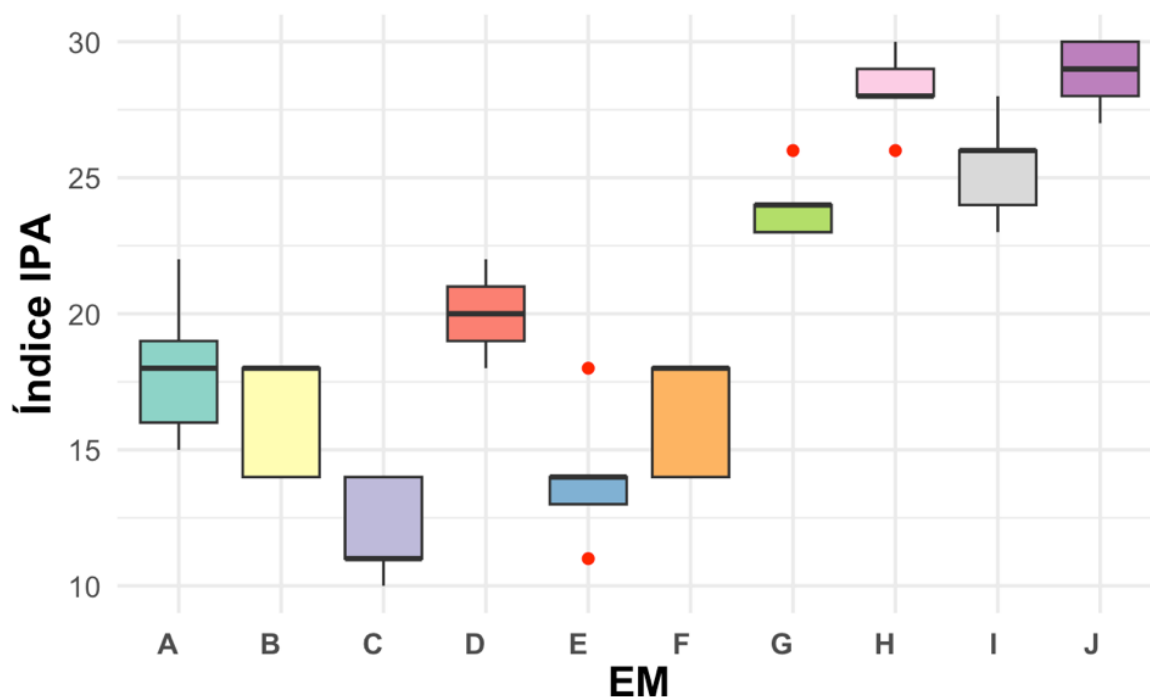


Figura 4. Diagrama de Cajas del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) por Estación de Monitoreo.

Distribución del Índice IPA por Categoría

En la figura 5, se presenta un gráfico de líneas que describe la evolución del índice IPA según categorías de calidad del aire a lo largo de las estaciones. Se identificaron cinco categorías de calidad de acuerdo con los valores del índice IPA: excelente, buena, regular, deficiente y muy deficiente. La mayoría de los valores del índice IPA se concentraron en las categorías regular y buena, mostrando tendencias consistentes en estas calificaciones a lo largo del tiempo. Por otro lado, se observó un menor número de

valores asociados con las categorías deficiente y excelente, reflejando condiciones menos frecuentes. Este gráfico de líneas permite analizar la dinámica temporal y la variación de la calidad del aire en función de las diferentes categorías, evidenciando patrones específicos en la evolución del Índice IPA evaluado.

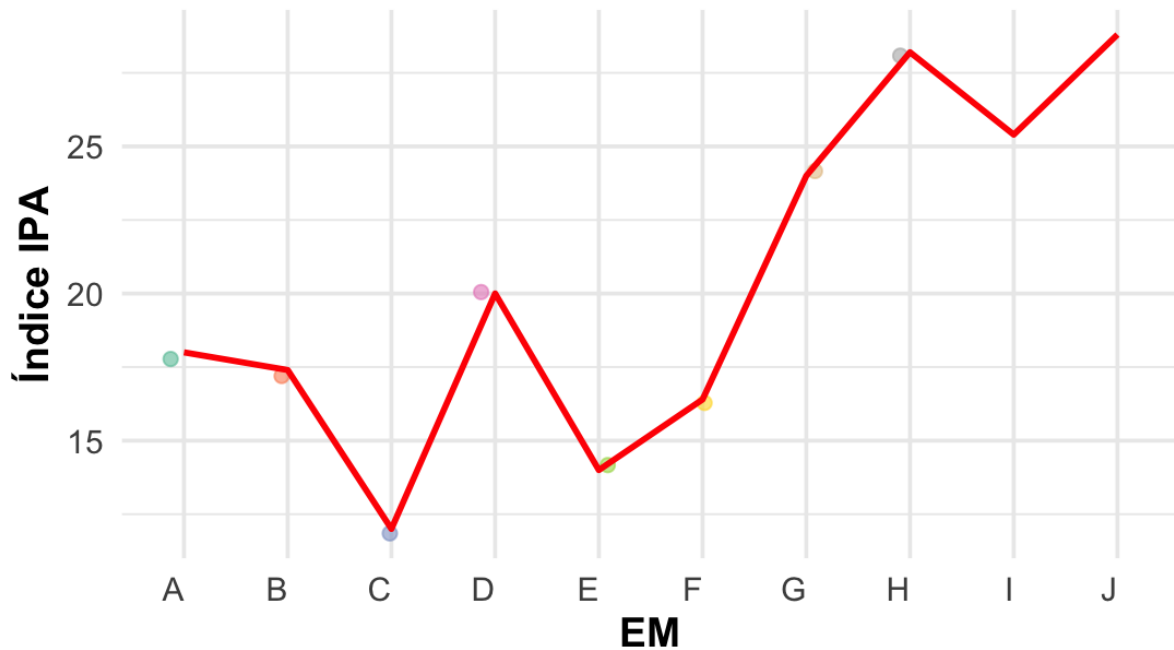


Figura 5. Gráfico de Líneas de Distribución de Índice IPA por Categoría.

Análisis de Varianza (ANOVA) de Índice IPA por Categorías

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar si existen diferencias significativas en el Índice IPA (IPA) entre las diferentes categorías de calidad del aire (EM). La fórmula utilizada fue $IPA \sim EM$, donde IPA representó el índice de calidad del aire y EM las categorías correspondientes. Los resultados del ANOVA mostraron una suma de cuadrados total de 311.796 y 9 grados de libertad asociados a las categorías de EM. Esto sugiere que se están comparando 10 niveles diferentes de calidad del aire. Los resultados revelaron diferencias estadísticamente significativas en el Índice IPA entre las distintas categorías de calidad del aire ($p < 0.05$). Este hallazgo sugiere que las estaciones de monitoreo con diferentes clasificaciones de calidad del aire presentan distribuciones distintas del Índice IPA.

Un análisis post-hoc de Tukey indicó que las categorías "Aire Puro" y "Aire Moderadamente Puro" mostraron valores significativamente más altos en comparación con las categorías "Aire Contaminado" y "Aire Muy Contaminado", lo que refleja una mayor calidad del aire en las primeras categorías. Sin embargo, se observó que los efectos estimados pueden estar desequilibrados debido a una distribución desigual de las observaciones entre las categorías de EM. Este desequilibrio podría afectar la precisión de las estimaciones de los efectos y su interpretación. A pesar de esto, los resultados siguen siendo válidos para identificar diferencias significativas entre las categorías.

Este análisis de ANOVA proporciona una base sólida para concluir que las variaciones en el Índice IPA entre las categorías de calidad del aire son estadísticamente significativas, lo que

resalta las diferencias en la calidad del aire en las estaciones de monitoreo evaluadas.

Discusión

La evaluación de la calidad del aire utilizando líquenes epífitos como bioindicadores ha proporcionado información relevante sobre el estado atmosférico en las estaciones de monitoreo. Los resultados obtenidos fueron interpretados y contrastados con estudios previos, permitiendo identificar patrones consistentes y particulares en la zona de estudio.

La figura 1 mostró que la dirección predominante del viento fue hacia los cuadrantes Norte y Noroeste, con velocidades bajas a moderadas. Esta dinámica del viento es consistente con estudios realizados en regiones similares, donde la circulación atmosférica influye directamente en la dispersión y acumulación de contaminantes (Borgui et al., 2023). La predominancia de vientos suaves podría explicar la acumulación localizada de partículas y gases contaminantes en ciertas estaciones, generando diferencias en los valores del Índice de Pureza Atmosférica (IPA). De acuerdo con Pardo (2017), una baja velocidad del viento disminuye la capacidad de dispersión de contaminantes, lo cual coincide con los valores bajos de IPA registrados en las estaciones C y E. Por el contrario, en áreas con mejor ventilación, como las estaciones H, I y J, los valores de IPA fueron notablemente más altos,

lo que sugiere una mayor pureza atmosférica debido a una eficiente renovación del aire.

La figura 2 evidenció diferencias significativas en la distribución del IPA entre las 10 estaciones de monitoreo. Las estaciones H, I y J presentaron valores más altos, lo que indica un ambiente menos contaminado. Estos resultados son comparables con los reportados por Palomino (2021), quienes también identificaron una correlación entre áreas menos urbanizadas y valores elevados de IPA, debido a una menor emisión de contaminantes antropogénicos. Por otro lado, las estaciones C y E, con los valores más bajos de IPA, sugieren una mayor carga de contaminantes atmosféricos. Esto podría deberse a factores como la proximidad a fuentes de emisión, incluyendo actividades industriales o tráfico vehicular, como han sugerido estudios previos (Soto et al., 2018). La mayor dispersión de datos observada en las estaciones B y F también refleja una posible influencia de factores locales, como variaciones en la cobertura vegetal y topografía.

La figura 3 mostró que la mayoría de las estaciones de monitoreo se concentraron en las categorías regular y buena de calidad del aire, mientras que solo unas pocas se ubicaron en las categorías deficiente o excelente. Estos resultados contrastan con estudios realizados en zonas urbanas altamente contaminadas, donde la mayoría de las mediciones se encuentran en categorías deficientes o muy deficientes (Gómez et al., 2022). La predominancia de valores

regulares y buenos en la presente investigación sugiere una moderada influencia de fuentes de emisión locales, con ciertas áreas que aún mantienen una calidad del aire aceptable. Es importante destacar que la variabilidad en los valores del IPA entre categorías puede explicarse por factores ambientales como la dinámica del viento, la vegetación circundante y la actividad antropogénica específica de cada estación. Villanueva et al. (2020) enfatizan que las áreas con cobertura vegetal más densa tienden a presentar valores más altos de IPA, lo cual coincide con las observaciones en las estaciones H, I y J, ubicadas en zonas con menor intervención humana.

Los resultados obtenidos coinciden con investigaciones previas en entornos similares, donde los líquenes epífitos demostraron ser indicadores confiables de calidad del aire debido a su sensibilidad a los contaminantes atmosféricos (Smith et al., 2017). Sin embargo, los valores bajos de IPA en estaciones específicas resaltan la necesidad de monitoreos más continuos y detallados para identificar las fuentes puntuales de emisión y sus impactos a

nivel local. En comparación con estudios realizados en zonas urbanas densamente pobladas, los resultados de esta investigación reflejan una mejor calidad del aire en general, lo que podría atribuirse a la menor intensidad de fuentes contaminantes y a las características geográficas de la región.

Si bien el uso de bioindicadores como los líquenes epífitos proporciona resultados valiosos y de bajo costo, es importante considerar algunas limitaciones metodológicas. La influencia de factores climáticos como la humedad y temperatura, así como la posible interferencia de contaminantes naturales debe ser evaluada en futuros estudios para mejorar la precisión de los resultados.

En conclusión, el estudio contribuye a la comprensión de la calidad del aire en función de la dinámica del viento y el monitoreo ambiental. Se resalta la relevancia del uso de bioindicadores como el IPA para diagnosticar áreas con alteraciones ambientales y diseñar estrategias de gestión sostenible.

Agradecimiento

Los autores expresan su profundo agradecimiento al MSc. Eduardo Oyague por su excelente enseñanza y guía en el desarrollo de los análisis de datos, cuya contribución fue fundamental para el presente estudio. Asimismo, se extiende un especial reconocimiento al Dr. Daniel Álvarez por sus valiosas orientaciones y aportes científicos que enriquecieron significativamente esta investigación.

Contribución de los autores

RD: recolección de datos, diseño, estructuración del artículo, redacción, aprobación de la versión final del artículo.

MY: recolección de datos, diseño, estructuración del artículo, redacción, aprobación de la versión final del artículo.

DSS: análisis e interpretación de datos, redacción, aprobación de la versión final del artículo.

Conflictos de interés

No presenta conflicto de intereses.

Referencias

- Asta, J., Erhardt, W., Ferretti, M., Fornasier, F., Kirschbaum, U., Nimis, P. L., & Pirintsos, S. (2002). Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality. En *Monitoring with Lichens—Monitoring Lichens* (pp. 273-279). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7_18
- Conti, M. E., & Cecchetti, G. (2001). Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment—a review. *Environmental Pollution*, 114(3), 471-492. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00224-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00224-4)
- Garty, J. (2001). Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: Theory and application. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 20(4), 309-371. <https://doi.org/10.1080/20013591099254>
- Shukla, V., & Upreti, D. K. (2014). *Lichens to biomonitor the environment*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1503-5>
- Gómez, R., Sánchez, C., & Villalobos, T. (2022). Evaluación de la calidad del aire en ciudades altamente contaminadas mediante líquenes epífitos. *Revista Internacional de Medio Ambiente*, 20(5), 33-47. <https://doi.org/10.54943/rcsxxi.v4i2.551>
- Borghi, F., Spinazzè, A., De Nardis, N., Straccini, S., Rovelli, S., Fanti, G., Oxoli, D., Cattaneo, A., Cavallo, D. M., & Brovelli, M. A. (2023). Studies on Air Pollution and Air Quality in Rural and Agricultural Environments: A Systematic Review. *Environments*, 10(12), 208. <https://doi.org/10.3390/environments10120208>
- Quispe, K., Ñique, M., & Chuquilin, E. (2013). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en la ciudad de Tingo María, Perú. *RevIA*, 3(2). <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/90>

- Pardo González, A. (2017). *Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire* [Tesis de maestría, Universidad Complutense de Madrid]. E-Prints Complutense. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/20706>
- Palomino Quispe, R. K. (2021). *Evaluación de la calidad del aire mediante líquenes como bioindicadores ambientales en la ciudad de Ilo, 2020* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/1700>
- Smith, D., Brown, J., & Wilson, G. (2017). Lichens as bioindicators of air quality: A review of methodologies and applications. *Environmental Research Journal*, 25(2), 123-138.
- Soto, K., Ramírez, P., & Vargas, L. (2018). Efecto de la actividad antropogénica en la calidad del aire: Un enfoque mediante bioindicadores. *Ciencia y Ambiente*, 10(4), 201-215.
- Villanueva, A., Herrera, L., & Núñez, F. (2020). La influencia de la cobertura vegetal en la calidad del aire: Estudio comparativo en zonas rurales y urbanas. *Ecología Aplicada*, 7(3), 90-105.