



CIENCIAS AMBIENTALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

UNIVERSITAS *Miguel Hernández*

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y FISICOQUÍMICA DE MEZCLAS BINARIAS DE COMPOST DE LODO DE EDAR Y DE ZAHORRA FINA PARA EL USO EN TECNOSOLES.



Grado en Ciencias Ambientales

Facultad de Ciencias experimentales

Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente

Área de Edafología y Química Agrícola

Curso 2020/2021

Autora: María del Carmen Reche Cutanda

Tutores: Ignacio Gómez Lucas y Teresa Rodríguez Espinosa

Resumen

La realización de este trabajo tiene como objetivo principal evaluar el uso de las mezclas binarias de compost de lodo de EDAR y de zahorra fina de naturaleza caliza, en diferentes dosis, con el fin de crear un suelo artificial (technosol) apto como sustituto de suelos para restauración de zonas degradadas y extractivas. Se ha estudiado el efecto de ciertas propiedades físicas y fisicoquímicas de las mezclas con distintas proporciones de volumen/volumen de ambos residuos. Los resultados obtenidos indican que el incremento de la dosis de la enmienda orgánica aumenta los valores para la porosidad, el porcentaje de materia orgánica y la conductividad eléctrica, y disminuye las otras propiedades analizadas. Además, se ha observado que la porosidad es la única propiedad que no se ve afectada significativamente por el cambio de las proporciones de los residuos. Finalmente, el uso ambos residuos puede ser una solución a uno de los grandes problemas ambientales actuales, como es la pérdida de suelo.

Palabras clave: enmienda orgánica, enmienda inorgánica, mezclas binarias, propiedades físico-químicas, residuos, Technosol.



Abstract

The main objective of this research work is to evaluate this use of binary mixtures of WWTP sludge compost and fine gravel of limestone origin on different dosages with the purpose of creating an artificial soil (Technosol) suitable as a substitute of soils for restoration of degraded areas and extractive activities. Some of the effect of the physical and physicochemical proprieties of the mixtures of the different proportions of volume/volume of both residues have been studied and the obtained results show that the increment of porosity, organic matter an electric conductivity, and one the other hand decreases the other analysed proprieties. Furthermore, the porosity is the only property that is not significantly effected by the change of proportions of the residues on the mixture. Finally, the use of both residues can be a solution to one of the big actual environmental problems, like that of soil loss.

Key words: organic amendment, inorganic amendment, binary mixtures, proprieties physicochemical, residues, Technosol.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. IMPORTANCIA DE LOS RESIDUOS COMO TECHNOSOLS EN LA RESTAURACIÓN DE ZONAS EXTRACTIVAS Y DEGRADADAS.....	3
1.2. TECHNOSOL.....	5
1.3. EL USO DE LOS RESIDUOS COMO ENMIENDAS MEJORADORAS DEL SUELO Y PARA PREPARACIÓN DE TECHNOSOLS	6
2. OBJETIVOS.....	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. MATERIALES.....	10
3.1.1. Residuos.....	10
3.1.2. Materiales de la fase de preparación de residuos	10
3.1.3. Materiales de la fase de caracterización de residuos, tratamientos y procedimiento de los tratamientos	11
3.2. METODOLOGÍA	12
3.2.1. Preparación de muestras inicial.....	12
3.2.2. Caracterización de residuos	12
3.2.3. Tratamiento.....	17
3.2.4. Procedimiento del tratamiento	18
3.2.5. Cálculos estadísticos	21
4. RESULTADO Y DISCUSIÓN	22
4.1. DENSIDAD APARENTE, DENSIDAD REAL Y POROSIDAD	22
4.2. PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA	23
4.3. CAPACIDAD DE RETENCIÓN HÍDRICA Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURAD.....	24
4.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PH.....	25
5. CONCLUSIONES	27
6. BIBLIOGRAFÍA.....	29
6.1. CONSULTAS EN INTERNET	30

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia de los residuos como Technosols en la restauración de zonas extractivas y degradadas

El suelo es un recurso natural no renovable y finito que presta diversos servicios ambientales o ecosistémicos, entre ellos, cabe mencionar el relacionado con su participación en ciclo hidrológico. Los suelos son uno de los principales reservorios de aguas dulce, se encarga del abastecimiento de agua de calidad para diferentes usos (consumo humano, riego, etc.) (Artieda, 2008) y actúan filtrando, amortiguando y transformando compuestos adversos que contaminan el entorno. Los suelos son la base de todos los ecosistemas terrestre y hacen posible la vida en el planeta, actuando como sustrato para la producción de alimentos y materias primas (Burbano, 2016). Por ello, las consecuencias de la degradación acelerada y la pérdida de suelo son dos problemáticas ambientales de similar trascendencia que el calentamiento global y la pérdida de biodiversidad, estando estos cuatro procesos relacionados entre sí.

Con el rápido crecimiento de la población mundial, se han intensificado las demandas de producción alimentaria y materias primas conduciendo a consecuencias dramáticas en el ámbito ambiental, social y económico. Se considera que actualmente hay unos 3600 millones de hectáreas afectadas por diferentes niveles de degradación de suelos (Pla, 2008), especialmente suelos agrícolas, que acaban siendo abandonadas principalmente por la pérdida de productividad, y áreas extractivas mineras, donde el abandono y la ausencia de una adecuada normativa en las décadas pasadas ha generado una serie de consecuencias (pérdida de suelo, generación de una gran cantidad de residuos y escombros estériles, contaminación, etc.).

La degradación del suelo es la pérdida total o parcial de su productividad, ya sea cualitativa o cuantitativa, como efecto de procesos tales como la compactación, la contaminación, el deterioro de la estructura, desertificación, la erosión, la pérdida de elementos nutritivos y de materia orgánica, la salinización, etc. (Encina y Ibarra, 2003). La topografía, el clima, el estado de la vegetación y la actividad humana son factores decisivos en la degradación del suelo y de los ecosistemas que soporta. En España, la investigación sobre la restauración y la recuperación de suelos se ha vuelto de gran importancia durante estos últimos años, debido a la extensa superficie que está afectada por una pérdida total o parcialmente de la calidad del suelo por procesos degradativos, destacando la

desertificación y la contaminación, que influyen negativamente en las propiedades y funciones de estos. Las zonas con climas áridos o semiáridos son las más afectadas.

Por otro lado, las actividades extractivas, son una de las principales causas de contaminación de suelos en España y provocan toda una serie de afecciones al medio ambiente, que se manifiestan como impactos ambientales dentro del proceso extractivo. Los tres más destacables son la modificación del relieve natural, la supresión de la cubierta vegetal y el suelo y la generación de una gran cantidad de residuos o escombros inertes. En 2014, se generó alrededor de 22509 millones de toneladas de residuos mineros en España. (Jordán *et al.*, 2014).

Por tanto, los suelos degradados o contaminados y los espacios sin o con escaso suelo necesitan un actuación rápida y medidas de corrección capaces de ofrecer mayores perspectivas de mejora y una eficacia que nos garantice la restauración y recuperación de los suelos y de su calidad. Por esta razón, la producción de suelos a la carta, mediante el uso de diferentes residuos, es una buena alternativa como sustituto o enmienda mejoradora de suelos, solucionando los problemas ambientales mencionados anteriormente (pérdida, contaminación y degradación del suelo).

Considerando que la generación de residuos es inevitable, se debe valorar la reutilización de estos como componentes de suelos artificiales, que simulen las propiedades de suelos naturales, a través de mezclas sólidas estructuradas de materiales antropogénicos o naturales, inorgánicos u orgánicos, que cumplan con la definición mencionada en el siguiente apartado de Technosol. Estos se pueden utilizar como sustitutos de suelos naturales, degradados o contaminados por la acción humana, o donde sean escasos, con la finalidad de convertir los residuos en materiales reutilizables, disminuir el impacto ambiental y mejorar la calidad ambiental previa (Macías-García, 2006). La recuperación de la bahía de Portmán (Murcia, España) y la recuperación del terreno en la mina de Touro (La Coruña, España) son dos claros ejemplos que han demostrado que una adecuada gestión de residuos no solo encuentra un destino de reciclaje relativamente económico, sino que causa importantes beneficios ambientales y productivos a corto, medio y largo plazo (Macías, 2004).

Además, teniendo en cuenta que los suelos representan el tercer reservorio de carbono más importante y que la capacidad de secuestro de carbono de estos se puede incrementar aplicando enmiendas orgánicas (Milian, 2015), el uso de residuos como sustratos artificiales para restauración ambiental resulta una interesante medida de mitigación del cambio climático, produciendo una mayor fijación de carbono y frenando las emisiones de gases de efecto invernadero tras su aplicación.

La tendencia actual para rehabilitar terrenos desnudos, restaurar espacios degradados y áreas afectadas por actividades extractivas consiste en combinar los diferentes materiales para construir un Technosol más equilibrado, empleando suelo de capaceo, tierras externas (tierras procedentes de obras cercanas, zonas urbanas, etc.) o residuos minerales de excavaciones y estériles de minas, cuando no son muy pedregosos, junto con enmiendas orgánicas (Alcañiz *et al.*, 2011). No obstante, en el futuro, se debería tender a la preparación de enmiendas ajustadas a cada tipo de restauración en función de las características fisicoquímicas del suelo y al uso que se pretende desarrollar. También es conveniente tener en cuenta que para zonas desnudas o de climas áridos y semiáridos es necesario aplicar enmiendas orgánicas que sean efectivas a largo plazo y que contengan materia orgánica estable para el crecimiento de especies vegetales, evitando problemas futuros relacionados con la erosión.

1.2. Technosol

Los Technosols, también conocidos como Technosuelos o Tecnosuelos, se definen de acuerdo con la World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB, 2015) como un tipo de suelo que esté caracterizado por la presencia de alguna de las siguientes condiciones: un 20 % o más en volumen de artefactos (algo hecho, modificado o extraído de la tierra por el hombre), una geomembrana construida o un material técnico duro (material duro creado por el hombre que tiene propiedades diferentes a la roca natural) dentro de los primeros centímetros. Forman parte también los suelos de desechos tales como: cenizas, desechos de minería, escombros, escorias, lodos, pavimentos con su estructura no consolidada, rellenos, suelos con geomembranas e incluso suelos contruidos con materiales de origen antrópico.

También se pueden definir como la mezcla sólida de materiales naturales o sintéticos, minerales u orgánicos que, colocados en la superficie, permiten la integración de los componentes residuales antropogeomórficos en los ciclos biogeoquímicos, así como el cumplimiento de las funciones ambientales y productivas del suelo, mejorando la situación ambiental previa (Macías 2004, 2007).

Estos suelos, elaborados a partir de mezclas de residuos, han sido diseñados para ser usados en situaciones de contaminación o deterioro próximo, difícilmente reversible a escala humana y fuera de áreas consideradas de protección natural, con la finalidad de que cumpla las principales funciones del suelo y de generar un producto de valor agregado a partir de estas mezclas. Es importante conocer las condiciones del medio físico inicial, así como las características de los materiales residuales utilizados

y su evolución en el tiempo (Vittori et al., 2014), para conseguir un adecuado funcionamiento de estos suelos artificiales, ya que se ven fuertemente afectados por la naturaleza del material o la actividad que los originó. En ocasiones, debido al origen del material pueden contener sustancias tóxicas, en estos casos deben ser tratados con cuidado y realizar un estudio para aplicar las técnicas adecuadas para su recuperación, con la finalidad de poder emplear estos materiales posteriormente.

Los Technosols se pueden encontrar en todo el mundo donde la actividad humana ha propiciado la construcción de suelo artificial, sellando el suelo natural o extrayendo el material normalmente no afectado por los procesos superficiales. Por esta razón, los suelos preparados para su uso en vertederos, ciudades, carreteras, cenizas de carbón, derrames de petróleo, minas y otros depósitos similares, están incluido dentro de la categoría de Technosols (IUSS Working Group WRB, 2015).

1.3. El uso de los residuos como enmiendas mejoradoras del suelo y para preparación de Technosols

Otro problema de la sociedad actual es la escasez de recursos naturales no renovables y la generación de una gran cantidad de residuos por incremento de la industrialización y del consumismo. Muchos de los residuos generados son mal gestionados incluso siguiendo la legislación, filtrando o desechándose, terminando de esta forma en el medio ambiente alterando los ecosistemas. Como hemos mencionado en lo anteriores apartados, para solucionar el problema de la pérdida de suelos y de la recuperación de suelos degradados o contaminados se pueden aplicar estos residuos como enmiendas mejoradoras de suelos o como integrante de un Technosol. Los materiales que elaboren dichas enmiendas deben ser abundantes, disponibles y originadas de fuentes cercanas (Rinklebe *et al.*, 2006).

Se ha demostrado que la adición de residuos adecuados y con buenas prácticas de gestión en forma de enmiendas al suelo producen mejoras significativas en las condiciones fertilidad, estabilidad estructural, porosidad y actividad biológica en el suelo, provocando una mejora en el cumplimiento de las funciones productivas y ambientales, con beneficios como: mejora de la capacidad de depuración del agua , mayor amortiguación y resistencia frente contaminantes , incremento en la productividad agrícola y en la fijación y almacenamiento de carbono (Pérez-Estaban *et al.* , 2012).

Las enmiendas orgánicas más utilizadas en la recuperación de suelos pueden provenir de diferentes fuentes como la agricultura (estiércol, podas de especies arbóreas, etc.), la industria madera (serrín, astillas y otros derivados) y zonas urbanas (lodos de depuradoras de EDAR, componentes biodegradables de los residuos sólidos urbanos, podas de parques y áreas municipales, etc.). Una de

las técnicas más utilizadas es el compostaje, especialmente nos centraremos en el compostaje de lodos de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) porque es una de las enmiendas utilizadas en este trabajo.

El compostaje de los lodos de EDAR tuvo su inicio en la década de los 70. En la actualidad, este proceso está teniendo un mayor desarrollo como alternativa económicamente viable y ambientalmente segura para la estabilización de los lodos de depuración. Su objetivo final es la estabilización de la materia orgánica contenida en los lodos, favoreciendo la reutilización de este subproducto posteriormente en la agricultura, en la recuperación de suelos o la restauración de zonas degradadas (González, 2015). Según los datos del Registro Nacional de lodos, en España, se producen anualmente alrededor de 1.200.000 toneladas (en materia seca) de lodos de depuradora. Los principales usos posibles de este subproducto son: 80% en la aplicación de suelo con fines agrícolas, 8% el depósito en vertederos controlados, aproximadamente sobre un 4% de estos son incinerados y en una menor proporción su uso en suelos no agrícolas (recuperación de zonas degradadas o de áreas extractivas).

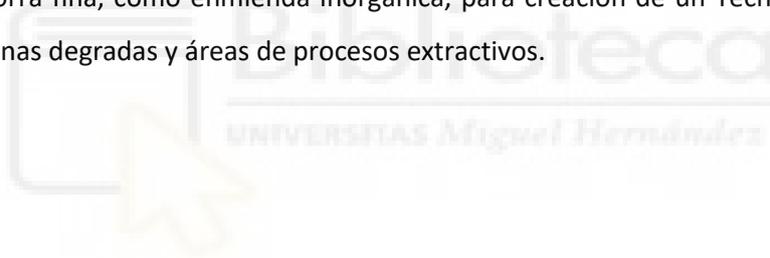
El uso de compost de EDAR como producto final del proceso de compostaje, posibilita el secuestro de carbono al suelo mediante su aplicación como enmienda orgánica o fertilizante y con otros propósitos diferentes, como la recuperación de suelos, la restauración de zonas degradadas y la creación de un sustrato artificial (Technosol) (Esteban, et al., 2010). Además, la aplicación de este subproducto como enmienda orgánica al suelo puede mejorar la infiltración y la retención de agua, disminuir las fluctuaciones de temperatura, reducir la erosión, mejorar la sanidad de los cultivos al favorecer un control natural de plagas y aportar nutrientes para el sustrato de las plantas. La sustitución de la turba por el compost de lodo de EDAR es una posible alternativa, causando una disminución de este recurso no renovable y, por tanto, ayuda a conservar áreas naturales de gran valor ecológico donde se produce su formación.

En el caso de las condiciones ambientales del clima mediterráneo, la preparación de un sustrato para la restauración de zonas degradadas requiere habitualmente una incorporación de materia orgánica con un doble propósito: aportar nutrientes a las especies vegetales y mejorar las propiedades físicas del nuevo sustrato artificial para incrementar la retención de agua y reducir el impacto de la erosión facilitando el aumento de la estabilidad de agregados. Además, en algunos estudios se ha comprobado que este material favorece el crecimiento de especies adaptadas a los ecosistemas mediterráneos.

Por otro lado, están los residuos inorgánicos, que generalmente son subproductos procedentes de los procesos extractivos mineros (escombros inertes, relaves de sulfuro de hierro, bentonitas recicladas,

etc.) y de la industria de la piedra natural (lodo de mármol, zahorras, fragmentos de piedra caliza, etc.) y de la construcción y demolición (escombros o materiales triturados). Estos son empleados como rellenos o sustratos en restauración de canteras, de descampados degradados o de terrenos desnudos. El residuo inorgánico seleccionado para nuestra mezcla fue zahorra fina artificial de 1/2mm. Este material está constituido por partículas total o parcialmente trituradas (en una proporción mínima de un milímetro) de piedra caliza pulimentable (mármol blanco marfil). El empleo de materiales granulométricos favorece la infiltración y reduce la erosión y la compactación en suelos (Macías-García, 2006).

La elección de los subproductos que constituyen los suelos artificiales debe realizarse atendiendo a las características fisicoquímicas del suelo, las necesidades de calidad del Technosol y al tipo de materiales disponibles originados cerca de la zona que se pretende restaurar, como hemos explicado en apartados anteriores. La finalidad es generar un medio edáfico artificial (Technosol) que sea eficaz y funcional, permitiendo la aparición de especies vegetales y dando una segunda vida a los materiales residuales. Por ello, este trabajo plantea el uso del compost de lodo de EDAR, como enmienda orgánica, y la zahorra fina, como enmienda inorgánica, para creación de un Technosol apto para la restauración de zonas degradadas y áreas de procesos extractivos.



2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es analizar determinadas propiedades físicas (densidad aparente y real, porosidad, capacidad de retención hídrica y conductividad hidráulica saturada) y físico-químicas (pH, conductividad eléctrica y porcentaje en materia orgánica total) en distintas mezclas binarias generadas con diferentes proporciones de un residuo orgánico, compost de lodo de EDAR, y uno inorgánico, zahorra fina, para valorar su posterior uso como technosoles o enmiendas mejoradoras del suelo. Se pretende contribuir al conocimiento del empleo de residuos con el fin de mejorar la calidad del suelo y fomentar la economía circular.

Para alcanzar esta finalidad, se realizarán los siguientes objetivos específicos en este trabajo:

- Preparación y determinación de las propiedades de los residuos.
- Preparación de las mezclas binarias con el residuo orgánico y el residuo inorgánico en distintas proporciones.
- Determinar las propiedades físicas y físico-químicas indicadas en las mezclas y comprobar si existen variaciones significativas en las mismas.
- Valoración de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla de compost de lodo de EDAR y zahorra fina y comparar estas con las propiedades del compost comercial analizado en el laboratorio.
- Obtener un technosol, o componente del mismo, apto para su empleo como sustrato en la restauración de áreas extractivas y degradadas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

En este apartado se van a enumerar los materiales utilizados en las tres fases principales del trabajo, que son: residuos, preparación de los residuos y caracterización de los residuos, tratamiento y procedimiento del tratamiento.

3.1.1. Residuos

Inicialmente se seleccionaron una serie de residuos, de distinta naturaleza y procedencia, atendiendo a la posibilidad de obtener con facilidad y su potencial de uso como componentes de technosuelos. El análisis de los mismos sirvió de base para la elección de qué subproductos se iban a utilizar para realizar el presente trabajo. Los residuos considerados fueron sometido a un acondicionamiento físico previamente a su análisis (triturado y tamizado) y fueron los siguientes elegidos:

- Paja cereal.
- Poda de palmera.
- Poda de olivo.
- Poda de sarmiento de viña.
- Acículas de pino.
- Compost de lodo EDAR, procedente de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) y de la planta de compostaje de Aspe (Alicante). Al lodo de la depuradora se le añade serrín y paja para favorecer la aireación, absorba la humedad y aporte carbono.
- Compost comercial de Compo Sana Universal. Fabricado en Alemania. El contenido básico de este material es: turba, perlita, agrosil (electrolitos activables que consiste en silicato de sodio parcialmente deshidrato y fosfato), cal y nutrientes (nitrógeno, fosfato, oxido de potasio, calcio, etc.).
- Lodo de mármol.
- Zahorra fina (1/2mm).
- Zahorra gruesa (mayor de 2mm).

3.1.2. Materiales de la fase de preparación de residuos

- Residuos orgánicos e inorgánicos mencionado en el subapartado anterior.
- Palas, sacos, cubos de basura y capazos.
- Tijeras de podar.
- Batidora de vaso y molinillo.
- Tamices con una malla de tamaño 1 y 2mm.

- Mazo, para fragmentar los agregados.
- Porta muestras.

3.1.3. Materiales de la fase de caracterización de residuos, tratamientos y procedimiento de los tratamientos

- Residuos y mezclas binarias.
- Frasco lavador relleno con agua destilada y dosificador para botellas de reactivos.
- Porta muestras de diferentes tamaños.
- Cilindros de PVC, crisoles y cubetas.
- Probetas con una capacidad de 5ml, 25ml, 50ml, 100ml y 500ml.
- Embudos de diferentes tamaños y materiales.
- Soporte y pinzas metálicas para el soporte, se usarán con el embudo grande de plástico.
- Filtros de papel de diferentes tamaños.
- Botes de 50ml y tubos de ensayo.
- Pipetas, varillas de vidrio, espátulas, cucharillas y gradillas.
- Tres mangueras, una se emplea como entrada de agua por el extremo superior de un cilindro de PVC; otra como desagüe, que está unido al embudo grande; y la última, como salida del exceso de agua.
- Malla de grosor de 1mm y gasa, ambas cortadas con formar circular y con dos tamaños distintos de diámetro (2,5mm y 120mm aproximadamente).
- Llave de paso de agua.
- Desecador. Formado por una tapa, un cuerpo y una rejilla. En la zona del cuerpo debe estar puesto el desecante (gel de sílice con un colorante).
- Estufa, con una temperatura de 105°C.
- Pie de rey, con una sensibilidad 0,01mm.
- Horno eléctrico de mufla.
- Conductímetro, con dos sondas, una mide la temperatura y la otra la conductividad eléctrica de la muestra.
- pH-metro, con una sola sonda que mide el pH y la temperatura de la muestra.
- Balanza digital, con una sensibilidad 0,5g, para anotar el peso de los cilindros de PVC de los residuos inorgánicos para los cálculos de densidad aparente.
- Balanza digital de precisión, con sensibilidad 0,001mg y con una capacidad máxima de peso de 360,000g para el resto de los procedimientos.
- Agitador y cronometro digital.

3.2. Metodología

3.2.1. Preparación de muestras inicial

Este trabajo parte de un primer análisis con diferentes residuos orgánicos (compost comercial, paja, poda de palmera, poda de olivo, acículas de pino, sarmiento de viña y compost de lodo de EDAR) e inorgánicos (lodo de mármol, zahorra fina (1/2mm) y zahorra gruesa (mayor de 2mm)) que estuvieron depositado en sacos, capazos y contenedores de plástico durante varias semanas en el invernadero de la Universidad ubicado en el campus de Elche, para garantizar que disminuyera el exceso de humedad que pudieran presentar algunos de los residuos, tras su recogida. En algunos casos, los residuos orgánicos más leñosos fueron cortados en trozos más pequeños mediante tijeras de podar, previamente a su troceado mecánico.

Posteriormente, en el laboratorio, todos los residuos orgánicos, excepto compost de lodo de EDAR, fueron triturados mediante una batidora de vaso o molinillo y tamizados por mallas 1mm y 2 mm. Respecto al resto de enmiendas, tanto el lodo de mármol como el compost de lodo de EDAR fueron fragmentados de manera manual o mediante un mazo y, por otro lado, la zahorra fina y la gruesa no necesitaron disminuir su tamaño.



Figura 1. Muestras de los residuos sin triturar.

Figura 2. Muestras tras el acondicionamiento físico.

3.2.2. Caracterización de residuos

La finalidad de analizar los diversos parámetros considerados en este TFG, es conocer determinadas propiedades de los residuos que, posteriormente, vamos a usar en las mezclas. Tras la preparación inicial, se sometieron todos los residuos a los mismos ensayos. No obstante, en este trabajo nos centraremos en los materiales seleccionados para las mezclas, que fueron: el compost de lodo EDAR, como enmienda orgánica, y en la zahorra fina (1/2mm), como enmienda inorgánica. Además, también

añadiremos la caracterización del compost comercial de Compo Sana Universal, ya que es interesante comparar sus propiedades con las obtenidas en nuestros tratamientos.

Los ensayos se han realizado en los laboratorios del edificio Alcudia, adscritos al Grupo de Edafología Ambiental de la UMH, siguiendo los protocolos de análisis basados en las normas UNE, métodos oficiales de análisis y los referenciados en trabajos de investigación consultados, citados en el apartado de bibliografía. Para reducir el error experimental se realizaron 5 repeticiones de cada ensayo por parámetro analizado en cada residuo. A continuación, se exponen los parámetros analizados para caracterizar los residuos y cuyo análisis figura en la tabla 1:

- 1) **Densidad aparente (D_{ap}):** obtenida mediante una masa conocida de la muestra de residuo introducida en un cilindro de diámetro (d) y altura total (H) conocidos. Medimos cinco veces la altura desde el residuo hasta el final del cilindro (h'), mediante el pie de rey, y sacamos la media. Restamos h' a H y obtenemos la altura de la muestra (h), con ella y el radio obtenemos el volumen. Dividimos la masa del residuo por el volumen y calculamos la densidad aparente (UNE-EN-13040:2008):

$$h(\text{cm}) = H(\text{cm}) - h'(\text{cm}) \quad V_{\text{cilindro}}(\text{cm}^3) = \pi \cdot (r^2) \cdot h$$

$$D_{ap}(\text{g/cm}^3) = \frac{m(\text{g})}{V(\text{cm}^3)}$$

- 2) **Densidad real (D_r):** se calculó en laboratorio siguiendo la norma UNE-EN-17892-3, este método emplea un picnómetro para las mediciones de densidad real, aunque debido a la gran cantidad de partículas pequeñas que componían los residuos orgánicos se hizo una pequeña modificación al método. La densidad real se ha determinado mediante el uso de probetas de 50ml, donde se introdujeron diferentes muestras de pesos conocidos y una malla (diámetro de 2,5mm) con una gasa para evitar que las partículas de menor tamaño estuvieran en suspensión. Se pesa varias cantidades de muestras de residuo (m_1). Se llena la probeta con agua destilada hasta llegar a los 50ml, se engrasa con ayuda de una pipeta y se introduce la malla con la gasa. Se pesa la probeta preparada y se le suma m_1 (m_2). Se vacía la probeta, se incorpora m_1 y se rellena hasta 40ml con agua destilada, se añade la malla con la gasa y se engrasa hasta los 50ml. Se vuelve a pesar (m_3). Una vez obtenidos las diferentes masas se calcula la densidad real de cada muestra con la siguiente ecuación:

$$D_r(\text{g/cm}^3) = \frac{m_1}{(m_2 - m_3)} = \frac{m(\text{g})}{V(\text{cm}^3)}$$

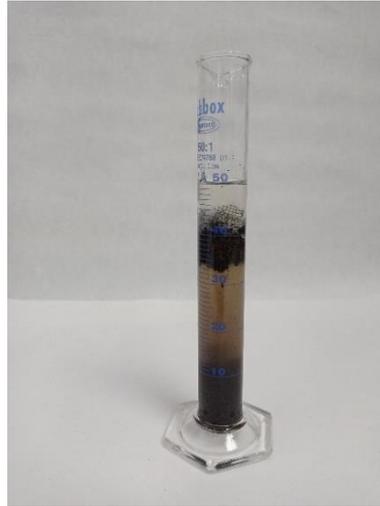


Figura 3. Ensayo de la densidad real.

- 3) **Porosidad (ϵ):** porcentaje del volumen de suelo no ocupado por sólidos. Con los datos de la densidad aparente y real se calcula de la siguiente manera la porosidad:

$$\epsilon = \frac{V_t}{V_p} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{D_{ap}}{D_r}$$

- 4) **Conductividad eléctrica (CE):** se mide con el conductímetro, previamente calibrado con los patrones estandarizados de conductividades conocidas, en una proporción de 1:5 de volumen/volumen (UNE-EN-13038:2001). Para preparar las muestras, hemos añadido 6ml de muestra y 30ml de agua destilada, mediante un dosificador, en botes de 50ml. Cerramos y agitamos los botes antes de repartirlos equitativamente en dos botes mayor tamaño, antes de cerrar estos, los rellamos hasta arriba de papel para asegurarnos que estén bien apretados y no haya derramamiento de muestra. Agitamos las muestras durante una hora. Tras acabar de agitarse, debemos filtrar y medir la muestra a temperatura ambiente (25°C) en menos de una hora, para asegurarnos que no se produzcan cambios en la composición iónica. Entre cada medición hay que limpiar el aparato con agua destilada y secar con papel. Tras la finalización del ensayo, las muestras fueron introducidas en tubos de ensayo y se pusieron a enfriar en el frigorífico, para analizarlas posteriormente a este trabajo.
- 5) **Porcentaje de materia orgánica total ($W_{m.o.}$):** Calentamos los crisolo durante 16 h en el horno de mufla a 550°C y los dejamos enfriar en un desecador. Pesamos la masa de los crisoles una vez fríos (m_0). Depositamos entre 2-3 gramos de muestras de residuo por cada crisol y los pesamos. Dejamos secar en estufa a 105°C durante 4 horas y, posteriormente, los depositamos a enfriar en un desecador hasta que alcancen una temperatura ambiente y lo pesamos (m_1). Colocamos los crisoles y su contenido en el horno de mufla, elevar la temperatura

gradualmente durante 1h aproximadamente hasta alcanzar 450°C y mantener esta temperatura durante 6h. Dejar los crisoles con la muestra en un desecador hasta que alcance la temperatura ambiente y pesar (m_2) (UNE-EN-13039:2001). Cálculos:

$$W_{mo} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \cdot 100$$

- 6) **Capacidad de retención hídrica (%C.R.H.):** corresponde al máximo de agua que el suelo puede retener en las condiciones en las que el drenaje esta libremente asegurado, es decir, es la cantidad de agua retenida por el suelo cuando este está al 100%. Para su cálculo pesamos cinco muestras de 10-20 gramos de cada residuo en seco y se colocan en embudos medianos de plástico que contenga un filtro (m_m), que ha estado mojado durante 24h (m_f) y ha sido pesado. Se satura lentamente con agua hasta que supere la superficie del residuo. Se cubre con film de aluminio y se deja drenar libremente durante 24 horas. Se vuelve a pesar y se determina el peso de agua que ha quedado retenido por el residuo (m_h) (Moorberg y Crouse, 2021). Calculamos la capacidad de retención hídrica (CHR) mediante las siguientes fórmulas:

$$\%C.R.H. = \frac{\text{Peso de agua retenida por residuo}}{\text{Peso residuo seco}} \cdot 100 = \frac{(m_h - m_m)}{(m_m - m_f)} \cdot 100$$



Figura 4. Ensayo de %C.R.H.

- 7) **Conductividad hidráulica saturada (K_{hs}):** describe la funcionalidad de un sistema poroso, englobando propiedades tales como, cantidad, tamaño, morfología, continuidad y orientación de los poros (Sch *et al.*, 1997). Utilizaremos un cilindro de PVC, que presenta una tela permeable en uno de los extremos, por donde ascenderá el agua por capilaridad. Las muestras serán depositadas dentro de los cilindros hasta casi completarlo (aproximadamente falten entre 3-4 centímetros para llenarlo del todo) y las humedeceremos. Estas serán colocadas en una bandeja, la cual llenaremos hasta que cubra dos dedos del cilindro para garantizar la saturación, estarán sumergidos entre 24-48 horas. A partir de ese periodo transcurrido, agregaremos encima de la muestra una malla de 1mm de grosor y una gasa, ambas cortadas con un diámetro de 120 cm aproximadamente, para evitar que las partículas de menor tamaño

escapen. El cilindro se colocará encima de un embudo de plástico grande, con el que recogeremos las medidas de volumen (V). El embudo estará sujeto por unas pinzas unidas a un soporte. Encima del cilindro que contiene la muestra, se le añadirá otro cilindro que tiene unido un trozo de manguera, por donde saldrá el exceso de agua. Encima de este segundo cilindro introduciremos un extremo de una porción de una manguera. El otro extremo estará unido al grifo que nos suministrará el caudal (Figura 6). A continuación, llenaremos el cilindro hasta alcanzar la mitad del orificio de la manguera por donde sale exceso de agua. Regulando el grifo buscaremos el caudal que más se asemeje a un régimen estacionario (el caudal de entrada a través de la manguera sea igual al de la salida). Una vez conseguido esto, realizaremos cinco mediciones de volumen, con ayuda de una probeta (la selección de la probeta dependerá del flujo de agua), y de tiempo, mediante un cronometro digital. En este caso las repeticiones se realizarán quitando una cantidad de residuo y removiendo la muestra entre cada repetición. Los datos necesarios para sacar K_{hs} son: h (altura del cilindro correspondiente al que agua que se mantiene cte. por encima de la muestra), L (altura de la muestra), Δt (tiempo transcurrido desde comenzó a recogerse el agua en la probeta hasta la medición final de volumen), V (volumen de agua recogido en la probeta) y A (área de sección circular horizontal del cilindro) (Figura 5). Fórmula:

$$K_{hs}(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}) = \frac{V(\text{cm}^3)}{A(\text{cm}^2) \cdot \Delta t(\text{h}) \cdot \left[\frac{h(\text{cm}) + L(\text{cm})}{L(\text{cm})} \right]} = \frac{V}{(2 \cdot \pi \cdot r) \cdot \Delta t \cdot \left[\frac{h + L}{L} \right]}$$

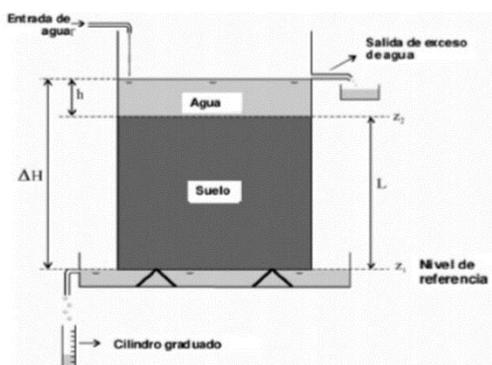


Figura 5. Esquema del ensayo de K_{hs} .



Figura 6. Ensayo de K_{hs} .

- 8) **pH:** se mide en un pH-metro previamente calibrado mediante los patrones estandarizados (4,7 y 9), en una proporción de masa/volumen de 1:25 (BOE 17, 1982). Para preparar las muestras, hemos añadido 1,2g de muestra y 30ml de agua destilada, mediante un dosificador, en botes de 50ml. Cerramos y agitamos los botes antes de repartirlos equitativamente en dos botes mayor tamaño, antes de cerrar estos, los rellamos hasta arriba de papel para asegurarnos

que estén bien apretados y no haya derramamiento de muestra. Agitamos las muestras durante 30 minutos, los dejamos reposar otros treinta minutos y medimos. Tras cada medición hay que limpiar la sonda con agua destilada y secar con papel.

Tabla 2. Caracterización de los residuos.

RESIDUO	D _{ap} (g/cm ³)	D _r (g/cm ³)	ε (%)	pH	C.E. (μS/cm)	C.R.H. (%)	Khs (cm h ⁻¹)	W _{m.o.} (%)
C. lodo de EDAR	0,46	0,87	46,2	8,61	2352	84,4	284	59,0
Zahorra fina (1mm)	1,61	2,68	40,1	9,87	113	20,1	8098	0,0
C. comercial	0,42	0,68	35,0	4,83	1200	105,4	239	91,0

Respecto a los residuos de los tratamientos, se observan diferencias importantes entre los parámetros, excepto por su porosidad, la cual ronda en ambos entre un cuarenta y cincuenta por ciento, y su pH, que es básico para ambos residuos. Una de las razones principales por las que se ha seleccionado estos residuos para realizar los tratamientos, es la conductividad eléctrica (C.E.). En el caso de la zahorra fina la C.E. es baja y en el compost de lodo de EDAR, es muy alta. Esto nos indica que la mezcla de ambos podría ayudar que los valores se neutralizaran.

Por otro lado, los datos de el compost comercial no se emplearán hasta el apartado de resultados y discusión, ya que compararemos nuestros tratamientos con sus características.

3.2.3. Tratamiento

Como se ha mencionado anteriormente, en caso de que fuera necesario, se realizó un acondicionamiento físico al residuo (fragmentación, tamizado, etc.), a fin de conseguir una buena homogeneidad de las mezclas a preparar.

Una vez analizado los dos residuos, se establecieron cinco tipos de mezclas, que aparece representado en la siguiente tabla:

Tabla 2. Tratamiento mezcla residuo-residuo en función de la proporción.

Residuo inorgánico	Residuo orgánico	Porcentaje de residuo/residuo (v/v)				
		100/0	75/25	50/50	25/75	0/100
Zahorra fina (1/2mm)	Compost de lodo de EDAR	100/0	75/25	50/50	25/75	0/100

La elección de las proporciones de las mezclas en volumen, y no en peso, se basó en que las enmiendas se aplican en volumen de material en las labores agrícolas, por tanto, a la hora de aplicar nuestro tratamiento se hará con esas mismas unidades.

A partir de aquí calculamos la masa (g) que era necesaria de cada residuo en relación con su volumen (cm³) correspondiente, mediante la densidad aparente (g/cm³) que obtuvimos en la caracterización de ambos residuos. La fórmula empleada en este cálculo es la siguiente:

$$V1 + V2 = \frac{m1}{D_{ap1}} + \frac{m2}{D_{ap2}}$$

Las masas obtenidas quedan resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 3. Masas de residuos según su proporción en volumen.

Proporción volumen/volumen (v/v)	Masa de C. lodo de EDAR (g)	Masa de Zahorra fina (g)
100/0	86,690	0
75/25	65,017	67,027
50/50	43,345	134,055
25/75	21,672	201,820
0/100	0	268,110

A la hora de preparar los ensayos debemos tener en cuenta las dimensiones y las proporciones que nos indican los protocolos de las propiedades físicas y físico-químicas con los que hemos trabajado en el laboratorio, deberemos multiplicar o dividir las masas de los dos residuos por el mismo número para que cumplan con las cantidades establecidas en ellos y a la vez que cumplan con nuestras proporciones volumen/volumen.

3.2.4. Procedimiento del tratamiento

Tras realizar los cálculos de la cantidad de residuo en gramos que se debía añadir para cumplir con las pautas establecidas del tratamiento, se procede a preparar para cada ensayo cinco muestras de las proporciones 75/25, 50/50 y 25/75 de compost de lodo de EDAR y zahorra fina. En el caso de las proporciones donde cada residuo está al 100 %, no es necesario calcularlo, ya que en la caracterización de los residuos están representados estos datos. En total se preparan quince muestras para cada ensayo, excepto para el porcentaje de materia orgánica ($W_{m.o.}$) que se calculó estequiométricamente, porque el compost de lodo de EDAR es el único de ambos residuos que contiene materia orgánica.

A partir de las masas conocidas y el número de muestras necesarias para cada ensayo, calculamos la densidad aparente, la densidad real, porosidad, pH, C.E., % C.R.H. y K_{hs} para cada mezcla de residuo-residuo.

Respecto a la densidad aparente, rellenamos cinco veces, para cada proporción, un cilindro de PVC, con una altura total y un diámetro conocidos, con las siguientes masas: 396,13g (75% de compost de

lodo de EDAR y 25% de zahorra fina), 354,81g (50% de compost de lodo de EDAR y 50% de zahorra fina) y 446,99g (25% de compost de lodo de EDAR y 75% de zahorra fina). Una vez obtenido el volumen, dividimos la masa por este y determinamos la densidad aparente para cada proporción. Por otro lado, La densidad real la calculamos mediante el método del picnómetro modificado, pero debido a la dificultad de obtener resultados homogéneos, a causa de las burbujas de aire que se formaban entre las partículas de menor tamaño de la enmienda orgánica, se decidió que finalmente se calcularían estequiométricamente. Una vez obtenidos ambos datos, procedimos a calcular la porosidad.

Para la conductividad eléctrica (C.E.), se aplicó los mismos volúmenes mencionados en el apartado de caracterización de los residuos. Teniendo el volumen y la densidad aparente de cada residuo conocidos, se calculó la masa de cada proporción mediante la fórmula de la densidad aparente. Estas fueron las masas obtenidas:

Tabla 5. Masas de residuos aplicadas en la C.E.

Proporción volumen/volumen (v/v)	Masa de C. lodo de EDAR (g)	Masa de Zahorra fina (g)
75/25	2,074	2,410
50/50	1,383	4,821
25/75	0,691	7,231

Preparamos treinta botes de 50ml, enumerados del 1 al 15, quince de ellos los llenaremos con las masas calculadas para cada residuo y le añadiremos 30ml de agua destilada a cada uno, mediante el dosificador. Los agitaremos y, mientras, prepararemos los otros quince botes para filtrar. Una vez filtrado, mediremos la muestra.

Por otra parte, para el pH, también utilizamos las mismas cantidades mencionadas en la caracterización de los residuos. Primero, calcularemos el volumen total de cada proporción de mezcla que necesitamos, mediante las densidades aparentes de 75/25 (0,735g/cm³), 50/50 (0,987g/cm³) y 25/75 (1,249 g/cm³) calculadas anteriormente y la masa total (1,2g), con la siguiente formula:

$$V_T (ml) = \frac{m_T (g)}{D_{ap} (\frac{g}{ml})}$$

A continuación, para determinar las masas de los residuos que necesitamos para las mezclas, multiplicamos el volumen total por el porcentaje de volumen de cada residuo y por la densidad aparente de cada uno:

$$m_{residuo}(g) = \% \text{ de volumen de cada residuo} \cdot V_T (ml) \cdot D_{ap} \text{ del residuo}(g/ml)$$

Estas fueron las masas obtenidas a partir de los cálculos anteriores:

Tabla 6. Masas de residuos aplicadas en la pH.

Proporción volumen/volumen (v/v)	Masa de C. lodo de EDAR (g)	Masa de Zahorra fina (g)
75/25	0,564	0,655
50/50	0,280	0,976
25/75	0,110	1,158

Dispondremos quince botes de 50ml con sus correspondientes tapaderas, enumerados del 1 al 15. Añadiremos 30ml de agua destilada con el dosificador a nuestras muestras preparadas, los pondremos en el agitador y, posteriormente a reposar. Tras el reposo, mediremos.

En cuanto la retención hídrica, seguiremos el mismo protocolo utilizado para la caracterización de nuestros subproductos. Prepararemos quince embudos y quince filtros (mojados), cinco para cada mezcla binaria, a los que añadiremos las siguientes masas: 22,007g (75% de compost de lodo de EDAR y 25% de zahorra fina), 18,221g (50% de compost de lodo de EDAR y 50% de zahorra fina) y 22,349g (25% de compost de lodo de EDAR y 75% de zahorra fina). Se satura lentamente con agua hasta que supere la superficie del residuo y se removerá con una varilla de vidrio para que se impregne bien la muestra. Posteriormente, mediremos al cabo de veinticuatro horas.



Figura 7. Muestras de las mezclas binarias en ensayo de % C.R.H.

Finalmente, para el ensayo de conductividad hidráulica saturada, prepararemos tres cilindros de PVC, con una altura y diámetro conocidos, con estas masas: 924,309g (proporción 75/25 de C. de lodo de EDAR y Z. fina), 1241,8g (proporción 50/50 de C. de lodo de EDAR y Z. fina) y 1787,948g (proporción 25/75 de C. de lodo de EDAR y Z. fina). Se modificó una parte del método para K_{hs} explicado en los apartados anteriores. En vez de quitar cantidad de muestras por cada repetición, para realizar el experimento sobre muestras diferentes, realizamos las repeticiones de esta manera: sacábamos la

muestra del cilindro, la depositamos en una cubeta, la removíamos manualmente o con una varilla durante un par de minutos, la retornábamos al cilindro, la humedecíamos de nuevo y la volvíamos a introducir en la cubeta con dos dedos de agua durante otras 24 horas. Se decidió hacer así, a causa de que la gran cantidad de partículas pequeñas de la enmienda orgánica que compactaba nuestra muestra y falseaba los resultados.

3.2.5. Cálculos estadísticos

Se ha determinado la media y la desviación estándar (estadística descriptiva) para los resultados obtenidos de las mezclas binarias para todos los ensayos realizados. Además, para poder determinar si existen diferencias significativas sobre los resultados de las propiedades físicas, se ha procedido a realizar el análisis de varianza (ANOVA) de un factor y se ha aplicado el test de Tukey de comparaciones múltiples entre poblaciones.

Los cálculos y la estadística entre las variables se han realizado mediante los programas EXCEL (Office, v. 2016) y IBM SPSS Statistics (v.26).



4. RESULTADO Y DISCUSIÓN

Los resultados que se muestran a continuación son los correspondientes al análisis de las propiedades físicas y físico-químicas de las mezclas binarias de los residuos realizadas en el laboratorio, para poder definir e interpretar su funcionalidad como componentes de un Technosol.

4.1. Densidad aparente, densidad real y porosidad

En primer lugar, se presentan los datos relativos a la densidad aparente (D_{ap}), real (D_r) y porosidad(ϵ), parámetros que están muy relacionados entre sí. La tabla 6 muestra los resultados para las mezclas de compost de lodo de EDAR y zahorra fina en una proporción volumen/volumen (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 y 0/100), indicándose los valores medios procedentes de las réplicas y la desviación estándar (σ).

La densidad aparente y la real evolucionan de maneras muy similares. A medida que vamos aumentando el porcentaje de zahorra fina y disminuyendo el porcentaje de compost de lodo de EDAR la densidad aparente y real aumenta. Esto ocurre, en caso de la densidad aparente, porque esta varía en función de la textura, del contenido de materia orgánica (m.o.) y del tipo de manejo que se le aplique al sustrato. Puesto que la materia orgánica pesa mucho menos que un volumen igual de sólidos minerales, la densidad de partículas es mas baja cuando mayor sea el contenido en m.o. (Buckman y Brady, 1977). Además, si observamos la table 6, la densidad aparente siempre es menor a la densidad real. Aun en suelos extremadamente compactados, esta relación siempre es así, porque las partículas nunca llegan entrelazarse perfectamente, es decir, el espacio poroso puede verse reducido por la compactación, pero nunca llega a eliminarse totalmente (Ingaramo *et al.*, 2007). La densidad real y la aparente solo se asemeja a las del compost comercial ($D_{ap} = 0,42\text{g/cm}^3$ y $D_r = 0,68\text{g/cm}^3$) cuando el tratamiento esta formada al 100% por el compost de lodo de EDAR.

En cuanto a la porosidad, representa el porcentaje de huecos que existen respecto al volumen. Podemos apreciar que los cambios de aplicación de residuos producen pequeñas diferencias en el resultado de la porosidad, es decir, si disminuimos el porcentaje de la enmienda orgánica y aumentamos el de la enmienda inorgánica, esta disminuye. Como era de esperar, este parámetro aumenta a medida que disminuye la densidad aparente y la real. La porosidad en todas las proporciones de residuo-residuo supera a la del compost comercial ($\epsilon = 35\%$).

Tabla 6. Densidad aparente, densidad real y porosidad de las diferentes proporciones del tratamiento.

Mezcla C. lodo EDAR- Z. fina (%)	D _{ap}		D _r		ε	
	Media (g/cm ³)	σ	Media (g/cm ³)	σ	Media (%)	σ
100-0	0,46	0,01	0,87	0,10	46,2 a	7,1
75-25	0,73	0,04	1,32	0,07	44,2 a	4,1
50-50	0,99	0,04	1,78	0,04	44,3 a	2,9
25-75	1,25	0,03	2,23	0,02	43,9 a	1,6
0-100	1,61	0,05	2,68	0,02	40,1 a	1,6
F	732 ***		749 ***		1,58 ns	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p=0,05$, $0,01$, y $0,001$, respectivamente. Por columnas, valores medios con letras en común (a) son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

Con relación a los factores que podemos apreciar en la tabla, conviene indicar la tendencia observada a partir de la significancia estadística dada por los valores del test de análisis de varianza. Por un lado, el incremento de zahorra fina y la disminución de compost de lodo EDAR en las mezclas, muestra la tendencia de afectar significativamente a la densidad aparente y real, como se aprecia en los valores de las “F” de ambas columnas. Sin embargo, en el valor de “F” para la porosidad se muestra una nula significancia estadística (“ns”), este dato nos puede conducir a pensar que la variación en el porcentaje de volumen de los residuos resulta indiferente para la porosidad de nuestro tratamiento.

4.2. Porcentaje de materia orgánica

El porcentaje en materia orgánica ($W_{m.o.}$) es la fracción de materia orgánica total que contiene un suelo o un residuo orgánico. En la tabla 7 se muestra la variación de los valores en el porcentaje de materia orgánica en función de la proporción de residuo-residuo que presenta la mezcla. Conforme disminuye el compost de lodo de EDAR también lo hace a su vez este parámetro. Esto se debe a que la zahorra fina es una enmienda inorgánica y, por tanto, no tiene materia orgánica. Por esta razón, en el momento en que la proporción es del 100% de zahorra fina, el porcentaje de m.o. es igual a cero. Ninguna de las mezclas realizadas supera a la del compost comercial ($W_{m.o.} = 91\%$).

Tabla 7. Porcentaje de materia orgánica de las diferentes proporciones del tratamiento.

Mezcla C. lodo EDAR- Z. fina (%)	W _{m.o.}	
	Media (%)	σ
100-0	59,0	1,1
75-25	44,2	0,8
50-50	29,5	0,5
25-75	14,8	0,3
0-100	0	0
F	5957 ***	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p=0,05$, $0,01$, y $0,001$, respectivamente. Por columnas, valores medios con letras en común (a) son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

4.3. Capacidad de retención hídrica y conductividad hidráulica saturada

A continuación, se exponen los resultados de la capacidad de retención hídrica (%C.R.H.) y la conductividad hidráulica saturada (K_{hs}), expresados en porcentaje y en centímetro por hora a la menos uno, junto al análisis de varianza de una vía, para ver la significancia del porcentaje de volumen de los residuos aplicados, se muestra en la tabla 8. Estos dos parámetros están muy relacionados con la porosidad y el porcentaje de materia orgánica explicados en los anteriores apartados

La capacidad de retención hídrica se ve incrementada por el contenido de materia orgánica, como podemos observar en la tabla 8, conforme aumenta el porcentaje de compost de lodo de EDAR también lo hace a su vez el porcentaje de capacidad de retención hídrica. Ninguno de los resultados obtenidos de este parámetro supera al del compost comercial (C.R.H. = 105%).

Estrechamente relacionada con la porosidad, se encuentra la conductividad hidráulica saturada. Este parámetro nos permite describir las características del sistema poroso de un suelo, determina la capacidad de hacer crecer las plantas y la disponibilidad de nutrientes, agua y aire (Vaccaro, 2019). Al contrario de lo que sucedía con la capacidad de retención hídrica, el valor de conductividad hidráulica saturada aumenta cuando menor cantidad de materia orgánica hay en nuestra mezcla, es decir, cuanto mayor porcentaje de zahorra fina tenga la mezcla, mayor será el valor de K_{hs} . Todos los resultados obtenidos de este parámetro son mayores a los de compost comercial ($239,4 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) analizado en el apartado de caracterización de residuos.

Como era esperables, ambas propiedades físicas se ven afectada significativamente por el porcentaje de los materiales que se usaron para las mezclas.

Tabla 8. Capacidad de retención hídrica y conductividad hidráulica saturada de las diferentes proporciones del tratamiento.

Mezcla C. lodo EDAR- Z. fina (%)	C.R.H.		K _{hs}	
	Media (%)	σ	Media (cm · h ⁻¹)	σ
100-0	84,4	11,6	284 a	4
75-25	55,4	4,8	305 a	4
50-50	45,0	1,4	304 a	21
25-75	31,9	6,7	1069	2
0-100	20,1	0,7	8009	691
F	93,7 ***		488***	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p=0,05$, $0,01$, y $0,001$, respectivamente. Por columnas, valores medios con letras en común (a) son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

4.4. Conductividad eléctrica y pH

En este último apartado, se presenta los resultados de la conductividad eléctrica (C.E.) y el pH. La tabla 9 muestra los resultados para las mezclas de compost de lodo de EDAR y zahorra fina en una proporción volumen/volumen (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 y 0/100), indicándose los valores medios procedentes de las réplicas y la desviación estándar (σ). Ambas propiedades físicas se ven afectada significativamente por las dosis aplicadas de los materiales para las mezclas.

En cuanto C.E., mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato. Este parámetro se ve influenciado por el contenido de agua, las fracciones finas y la presencia de iones intercambiables en el sustrato. Conforme aumente el porcentaje de zahorra fina, la conductividad eléctrica disminuye. Esto es a causa de la menor presencia de materia orgánica y, por tanto, el intercambio catiónico también se ve afectado. Ninguno de los valores obtenidos es igual al del compost comercial (C.E.= 1200), pero la proporción de mezcla que más se acerca es la de 25/75.

El pH está relacionado, con el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo. Este parámetro, además, influye en la disponibilidad de nutrientes para las especies vegetales y en la solubilidad, movilidad y disponibilidad de contaminantes. Como era esperable, el pH en todas las mezclas es básico o muy básico ($pH > 9,5$), por tanto, no se asemeja al pH de compost comercial ($pH=$

4,83). La zahorra fina es un residuo que se origina en canteras de piedra caliza y, por tanto, tiene un pH básico. El compost de lodo de EDAR está formado principalmente por lodos de depuradoras, cuya composición es muy variable y esta determinada por las características del agua residual tratar, por lo procesos de depuración empleados, por el tratamiento a que es sometido el fango para estabilizarlo y por los materiales empleados en el proceso de compostaje. En nuestro caso el pH del compost de biosólido empleado tiene un pH alcalino, aunque menos acusado que el de la zahorra fina.

Tabla 9. Conductividad eléctrica y pH de las diferentes proporciones del tratamiento.

Mezcla C. lodo EDAR- Z. fina (%)	C.E.		pH	
	Media ($\mu\text{S/cm}$)	σ	Media	σ
100-0	2553	51	8,61	0,01
75-25	2212	82	8,71	0,02
50-50	1734	144	8,91	0,03
25-75	1027	67	9,16	0,03
0-100	114	8	9,87	0,02
F	622 ***		2828 ***	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p=0,05$, $0,01$, y $0,001$, respectivamente. Por columnas, valores medios con letras en común (a) son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo, derivadas de los objetivos planteados en el mismo indican que:

- El aumento de dosis de enmienda orgánica se traduce en una reducción significativa de la densidad aparente y real en las mezclas obtenidas. Por lo contrario, la porosidad y el porcentaje de materia orgánica aumentaba cuando mayor era la proporción de compost de lodo de EDAR. No obstante, el cambio de las dosis de ambos residuos no parecía afectar significativamente a la porosidad. Todos los valores de porosidad de las mezclas superaban al valor del compost comercial.
- El porcentaje de retención hídrica era mayor cuando aumentábamos el porcentaje de compost lodo de EDAR en la mezcla, por el aporte de materia orgánica. En cambio, la incorporación de dosis crecientes de zahorra fina favorecía el incremento de la conductividad hidráulica saturada en las mezclas.
- Se constató que con la aplicación superficial del agua en los ensayos de conductividad hidráulica, se producía un movimiento descendente rápido de la fracción mas fina del residuo de compost de lodo de EDAR, hecho que, con el tiempo, modificaría la velocidad de lixiviación del agua en los technosuelos que contuviesen este subproducto.
- La conductividad eléctrica disminuye a medida que aumentamos la dosis de residuo inorgánico. La mezcla de ambos residuos en la proporción 25/75 era la que más se asemejaba a la del compost comercial. Respecto al pH, en todas las mezclas era alcalino.
- Ninguna de las propiedades analizadas de las mezclas era similar al 100% a las del compost comercial.
- Los tratamientos de 75/25, 50/50 y 25/75 de residuo-residuo se podrían aplicar como: sustrato artificial en zonas con escasa profundidad de suelo, parques urbanos, zonas con suelos básicos o en restauración de zonas degradadas o extractivas; relleno en canteras, enmienda reguladora de pH, acidez y que favorezca la inmovilización de metales pesados.

- El empleo de ambas enmiendas supone la posibilidad de reutilizar estos residuos en la preparación de un suelo artificial (technosol), como sustituto de un medio edáfico. Además, fomentamos el desarrollo sostenible y la economía circular y solucionamos dos de los grandes problemas actuales, la pérdida de suelo y la reutilización de residuos.



6. BIBLIOGRAFÍA

- AEONOR. UNE-EN-13038:2001. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de conductividad eléctrica.
- AEONOR. UNE-EN-13039:2001. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación del contenido en materia orgánica y de las cenizas.
- AEONOR. UNE-EN-13040:2008. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Preparación de la muestra para ensayos físicos y químicos. Determinación del contenido de materia seca, del contenido humedad y de la densidad aparente compactada en el laboratorio.
- AEONOR. UNE-EN-17892-3. Determinación de las partículas del suelo.
- Alcañiz, J.M., Ortiz, O., Carabassa, V., Andres, P. 2011. Enmiendas orgánicas y biosólidos para la rehabilitación de terrenos desnudos.
- Artieda, O. 2008. Papel del suelo en ciclo hidrológico.
- Buckman, H.O., Brady, N.C. 1977. Naturaleza y propiedades de los suelos. Ed Montaner y Simon, S.A. Barcelona.
- Burbano, H. 2016. El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. Rev. Cienc. Agr. 33(2):106 - 116.
- Encina, A. y Ibarra, J. 2003. La degradación del suelo y sus efectos sobre la población.
- Esteban, M., Soler, A., 2010. Alternativas de tratamiento de residuos orgánicos: optimización energética y reducción de emisiones. CONAMA10 Congreso Nacional de Medio Ambiente.
- Gabriels, D., Lobo L., D., Pulido M., M. 2006. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos.
- González, I.C. 2015. Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR. Tesis doctoral de la Universidad de Córdoba.
- Ingaramo, O.E., Paz Ferreiro, J., Mirás Alvalos, J.M., Vidal Vázquez, E. 2007. Cordernos Lab. Xeloxico de Laxe, Coruña. Vol 32, pp. 127-137.
- Jorda, M.M., García, E., Sanfelu, T., Pardo, F. 2014. Movilidad iónica en tecnosoles diseñados para restauración edáfica de canteras de roca caliza. ISSN 1885-7264. N.º 18, págs. 75-76.
- Macías, F. 2004. Recuperación de suelos degradados, reutilización de residuos y secuestro de carbono. Una alternativa integral de mejora de calidad ambiental.
- Macías-García, F., 2006. Elaboración de Suelos derivados con diferentes aplicaciones ambientales. DEA. Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela: s.n.
- Milian, L. 2015. Influencia de la materia orgánica del suelo en el secuestro de carbono. Biochar, una estrategia en potencia. Trabajo de Fin de Grado de la Universidad Complutense de Madrid.
- Moorberg, C.J. y Crouse, D.A. 2021. Soils Laboratory Manual: K-State Edition, Version 2.0. Kansas State University Libraries.

- Pla, I. 2008. Problemas de degradación de suelos en el mundo: causas y consecuencias. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.
- Perez-Esteban, J., Escolastico, C., Masaguer, A., Moliner, A. 2012. Effects of sheep and horse manure and pine bark amendments on metal distribution and chemical proprieties of contaminated mine soils. *Eur J Soil Sci* 63:439-451.
- Pérez-Murcia, M.D., y Moreno-Castello, A. 2008. Residuos urbanos. En: *Compostaje* (Eds.) Moreno, R., Moral. Editorial Mundi-Presa, Madrid. pp 469-488.
- Ricnklebe, J., Shaheen, S.M., Frohne, T. 2016. Amendment of biochar reduces the release of toxic elements under dynamic redox conditions in a contaminated flood plain, *Chemosphere*. 142:41-47.
- Sch, A.E., Grez, R. y Ramirez, C. 1997. La conductivida hidráulica en fase satura como herramienta para el diagnostico de la estructura suelo. *Agro sur*, 25(1), 51-56.
- Vaccaro, S. (2019). Análisis físico en el suelo. Laboratorio agronómico Gualeguay.
- Vittori Antisari, L., Lo Papa, G., Ferronato, C., Falsone, G., Vianello, G. y Dazzi, C. 2014. In situ remediation of polluted Spolic Technosols using Ca(OH)₂ and smectitic maristone. *Geoderma* 232-234: 1-9.

6.1. Consultas en internet

- BOE 17 (1982) Suelos y otros. Orden de 1 diciembre de 1081 por la que se establecen métodos oficiales de análisis de aguas, aceites y grasas, carne y productos cárnicos, fertilizantes, productos fitosanitarios, leche y productos lácteos, productos orgánicos, fertilizantes, suelos y productos derivados de la uva y similares.
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1982-1323>
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Calidad y evaluación ambiental. Prevención y gestión de residuos. Flujos de residuos: Lodos de depuradora.
<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/>