



FACULTAD DE CIENCIAS
EXPERIMENTALES

UNIVERSITAS
Miguel Hernández

MEZCLAS BINARIAS DE ACÍCULAS DE PINO Y COMPOST DE EDAR PARA LA CREACIÓN DE UN TECNOSUELO: EVALUACIÓN DE SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y FÍSICO-QUÍMICAS

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

CURSO 2020/2021

Autor: Eduardo Ruibal Eleno

Tutores: Ignacio Gómez Lucas y Teresa Rodríguez Espinosa

Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente

Área de Edafología y Química Agrícola

Resumen

La realización de este trabajo tiene como objetivo principal el estudio de determinadas propiedades en mezclas binarias, generadas a partir de acículas de pino y compost de lodo de EDAR, para valorar su potencial uso como componentes de tecnosuelos. Se ha pretendido fomentar la economía circular de estos dos residuos orgánicos para valorizarlos y reutilizarlos de manera sostenible. Se han analizado distintas propiedades físicas y físico-químicas de las mezclas consideradas mediante el aporte de diferentes proporciones volumen/volumen de ambos residuos para comprobar que porcentaje de mezcla es el más adecuado y se asemejaba a las características de un compost comercial. Los resultados obtenidos indican que para la mayoría de parámetros analizados la mejor proporción para usar es la de 75 - 25%. Además, se ha puesto de manifiesto la potencial idoneidad de la utilización de las enmiendas estudiadas para formular tecnosuelos.

Palabras clave: tecnosuelos, mezcla binaria, enmienda orgánica, propiedades físicas y físico-químicas.

Abstract

The main objective of this work is to study certain properties of binary mixtures, generated from pine needles and WWTP sludge compost, in order to assess their potential use as components of technosoils. The aim was to promote the circular economy of these two organic wastes in order to recover and reuse them in a sustainable way. Different physical and physico-chemical properties of the mixtures considered have been analysed by adding different volume/volume proportions of both wastes to check which percentage of mixture is the most suitable and resembles the characteristics of a commercial compost. The results obtained indicate that for most of the parameters analysed the best ratio to use is 75 - 25%. Furthermore, the potential suitability of using the amendments studied to formulate technosoils has been demonstrated.

Keywords: technosoils, binary mixture, organic amendment, physical and physico-chemical properties.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	- 3 -
1.1 El suelo	- 3 -
1.1.1 Las funciones fundamentales del suelo	- 4 -
1.1.2 Propiedades físicas y físico-químicas analizadas en el suelo	- 6 -
1.1.2.1 Densidad real	- 6 -
1.1.2.2 Densidad aparente	- 7 -
1.1.2.3 Porosidad	- 8 -
1.1.2.4 Capacidad de retención hídrica	- 9 -
1.1.2.5 Conductividad hidráulica	- 9 -
1.1.2.6 Conductividad eléctrica	- 10 -
1.1.2.7 Materia orgánica	- 10 -
1.1.2.8 pH	- 11 -
1.2 Tecnosuelos	- 11 -
1.2.1 Aplicaciones de los tecnosuelos	- 12 -
1.3 Residuos	- 13 -
1.3.1 Concepto de residuo	- 13 -
1.3.2 Efectos positivos de los residuos orgánicos	- 13 -
2. OBJETIVOS	- 15 -
3. MATERIALES Y MÉTODOS	- 16 -
3.1 Materiales	- 16 -
3.2 Preparación de muestras	- 16 -
3.3 Tratamientos realizados	- 17 -
3.4 Métodos analíticos	- 18 -
4. RESULTADOS	- 24 -
5. CONCLUSIONES	- 29 -
6. BIBLIOGRAFÍA	- 30 -

1. INTRODUCCIÓN

1.1 EL SUELO

El suelo es un sistema natural vivo, dinámico, organizado y complejo como resultado de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar tras instalarse microorganismos y plantas en un material originario natural más o menos meteorizado o de origen antrópico; y está constituido por tres fases. La fase sólida está formada por compuestos inorgánicos (fracción mineral) y orgánicos (materia orgánica, MO) que dejan un espacio de huecos donde se encuentran las fases líquida y gaseosa.

Las interacciones entre las fases sólida y líquida adquieren especial relevancia al existir en la fase sólida partículas con una elevada superficie específica que están cargadas eléctricamente, lo cual contribuye a los procesos de adsorción e intercambio iónico. Estos fenómenos son esenciales para la actuación del suelo como depurador natural, para la vida en el mismo (micro, meso y macroorganismos) y, fundamentalmente, para la nutrición de las plantas (Ingaramo, 2007).

El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano) y materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas.

El suelo es un componente esencial de la "Tierra" y "Ecosistemas". Ambos son conceptos más amplios que abarcan la vegetación, el agua y el clima en el caso del concepto tierra, y además abarca también las consideraciones sociales y económicas en el caso de los ecosistemas según FAO (1999).

Los suelos constituyen una cubierta delgada sobre la superficie terrestre, cuyo espesor es variable, de unos pocos centímetros a varios metros. Como cuerpo natural, el suelo es la interfase que permite los intercambios entre la litosfera, la hidrosfera, la biosfera y la atmósfera.

Desde la perspectiva de su formación, los suelos son unidades multifuncionales que resultan de la acción combinada y continua de diversos factores de formación, por lo que no son un medio inerte ni estático, sino que se desarrollan bajo la influencia de estos

factores, que varían de un lugar a otro y a lo largo del tiempo. Los factores identificativos en los procesos de formación son los siguientes:

- Material parental: la roca madre o material originario a partir del cual se forma el suelo.
- Clima: aporta agua y energía al material originario, con lo que va alterando las propiedades del suelo.
- Organismos vivos: interactúan sobre el material originario contribuyendo a su disgregación y mezcla.
- Geomorfología: posición que ocupa el suelo en el paisaje y sus características topográficas.
- Tiempo: la acción de los factores se prolonga a lo largo de cientos o miles de años.

Las múltiples formas en que estos factores se pueden combinar, hacen que los suelos presenten una gran variabilidad espacio-temporal y por tanto una enorme edafodiversidad que condiciona el desarrollo de los ecosistemas terrestres.

1.1.1 Funciones fundamentales del suelo

El suelo se considera un recurso natural limitado y no renovable ya que, a escala humana, el tiempo necesario para la formación del mismo es muy elevado. La formación de un solo centímetro de suelo puede tardar aproximadamente unos 1000 años (FAO, 2015). Por esa razón es tan importante proteger los suelos.

Como sociedades cada vez más urbanas, perdemos de vista la importancia de los suelos para nuestra supervivencia y prosperidad. Sin embargo, en todos los ecosistemas, los suelos cumplen con importantes funciones de las cuales se derivan servicios ambientales indispensables para el sostenimiento tanto del ecosistema como de la vida humana. La función más conocida es la de soporte y suministro de nutrientes a las plantas. De ahí que la degradación del suelo esté considerada como el mayor problema ambiental que amenaza la producción mundial de alimentos y una de las principales amenazas para el desarrollo sostenible de los terrenos agrícolas.

No obstante, el suelo cumple con otras funciones igualmente trascendentes, como la de constituir un medio filtrante que permite la recarga de los acuíferos, influyendo también en la calidad del agua. Asimismo constituye el medio donde se realizan ciclos biogeoquímicos necesarios para el reciclaje de los compuestos orgánicos. Como resultado de este proceso, se estima que el contenido de carbón almacenado en el primer metro del suelo es 1.5 veces mayor a aquél acumulado en la biomasa, constituyendo la tercera fuente más importante de carbono. Este secuestro de carbono en el suelo, reduce su liberación a la atmósfera como CO₂, uno de los principales gases de efecto invernadero responsables del cambio climático.

Según sus características, el suelo funciona también como hábitat para una gran cantidad de organismos, desde células microscópicas a pequeños mamíferos y reptiles, manteniendo una amplia biodiversidad. Finalmente, en los ecosistemas urbanos, el suelo juega un papel fundamental como material de construcción y como cimiento para la infraestructura urbana. En estos ecosistemas, se reconoce cada vez más la importancia del suelo antrópico en las zonas urbanas como soporte para sus áreas verdes y para la recarga de acuíferos.

La importancia de los suelos para el sostén de la vida humana ha sido reconocida durante el último medio siglo con la aparición de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y de decenas de otras instituciones internacionales y nacionales, que año tras año alertan sobre la degradación y sus repercusiones en el mantenimiento de la biodiversidad, la mitigación de la pobreza y la seguridad alimentaria (Cotler, 2007).

Por consiguiente, al degradarse un suelo perderá su funcionalidad ecosistémica y antrópica. Para evitar la degradación es clave una buena ordenación territorial. La planificación del territorio, la asignación de usos al mismo y la gestión territorial que vengan orientadas por un objetivo de protección de los mejores suelos, debe tener una base científica que derive de un conocimiento de las características, respuesta y distribución de los suelos en el territorio. Sólo de este modo se podrán evaluar los cambios probables en los suelos al simular estrategias de uso alternativas y elegir de esta manera aquellas que causen menor impacto sobre este recurso natural no renovable (FAO, 1999).

1.1.2 Propiedades físicas y físico-químicas analizadas en el suelo

Las propiedades físicas y físico-químicas del suelo determinan, en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los somete. La condición física de un suelo limita aspectos tales como la rigidez y la consistencia, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes. Se considera imprescindible para las personas involucradas en el uso del suelo, conocer sus propiedades físicas, para entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas, de qué manera la actividad humana puede llegar a modificarlas, y comprender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo posibles. (Rucks *et al.*, 2004).

La atención prestada a las propiedades físicas y físico-químicas del suelo ha sido en general, menor que las dadas a las propiedades químicas y a la importancia que se le da en la actualidad a las biológicas. Conviene indicar que el estudio de estas propiedades físicas requiere en ocasiones, la utilización de métodos más específicos o de mayor complejidad estructural. No debemos de olvidar que las propiedades físicas son de igual o incluso de mayor importancia que las químicas y biológicas para la funcionalidad y la calidad de los suelos (Dexter, 2004).

1.1.2.1 Densidad real

La densidad real, también conocida como densidad de sólidos o densidad de las partículas, es la relación existente entre el peso de los sólidos del suelo y el volumen ocupado. Viene dada por la siguiente expresión:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Donde M_s es la masa de sólidos y V_s es el volumen de sólidos de un suelo. Para determinar la densidad real se utiliza el picnómetro y líquidos no polares, como el tolueno, o polares, como el agua.

1.1.2.2 Densidad aparente

La densidad aparente de un suelo seco expresa la relación entre la masa de sólidos y el volumen total de suelo, incluyendo los poros. Viene dada por la siguiente expresión:

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{(V_s + V_a + V_w)}$$

Donde M_s es la masa de sólidos y V_t es el volumen total que viene dado por el sumatorio del volumen de sólido (V_s), el volumen de aire (V_a) y el volumen de agua (V_w) que posee un suelo. Los valores que puede tomar la densidad aparente dependen de diversos factores, como textura, contenido en materia orgánica o tipo de manejo del suelo.

En contraste con la densidad real, que es más o menos constante, la densidad aparente es altamente variable ya que está afectada por la estructura del suelo, y por sus características de retracción y expansión. Esto último, depende tanto de su contenido en arcilla como de la humedad del suelo.

Aun en suelos muy compactados, la densidad aparente sigue siendo menor que la densidad real porque las partículas nunca llegan a entrelazarse perfectamente. El espacio poroso puede verse muy reducido por compactación, pero nunca llega a eliminarse totalmente.

Esta densidad se utiliza para referir los resultados de los análisis de laboratorio a un volumen de suelo en el campo. Esta variable afecta al crecimiento de las plantas debido al efecto que tienen la dureza y la porosidad del suelo sobre las raíces. Si se incrementa la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con lo que el crecimiento de las raíces se limita a valores críticos. Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces varían dependiendo de la textura del suelo y de la especie vegetal; por ejemplo, para suelos arenosos una densidad aparente de 1759 kg/m³ limita el crecimiento de las raíces de girasol, mientras que en suelos arcillosos, ese valor crítico es de 1460 a 1630 kg/m³ para la misma especie.

La densidad aparente puede determinarse mediante varios métodos como el del cilindro, el de la bolsa de plástico, el de la arena o el método del agregado. El método

generalmente empleado es el uso de un cilindro de dimensiones conocidas con el que se toma la muestra inalterada del suelo (Ingaramo, 2007).

1.1.2.3 Porosidad

La porosidad es la propiedad por el cual todos los cuerpos poseen en el interior de su masa espacios que se denominan poros. En el caso de los suelos, la porosidad es el espacio ocupado por fluidos (gaseosos o líquidos) que queda entre las partículas sólidas, inorgánicas y orgánicas, y es consecuencia de la textura y estructura del suelo. El flujo de agua y aire en el suelo se realiza a través del espacio poroso condicionado por el tamaño, abundancia y distribución de los poros (Bonneau y Levy, 1979).

El crecimiento de las plantas está determinado fundamentalmente por factores edáficos. Estos pueden ser físicos y químicos siendo los físicos las propiedades del suelo que determinan el crecimiento radicular y la dinámica del aire y del agua.

Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macroporos y microporos. Los primeros no retienen el agua contra la fuerza de la gravedad, y por lo tanto son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, permitiendo una circulación más rápida de aire y de agua. Además, constituye el principal espacio en el que se desarrollan las raíces. Los segundos son los que ejercen grandes fuerzas de retención del agua, parte de la cual acaba siendo disponible para las plantas. La porosidad total o espacio poroso del suelo, es la suma de los macroporos y microporos. Las características del espacio poroso dependen de la textura y la estructura del suelo (Rucks *et al.*, 2004).

La porosidad debe ser considerada un indicador fundamental de la calidad del suelo por su capacidad para almacenar agua y permitir el intercambio fisicoquímico y biológico entre las diferentes fases presentes en el suelo.

Las características morfológicas y volumétricas del espacio poroso en el perfil del suelo desempeñan un rol crucial en el transporte y retención del agua por lo que el estudio de la porosidad edáfica tiene una gran relevancia y contribuye a entender entre otros procesos, la captación y almacenamiento del agua en cuencas hidrológicas.

1.1.2.4 Capacidad de retención hídrica

La capacidad de retención hídrica (CRH) corresponde al máximo de agua que el suelo puede retener en las condiciones en las que el drenaje está libremente asegurado, o lo que es lo mismo, es la cantidad de agua retenida por el suelo cuando éste está al 100%.

La capacidad máxima se mide por la porosidad, pero este conocimiento no tiene ningún interés práctico, ya que corresponde al caso de una total eliminación de aire que convertiría el suelo en un medio impropio a toda la vegetación. Cuando el agua gravitacional llega al subsuelo puede encontrarse: fijada en los vacíos de pequeña apertura donde los roces le impiden drenar hacia abajo, mantenida por las fuerzas de unión contra las partículas del suelo sobre las cuales forma una película o en forma de vapor de agua.

Se trata pues del agua, que en su mayor parte, ocupa la microporosidad. Por consiguiente la capacidad de retención de un suelo depende de su porosidad y más exactamente de su microporosidad y porosidad capilar y, por lo tanto, de su textura y estructura (Rucks *et al.*, 2004).

1.1.2.5 Conductividad hidráulica

El agua fluye en el suelo debido a varios tipos de fuerzas: gravedad, ascenso capilar y osmosis. Los flujos de agua se pueden medir en campo o en laboratorio mediante la conductividad hidráulica. Se puede obtener información fundamental en la circulación del agua en el suelo mediante la descripción de suelos de las clases de drenaje y sus características asociadas (FAO, 1999).

La conductividad hidráulica en un suelo saturado describe la funcionalidad de su sistema poroso, englobando propiedades tales como cantidad, tamaño, morfología, continuidad y orientación de los poros. Con los distintos usos y manejos del suelo se modifica su estructura, como consecuencia también varía la conductividad hidráulica (Ramírez *et al.*, 1997).

1.1.2.6 Conductividad eléctrica

La CE es la propiedad que mide la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica. El valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente a través del mismo, es decir, a mayor concentración de sales mayor CE. La CE de los suelos se usa como parámetro para conocer la salinidad, es el más extendido y el más ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución. Se mide habitualmente a 25°C en un conductivímetro y las medidas se expresan en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por lo tanto la CE refleja la concentración de sales solubles en la disolución (Barbaro, 2014).

1.1.2.7 Materia orgánica

La materia orgánica del suelo (M.O) es un recurso natural y el agente primordial de la fertilidad del suelo. Los componentes orgánicos del suelo constituyen una proporción muy pequeña en relación con los componentes inorgánicos aunque ejercen una notable influencia sobre las propiedades tanto físicas como químicas del suelo y sobre el comportamiento del mismo frente al estrés producido por las alteraciones debido a las labranzas.

El uso del suelo tiene una marcada influencia sobre el contenido en MO, afectando especialmente a su tasa de reposición. Cuando un suelo virgen (selva, sabana, pradera natural, etc.), es alterado y cultivado la tasa de pérdida de la MO es modificada drásticamente, disminuyendo el aporte, ya que normalmente el volumen de MO que puede generar un ecosistema estable es mucho mayor que los cultivos que se implantan. En suelos con altos contenidos en MO, un buen sistema de manejo del suelo debe aportar como mínimo la misma cantidad de MO que se pierde por mineralización para mantener el estatus de carbono orgánico. En suelos degradados o con muy bajos contenidos de materia orgánica, los sistemas de manejo deben dirigirse a incrementar los contenidos en MO (Ingaramo, 2007).

1.1.2.8 pH

La reacción del suelo (pH) es un índice de la acidez, neutralidad o alcalinidad del suelo. Los pH neutros son los mejores para las propiedades físicas de los suelos. A pH muy ácidos hay una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable. La asimilación de nutrientes del suelo está influenciada por el pH, ya que determinados nutrientes se pueden bloquear en determinadas condiciones de pH y no son asimilable para las plantas. Alrededor de pH 6-7,5 son las mejores condiciones para el desarrollo de las plantas. La determinación del pH del suelo se suele realizar en suspensiones suelo/agua en relación 1:2,5 (p/v). La medida se basa en el potencial eléctrico que se crea en la membrana de vidrio de un electrodo, que es función de la actividad de los iones hidrógeno a ambos lados de la membrana (Rucks *et al.*, 2004).

1.2 TECNOSUELOS

Los suelos artificiales, denominados también tecnosuelos, tecnosoles o tecnosoil se pueden definir como el resultado de la acción voluntaria de crear un "suelo" (suelo hecho por humanos) utilizando artefactos (es decir, materiales tecnogénicos, desechos particulares o materiales seminaturales que incluyen materiales profundos como sedimentos o suelo material de los horizontes C) y darles forma intencionalmente para proporcionar un entorno adecuado para el crecimiento de la vegetación.

Si bien consideramos esta definición como una de las más adecuadas, es necesario señalar que los tecnosoles son suelos diseñados con la intención de brindar servicios ecosistémicos iguales a los que ofrecen los suelos naturales, o para potenciar un servicio ecosistémico; por lo tanto, superaría los suelos naturales, asegurando la salud humana y ambiental.

Partiendo de la base de la economía circular, proponemos el uso de residuos orgánicos para generar tecnosoles, evitando nuevas extracciones de recursos naturales y aumentando las tasas de valoración.

Los tecnosuelos han sido creados involuntariamente por humanos, asociados con la manipulación de los suelos donde tienen lugar las actividades humanas. El ser humano puede formular suelos con un propósito específico, con una mayor o menor complejidad técnica, a partir de comprobaciones empíricas de su capacidad funcional. (Rodríguez-Espinosa *et al.*, 2021).

1.2.1 Aplicaciones de los tecnosuelos

Las principales aplicaciones de los tecnosuelos son: enmienda para los suelos agrícolas, material para la recuperación de suelos y aguas degradados y/o contaminados, cubrición de escombreras, empleo en zonas afectadas por obras urbanas e infraestructuras (rotondas, bordes de los viales y zonas ajardinadas no recreativas), material para recuperación de minas y canteras o suelos degradados por erosión, incendio o pérdida de la capacidad productiva.

Incluso se pueden diseñar tecnosuelos para almacenar más carbono orgánico que los suelos naturales, para la gestión térmica y del agua y para el aumento de la biodiversidad y para la recuperación de sitios urbanos contaminados que mantienen las funciones de ciclo de nutrientes. Los tecnosuelos son una solución óptima que no compromete la salud ambiental o humana. Sería de gran utilidad un marco regulatorio europeo que contemple no solo limitaciones sino posibles usos de residuos y metodología de ensayo a cumplir.

Para suelos que necesiten ser descontaminados o con deficiencias funcionales, se debe tener en cuenta que la aplicación de enmiendas a través de la formulación de Tecnosuelos hechos por residuos es una gran opción. De esta manera, los planificadores podrían evitar el uso de recursos naturales, reducir el impacto de la gestión de residuos y permitir la reincorporación de nutrientes a los ciclos bioquímicos del suelo (Rodríguez-Espinosa *et al.*, 2021).

1.3 RESIDUOS ORGÁNICOS

1.3.1 Concepto de Residuo

Según la Ley española 42/75 podemos definir residuo como: “aquellas materias derivadas de actividades de producción y consumo que no han alcanzado ningún valor económico” y por otra parte la directiva de la CEE 75/442 lo define como: “cualquier sustancia u objeto del cual se desprende su poseedor o tiene la obligación de desprenderse”.

La mala gestión de los residuos puede acarrear problemas importantes, sobre todo para el medio ambiente. A esta situación debemos añadir el agotamiento de los recursos naturales no renovables, que puede conducir a una escasez de muchos de ellos a medio o corto plazo. Por lo tanto, los residuos deben ser estudiados, analizados, transformados y sobre todo aprovechados en la medida que sea posible, lo que permitirá una disminución de los daños al medio ambiente y su consideración como nuevos recursos.

Ambas definiciones son muy amplias y abarcan la totalidad de los productos residuales que generan nuestro sistema de vida tales como: inorgánicos, orgánicos y mezcla de ellos, tóxicos o inertes, líquidos o sólidos, etc. En los países desarrollados es donde existe el mayor índice de consumo y por tanto el de mayor producción de residuos. Nuestro interés se centra en el uso de los residuos orgánicos como mejora y enmienda en suelos degradados o bien que necesiten mejorar algunas de sus propiedades. (Navarro-Pedreño *et al.*, 1995).

1.3.2 Efectos positivos de los residuos orgánicos

En general, se pueden considerar como residuos orgánicos a todos aquellos procedentes de actividades como la agricultura, ganadería, mataderos, residuos forestales, domésticos, lodos de depuradora de aguas residuales, englobando también a los originados en las industrias agroalimentarias y afines (cárnicas, conserveras, etc.). El abanico de actividades que generan materiales con mayor o menor carácter orgánico es grande, lo que provocará que también sea amplia la variedad de residuos y las características que presentan.

En algunas zonas de España, como es el caso de la provincia de Alicante, la presencia de materia orgánica en los suelos suele ser escasa, y son contadas las excepciones (coincidentes con cultivos hortícolas) en las que esta se halla presente por encima del 2 %. Si a ello unimos la naturaleza caliza de la mayor parte de nuestros suelos en ocasiones superior al 50 %, hecho que favorece las condiciones degradativas de la materia orgánica y por tanto su pérdida, nos daremos cuenta que somos un área con suelos deficitarios en fracción orgánica (Navarro-Pedreño *et al.*, 1995).

La elección del tipo de residuo para su uso en los suelos dependerá de las características del suelo, su estado de degradación y de las propiedades que se quieran mejorar. Anteriormente ya se ha señalado la importancia de las propiedades físicas del suelo.

Las especies arbóreas que habitan en una determinada zona tienen una gran influencia sobre la estructura de los suelos, siendo convenientes su utilización en proyectos de recuperación de áreas degradadas dado que, por ejemplo, la relación materia orgánica-densidad aparente se ve favorecida en la medida que los sistemas agroforestales tienen aportes anuales de hojarasca suficiente como para modificar algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo mediante un incremento de la materia orgánica en la superficie y en el subsuelo.

Los cambios en el contenido de la materia orgánica de los suelos modifican las propiedades físicas como la estructura y la densidad aparente, así como la porosidad, infiltración y la humedad presente en el suelo.

Como consecuencia de un mayor contenido de materia orgánica se presenta una mejor estructura y aumento de la presencia de canales (abiertos por la mesofauna edáfica) favoreciendo la infiltración (Murray Núñez, 2011).

En este trabajo, se van a utilizar dos residuos orgánicos como enmiendas de suelos: las acículas de pino y el compost de EDAR. En concreto, el primero es un residuo muy abundante ya que constituye la hojarasca forestal más abundante del área mediterránea.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es la creación de un tecnosuelo lo más parecido al compost comercial mediante una mezcla binaria de acículas de pino y compost de EDAR y ver qué efectos tienen como enmendantes orgánicos para restaurar o recuperar suelos altamente degradados mediante la evaluación de sus propiedades físicas y físico-químicas.

Los objetivos específicos que se han seguido en este trabajo son:

- Fomentar la economía circular de estos residuos orgánicos para valorizarlos y restaurar o recuperar suelos degradados sin costes excesivos.
- Estudiar las diferentes propiedades físicas de la mezcla binaria y comprobar como varían cuando se aplica un diferente porcentaje en proporción volumétrica residuo-residuo para su posterior uso como tecnosuelos o enmienda de suelos.
- Analizar en función de los resultados obtenidos que porcentaje residuo-residuo es el más adecuado para la creación de un tecnosuelo óptimo y fértil.
- Comprobar si hay diferencias significativas entre los dos residuos para mejorar la calidad del suelo desde el punto de vista de las propiedades físicas analizadas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

Inicialmente para el desarrollo de este trabajo se realizaron una serie de ensayos para la caracterización de diez residuos diferentes tanto orgánicos como inorgánicos con la finalidad de comprobar que dos residuos podían ser la mejor opción para usar en la mezcla binaria. Estos diez residuos eran los siguientes: paja de cereal, acículas de pino, polvo de mármol, poda de olivo, compost de EDAR, hojas de palmera, grava fina y gruesa, poda de sarmiento de viña y compost comercial. Asimismo los parámetros que determinamos fueron: densidad aparente, densidad real, porosidad, CRH (capacidad de retención hídrica), porcentaje de MO y humedad, conductividad eléctrica, conductividad hidráulica saturada y pH.

3.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Todos los residuos estaban disponibles en una serie de capazos o cubos que se encontraban en el invernadero de la universidad, ubicado en el campus de Elche, depositados, tras ser recogidos en su lugar de origen, durante varios días para su secado y, de esta forma, garantizar una reducción del exceso de humedad que pueda presentar el residuo tras su recogida. Una vez que estuvieron secos los trasladamos al laboratorio mediante bolsas de basura y cubos de plástico. Para dejarlos en condiciones fáciles de uso y análisis tuvimos que aplicar un proceso exhaustivo de triturado y tamizado, exceptuando los dos tipos de grava y compost porque ya se encontraban en condiciones óptimas.

En primer lugar, hicimos un triturado con tijeras de podar para los residuos de poda de olivo y sarmiento de viña ya que tenían ramas muy gruesas y era necesario cortarlas en trozos pequeños para poder meterlas más tarde en la batidora.

En segundo lugar, hicimos un segundo triturado en el laboratorio mediante una batidora con vaso de cristal y velocidad regulable para los dos tipos de poda, la paja, las hojas de palmera y las acículas de pino.

En tercer lugar, toda la muestra que trituramos, la íbamos pasando por un tamiz con una malla de 2 mm, para retirar todos los gruesos que presentaban, ya que podían interferir notablemente en el desarrollo experimental y enmascarar los resultados asociados directamente con el empleo de residuos.

En lo que respecta a mis dos residuos, las acículas de pino fueron recogidas de una pinada del término de Sax (Alicante) y el compost de biosólido procedía de la planta de compostaje asociada a la EDAR de Aspe (Alicante) ya totalmente higienizado. Posteriormente tuvimos que seguir triturando una gran cantidad de acículas de pino, con el objetivo de tener suficiente volumen de muestra para realizar todos los ensayos, y los trozos más grandes de compost se desmenuzaron fácilmente con las propias manos.



Figura 1. Acículas de pino sin triturar



Figura 2. Compost de EDAR

3.3 TRATAMIENTOS REALIZADOS

Tras los resultados previos obtenidos del análisis de todos los residuos, decidimos usar las acículas de pino y el compost de EDAR para la mezcla binaria de nuestro tecnosuelo, ya que podían complementarse para obtener una aceptable enmienda orgánica. Son

dos residuos orgánicos que vienen siendo empleados comúnmente como enmienda de suelos, con distinta finalidad y, además, se puede disponer de ellos en cantidades elevadas.

Los mismos parámetros analíticos que se determinaron inicialmente en todos los residuos valorados inicialmente (apartado 3.1), se van a cuantificar en las mezclas binarias consideradas, exceptuando el porcentaje de MO ya que lo calculamos de forma estequiométrica a partir de los datos obtenidos anteriormente de los dos residuos por separado. Las proporciones de mezcla utilizadas (0-100, 25-75, 50-50, 75-25 y 100-0) son en volumen en base a la densidad. La densidades reales calculadas del pino y compost respectivamente son: 0,587 g/cm³ y 0,867 g/cm³. Las masas obtenidas de cada residuo según la proporción se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Masas de cada residuo según la proporción

Mezcla binaria (%)	Hoja pino (g)	Compost EDAR (g)
0-100	0	86,700
25-75	14,675	65,025
50-50	29,350	43,350
75-25	44,025	21,675
100-0	58,700	0

3.4 MÉTODOS ANALÍTICOS

Para el proceso de análisis en el laboratorio se siguieron los protocolos que se utilizan en el Grupo de Edafología Ambiental de la Universidad Miguel Hernández de Elche, basados en las normas UNE, métodos oficiales de análisis y metodología recomendada en los artículos de investigación. Para minimizar todo lo posible el error experimental se realizaron 5 réplicas de cada parámetro analizado en cada muestra. Siguiendo la metodología de las normas UNE, mejoradores del suelo y sustratos de cultivo, y otras, se han determinado los siguientes parámetros:

- **Densidad aparente (ρ_{ap}).** Se ha determinado obteniendo el volumen que ocupa una masa de residuo conocida, empleando un cilindro de medidas conocidas (UNE-EN 13040:2008).
- **Densidad real (ρ_r).** El método oficial con el picnómetro dio muchos problemas así que tuvimos que buscar otra solución. Se ha determinado utilizando probetas de 50 ml introduciendo una gasa envuelta en una pequeña rejilla para fijar la muestra, donde se introdujeron varias muestras de residuo de peso variable. Posteriormente se añade agua destilada hasta alcanzar casi la capacidad de la probeta y después se enrasa con cuenta gotas. Una vez obtenidos los datos del volumen ocupados por las muestras y conociendo el peso de estas, calculamos la densidad real para cada residuo (UNE-EN ISO 17892-3).
- **Porosidad (ϵ).** Se ha determinado mediante los valores obtenidos de densidad real y aparente. Como he dicho anteriormente, la porosidad es la relación que hay entre el volumen de poros y el volumen total del suelo. Los volúmenes están relacionados con la densidad y a partir de los volúmenes totales y de sólidos podemos llegar a la siguiente expresión:

$$\epsilon = \frac{V_t}{V_p} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r}$$

- **Capacidad de retención hídrica (CRH).** Para su cálculo pesamos cinco muestras por cada proporción de residuo y para ello dividimos entre 3 las masas iniciales para obtener una masa total de la mezcla de unos 20-25 g aproximadamente. Primero, se preparan todos los embudos con sus filtros humedecidos y se dejan 24h envueltos en papel de aluminio. Pasadas esas 24h, se pesan los embudos con los filtros húmedos y después de colocarles la muestra de residuo se pesan de nuevo. A continuación, se ponen sobre una gravilla y se riega la muestra de suelo con agua destilada hasta saturarla completamente. Se tapa el embudo con papel de aluminio, permitiendo equilibrar la presión con la atmosférica y se deja el libre drenaje del agua gravitacional durante 24 horas. Pasadas las 24 horas, se pesa el residuo mojado en el embudo junto

con el filtro húmedo (Moorberg y Crouse, 2021). Una vez obtenidos los datos, calculamos:

$$\rightarrow \% \text{ Capacidad retención hídrica} = (M_h - M_m) / (M_m - M_f) * 100$$

M_h = Masa del embudo, con filtro y la muestra hidratada tras 24h

M_m = Masa del embudo con el filtro mojado y la muestra del residuo

M_f = Masa del embudo con el filtro mojado

- **Porcentaje de materia orgánica y cenizas.** Se han determinado según la norma UNE-EN13039. El contenido en cenizas, se ha determinado mediante la calcinación de las muestras en el horno Mufla, a unos 450°C. Como materia orgánica se toma la pérdida de masa por ignición. Ambas se expresan como porcentaje en peso seco de la muestra. Se han depositado varias muestras de residuo en crisoles. Estos crisoles y su contenido han sido introducidos en un horno de mufla hasta alcanzar la temperatura de 450 °C en 1h, manteniéndolo durante 6h. Más tarde, dejamos que los crisoles y su contenido se enfríen hasta temperatura ambiente en el desecador y pesar.

El contenido de materia orgánica expresado en porcentaje en peso de muestra seca viene dado por la ecuación:

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

El contenido en cenizas, expresado como porcentaje en peso de muestra seca, viene dado por la siguiente ecuación:

$$W_{cenizas} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100$$

Donde

W_{mo} es el contenido en materia orgánica en %;

$W_{cenizas}$ es el contenido en cenizas en %;

m_0 es el peso del crisol en gramos;

m_1 es el peso del crisol y la muestra antes de introducirlo en el horno de mufla;

m_2 es el peso del crisol y la muestra tras su combustión en gramos.

- **Conductividad Eléctrica (CE).** Según la norma UNE-EN 13038, se ha medido la conductividad de un extracto de residuo-mejorador de suelo en agua destilada 1/5 (v/v). Se mide en un conductímetro previamente calibrado mediante patrones estandarizados de disoluciones de KCl de conductividades conocidas. Nuestras disoluciones estaban muy diluidas por lo que para favorecer el filtrado tuvimos que introducirlas en una centrifugadora a unas 4000 rpm durante unos 4 min. De esta forma, conseguimos que los sólidos se quedaran en la parte de debajo de los botes y el líquido en la de arriba. Después, volteamos todos los botes en el agitador durante 1 hora y los dejamos en reposo otra hora para que se equilibraran. Finalmente, medimos los valores de todos los botes en el conductímetro.

- **Conductividad Hidráulica saturada (K_{hs}).** Para ello utilizamos cinco cilindros de PVC, uno para cada proporción de la muestra. En una de las aberturas del cilindro este presenta una tela permeable por donde ascenderá el agua gracias a la capilaridad. Las muestras son depositadas dentro de los cilindros (las muestras deben presentar la misma altura, para que los ensayos sean similares y los resultados comparables), y a su vez estos dentro de una bandeja para evitar que el agua desborde. Una vez depositadas las muestras dentro del cilindro, estos son colocados dentro de la bandeja, la cual llenaremos de agua hasta cubrir más o menos un tercio de la muestra para garantizar la saturación del suelo, dejando los cilindros parcialmente sumergidos 24 horas.

Una vez transcurrido el tiempo requerido y el residuo está saturado, procedemos a realizar la fase central del experimento. Con ayuda de un soporte con pinza colocamos un embudo grande con un tubo de plástico en su extremo por donde percolará el agua. Encima del embudo pondremos los cilindros y una malla plástica sobre la muestra para fijarla. A continuación, introducimos un extremo de porción de manguera en el grifo que nos suministrará el caudal y el otro extremo lo colocaremos sobre el cilindro. Por último, llenamos el cilindro hasta el límite de su capacidad, y regulando el grifo buscamos el caudal hasta conseguir un régimen estacionario, debemos conseguir que el caudal de entrada a través de la manguera sea igual al de salida, el cual percola a través de la tela permeable en la parte inferior del cilindro.

Una vez conseguido esto, realizamos cinco mediciones de caudal para cada muestra de residuo con ayuda de una probeta de 100, 50 o 500 ml, dependiendo de la velocidad del caudal, y un cronómetro. Tras cada medición debemos vaciar el cilindro y remover las muestras para conseguir cierta heterogeneidad de la muestra ya que en mi caso el pino tenía una gran cantidad de material fino que iba todo a la parte baja del cilindro y formaba una especie de costra que impedía realizar adecuadamente el ensayo. Una vez removido repetiremos el mismo proceso. Los datos de caudal de las distintas muestras son recopilados y necesarios para obtener la conductividad hidráulica en fase saturada (Sch *et al.*, 1997).

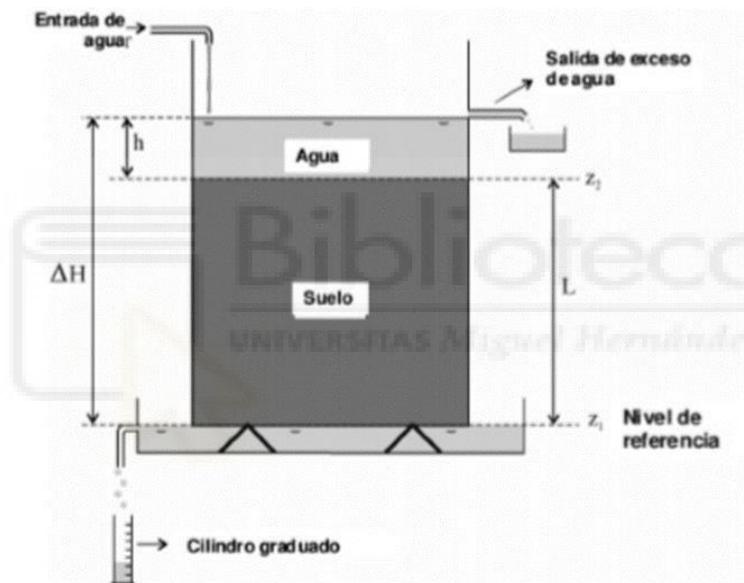


Figura 3. Esquema del ensayo para la obtención de la conductividad hidráulica

h = Altura del cilindro correspondiente al agua que se mantiene constante por encima de la muestra de suelo. (cm)

L = altura de la muestra de suelo (cm).

Δt = tiempo transcurrido desde que comenzó a recogerse el agua en la probeta hasta la medición final del volumen (horas).

V = volumen de agua recogido en la probeta (cm³).

A = área de la sección circular horizontal del cilindro (cm²).

Una vez recopilados estos datos, podemos calcular la conductividad hidráulica en fase saturada (cm/h) mediante la siguiente expresión:

$$Khs = \frac{V}{A \times \Delta t \times \left[\frac{h + L}{L} \right]}$$

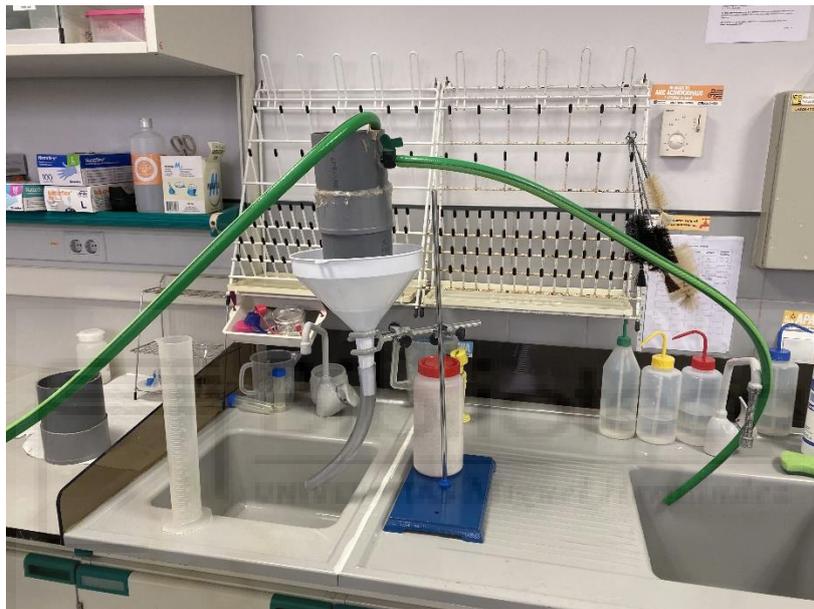


Figura 4. Ensayo en el laboratorio para la obtención de la Khs

pH. Según el método de la disolución acuosa (pH actual), se ha medido el pH con una relación peso de residuo y volumen de agua 1:2,5 (p/V) (BOE 17, 1982). Se mide en un pH-metro previamente calibrado mediante tres disoluciones tampón de pH conocido. Para ello echamos una cantidad de 1,2 g de mezcla binaria, según la relación, y 30 mL de agua destilada en botes de plástico con capacidad de 50 mL. Después agitamos los botes en un agitador durante 30 min y los dejamos en reposo otros 30 min para que se equilibrara la solución. Por último, medimos los valores mediante el pH-metro agitando previamente cada solución antes de entrar en contacto con los electrodos.

4. RESULTADOS

El conocimiento de las propiedades del suelo y de las enmiendas a utilizar, es importante para definir e interpretar sus procesos físicos, químicos y microbiológicos, crecimiento de los cultivos y especies vegetales en los ecosistemas, etc. Por ello, en nuestro estudio nos hemos centrado en una serie de características físicas y físico-químicas para comprobar qué porcentaje de mezcla binaria es el más adecuado para usarse como un componente de un tecnosuelo.

Para los cálculos estadísticos se ha determinado la media y la desviación estándar (estadística descriptiva) para los resultados obtenidos. Además, para poder determinar si los distintos tratamientos han producido diferencias significativas en los resultados, se ha procedido a realizar el análisis de varianza (ANOVA) de un factor. Los cálculos y la estadística entre las variables se han realizado mediante los programas EXCEL (Office, v. 2013) y SPSS Statistics (v. 26).

Con el fin de no repetir al pie de todas las tablas los símbolos utilizados para la representación estadística, la significación queda expresada en las tablas de datos de tal manera que los valores para una misma columna, son diferentes para una probabilidad del 95% si tienen letras distintas. El análisis de varianza queda representado por el valor de la F y la simbología *, ** y *** expresa significancia al 95%, 99% y 99,9% respectivamente.

Primeramente, analizaremos los resultados de las dos densidades, la real y la aparente. La densidad real viene dada por la relación existente entre el peso de los sólidos del suelo y el volumen ocupado por los mismos, en el cuál no se incluye el volumen ocupado por los poros. La densidad aparente viene dada por la relación entre el peso de los sólidos del suelo y el volumen total o aparente del mismo.

En la tabla 2 se muestran los resultados de las densidades con su consiguiente variación en función del porcentaje de residuo orgánico pino-compost (indicado en la tabla 1) que presente la mezcla.

Tabla 2. Densidad real y aparente (g/cm³) de la mezcla pino-compost

% Residuo	Da (g/cm³)	σ	Dr (g/cm³)	σ
0-100	0,46	0,01	0,87 a	0,1
25-75	0,42	0	0,79 ab	0,07
50-50	0,38	0,01	0,72 bc	0,05
75-25	0,35	0	0,64 cd	0,04
100-0	0,32	0,01	0,57 d	0,06
F	229 ***		16,1 ***	

Atendiendo a los resultados obtenidos de densidad real y aparente de un compost comercial utilizado como referencia (0,679 g/cm³ y 0,42 g/cm³ respectivamente) podemos concluir que el porcentaje de mezcla más adecuado para la Dr sea el de 75-25% y para la Da sea el de 25-75% ya que son los valores que más se parecen.

Una vez conocidos los valores de densidad real y densidad aparente, con ello podremos obtener datos sobre la porosidad del suelo. Como ya se comentó, la porosidad representa el porcentaje de huecos existentes respecto al volumen total del suelo, estos huecos pueden ser macroporos o microporos. Los macroporos no retienen agua contra la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces.

Los microporos retienen agua y parte de la cual es disponible para las plantas. En la tabla 3 podemos observar los resultados obtenidos respecto al porcentaje de porosidad y CRH con los diferentes porcentajes de la mezcla.

Tabla 3. Porcentaje de Porosidad y CRH de la mezcla pino-compost

% Residuo	Porosidad (%)	σ	CRH (%)	σ
0-100	46,2 a	7,1	84,4	11,6
25-75	46,7 a	5,2	100,5	5,3
50-50	46,8 a	3,1	121,5 a	7
75-25	44,8 a	3,9	132,4 a	1,3
100-0	43,7 a	5,3	157	13
F	0,34 ns		53,2 ***	

En principio, se puede observar que todas las mezclas binarias tiene una porosidad muy alta, al situarse todos los valores por encima del 40%. Esto quiere decir que va a permitir una buena aireación del suelo y circulación del agua, lo que se traduce en un mejor enraizamiento de las plantas, por lo que favorecerá los intercambios entre el vegetal y el sustrato. Como se observa, no hay diferencias significativas entre los valores de porosidad, entre las diferentes mezclas ensayadas, por lo que cualquiera de ellas sería aceptable como constituyente del tecnosuelo, siendo estos valores superiores al del determinado en el compost comercial (38,14%).

En cuanto a la CRH, se aprecia claramente que al incrementar el porcentaje de las hojas de pino en las mezclas, los valores de CRH aumentan. Esto quiere decir que el pino tiene una gran capacidad para retener agua.

El resultado obtenido del compost comercial fue de 105,37% por lo que el porcentaje de mezcla más parecido sería el de 25-75%. Mezclas con porcentajes superiores de hoja de pino serían muy interesante como medio de cultivo, aunque, posiblemente, no tendría otras propiedades asociadas a la materia orgánica compostada, que se alejan de los objetivos de este trabajo, como el poder de quelación, o el aporte de determinados nutrientes esenciales.

En la tabla 4 se muestran los porcentajes de MO y CE en función de la variación del porcentaje de la mezcla binaria.

Tabla 4. Porcentaje de MO y CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de la mezcla pino-compost

% Residuo	MO (%)	σ	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	σ
0-100	59	1,1	2353 a	51
25-75	67,2	0,8	2244 a	87
50-50	75,5	0,5	1.723	96
75-25	83,7	0,2	1.309	64
100-0	91,9	0,3	789	114
F	1910 ***		293 ***	

Atendiendo al valor de 91% de materia orgánica del compost comercial, podemos ver que los porcentajes de mezcla más adecuados para usar son el de 75% y 100% de pino. Cabe resaltar que el pino tiene un contenido en MO bastante mayor que el propio compost de EDAR, como consecuencia del diferente origen de los residuos y el proceso de estabilización a que ha sido sometido el lodo de EDAR.

Por otro lado, atendiendo a la conductividad eléctrica, el porcentaje de 75% pino y 25% compost sería la mezcla que se asemejaría más al valor del compost comercial (1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). A este respecto, debemos indicar que dependiendo de la composición de las sales presentes en el extracto de conductividad, se podría indicar, con más criterio, si es mejor o no la conveniencia de utilizar mezclas de residuos con un porcentaje de hoja de pino diferente.

En la tabla 5, la última, se muestran los valores de Khs y pH en función de la variación del porcentaje de la mezcla binaria.

Tabla 5. Conductividad hidráulica (cm/h) y pH de la mezcla pino-compost

% Residuo	Khs (cm/h)	σ	pH	σ
0-100	284	4	8,62	0,01
25-75	218 a	3	7,7	0,1
50-50	226 a	2	7,28	0,12
75-25	226 a	4	6,76	0,05
100-0	270	9	6,15	0,03
F	143 ***		820 ***	

Estrechamente relacionada con la porosidad de un suelo, se encuentra la conductividad hidráulica saturada. Este parámetro nos permite describir las características del sistema poroso de un suelo. Cuando los usos, los manejos y los procesos de compactación influyen sobre el sistema poroso del suelo, también lo hace directamente sobre su conductividad hidráulica.

Observando los resultados de la Khs y comparándolo con el dato de 239,38 cm/h del compost comercial, vemos que el porcentaje más adecuado a usar en este caso está entre el intervalo del 25% al 75% de hoja de pino, si bien es cierto que las pocas diferencias entre valores de conductividad hidráulica de las mezclas, harían aconsejable cualquier proporción. En cuanto al pH, nos interesa un pH ácido, que favorezca la disponibilidad de la mayor parte de los nutrientes presentes en un medio de cultivo, tal como sucede con el compost comercial con un valor de 4,83. Dicho esto, los porcentajes de mezcla idóneos serían los superiores al 75% de hoja de pino, ya que son los que garantiza un pH por debajo de 7,0.

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones extraídas a partir de los datos obtenidos en este trabajo son las siguientes:

- Se ha comprobado mediante el análisis de los resultados obtenidos que el porcentaje de mezcla binaria con resultados más parecidos al compost comercial está entre el 75 - 25% de hoja de pino.
- Se ha constatado que la densidad aparente y la capacidad de retención hídrica son los únicos parámetros en los cuales el porcentaje de mezcla binaria a usar es diferente, 25 - 75%.
- La adición de acículas de pino como enmienda se traduce en un aumento de la conductividad hidráulica, en las mezclas ensayadas en nuestro estudio. Hecho que indirectamente tiene connotaciones positivas como permitir un adecuado drenaje y reducir la escorrentía superficial.
- Se ha puesto de manifiesto que la aplicación de enmiendas para la formulación de Tecnosuelos, a partir de hojas de pino y compost de EDAR, es una opción potencialmente adecuada, susceptible de mejorar los suelos enmendados o los generados a partir de estos subproductos.
- El empleo como enmienda de las acículas de pino y el compost de lodo de EDAR, supone la posibilidad de fomentar la economía circular de estos residuos y valorizarlos de manera sostenible sin costes excesivos para regenerar propiedades de suelos del entorno en que se obtienen. Esta estrategia parece estar conforme con lo esperable en las políticas europeas de reutilización de residuos y encaminadas a fomentar el desarrollo sostenible.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. UNE-EN ISO 17892-3:2015. Determinación de la densidad de las partículas de un suelo.
- AENOR. UNE-EN 1936:2006. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.
- AENOR. UNE 77308:2001. Calidad del suelo. Determinación de la conductividad eléctrica específica.
- AENOR. UNE 77317:2001. Calidad del suelo. Determinación del contenido en carbonato. Método volumétrico.
- AENOR. UNE-EN 13038:2001. Mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. Determinación de la conductividad eléctrica.
- AENOR. UNE-EN 13039:2001. Mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. Determinación del contenido en materia orgánica y de las cenizas.
- AENOR. UNE-EN 13040:2008. Mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. Preparación de las muestras para ensayos físicos y químicos. Determinación del contenido de materia seca, del contenido en humedad y de la densidad aparente compactada en el laboratorio.
- Barbaro, L., Karlanian, M., & Mata, D. (2014). Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas. *Presidencia de la Nación, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina.*
- BOE 17 (1982) Suelos y otros. Orden de 1 diciembre de 1081 por la que se establecen en 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.

- Bonneau, M.; Levy, G. (1979). Assemblage et organization physique des particules. En *Pédologie 2: Constituants et propriétés du sol*, pp. 234-250. Ed. Elsevier-Masson, Paris.
- Cotler, H.; Sotelo, E.; Domínguez, J.; Zorrila, M.; Cortina, S.; Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica* 83: 5-71. Instituto Nacional de Ecología, México.
- Dexter, A. (2004). Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120:201-214.
- FAO (1999). New concepts and approaches to land management in the tropics with emphasis on steep lands. Ed. FAO, Roma.
- FAO (2015). Revised world soil charter. Ed. FAO, Roma.
- Francés, F. S. (2005). La importancia del suelo como recurso. *Gestión del medio ambiente (1996-2005)*, 93, 259.
- Ingaramo, O. E., Paz Ferreiro, J., Mirás-Avalos, J. M., & Vidal Vázquez, E. (2007). Caracterización de las propiedades generales del suelo en una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo.
- Moorberg, C.J. y Crouse, D.A. 2021. Soils Laboratory Manual: K-State Edition, Version 2.0. Kansas State University Libraries.
- Murray Núñez, R. (2011). Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *CONACYT*, 20.
- Navarro-Pedreño, J.; Moral, R.; Gómez, L.; Mataix, J. (1995). Residuos Orgánicos y Agricultura. Ed. SP Universidad de Alicante, Alicante.
- Porta, J.; López-Acevedo, M.; Poch, R.M. (2010). Introducción a la Edafología. Uso y protección del suelo. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.

Rodríguez-Espinosa, T.; Navarro-Pedreño, J.; Gómez-Lucas, I.; Jordán-Vidal, M.; Bech-Borras, J.; Zorpas, A. (2021). Áreas urbanas, salud humana y tecnosoles para el acuerdo verde. *Environ Geochem Health*.

Rucks, L. (2004). Propiedades físicas del suelo. *Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay*.

Sch, A.E., Grez, R. y Ramirez, C. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro sur*, 25(1), 51-56.

