

Enriquecimiento de Tierra utilizando biofertilizantes provenientes de los residuos sólidos urbanos (RSU), implementando la economía circular

Enrichment of Soil Using Biofertilizers Derived from Urban Solid Waste (USW),
Implementing Circular Economy Principles

Luis Andrés Samayoa Portillo¹, Alma Hortensia Serafin Muñoz², José Ignacio Ceseña Quiñonez² Berenice Michelle Ramírez Torres², Miguel Ángel Ortiz González²

¹Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Campus Central, ²Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Guanajuato.

luissamayoa1303@gmail.com¹; sermuah@ugto.mx²; ji.cesena@ugto.mx²

Resumen

La ciudad de Guanajuato, Gto. (México), históricamente conocida por su intensa actividad minera, enfrenta un desgaste considerable del suelo debido a la acumulación de residuos mineros tóxicos. Estos residuos han degradado la calidad del suelo, afectando la biodiversidad y la productividad agrícola. A pesar de su contribución económica, la minería ha dejado una significativa huella ambiental que requiere soluciones sostenibles. La restauración del suelo mediante tecnologías innovadoras, como la aplicación de biofertilizantes proveniente de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), emerge como una alternativa viable. Esta técnica, alineada con la economía circular y la agenda 2030, transforma desechos en biofertilizantes, mitigando la acumulación de residuos urbanos y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos. Los biofertilizantes mejoran la salud del suelo y promueven la sostenibilidad ambiental y económica. Este estudio evalúa el potencial de los biofertilizantes generados a partir de FORSU para enriquecer suelos infértiles o contaminados en Guanajuato, destacando la viabilidad de su producción a nivel industrial.

Palabras clave: minería, desgaste del suelo, fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), biofertilizantes, economía circular, sostenibilidad, restauración del suelo.

Abstract

The city of Guanajuato, Gto. (Mexico), historically known for its intense mining activity, faces considerable soil degradation due to the accumulation of toxic mining residues. These residues have degraded soil quality, affecting biodiversity and agricultural productivity. Despite its economic contribution, mining has left a significant environmental footprint that requires sustainable solutions. Soil restoration through innovative technologies, such as the application of biofertilizers derived from the organic fraction of municipal solid waste (OFUSW), emerges as a viable alternative. This technique, aligned with the circular economy and the 2030 agenda, transforms waste into biofertilizers, mitigating the accumulation of urban waste and reducing the dependency on chemical fertilizers. Biofertilizers improve soil health and promote environmental and economic sustainability. This study evaluates the potential of biofertilizers generated from OFUSW to enrich infertile or contaminated soils in Guanajuato, highlighting the feasibility of their production at an industrial level.

Keywords: mining, soil degradation, organic fraction of urban solid waste (OFUSW), biofertilizers, circular economy, sustainability, soil restoration.

Introducción

La ciudad de Guanajuato, Gto. (México) es conocida históricamente por su rica actividad minera, la cual ha experimentado un considerable desgaste del suelo debido a la generación y acumulación de residuos mineros. Estos desechos, a menudo tóxicos y difíciles de manejar, han contribuido a la degradación de la calidad del suelo, afectando la biodiversidad y la productividad agrícola de la región. (Sandoval Pérez et al., 2020). La explotación minera, sí bien ha sido una fuente crucial de desarrollo económico, ha dejado una huella ambiental significativa que demanda soluciones innovadoras y sostenibles. (Martínez Delgado, 2020). La minería a cielo abierto causa un gran impacto ambiental dañando severamente regiones naturales; por ello, la restauración del suelo es necesaria para la recuperación de los sistemas suelo-planta. (Peñaranda Barba et al., 2023)

Por lo anterior, es de gran auge la búsqueda de sistemas o metodologías que ayuden en el mejoramiento o enriquecimiento de los suelos. Una de las tecnologías alternativas es la aplicación de la composta proveniente de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) ya que se ha demostrado ser una buena solución para rehabilitación de los suelos pobres. Además, que desde una perspectiva de innovación entra en el modelo de la economía circular y dentro de posibilidad de llevar en parte el desafío a “residuo cero”; así como dentro de las perspectivas de la agenda 2030. (Sosa Cabrera, 2022) La técnica de generación de biofertilizantes a partir de residuos sólidos urbanos se ha convertido en una herramienta fundamental para promover la sostenibilidad ambiental y la eficiencia en la gestión de recursos. Esta práctica aborda de manera integral dos problemas críticos: la acumulación de residuos urbanos y la necesidad de prácticas agrícolas sostenibles. (Mamani et al., 2019).

Al transformar los desechos orgánicos en biofertilizantes, se reduce significativamente la cantidad de residuos que terminan en vertederos, disminuyendo así la contaminación y el impacto ambiental asociado con su descomposición no controlada. El uso de biofertilizantes contribuye a la reducción de la dependencia de fertilizantes químicos, cuyos efectos a largo plazo pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana, los fertilizantes químicos pueden contaminar cuerpos de agua y degradar la calidad del suelo con el tiempo (Matheus, 2004). En contraste, los biofertilizantes proporcionan una alternativa natural y sostenible, que mejora la salud del suelo y de los ecosistemas circundantes.

En este contexto, la aplicación del esquema de la economía circular emerge como una estrategia prometedora para mitigar los efectos negativos de la minería y revitalizar los suelos de Guanajuato. La economía circular se basa en la reducción, reutilización y reciclaje de materiales, transformando residuos en recursos valiosos. En particular, los residuos sólidos urbanos (RSU) representan una fuente potencialmente rica para la creación de abonos orgánicos que pueden enriquecer los suelos degradados. (Rodríguez Guerra & Baca-Cajas, 2022) El proceso de convertir los RSU en composta y otros biofertilizantes no solo ofrece una solución al problema de los desechos urbanos, sino que también proporciona una manera efectiva de restaurar la fertilidad del suelo afectado por la actividad minera. Estos abonos orgánicos mejoran la estructura

del suelo, aumentan su capacidad para retener agua, nutrientes y fomentan la actividad microbiana beneficiosa. Así, se promueve un ciclo virtuoso donde los residuos se reincorporan al ecosistema agrícola, cerrando el ciclo de los materiales y reduciendo la necesidad de insumos químicos externos. La implementación de la economía circular en Guanajuato puede transformar desafíos ambientales en oportunidades, al integrar los residuos sólidos urbanos en prácticas agrícolas sostenibles. Esta integración no solo contribuye a la rehabilitación del suelo minero, sino que también fortalece la resiliencia de la agricultura local, promoviendo un desarrollo económico y ambiental equilibrado. La economía circular ofrece un enfoque innovador y sostenible para abordar los problemas de desgaste del suelo en Guanajuato causados por la minería y la contaminación. Al convertir los residuos sólidos urbanos en abonos orgánicos, se puede revitalizar el suelo, mejorar la productividad agrícola y avanzar hacia un modelo de desarrollo más sostenible y circular.

El presente estudio tiene como objetivo determinar el potencial que tiene la utilización de biofertilizante generado a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para el enriquecimiento de suelos infértiles o contaminados que se encuentran a lo largo de la zona de Guanajuato capital, destacando el proceso realizado a nivel laboratorio y manual, con la finalidad de enfatizar en la factibilidad del aprovechamiento de los FORSU, evaluando la posibilidad de realizarse a una escala nivel industrial.

Metodología

1. Recolección y procesamiento de FORSU

Se recolectó la Fracción orgánica Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) provenientes de áreas comerciales, fruterías y hogares de la ciudad de Guanajuato. Inicialmente, los residuos fueron pesados, luego separados y clasificados en dos categorías: vegetales y frutas. El siguiente paso en el proceso consistió en triturar las muestras para obtener un residuo semilíquido. Para ello, se emplearon licuadoras de la marca Black&Decker, que permitieron desintegrar los residuos en una mezcla homogénea. Finalmente, la mezcla obtenida fue sometida a un proceso de filtración. Este proceso permitió la separación eficiente de los residuos sólidos de los líquidos, facilitando así el manejo y tratamiento posterior de cada una de las fracciones resultantes.

2. Generación de biofertilizante

Para la generación de biofertilizante a partir de los FORSU, los residuos se colocaron en un secador solar donde se dejaron secar a temperatura ambiente con la ayuda del sol. Una vez secos, los residuos se molieron en un molino convencional, con el objetivo de obtener un grano más fino. El material molido se homogeneizó con tierra recolectada del río cercano a la sede La Perlita. Este proceso tiene como finalidad enriquecer el suelo con los nutrientes provenientes de los FORSU. Se generaron distintos biofertilizantes, cada uno con una base diferente de FORSU. Estos

biofertilizantes contenían concentraciones variadas de distintos residuos orgánicos, permitiendo así la evaluación de su eficacia en el enriquecimiento del suelo.

- FORSU 1: Residuos de café provenientes del filtro convencional.
- FORSU 2: Residuo orgánico generado anteriormente en otros trabajos del laboratorio, compuesto principalmente de fruta variada.
- FORSU 3: Residuo orgánico generado previamente en trabajos anteriores del laboratorio, compuesto de mezcla de frutas y verduras variadas.
- FORSU 4: Residuo orgánico compuesto principalmente de restos de fresa y tomate.
- FORSU 5: residuo orgánico principalmente compuesto de restos de lechuga y col.

3. Homogeneización biofertilizante-tierra

Para establecer parámetros e índices de enriquecimiento del suelo, se generaron diversas muestras experimentales. La tierra utilizada en estas muestras fue extraída del río cercano a la sede La Perlita. Cada muestra de suelo se mezcló en una proporción del 5% con el biofertilizante generado a partir de FORSU. El objetivo de esta mezcla fue evaluar distintos parámetros de cada muestra.

- a) **Recolección de Muestras de Tierra:** La tierra fue recolectada del río cercano a La Perlita, garantizando una cantidad suficiente para las pruebas.
- b) **Preparación del Biofertilizante:** Se utilizaron diferentes tipos de FORSU para generar varias muestras de biofertilizante, cada una con concentraciones variadas de residuos orgánicos.
- c) **Mezcla de Tierra y Biofertilizante:** Se prepararon múltiples muestras de tierra, cada una mezclada con un 5% del biofertilizante correspondiente.

4. Caracterización de muestras

4.1 Prueba de Granulometría

Para realizar la prueba de la muestra de tierra base, se tomaron 500 gramos de tierra húmeda extraída del río La Perlita, la cual se calcinó en una mufla (ARSA) a 200 °C por dos horas, seguida de un secado en horno (FERISA, Modelo: F3-293D) a 65 °C, y posteriormente se enfrió en una desecadora (NALGENE). Una vez seca, la muestra se tamizó utilizando mallas de distintos diámetros de apertura para clasificarla según el tamaño de grano. Cada fracción tamizada fue pesada y separada, permitiendo la clasificación del suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (M-MMP-1-01/03, 2003), lo cual ayudó a determinar la estructura del suelo basado en los porcentajes de tierra que sobrepasan las distintas mallas, proporcionando una caracterización detallada de las propiedades físicas del suelo.

4.2 Determinación del potencial de hidrógeno medido en agua

Para las muestras de suelo enriquecido, se midió una altura de 1 centímetro de la muestra dentro de un vaso de precipitado de 4.6 cm de diámetro (16 cm³). Luego, se añadieron 200 ml de agua destilada a la muestra de tierra homogeneizada y se agitó de manera homogénea para disolver completamente la muestra sólida. El siguiente paso consistió en filtrar la muestra utilizando un embudo y papel filtro de celulosa, con el fin de retener cualquier residuo sólido no disuelto durante el proceso de homogeneización. Posteriormente, se recolectaron 20 ml de la muestra filtrada en otro vaso de precipitado y se procedió a medir los parámetros utilizando un potenciómetro, con el objetivo de determinar el pH, el potencial de oxidación-reducción y la conductividad de cada una de las muestras de FORSU. Este procedimiento se basó en la norma estandarizada AS-01 NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

4.3 Determinación del contenido de humedad del biofertilizante por gravimetría

El procedimiento para las muestras de biofertilizante generadas se realizó utilizando cinco crisoles, los cuales fueron tarados en una balanza granataria antes de añadirles 5 gramos de biofertilizante. Los crisoles con las muestras fueron colocados en un horno (FERISA, Modelo: F3-293D) a una temperatura de 105 °C durante 24 horas para eliminar cualquier humedad presente. Después de este periodo, se retiraron las muestras y se enfriaron en una desecadora (NALGENE). Una vez enfriadas, las muestras fueron pesadas nuevamente, y el contenido de humedad se determinó restando el peso final del peso inicial. Este procedimiento siguió los estándares de la norma AS-02 NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002)

4.4 Determinación de materia orgánica del biofertilizante por pérdida en ignición

Para realizar la prueba de determinación de materia orgánica en las muestras de biofertilizante, seguimos el siguiente procedimiento: primero, ingresamos las muestras en la mufla (ARSA), donde se calientan a 360 °C durante 2 horas para calcinar y eliminar cualquier presencia de materia orgánica. Después, las muestras se enfrían nuevamente en la desecadora (NALGENE) y se pesan en la balanza granataria, la cantidad de materia orgánica presente se determina mediante la diferencia de peso, de acuerdo con la norma AS-02 NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002)

4.5 Determinación de carbonatos presentes en el biofertilizante.

Para realizar el procedimiento con muestras de biofertilizante, utilizamos crisoles tras la determinación de materia orgánica. Las muestras se introdujeron en la mufla (ARSA) a una temperatura de 500 ± 50 °C durante dos horas. Posteriormente, se retiraron y se pasaron a la desecadora (NALGENE) para el proceso de enfriamiento. Una vez enfriadas, las muestras se pesaron en la balanza granataria para determinar el porcentaje de carbonatos eliminados durante el proceso. Este procedimiento se llevó a cabo siguiendo la norma NMX-AA-034-SCFI-2015. (Secretaría de Economía, 2016)

4.6 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico en campo de la tierra homogeneizada

Se llevó a cabo un procedimiento cualitativo con muestras de tierra mezcladas con biofertilizante. Se utilizaron 130 gramos de estas muestras, las cuales se colocaron sobre un filtro de papel convencional para café, que

actuó como filtro. A continuación, se añadió a las muestras 50 ml de una solución de Sulfato de Cobre (CuSO_4) preparada a una concentración de 0.4 molar, con el objetivo de determinar la retención de cationes de la tierra. Este proceso tiene como fin evaluar las propiedades cualitativas de las muestras, proporcionando una mayor referencia sobre su comportamiento. (Secretaría de Economía, 2006). Posteriormente, se tomó la muestra filtrada y se analizó utilizando un equipo de absorción atómica (AAS-HG PinAAcle 900F Perkin Elmer) con la técnica de vapor frío propuesta por el fabricante. El objetivo era determinar la cantidad de cobre presente en el líquido obtenido. Sin embargo, la concentración de cobre en la muestra superaba la capacidad de lectura del equipo, por lo que se realizaron dos diluciones con agua destilada: la primera en una proporción de 1:10 y la segunda de 1:1,000,000, para obtener una muestra que pudiera ser medida. Adicionalmente, se realizaron otras diluciones de la solución inicial de Sulfato de Cobre para establecer una curva de referencia y obtener valores aceptables.

4.7 Determinación de metales en muestra de biofertilizantes

Para evaluar la presencia de minerales y metales en las muestras de diferentes biofertilizantes y una muestra de tierra base tras el proceso de calcinación descrito en el inciso 4.5 de la metodología, se utilizó un equipo de absorción atómica. En este equipo, se midió la presencia de Cobre (Cu), Zinc (Zn), Hierro (Fe) y Plomo (Pb) en las muestras, con los resultados expresados en mg/L. Las muestras de biofertilizantes ya calcinados se digestaron con 20 ml de ácido clorhídrico y se calentaron durante 2 horas a una temperatura de 180 °C para evaporar los ácidos y eliminar cualquier residuo no mineral. Luego, se añadieron otros 20 ml de ácido clorhídrico y la solución se diluyó en un matraz de 100 ml con agua destilada. La solución obtenida se filtró a través de un papel de celulosa para eliminar cualquier residuo sólido antes del análisis. Esta solución se llevó al equipo de absorción atómica (AAS-HG PinAAcle 900F Perkin Elmer) utilizando la técnica de vapor frío propuesta por el fabricante. Así, se determinaron las concentraciones de los minerales previamente mencionados en cada una de las muestras de biofertilizantes y en la muestra de tierra ya digeridas, siguiendo el estándar ASTM E1024.

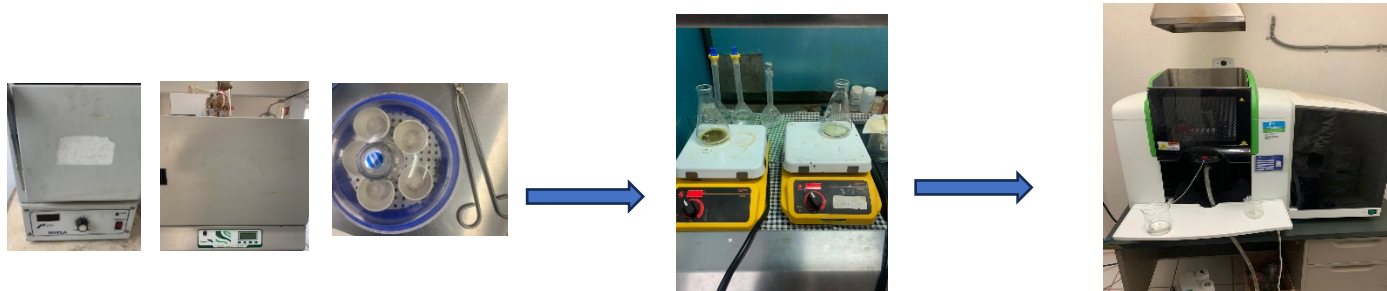
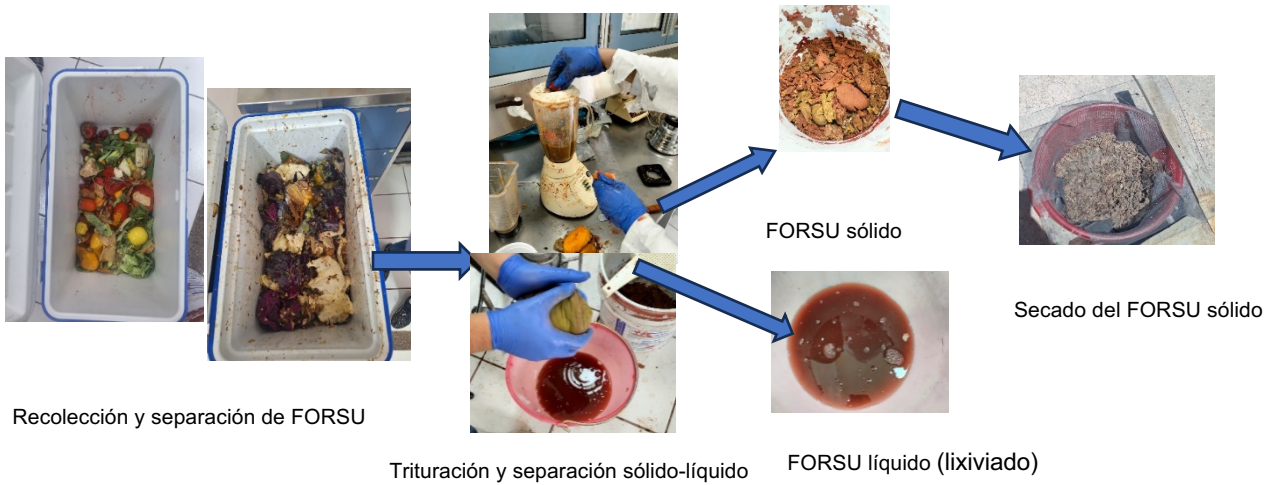


Figura 1. Metodología resumida.

Resultados y discusiones

En la Tabla 1 se presenta un análisis detallado del rendimiento en relación con la colecta inicial. De esta forma, se evidencia que hubo una pérdida de 1.4 kilogramos en el peso del material sólido-lixiviado, lo cual equivale a una reducción aproximada del 8.76%. Esta pérdida puede deberse a varios factores, tales como la presencia de materia orgánica que no era adecuada para ser utilizada en la producción de biofertilizantes o a la existencia de partes de residuos que no podían ser trituradas mediante los métodos convencionales.

En la Tabla 2 se puede observar detalladamente la relación entre la cantidad de FORSU sólido generado y el lixiviado extraído. Este análisis es crucial para determinar la viabilidad de la obtención de material sólido destinado a la producción de biofertilizantes. Los resultados presentados indican que existe un rendimiento equilibrado en la generación tanto de FORSU sólido como de lixiviado, lo cual es un indicativo positivo para la eficiencia del proceso de producción de biofertilizantes.

Tabla 1. Muestras de FORSU recolectadas

Muestra FORSU	Peso (kg)
Bolsa 1	2.07
Bolsa 2	3.945
Bolsa 3	5.74
Bolsa 4	0.795
Bolsa 5	0.22
Bolsa 6	0.5325
Bolsa 7	0.3275
Bolsa 8	0.79
Bolsa 9	0.7875
Bolsa 10	0.45
Bolsa 11	0.3175
Total	15.975
Muestra sólida/líquida	14.5117
Pérdida	1.4633

Tabla 2. Relación de material sólido y líquido extraído de la muestra de FORSU

Fecha	Material sólido (kg)	Lixiviado (kg)
18 de junio	2.920	7.2625
19 de junio	1.905	2.5242
Total	4.825	9.6867
Total generado	14.5117	
Porcentaje	49.3%	50.7%

Además, es importante destacar que esta pérdida no necesariamente representa un fallo en el proceso, sino más bien una oportunidad para mejorar la selección y preparación del material inicial, de igual manera que se produzcan dichos residuos en un lapso más reducido de tiempo ya que al tener una cantidad considerable

de tiempo de por medio se pudo haber evaporado cierto residuo líquido generado. Asimismo, la identificación de los componentes que no son aptos para la producción de biofertilizantes puede conducir a ajustes en el procedimiento de recolección y pre-tratamiento, optimizando así el rendimiento y la calidad del producto final.

En la Tabla 3 se logra observar la proporción de suelo que pasa por cada malla, utilizando el Sistema unificado de caracterización de tierras (SUCS) podemos llegar a determinar el tipo de suelo que se encuentra en los alrededores de la sede la perlita, como se puede observar en la Tabla 4 se puede determinar que el suelo extraído se clasifica como una arena limpia y con finos. Acorde a la organización de las naciones unidas para la alimentación y agricultura (FAO) nos indica que los suelos arenosos se caracterizan por una textura granular que se extiende hasta una profundidad de 50 cm. Esta estructura granular implica que las partículas de arena son predominantemente grandes y espaciadas, lo que afecta directamente las propiedades del suelo. Como resultado, estos suelos tienen una baja capacidad de retención de nutrientes, ya que los espacios entre las partículas permiten que los nutrientes se filtren rápidamente. Además, la capacidad de retención hídrica es limitada, lo que significa que el agua se drena con rapidez a través del suelo, reduciendo la disponibilidad de humedad para las plantas. Estas características hacen que los suelos arenosos requieran un manejo cuidadoso y la adición de materia orgánica o enmiendas para mejorar su fertilidad y capacidad de retención de agua. (FAO, s.f). Como podemos observar en la Tabla 3 el porcentaje de la muestra de tierra que supera la malla 200 es mayor al 50% considerándose así un suelo de tipo arenoso, en otros trabajos se tiene un rango de porcentaje de material sobrepasa la malla 200 alrededor del 90% (Behak & Núñez, 2008). Con esto se puede inferir que el suelo que se tiene en disposición no es arena fina en su totalidad, posee una composición más granular.

Tabla 3. Caracterización de suelo por granulometría

Muestras	Menor malla 325	Malla 325	Malla 200	Malla 20	Malla 4	Malla 3/8
Peso neto (g)	8.8	18.6	170.2	98.3	22.4	61.3
Porcentaje	2.30%	4.86%	44.51%	25.71%	5.86%	16.03%

Tabla 4. Clasificación del suelo en base al sistema unificado de caracterización de suelos SUCS

Malla	Porcentaje	Clasificación
Retenido en malla 200	92.10%	Suelo de partículas gruesas
Supera la malla 4	70.21%	Arena
Supera la malla 200	7.17	Arena limpia y con finos

Por esta razón, se implementan estrategias de enriquecimiento del suelo con el objetivo de incrementar su capacidad de retención hídrica y de nutrientes. Estas estrategias pueden incluir la adición de materia orgánica, como lo es el biofertilizante, lo que mejora la estructura del suelo y aumenta su capacidad para retener agua y nutrientes.

La Tabla 5 nos ayuda a determinar los componentes de nuestras muestras, como podemos observar las muestras de biofertilizante poseen una presencia mucho mayor de materia orgánica y de carbonatos que la muestra de tierra original, esto nos indica que nuestro biofertilizante aporta grandes cantidades de materia orgánica que fomentan a un enriquecimiento y también aportan cantidades significativas de carbonatos que ayudan a desarrollar una mayor respiración biológica (Ovalle et al., 2023).

Tabla 5. Determinación de compuestos de la tierra y de los FORSU

Muestra	Porcentaje Humedad	Porcentaje materia orgánica	Porcentaje Carbonatos	Porcentaje de Minerales
Tierra base	76.09± 3.01	7.61±1.22	2.94±0.14	13.36±1.88
FORSU 1	7.28 ± 1.54	74.90± 1.97	16.06± 2.09	1.76± 1.65
FORSU 2	7.07 ± 2.05	60.92± 1.70	10.69± 1.86	21.32± 1.49
FORSU 3	6.69 ± 1.01	52.19± 4.23	17.5± 2.24	23.71± 2.04
FORSU 4	8.53 ± 1.32	63.45± 1.45	14.63± 1.71	13.39± 1.30
FORSU 5	7.90 ± 1.45	66.08±3.56	18.38± 1.39	7.64± 1.61

La aplicación de biofertilizantes en suelos arenosos proporciona múltiples beneficios significativos y justificados como podemos ver en la Tabla 5, principalmente desde el punto de vista del enriquecimiento de nutrientes y la mejora de la respiración biológica (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). Los biofertilizantes, que contienen microorganismos beneficiosos, materia orgánica y carbonatos, son esenciales para transformar un suelo arenoso, caracterizado por su pobreza en nutrientes, en un medio más fértil y productivo. Podemos observar que la muestra de Fruta 2 posee un mayor balance en el aporte de materia orgánica, carbonatos y minerales, por lo que se podría considerar como la muestra de biofertilizantes que mayores beneficios podría traerle a nuestra muestra de tierra arenosa. De igual manera podemos observar

la gran pérdida de humedad de la muestra de tierra respaldando su caracterización donde su retención de humedad es muy pobre a comparación de tierras más fértiles.

Una vez homogeneizadas los biofertilizantes con la muestra de tierra se procedió a tomarles parámetros los cuales se ven plasmados en la Tabla 7, se puede ver la tendencia de aumento de potencial de hidrogeno y del potencial de reducción y oxidación, se busca alcanzar un suelo neutro que se encuentre en el rango de 6.5-7 en la escala del pH, esto indica que se tiene un suelo neutro, como lo evidencia la muestra de suelo es ácida, lo cual inhibe y perjudica a la actividad de organismos beneficiosos para las plantas.

Tabla 6. Clasificación de cada tipo de muestra evaluada

MUESTRA 1	SUELO EXTRAÍDO DEL RÍO
MUESTRA 2	Suelo extraído combinado en un 5% con residuo de café
MUESTRA 3	Suelo extraído enriquecido en un 5% con residuo de verdura seco
MUESTRA 4	Suelo extraído enriquecido en un 5% con residuo de frutas mayoritariamente fresas y tomate
MUESTRA 5	Suelo extraído enriquecido en un 5% con residuo húmedo de frutas

Tabla 7. Toma de parámetros de las muestras de tierra homogeneizadas con los FORSU

	PH	ORP	CONDUCTIVIDAD
MUESTRA 1	5.57	186	180
MUESTRA 2	6.29	302	189
MUESTRA 3	6.62	310	213
MUESTRA 4	6.49	304	367
MUESTRA 5	7.39	196	315

La aplicación de biofertilizantes que aumentan el pH en suelos arenosos ácidos proporciona beneficios significativos que mejoran la calidad del suelo y la productividad de las plantas. Estos beneficios se deben a la neutralización de la acidez del suelo, la mejora de la disponibilidad de nutrientes y la promoción de una actividad biológica más saludable. Los biofertilizantes que contienen carbonatos, como el carbonato de calcio (CaCO_3), neutralizan la acidez del suelo al reaccionar con los ácidos presentes, elevando el pH hacia niveles más neutros. (Arévalo Ortiz & Quispe Cáceres, 2008) Esto crea un ambiente más favorable para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiana beneficiosa. La elevación del pH mejora la disponibilidad de nutrientes esenciales. También, la mayor actividad microbiana promovida por un pH más equilibrado intensifica la descomposición de la materia orgánica y la mineralización de nutrientes, incrementando la fertilidad del suelo. La combinación de una estructura del suelo mejorada, mayor disponibilidad de nutrientes y un entorno radicular más saludable resulta en un aumento significativo de la productividad de las plantas en suelos arenosos ácidos tratados con biofertilizantes que elevan el pH. (Ruiz-Morales et al., 2023)

En la Figura 2 podemos observar la concentración de cobre resultante luego de filtrar el Sulfato de Cobre (CuSO_4) por medio de nuestras distintas muestras de tierra ya homogeneizada con las muestras de biofertilizante, como podemos observar las muestras de tierra que están homogeneizadas con fruta poseen menores concentraciones de cobre presente a comparación de la tierra extraída del río como tal y de otras muestras de tierra que están homogeneizadas con otros tipos de biofertilizantes y composta. Un alto intercambio catiónico (CIC) en los suelos es beneficioso porque mejora la retención y disponibilidad de nutrientes esenciales como potasio, calcio y magnesio, asegurando un suministro constante para las plantas y promoviendo su crecimiento saludable. Además, un alto CIC contribuye a una mejor estructura del suelo, favoreciendo la agregación de partículas, la porosidad, la infiltración de agua y la aireación, lo que resulta en raíces más fuertes y profundas. También, actúa como amortiguador contra cambios bruscos en el pH, manteniéndolo en un rango óptimo para el crecimiento de los cultivos. Asimismo, reduce la pérdida de nutrientes por lixiviación, especialmente en climas lluviosos, mejorando la eficiencia del uso de fertilizantes. Además, promueve la actividad biológica en el suelo, incluyendo microorganismos beneficiosos que descomponen materia orgánica y liberan nutrientes adicionales, protegiendo también a las plantas contra enfermedades del suelo. En resumen, un alto CIC es esencial para mantener un suelo fértil, saludable y productivo, beneficiando tanto a las plantas como al ecosistema agrícola en general. (s/f. ULPGC)

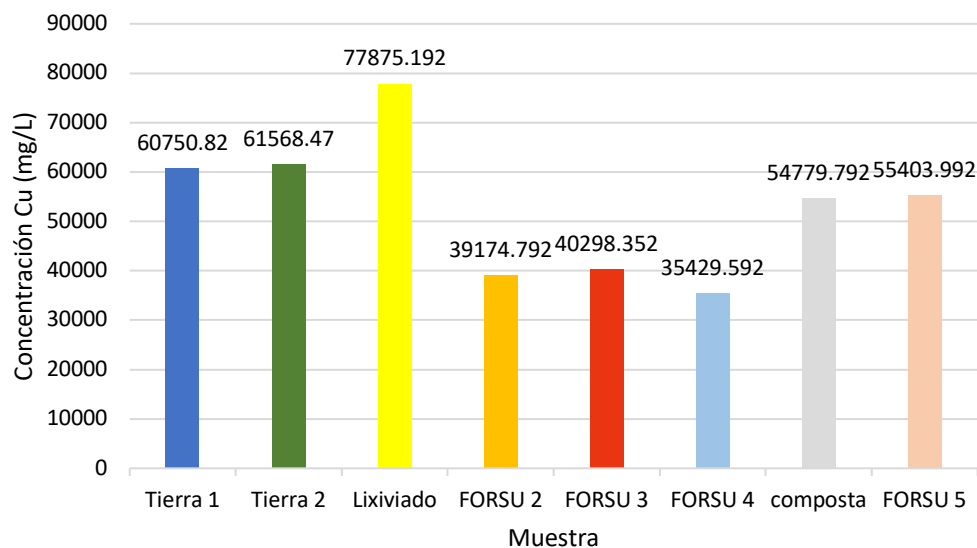


Figura 2. Presencia de concentración de cobre equivalente al intercambio catiónico producido

Observando dichos resultados se puede inferir que el añadir biofertilizantes con alta presencia de materia orgánica favorece a la actividad microbiológica, mejora las condiciones biológicas del suelo y ayuda a incrementar el nivel de fertilidad del suelo, esto gracias a la capacidad que tienen los biofertilizantes de mejorar el intercambio catiónico del suelo. (Cruz-Macías et al., 2020).

En la Tabla 8 podemos visualizar la concentración de distintos metales en las distintas muestras de biofertilizantes y muestra de tierra, cabe destacar la alta concentración de partículas de hierro que posee la muestra de tierra extraída del río, esto puede ser debido a la composición del suelo arenoso o puede estar saturado por alguna fuente no natural como sería un drenaje ácido de mina.

Las altas concentraciones de hierro en el suelo pueden presentar varias desventajas significativas. En primer lugar, pueden provocar toxicidad en las plantas, ya que niveles excesivos de hierro pueden dañar las raíces y otros órganos vegetales, afectando negativamente su crecimiento y desarrollo general. Esta toxicidad es especialmente problemática en suelos con un pH bajo, donde el hierro se vuelve más soluble y, por lo tanto, más disponible en formas que pueden ser tóxicas para las plantas. Además, el exceso de hierro puede interferir con la absorción de otros nutrientes esenciales como fósforo, manganeso, zinc y cobre. Esta competencia puede provocar deficiencias de estos nutrientes, incluso cuando están presentes en el suelo en cantidades suficientes, afectando el equilibrio nutricional necesario para un crecimiento óptimo de las plantas. (Heeren, 2021)

Otro problema asociado con altas concentraciones de hierro es su impacto en el pH del suelo. En suelos ácidos, el hierro soluble puede acumularse en niveles que resultan tóxicos para las plantas, mientras que, en suelos alcalinos, el hierro puede precipitarse y volverse menos disponible, lo que puede llevar a una deficiencia en lugar de una toxicidad. Esta variabilidad en la disponibilidad de hierro según el pH del suelo puede complicar la gestión del suelo y la nutrición de las plantas, requiriendo un ajuste cuidadoso del pH para mantener un equilibrio adecuado. (Heeren, 2021)

Tabla 8. Detección de metales presentes en la muestra de biofertilizante y muestra de tierra (mg/L)

Muestra	Cu	Fe	Zn	Pb
Tierra	28.85	604.9	3.225	1.728
FORSU 1	4.517	3.195	0.374	0.172
FORSU 2	46.74	1.718	0.814	0.603
FORSU 3	5.113	3.214	0.67	0.429
FORSU 4	2.406	11.15	0.796	0.347
FORSU 5	5.025	2.523	0.152	0.579

La incorporación de materia orgánica en el suelo es una solución efectiva y multifacética para reducir el exceso de hierro y mejorar la calidad general del suelo. La materia orgánica, como la composta, estiércol bien descompuesto y biofertilizantes, mejora la estructura del suelo al aumentar su porosidad y capacidad de

retención de agua. Esto a su vez facilita el drenaje y reduce la acumulación de hierro en formas solubles y tóxicas, esta técnica se utilizó en un estudio de contaminación de hierro en arroz. (Mahender et al., 2019).

De igual manera cabe recalcar la presencia de Plomo (Pb) en las distintas muestras, en especial la de la tierra, las cuales sobrepasan los límites permitidos por la Norma Nacional de Seguridad Alimentaria.

La presencia de plomo en los cultivos agrícolas representa un serio riesgo tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Este metal pesado, altamente tóxico, puede introducirse en los suelos agrícolas a través de diversas fuentes, como el uso de pesticidas contaminados, aguas de riego contaminadas, residuos industriales y emisiones vehiculares. Una vez en el suelo, el plomo es absorbido por las plantas a través de sus raíces y se acumula en sus tejidos, especialmente en las hojas y los frutos. En trabajos similares se evaluó el impacto del plomo en distintas plantas para ver como lo asimilaban, y se presentaron resultados de una tasa de mortalidad alta de las plantas, lo cual afecta grandemente en la fertilidad y viabilidad del suelo para ser aprovechado para cultivo, este fenómeno de presencia de plomo se encuentra más en zonas áridas de México. (Perales-Aguilar et al., 2021). El plomo tiene una alta afinidad por los compuestos orgánicos presentes en el suelo, lo que facilita su disponibilidad para las plantas. Su acumulación en las partes comestibles de los cultivos implica un riesgo significativo para la salud humana, dado que su ingesta a través de la cadena alimentaria es una de las principales vías de exposición. Estudios han demostrado que la exposición crónica al plomo, incluso en bajas concentraciones, puede provocar daño neurológico irreversible, especialmente en niños, donde se manifiesta como una disminución del coeficiente intelectual, problemas de aprendizaje y trastornos del comportamiento. (Azcona et al., 2015).

Desde una perspectiva ambiental, la contaminación del suelo con plomo no solo afecta la calidad de los cultivos, sino que también altera la biodiversidad del suelo y la actividad microbiana, cruciales para la fertilidad del suelo y la salud de los ecosistemas agrícolas. Esto genera un círculo vicioso de degradación ambiental y disminución de la productividad agrícola, afectando la seguridad alimentaria a largo plazo. Por lo que se consideraría de alto interés ahondar y encontrar la fuente de origen de la contaminación de plomo de las muestras, las muestras de los FORSU pudieron ser contaminadas debido al suelo en el que se cultivan o la exposición a emisiones de vehículos ya que en su mayoría las muestras de FORSU están compuestas de residuos de fruterías y verdulerías que pudieron haber expuesto los residuos al paso de vehículos que emiten gases y el plomo puede estar presente en esos gases emitidos. Es crucial implementar estrategias de mitigación y remediación, como la regulación estricta de las fuentes de contaminación, para reducir los niveles de plomo en los suelos agrícolas y proteger la salud pública.

Conclusión

Los resultados de este estudio demuestran que la aplicación de biofertilizantes derivados de residuos orgánicos mejora significativamente la calidad de los suelos arenosos. Se observó una mejora en la capacidad de intercambio catiónico, el potencial de hidrógeno. Además, los biofertilizantes aportan una gran cantidad de materia orgánica al suelo que se observó que posee muy poca presencia de esta, promoviendo un ecosistema del suelo más saludable y equilibrado. Estas mejoras contribuyeron a un aumento en la fertilidad del suelo y a mejores condiciones para el crecimiento de las plantas, evidenciando la eficacia de los biofertilizantes en la rehabilitación de suelos arenosos.

Es importante destacar que este estudio fue realizado de manera asequible y utilizando procesos amigables, lo que subraya el potencial de estas prácticas incluso a pequeña escala. A pesar de la naturaleza manual del proceso, los resultados obtenidos son prometedores y sugieren que la producción y aplicación de biofertilizantes pueden tener un impacto positivo sustancial en la agricultura. Con base a los resultados obtenidos dentro de este estudio de investigación preliminar, se da la pauta para el seguimiento en la contribución de trabajos afines con el fin de profundizar en la investigación sobre el uso de biofertilizantes de residuos orgánicos. La implementación de técnicas más avanzadas y la optimización de procesos pueden llevar a una producción a nivel industrial, lo que permitiría aprovechar estos beneficios a una escala mucho mayor. La investigación futura debería centrarse en la escalabilidad del proceso, la eficiencia de producción y la rentabilidad económica para desarrollar una solución sostenible y económicamente viable para la mejora de suelos arenosos. En este contexto, la aplicación de la economía circular es de suma importancia, ya que promueve el reciclaje y la reutilización de residuos orgánicos, transformándolos en recursos valiosos para el enriquecimiento y recuperación de suelos poco aptos para ser utilizados como base para la plantación. Esto no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también mejora la eficiencia económica de la implementación de un sistema de cultivo.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres por brindarme el apoyo y la oportunidad de aprender e investigar fuera de Guatemala.

A la profesora Ma. Guadalupe Medina Mejía de la división de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, México, por su valiosa orientación y apoyo dentro de este trabajo de verano de investigación.

A los estudiantes de posgrado del equipo de trabajo de la doctora Alma Serafín, Hugo López y Mayela Zavala por sus enseñanzas y disposición.

A la DAIP-UG y al comité organizador de los veranos de la ciencia de la UG 2024 por su preciado apoyo y espacio de trabajo.

Referencias

- Arévalo Ortiz, F. H., & Quispe Cáceres, A. (2008). Control y regulación del pH en una fermentación láctica utilizando carbonato de calcio como regulador y microbiota de granos de Kefir como agente biológico. *Ciencia y Desarrollo*, 9. <https://doi.org/10.21503/cyd.v9i0.1175>
- Azcona, M., Ramírez, R., & Vicente, G. (2015). Efectos tóxicos del plomo. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 20(1).
- Behak, L., & Núñez, W. P. (2008). Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación. *Revista Ingeniería de Construcción*, 23(1). <https://doi.org/10.4067/s0718-50732008000100004>
- Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., & Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 38(3). <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Heeren, O. (2021). EFECTO DIRECTO E INDIRECTO DEL EXCESO DE HIERRO (FE) DISPONIBLE EN EL SUELO SOBRE EL DESEMPEÑO DEL CULTIVO DE LEPIDIUM MEYENII WALP. (MACA). *Repositorio de La Universidad Peruana Cayetano Heredia*.
- Mahender, A., Swamy, B. P. M., Anandan, A., & Ali, J. (2019). Tolerance of Iron-Deficient and -toxic soil conditions in Rice. In *Plants* (Vol. 8, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/plants8020031>
- M-MMP-1-01/03. (2003). Métodos de muestreo y prueba de materiales, Parte 1. Suelos y materiales para terracerías, Título 01. Muestreo de Materiales para Terracerías. *Normativa SCT*.
- Ovalle, R., Seguel, O., & Pfeiffer, M. (2023). Genesis y ocurrencia de carbonatos en los suelos. *Agro Sur*, 51(1). <https://doi.org/10.4206/agrosur.2023.v51n1-01>
- Perales-Aguilar, L., Esquivel-Rivera, J. A., Silos-Espino, H., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Perales-Segovia, C. (2021). Tolerancia de plantas de zonas áridas a metales pesados. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.759>
- Ruiz-Morales, G. A., Menéndez-Sierra, A., & Fossatti-Carrillo, A. (2023). DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD BUFFER Y DOSIS DE CaCO₃ DE LOS SUELOS DEGRADADOS DEL DISTRITO DE ÑÜRÜM, CERRO PELADO, COMARCA NGÄBE BUGLE, PANAMÁ. *Revista Investigaciones Agropecuarias*, 6(1). <https://doi.org/10.48204/j.ia.v6n1.a4519>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). ¿Qué es y para qué sirve el fertilizante? *Gobierno de México*.
- Secretaría de Economía. (2006). Nmx-Aa-132-Scfi-2006. *Muestreo De Suelos Para La Identificación Y La Cuantificación De Metales Y Metaloides, Y Manejo De La Muestra*.
- Secretaría de Economía. (2016). *NMX-AA-034-SCFI-2015*. Diario Oficial de La Federación.
- SEMARNAT. (2002). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. *Diario Oficial de La Federación*.