ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1107

Evaluation of physicochemical alterations in agricultural soils due to wastewater filtration from the Covicorti WWTP, Trujillo, 2024

Bobadilla Polo,Yenifer Tatiana[1]; Cruz Paredes, Silberio[2]; Davila Villanueva, Ronaldo Jean Pier[3] ;Guzman Cruzado, Snayder Fair[4]; Juárez Rodríguez, Kevin[5]; Tacanga Munarriz, Ariana[6];[1,1]Universidad César Vallejo, Trujillo, ybobadillapo20@ucvvirtual.edu.pe;[1,2]Universidad César Vallejo, Trujillo, Sicruzpa@ucvvirtual.edu.pe;[1,3]Universidad César Vallejo, Trujillo, rodavilavi@ucvvirtual.edu.pe; [1,4]Universidad César Vallejo, Trujillo; snguzmancr@ucvvirtual.edu.pe; [1,5]Universidad César Vallejo, Trujillo; kjuarezr@ucvvirtual.edu.pe; [1,6]Universidad César Vallejo, Trujillo; artacangamu@ucvvirtual.edu.pe

Abstract – This research follows the guidelines of SDG 15 (Sustainable Development Goal 15): Life on Land, contributing to the fight against desertification, drought, and the rehabilitation of degraded lands and soils. The objective was to evaluate the alterations in the physicochemical properties of agricultural soils due to the infiltration and use of wastewater from a wastewater treatment plant (WWTP). For this purpose, 32 soil samples were collected from two different zones: Zone A (agricultural soil affected by wastewater infiltration from the Covicorti WWTP) and Zone B (clean soil with no presence of wastewater located in the Barraza district, Laredo). The calicata technique was used to collect samples at a depth of 30 cm, which were later analyzed in the laboratory to determine various parameters such as density, moisture, pH, electrical conductivity, organic matter, and salinity. The results showed that the soils in Zone A are not suitable for agricultural activities, as they exceed the Maximum Permissible Limits (MPL), while the soils in Zone B exhibit better quality, aligned with reference values.

Evaluación de alteraciones fisicoquímicas en suelos agrícolas por filtración de aguas residuales de una PTAR en Trujillo, 2024

Bobadilla Polo,Yenifer Tatiana[1]; Cruz Paredes, Silberio[2]; Davila Villanueva, Ronaldo Jean Pier[3] ;Guzman Cruzado, Snayder Fair[4]; Juárez Rodríguez, Kevin[5]; Tacanga Munarriz, Ariana[6];[1,1]Universidad César Vallejo, Trujillo, ybobadillapo20@ucvvirtual.edu.pe;[1,2]Universidad César Vallejo, Trujillo, Sicruzpa@ucvvirtual.edu.pe;[1,3]Universidad César Vallejo, Trujillo, rodavilavi@ucvvirtual.edu.pe; [1,4]Universidad César Vallejo, Trujillo; snguzmancr@ucvvirtual.edu.pe; [1,5]Universidad César Vallejo, Trujillo; kjuarezr@ucvvirtual.edu.pe; [1,6]Universidad César Vallejo, Trujillo; artacangamu@ucvvirtual.edu.pe

Resumen– ***Este trabajo de investigación sigue los lineamientos del (ODS 15); tierra y ecosistemas terrestres; sumándose a la lucha contra la desertificación, sequía, la rehabilitación de tierras y suelos degradados. Es así, que se tuvo como objetivo evaluar las alteraciones en las propiedades fisicoquímicas de los suelos agrícolas por la filtración y uso de aguas residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) , para esto se recolectó 32 muestras de suelos en dos diferentes zonas: Zona A (suelo agrícola con filtración y uso de aguas residuales crudas de PTAR Covicorti) y Zona B (suelo agrícola limpio sin presencia de agua residual presente en el distrito de Barraza, Laredo). Para ello se utilizó la técnica de la calicata para el recojo de muestras con una profundidad de 30 cm, que posteriormente fueron analizadas en el laboratorio para determinar los diversos parámetros de: Densidad, humedad, pH, conductividad eléctrica, Materia orgánica y salinidad. Teniendo como resultado que los suelos en Zona A no son aptos para la actividad agrícola excediendo los Límites máximos Permitidos (LMP), mientras los suelos en Zona B, muestran una mejor calidad acorde a los valores referenciales***

Palabras claves: Calicata, residuales, alteraciones, suelo agrícola, parámetros

I. Introducción

A nivel global, la problemática de la degradación de suelos agrícolas por el uso de aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas es una preocupación creciente, especialmente en regiones donde la actividad agrícola depende directamente de la calidad del suelo. En este contexto, esta investigación es importante para poder evidenciar resultados que determinan un problema ambiental generado por el uso directo de aguas residuales de una PTAR en la agricultura; Así mismo, la manera en la que repercute en la calidad del suelos, tener una estimación precisa de los efectos adversos es crucial para exponer y mitigar los posibles problemas a largo plazo, especialmente ahora que se adoptan cada vez más prácticas que incluyen la reutilización de aguas residuales para fines agrícolas. Es así, que esta investigación se enfoca en el ODS N.º 15: que busca la gestión sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad; aportando sustancialmente con la meta 15.3 Conservar, rehabilitar y fomentar el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, administrar los bosques de manera sustentable, combatir la desertificación, frenar y revertir la degradación de los suelos, y mitigar el empobrecimiento de la biodiversidad [1]

En la actualidad, las aguas residuales tratadas se utilizan ampliamente para el riego en muchos países del mundo que sufren escasez de agua dulce [2]. A pesar de que es ilegal en la mayoría de los países, se utilizan aguas residuales sin tratar para el riego agrícola. En los países de bajos ingresos, la reutilización de aguas residuales para la agricultura no está regulada adecuadamente y los desafíos ambientales y económicos son poco reconocidos. Dentro de las limitaciones que presenta esta práctica se tiene que estas aguas presentan un mayor nivel de concentración de sales que terminan acumulándose en el suelo, degradando la textura y la productividad del suelo, afectando de manera directa en las zonas radiculares de plantas, con un movimiento y una fisiología inadecuados del agua [3].

Se han realizado diversos estudios sobre el tema en distintas regiones del mundo, donde se da a conocer mediante la evaluación de la calidad de suelo, la problemática en torno a la práctica de empleo de aguas residuales para riego de suelos agrícolas. identificando impactos en el pH del suelo, la salinidad, la acumulación de nutrientes, la acumulación de metales pesados, la conductividad eléctrica, los cambios en la

estructura y textura del suelo, la relación de adsorción de sodio y los cambios en la comunidad microbiana [4]

Entre los cuales se tienen a trabajos como el de García en el 2020 que evaluó el uso de aguas residuales para riego de cultivos agrícolas en la ciudad de Torreón Coahuila, México, con el propósito de demostrar sus efectos en las propiedades fisicoquímicas del suelo, para ello, tomaron cuatro muestras de suelo agrícola en zig-zag con una distancia de 50 m entre ellas y una profundidad de 30 cm hasta 60 cm. Considerando la NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana, 2002). Obteniendo valores en Materia Orgánica (2.40%), pH (7.92), densidad (7.21). Con estos valores concluyen que el uso de aguas residuales crudas incrementa significativamente estos parámetros en el suelo [5]

Además, se tiene el estudio de "Ref. [6]"en El-Fayoum, Egipto, demostrando que el riego prolongado (30 años) con aguas residuales urbanas y agrícolas incrementa la concentración de metales pesados en suelos, aunque la mayoría se mantuvo bajo los LMP, excepto el Cd en agua. Los suelos arcillosos mostraron mayor retención de contaminantes que los arenosos. Si bien se observaron beneficios como aumento de materia orgánica y nutrientes, el estudio advirtió sobre riesgos de salinización y degradación progresiva del suelo.

Por otro lado, en el estado de Falcón, Venezuela, el uso prolongado de aguas residuales para el riego demostró mejorar la fertilidad del suelo, incrementando los niveles de materia orgánica, fósforo, potasio y magnesio. No obstante, esta práctica también presenta un riesgo significativo para la salud, debido al aumento de los contenidos de cadmio y plomo, dos metales pesados tóxicos, en los suelos de las áreas de riego. La posible contaminación de los cultivos con estos metales puede tener consecuencias negativas para la salud humana y el ambiente, lo que plantea un dilema sobre la sostenibilidad de esta práctica a largo plazo, [7]

En una investigación sobre el impacto ambiental provocado en la PTAR el Tambo" revela una preocupante situación, donde solo el 53% de las cabeceras municipales cuentan con sistemas operativos de tratamiento de aguas residuales y la mayoría de las áreas urbanas carecen de infraestructura adecuada, lo que incrementa la contaminación del agua y suelos debido al vertimiento de aguas residuales industriales y domésticas. mostrando deficiencias en la construcción falta de mantenimiento e incumplimientos normativos impactando en la biodiversidad acuática, la calidad del suelo y los cultivos.

Asimismo, en Perú, en la región de Cajamarca, una investigación encontró en muestras de suelo valores que exceden los niveles permisibles de componentes químicos clave, incluidos pH, fósforo, potasio y materia orgánica, según lo establecido por la [8]. La alta alcalinidad y salinidad, presente afectaron negativamente el crecimiento de las plantas y la salud general del suelo. Por lo que, se subraya la necesidad de mejorar las prácticas de gestión de aguas residuales para mitigar los efectos adversos sobre los suelos agrícolas [9].

Por otro lado, es importante reconocer que el uso de aguas residuales en la agricultura puede tener tanto beneficios como efectos negativos para la salud de los ecosistemas agrícolas, llegando a impactar negativamente el crecimiento de las plantas, la fotosíntesis y la calidad de los cultivos. Por ejemplo, aguas residuales con solo un tratamiento secundario tienen un efecto negativo en la seguridad de los cultivos frutales en comparación con las aguas residuales tratadas a nivel terciario [10]

El riego de manera directa con aguas residuales crudas puede alterar las propiedades físicas del suelo, como la conductividad hidráulica y la agregación del suelo, afectando la retención y el movimiento del agua dentro del perfil del suelo, lo que podría provocar una reducción de la calidad y la productividad del suelo [11]. El riego con aguas residuales puede aumentar la salinidad del suelo, lo que puede afectar negativamente la estructura del suelo y limitar a largo plazo las actividades agrícolas [12].

En vista de la información consultada, esta investigación buscó evaluar qué efecto tiene la filtración de aguas residuales de la PTAR Covicorti en las propiedades fisicoquímicas de suelos agrícolas, para lo cual se organizó un plan de monitoreo de suelos agrícolas, seguido de la determinación en laboratorio de parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo agrícola regado con aguas residuales de una PTAR y un suelo agrícola de referencia no expuesto a aguas residuales. Finalmente, los valores obtenidos se compararon con la normativa NOM-021-RECNAT-2000- México para la producción agrícola.[13]

Por otro lado, los parámetros físico químicos que permiten la valoración de la calidad de suelo y determinar la capacidad de éste para sustentar la vida vegetal y animal manteniendo el equilibrio ecológico, son la textura, densidad, porosidad, pH, conductividad eléctrica, salinidad. [14].

II. Material y método

Para evaluar la calidad del suelo en ambas zonas de estudio se recolectaron 16 muestras de suelo de peso aprox. 500g en bolsas de polietileno, las coordenadas de la zona de muestreo fueron 17S 713241.48 9100981.81 1N Panamericana Norte Fundo San Pedro / Víctor Larco Trujillo La Libertad Perú. Como también se recolectaron 16 muestras de suelo no afectadas por las aguas residuales de la PTAR con un peso de 500 gramos por muestra en bolsas de polietileno, las coordenadas de la zona son 17 S 722067.71 – 9102064.43, ubicadas en el pueblo de Barraza, distrito de Laredo, Trujillo, región la Libertad, Perú.

Las muestras fueron analizadas 24 horas después de su recolección, por lo que se preservaron en refrigeración a (4C°), manteniéndose la cadena de custodia. Según el [17]

Las muestras recolectadas se analizaron utilizando las metodologías propuestas por el "Manual para análisis de suelos agrícolas y agua para riego, proporcionado por el Ministerio de

Desarrollo Agrario y Riego/ Perú", considerando los parámetros de pH, conductividad eléctrica (CE), salinidad (Sa), materia orgánica (MO), humedad y densidad.

Para medir el pH del suelo, se tomó una muestra representativa que se mezcló con agua destilada en una proporción estándar (suelo:agua). Esta mezcla se agitó durante 30 minutos permitiendo que los componentes del suelo se disuelvan adecuadamente. Posteriormente, el pH se midió con pH-metro marca HANNA modelo HI8424, según lo describe [18].

Para determinar la CE, se preparó una solución saturada del suelo con agua destilada y se midió en la mezcla utilizando un medidor de conductividad marca HANNA, modelo HI 8633. permitiendo tener una lectura de la capacidad de la solución para conducir electricidad, lo cual se relaciona directamente con la concentración de iones disueltos en el agua, expresando los valores en decisiemens por metro (dS/m). Este análisis es vital para determinar estimar si el suelo presenta niveles de salinidad que podrían ser perjudiciales para las plantas [19].

Por otro lado, para la medición de la MO se utilizó la metodología descrita por EEA Donoso. Iniciando con el pesaje de una muestra representativa del suelo, generalmente de un gramo, sin embargo, se debe considerar que una coloración oscura en el suelo evidencia un alto contenido orgánico, siendo necesario reducir la cantidad de muestra a entre 0.25 y 0.5 g para evitar que la reacción sea demasiado intensa. Esta muestra se coloca en un matraz de 125 mL y se lleva a una campana extractora para asegurar que los vapores peligrosos no se liberen al ambiente. A continuación, se adicionan 10 mL de una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N. y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). Es importante tener mucho cuidado al manipular el ácido sulfúrico, ya que produce una reacción exotérmica. Esta mezcla se agita manualmente para asegurar que el suelo y los reactivos se mezclen bien. Durante este proceso se genera un color característico que indica que la oxidación de la materia orgánica. Después de la agitación, se deja reposar la mezcla durante aproximadamente una hora para que la reacción se complete. Una vez transcurrido este tiempo, se agrega alrededor de 30 mL de agua destilada para diluir la solución y enfriar el extracto resultante. Luego, se toma una alícuota de 20 mL del extracto y se le adiciona 0.5 mL de indicador difenilamina sulfúrica, que facilita la titulación. Para determinar la cantidad de MO, se titula la muestra con una solución estándar de sulfato ferroso amoniacal (Fe^{2+}), agregándola lentamente hasta que el color de la mezcla vire de verde tenue a oscuro o intenso. Este cambio de color indica el punto final de la titulación. Finalmente, se registra el volumen de sulfato ferroso utilizado. A partir de esta medición, se puede calcular la cantidad de MO en la muestra de suelo, utilizando la relación química entre los reactivos y considerando el volumen de titulación [20].

Asimismo, para la medición del contenido de humedad se utilizó la metodología proporcionada por la NOM-021-RECNAT-2000 [AS-05]. Se inicia con el secado de los vasos de precipitación colocándolos en una estufa a 105 °C durante un periodo de ocho horas. Luego de este tiempo, se registran los pesos de los vasos y, si es necesario, se vuelven a introducir en la estufa hasta alcanzar un peso constante. Una vez obtenidos estos pesos, los vasos se retiran cuidadosamente de la estufa y se colocan en un desecador para su enfriamiento.

Cuando los vasos están fríos, se extraen del desecador utilizando pinzas y se pesan completamente, incluidas las tapas, para determinar el peso vacío de cada vaso. Seguidamente, se toma una muestra de suelo de aproximadamente 30-50 gramos y se coloca en el vaso de precipitación. Posteriormente, se pesa el vaso conteniendo el suelo húmedo, registrando este peso como el peso del vaso más el peso del suelo húmedo (PC+Wsh). El vaso, junto con su contenido, se introduce nuevamente en la estufa, colocando la tapa en la parte inferior, y se somete a una temperatura de 105 °C durante 24 horas garantizando un peso constante. Una vez transcurrido este tiempo, se retira el vaso de la estufa y se coloca en el desecador para que se enfríe completamente antes de ser pesado nuevamente. Este peso corresponde al peso del vaso más el peso del suelo seco (PC+Wss) [18]. Posteriormente, se emplea para el cálculo la fórmula 1.

$$Humedad\ (\%) = \frac{(PC + Wsh) - (PC + Wss)}{(PC + Wss) - PC} \times 100\% \qquad (1)$$

Finalmente, para la medición de densidad se utilizó la metodología NOM-021-RECNAT-2000 [AS-03]. Se inició con la selección de entre dos y tres terrones representativos del suelo y se colocaron en una estufa a 105 °C, manteniéndolos allí hasta alcanzar un peso constante, asegurándose de eliminar cualquier rastro de humedad. Una vez secos, uno de los terrones se ata firmemente con hilo de algodón, dejando el otro extremo del hilo en forma de lazo para sujetarlo al brazo del platillo de una balanza. El terrón seco se pesa al aire, registrando su peso inicial. A continuación, se derrite parafina a 60 °C y se sumerge el terrón en la parafina derretida hasta que quede cubierto por una capa delgada y uniforme. Una vez enfriado, se realiza un nuevo pesaje para registrar el peso del terrón con la capa de parafina. Finalmente, se pesa el terrón recubierto de parafina mientras está completamente sumergido en agua. Para ello, se coloca un recipiente con agua en la balanza, asegurándose de que el terrón no toque las paredes ni el fondo del recipiente. El peso sumergido se registra cuidadosamente. Con estos datos, es posible calcular la densidad del terrón de suelo, siguiendo las fórmulas correspondientes, obteniendo así resultados precisos conforme a la normativa establecida [18].

Una vez obtenidos los datos de las mediciones de laboratorio, se realizó un análisis de estos incluyendo un enfoque descriptivo e inferencial. En la etapa descriptiva, se obtuvieron medidas de tendencia central y de dispersión que permitieron identificar tendencias y diferencias preliminares entre ambos tipos de suelos (suelos afectados por aguas residuales y suelos libres de contaminación). Asimismo, se realizó el análisis inferencial, mediante la prueba de no paramétrica U de Mann-Whitney, adecuada para comparar dos

grupos independientes sin requerir normalidad en los datos, a un nivel de confianza del 95%. El software estadístico empleado fue IBM SPSS Statistics, versión 27. Este último análisis se realizó con la finalidad de obtener evidencia de la afectación generada por el empleo de aguas residuales para el riego de suelos agrícolas.

III. Resultados

3.1 Zonas elegidas para el muestreo.

Para la realización de este estudio se consideró recoger muestras de suelo agrícola de dos zonas diferentes; teniendo un suelo agrícola de referencia, el cual es regado constantemente con aguas limpias provenientes del proyecto especial CHAVIMOCHIC. Por otro lado, se colecto muestras de suelo agrícola influenciado por las aguas de una planta de tratamiento para aguas residuales municipales, que por su antigüedad presenta infiltraciones de estas aguas a los campos de cultivo aledaños, las cuales son desviadas por los mismos agricultores locales para el riego de sus cultivos. La ubicación del área monitoreada, así como los resultados de los análisis realizados a los dos diferentes suelos se presentan en las siguientes figuras y tablas.

En las figuras 1 y 2 tomadas de Google Earth se muestra las dos zonas en las que se realizó la toma de muestras.

Fig.1 Suelo agrícola de la PTAR Covicorti /Google Earth.

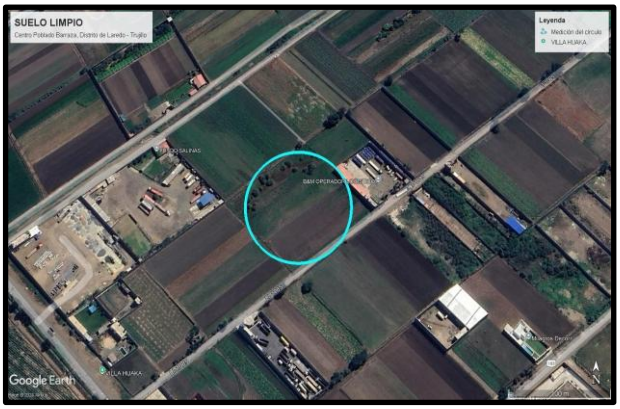

Fig. 2. Suelo agrícola Pueblo Barraza / Google Earth.

3.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos.

En la figura 3 se muestra la comparación de los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos del análisis de las muestras de suelos de ambas zonas. La zona 1 que comprende los suelos regados con aguas proporcionadas por el proyecto especial CHAVIMOCHIC presentan los valores mas bajos en salinidad y conductividad frente a los suelos de la zona 2 que son regados con las aguas sin tratar de la PTAR. De manera general en los seis parámetros evaluados los suelos de la zona 2 presentan los valores más elevados.

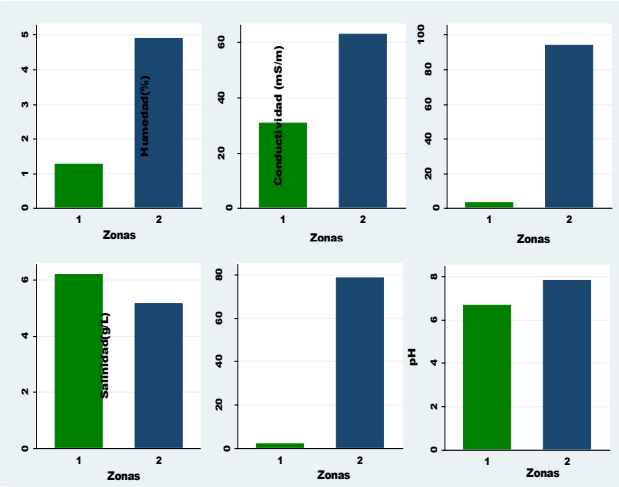

Fig. 3. Comparación de las medias de parámetros fisicoquímicos analizados en muestras de suelo de ambas zonas de estudio.

3.3 Comparación de los resultados fisicoquímicos con la norma NOM-021- RECNAT-2000 - MÉXICO.

TABLA 1.
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS OBTENIDOS DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS REGADOS CON AGUAS RESIDUALES DE PTAR-COVICORTI VS. NORMATIVA NOM-021-RECNAT-2000 - MÉXICO.

Parámetros del suelo		NOM-RECNAT para suelo agrícola	Observación
Físicos			
D (g/ml)	4.96	Arenoso: Mayor a 1.32	NO APTO
H (%)	62.72	20 % - 60 %	NO APTO
Químicos			
Sa (g/L)	78.34	2.1-4.0 salinidad moderado	NO APTO
pH (escala 0-14)	7.89	Medianamente alcalino 7.4 - 8.5	NO APTO
MO (%)	5.14	5	NO APTO
CE (mS/m)	95.24	Muy fuertemente salino >16.0	NO APTO

En la comparación presentada en la Tabla 1 de los valores obtenidos tras el monitoreo de los suelos agrícolas en la zona del fundo San Pedro (aledaño a la PTAR-Covicorti) vs. los valores presentados por la NOM-RECNAT-2000- México para suelo agrícola; siendo las medias obtenidas superiores a los valores establecidos en los seis parámetros.

TABLA 2.
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS OBTENIDOS DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS REGADOS CON AGUAS DEL CANAL DE RIEGO CHAVIMOCHIC VS. NORMATIVA NOM-021-RECNAT-2000 - MÉXICO.

Parámetros del suelo		NOM-RECNAT para suelo agrícola	Observación
Físicos			
D (g/ml)	1.27	Arenoso: Mayor a 1.32	Apto
H (%)	30.87	20 % - 60 %	Apto
Químicos			
Sa (g/L)	1.91	2.1-4.0 salinidad moderado	Apto
pH (escala 0-14)	6.66	6.6 – 7.3	Apto
MO (%)	6.18	5	Apto
CE (mS/m)	2.93	Moderadamente salino 2.1 - 4.0	Apto

La tabla **2** muestra los resultados de la comparación de las muestras de suelos agrícola tomadas del sector Barraza vs los valores presentados por la NOM-RECNAT-2000- México para suelo agrícola; concluyendo que las muestras se encuentran dentro de los valores establecidos para un suelo agrícola considerado apto en los seis parámetros ensayados.

TABLA 3.
COMPARACIÓN DE LOS VALORES OBTENIDOS EN PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LOS SUELOS MUESTREADOS EN AMBAS ZONAS MEDIANTE ESTADÍSTICO U DE MANN- WHITNEY.

Parámetros	Suelos	U de Mann- Whitney	P-Valor
D (g/m)	S. Filtrado	0.00	<.001
	S.Limpio		<.001
H (%)	S. Filtrado	0.00	<.001
	S.Limpio		<.001
pH (escala 0-14)	S. Filtrado	36.00	<.001
	S.Limpio		<.001
MO (%)	S. Filtrado	0.00	<.001
	S.Limpio		<.001
S (g/L)	S. Filtrado	0.00	<.001
	S.Limpio		<.001
CE (mS/M)	S. Filtrado	0.00	<.001
	S.Limpio		<.001

La **Tabla 3** muestra los resultados del análisis estadístico realizado para comparar los valores obtenidos del suelo de ambas zonas estudiadas, según los parámetros fisicoquímicos. Para ello, se utilizó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney. Los valores de p en todos los parámetros resultaron ser altamente significativos ($p< 0.01$), indicando que existe diferencias en las medianas para los suelos de ambos sectores, sugiriendo la influencia que tendría el riego constante con aguas residuales crudas o parcialmente tratadas sobre la calidad de los suelos agrícolas en este sector.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de la investigación, evidencian un incremento significativo en pH (7.89), conductividad eléctrica (95.245 $\mu S/Cm$) y salinidad en los suelos afectados, lo que concuerda de manera global en El -Fayum, Egipto, donde también se observó aumento de salinidad por riego con aguas residuales, asimismo se advirtió que el uso prolongado de estas aguas sin tratar, incrementa significativamente la concentración de metales pesados como (Pb, Cd, Fe y Zn) [6].

Asimismo, se identificó que el suelo agrícola filtrado presentó un pH de 7.89, reflejando una ligera alcalinidad, mientras que el suelo no filtrado tuvo un pH de 6.66, situándose en un rango más ácido [10]. Por otro lado, la conductividad eléctrica del suelo filtrado alcanzó 95.245, significativamente mayor que en el suelo no filtrado (2.93), siendo esto negativo para las actividades agrícolas, ya que una alta conductividad del suelo afecta negativamente la capacidad de este para absorber agua, comprometiendo el desarrollo de las plantas [21].

De otro lado, los resultados de la comparación de medianas obtenidos entre los dos grupos evidenciaron diferencias altamente significativas para cada parámetro de calidad de suelo ($p < 0.01$), indicando una influencia que tendría la utilización de las aguas residuales sobre la calidad de los suelos agrícolas afectando directamente las propiedades del suelo. Este hallazgo es consistente con lo señalado por la [8], que advierte que la contaminación de los suelos agrícolas en América Latina, especialmente en valles y quebradas, se debe principalmente al vertido de aguas residuales sin tratar o mal tratadas. Estas actividades incrementan la acumulación de compuestos químicos, degradando el suelo, volviéndolo árido e infértil, y promoviendo el transporte de residuos hacia ríos y quebradas [19].

Por otro lado, al comparar los resultados obtenidos con la normativa mexicana NOM-021-RECNAT-2000, se determinó que los suelos afectados por la filtración de aguas residuales no cumplen con los parámetros establecidos para ser aptos en la producción agrícola [9]. Esta normativa establece especificaciones técnicas para el análisis de suelos agrícolas, siendo una herramienta clave para fomentar prácticas sostenibles. Este hallazgo refuerza la necesidad de implementar estrategias de remediación para mejorar la calidad del suelo y garantizar su sostenibilidad a largo plazo [8]. En conclusión, el suelo agrícola afectado por aguas residuales de la PTAR Covicorti no cumple con las condiciones necesarias para la producción agrícola, evidenciando la urgencia de tomar medidas para minimizar los impactos negativos sobre los ecosistemas terrestres.

Finalmente, estos hallazgos resaltan la necesidad de aplicar medidas a nivel local por parte de las autoridades municipales y regionales para abordar este problema con suma urgencia, donde el aporte de este tipo de estudios es de gran relevancia, ya que el monitoreo de los suelos agrícolas brinda evidencia de la existencia y magnitud del problema a fin de prevenir los efectos negativos que esta generando el uso

desmedido y sin conocimiento de estas aguas y en base a esto se proponga acciones correctivas o mitigantes que permitan aportar con la Meta 15.3 del ODS 15 para la lucha contra la desertificación y rehabilitación de suelos degradados. Es así, que se presentan algunas estrategias recogidas tras la consulta de diversos autores para solucionar los problemas relacionados con los efectos de estas aguas sobre los suelos agrícolas.

Para el uso adecuado de las aguas residuales en el riego agrícola, es fundamental establecer una estrategia integral que abarque aspectos técnicos, ambientales, institucionales y sociales, por lo que un punto de partida esencial es la concienciación de los agricultores sobre la calidad del agua reutilizada, informándoles sobre los niveles de nutrientes presentes y los posibles contaminantes, como metales pesados y patógenos, que podrían afectar negativamente tanto la salud humana como la productividad del suelo [22] . En ese sentido, es crucial llevar a cabo programas de capacitación que aborden tanto los métodos de tratamiento de aguas residuales como los beneficios y limitaciones de su uso, diferenciando claramente entre aguas tratadas y no tratadas [23]. Además, se debe orientar a los agricultores en la selección de cultivos apropiados, priorizando aquellos con menor capacidad de acumulación de sustancias nocivas, y en la gestión eficiente de los nutrientes presentes en las aguas residuales [24]. Por lo que, el respaldo institucional es vital, el apoyo regulatorio, familiarizando a los usuarios con normativas locales e internacionales, como las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el uso de aguas residuales en agricultura, y fomentando la adhesión a estas normas para garantizar prácticas seguras [25].Esta tarea requiere del compromiso activo de los gobiernos locales y entidades competentes, quienes deben destinar recursos para el monitoreo de la calidad del agua, el cumplimiento normativo y la provisión de infraestructura adecuada [26].

Es así, que, para fortalecer la adopción de estas prácticas, se recomienda la implementación de talleres prácticos de medio día y sesiones de capacitación en campo, los cuales permitan a los agricultores adquirir experiencia directa y aplicable en sus parcelas [27]. Asimismo, se deben desarrollar manuales técnicos y materiales de referencia que abordan los aspectos legales, técnicos y económicos del riego con aguas residuales [28]. La ejecución de proyectos piloto resulta también clave, ya que permite demostrar la viabilidad del uso de aguas residuales tratadas, así como recopilar datos útiles para la mejora continua de las prácticas [29].

Por otro lado, para los casos donde el uso de aguas residuales ya ha generado afectaciones en la calidad del suelo, evidenciadas en este estudio mediante la evaluación de parámetros críticos, se sugiere aplicar diversas estrategias de recuperación. Una de ellas consiste en el uso de enmiendas de suelo como el yeso agrícola, especialmente efectivo para mejorar la conductividad hidráulica y reducir la salinidad en suelos sódicos [30]. Esto es particularmente relevante, considerando que el riego con aguas residuales domésticas es una práctica común en países en desarrollo, y sus efectos adversos sobre las propiedades físicas del suelo requieren atención [30]. No obstante, para lograr mitigar los impactos negativos de manera efectiva se propone una gestión integrada que combine el tratamiento adecuado del agua residual, la aplicación de enmiendas del suelo, así como la selección estratégica de cultivos [31]. Otra técnica efectiva para tratar los suelos afectados es el proceso de lixiviación, que consiste en la aplicación controlada de grandes volúmenes de agua para eliminar sales acumuladas en la zona radicular, sin embargo, esta alternativa será viable siempre que exista suficiente disponibilidad hídrica [32]. Además, otra alternativa estratégica complementaria consiste en la mezcla de aguas residuales tratadas con agua dulce, lo cual puede reducir considerablemente la salinidad y sodicidad del suelo afectado. Estudios han demostrado que una proporción de 1:1 entre aguas residuales tratadas y agua dulce resulta eficaz para mejorar la calidad del riego. Asimismo, pueden utilizarse métodos ecológicos como la fitorremediación, que implica el uso de plantas tolerantes a la sal, como el eucalipto, el álamo y especies halófitas, las cuales absorben y acumulan sales del suelo, mejorando así su calidad [33]. También, se puede emplear enmiendas orgánicas como el biocarbón que ha demostrado ser beneficioso, al mejorar la estructura del suelo, aumentar el carbono orgánico y reducir el impacto de la salinidad sobre el crecimiento de los cultivos [34]. Finalmente, la adopción de técnicas de riego eficientes como el riego por goteo y por surcos no solo contribuye al uso racional del recurso hídrico, sino que también ayudara a controlar la acumulación de sales en la zona radicular, favoreciendo una producción agrícola más sostenible [35].

V. Conclusiones

En la presente investigación se evaluó la alteración en las propiedades fisicoquímicas de los suelos agrícolas debido a la filtración de aguas residuales de la PTAR Covicorti en Víctor Larco Herrera – Trujillo, concluyendo que la filtración de aguas residuales genera un impacto significativo en la estructura física de los suelos agrícolas analizados y en las propiedades químicas. Los resultados mostraron que los suelos afectados presentan valores por encima de lo establecido por la normativa NOM-021- RECNAT-2000-Mex para suelos agrícolas, clasificándolos como no aptos para una producción agrícola segura, lo que representa un riesgo para la salud pública y la seguridad alimentaria mientras que los suelos no filtrados presentan óptimas condiciones para realizar actividad agrícola, por lo que se concluye que el uso de las aguas residuales en el riego de suelos agrícolas debe de ser fiscalizado por las autoridades locales para una correcta regulación que permita un uso seguro de estas aguas.

REFERENCES

[1] H. A. NARVÁEZ-IBARRA and F. A. HOLGUÍN-ALVARADO, "Informe de inversión social para el desarrollo sostenible 2022-2023," 2024. Accessed: Dec. 17, 2024.

[2] D. B. Nemera, D. Yalin, G. J. Levy, S. Cohen, M. Shenker, R. Gothelf, J. Tarchitzky, and A. Bar-Tal, "Remediation and mitigation measures to counteract orchard soil degradation by treated wastewater irrigation," Soil and Tillage Research, vol. 234, p. 105846, 2023. Accessed: Dec. 27, 2024.

[3] P. Yadav, R. P. Singh, R. K. Gupta, T. Pradhan, A. Raj, S. K. Singh, Kaushalendra, K. D. Pandey, and A. Kumar, "Contamination of soil and food chain through wastewater application," in Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection, Elsevier, pp. 109–132, 2023. Accessed: Dec. 27, 2024.

[4] S. Ofori, A. Puškáčová, I. Růžičková, and J. Wanner, "Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons," Science of The Total Environment, vol. 760, p. 144026, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144026. Accessed: Dec. 27, 2024.

[5] J. E. BORJAS-GARCÍA, "Validez y confiabilidad en la recolección y análisis de datos bajo un enfoque cualitativo," Trascender, contabilidad y gestión, vol. 5, no. 15, pp. 79-97, 2020. Accessed: Dec. 17, 2024.

[6] M. A. Alnaimy, S. A. Shahin, Z. Vranayova, M. Zelenakova, y E. M. W. Abdel-Hamed, "Long-term effects of wastewater irrigation on soil properties: A case study rom El-Fayum, Egypt," Water, vol. 13, no. 16, pp. 1–18, 2021.

[7] F. Zamora, N. Rodríguez, D. Torres, and H. Yendis, "Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, Estado Falcón," Bioagro, vol. 20, no. 3, pp. 193–199, 2008.

[8] FAO, "La contaminación del suelo: una realidad oculta", 2018.

[9] J. de D. A. Sánchez and N. C. Irigoín, "Contaminación de suelos por el uso de aguas residuales," Revista Alfa, vol. 5, no. 14, pp. 132–144, 2021. Accessed: Dec. 27, 2024.

[10] V. Trotta, O. Baaloudj, and M. Brienza, "Risks associated with wastewater reuse in agriculture: investigating the effects of contaminants in soil, plants, and insects," Frontiers in Environmental Science, vol. 12, May 2024, Art. no. 1358842, doi: 10.3389/fenvs.2024.1358842 .

[11] K. S. Balkhair, "Impact of treated wastewater on soil hydraulic properties and vegetable crop under irrigation with treated wastewater, field study and statistical analysis," Journal of Environmental Biology, vol. 37, no. 5 Spec No, pp. 1143–1152, Sep. 2016. Accessed: Dec. 27, 2024

[12] F. M. Kiziloglu, M. Turan, U. Sahin, Y. Kuslu, and A. Dursun, "Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (Brassica oleracea L. var. botrytis) and red cabbage (Brassica oleracea L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey," Agricultural Water Management, vol. 95, no. 6, pp. 716–724, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.agwat.2008.01.008. Accessed: Dec. 27, 2024.

[13] SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, "NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis," Diario Oficial de la Federación, México, 2002. Accessed: Dec. 17, 2024.

[14] M. Delbari, P. Afrasiab, B. Gharabaghi, M. Amiri, and A. Salehian, "Spatial variability analysis and mapping of soil physical and chemical attributes in a salt-affected soil," Arabian Journal of Geosciences, vol. 12, no. 3, Jan. 2019, doi: 10.1007/s12517-018-4207-x.

[15] B. Murphy, "Key soil functional properties affected by soil organic matter - Evidence from published literature," in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2015. Accessed: Dec. 27, 2024.

[16] D. L. Corwin and S. M. Lesch, "Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture," Computers and Electronics in Agriculture, 2005. Accessed: Dec. 27, 2024.

[17] Ministerio del Ambiente, "Guía para el muestreo de suelos", Perú, 2013.

[18] A. BERETTA, D. BASSAHUM, and R. MUSSELLI, "¿Medir el pH del suelo en la mezcla suelo: agua en reposo o agitando?," Agrociencia (Uruguay), vol. 18, no. 2, pp. 90-94, 2014. Accessed: Dec. 17, 2024.

[19] TestAgro, "Cómo medir la conductividad eléctrica (CE) en el suelo," 2022. Accessed: Dec. 17, 2024.

[20] Manual para el análisis de suelos agrícolas y agua para riego, Sales Dávila et al.

[21] F. TORRES and A. ROJAS, "Suelo agrícola en México: retrospección y prospectiva para la seguridad alimentaria. Realidad, datos y espacio," Revista Internacional de Estadística y Geografía, vol. 9, no. 3, pp. 137-155, 2018. Accessed: Dec. 17, 2024.

[22] S. Deb and P. Dutta, Wastewater in Agriculture: Possibilities and Limitations, in Adaptive Soil Management: From Theory to Practices, Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 215–225

[23] G. S. Pettygrove, Irrigation With Reclaimed Municipal Wastewater–A Guidance Manual, CRC Press, 2018.

[24] A. Alsa'di, N. Mahmoud, and I. A. Al-Khatib, "Utilization of treated municipal effluent for irrigating agricultural land in Palestine: The driving factors and existing practices," Environmental Research, vol. 242, p. 117578, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.envres.2023.117578.

[25] M. Qadir et al., "The challenges of wastewater irrigation in developing countries," Agricultural Water Management, vol. 97, no. 4, pp. 561–568, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.agwat.2008.11.004.

[26] S. Esfandiari, A. Dourandish, A. Firoozzare, and S. Taghvaeian, "Strategic planning for exchanging treated urban wastewater for agricultural water with the approach of supplying sustainable urban water: a case study of Mashhad, Iran," Water Supply, vol. 22, no. 12, pp. 8483–8499, Oct. 2022, doi: 10.2166/ws.2022.359.

[27] M. E. Gerdes, M. R. Suri, and R. E. Rosenberg Goldstein, "Traditional approaches for educating farmers about nontraditional water: Evaluating preferred outreach, education, and methods for alleviating concerns," Journal of Environmental Management, vol. 275, p. 111265, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111265.

[28] G. S. Pettygrove, Irrigation With Reclaimed Municipal Wastewater–A Guidance Manual. CRC Press, 2018.

[29] T. Jang, S.-B. Lee, C.-H. Sung, H.-P. Lee, and S.-W. Park, "Safe application of reclaimed water reuse for agriculture in Korea," Paddy and Water Environment, vol. 8, no. 3, pp. 227–233, Mar. 2010, doi: 10.1007/s10333-010-0203-9.

[30] F. H. Li, S. M. Yang, and C. Peng, "Effects of Domestic Sewage Water and Ameliorant Effectiveness on Soil Hydraulic Conductivity," Soil Science Society of America Journal, vol. 74, no. 2, pp. 461–468, Mar. 2010, doi: 10.2136/sssaj2008.0258.

[31] M. Qadir and C. A. Scott, "Trade-offs of wastewater irrigation," in Encyclopedia of Soils in the Environment, Elsevier, 2023, pp. 277–287.

[32] M. Shaygan and T. Baumgartl, “Simulation of the Effect of Climate Variability on Reclamation Success of Brine-Affected Soil in Semi-Arid Environments,” Sustainability, vol. 12, no. 1, p. 371, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12010371.

[33] D. B. Nemera et al., “Remediation and mitigation measures to counteract orchard soil degradation by treated wastewater irrigation,” Soil and Tillage Research, vol. 234, p. 105846, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.still.2023.105846.

[34] B. Iqbal et al., “Biochar and saline soil: mitigation strategy by incapacitating the ecological threats to agricultural land,” International Journal of Phytoremediation, vol. 26, no. 8, pp. 1269–1279, Feb. 2024, doi: 10.1080/15226514.2024.2310001

[35] S. Karimzadeh, S. Hartman, D. D. Chiarelli, M. C. Rulli, and P. D’Odorico, “The tradeoff between water savings and salinization prevention in dryland irrigation,” Advances in Water Resources, vol. 183, p. 104604, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.advwatres.2023.104604.