2025 | 16·20
GIJÓN | JUNIO
9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

# 9CFE-1267

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025**.
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza

# Influencia de la densidad aparente en la regeneración natural de pinares de *Pinus pinea* L. vallisoletanos

PÉREZ MARTÍN, E. (1), MORENO PÉREZ, D. (1), ORTIZ SANZ, M. (1), LAFUENTE ALVAREZ, F. (1), MARTÍNEZ MORENO, J. (2), RUANO BENITO, I. (2), SANGÜESA-BARREDA, G. (3), PARDOS MINGUEZ, M. (4), CALAMA SAINZ, R. (4), ROMERALO TAPIA, C. (4), PANDO FERNANDEZ, V. (5), SISAY, G. (1, 6), TURRIÓN NIEVES, M.B. (7), HERRERO DE AZA, C. (1).

(1) Departamento de Ciencias Agroforestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (ETSIIAA), Universidad de Valladolid, Avda. Madrid, 57. 34004. Palencia, ESPAÑA.

(2) Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), ETSIIAA, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid, Avda. Madrid, 57. 34004. Palencia, ESPAÑA.

(3) Departamento de Ciencias Agroforestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), EiFAB, Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y Bioenergía. Universidad de Valladolid.

(4) Departamento de Dinámica y Gestión Forestal, Instituto de Ciencias Forestales, INIA-CSIC, Madrid.

(5) Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (ETSIIAA). Universidad de Valladolid, Avda. Madrid, 57. 34004. Palencia, ESPAÑA.

(6) Departamento de Geografía y estudios ambientales, Universidad de Gondar, P.O. Box 196, Etiopía.

(7) Departamento de Ciencias Agroforestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), Unidad Asociada de I+D+i al CSIC Gestión Forestal Sostenible,Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (ETSIIAA), Universidad de Valladolid, Avda. Madrid, 57. 34004. Palencia, ESPAÑA.

**Resumen**

La regeneración natural es un proceso clave de la dinámica de los sistemas forestales para asegurar la persistencia, funcionalidad y productividad de los bosques. Existen algunos factores ambientales que limitan el establecimiento de la regeneración natural y más aún en el contexto actual de cambio climático y global. En los pinares de *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte, el principal cuello de botella en los procesos de regeneración está relacionado con la sequía estival y las altas temperaturas. El efecto de la sequía se ve agravado por las características del suelo, con más del 90% de contenido en arena y muy baja capacidad de retención de agua (<100 mm), unido a una capa freática cada vez más profunda. El objetivo de este trabajo es analizar la influencia de la densidad aparente en el proceso de

regeneración, para ello se ha estudiado la densidad aparente en una red de 43 parcelas. Los resultados obtenidos sugieren que la densidad aparente influye en los procesos de regeneración de la especie *Pinus pinea*.

**Palabras clave**

Piñonero, propiedades fisicoquímicas edáficas, arenales, persistencia de la masa.

## 1. Introducción

La regeneración natural es un proceso complejo que resulta de la interacción de distintos factores bióticos y abióticos (RUANO, 2016) y por el cual los ecosistemas se perpetúan mediante el establecimiento de nuevos individuos a partir de semillas o materiales vegetativos sin intervención humana directa (PARDOS et al., 2005; RIBEIRO et al., 2022). Este proceso es vital para mantener la biodiversidad, aumentar la resiliencia de los ecosistemas y apoyar la recuperación de paisajes degradados (CHAZDON & GUARIGUATA, 2016; DYDERSKI & JAGODZINSKI, 2020).

El pino piñonero, *Pinus pinea* L., desempeña un papel crucial en los ecosistemas mediterráneos, proporcionando importantes servicios ecosistémicos (MANSO et al., 2012). Esta especie originaria de la región mediterránea abarca una superficie aproximada de 600.000 hectáreas, principalmente distribuidas en España (70%), Portugal (10%), Italia (6%) y, en menor medida, Túnez, Francia, Marruecos e Israel (representando en conjunto el 6%) (LOEWE Y GONZÁLEZ, 2012). Además, ha sido introducido satisfactoriamente en Argentina, Sudáfrica y Estados Unidos (VIÑAS et al., 2016). De las 460.000 hectáreas comprendidas en España, gran parte se encuentran en Andalucía y Castilla y León, siendo la mayoría de ellas masas mixtas de *Pinus pinea* y *Pinus pinaster* Ait., según datos de MITECO (2025). Es una de las especies forestales más importantes en las zonas con marcada sequía estival en la Península Ibérica (GONÇALVES & POMMERENING, 2012) por su polivalencia, siendo cultivada para la producción de piñones, resina, corteza y madera y para la protección del suelo frente a la erosión (VIÑAS et al., 2016), empleando incluso la corteza de las piñas como biocombustible. Sin embargo, dado su crecimiento relativamente lento no es una especie destacada para plantaciones madereras, siendo el producto económicamente más importante su fruto comestible, el piñón. El piñón posee un mercado amplio tanto interior como exterior y la recogida de piña juega un papel significativo en la economía rural, contribuyendo a frenar el éxodo rural (REYES & PÉREZ, 2004).

La hipótesis principal del presente trabajo es que una de las limitaciones clave de la regeneración forestal de esta zona está relacionada con las propiedades del suelo (GORDO et al., 2012). Varios autores han explorado la influencia de los factores edáficos en otras especies de pino (ZHOU & SHANGGUAN, 2006; GARCÍA-SAUCEDO, 2024; RODRÍGUEZ Y BRAVO, 2012), cuyos resultados señalan que las propiedades edáficas son clave para el establecimiento de nuevas plántulas. Factores como la textura del suelo, el contenido en materia orgánica, el pH, la conductividad eléctrica y la capacidad de retención de agua en el suelo son críticos para determinar la capacidad del suelo para retener la humedad y proporcionar

nutrientes esenciales (MONGE, 2003) y, por tanto, pueden influir en la germinación de las semillas, el crecimiento de las plantas y la recuperación general del ecosistema (MANSO et al., 2012). En la meseta castellana, la regeneración natural de los pinares de piñonero está afectada por una combinación de factores abióticos y bióticos que crean cuellos de botella críticos en su establecimiento (MANSO et al., 2012; RIBEIRO et al., 2022).

A pesar de las investigaciones previas en torno a la influencia de distintos factores sobre la regeneración de *Pinus pinea*, existe un vacío importante en la comprensión de la influencia de los suelos, particularmente en las áreas de regeneración. Así, se han estudiado los patrones espacio-temporales de dispersión primaria de las semillas (MANSO et al., 2012) determinando que, aunque la dispersión de semillas es vital para la regeneración, el éxito de estas nuevas poblaciones también está fuertemente influenciado por factores ambientales, principalmente la disponibilidad de agua. Por su parte, CALAMA et al. (2013) se centraron en modelizar la respuesta ambiental de la fotosíntesis neta foliar en la regeneración natural de *Pinus pinea y*VERGARECHEA et al. (2019) modelizaron cómo el cambio climático afecta a los patrones de regeneración. CALAMA et al. (2017) llevaron a cabo una revisión sobre diferentes factores, entre los que se encuentra la capacidad de retención de agua y el tipo de suelo, que pueden influenciar en la regeneración de distintas especies de pino entre las que se incluye *Pinus pinea*, pero no se estudió pormenorizadamente la influencia determinante del suelo en la regeneración.

La densidad aparente del suelo es un indicador de la compactación y la salud del mismo y está influenciada por la textura y la estructura del suelo (AL-SHAMMARY et al., 2018), el contenido de materia orgánica (COTRUFO & LAVALLEE, 2022) y el contenido de humedad (ROMERO-BARRIOS et al., 2015; ARCHER & SMITH, 1972; SALAMANCA Y SADEGHIAN, 2006). Estos factores, a su vez, tienen influencia en características como la capacidad de retención de agua (GEROY et al., 2011), la disponibilidad de nutrientes (MARTÍNEZ et al., 2008), la distribución de las raíces (GAITÁN et al., 2005; SAINJU & GOOD, 1993) o la diversidad y estructura de las comunidades microbianas (JAURIXJE et al., 2013; HAO et al., 2021). Todas ellas son esenciales para el asentamiento de las plántulas y, por tanto, determinantes en la regeneración de especies forestales. RODRIGUEZ Y BRAVO (2012) sugirió que la influencia significativa del porcentaje de elementos gruesos, el contenido de materia orgánica y de arena del suelo sobre el estado de desarrollo de la regeneración en rodales de *Pinus sylvestris*L. podría indicar que la textura y estructura del suelo son factores clave para el establecimiento natural de las plántulas, debido a su relación con la profundidad y disponibilidad del agua de lluvia. La densidad aparente, al estar influenciada por estos mismos factores (ATHIRA et al., 2019; VERHEIJEN et al, 2019), también sería un factor clave en la regeneración. La materia orgánica del suelo afecta a propiedades edáficas como la porosidad, la agregación y la capacidad de intercambio catiónico, que determinan la densidad aparente, la textura y la estructura del suelo, que están íntimamente relacionadas con la regeneración y productividad de las plantas (COTRUFO & LAVALLEE, 2022). Por ello, la densidad aparente se convierte en una propiedad interesante para el estudio indirecto de otras propiedades edáficas relacionadas con ella.

## 2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es estudiar la posible influencia de la densidad aparente en la regeneración de *Pinus pinea*.

## 3. Metodología

La zona de estudio se encuentra situada en masas regulares monoespecíficas de *Pinus pinea*, en tierra de pinares de la provincia de Valladolid. Estas masas, con una edad media del arbolado en torno a 120 años, presentan una calidad de estación media-alta (índice de calidad de estación 15-16 m de altura dominante a los 100 años de edad). Estas formaciones se encuentran en terreno llano, sobre suelos muy arenosos (contenido medio de arenas superior al 90%) de origen sedimentario, con una primera capa de arena que llega a alcanzar, en algunos puntos, una profundidad superior a los dos metros, encontrando por debajo de la misma horizontes con un mayor contenido en arcillas. El clima es mediterráneo-continental, el cual se caracteriza por tener inviernos fríos y húmedos, con temperaturas mínimas absolutas de -10 ºC, veranos cálidos y secos, con una temperatura máxima absoluta de 40 ºC y precipitaciones medias de julio a septiembre de 66 mm, siendo la precipitación media y temperatura anuales de 435,5 mm y 12,6 ºC respectivamente. El periodo de heladas comprende de septiembre a mayo (VERGARECHEA et al., 2019).

La recogida de muestras edáficas se llevó a cabo en 43 parcelas de pinares de *Pinus pinea* con distintas categorías de regeneración. Estas parcelas pertenecen a la red de seguimiento instalada en el año 2002 por el Servicio Territorial de Medio Ambiente de Valladolid, en tramos en regeneración dentro de los montes públicos. Estas parcelas son circulares, de radio fijo igual a 8 m, y se mide anualmente el regenerado establecido. Todas ellas se localizan en el MUP 44 “Tamarizo Nuevo”, cuartel B, tramo III, propiedad del Ayuntamiento de Portillo. Las parcelas fueron clasificadas acorde a la cantidad de regenerado existente en el último inventario. Las categorías de regeneración consideradas fueron: Regeneración 0 plántulas/ha, Regeneración <200 plántulas/ha, Regeneración 200-1000 plántulas/ha y Regeneración >1000 plántulas /ha. En cada parcela se tomaron distintos puntos de muestreo en función de la categoría. Así, en las parcelas con Regeneración 0 se muestrearon 2 puntos (punto control [C], fuera del área de influencia de los árboles madre de la parcela pero igualmente ubicado dentro de sus límites y punto control regeneración [T], en una zona sin regeneración ubicada bajo la influencia del árbol madre y de los límites de la parcela), mientras que en las parcelas con regeneración (Regeneración <200, 200-1000 y >1000 plántulas /ha) se tomaron 3 puntos de muestreo (C, T y punto regeneración [R], tomándose este último en la zona de regeneración del árbol madre, la cual debe de encontrarse en un límite de 8 metros del hito central de la parcela (MANSO et al., 2012)). En todos los puntos de muestreo se recogieron las fracciones de hojarasca inalterada y humificada en un marco de muestreo de 30 x 30 cm (*Figura 1*) y se consideraron 4 profundidades de suelo mineral (0 - 5 cm desde la superficie, 5 - 10 cm, 10 - 20 cm y 20 - 30 cm desde la superficie) (*Figura 2*).

*Figura 1. Recogida de hojarasca comprendida en un marco de 30x30 cm.*

*Figura 2. Medición y marcaje de los rangos de estudio del perfil*

Para la determinación de la densidad aparente se tomaron muestras inalteradas con un cilindro de volumen conocido. Dicho volumen fue llevado a laboratorio y secado en estufa hasta peso constante para determinar la masa seca. La densidad aparente (masa seca en g y volumen inalterado en $cm^3$, *Ecuación 1*) fue determinada para cada parcela, punto de muestreo y profundidad.

[*Ecuación 1*] da ($g/cm^3$) = masa suelo seco (g) / V suelo inalterado ($cm^3$),

siendo $V = \pi \times h \times r^2$

*Nota: donde h es la altura del cilindro (cm)*

*r es el radio del cilindro (cm)*

Análisis estadístico.

Se ajustó un modelo lineal mixto (LMM). La variable dependiente fuela densidad aparente y las variables independientes fueron dos factores inter-sujetos (categoría con 4 niveles y punto de muestreo con 3 niveles), un factor intra-sujeto (profundidad con 4 niveles) y un factor aleatorio (parcela con 43 niveles).

La formulación del modelo fue la siguiente:

$$y_{ml(ij);k} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \delta_{l(ij)} + \gamma_k + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + \varepsilon_{ml(ij);k}$$

Con *i=1,2,3,4* para las categorías, *j=1,2,3* para los puntos de muestreo, *k=1,2,3,4* para las profundidades, *l=1, 2,...,43* para las parcelas y *m=1,2,3* para los puntos de muestreo dentro de una parcela.

Las variables y los parámetros del modelo fueron:

$y_{ml(ij);k}$

*m*
*l*
*i*
*j*
*k*

$\mu$

$\alpha_i$

*i*

$\beta_j$

*j.*

$\delta_{l(ij)}$

*i*
*j*

$\delta_{l(ij)} \sim N(0, \sigma_\delta^2)$

$\sigma_\delta^2$

$\gamma_k$

$k$

$\varepsilon_{ml(ij);k}$

$m$
$l$
$i$
$j$
$k$

La formulación de los errores del modelo fueron:

- $\varepsilon_{ml(ij);k} \sim N(0, \sigma_k^2)$, donde $\sigma_k^2$ es la varianza aleatoria de los errores para la densidad aparente a profundidad *k*.
- $Cov(\varepsilon_{ml(ij);k}, \varepsilon_{m'l'(i'j');k'}) = \begin{cases} w_{kk'} \text{ if } k = k' \\ 0 \text{ if } k \neq k' \end{cases}$, donde $\omega_{kk'}$ es la covarianza entre las profundidades *k* y *k´*.

Todas las comparaciones se realizaron utilizando la prueba t de Student. El análisis estadístico se realizó usando Proc MIXED de SAS 9.4 (SAS Institute Inc., 2024).

## 4. Resultados

En la *Tabla 1*se muestran los p-valores de los efectos fijos sobre la densidad aparente. El modelo mostró una interacción triple significativa con un p-valor de 0,0477 entre las tres variables de estudio (categoría de regeneración, punto de muestreo en la parcela y profundidad de muestreo), lo que sugiere que la densidad aparente depende de la parcela muestreada y, dentro de ella, del punto de muestreo y de la profundidad considerada.

*Tabla 1. Pruebas de tipo 3 para efectos en el modelo mixto de densidad aparente.*

| Test de tipo 3 de efectos fijos | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Efecto** | **NumDF** | **DenDF** | **F-Valor** | **Pr > F** |
| Categoría | 3 | 107 | 1,75 | 0,1618 |
| Punto de muestreo | 2 | 107 | 3,77 | 0,0262 |
| Categoría x Punto | 5 | 107 | 0,39 | 0,8554 |
| Profundidad | 3 | 321 | 74,61 | <0,0001 |
| Categoría x Profundidad | 9 | 321 | 0,49 | 0,8802 |
| Punto x Profundidad | 6 | 321 | 0,96 | 0,4546 |
| Categoría x Punto x Profundidad | 15 | 321 | 1,71 | **0,0477** |

*Nota: NumDF, DenDF son los Grados de libertad del numerador y denominador, respectivamente; F-Valor* es el *Valor F del estadístico F; Pr>F Valor es el p-valor asociado con el estadístico F anterior.*

En la *Tabla 2*se muestranlos resultados del análisis estadístico, donde se recogen la media y la desviación estándar para cada categoría, punto de muestreo y profundidad, así como la significancia entre los distintos factores.

Así, se observaron diferencias significativas en el punto R respecto de los puntos C y T en la categoría 200-1000 y a una profundidad de 0-5 cm. Aún sin diferencias significativas, se observó una tendencia de la densidad aparente a ser menor en los puntos T y R respecto del C en las dos primeras profundidades que no se observó a partir de 10 cm de profundidad. Los puntos de muestreo bajo influencia del árbol madre (R y T) presentaron densidades aparentes cercanas a 1,3 g/cm³, mientras que las densidades aparentes de los puntos C se encontraron más alejadas de dicha medida, a excepción de la categoría de mayor regeneración.

*Tabla 2. Resultados del análisis estadístico de la densidad aparente por profundidad, punto de muestreo y categoría.*

| Categoría | Punto | Profundidad | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 - 5 | 5 - 10 | 10 - 20 | | | 20 - 30 | | |
| media | st | media | st | media | st | media | st |
| C | 1,3958 aA1 | 0,0509 | 1,5483 bA1 | 0,0345 | 1,6107 cA1 | 0,0299 | 1,592 bcA1 | 0,0285 |
| T | 1,3578 aA1 | 0,0509 | 1,5333 aA1 | 0,0345 | 1,5943 cA1 | 0,0299 | 1,6204 dA1 | 0,0285 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-200 | C | 1,4988 aA1 | 0,0468 | 1,627 bA1 | 0,03175 | 1,6573 cA1 | 0,0275 | 1,6511 bA1 | 0,0262 |
| 0-200 | T | 1,3896 aA1 | 0,0468 | 1,5795 bA1 | 0,03175 | 1,6044 bA1 | 0,0275 | 1,6525 bA1 | 0,0262 |
| 0-200 | R | 1,3581 aA1 | 0,0468 | 1,5052 bA1 | 0,03175 | 1,5513 bA1 | 0,0275 | 1,6257 dA1 | 0,0262 |
| 200-1000 | C | 1,45 aA1 | 0,0509 | 1,5642 bA1 | 0,0345 | 1,5569 bA1 | 0,0299 | 1,5923 bA1 | 0,0385 |
| 200-1000 | T | 1,4111 aA1 | 0,0509 | 1,4983 aA1 | 0,0345 | 1,5667 cA1 | 0,0299 | 1,6113 cA1 | 0,0285 |
| 200-1000 | R | 1,255 aB1 | 0,0509 | 1,5109 bA1 | 0,0345 | 1,6125 cA1 | 0,0299 | 1,6046 cA1 | 0,0285 |
| > 1000 | C | 1,3632 aA1 | 0,0596 | 1,5655 bA1 | 0,0404 | 1,6166 bdA1 | 0,0351 | 1,6492 dA1 | 0,03351 |
| > 1000 | T | 1,3289 aA1 | 0,0596 | 1,5191 bA1 | 0,0404 | 1,57 bA1 | 0,0351 | 1,5693 bA1 | 0,03351 |
| > 1000 | R | 1,3869 aA1 | 0,0596 | 1,4919 bA1 | 0,0404 | 1,5451 bA1 | 0,0351 | 1,5626 bA1 | 0,3351 |

*Nota: st es desviación estándar. Diferente letra minúscula indica que hay diferencias significativas entre distintas profundidades para igual punto de muestreo y categoría; diferente letra mayúscula indica que hay diferencias significativas entre distintos puntos de muestreo para igual profundidad y categoría y diferente número indica que hay diferencias significativas entre distintas categorías para igual punto de muestreo y profundidad.*

## 5. Discusión

En el presente estudio esperábamos encontrar diferencias significativas en la densidad aparente entre las distintas categorías y puntos de muestreo, más allá de las diferencias encontradas entre distintas profundidades. Si bien lo que encontramos fue una tendencia de la densidad aparente a disminuir en los puntos de muestreo con influencia del árbol madre respecto del punto sin influencia en las dos primeras profundidades, siendo menor la densidad aparente en los puntos R respecto de los puntos T y en estos, a su vez, respecto de los puntos C. Esta tendencia no se observó para la categoría de mayor regeneración, lo que puede ser consecuencia de que, a pesar de que en las parcelas con mucha regeneración el punto C se tomó fuera del área de influencia del árbol madre, no se pudo evitar en muchas ocasiones la influencia de otros árboles de la parcela. Además, la dificultad en la selección de los puntos de muestreo en categorías donde la regeneración estaba ausente o donde ésta era tan abundante que impedía la selección de puntos de muestreo sin regeneración o controles verdaderos puede ser la causa de la ausencia de diferencias significativas en dichas categorías.

Respecto a las diferencias encontradas en la densidad aparente entre los puntos de estudio, es esperable un aumento de la densidad aparente conforme disminuye la materia orgánica (ATHIRA et al., 2019) y, en el caso concreto de estudio, podría explicar la tendencia de la densidad aparente, aunque no significativa en la mayoría de las categorías de regeneración, a ser menor en los lugares donde hay influencia de árboles madre (puntos T y R) respecto de donde no la hay (punto C).

Esto puede ser debido a que la presencia de vegetación repercute en la cantidad de materia orgánica del suelo, lo que provoca un descenso de la densidad aparente. Esta disminución de la materia orgánica en las zonas sin influencia del árbol madre podría verse agudizada, además, por la acción de la deshidrogenasa, enzima que transforma la materia orgánica en compuestos inorgánicos en aquellos lugares donde hay una mayor demanda de nutrientes, como lugares donde el ecosistema forestal es joven (GARCÍA-SAUCEDO, 2024), contribuyendo a aumentar la densidad aparente de dichas zonas.

Distintos autores (ALAMEDA et al., 2012; KORMANEK et al., 2015) han explorado la influencia de la densidad aparente en el sistema radicular, comprobando que el crecimiento de las raíces disminuye conforme aumenta la densidad aparente, así como la masa en seco y la altura total de las plántulas. TRACY et al. (2013) observaron cómo el crecimiento óptimo de las raíces en suelos franco-arenosos, tal y como es el caso de nuestra zona de estudio, se produce en una densidad aparente de 1,3 g/cm$^3$, encontrándose un claro efecto negativo sobre el crecimiento conforme aumenta la densidad aparente. ALAMEDA et al. (2012) encontraron que el efecto negativo de la densidad aparente comienza a manifestarse en densidades aparentes por encima de 1,4 g/cm$^3$. Los primeros días de crecimiento de las raíces, donde las plántulas dependen principalmente de los nutrientes de la semilla, el principal obstáculo para el crecimiento es una mayor densidad aparente, siendo prioritaria la influencia de la textura del suelo en relación con la disponibilidad de nutrientes y agua en días posteriores (TRACY et al., 2013). En condiciones de incidencia de luz muy limitada, se observó que el efecto de la compactación del suelo se reduce significativamente, lo que se relaciona con la disminución de los requerimientos de agua y nutrientes en tales condiciones (ALAMEDA et al., 2012). Esto respalda que la importancia de la densidad aparente en el crecimiento radicular responde no solo a su relación con la compactación del suelo, sino también a su relación con la disponibilidad de agua y nutrientes. AL MAHOU et al. (2008) emplearon funciones de pedotransferencia que utilizaban las variables de textura y densidad aparente, las cuales resultaron adecuadas para la predicción de la retención de agua. De igual forma, un estudio en la especie *Pinus tabulaeformis* Carr. (ZHOU & SHANGGUAN, 2006), donde se observó que el agua en el suelo es un control clave en la distribución de las raíces finas, mostró que los efectos de la densidad aparente en los parámetros de las raíces finas fueron consistentes con los del agua del suelo. Los resultados de nuestro estudio, de acuerdo con lo sugerido en TRACY et al. (2013), sugieren que la densidad aparente idónea para el asentamiento de nuevas plántulas en profundidad superficial de 0 a 5 cm se encuentra en torno a 1,3g/cm$^3$y que densidades superiores a 1,4g/cm$^3$ dificultan en gran medida la existencia de regeneración.

## 6. Conclusiones

Las diferencias encontradas en el presente estudio sugieren que la densidad aparente es un factor relevante en la regeneración de nuevas plántulas, posiblemente debido a su relación con la compactación en la primera etapa de crecimiento radicular y con la disponibilidad de agua y de nutrientes en etapas posteriores.

Estudios futuros sobre cómo influyen las propiedades edáficas en la regeneración, como la retención de agua en el suelo, la textura, el contenido en materia orgánica o la disponibilidad de nutrientes, son trascendentales para desarrollar estrategias de conservación y prácticas de gestión forestal sostenibles con el fin de promover la resiliencia de los ecosistemas. En esta tarea, el suelo juega un papel fundamental como pilar de la regeneración de *Pinus pinea* y en la dinámica y abastecimiento de los distintos servicios ecosistémicos proporcionados por este ecosistema mediterráneo.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación del proyecto BEGINPINE, El final es el comienzo. Envejecimiento y regeneración de pinares autóctonos: resiliencia y vulnerabilidad frente a un ambiente en cambio, PID2022-136906OB-C21, financiado por el Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023, por el proyecto Bosque Modelo Palencia, BF154, por el Proyecto IMFLEX, PID2021-126275OB-C22, y por el programa Garantía Juvenil – UVA-05-B. Las personas autoras de este trabajo quieren agradecer el trabajo del S.T. de Medio Ambiente de Valladolid en la instalación, mantenimiento y seguimiento de la red de parcelas, y expresar un especial agradecimiento a David, agente forestal de la Pedraja de Portillo.

## 8. Bibliografía

ALAMEDA, D.; ANTEN, N. P.; VILLAR, R.; 2012.Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. *Soil and Tillage Research,* 120, 121-129.

AL-MAJOU, H.; BRUAND, A.; DUVAL, O.; LE BAS, C.; VAUTIER, A.; 2008. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. *Soil Use and Management* 24(4) 383–391.

AL-SHAMMARY, A. A. G.; KOUZANI, A. Z.; KAYNAK, A.; KHOO, S. Y.; NORTON, M.; GATES, W.; 2018. Soil bulk density estimation methods: A review. *Pedosphere* 28(4) 581–596.

ATHIRA, M.; JAGADEESWARAN, R.; KUMARAPERMAL, R.; 2019. Influence of soil organic matter on bulk density in Coimbatore soils.*Int. J. Chem. Stud* 7(3) 3520–3523.

CALAMA, R.; MANSO R.; LUCAS, M. E., ESPELTA, J. M., PIQUÉ, M., BRAVO, F.; PARDOS, M.; 2017.Natural regeneration in Iberian pines: A review of dynamic processes and proposals for management.

CALAMA, R.; PUÉRTOLAS, J.; MADRIGAL, G.; PARDOS, M.; 2013.Modeling the environmental response of leaf net photosynthesis in Pinus pinea L. natural regeneration. *Ecological Modelling* 251 9–21.

CHAZDON, R. L.; GUARIGUATA, M. R.; 2016. Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: Prospects and challenges. *Biotropica* 48(6) 716–730.

COTRUFO, M. F.; LAVALLEE, J. M.; 2022. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. *Advances in agronomy* 172 1–66.

DYDERSKI, M. K.; JAGODZIŃSKI, A. M.; 2020. Impact of invasive tree species on natural regeneration species composition, diversity, and density.*Forests* 11(4) 1–20.

GAITÁN, J. J.; PENÓN, E. A.; COSTA, M. C.; 2005. Distribución de raíces finas de Eucalyptus globulus ssp. maidenii y su relación con algunas propiedades del suelo. *Ciência Florestal* 15(1) 33–41.

GARCÍA-SAUCEDO, F.; GARCÍA-MOROTE, F. A.; PICAZO, M.; WIC, C.; RUBIO, E.; LÓPEZ-SERRANO, F. R.; ANDRÉS-ABELLÁN, M.; 2024.Responses of enzymatic and microbiological soil properties to the site index and age gradients in Spanish black pine (Pinus nigra Arn ssp. salzmannii) Mediterranean forests. *Forests* 15(1) 113.

GEROY, I. J.; GRIBB, M. M.; MARSHALL, H. P.; CHANDLER, D. G.; BENNER, S. G.; MCNAMARA, J. P.; 2011. Aspect influences on soil water retention and storage. *Hydrological Processes* 25(25) 3836–3842.

GONÇALVES, A. C.; POMMERENING, A.; 2012. Spatial dynamics of cone production in Mediterranean climates: A case study of Pinus pinea L. in Portugal.*Forest Ecology and Management* 266 83–93.

GORDO, J.; CALAMA, R.; PARDOS, M.; BRAVO, F.; MONTERO, G.; 2012. La regeneración natural de los pinares en los arenales de la Meseta Castellana. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA).254 pp.Valladolid.

HAO, J.; CHAI, Y. N.; LOPES, L. D.; ORDÓÑEZ, R. A.; WRIGHT, E. E.; ARCHONTOULIS, S.; SCHACHTMAN, D. P.; 2021. The effects of soil depth on the structure of microbial communities in agricultural soils in Iowa (United States).*Applied and Environmental Microbiology* 87(4) e02673-20.

JAURIXJE, M.; TORRES, D.; MENDOZA, B.; HENRÍQUEZ, M.; CONTRERAS, J.; 2013.

Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara.*Bioagro* 25(1) 47–56.

KORMANEK, M.; GLAB, T.; BANACH, J.; SZEWCZYK, G.; 2015. Effects of soil bulk density on sessile oak Quercus petraea Liebl. seedlings. *European Journal of Forest Research* 134 969–979.

LIANG, W.; WEI, X.; 2020. Factors promoting the natural regeneration of Larix principis-rupprechtii plantation in the Lvliang Mountains of central China. *PeerJ* 8 e9339.

LIO, X.; LU, Y.; ZHOU, Y.; LEI, X.; ZHANG, X.; MENG, J.; 2011. The influence of soil conditions on regeneration establishment for degraded secondary forest restoration, Southern China. *Forest Ecology and Management* 261(11) 1771–1780.

LOEWE MUÑOZ, V., GONZÁLEZ GONZÁLEZ, M.; 2012.Apuntes sobre una gira de estudio sobre el Piñón del Pino piñonero (Pinus pinea) a Italia, España y Portugal.

MANSO, R.; PARDOS, M.; KEYES, C. R.; CALAMA, R.; 2012.Modelling the spatio-temporal pattern of primary dispersal in stone pine (Pinus pinea L.) stands in the Northern Plateau (Spain).*Ecological Modelling* 226 11–21.

MARTÍNEZ, E.; FUENTES, J. P.; ACEVEDO, E.; 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8(1) 68–96.

MONGE, R. A.; 2003. La regeneración de pinares mediterráneos naturales con especial referencia a" Pinus nigra ssp. salzmannii". Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, (15), 77-88.

PARDOS, M.; RUIZ DEL CASTILLO, J.; CAÑELLAS, I.; MONTERO, G.; 2005.Ecophysiology of natural regeneration of forest stands in Spain. *Forest Systems* 14(3) 434–445.

REEVES, M. J.; SMITH, P. D.; THOMASSON, J.; 1973. The effect of density on water retention properties of field soils. *Journal of Soil Science* 24(3) 355–367.

REYES, J. B.; PÉREZ, S. O.; 2004.Aproximación al sector del piñón en España. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros* (201) 165–189.

RIBEIRO, S.; CERVEIRA, A.; SOARES, P.; FONSECA, T.; 2022.Natural regeneration of maritime pine: A review of the influencing factors and proposals for management.*Forests* 13(3) 1–16.

ROMERO-BARRIOS, C.; GARCÍA-GALLEGOS, E.; HERNÁNDEZ-ACOSTA, E.; 2015. Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. *REIBCI* 2(5) 63–70.

RODRÍGUEZ, E.; BRAVO, F.; 2012. Regeneración natural de *Pinus pinaster* Ait. y su relación con los factores ambientales en masas mediterráneas del centro de España. J. Gordo, R. Calama, M. Pardos, F. Bravo, G. Montero, La regeneración natural de los pinares en los arenales de la Meseta Castellana (págs. 175-190). Valladolid.

RUANO BENITO, I.; 2016. Factores claves para la gestión de la regeneración natural en pinares mediterráneos.

SALAMANCA, A.; SADEGHIAN, S.; 2006. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana.

SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; ESPAÑOL, E.; LÓPEZ, C. A.; MERINO, A.; 2002.Influence of edaphic factors and tree nutritive status on the productivity of Pinus radiata D. Don plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management* 171(1–2) 181–189.

TEPEE, R.; DILLING, H.; BEESE, F.; 2003. Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166(1) 111–119.

MITECO (2025) Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3).Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.html

TRACY, S. R.; BLACK, C. R.; ROBERTS, J. A.; MOONEY, S. J.; 2013. Exploring the interacting effect of soil texture and bulk density on root system development in tomato (Solanum lycopersicum L.).*Environmental and Experimental Botany* 91 38–47.

VERGARECHEA, M.; CALAMA, R.; FORTIN, M.; DEL RÍO, M.; 2019. Climate-mediated regeneration occurrence in Mediterranean pine forests: A modeling approach. *Forest Ecology and Management* 446(April) 10–19.

VERGARECHEA, M.; DEL RÍO, M.; GORDO, J.; MARTÍN, R.; CUBERO, D.; CALAMA, R.; 2019. Spatio-temporal variation of natural regeneration in Pinus pinea and Pinus pinaster Mediterranean forests in Spain. *European Journal of Forest Research*

138(2) 313–326.

VIÑAS, R. A.; CAUDULLO, G.; OLIVEIRA, S.; DE RIGO, D.; 2016. Pinus pinea in Europe: Distribution, habitat, usage and threats. *European Atlas of Forest Tree Species* 204.

ZHOU, Z.; SHANGGUAN, Z.; 2007. Vertical distribution of fine roots in relation to soil factors in Pinus tabulaeformis Carr. forest of the Loess Plateau of China. *Plant and Soil* 291 119–129.