

Effect of Organic Matter and Lead Concentration on Soil Mycoremediation Using the Fungus *Pleurotus ostreatus* in Pampalca, Huancavelica, Peru

Pizarro Tocto, Nicol Milagros¹ , Valeriano Ballarta, Máxima Lucia² , Ruiz-Huaman, Carmen Milagros³ 
^{1,2,3} Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
u20211c360@upc.edu.pe, u20201f336@upc.edu.pe, pcigcrui@upc.edu.pe

Abstract– Soil contamination by lead (Pb) derived from mining environmental liabilities represents a critical environmental and public health problem in high-Andean regions of Peru. This study evaluated the effect of organic matter content and initial lead concentration on the efficiency of soil mycoremediation using the fungus *Pleurotus ostreatus* under laboratory conditions. Soil samples were collected from the community of Pampalca, Huancavelica, where Pb concentrations exceeded the Peruvian Environmental Quality Standards for agricultural soils. Three initial Pb concentrations (288.73, 370.29 and 546.73 mg/kg) and three proportions of organic substrate inoculated with *P. ostreatus* (5 %, 15 % and 25 %) were tested, using corn cob as a lignocellulosic substrate. Lead concentrations were determined by atomic absorption spectrophotometry, and organic matter content was analyzed using the Walkley–Black method. A two-factor analysis of variance (ANOVA) revealed a statistically significant interaction between lead concentration and organic matter percentage ($p < 0.05$), indicating that both factors significantly influence Pb removal efficiency. The highest lead removal was obtained at an initial concentration of 288.73 mg/kg with 15 % organic matter, achieving a reduction of 104.77 mg/kg. These results demonstrate the potential of *Pleurotus ostreatus* as a sustainable and environmentally viable alternative for the remediation of lead-contaminated soils in mining-impacted high-altitude environments.

Keywords– Mycoremediation, *Pleurotus ostreatus*, lead contamination, organic matter, mining environmental liabilities.

Efecto de la materia orgánica y la concentración de plomo en la micorremediación con el hongo *Pleurotus ostreatus* en suelo de la comunidad de Pampalca, Huancavelica

Pizarro Tocto, Nicol Milagros¹ , Valeriano Ballarta, Máxima Lucia² , Ruiz-Huaman, Carmen Milagros³ 
^{1,2,3} Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
u20211c360@upc.edu.pe, u20201f336@upc.edu.pe, pcigcruir@upc.edu.pe

Resumen– La contaminación de suelos por plomo (Pb) proveniente de pasivos ambientales mineros constituye una problemática ambiental y sanitaria de alta relevancia en regiones altoandinas del Perú. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la materia orgánica y la concentración inicial de plomo en la eficiencia de la micorremediación de suelos contaminados en la comunidad de Pampalca, Huancavelica mediante el hongo *Pleurotus ostreatus*, bajo condiciones controladas de laboratorio. Al recolectar las muestras de la zona de estudio, donde las concentraciones de Pb superan los Estándares de Calidad Ambiental para suelos agrícolas. Se evaluaron tres concentraciones iniciales de plomo (288,73; 370,29 y 546,73 mg/kg) y tres proporciones de materia orgánica inoculada con *P. ostreatus* (5 %, 15 % y 25 %), utilizando coronta de maíz como sustrato lignocelulósico. La concentración de plomo se determinó mediante espectrometría de absorción atómica y el contenido de materia orgánica mediante el método Walkley–Black. El análisis de varianza de dos factores evidenció una interacción estadísticamente significativa entre la concentración de plomo y el porcentaje de materia orgánica ($p < 0,05$), demostrando que ambos factores influyen significativamente en la eficiencia de remoción. La mayor remoción de plomo se obtuvo en el tratamiento con 288,73 mg/kg de Pb y 15 % de materia orgánica, alcanzando una reducción de 104,77 mg/kg. Los resultados confirman el potencial de *Pleurotus ostreatus* como una alternativa sostenible y ambientalmente viable para la remediación de suelos contaminados con plomo en zonas afectadas por la actividad minera.

Palabras claves –Micorremediación, *Pleurotus ostreatus*, contaminación por plomo, materia orgánica y pasivos ambientales mineros

I. INTRODUCCIÓN

Se estima que existen más de 10 millones de sitios contaminados a nivel mundial, de los cuales aproximadamente el 50 % presentan contaminación por metales pesados y metaloides [1]. Esta problemática se origina principalmente en actividades antropogénicas asociadas a la minería, la metalurgia, los procesos industriales y el manejo inadecuado de residuos sólidos [2]. Los metales pesados se caracterizan por su elevada persistencia en el medio ambiente, su propiedad no biodegradable y su capacidad de acumulación, genera procesos de bioacumulación y biomagnificación a lo largo de la cadena trófica, con impactos negativos sobre los ecosistemas y la salud humana [3].

Entre estos contaminantes, el plomo (Pb) es considerado uno de los metales más tóxicos y persistentes en el ambiente. La exposición al plomo se asocia a efectos neurotóxicos severos, especialmente en niños, y se estima que contribuye aproximadamente al 0,6 % de las muertes globales anuales [4].

A nivel edáfico, la presencia de plomo afecta negativamente la calidad del suelo, reduciendo su fertilidad hasta en un 50 %, alterando la microbiota del suelo y disminuyendo la disponibilidad de nutrientes esenciales [5]. Asimismo, en las plantas provocan alteraciones fisiológicas como la inhibición del crecimiento, interferencias en la fotosíntesis y un incremento del estrés oxidativo [6].

Diversos estudios han demostrado que cultivos de importancia alimentaria, como el maíz, el arroz y el trigo, son capaces de absorber y acumular metales pesados presentes en el suelo, lo que representa un riesgo significativo para la seguridad alimentaria y la salud pública [7]. En respuesta a esta problemática, numerosos países han establecido límites máximos permisibles de plomo en suelos agrícolas, los cuales varían generalmente entre 70 y 300 mg/kg, dependiendo del uso del suelo y la normativa vigente [8].

En América Latina, la contaminación por metales pesados se encuentra estrechamente vinculada a la actividad minera, especialmente en países con alta producción de minerales como Perú, Chile y México [10]. En el contexto ambiental peruano, los pasivos mineros constituyen una de las principales fuentes de contaminación de suelos. Para el año 2022, se registraron 6 903 pasivos ambientales mineros, donde predominan metales como el plomo, el arsénico y el cadmio [11]. A nivel regional, el departamento de Huancavelica concentra aproximadamente 754 pasivos ambientales mineros, y se ha reportado la exposición de más de 1 200 personas a metales pesados [12].

Un caso particularmente crítico se presenta en el distrito de San Pedro de Coris, donde se han identificado 80 pasivos ambientales mineros clasificados como de alto riesgo, con concentraciones de plomo que superan los límites establecidos

para suelos agrícolas [13]. En el año 2025, el colapso de un relave minero impactó directamente la producción agrícola y los recursos hídricos locales [14], situación derivó en la declaración de emergencia ambiental en el departamento de Huancavelica [15].

Frente a esta problemática, las tecnologías convencionales de remediación de suelos contaminados con plomo, como la excavación, el confinamiento y la estabilización química, presentan importantes limitaciones, principalmente asociadas a sus elevados costos, que pueden oscilar entre 50 y 500 USD por metro cúbico de suelo tratado, así como a su baja sostenibilidad ambiental [16]. Estas limitaciones se acentúan en zonas altoandinas, donde las condiciones climáticas extremas, como bajas temperaturas, alta humedad y precipitaciones intensas, dificultan su implementación y aumentan los costos operativos [17].

En este contexto, las tecnologías de biorremediación surgen como alternativas sostenibles y ambientalmente compatibles para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados [18]. Dentro de estas, la microrremediación destaca por el uso de hongos capaces de inmovilizar, transformar o eliminar contaminantes, contribuyendo a la restauración de ecosistemas degradados [19]. Los hongos presentan una elevada tolerancia a condiciones ambientales adversas, una alta capacidad de adaptación a climas extremos y una alta afinidad por metales y metaloides, lo que los convierte en organismos idóneos para su aplicación en suelos contaminados [20].

En particular, los hongos de pudrición blanca desempeñan un rol clave en los procesos de microrremediación debido a su capacidad para degradar compuestos lignocelulósicos como la lignina, la hemicelulosa y la celulosa, facilitando la disponibilidad de energía y nutrientes para otros microorganismos del suelo y promoviendo procesos de bioaumentación [21]. Entre las especies más estudiadas se encuentran *Phanerochaete chrysosporium*, *Irpex lacteus*, *Lentinula edodes*, *Bjerkandera adusta*, *Trametes versicolor* y *Pleurotus ostreatus* [22].

El hongo *Pleurotus ostreatus* ha sido ampliamente estudiado tanto por su valor agrícola como por su potencial ambiental. A nivel mundial, constituye el segundo hongo comestible más producido, debido a su alto contenido proteico, su bajo costo de producción y su capacidad para desarrollarse sobre una amplia variedad de sustratos lignocelulósicos [23]. En el ámbito ambiental, investigaciones realizadas en regiones altoandinas de Bolivia, Ecuador, Colombia y México, así como en zonas de elevada altitud en Asia, han demostrado su capacidad para crecer y remover metales pesados en suelos ubicados por encima de los 4 000 m.s.n.m., bajo condiciones de baja temperatura, alta radiación y disponibilidad limitada de nutrientes [24].

Asimismo, la eficiencia de la microrremediación mediante *Pleurotus ostreatus* se encuentra estrechamente influenciada por el contenido y tipo de materia orgánica del suelo, la cual actúa como sustrato y fuente de carbono para el crecimiento fúngico [25]. Estudios previos han demostrado que el uso de residuos vegetales permite alcanzar remociones cercanas al 10 %, mientras que sustratos como la corona de maíz pueden incrementar la eficiencia de remoción hasta valores cercanos al 55 % [26]. En este sentido, la interacción entre la concentración de plomo y la disponibilidad de materia orgánica constituye un factor determinante para optimizar los procesos de microrremediación [27].

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de la materia orgánica y la concentración de plomo en la eficiencia de la microrremediación de suelos contaminados del distrito de la comunidad de Pampalca, Huancavelica mediante el hongo *Pleurotus ostreatus*, bajo condiciones de laboratorio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio

El área de estudio se ubica en la comunidad de Pampalca, distrito de San Pedro de Coris, provincia de Churcampa, departamento de Huancavelica, a una altitud aproximada de 4044 m.s.n.m. Desde el punto de vista climático, la zona se caracteriza por presentar un régimen predominantemente lluvioso, conforme a la clasificación climática propuesta por Thornthwaite [28].

Las precipitaciones y los niveles de humedad relativa alcanzan sus valores máximos durante el periodo comprendido entre los meses de diciembre y marzo. En términos promedio, enero constituye el mes con mayor precipitación, registrándose valores de hasta 204,6 mm, mientras que marzo presenta el mayor nivel de humedad relativa, con un promedio de 67,1 % [29]. En cuanto al régimen térmico, la temperatura máxima media registrada es de 24 °C, mientras que la temperatura mínima media alcanza los 17,8 °C [30].



Fig. 1 Ubicación del área de estudio.

B. Métodos

La identificación de las zonas con evidencia de contaminación de suelos se realizó a partir de pasivos ambientales mineros registrados oficialmente en el Inventario de Pasivos Ambientales del Perú [31]. El área de estudio presenta antecedentes de actividad minera aurífera desarrollada aproximadamente hace 20 años. El muestreo de suelos se realizó en el mes de febrero, correspondiente a la temporada de lluvias, observándose una cobertura vegetal moderada.

El muestreo se llevó a cabo conforme a lo establecido en la Guía para el Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), aplicando un muestreo de identificación orientado a determinar la presencia de plomo y verificar si sus concentraciones superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos.

Se recolectaron muestras representativas destinadas al análisis elemental en el laboratorio, con el objetivo de evaluar el nivel de riesgo asociado a la contaminación por plomo. La georreferenciación del área de estudio se realizó mediante el sistema de coordenadas UTM (datum WGS 84, zona 18L), identificándose cinco puntos de muestreos dispuestos en patrón zigzag, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Guía de Muestreo de Suelos del MINAM (2013).

TABLA 1
PUNTOS DE MUESTREO

Punto de Muestreo	Coordenadas UTM WGS 84 Zona 18L		Altitud (m.s.n.m)
	Norte	Este	
NF	8604122	565459	3236.2
RM	8603311	565624	3639.7
CA-01	8603387	565541	3840.7
CA-02	8603481	565530	3843.1
CA-03	8603578	565536	3839.9

NF: Nivel de Fondo, RM: Relave Minero

En cada punto de muestreo se recolectó 1 kg de suelo, almacenado en bolsas tipo Ziploc de polipropileno. Cada muestra fue rotulada con la fecha, hora y código de ubicación geográfica. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en contenedores y conservadas a 4 °C para preservar sus características hasta llegar a ser transportadas al laboratorio de la UNALM para su análisis.

Preparación del sustrato (coronta de maíz)

El sustrato utilizado fue la corona de maíz, la cual presenta un contenido de materia orgánica del 94,3 % [32]. Este material fue sometido a un proceso de esterilización con el fin de eliminar posibles patógenos, aplicándose una temperatura de 75 ± 5 °C durante 1 hora; posteriormente, se dejó enfriar a temperatura ambiente por un período de 24 horas [33].

Previo a la inoculación del hongo, el sustrato fue tamizado mediante un tamiz de 2 cm, con el fin de garantizar su homogeneidad. La conservación de la estructura de la coronta de maíz favorece la adecuada oxigenación del sustrato y promueve una colonización eficiente y uniforme por parte del hongo *Pleurotus ostreatus*, tal como se ha reportado en estudios previos [34].

Cultivo del sustrato con el micelio

Se inocula 10% de la semilla micelial en 1 kg de sustrato [35]. El material inoculado se almacenó en bolsas de polipropileno, permitiendo la colonización del micelio durante un periodo de 10 a 15 días manteniendo una humedad 67 % y temperatura de 24°C. Para favorecer la oxigenación, se realizaron 2 cortes en la parte superior de cada bolsa [36].

Preparación del suelo y la experimentación

En esta fase experimental se emplearon diferentes proporciones del sustrato previamente colonizado (5 %, 15 % y 25 %) con el hongo *Pleurotus ostreatus*, en combinación con muestras de suelo contaminado que presentaron concentraciones iniciales de plomo de 288,73; 370,29 y 546,29 mg/kg [37]. Previamente a su uso, el suelo contaminado fue tamizado mediante una malla de 2 mm, con el fin de asegurar la homogeneidad del material.

El experimento se desarrolló en macetas de plástico con una capacidad de 0,5 kg, las cuales se distribuyeron en tres tratamientos y un control, cada uno con cuatro repeticiones. Las réplicas fueron identificadas como R0, R1, R2 y R3. Las macetas se regaron de forma diaria durante 30 días, manteniéndose condiciones de humedad y temperatura similares a las registradas en la comunidad de Pampalca, distrito de San Pedro de Coris.

La concentración de Pb en suelo fue determinada por espectrofotometría de absorción atómica, previa digestión ácida (HNO_3/HCl) de muestras secadas y tamizadas (<2 mm). Mientras que el contenido de materia orgánica se evaluó utilizando el método Walkley-Black, basado en la oxidación de material orgánica con la mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfurico, y titulación por retroceso del dicromato con sulfato ferroso de amonio.

Se precisa que las proporciones de 5%, 15% y 25% representan la adición del sustrato lignocelulósico (coronta de maíz inoculada con *P. ostreatus*) en función del peso seco del suelo contaminado. Dado que la coronta de maíz empleada presenta un contenido de materia orgánica (MO) del 94.3% [38], su incorporación actúa como un agente de enmienda orgánica, incrementando la disponibilidad de carbono para el metabolismo fúngico.

TABLA 2
DISEÑO EXPERIMENTAL

MO con inoculo del Hongo <i>Pleurotus ostreatus</i> (%)	Concentración de plomo			
		N (288,73 ppm)	M (370,29 ppm)	L (640,73 ppm)
	5%	N5%	M5%	L5%
	15%	N15%	M15%	L15%
	25%	N25%	M25%	L25%

Prueba de ANOVA

Los resultados de las 48 repeticiones correspondiente a los diferentes tratamientos se emplearon para el análisis estadístico mediante el programa R. Se evaluaron los niveles de plomo con el fin de determinar la efectividad de los tratamientos.

El análisis de varianza (ANOVA) permitió establecer si existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y la variable evaluada.

Prueba de Tukey para comparación de medias

Posteriormente, se aplicó la prueba Tukey luego de realizar el ANOVA, y de haber obtenido un resultado significativo ($p < 0,05$). Identifica las diferencias que se encuentran en dos grupos en específico. Esta prueba permitió identificar qué tratamientos presentaron diferencias significativas entre sí, determinando así el tratamiento más eficiente para la remoción de plomo en el suelo contaminado.

III. RESULTADOS

Medición de las características fisicoquímicas del suelo

Los resultados de las concentraciones de plomo (Pb) en cinco puntos de muestreo ubicados en la comunidad de Pampalca, Huancavelica, evidencian valores que superan ampliamente el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas (70 mg/kg) establecido por el Ministerio del Ambiente [39]. Se incluyó un punto de muestreo de nivel de fondo (NF), con la finalidad de evaluar las condiciones iniciales del suelo; consistió en una muestra compuesta integrada por cinco submuestras recolectadas a aproximadamente un kilómetro del área de estudio, bajo condiciones edáficas similares. La mayor concentración de Pb se registró en el punto CA-03, con 546,73 mg/kg, mientras que la menor concentración se observó en el punto CA-02, con 288,73 mg/kg.

Los valores obtenidos de pH tienden a ser ácidos (4,36 – 5,04), con tendencias hacia un estado básico. El valor de pH del punto de nivel de fondo es de 6,08. La textura del suelo es franco arcilloso en todos los puntos de muestreo (Tabla 3).

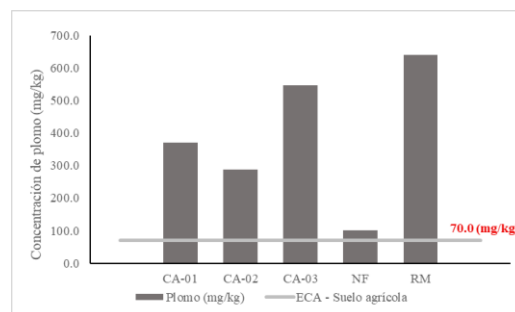


Fig. 2: Concentración de plomo en los puntos de muestreo

Para determinar el comportamiento de los datos, se aplicó la prueba de normalidad de Anderson-Darling, donde la hipótesis nula (H_0) establecía que los datos provenían de una población normal. El resultado obtenido ($p = 0,761$) permitió aceptar H_0 , confirmando que la distribución es normal de los datos.

TABLA 3
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LOS PUNTOS DE
MUESTREO DE SUELO

Parámetros		CA-01	CA-02	CA-03	NF
Plomo (Pb)	ppm	370,3	288,73	546,73	101,04
Potencial de hidrogeno (pH)	(1:1)	4,36	5,04	4,56	6,08
Conductividad eléctrica (1:1)	dS/m	0,11	0,07	0,09	0,25
CaCO ₃	%	0	0	0	0
Materia orgánica	%	10,45	10,30	10,449	6,989
Arena	%	65	73	59	73
Limo	%	25	21	29	19
Arcilla	%	10	6	12	8
Clase Textural		Fr.A.	Fr.A.	Fr.A.	Fr.A.
CIC		30,43	27,7	28,071	21,2
Ca+2		2,884	9,05	3,074	15,29
Mg+2		0,806	1,63	0,9052	3,703
K+	meq/100g	0,276	0,73	0,4911	0,276
Na+		0,009	0,01	0,0087	0,009
Al+3 + H+		3,45	0,35	2,55	0

Posteriormente, se empleó la prueba t de una muestra, considerando como media hipotética el valor de referencia del ECA para suelo agrícola (70 mg/kg). En este caso, la hipótesis nula (H_0) planteaba que la concentración media de plomo era igual a 70 mg/kg, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) indicaba que era mayor. Con un nivel de significancia del 5 %, el análisis evidenció que la concentración media de plomo en los suelos de la comunidad de Pampalca es significativamente superior al ECA para suelo agrícola, dado que el valor de p fue menor a 0,05. En consecuencia, se rechazará la hipótesis nula y se aceptará la hipótesis alternativa.

Porcentajes de remoción de plomo

Tras la aplicación de los tratamientos, se observó remoción de plomo en todos los tratamientos, mientras que el control se mantuvo constante. La mayor remoción de plomo se registró en el tratamiento con 288,73 ppm de plomo y 15% de sustrato inoculado con el hongo *Pleurotus ostreatus*.

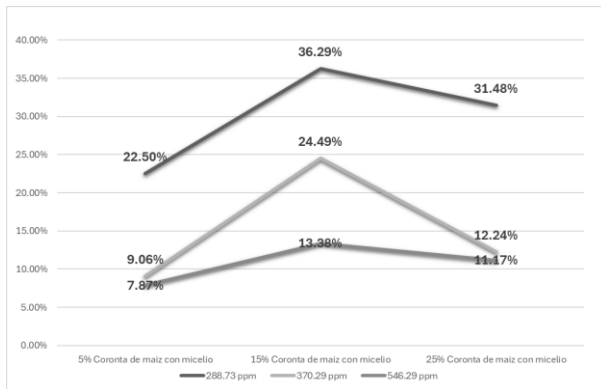


Fig. 3: Porcentajes de remoción de plomo con el hongo *Pleurotus ostreatus*.

Para la validación estadística de los resultados, se aplicaron diversas pruebas. En primer lugar, la prueba de normalidad de Anderson-Darling un valor de $p = 0,06958$ ($> 0,05$), lo que permitió concluir que los datos siguen una distribución normal. Posteriormente, se evaluó el supuesto de homocedasticidad, obteniendo un valor de $p = 0,08711$. Dado que este valor es mayor a 0,05 no se rechazará la hipótesis nula, determinándose que las varianzas son homogéneas.

Y para la prueba de independencia de errores se aplicó la prueba de Durbin Watson, dando como resultado el valor de 2,4983, el cual se encuentra dentro del rango de 1 y 3, por lo tanto, se asume que los errores son independientes. Y con ello se confirma la validez de los resultados estadísticos.

Para el análisis de varianza (ANOVA) de dos factores, se planteó como hipótesis nula (H_0) que no existe interacción entre la concentración de plomo y la cantidad de materia orgánica añadida sobre la capacidad de remoción del hongo *Pleurotus ostreatus*, y como hipótesis alternativa (H_1) si existe interacción entre la concentración de plomo y la cantidad de materia orgánica añadida sobre la capacidad de remoción del hongo *Pleurotus ostreatus*. El valor de p obtenido fue igual a $6,03 \times 10^{-13}$, lo cual resulta menor al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$). En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que si existe interacción entre la concentración de plomo y la cantidad de materia orgánica añadida sobre la capacidad de remoción del hongo *Pleurotus ostreatus*. Asimismo, se analizó la influencia de los factores de concentración de plomo y materia orgánica sobre la capacidad de remoción del hongo

Pleurotus ostreatus. Resultando ambos valores de p menores a 0 por lo tanto a un nivel de significancia del 5% se puede afirmar que los factores de concentración de plomo y materia orgánica si influyen sobre la capacidad de remoción del hongo *Pleurotus ostreatus*.

Asimismo, mediante la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (95 % de confianza), se obtuvo que el tratamiento de 288,73 ppm y 15% de materia orgánica añadida logró la remoción mayor de plomo de 104,77 ppm de Pb, seguido de 288,73 ppm de plomo y 25% de materia orgánica añadida que logró remover 90,89 ppm de plomo en comparación con los demás tratamientos, estos dos tratamientos tuvieron una diferencia significativa de remoción.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los suelos del pasivo ambiental minero de la comunidad de Pampalca, Huancavelica, ubicados a 3580 m.s.n.m., evidencian concentraciones de plomo comprendidas entre 100 y 540 mg/kg, valores que superan ampliamente los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos de uso agrícola (70 mg/kg), establecidos en el Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM. Asimismo, cuatro de las cinco muestras analizadas exceden el límite permisible para suelos residenciales y parques (140 mg/kg), lo que confirma un elevado nivel de contaminación por plomo y un potencial riesgo ambiental y sanitario para la población local, considerando la cercanía de las áreas contaminadas a zonas de uso agrícola y ganadero.

La magnitud de la contaminación registrada es acorde con lo reportado en otros pasivos ambientales mineros ubicados en regiones altoandinas del Perú. En Trujillo, a 3700 m.s.n.m., se han documentado concentraciones de plomo que oscilan entre 1105 y 14 950 mg/kg [40], reflejando una acumulación severa asociada a la actividad minera histórica. De manera similar, en Chugur, Cajamarca (3212 m.s.n.m.), se reportaron valores de hasta 1570 mg/kg en suelos impactados, en contraste con 37,83 mg/kg en suelos no contaminados [41], lo que evidencia la influencia directa de los pasivos mineros en la alteración de la calidad del suelo. En la región Pasco, las concentraciones alcanzaron 834 mg/kg [42], confirmando que la contaminación por plomo constituye una problemática recurrente en zonas altoandinas.

Frente a este escenario, la aplicación del hongo *Pleurotus ostreatus* se plantea como una alternativa biotecnológica sostenible para la remoción de plomo en suelos contaminados. En el presente estudio, se evaluó su desempeño bajo tres niveles de materia orgánica (5 %, 15 % y 25 %), observándose que una mayor disponibilidad de sustrato orgánico favorece significativamente la colonización y el desarrollo del micelio. Este comportamiento puede atribuirse al incremento de la disponibilidad de carbono y nutrientes esenciales que estimulan la actividad metabólica del hongo y la producción

de enzimas extracelulares involucradas en procesos de adsorción y quelación de metales pesados.

El tiempo de incubación de 40 días resultó ser un factor clave en la remoción de plomo, permitiendo una interacción prolongada entre el micelio y la matriz del suelo. Este hallazgo concuerda con estudios previos que reportan reducciones significativas del contenido de plomo recién a partir de los 20 a 28 días de tratamiento [43, 44], mientras que ensayos con periodos de exposición más cortos (15 días) evidencian remociones inferiores al 9 %. La mayor eficiencia observada en periodos prolongados puede explicarse por el incremento progresivo de la biomasa fúngica y la acumulación de compuestos funcionales en la pared celular, tales como grupos carboxilo, fosfato y amino, responsables de la unión del metal.

Sin embargo, se evidencia que las elevadas concentraciones de plomo presentes en el suelo (hasta 600 mg/kg) actúan como efecto inhibidor sobre el desarrollo del micelio, manifestado en una menor tasa de colonización y crecimiento [45]. Este comportamiento es consistente con investigaciones que señalan la toxicidad del plomo sobre los procesos fisiológicos de los hongos, incluyendo las alteraciones de la permeabilidad de la membrana celular y la inhibición de enzimas clave del metabolismo energético [46].

A pesar de estas limitaciones, *Pleurotus ostreatus* demostró tolerancia relativa al metal, lo que refuerza su potencial como organismo remediador en suelos con contaminación moderada a alta.

En conjunto, los resultados confirman la capacidad del hongo *Pleurotus ostreatus* para la remoción de plomo en suelos contaminados por pasivos ambientales mineros, especialmente bajo condiciones controladas de aporte de materia orgánica y tiempos de incubación adecuados. No obstante, la eficiencia del proceso depende de la concentración inicial del metal y de las características fisicoquímicas del suelo, por lo que se recomienda, en estudios futuros, evaluar el desempeño del hongo empleado otros tipos.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la universidad por fomentar la investigación científica y brindar un entorno académico que impulsa el desarrollo de soluciones sostenibles frente a los desafíos ambientales del país.

Expresamos nuestra gratitud a la comunidad de Pampalca por su colaboración, disposición y apoyo durante el trabajo de campo, permitiendo acceder a los sitios de muestreo y compartir su conocimiento sobre la problemática minera.

Asimismo, valoramos el acompañamiento académico y la orientación de nuestros docentes, cuyo compromiso fue esencial para la consolidación de esta investigación. Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a todas las personas e instituciones que, con su tiempo, experiencia y dedicación, contribuyeron a que este estudio se materialice.

REFERENCIAS

- [1] Xu, N., Wei, X., Wang, Y., Dong, J., & Yang, X. (2025). Mechanism of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Enhancing Lead Stress Resistance in Poplar Trees. *Forests*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/f16010082>
- [2] Sánchez-Castro, I., Molina, L., Prieto-Fernández, M. Á., & Segura, A. (2023). Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil - Remediation techniques applied in real soil-contamination events. In *Heliyon* (Vol. 9, Issue 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16692>
- [3] Sánchez-Castro, I., Molina, L., Prieto-Fernández, M. Á., & Segura, A. (2023). Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil - Remediation techniques applied in real soil-contamination events. In *Heliyon* (Vol. 9, Issue 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16692>
- [4] Ministerio de Salud. (2024). Vigilancia epidemiológica de factores de riesgo por exposición a metales pesados y metaloides.
- [5] Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. (2023). Aumento de la contaminación. <https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/t56>.
- [6] McCance KL, Huether SE, Brashers VL, Rote NS. *Pathophysiology: The biologic basis for disease in adults and children*. 8th ed. St. Louis: Elsevier; 2019. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560920>
- [7] Ministerio de Energía y Minas. (2023). Primera Modificación del Plan de Cierre de Pasivos Ambientales Mineros de la ex Unidad Minera "Santa Rosa 2" CGT Company SAC Activos Minero SAC RESUMEN EJECUTIVO RESUMEN EJECUTIVO DE LA MODIFICACIÓN DEL PLAN DE CIERRE DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS GENERADOS POR LA EX UNIDAD MINERA SANTA ROSA 2 CONTENIDO. <https://doi.org/https://extranet.minem.gob.pe/seal>
- [8] Instituto Nacional de Estadística e informática (s/f). Sistema de información Distrital para la gestión pública. <https://estadist.inei.gob.pe/map>
- [9] Zárate-Salazar, J. R., Santos, M. N., Caballero, E. N. M., Martins, O. G., & Herrera, Á. A. P. (2020). Use of lignocellulosic com and rice wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus* Jacq.) cultivation. *SN Applied Sciences*, 2(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03720-z>.
- [10] Dickson, U. J., Coffey, M., Mortimer, R. J. G., Smith, B., Ray, N., & Di Bonito, M. (2020). Investigating the potential of sunflower species, fermented palm wine and *Pleurotus ostreatus* for treatment of petroleum-contaminated soil. *Chemosphere*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124881>
- [11] El-Ramady, H., Abdalla, N., Fawzy, Z., Badgar, K., Llanaj, X., Törös, G., Hajdú, P., Eid, Y., & Prokisch, J. (2022). Green Biotechnology of Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus* L.): A Sustainable Strategy for Myco-Remediation and Bio-Fermentation. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14063667>
- [12] Priyanka, & Dwivedi, S. K. (2023). Fungi mediated detoxification of heavy metals: Insights on mechanisms, influencing factors and recent developments. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 53). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103800>
- [13] Salifu, E., Di Rauso Simeone, G., Russo, G., Rao, M. A., Urciuoli, G., & El Mountassir, G. (2024). Influence of environmental conditions on the growth of *Pleurotus ostreatus* in sand. *Biogeotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100137>
- [14] Briseño-Bugarín, J., Araujo-Padilla, X., Escot-Espinoza, V. M., Cardoso-Ortiz, J., Flores de la Torre, J. A., & López-Luna, A. (2024). Lead (Pb) Pollution in Soil: A Systematic Review and Meta-Analysis of Contamination Grade and Health Risk in Mexico. In *Environments - MDPI* (Vol. 11, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/environments11030043>
- [15] Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. (2023). Aumento de la contaminación. <https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/t56>
- [16] CEPAL. (2023). Cepal analizó los desafíos de la extracción de minerales críticos para la transición energética durante el Foro de los Países de América Latina y el Caribe sobre Desarrollo Sostenible 2023. *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe*. <https://www.cepal.org/es/notas/cepal-analiza-desafios-la-extraccion-minerales-criticos-la-transicion-energetica-durante-foro>

- [17] Chellaiah, E. R. (2018). Cadmium (heavy metals) bioremediation by *Pseudomonas aeruginosa*: a minireview. In *Applied Water Science* (Vol. 8, Issue 6). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0796-5>
- [18] Childebayeva, A., Goodrich, J. M., Chesterman, N., Leon-Velarde, F., Rivera-Ch, M., Kiyamu, M., Brutsaert, T. D., Bigham, A. W., & Dolinoy, D. C. (2021). Blood lead levels in Peruvian adults are associated with proximity to mining and DNA methylation. *Environment International*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106587>
- [19] Chukwu, E. C., & Gulser, C. (2025). Morphological, physiological, and anatomical effects of heavy metals on soil and plant health and possible remediation technologies. In *Soil Security* (Vol. 18). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2025.100178>
- [20] Córdoba-Tovar, L., Marrugo-Madrid, S., Castro, L. P., Tapia-Contreras, E. E., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2025). Exploring the phytoremediation potential of plant species in soils impacted by gold mining in Northern Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35853-8>
- [21] Cruzado-Tafur, E., Torró, L., Bierla, K., Szpunar, J., & Tauler, E. (2021). Heavy metal contents in soils and native flora inventory at mining environmental liabilities in the Peruvian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103107>
- [22] Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM. (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo.
- [23] Díaz, W. (2016). Estrategia de gestión integrada de suelos contaminados en el Perú Integrated management strategy of contaminated soil in Peru (Vol. 19).
- [24] Dickson, U. J., Coffey, M., Mortimer, R. J. G., Smith, B., Ray, N., & Di Bonito, M. (2020a). Investigating the potential of sunflower species, fermented palm wine and *Pleurotus ostreatus* for treatment of petroleum-contaminated soil. *Chemosphere*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124881>
- [25] Dickson, U. J., Coffey, M., Mortimer, R. J. G., Smith, B., Ray, N., & Di Bonito, M. (2020b). Investigating the potential of sunflower species, fermented palm wine and *Pleurotus ostreatus* for treatment of petroleum-contaminated soil. *Chemosphere*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124881>
- [26] El-Ramady, H., Abdalla, N., Fawzy, Z., Badgar, K., Llanaj, X., Törös, G., Hajdú, P., Eid, Y., & Prokisch, J. (2022). Green Biotechnology of Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus* L.): A Sustainable Strategy for Myco-Remediation and Bio-Fermentation. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14063667>
- [27] Walter-Villegas, L., Dávila-Mego, N., Sanchez-Peña, B. M., & Roncal-Rabanal, M. (2022). Phytoremediation capacity of heavy metals in emerging native plant species in mining liabilities of Sinchao-Peru. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 2022-July. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.53>
- [28] Escot-Espinoza, V. M., Rodríguez-Márquez, S., Briseño-Bugarín, J., López-Luna, M. A., & Flores de la Torre, J. A. (2024a). Presence of Potentially Toxic Elements in Historical Mining Areas in the North-Center of Mexico and Possible Bioremediation Strategies. In *Toxics* (Vol. 12, Issue 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/toxics12110813>
- [29] Valera López, A., Castillo Cotrina, D., & Tito Vargas, C. (2023). Rendimiento del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* cultivado en diferentes sustratos a base de residuos agroindustriales de la ciudad de Tacna. *Revista Ciencias Biológicas y Ambientales*, 2(1). <https://doi.org/10.33326/29585309.2023.1.2006>
- [30] Escot-Espinoza, V. M., Rodríguez-Márquez, S., Briseño-Bugarín, J., López-Luna, M. A., & Flores de la Torre, J. A. (2024b). Presence of Potentially Toxic Elements in Historical Mining Areas in the North-Center of Mexico and Possible Bioremediation Strategies. In *Toxics* (Vol. 12, Issue 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/toxics12110813>
- [31] Alasmay, Z. (2025). Lead (Pb) Contamination in Soil and Plants at Military Shooting Ranges and Its Mitigation Strategies: A Comprehensive Review. In *Processes* (Vol. 13, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/pr13020345>
- [32] Fazli, M. M., Soleimani, N., Mehrasbi, M., Darabian, S., Mohammadi, J., & Ramazani, A. (2015). Highly cadmium tolerant fungi: Their tolerance and removal potential. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0176-0>
- [33] Gholami, Z., Rouzbahani, M. M., Payandeh, K., & Sabzalipour, S. (2025). Health risk assessment Pb, as and cr in corn (*Zea mays*) of Behbahan and Dezful from Khuzestan Province, Iran. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89281-w>
- [34] Wolfgang Morche. (2017). *Estudio de Caso de Pasivos Ambientales Mineros en la Región La Libertad/Perú*. <https://minsus.net/mineria-sustentable/wp-content/uploads/2019/12/Estudio-de-Caso-PAM-La-Libertad-Econ.-Min.-Ambiental-2017-BGR-INF.-OFICIAL.pdf>
- [35] Briseño-Bugarín, J., Araujo-Padilla, X., Escot-Espinoza, V. M., Cardoso-Ortiz, J., Flores de la Torre, J. A., & López-Luna, A. (2024). Lead (Pb) Pollution in Soil: A Systematic Review and Meta-Analysis of Contamination Grade and Health Risk in Mexico. In *Environments - MDPI* (Vol. 11, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/environments11030043>
- [36] Xu, N., Wei, X., Wang, Y., Dong, J., & Yang, X. (2025). Mechanism of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Enhancing Lead Stress Resistance in Poplar Trees. *Forests*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/f16010082>
- [37] Yadav, P., Mishra, V., Kumar, T., Rai, A. K., Gaur, A., & Singh, M. P. (2023a). An Approach to Evaluate Pb Tolerance and Its Removal Mechanisms by *Pleurotus opuntiae*. *Journal of Fungi*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/jof9040405>
- [38] Tsogtbaatar, U., Huo, L., Jiao, L., Dalantai, S., An, Y., Batsaikhan, B., Jugnee, U., Natsagdorj, B., Batsaikhan, T., & Munkhchuluun, B. (2025). Ecological risk evaluation of heavy metals based on hyperspectral: a case study of rice paddy soil in Xiangtan County, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13821-0>
- [39] Valera López, A., Castillo Cotrina, D., & Tito Vargas, C. (2023). Rendimiento del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* cultivado en diferentes sustratos a base de residuos agroindustriales de la ciudad de Tacna. *Revista Ciencias Biológicas y Ambientales*, 2(1). <https://doi.org/10.33326/29585309.2023.1.2006>
- [40] Walter-Villegas, L., Dávila-Mego, N., Sanchez-Peña, B. M., & Roncal-Rabanal, M. (2022). Phytoremediation capacity of heavy metals in emerging native plant species in mining liabilities of Sinchao-Peru. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 2022-July. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.53>
- [41] Wang, Y., Wang, X., Lan, W., Wei, Y., Xu, F., & Xu, H. (2021). Impacts and tolerance responses of *Coprinus comatus* and *Pleurotus cornucopiae* on cadmium contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111929>
- [42] Yuan, F., Dai, C., Ying, Y., Wang, D., Yang, X., Du, J., & Yu, W. (2025). Prediction of the settlement of submillimeter microplastic fibers in still water. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103951. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103951>
- [43] Tsogtbaatar, U., Huo, L., Jiao, L., Dalantai, S., An, Y., Batsaikhan, B., Jugnee, U., Natsagdorj, B., Batsaikhan, T., & Munkhchuluun, B. (2025). Ecological risk evaluation of heavy metals based on hyperspectral: a case study of rice paddy soil in Xiangtan County, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13821-0>
- [44] Wang, Y., Yi, B., Sun, X., Yu, L., Wu, L., Liu, W., Wang, D., Li, Y., Jia, R., Yu, H., & Li, X. (2019). Removal and tolerance mechanism of Pb by a filamentous fungus: A case study. In *Chemosphere* (Vol. 225, pp. 200–208). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.027>
- [45] Wang, Y., Wang, X., Lan, W., Wei, Y., Xu, F., & Xu, H. (2021). Impacts and tolerance responses of *Coprinus comatus* and *Pleurotus cornucopiae* on cadmium contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111929>
- [46] Sui, H., Jiang, H., Li, G., Chen, J., Cheng, W., & Chen, H. (2025). Combustion of phytoremediation biomass for recycling utilization: Thermal behavior, kinetic analysis, and release of heavy metal. *Industrial Crops and Products*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121047>