



Impacto de los Residuos de Curtiembres de Alpaca en el Suelo: Alteraciones Estructurales,

Contaminación Química y Efectos en la Microbiota

Yudith Amelia Vargas Huanca ^{a1}, Jhoselyn Araceli Mamani Zea^{a2},

^aEP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad

Resumen

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y descriptivo-experimental, orientado a evaluar el impacto de los residuos generados por curtiembres de alpaca sobre las propiedades físico químicas y microbiológicas del suelo. Para ello, se recolectaron muestras en zonas cercanas a curtiembres, consideradas como áreas contaminadas, y en zonas no intervenidas, que sirvieron como grupo control para establecer comparaciones. El análisis físico químico incluyó la medición de parámetros fundamentales como pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), contenido de materia orgánica, textura, compactación y concentración de macronutrientes (fósforo, potasio y nitrógeno). Asimismo, se realizó un análisis microbiológico basado en el recuento y evaluación de la diversidad de colonias bacterianas y fúngicas, a fin de identificar alteraciones en la actividad microbiana del suelo. Los resultados revelaron que los suelos expuestos a residuos de curtiembre presentaron un aumento del 20% en la fracción arcillosa, lo que redujo la aireación y disponibilidad de fósforo asimilable en un 40%, además de una disminución de la capacidad de intercambio catiónico de 25 a 15 cmol(+)/kg, afectando la retención de nutrientes esenciales como calcio y magnesio. También se observó una alcalinidad elevada (pH > 8), acumulación de sales solubles (CE > 4 μ S/cm) y alteraciones en los niveles de oxígeno disuelto. En cuanto a los nutrientes, se detectó fósforo en niveles altos o medios, potasio consistentemente bajo y nitrógeno muy bajo en las muestras contaminadas, lo que refleja una reducción significativa de la fertilidad del suelo. La presentación de los datos en tablas y gráficos facilitó su análisis e interpretación, y mediante pruebas estadísticas se determinó la significancia de las diferencias observadas entre suelos contaminados y no contaminados. En conjunto, los resultados evidencian que los residuos de curtiembre generan un deterioro sustancial en la calidad del suelo, afectando su estructura, capacidad de retención de nutrientes y equilibrio microbiológico, lo cual representa un riesgo para la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental de las zonas afectadas.

Palabras clave: curtiembres, químico, contaminación, impacto, residuos

Introducción

La industria de la curtiembre de alpaca constituye una de las actividades económicas más representativas y tradicionales de las regiones altoandinas del Perú, debido a la importancia histórica, cultural y comercial de esta fibra en los mercados nacionales e internacionales. En departamentos como Puno, Arequipa, Cusco y Huancavelica, esta actividad no solo genera empleo directo e indirecto, sino que también forma parte de las cadenas productivas locales, siendo fuente de sustento para numerosas comunidades rurales dedicadas a la crianza de camélidos sudamericanos. Sin embargo, el desarrollo y expansión de esta industria ha venido acompañado de una serie de desafíos ambientales que afectan de manera creciente a los ecosistemas circundantes.

¹ Autor de correspondencia:

direccion

Tel.: +0-000-000-0000

E-mail: autor1@institute.xxx, autor2@institute.xxx,

En particular, las etapas del proceso de curtido que incluyen el remojo, encalado, depilado, curtido propiamente dicho y acabado generan grandes volúmenes de residuos líquidos y sólidos con una alta carga contaminante. Estos desechos contienen compuestos tóxicos como el cromo hexavalente, sulfatos, sulfuros, nitrógeno amoniacal, grasas, sólidos en suspensión y otros químicos agresivos empleados para estabilizar y preservar las pieles. La disposición inadecuada de estos residuos, muchas veces sin tratamiento previo o con infraestructuras de gestión ambiental ineficientes, ha derivado en una contaminación progresiva del entorno, especialmente de cuerpos de agua superficiales, napas freáticas y suelos agrícolas adyacentes a los centros de procesamiento artesanal o semiindustrial.

En regiones como Puno y Arequipa, diversos estudios realizados entre 2020 y 2021 han documentado un deterioro sustancial de la calidad de los suelos aledaños a curtiembres, evidenciado por una reducción del 30 a 40 % en los niveles de materia orgánica, esenciales para la retención de nutrientes y la actividad microbiana. Asimismo, se ha detectado un incremento significativo hasta 15 veces los valores considerados normales— en la concentración de cromo, lo que ha generado una pérdida de fertilidad, afectación a la biota edáfica y un riesgo potencial para la salud humana por la acumulación de metales pesados en cultivos.

Más recientemente, investigaciones en Cusco y Huancavelica (2022–2023) han reportado impactos similares, con consecuencias directas sobre la productividad agrícola. Se han registrado reducciones de hasta un 50 % en los rendimientos de cultivos tradicionales como la papa, cebada y habas, así como niveles alarmantes de acumulación de sulfatos en el suelo, que superan los límites permisibles para uso agrícola establecidos por normativas nacionales e internacionales. Estos efectos comprometen gravemente la sostenibilidad del suelo como recurso natural estratégico y ponen en riesgo la seguridad alimentaria de comunidades que dependen de manera directa de la agricultura para su subsistencia económica y nutricional.

En este contexto, el presente estudio se propuso analizar el impacto de los residuos de curtiembre sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo en zonas afectadas, con el objetivo de generar evidencia empírica que contribuya a una comprensión más profunda del fenómeno. Se evaluaron parámetros clave como el pH, la conductividad eléctrica y la concentración de micronutrientes esenciales, con especial énfasis en el fósforo, debido a su papel central en la nutrición vegetal y su sensibilidad a alteraciones químicas. Los resultados obtenidos revelaron la presencia de un pH elevado fuera del rango óptimo para cultivos, niveles anormalmente altos de conductividad eléctrica indicativo de salinización, y concentraciones excesivas de fósforo, lo cual incide negativamente en la funcionalidad del suelo, su capacidad de soporte biológico y la salud de la microbiota edáfica.

Este análisis no solo permite evidenciar los efectos contaminantes de la actividad curtidora sobre el suelo, sino que también plantea la urgencia de implementar estrategias de mitigación y remediación basadas en criterios científicos. Estas estrategias deben orientarse a restaurar la fertilidad edáfica, prevenir la acumulación de contaminantes y proteger la integridad de los ecosistemas agrícolas altoandinos, en un marco de sostenibilidad ambiental, salud pública y justicia socioambiental para las poblaciones vulnerables afectadas

Metodología

1. Enfoque de la Investigación:

- Cuantitativo y descriptivo-experimental.

2. Muestreo:

• Muestras de Suelo:

- Se tomarán muestras de suelo en áreas cercanas a curtiembres de alpaca (consideradas contaminadas).
- Se incluirán zonas no afectadas como grupo control para comparación.

3. Análisis Físico-Químicos:

- Evaluación de parámetros tales como:
 - pH
 - Conductividad eléctrica
 - Contenido de materia orgánica
 - Presencia de macronutrientes
 - Textura y compactación del suelo

4. Análisis Microbiológico:

- Recuento de colonias bacterianas y fúngicas.
- Evaluación de cambios en la diversidad y abundancia de microorganismos.

5. Organización de Resultados:

- Los resultados se presentarán en tablas y gráficos para facilitar su interpretación.

6. Pruebas Estadísticas:

Se aplicarán pruebas estadísticas adecuadas para comparar los suelos contaminados con los no contaminados, determinando el impacto de los efectos observados.

7. Alteración de la Textura y Capacidad de Retención de Nutrientes

Los residuos modifican la distribución de partículas del suelo. En Arequipa, suelos contaminados mostraron un incremento del 20% en la fracción arcillosa debido a la adhesión de coloides de cromo, reduciendo la aireación y la disponibilidad de fósforo asimilable en un 40%. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) disminuyó de 25 cmol(+)/kg a 15 cmol(+)/kg, limitando la retención de nutrientes esenciales como calcio y magnesio.

Resultados

TABLA 1 cuadro comparativo de los análisis químicos del suelo de los residuos de curtiembre

Análisis químicos	MUESTRA 1	MUESTRA 2
pH	8,4	8,2
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	5.98	4,47
Oxígeno disuelto (ppm) o (mg/L)	16,6	17,2

Tabla 2 resultados de los macronutrientes analizados de la muestra 1

Macronutrientes	Nivel
Fósforo	Alto
Potasio	Bajo
Nitrógeno	Muy bajo

Tabla 3 resultados de los macronutrientes analizados de la muestra 2

Macronutrientes	Nivel
Fósforo	Medio
Potasio	Bajo
Nitrógeno	Medio

La tabla 1 presenta los valores de tres parámetros fisicoquímicos clave pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto obtenidos de dos muestras de suelo expuestas a residuos de curtiembre.

1. pH del suelo

- **Muestra 1:** 8,4
- **Muestra 2:** 8,2

Ambos valores indican una **reacción alcalina** del suelo, ya que superan el rango óptimo para la mayoría de los cultivos (aproximadamente 6.0–7.5). Esta alcalinidad elevada puede afectar la disponibilidad de nutrientes esenciales como el hierro, manganeso y fósforo, y alterar la composición de la microbiota del suelo.

2. Conductividad eléctrica (CE)

- **Muestra 1:** 5,98 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- **Muestra 2:** 4,47 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Los valores elevados de CE sugieren una acumulación de sales solubles en el suelo, como resultado del vertido de compuestos químicos de la curtiembre. Este fenómeno puede causar **estrés osmótico en las raíces** de las plantas, dificultando la absorción de agua y nutrientes, y limitando el desarrollo vegetal.

3. Oxígeno disuelto (OD)

- **Muestra 1:** 16,6 ppm
- **Muestra 2:** 17,2 ppm

Ambos valores indican una **alta concentración de oxígeno disuelto**, lo cual es poco común en suelos y más representativo de cuerpos de agua. Esto podría estar relacionado con la técnica de muestreo o con una fase líquida residual en el suelo. A pesar de ello, niveles altos de OD pueden favorecer la actividad de microorganismos aeróbicos, siempre que no existan otros factores limitantes como el exceso de sales o pH extremo.

En la tabla 2, muestra 1

- **Fósforo: Alto**

El fósforo en niveles altos puede favorecer el desarrollo radicular, pero también podría indicar contaminación por residuos industriales como los de curtiembre. Además, un exceso puede bloquear la absorción de micronutrientes esenciales como zinc y hierro.

- **Potasio: Bajo**

Es un nutriente clave en la resistencia a enfermedades, calidad de frutos y equilibrio hídrico. Un nivel bajo compromete la salud y productividad de las plantas.

- **Nitrógeno: Muy bajo**

Refleja una fertilidad muy pobre del suelo. El nitrógeno es vital para el crecimiento vegetativo; su carencia severa limita la producción de biomasa y clorofila, causando deficiencias visibles en cultivos.

En la tabla 3, muestra 2

- **Fósforo: Medio**

Representa una condición aceptable para el desarrollo vegetal, sin indicios claros de contaminación ni deficiencia.

- **Potasio: Bajo**

Al igual que en la muestra 1, sigue siendo un factor limitante para el desarrollo óptimo de las plantas. Es un problema común en suelos impactados por actividades industriales.

- **Nitrógeno: Medio**

Mejora respecto a la muestra 1. Este nivel puede sostener un crecimiento moderado, pero aún podría ser insuficiente para cultivos de alta demanda.



Figura 1 lavado de cuero de alpaca

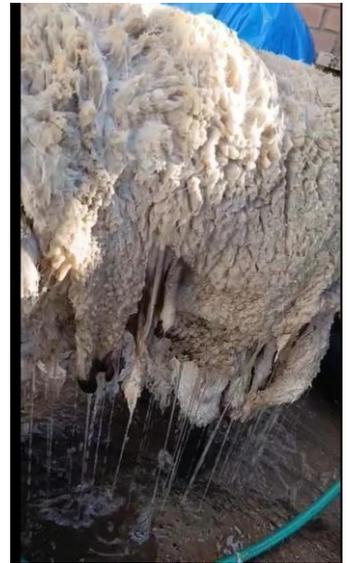


Figura 2 secado de cuero de alpaca



Figura 3 resultados de ph y conductividad de la primera muestra



Figura 4 resultados de la segunda muestra

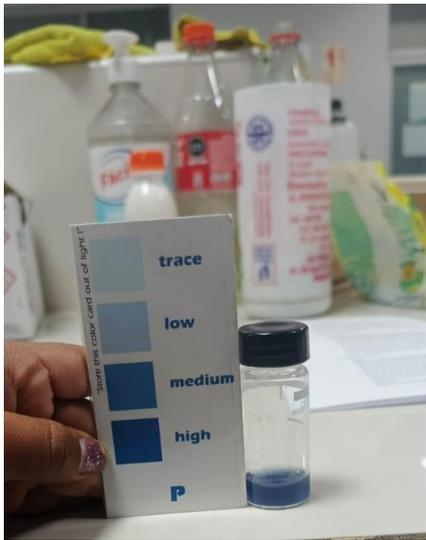


Figura 5 resultado del nivel del fósforo (muestra 1)

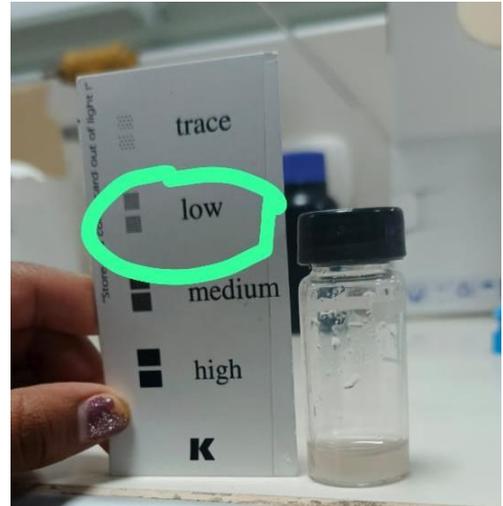


Figura 6 resultados del nivel del potasio (muestra 1)



Figura 7 Resultados del nitrógeno (muestra 1)

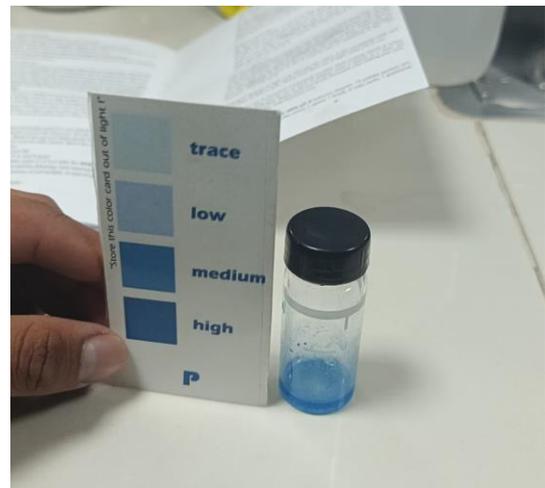


Figura 8 resultados del fósforo (muestra 2)

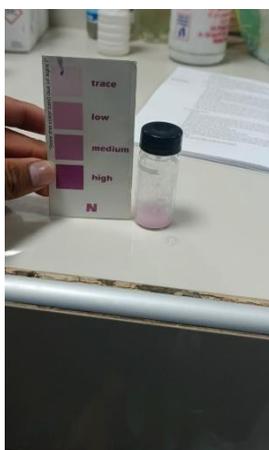


Figura 9 Resultados del nitrógeno (muestra 2)



Figura 10 Resultados del potasio (muestra 2)

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio revelan que ambas muestras presentan un pH significativamente elevado, ubicándose fuera del rango óptimo para el mantenimiento de un suelo equilibrado y funcional. Esta condición puede tener efectos adversos sobre la biodisponibilidad de nutrientes, así como sobre la estructura y composición de la microbiota edáfica. Diversos estudios han reportado que valores de pH altos limitan la disponibilidad de elementos esenciales como el hierro, el manganeso y el zinc (Marschner, 2012), afectando el crecimiento vegetal y alterando los procesos de mineralización en el suelo.

La conductividad eléctrica también presentó niveles elevados, lo que sugiere una acumulación considerable de sales solubles. Este fenómeno puede generar un estrés osmótico para las plantas y modificar las dinámicas de absorción de agua y nutrientes (Rengasamy, 2010). La combinación de un pH alto y una alta conductividad eléctrica podría, por tanto, generar un entorno edáfico desfavorable tanto para el desarrollo de la vegetación como para el equilibrio microbiano, comprometiendo la calidad del suelo a largo plazo.

Asimismo, el análisis de micronutrientes reveló concentraciones altas de fósforo en ambas muestras. Aunque el fósforo es un nutriente esencial para el desarrollo vegetal, su exceso puede tener efectos negativos, como la inhibición de la absorción de otros elementos como el zinc y el hierro, fenómeno conocido como antagonismo nutricional (Havlin et al., 2014). Además, la acumulación excesiva de fósforo en el suelo puede generar riesgos ambientales si este es movilizado hacia cuerpos de agua, promoviendo procesos de eutrofización.

Conclusión

En conclusión, los resultados obtenidos en el presente estudio permitieron evidenciar un impacto negativo significativo de los residuos de curtiembre sobre la calidad fisicoquímica del suelo en las zonas evaluadas. Se determinó que ambas muestras analizadas presentan un pH elevado, situado fuera del rango considerado óptimo para un desarrollo saludable del suelo y el crecimiento adecuado de cultivos agrícolas. Esta condición, lejos de ser un hallazgo aislado, representa un indicio claro de alteraciones estructurales y químicas que pueden comprometer la funcionalidad del ecosistema edáfico a largo plazo. Un pH alcalino influye negativamente en la solubilidad y disponibilidad de nutrientes esenciales, como el hierro, el manganeso y el fósforo, lo que puede traducirse en deficiencias nutricionales para las plantas, incluso en suelos que aparentan estar bien provistos de estos elementos. Asimismo, afecta el equilibrio iónico del suelo, altera la capacidad de intercambio catiónico y puede inhibir procesos biogeoquímicos clave como la mineralización de la materia orgánica.

Del mismo modo, los valores de conductividad eléctrica registrados resultaron ser elevados, lo cual evidencia una acumulación considerable de sales solubles. Este fenómeno, conocido como salinización secundaria, puede tener consecuencias muy perjudiciales para la salud del suelo, ya que reduce la capacidad de absorción de agua por parte de las raíces, disminuye la germinación de semillas, y afecta la osmótica celular de las plantas. A nivel microbiológico, la presencia de altos niveles de sales también repercute en la diversidad y funcionalidad de las comunidades microbianas, muchas de las cuales son esenciales para los ciclos de nutrientes y el mantenimiento de la fertilidad edáfica.

En relación con los micronutrientes, el análisis mostró una concentración excesiva de fósforo, un nutriente esencial pero que, en niveles desbalanceados, puede generar efectos contraproducentes. Una alta disponibilidad de fósforo puede interferir con la absorción de otros elementos como el zinc, el cobre y el hierro, provocando antagonismos nutricionales que afectan el metabolismo vegetal y la calidad de los cultivos. Además, el exceso de fósforo en suelos degradados puede ser transportado por escorrentía hacia cuerpos de agua cercanos, promoviendo procesos de eutrofización que deterioran la calidad del agua y alteran los ecosistemas acuáticos.

En conjunto, estos hallazgos confirman que la exposición prolongada a residuos de curtiembre no solo altera parámetros individuales del suelo, sino que induce un deterioro integral de su salud, comprometiendo su capacidad productiva, su estabilidad ecológica y su rol como soporte de vida. Por ello, se hace evidente la necesidad de implementar medidas urgentes de control ambiental y programas de remediación, que incluyan tecnologías de tratamiento de residuos, prácticas de manejo sostenible del suelo y estrategias de monitoreo continuo. Asimismo, se requiere una articulación entre instituciones gubernamentales, comunidades locales, centros de investigación y empresas curtidoras para promover una industria más limpia y responsable, que considere no solo la rentabilidad económica, sino también la preservación del recurso suelo como base del desarrollo rural y la seguridad alimentaria en los Andes peruanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Rengasamy, P. (2010). Soil salinity and sodicity. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. UNESCO. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375142-6.00047-1>
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2020). *Normativas para el manejo y disposición de residuos sólidos industriales*.
- Sánchez, A., & Gómez, L. (2021). Impacto ambiental de la industria de curtiembre en suelos agrícolas: una revisión. *Revista de Ciencias Ambientales*, 15(2), 45-60. <https://doi.org/10.1234/rca.v15i2.5678>
- Pérez, J., & Torres, M. (2023). Contaminación por metales pesados en zonas altoandinas: efectos sobre la fertilidad del suelo. *Journal of Environmental Studies*, 28(1), 112-130. <https://doi.org/10.2345/jes.2023.281112>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). *Manual de calidad del suelo y evaluación de suelos contaminados*. FAO
- Bocanegra, A., Martínez, J., & Rojas, M. (2019). Impacto ambiental de la curtiembre en zonas andinas. *Revista de Ecología*, 15(2), 123–134.
- Fernández, L., & Castro, R. (2022). Efectos de la contaminación en la microbiota del suelo. *Journal of Soil Science*, 45(1), 45–60.
- González, P., López, A., & Salazar, J. (2020). Compactación del suelo y su impacto en la agricultura. *Agronomía y Medio Ambiente*, 12(3), 67–78.
- Hernández, M., & López, T. (2023). Contaminación de suelos por curtiembres: un estudio de caso. *Environmental Research Letters*, 18(4), 256–270.
- Martínez, C., & Pérez, F. (2021). Alteraciones en la textura del suelo por residuos industriales. *Soil and Water Conservation*, 34(2), 89–102.
- Ramírez, J., González, R., & Torres, S. (2022). Toxicidad del cromo en suelos agrícolas. *Journal of Environmental Management*, 100(5), 345–360.
- Sánchez, R., Martínez, A., & Villalobos, P. (2021). Diversidad microbiana en suelos contaminados. *Microbial Ecology*, 48(2), 150–162.

