

Distribution and Identification of Heavy Metals in Medicinal Herbs Along a River Channel Using LIBS Spectroscopy

Jimmy Oblitas-Cruz^{1,2} ; Kathia Diaz-Campos¹ ; José Cruz-Oblitas¹ 

^{1,3}Universidad Privada del Norte, Perú, jimmy.oblitas@upn.edu.pe, N00272826@upn.pe

²Universidad Nacional de Cajamarca, Perú

Abstract—This study presents an ecotoxicological assessment of two medicinal plants (*Hypericum aciculare* and *Achyrocline alata*) collected in the upper micro-watershed of the Las Gradas River, located in Chugur, Cajamarca (Perú), using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Plant samples were oven-dried at 70°C, ground, and sieved to produce pellets. These were then analyzed with a LIBS system covering a spectral range from 181 to 1100 nm. The study aimed to identify exogenous contamination using elemental profiles reported by NIST and AndesLIBS software. Mercury (Hg) and lead (Pb) were the target elements. The spectral data were processed using supervised Principal Component Analysis (PCA) for decomposition into principal components. All statistics were performed in R. The results demonstrate that LIBS is a rapid and effective technique for analyzing organic substances, revealing characteristic emission peaks in experimental assays. Furthermore, semi-quantitative analysis confirmed the presence of two heavy metals, mercury (Hg) and lead (Pb). Their distribution varied among sampling sites, possibly due to anthropogenic activities. PCA enabled quick discrimination among samples using fused LIBS data, highlighting this method's potential for future studies. LIBS is a reliable, rapid technique for detecting heavy metal contamination in underexplored species, such as medicinal herbs.

Keywords— LIBS, *Hypericum Aciculare*, *Achyrocline Alata*, heavy metals, contamination

Distribución e identificación de metales pesados en hierbas medicinales en el cauce de un río usando espectroscopía LIBS

Jimmy Oblitas-Cruz^{1,2}; Kathia Diaz-Campos¹; José Cruz-Oblitas¹

^{1,3}Universidad Privada del Norte, Perú, jimmy.oblitas@upn.edu.pe, N00272826@upn.pe

²Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.

Resumen– La presente investigación propone una evaluación ecotoxicológica de dos plantas medicinales (*Hypericum aciculare* y *Achyrocline alata*) en la microcuenca alta del río Las gradas en Chugur – Cajamarca (Perú) usando espectroscopia de ruptura inducida por láser (LIBS). Para ello las muestras se secaron en una estufa a 70°C se molió y se tamizo para generar pastillas a ser medidas en un sistema LIBS que cubre el rango espectral de 181 a 1100 nm. Se pretende buscar contaminación exógena en base los perfiles reportados por NIST y usando el software AndesLibs, los elementos buscados son Mercurio (Hg), Plomo (Pb). Se empleó el método PCA supervisado para analizar la información espectral y descomponerla en componentes principales. El software utilizado para el análisis fue R. Se logro demostrar que la técnicas LIBS puede analizar de manera rápida a sustancias orgánicas, encontrando picos característicos en los ensayos realizados. Asimismo, el análisis elemental semicuantitativo mostro la presencia de dos metales pesados los cuales fueron el mercurio (hg) y el plomo (Pb). La presencia de estos metales no fue la misma en los puntos de muestreo, quizás debido a actividades antropogénicas. Usando PCA se logró una discriminación rápida de las diferentes muestras mediante la fusión sinérgica de LIBS mostrando que esta metodología puede ser útil en estudios posteriores. Finalmente podemos afirmar que LIBS puede ser una técnica fiable y rápida para la detección de posibles contaminaciones por metales pesados en especies poco exploradas como son las hierbas medicinales.

Palabras clave– LIBS, *Hypericum Aciculare*, *Achyrocline Alata*, metales pesados, contaminación

I. INTRODUCCIÓN

Los ríos tienen un impacto significativo en la seguridad ecológica y la salud humana en términos de calidad ambiental y es un como componente importante del ecosistema y transportador crucial de la circulación de materiales, [1]. Ciertos lugares donde se desarrolla minería la cual se desarrolla como una actividad económica crítica en las naciones en desarrollo como es el Perú, pero además representa una grave amenaza para los ecosistemas acuáticos a través de la liberación de metales pesados [2]. La alta concentración de elementos potencialmente tóxicos en el medio ambiente es una preocupación mundial y la geoquímica del suelo se utiliza como herramienta para el monitoreo ambiental [3].

Los metales pesados que existen en varios estados químicos o formas químicas migrarán, se transformarán y acumularán en diferentes medios ambientales, como cuerpos de agua, sedimentos y suelos, después de ingresar al medio ambiente o los ecosistemas [4], estos metales podrían llegar a la flora que crece en las riberas de los ríos, muchas de estas plantas son utilizadas como plantas medicinales.

La medicina tradicional tiende a ser única en comparación con otras, ya que fue la primera en desarrollarse y es una práctica de salud basada en la cultura. Esto implica que el conocimiento sobre los medicamentos se comunicaba oralmente entre diferentes sociedades de diversas culturas [5]. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la medicina tradicional a base de hierbas es una combinación de conocimientos, habilidades y prácticas basadas en creencias, experiencias y teorías propias de diversas culturas, utilizadas en el diagnóstico, la prevención, la mejora y el tratamiento de enfermedades mentales y físicas [6].

El uso de hierbas medicinales tuvo un auge luego de la pandemia de coronavirus, la cual generó que la población cambie de actividades sus hábitos regulares [7], y opte por hábitos que son más tradicionales como es la medicina tradicional a través de hierbas medicinales. Muchas personas en zonas rurales utilizan plantas medicinales para el tratamiento de diversas enfermedades, aunque desconocen la causa científica de su acción.

El Perú cuenta con al menos 3000 especies de plantas medicinales documentadas que son utilizadas como una alternativa para la atención primaria de salud, principalmente en las regiones más pobres como es la región andina [8]. Estudios como el de Zarate [9] midieron las concentraciones de As, Pb y Cd en hojas de las plantas medicinales más consumidas en la sierra central del Perú encontrando valores bajos de metales como Cd y Pb, pero existe más probabilidad de este tipo de contaminación si estamos cerca a zonas mineras. Los metales tóxicos presentes en las hierbas medicinales son potencialmente perjudiciales para quienes las consumen [10].

Los metales pesados como el arsénico (As), el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el mercurio (Hg), el cromo (Cr) y el níquel (Ni) son elementos que se encuentran de forma natural

en la corteza terrestre pero solo trazas de estos metales son esenciales para los procesos biológicos y se vuelven tóxicos cuando sus concentraciones superan los límites umbral, lo que supone un gran desafío para la salud humana y la seguridad alimentaria [11]. Es necesario implementar métodos de ensayo rápido para poder determinar la toxicidad de plantas que puedan estar cerca a estas fuentes de contaminación, el uso de diferentes espectroscopias puede generar soluciones interesantes.

La espectroscopia de ruptura inducida por láser (LIBS) es una técnica emergente de espectroscopia de emisión atómica. En comparación con los métodos de detección tradicionales, la tecnología LIBS ofrece las ventajas de procesar pocas muestras, medir simultáneamente múltiples elementos, un tiempo de detección corto y una alta precisión [12]. En el sistema LIBS, la fuente láser genera pulsos láser con la energía adecuada, dirigidos y enfocados sobre la superficie de la muestra objetivo mediante el reflector y la lente. La sustancia en la superficie de la muestra se ioniza, descompone y evapora instantáneamente para formar una columna de plasma. La señal espectral emitida por el plasma es captada por la sonda de fibra óptica y el espejo de adquisición, y luego se transmite al espectrómetro y al detector a través de la fibra óptica para convertir la señal luminosa en una señal eléctrica y obtener los datos espectrales de cada elemento de la muestra [13].

Aplicaciones reales de la LIBS revela su flexibilidad en diversas aplicaciones, como la monitorización ambiental, la determinación de la calidad de productos alimenticios, plantas medicinales y análisis de nutrientes del suelo, la evaluación de contaminantes del agua, la estimación de la corrosión del hormigón y el estudio de plantas agrícolas[14].

Autores como Sohrab [15] observaron la presencia de metales pesados y oligoelementos en los espectros LIBS de las muestras de hierbas medicinales, los cuales han usado un tipo de análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) para obtener el patrón de clasificación de las muestras según sus huellas espectrales.

Por tal motivo la presente investigación propone una evaluación ecotoxicológica de plantas medicinales en la microcuenca alta del río Las gradas en Chugur – Cajamarca usando espectroscopia de ruptura inducida por láser (LIBS)

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio y selección del sitio

El estudio se llevó a cabo en la microcuenca alta de la zona de Chugur – Cajamarca (Perú), una región con actividad de extracción de oro y plata. Se seleccionaron siete sitios de muestreo a lo largo del curso fluvial denominado “Las Gradas”. Los puntos de muestre se muestran en la figura X:

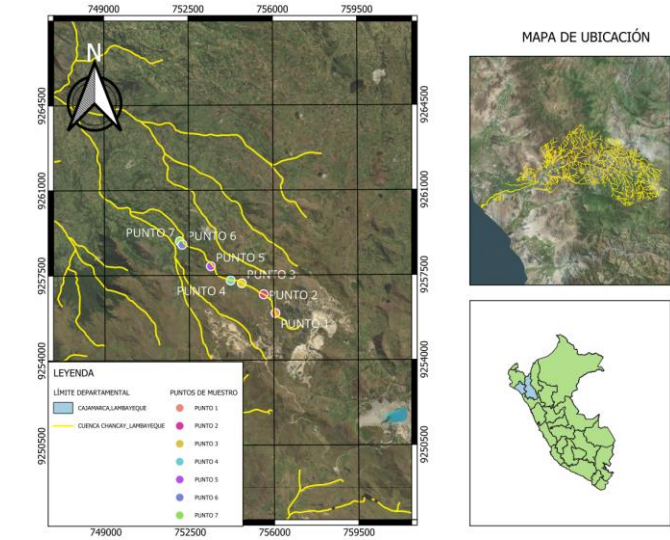


Fig.1 Muestreo de plantas usadas en la medicina tradicional

Las plantas identificadas que tienen uso medicinal se muestran en la Tabla 1, además de ubicar los puntos de recolección.

TABLA I PLANTAS MEDICINALES ESTUDIADAS								
Planta estudiada	Usos medicinales	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
<i>Hypericum aciculare</i>	Se emplea para tratar la inflamación, infecciones bacterianas y virales, quemaduras, úlceras estomacales, depresión leve, heridas y quemaduras, diarrea, dolor, fiebres. [16]	x	x	x	x	x		x
<i>Achyrocline alata</i>	Se ha utilizado tradicionalmente como antiespasmódico y antiinflamatorio [17]				x	x	x	x

Las muestras se secaron en una estufa a 70°C tras lavarlas con agua destilada para eliminar las impurezas superficiales. Tras el secado, cada muestra preparada se molió y se pasó por un tamiz de malla 100. Posteriormente, el polvo se prensó a 20 MPa durante un minuto en una máquina tableteadora.

B. Instrumentación y adquisición espectral

Los experimentos LIBS se realizará con un sistema LIBS-8 (Applied Photonics Ltd., Skipton, Reino Unido), compuesto por un láser Nd:YAG Q-switched de 150 mJ (Nano SG 150-10, Litron lasers Ltd., Rugby, Reino Unido), que opera a una longitud de onda de 1064 nm con una duración de pulso de 5 ns y una frecuencia de repetición de 1 Hz, acoplado a ocho espectrómetros (AvaSpec, Avantes BV, Apeldoorn, Países Bajos) que cubren el rango espectral de 181 a 1100 nm, el esquema de la configuración del equipo se muestra en la figura 2.

Se pretende buscar contaminación exógena en base los perfiles reportados por NIST y usando el software AndesLibs. Los elementos buscados son Mercurio (Hg), Plomo (Pb) y cadmio (Cd).

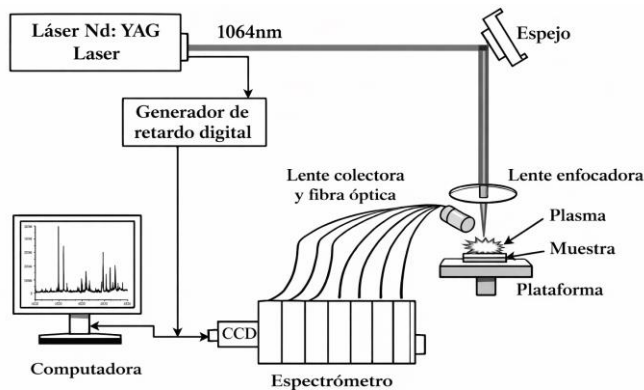


Fig.2 Funcionamiento del equipo LIBS

C. Análisis PCA

El Análisis de componentes principales (PCA) el cual proviene del inglés “Principal Component Analysis” es una técnica utilizada para resumir y visualizar información en conjuntos de datos con múltiples variables interrelacionadas [18]. Permite reducir los datos a través de la creación de componentes principales que capturan la mayor variación en los datos. Los datos fueron suavizados para eliminar el ruido aleatorio, preservando la información útil de los espectros. En este estudio se utilizó el algoritmo Savitzky-Golay. Se empleó el método PCA supervisado para analizar la información espectral y descomponerla en componentes principales. El software utilizado para el análisis fue R.

III. RESULTADOS

A. Análisis de la curva LIBS para *Hypericum aciculare*

La Fig. 3 muestra la curva espectral LIBS promedio de *Hypericum aciculare* medido en el rango de 200–1000 nm. Para poder identificar los 3 metales a examinar que son Mercurio (Hg), Plomo (Pb) y cadmio (Cd), se usó la base de datos del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST-USA).

Tal como se observa existen diversos picos generados en el espectro LIBS, muchos de ellos corresponden K, Na y Ca propios de la composición de las plantas, pero ya que el objetivo es identificar metales pesados solo se muestra los picos que identifican estos metales. Tal como se observa en la Figura 3 la mayor intensidad encontrada está identificada como mercurio y en menor proporción plomo. También se observa en la figura 3 que las intensidades varían siendo el punto 5 el que presenta el valor mayor. Es obvio que siendo la

misma variedad de planta medicinal su composición sea diferente, eso se observa en los diferentes puntos.

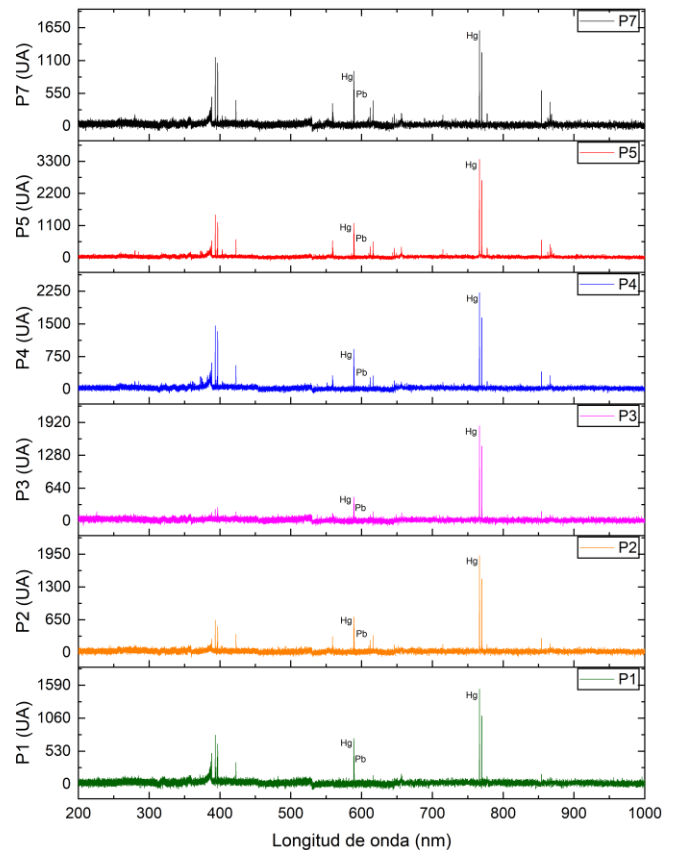


Fig.3 Espectros preprocesados mediante SG + SNV de *Hypericum aciculare*

Con el objetivo de ver si existe diferenciación estadística se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para ver si los diferentes espectros coinciden en el mismo cuadrante. Tal como se observa en la figura 4 los gráficos de puntuación de los dos primeros PC mostraron una dispersión entre los puntos de recolección para *Hypericum aciculare*, lo que nos indica que existe una separación clara. Por lo tanto, se puede inferir que existe diferencias en la composición en base a la ubicación de recolección.

Este tipo de estudios usando PCA para encontrar diferencias han sido reportados en diferentes aplicaciones con sistemas de espectroscopia LIBS, como la investigación en ginseng donde esta técnica multivariada permitió identificar la procedencia geográfica de esta planta en base a las líneas espectrales de emisión elemental, como las que genera el LIBS, que contienen información discriminativa más independiente [19].

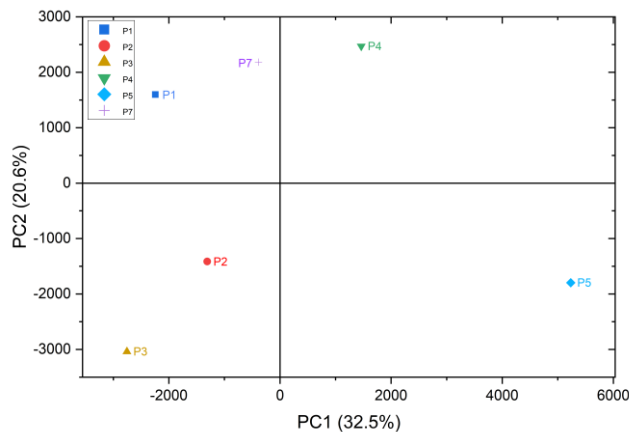


Fig.4 PCA de Espectros LIBS de *Hypericum aciculare*

B. Análisis de la curva LIBS para *Achyrocline alata*

De igual forma se evaluó los picos obtenidos en el LIBS de la planta medicinal *Achyrocline alata*, se encontró picos relacionados a presencia de los metales pesados evaluados, encontrándose mercurio y plomo, tal como se muestra en la figura 5.

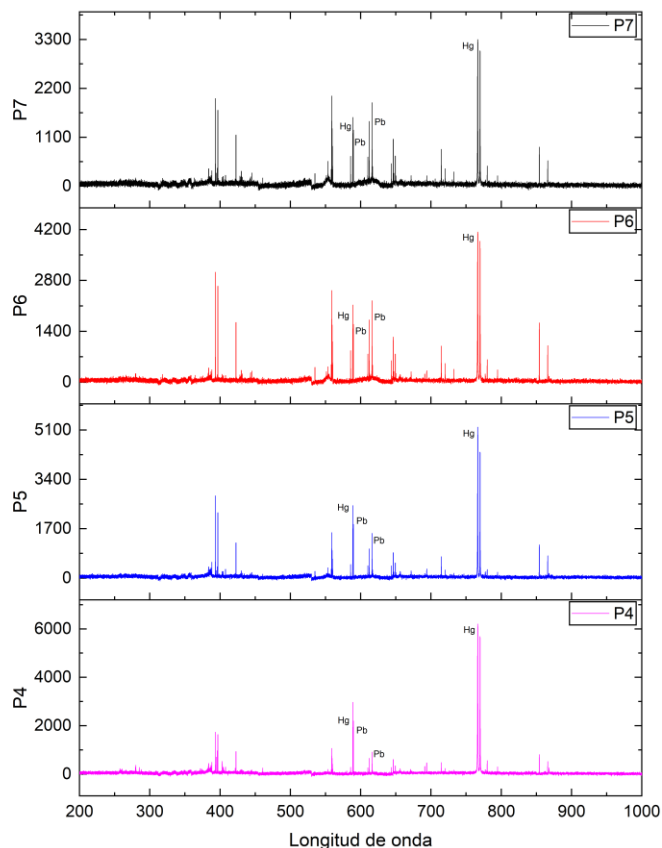


Fig.5 Espectros preprocesados mediante SG + SNV de *Achyrocline alata*

En esta especie de planta medicinal se muestra una mayor cantidad de picos relacionados a estos metales (Hg y Pb) en comparación con *Hypericum aciculare*. Se observa que las diferencias de intensidades son notorias siendo el punto 4 el que muestra los mayores niveles de intensidad para los metales estudiados. Este comportamiento podría relacionarse a una mayor bioacumulación de esta variedad.

La figura 6 muestra los gráficos de puntuación de los dos primeros PC donde se observa una dispersión entre los puntos de recolección para *Achyrocline alata*, lo que nos indica que existe una separación clara. Por lo tanto, se puede inferir que existe diferencias en la composición en base a la ubicación de recolección.

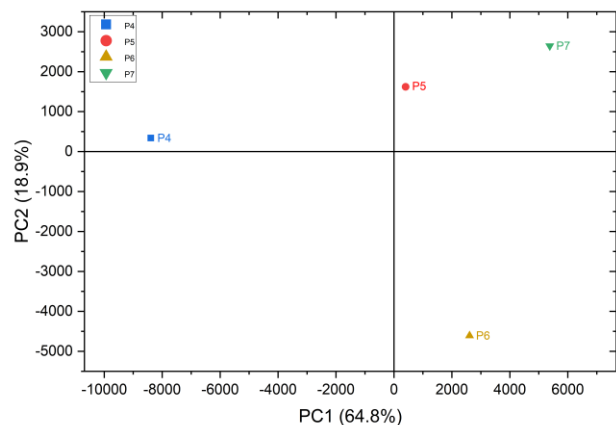


Fig.6 PCA de Espectros LIBS de *Achyrocline alata*

El análisis multivariado mediante PCA evidenció una clara separación entre muestras según su origen geográfico, lo que confirma que los perfiles espectrales contienen información discriminativa suficiente para diferenciar condiciones de crecimiento. Esta separación sugiere que la composición elemental no solo depende de la especie, sino también del entorno, incluyendo propiedades fisicoquímicas del suelo, disponibilidad de metales y posibles fuentes antropogénicas como actividad minera o agrícola.

El uso de plantas medicinales que son parte de la cultura de un país como Perú es bastante amplio, estas plantas son recolectadas directamente y pocas veces son cultivadas con un control adecuado, por lo que tal como menciona Sohrab [20] el papel de los perfiles elementales orgánicos e inorgánicos en el crecimiento, desarrollo y síntesis de metabolitos secundarios de las plantas es crucial, particularmente en lo que respecta a su valor medicinal. La presencia de Hg y Pb en ambas especies representa un hallazgo relevante desde el punto de vista sanitario, considerando que estas plantas son consumidas directamente en forma de infusiones o extractos [21] por lo que están en contacto directo con el consumidor.

La contaminación por metales pesados en las hierbas medicinales es una amenaza para los seres humanos,

especialmente en niveles superiores a las concentraciones umbral conocidas [22]. Las plantas medicinales como las estudiadas que crecen espontáneamente en áreas contaminadas desarrollan gradualmente estrategias de supervivencia distintivas y rasgos funcionales dominantes [24] que las adaptan a su entorno. La absorción de las plantas es una de las principales vías de exposición a los metales pesados en el suelo, y las amplias variaciones en las concentraciones de metales en ambas variedades estudiadas y en los diferentes puntos de muestreo podrían atribuirse a las diferencias en la absorción de metales de las plantas y las capacidades de translocación de cada especie.

La presencia de este tipo de metales en las hierbas medicinales puede deberse a diversos factores como son la fisicoquímicas del suelo siendo de relevancia la capacidad de intercambio de translocación y materia orgánica, las cuales pueden influir en la disponibilidad de metal para las plantas, tal como menciona Filipiak [23] esto puede estar relacionado a la exposición con la contaminación ambiental, incluyendo la invasión industrial, suelo o atmósfera contaminados; nuestra zona de estudio si bien esta libre de actividades extractivas, tiene muy cerca sectores mineros que podrían ser un factor, asimismo hay actividades agrícolas que podrían usar productos químicos que también podrían explicar la presencia de estos metales encontrados en estas hierbas medicinales.

Esto genera la necesidad de un mayor estudio para comprender la interacción de las condiciones ambientales con plantas medicinales que son usadas por la población, cabe resaltar que, si bien este trabajo evaluó 2 variedades, en la misma zona existe por lo menos otras 10 variedades que son usadas como hierbas medicinales. En este contexto, la variabilidad observada resalta la necesidad de establecer sistemas de monitoreo y control de calidad más estrictos para este tipo de recursos naturales.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la espectroscopía LIBS es una técnica eficaz, rápida y no destructiva para el análisis elemental de matrices vegetales, permitiendo la detección semicuantitativa de metales pesados como Hg y Pb en *Hypericum aciculare* y *Achyrocline alata*. Se evidenció una variabilidad significativa en la intensidad de las señales espectrales entre los distintos puntos de muestreo, lo que sugiere una influencia directa de factores ambientales y posibles fuentes antropogénicas en la acumulación de estos elementos. El análisis de componentes principales (PCA) permitió discriminar claramente las muestras según su procedencia, confirmando que la combinación de LIBS con herramientas quimiométricas constituye una estrategia robusta para la diferenciación y caracterización de plantas medicinales en función de su composición elemental. Finalmente, los hallazgos resaltan la importancia de implementar estudios más amplios que incluyan un mayor número de especies y variables ambientales, así como la necesidad de establecer

controles de calidad en plantas medicinales de consumo directo, dado el potencial riesgo asociado a la presencia de metales pesados. En este sentido, LIBS se posiciona como una herramienta prometedora para aplicaciones en monitoreo ambiental.

REFERENCES

- [1] Z. Chen, Y. Zhao, N. Liang, Y. Yao, Y. Zhao, y T. Liu, «Pollution, cumulative ecological risk and source apportionment of heavy metals in water bodies and river sediments near the Luanchuan molybdenum mining area in the Xiaolin Mountains, China», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 205, p. 116621, ago. 2024, doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116621.
- [2] D. T. A. Tapfuma, A. Chakona, y Y. Naik, «Synergistic effects of metal pollution and habitat degradation from artisanal gold mining drive species-specific oxidative stress and biodiversity loss in a semi-arid river catchment», *Environ. Pollut.*, vol. 393, p. 127683, mar. 2026, doi: 10.1016/j.envpol.2026.127683.
- [3] C. A. Vasquez Ugaz, N. León-Roque, J. L. Nuñez-León, D. W. Hidalgo-Chávez, y J. Oblitas, «Geochemical and environmental assessment of potential effects of trace elements in soils, water, and sediments around abandoned mining sites in the northern Iberian Peninsula (NW Spain)», *Heliyon*, vol. 9, n.º 3, p. e14659, mar. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14659.
- [4] T. L. Jolaosho, I. O. Elegbede, P. E. Ndimele, G. O. Mekuleyi, I. O. Oladipupo, y A. A. Mustapha, «Comprehensive geochemical assessment, probable ecological and human health risks of heavy metals in water and sediments from dredged and non-dredged Rivers in Lagos, Nigeria», *J. Hazard. Mater. Adv.*, vol. 12, p. 100379, nov. 2023, doi: 10.1016/j.hazadv.2023.100379.
- [5] N. Y. Yenorkar *et al.*, «Exploration of medicinal plants, their bioactive molecules and formulations from the Vidarbha region of Maharashtra, India in the treatment of inflammatory bowel disease», *Res.*, vol. 5, p. 101356, mar. 2026, doi: 10.1016/j.nexres.2026.101356.
- [6] «Traditional medicine», en *Pharmacognosy*, Academic Press, 2024, pp. 11-28. doi: 10.1016/B978-0-443-18657-8.00037-2.
- [7] J. E. Chire Saire y J. F. Oblitas Cruz, «Study of Coronavirus Impact on Parisian Population from April to June using Twitter and Text Mining Approach», en *2020 International Computer Symposium (ICS)*, dic. 2020, pp. 242-246. doi: 10.1109/ICS51289.2020.00056.
- [8] F. Coroto, O. A. Gamarra Torres, y M. J. Macía, «Different patterns in medicinal plant use along an elevational gradient in northern Peruvian Andes», *J. Ethnopharmacol.*, vol. 239, p. 111924, jul. 2019, doi: 10.1016/j.jep.2019.111924.
- [9] R. H. Zárate-Quinones, M. Custodio, E. Orellana-Mendoza, W. J. Cuadrado-Campó, P. L. Grijalva-Aroni, y R. Peñaloza, «Determination of toxic metals in commonly consumed medicinal plants largely used in Peru by ICP-MS and their impact on human health», *Chem. Data Collect.*, vol. 33, p. 100711, jun. 2021, doi: 10.1016/j.cdc.2021.100711.
- [10] Y. Jiang, J. Kang, Y. Wang, Y. Chen, y R. Li, «Rapid and Sensitive Analysis of Trace Leads in Medicinal Herbs Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy-Laser-Induced Fluorescence (LIBS-LIF)», *Appl. Spectrosc.*, vol. 73, n.º 11, pp. 1284-1291, nov. 2019, doi: 10.1177/0003702819857740.
- [11] S. A. Hasi, S. A. Jyoti, J. C. Joardar, y M. Halder, «Heavy metals in the soil, water, plants, and river sediments of Bangladesh: A synthesis», *Waste Manag. Bull.*, vol. 3, n.º 4, p. 100266, dic. 2025, doi: 10.1016/j.wmb.2025.100266.
- [12] J. Ren, Y. Zhao, y K. Yu, «LIBS in agriculture: A review focusing on revealing nutritional and toxic elements in soil, water, and crops», *Comput. Electron. Agric.*, vol. 197, p. 106986, jun. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.106986.
- [13] R. Zhang, S. Hu, C. Ma, T. Zhang, y H. Li, «Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) in biomedical analysis», *TrAC Trends Anal. Chem.*, vol. 181, p. 117992, dic. 2024, doi: 10.1016/j.trac.2024.117992.

- [14] I. Rehan, M. A. Gondal, y S. Sultana, «Calibration-Free Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (CF-LIBS): Capabilities, Limitations, and Real-World Applications», en *Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Chemometrics, Environmental and Forensic Applications*, V. K. Singh, Ed., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 99-120. doi: 10.1007/978-3-031-90970-2_6.
- [15] S. Sohrab, P. Mishra, V. Dwivedi, P. Veis, A. K. Pathak, y S. K. Mishra, «Elemental analysis and metabolic profiling of medicinally potent members of Zingiberaceae family using FT-IR and LIBS coupled with PLS-DA», *Heliyon*, vol. 10, n.º 13, p. e33395, jul. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e33395.
- [16] J. Calva *et al.*, «Constituents and Selective BuChE Inhibitory Activity of the Essential Oil from Hypericum aciculare Kunth», *Plants*, vol. 12, n.º 14, p. 2621, ene. 2023, doi: 10.3390/plants12142621.
- [17] N. Y. Paniagua-Zambrana, R. W. Bussmann, y C. Romero, «Achyrocline alata (Kunth) DC. Achyrocline bogotensis (Kunth) DC. Achyrocline satureioides (Lam.) DC. Asteraceae», en *Ethnobotany of the Andes*, Springer, Cham, 2020, pp. 117-121. doi: 10.1007/978-3-030-28933-1_7.
- [18] A. Massei, N. Falco, y D. Fissore, «Use of Raman spectroscopy and PCA for quality evaluation and out-of-specification identification in biopharmaceutical products», *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, vol. 200, p. 114342, jul. 2024, doi: 10.1016/j.ejpb.2024.114342.
- [19] T. Zhang *et al.*, «Precise geographical tracing of ginseng using laser-induced breakdown spectroscopy and hyperspectral imaging data fusion in small-sample conditions», *Microchem. J.*, vol. 220, p. 116575, ene. 2026, doi: 10.1016/j.microc.2025.116575.
- [20] S. Sohrab, P. Mishra, V. Dwivedi, P. Veis, A. K. Pathak, y S. K. Mishra, «Elemental analysis and metabolic profiling of medicinally potent members of Zingiberaceae family using FT-IR and LIBS coupled with PLS-DA», *Heliyon*, vol. 10, n.º 13, p. e33395, jul. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e33395.
- [21] R. W. Bussmann y D. Sharon, «Plantas medicinales de los Andes y la Amazonía - La flora mágica y medicinal del Norte del Perú», *Ethnobot. Res. Appl.*, vol. 15, pp. 1-293, 2016.
- [22] L. Luo *et al.*, «Heavy Metal Contaminations in Herbal Medicines: Determination, Comprehensive Risk Assessments, and Solutions», *Front. Pharmacol.*, vol. 11, p. 595335, ene. 2021, doi: 10.3389/fphar.2020.595335.
- [23] A. Filipiak-Szok, M. Kurzawa, y E. Szlyk, «Determination of toxic metals by ICP-MS in Asiatic and European medicinal plants and dietary supplements», *J. Trace Elem. Med. Biol.*, vol. 30, pp. 54-58, abr. 2015, doi: 10.1016/j.jtemb.2014.10.008.
- [24] J. Sulavik, I. Auestad, R. Halvorsen, y K. Rydgren, «Assessing recovery of alpine spoil heaps by vascular plant, bryophyte, and lichen functional traits», *Restor. Ecol.*, vol. 29, n.º 4, p. e13257, 2021, doi: 10.1111/rec.13257.