

# Aplicación de las tecnologías geoespaciales para optimizar la actividad repobladora: “el dato con botas<sup>1</sup>”

Rafael M.<sup>3</sup> Navarro Cerrillo<sup>1</sup>,  
Antonio del Campo García<sup>2</sup>,  
Carlos J. Ceacero Ruiz<sup>3</sup>,  
Antonio J. Molina Herrera<sup>4</sup>,  
Guillermo Palacios Rodríguez<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dr. Ingeniero de montes. Departamento de Ingeniería Forestal, ETSI Agronómica y de Montes, Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, 14071 Córdoba, España (rmnavarro@uco.es).

<sup>2</sup>Dr. Ingeniero de montes. Departamento de Ingeniería hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de Valencia. Cami de vera s/n, 46022 Valencia.

<sup>3</sup>Dr. Ingeniero de montes. Departamento de Fisiología, Anatomía y Biología celular. Universidad Pablo de Olavide,

<sup>4</sup>Dr. Ingeniero de montes. Departamento de Ingeniería Forestal, ETSI Agronómica y de Montes, Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, 14071 Córdoba, España.

<sup>5</sup>Dr. Ingeniero de montes. Departamento de Ingeniería Forestal, ETSI Agronómica y de Montes, Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, 14071 Córdoba, España

A medida que crece la demanda de acciones de restauración de ecosistemas forestales, el desafío de integrar eficazmente las nuevas herramientas geomáticas en la redacción, ejecución y seguimiento de proyectos de repoblación forestal se vuelve cada vez más importante. La complejidad en la toma de decisiones y la ejecución de los proyectos de repoblación abarca una gran diversidad de elementos que son cruciales para el éxito restaurador (rodalización, elección de especie/procedencias y adaptación actual y futura al lugar de establecimiento, “ingeniería” de los trabajos de establecimiento, cuidados culturales, evaluación a corto y largo plazo, etc.). Sin embargo, los métodos tradicionales utilizados para la redacción y ejecución de los proyectos de repoblación no han incorporado todavía todas las posibilidades que ofrecen las geotecnologías, lo que genera una disparidad entre la información y los medios disponibles y los empleados a diferentes escalas. Los avances en la geoinformática y la geomática forestal (ej., el acceso y análisis a bases de datos masiva, la teledetección óptica y activa sobre diferentes plataformas, la sensorización a tiempo real, etc.) representan una oportunidad sin precedentes para mejorar las actuaciones repobladoras, así como para el análisis e interpretación de la complejidad de los procesos asociados al éxito restaurador. Este artículo ofrece una reflexión sobre la aportación que la geomática puede hacer tanto al diseño como a la ejecución y seguimiento de los trabajos de repoblación forestal, intentando ser realista, pero a la vez planteando los retos que la silvicultura, como “casa común”, y la educación forestal, como “elemento transformador”, deben abordar, en el ámbito de las repoblaciones, de forma ineludible en los próximos años.

**Palabras clave:** Repoblación forestal, restauración ecosistemas, proyecto repoblador, geoinformática, SIG, teledetección, sensorización, proyecto, evaluación.

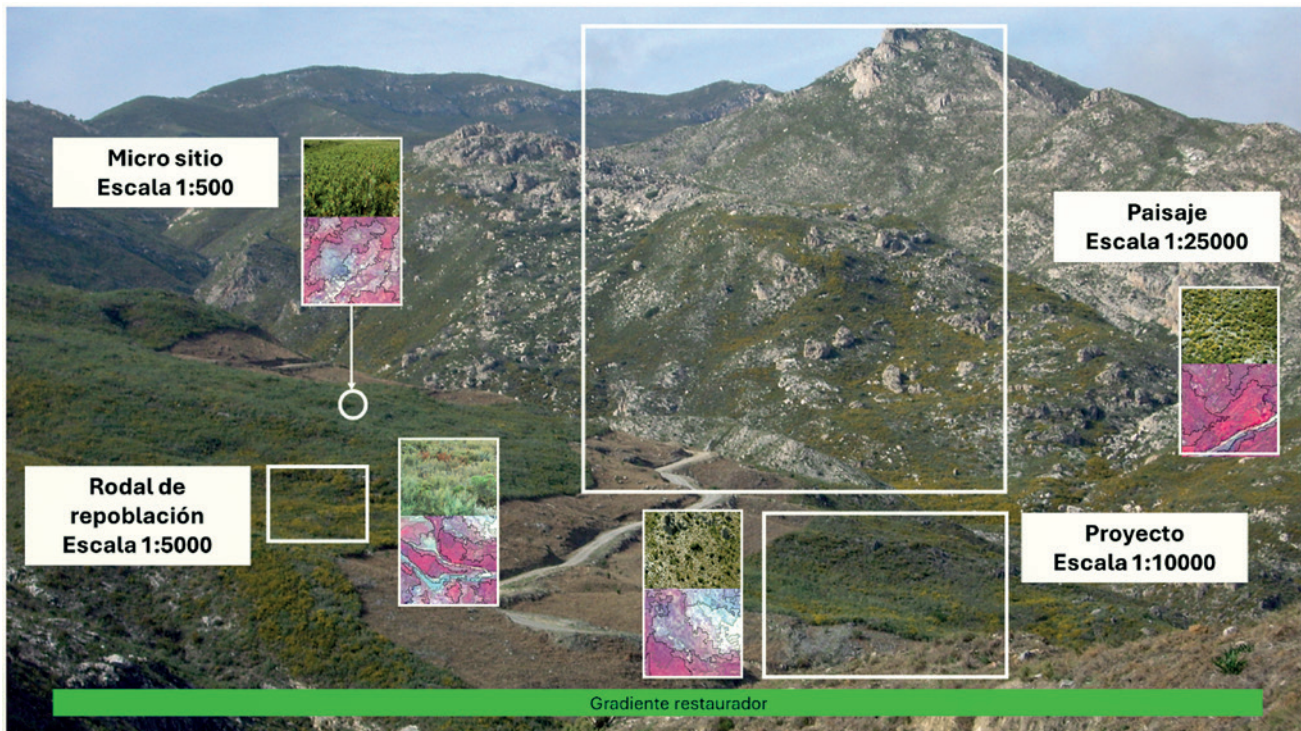


Fig. 1. Diferentes escalas a las que opera el proceso repoblador. Mientras que el proyecto integra información homogénea de acuerdo con los objetivos planteados (del paisaje al rodal), conocer las características del rodal permite entender las consecuencias del éxito/fracaso de la ejecución (del rodal al micrositio)

## 1. INTRODUCCIÓN

La historia de las repoblaciones en España ha venido determinada por la degradación de los bosques, hasta el punto de que se puede pensar que la ingeniería forestal en nuestro país surge por reacción a los graves procesos de deforestación acumulados después de siglos de destrucción de aquellos (Gómez Méndez, 2002). Para mitigar esta degradación y, más ampliamente, la pérdida de todos los servicios y producciones derivadas de los sistemas forestales, la repoblación ha representado una de las actividades prioritarias de la gestión forestal durante más de cien años (Pemán et al., 2017). Recientemente, por diferentes motivos (los procesos de restauración se consideran una prioridad global para la conservación de la biodiversidad, la lucha contra la desertificación y la degradación de la tierra, y para limitar los impactos del cambio climático antropogénico, Alexander et al., 2016), existe un creciente interés por la restauración de los ecosistemas terrestres (Löf et al., 2019), recogidos en gran parte por la Ley de Restauración de la Naturaleza promovida por la UE (<https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/natu->

re-[restoration-law\\_en](#)). En el período 1990-2020 se produjo un aumento de los bosques plantados a escala global de 123 millones de hectáreas, pasando de 170 millones de hectáreas en 1990 a 293 millones de hectáreas en 2020 (GFRA, 2020), lo que representa un aumento de más de cuatro millones de hectáreas al año. Sin embargo, durante el mismo período, se perdió una superficie total de 420 millones de hectáreas de bosques naturales (FAO, 2023). En este marco, la repoblación forestal, como parte de la silvicultura, ha desarrollado un amplio cuerpo de conocimiento técnico tanto desde el ámbito estrictamente repoblador (Pemán et al., 2021) como restaurador (Mola et al., 2018), que ha dado respuesta a diferentes aspectos del proyecto repoblador, que van desde la repoblación genérica hasta la restauración de ecosistemas de alta fragilidad ambiental.

Sin embargo, los dos grandes desafíos a los que se enfrenta la repoblación forestal en esta década son, por un lado, el aumento de la complejidad de los procesos ambientales de los ecosistemas que deben ser restaurados, y por otro, la imperiosa necesidad de cuantificar su éxito, es decir, su eficacia, eficiencia y efec-

tividad en el restablecimiento de las funciones y de los servicios ecosistémicos específicos que operan a diferentes escalas (Fig. 1). Las tecnologías geoespaciales (o si se prefiere, la geomática o la geoinformática) aplicadas a la ciencia forestal, surgidas de la interacción de las ciencias forestales y las cada vez más abundantes técnicas de obtención y análisis de datos, representan un conjunto de disciplinas y herramientas tecnológicas tales como las relacionadas con la adquisición, la estructura y el análisis de datos (datos masivos y minería de datos, *big data* – *data mining*), los sistemas de información geográfica (SIG), la cartografía, la teledetección, el Internet de las Cosas (IoT) o la inteligencia artificial (IA).

En ese sentido, y sobre la base del gran impulso experimentado en el área de las aplicaciones geotecnológicas forestales, en este artículo se brinda una descripción general de las diversas técnicas y tecnologías que pueden usarse en repoblaciones forestales, ejemplarizando a través de algunas aplicaciones prácticas. Por último, discutimos las limitaciones y desafíos actuales de la repoblación forestal y recomendamos las geotecnologías por ayudar a aumentar su



eficiencia y efectividad. Además, dado el dinamismo de este campo, uno de los objetivos de este artículo es contribuir al intercambio de ideas, experiencias y necesidades que tienen los repobladores y educadores forestales para potenciar la integración de estas competencias en la educación forestal, a todos los niveles, y su implantación como una de las áreas de mayor capacidad de innovación tecnológica del sector forestal.

## 2. EL TERRITORIO COMO OBJETO DE LA REPOBLACIÓN

Las actuaciones repobladoras tienen como objeto de sus actuaciones el territorio forestal —el monte—, así como las comunidades vegetales (y de forma indirecta, el resto de las comunidades bióticas), funcionalidades e interacciones que en él se desarrollan. Es, por tanto, inherente a la repoblación el conocimiento profundo de las condiciones ambientales del lugar de actuación. Tradicionalmente, en la repoblación forestal se ha recurrido al estudio del medio físico (socioambiental) a través de técnicas descriptivas (Aramburu Maqua y Escribano Bombín, 2014). En otros casos, se ha recurrido al uso de especies o comunidades indicadoras (Ortega y Montero, 1988) o, más recientemente, a variables esenciales de la biodiversidad, como la composición florística, la estructura o la funcionalidad de los ecosistemas, que proporcionan un medio para evaluar la efectividad y el éxito de las actividades de restauración (Gatica-Saavedra *et al.*, 2017). Una forma de integrar esa amplia y diversa información en un sistema espacial homogéneo es mediante la definición de *los rodales de repoblación*<sup>2</sup>, que representan las diferentes complejidades de los ecosistemas que van a ser restaurados, y que se consideran una *unidad espacial* confiable para la toma de decisiones intrínsecas al proyecto de repoblación y los objetivos preferentes para cada uno de los rodales definidos (Gómez Sanz, 2021). El concepto de rodal de repoblación, como la *integración* de la información del medio físico de una *unidad espacial* particular, también ha sido aplicado para la repoblación forestal



en los últimos años, con estudios que van desde la escala local hasta la microambiental (Navarro-Cerrillo *et al.*, 2014). Esta *estructuración espacial* proporciona un estado de referencia sobre el cual proyectar y ejecutar la repoblación, así como para evaluar su efectividad (es decir, cuanto más se acerque al *(eco)sistema de referencia*, más acorde con los objetivos de la restauración (Montero de Burgos, 1990; Mansourian, 2018), conceptos que permiten un amplio debate. De hecho, restaurar un determinado tipo de sistema forestal está directamente vinculado al *objetivo repoblador* de proporcionar los bienes y servicios que de él se demandan.

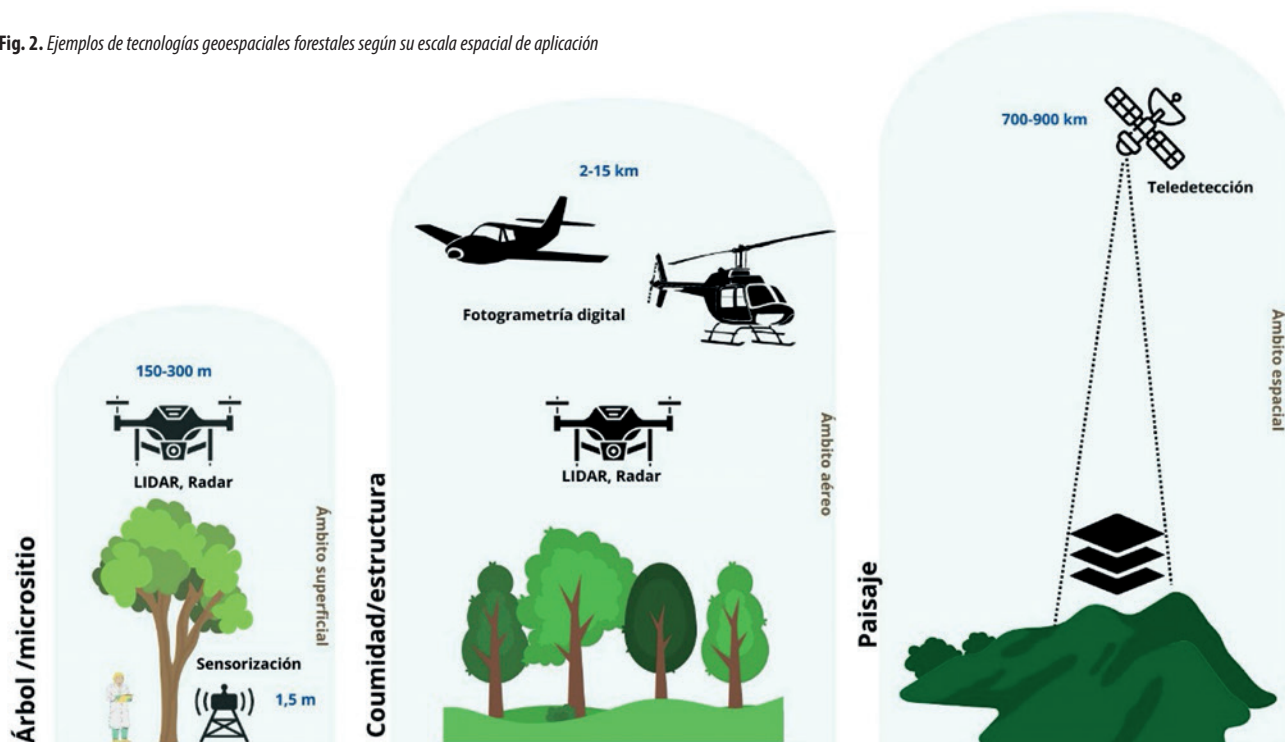
El *componente espacial* de la repoblación es lo que hace que las geotecnologías forestales representen una de las áreas de mayor potencial innovador dentro de la silvicultura y las repoblaciones. Se entienden las geotecnologías<sup>3</sup> como el conjunto de herramientas, métodos, técnicas y procedimientos orientados a la gestión de la Información Geográfica Digital (IGD), o bien los métodos y procedimientos que conforman un conjunto de tecnologías destinadas a la obtención, análisis y disponibilidad de información georreferenciada (Hernández y Rodríguez, 2016). Estas tecnologías incluyen el procesado y la fusión de datos espaciales; la teledetección; los sistemas de soporte de decisiones espaciales multicrite-

rio para la toma de decisiones ambientales, o las nuevas herramientas de análisis geoespacial como LiDAR, drones, realidad virtual o sensores, y todas ellas representan una innovación necesaria en el ámbito de la repoblación forestal (Fig. 2). En los siguientes epígrafes se revisan las principales geotecnologías que se pueden usar para comprender mejor los numerosos componentes del territorio, y su relación con las decisiones propias del proyecto de repoblación, así como su integración en la ejecución y el seguimiento del proyecto de repoblación. Capturar la heterogeneidad espacial dentro del monte objeto de la repoblación —describir la presencia o abundancia de atributos individuales como la diversidad de especies, el microrrelieve, la ecohidrología o la presencia de determinadas comunidades vegetales y animales, como cualquier otro atributo<sup>4</sup> que determine la repoblación— requiere una aproximación más compleja al territorio. Los estudios del medio físico orientados a la repoblación forestal han ido mejorando su capacidad descriptiva y analítica, desde los primeros trabajos basados íntegramente en el diagnóstico de campo (Aramburu Maqua y Escribano Bombín, 2014), la integración de los estudios de autoecología forestal orientados a la elección de especies (Gandullo y Sánchez-Palomares 1994), la integración de la información en Sistemas

**Tabla 2.** Características de los principales sensores espaciales con aplicaciones a la repoblación forestal

Nombre	Ejemplos	Resolución espectral	Resolución temporal	Resolución espacial	Misión	Utilidad
Sensores espaciales	Multiespectrales, hiperespectrales, térmico, radar	4 hasta más de 200	Baja resolución temporal (días)	Media-alta (metros)	Landsat Sentinel MODIS SPOT, etc.	Cartografía de vegetación, variables topográficas, cambio temporal, etc.
Sensores aerotransportados	LiDAR, fotogrametría, térmico, etc.	4 hasta más de 200	Baja resolución temporal (meses a años)	Alta (centímetros)	Comerciales	Similar, pero a mayor resolución espacial
Dispositivos tripulados a distancia	LiDAR, fotogrametría, térmico, etc.	4 hasta más de 200	Alta resolución temporal (días-horas)	Muy alta (centímetros)	Comerciales	Modelos 2-D y 3-D
Teledetección terrestre	LiDAR, fotogrametría, térmico, etc.	4 hasta más de 200	Baja resolución temporal (de meses a años)	Extraordinariamente alta (milímetros)	Comerciales	Modelos 3-D y micrositio
Sensorización	VARIABLES ecofisiológicas, crecimiento, meteorología y microclima, humedad del suelo, etc.	Depende de los dispositivos	Alta, de minutos a diaria	Baja (asociada a la parcela)	Comerciales	Ecofisiología, ecología, etc. Uso de modelos mecanicistas

**Fig. 2.** Ejemplos de tecnologías geoespaciales forestales según su escala espacial de aplicación



de Información Geográfica (Elena-Rosselló, 2004, García-Feced *et al.*, 2008) hasta los modelos que integran SIG y capacidad analítica de datos (MODERFOREST, Alonso Ponce *et al.*, 2022). En todos los casos, la adquisición de las variables biofísicas del medio se ha hecho mediante métodos de campo o, cada vez más frecuentemente, mediante el uso de bases cartográficas de referencia oficiales que se usan a escala de monte.

Esto, muchas veces, además del costo y de la dificultad de adquisición de la información, supone un desajuste entre la escala de la información disponible con respecto a la información necesaria. La integración de nuevas aproximaciones geoespaciales de mejor resolución espacio-temporal (y espectral) proporciona una nueva vía para evaluar los atributos necesarios para la adecuada repoblación forestal (Fig. 2).

El aumento de popularidad de las geotecnologías en ciencias forestales ha sido muy rápido en los últimos años (Reif yTheel 2017; Castro *et al.*, 2021) y ha desempeñado un papel importante, al proporcionar una base tecnológica nueva para los estudios espacio-temporales de los sistemas forestales (Lechner *et al.*, 2020). Las tecnologías geoespaciales en repoblaciones forestales se han empleado mayoritariamente en las primeras

etapas de la planificación; por ejemplo, el uso de los SIG para apoyar el proceso de rodalización mediante el uso de álgebra de mapas, o planificar la puesta en obra utilizando modelos digitales del terreno. Más recientemente, el valor de las tecnologías geoespaciales para derivar atributos clave de la repoblación se ha ampliado a un contexto que abarca toda la repoblación, desde las decisiones en vivero (relacionadas con la trazabilidad de la calidad de planta) hasta el seguimiento de las repoblaciones a largo plazo (Navarro-Cerrillo *et al.*, 2014; del Campo *et al.*, 2021 a). Con el fin de facilitar las aportaciones que las principales geotecnologías pueden proporcionar al proceso repoblador, analizaremos aquellas más relevantes, y después representaremos su importancia a lo largo del conjunto de actividades de la repoblación (temporalidad).

### 3. TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES APLICADAS A LA REPOBLACIÓN FORESTAL

#### 3.1. Sistemas de Información Geográfica y acceso a bases de datos

El diseño de una repoblación par-

te de la distribución de los atributos del medio físico que influyen en el éxito del establecimiento de la vegetación. El uso de capas superpuestas de información (aritmética de capas) se ha empleado frecuentemente en proyectos de repoblación forestal (por ejemplo, para medir la disposición estratificada de los elementos del medio físico (Navarro Cerrillo y Senra Riveiro, 1997), y se lleva generalmente a cabo a escalas de detalle (1:5000). Los SIG integran con gran facilidad capas de información ambiental (o de cualquier otro tipo) muy detalladas. Lo que se ha mejorado recientemente son los métodos estadísticos que utilizan datos derivados de diferentes fuentes basados en estadística paramétrica (regresiones o modelos lineales de diferente naturaleza), hasta enfoques más complejos que incluyen el desarrollo de modelos no lineales basados en inteligencia artificial como los árboles de decisión potenciados (*boosted regresión trees*) (del Campo García *et al.*, 2021b) o los modelos de hábitat aplicados a la restauración forestal (Navarro Cerrillo *et al.*, 2021). Esta arquitectura de información, estructurada como capas superpuestas en un SIG, es también extrapolable

al concepto de rodal de repoblación, entendido como la integración de la información del medio físico de una unidad espacial particular (es decir, una medida de la heterogeneidad estructural del rodal), y así ha sido aplicado para la repoblación forestal en los últimos años, con estudios que van desde la escala local hasta la microambiental (Navarro-Cerrillo *et al.*, 2014; Pemán *et al.*, 2021).

Independientemente del método estadístico empleado, los SIG se han aplicado con éxito en los proyectos de repoblación para i) determinar los rodales de repoblación (del Campo García *et al.*, 2021b), ii) identificar patrones horizontales dentro de un terreno objeto de repoblación (Franklin 1995), iii) cuantificar los procesos funcionales que afectan a la repoblación, como los estudios hidrológicos (González-Sanchis *et al.*, 2015) y iv) estudiar la fragmentación y la conectividad asociadas a la repoblación forestal (Navarro-Cerrillo *et al.*, 2023). Actualmente, el acceso a información con mayor resolución espacial y el aumento de la capacidad computacional permiten hacer estudios a escala de microrrodal o microhábitat (<1000 m<sup>2</sup>) (Fig. 2).



Fig. 3. Potenciales aplicaciones de la teledetección óptica pasiva en proyectos de repoblación forestal



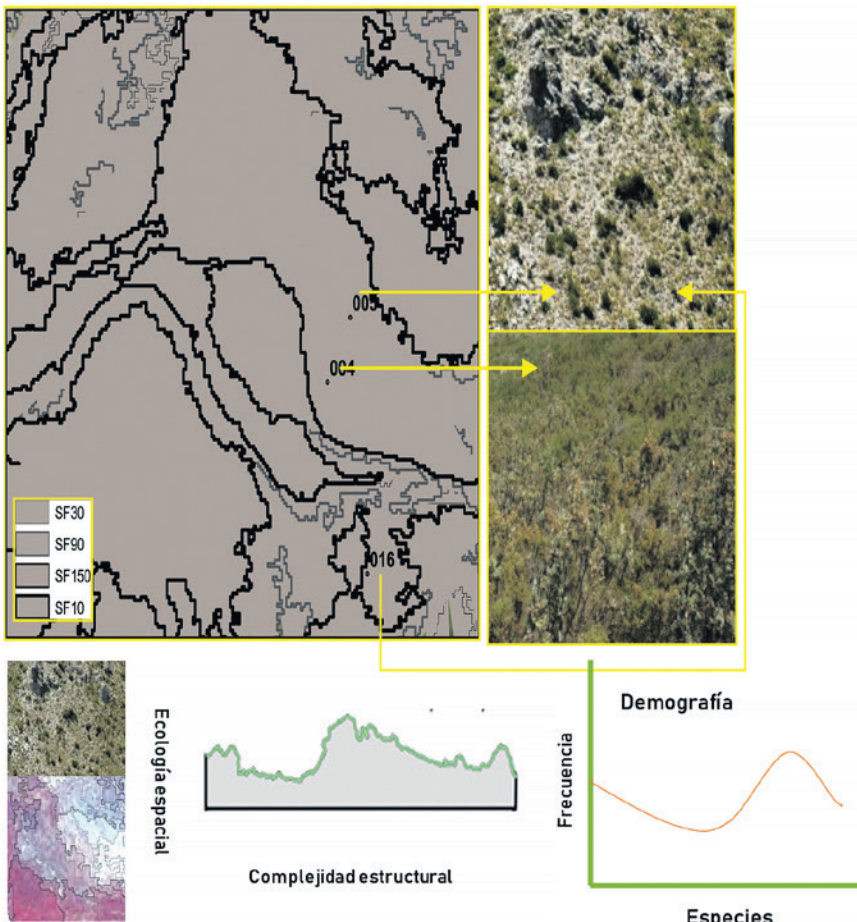


Fig. 4. Segmentación de un área afectada por un gran incendio a partir de una imagen Landsat ETM e interpretación de variables ecológicas importantes para el proceso repoblador (modificado de Hernández Clemente et al. 2009)

Los modelos de hábitat se utilizan cada vez con mayor frecuencia para la predicción y el cartografiado del hábitat potencial en programas de restauración forestal, así como para la identificación de localizaciones de conservación de especies en su hábitat natural (Ocampo-Peñuela et al., 2016), tanto en escenarios actuales como futuros. Los modelos de distribución de especies son funciones matemáticas que asignan la probabilidad de uso de un recurso o unidad de hábitat determinado (Araújo et al. 2019). Estas herramientas se están volviendo cada vez más populares en muchas aplicaciones ecológicas, y existe una variedad muy amplia de métodos de modelización de la distribución de especies (Franklin 2013). Sin embargo, se han utilizado comparativamente poco en proyectos de repoblación forestal (ver por ej.: López-Tirado e Hidalgo 2016, Duque-Lazo et al. 2018; Navarro Cerrillo et al., 2023).

### 3.2. Teledetección óptica pasiva

Desde el lanzamiento de la primera misión Landsat en 1972, ha habido un aumento en la disponibilidad de diferentes sensores y plataformas para adquirir datos de teledetección basados en la respuesta diferencial de las superficies terrestres a diferentes bandas del espectro electromagnético. Como hemos mencionado, la repoblación forestal requiere información sobre los elementos físicos de interés para el establecimiento de la vegetación. La teledetección busca un equilibrio entre la escala espacial del estudio y la resolución espacial requerida, así como las necesidades subyacentes del proyecto.

En repoblación forestal se han utilizado principalmente sensores multispectrales embarcados en satélites para adquirir información sobre la superficie terrestre a varias escalas (Reif and Theel, 2017); por ejemplo, las

misiones Landsat, MODIS, Sentinel-2 QuickBird, o WorldView-2. Muy raramente, sensores hiperespectrales, que capturan información espectral en un número muy elevado de bandas del espectro electromagnético; por ejemplo, USGS EO-1 Hyperion, CHRIS, próximo EnMAP. Estos sensores también se pueden embarcar en aeronaves (plataformas tripuladas) o, más recientemente, en vehículos aéreos no tripulados (RPAS<sup>5</sup>).

En la figura 3 se presentan algunas aplicaciones potenciales de las técnicas de teledetección a los proyectos de restauración forestal.

### 3.3. Fotogrametría digital

La fotogrametría digital ha experimentado un importante desarrollo durante los últimos años, impulsada por el uso de imágenes digitales capturadas en plataformas aéreas (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea-PNOA <https://pnoa.ign.es/> o RPA (*Robotic Process Automation* o *Automatización Robótica de Procesos*), así como el uso de programas de procesamiento fotogramétrico (Arévalo Verjel et al., 2021). La fotogrametría analógica se ha utilizado frecuentemente en numerosos aspectos del proyecto de repoblación, como para la delimitación de estratos de vegetación, la estructuración horizontal de la vegetación o la definición de microhábitat (Ferrari et al., 2021). La generalización de la fotogrametría digital supone una importante mejora, no solo por la resolución espacial (hasta centimétrica, 30 cm o menor), sino por la posibilidad de asociarla con cierta información espectral (bandas rojo, verde, azul y del infrarrojo cercano, fundamentalmente). Esto permite la determinación más clara de los rodales de repoblación, así como una localización más precisa de la distribución espacial de otras variables biofísicas de importancia para la repoblación (Fig. 4). De forma análoga a lo que ocurre con las imágenes procedentes de sensores espaciales, las imágenes obtenidas a partir de las RPA permiten generar índices espectrales —combinaciones entre bandas— que se pueden asociar al producto fotogramétrico para mejorar la caracterización de la potencialidad

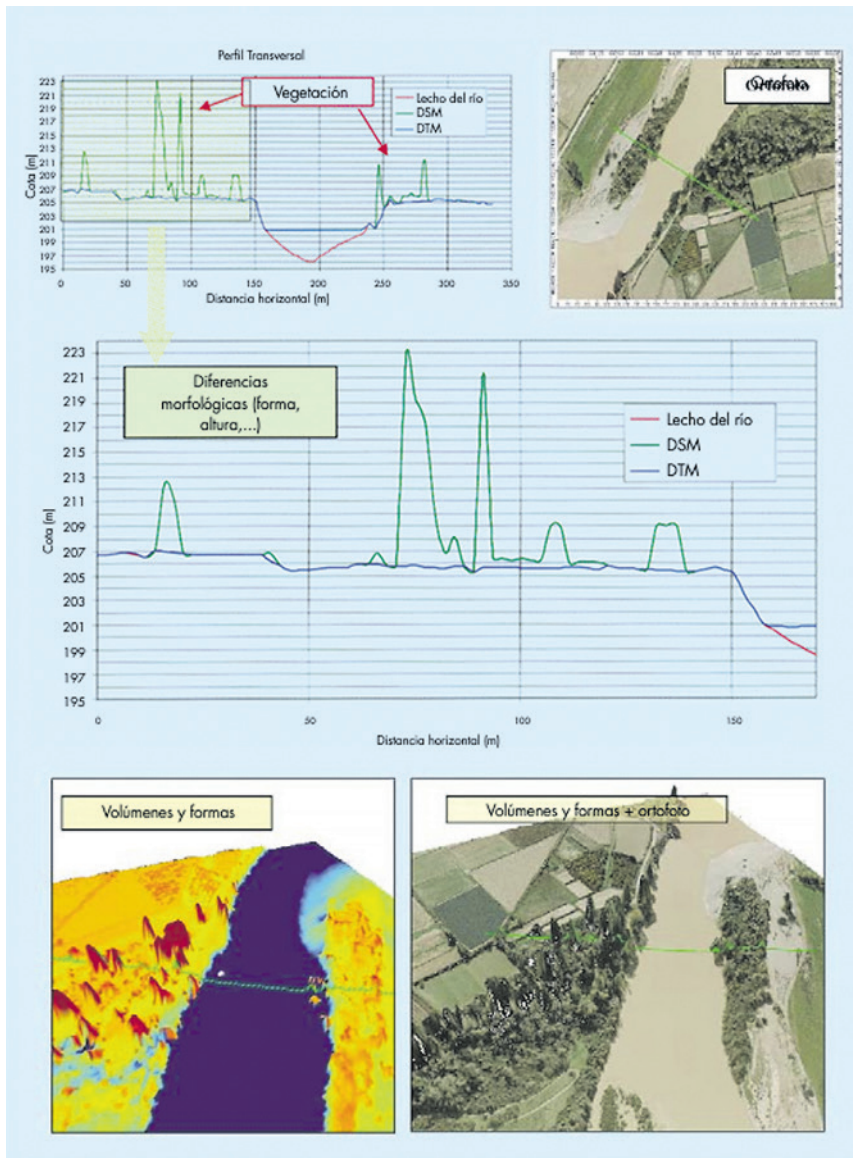


Fig. 5. Aplicación de datos LiDAR al estudio de la estructura de la vegetación riparia de un tramo del río Ebro (Fuente: Magdalena y Martínez Romero, 2006)

de la superficie a repoblar y la evolución de la cobertura tras la actuación. Por último, en el caso particular de las RPA, se pueden generar además nubes de puntos 3D mediante imágenes superpuestas y técnicas de fotogrametría que se han utilizado con gran precisión para detectar microhábitats (D'Urban *et al.*, 2020).

El tratamiento de toda esta información se puede hacer en un entorno SIG, registrando toda la información (permanentemente) en formato digital, lo que permite un fácil control en cualquier momento (a diferencia del control de la medición de campo) y la posibilidad de reprocesar los datos en el futuro (p. ej. evaluación de la repoblación).

### 3.4. Teledetección óptica activa: El caso de los sistemas LiDAR

El LiDAR (acrónimo del inglés *Light Detection and Ranging*) es un sistema de teledetección activa que utiliza un sensor láser para detectar objetos en el espacio emitiendo pulsos láser a frecuencias muy altas y midiendo el tiempo y la intensidad que se produce entre la emisión y la recepción de la reflexión del pulso (Giorgio *et al.*, 2010). Cada pulso puede generar diferentes retornos, ya que la vegetación presenta cierta permeabilidad al pulso láser (Fig. 5), dependiendo esta del número de retornos generados, de las características técnicas del sensor LiDAR (intensidad, frecuencia) y

de las características de la superficie en la que impacta (densidad, rugosidad, composición, etc.). Los sensores LiDAR proporcionan nubes de puntos 3D, donde cada punto coincide con la ubicación en el espacio del objeto alcanzado por el pulso láser (Fig. 5). A mayor densidad de puntos, la representación de la superficie y de los objetos será más precisa, dependiendo esta densidad tanto de factores del sensor (intensidad, frecuencia, ángulo de visión) como del vuelo (altura y velocidad de desplazamiento de la aeronave). En repoblaciones forestales se han utilizado para representar y caracterizar diferentes elementos estructurales del terreno (ej., microrelieve y redes de drenaje, tipo, porcentaje y altura de la cubierta vegetal —arbustos, matorral y suelo—) de una forma muy precisa (Magdalena Mas y Martínez Romero, 2006).

La oferta de datos públicos de LiDAR ha generalizado el acceso a este tipo de información en España, con una densidad inicial de puntos baja (desde 0,5-1,5 puntos  $m^{-2}$  en el primer vuelo nacional 2009-2015, hasta 5 puntos  $m^{-2}$  en la cobertura actual 2021-2025), pero con una frecuencia temporal de 5-6 años y con una densidad de puntos creciente (hasta 14 puntos  $m^{-2}$  en algunos territorios) (<https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/segunda-cobertura>) para medir atributos de interés repoblador. El uso de esta plataforma permite estudios específicos en áreas pequeñas (~ 1 ha) que pueden servir para estimar componentes de la compleja estructura del terreno, tanto desde el punto de vista topográfico, con modelos digitales del terreno de alta precisión, como sobre la descripción de la estructura de la vegetación que requiere ser tratada previa o posteriormente para aminorar los efectos de la competencia.

### 3.5. Sensorización *in situ* y simulación

El uso de sensores que miden aspectos biofísicos de la reforestación es una opción que se ha desarrollado significativamente gracias a los avances en electrónica digital aplicada, al almacenamiento físico de datos y a la telemetría. Hoy en día, instalar sensores que midan aspectos básicos



## Cartografía de proyectos de restauración posincendio

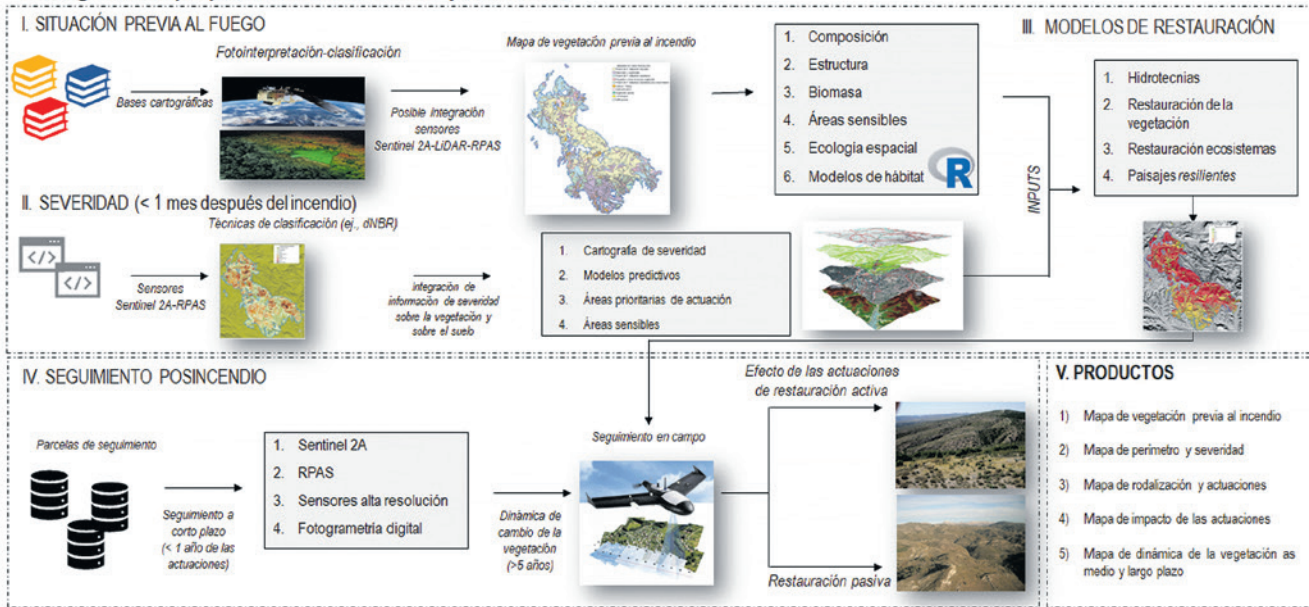


Fig. 6. Modelo de integración de diferentes fuentes de información geoespacial en los trabajos de restauración posincendio (Fuente: Navarro Cerrillo y Madrigal Olmo, 2021)

de la meteorología (precipitaciones, radiación, temperatura, viento, higrometría y presión atmosférica, entre otros), el agua en el suelo (contenido volumétrico y potencial hídrico) o incluso el estado de la vegetación (potencial hídrico o flujo de savia) es relativamente sencillo y económico, pues con un presupuesto contenido en cuatro dígitos es posible desplegar este tipo de instrumentación científica en la zona a reforestar. Suelen instalarse en parcelas experimentales donde, además, se pretendan investigar aspectos de interés de la repoblación en cuestión (del Campo *et al.*, 2021 a,b). Su utilidad para el caso concreto de las repoblaciones forestales se puede resumir en tres funciones principales: 1) apoyo en las labores de ejecución de la obra, permitiendo conocer con precisión las condiciones meteorológicas (lluvia acumulada, heladas, etc.) y el tempero del suelo, y con ello validar información satelital que estará disponible para toda el área de trabajo; 2) tras la plantación, esta misma información permitirá entender mejor el curso y seguimiento de esta, permitiendo programar riegos de apoyo si las condiciones meteorológicas han sido desfavorables, contextualizar los resultados de supervivencia y crecimiento, etc., y 3) la información *in situ* nos permitirá generar series tempo-

rales de variables como la humedad del suelo que servirán para calibrar y validar modelos ec hidrológicos que serán de gran utilidad para simular el desarrollo futuro de la plantación y si esta está cumpliendo los objetivos para los que fue diseñada.

Los modelos ec hidrológicos basados en procesos, como por ejemplo Biome-BGC-Muso (Hidy *et al.*, 2016), permiten determinar la evolución de la plantación en el tiempo, bajo distintos escenarios de cambio climático o clima histórico. Por ello, son la mejor herramienta posible para hacer estimaciones de los distintos servicios ecosistémicos basados en agua o carbono que la plantación pueda proveer a lo largo del tiempo, lo que hace muy recomendable su uso en programas o iniciativas de certificación/cuantificación *ex ante* del secuestro de carbono o la provisión de agua de una plantación. Igualmente, pueden ayudar bastante en fijar objetivos de proyecto realistas o valores para indicadores de rendimiento o evolución de la plantación a lo largo del tiempo.

### 4. DEL DATO, A ENTENDER EL ÉXITO REPOBLADOR

El seguimiento a largo plazo de los proyectos de restauración forestal es necesario para evaluar el éxito y la eficacia de las acciones

realizadas, así como para guiar la gestión futura de dichas repoblaciones. Es decir, el establecimiento de hitos e indicadores de rendimiento en proyectos de restauración forestal debe ser parte del proyecto (Gann *et al.*, 2019). Hasta la fecha, todavía hay pocos estudios de este tipo y rara vez emplean tecnologías geoespaciales (Navarro-Cerrillo *et al.*, 2014, del Campo *et al.*, 2021 a, b). Este es uno de los aspectos en los que más capacidad de análisis pueden aportar las herramientas geoespaciales, tanto en su componente espacial como temporal. La realidad demuestra que el éxito de una repoblación –a pesar del esfuerzo de redacción y ejecución de los proyectos– queda supeditado a factores poco previsibles (ej. evolución de las condiciones meteorológicas) o difíciles de controlar (ej.: puesta en obra, fecha de plantación, etc.) (del Campo *et al.*, 2021a). En ese sentido, en los trabajos de repoblación forestal es fundamental conocer cómo evoluciona a medio y largo plazo la vegetación establecida, acorde o no con las actuaciones activas de restauración (del Campo *et al.*, 2021b), o, menos frecuentemente pero cada vez de forma más importante, por la necesidad de modelizar la evolución del proceso restaurador bajo diferentes escena-



rios (Navarro-Cerrillo *et al.*, 2021). En ambos casos, el uso de series temporales de imágenes de satélite (en particular, mediante los sensores Landsat y más recientemente Sentinel 2-A) y de algoritmos semiautomáticos implantados en plataformas abiertas (e.g., Google Earth Engine) es fundamental (Morales *et al.*, 2023). En trabajos de restauración activa, se pueden usar los sensores espaciales para evaluar el efecto de las intervenciones realizadas a corto plazo (ej., control de procesos erosivos), a medio plazo (ej., implantación de la vegetación) o a largo plazo (ej. seguimiento a largo plazo de procesos de restauración posincendio). Una aplicación de estos estudios, cuando se hacen en un intervalo amplio de situaciones ecológicas, es la elaboración de modelos predictivos de respuesta de diferentes tipos de vegetación frente al fuego y, por tanto, la resiliencia de las comunidades vegetales ante el impacto de los incendios (Hernández-Clemente *et al.*, 2009, Navarro Cerrillo y Madrigal Olmo, 2021, Fig. 6). Las técnicas geoespaciales aplicadas a la repoblación forestal abren, de esta manera, un campo inmenso para el desarrollo tecnológico de los trabajos de restauración, y suponen un reto profesional fundamental para las nuevas generaciones de profesionales forestales.

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se sintetizan algunos ejemplos de las posibles aplicaciones de geotecnología en los proyectos de repoblación y restauración forestal. La geomática forestal representa una herramienta fundamental para los proyectos de repoblación, así como para su ejecución y seguimiento a corto, medio y largo plazo. Inicialmente su uso estuvo dominado por los SIG, y más recientemente se ha incorporado la teledetección óptica pasiva con sensores espaciales de media resolución espacial, como la serie de satélites Landsat



o Sentinel, aplicados al estudio de variables de sitio necesarias para la repoblación forestal. Sin embargo, la aparición de nuevos sensores de observación de la Tierra, como los sensores activos tipo LiDAR, y de distintas plataformas, como las RPA, ha permitido que se amplíen sus aplicaciones a otros aspectos del proyecto y de la ejecución de los trabajos de repoblación. Sin embargo, el estudio y uso de las tecnologías geoespaciales sigue siendo una tarea pendiente en muchos aspectos de la educación y el ejercicio profesional de los ingenieros del ámbito forestal, estando significativamente infrarrepresentados en los planes de estudio y en la investigación. En los próximos años debería fomentarse el desarrollo de todo el potencial que tienen estas tecnologías para estudios relacionados con la restauración de sistemas forestales. Está claro que estas disciplinas se encuentran entre las de mayor demanda profesional y de mayor innovación tecnológica, por lo que existen importantes oportunidades para su uso. Dados los avances tan rápidos en la tecnología de sensores, el programa de procesamiento y las técnicas de análisis espacial, junto con los cambios legales y los entornos profesionales, es fundamental

desarrollar las capacidades formativas, investigadoras y de innovación para que las tecnologías geoespaciales formen una parte central del quehacer de la repoblación forestal, pues la presencia de los profesionales forestales en este sector depende, en gran parte, de ello.

<sup>1</sup> Cortesía de Carlos Carreras Egaña

<sup>2</sup> En este trabajo se considera el rodal solo como una unidad espacial de carácter ecológico, y este puede integrarse para formar "unidades de obra".

<sup>3</sup> La geomática es una disciplina que engloba las Geociencias con la integración y aplicación de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Esta suma de Geociencias + TIC hace posible la captura, procesamiento, análisis, interpretación, almacenamiento, modelización, aplicación y difusión de información digital geoespacial o localizada, aplicable en los ámbitos de la ingeniería, el territorio y la sociedad (<https://geomaticas.com/que-es-la-geomatica/>). Otros conceptos como la geotecnología o la geoinformática se utilizan frecuentemente como sinónimos.

<sup>4</sup> Por simplicidad, en este trabajo nos centraremos en los aspectos relacionados con el estudio del medio físico en la repoblación, aunque entendemos la necesidad de integrar otros aspectos fundamentales como las condiciones socioambientales, jurídicas, culturales, etc.

<sup>5</sup> "Remotely Piloted Aircraft System", que se traduce como Sistema de aeronaves tripuladas por control remoto. Este concepto incluye tanto a la aeronave como al enlace de comunicaciones y la estación en tierra desde donde se controla al dron.

## BIBLIOGRAFÍA

Alexander S, Aronson J, Whaley O et al. 2016. The relationship between ecological restoration and the ecosystem services concept. *Ecol. Soc.* 21(1).

Alonso R, Gómez V, López-Senespleda E et al. 2022. Moderforest: más que una aplicación para la elección de especie y origen de la semilla en repoblaciones forestales. *Actas 8º Congreso For-*

*estal Español.* Sociedad Española de Ciencias Forestales.

Aramburu MP, Escribano R. 2014. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico.* Fundación

- del Conde del Valle de Salazar-Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Araújo MB, Anderson RP, Márcia A et al. 2019. Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Sci. Adv.* 5: eaat4858.
- Arévalo NA, Lerma JL, Fernández J. 2021. Análisis comparativo de software para obtener MDT con fotogrametría RPAS. *Proceedings 3rd Congress in Geomatics Engineering*, pp. 209-215. Universitat Politècnica de València.
- Castro J, Morales-Rueda F, Navarro FB et al. 2021. Precision restoration: a necessary approach to foster forest recovery in the 21st century. *Restor. Ecol.* 29(7): e13421.
- Del Campo AD, Navarro RM, Segura G et al. 2021a. Control integral y seguimiento de repoblaciones forestales. Pautas para el diseño experimental en estudios de seguimiento de repoblaciones. En: Pemán J, Navarro RM, Prada MA et al. (Eds.) *Bases técnicas y ecológicas del proyecto de repoblación forestal*, 2; 212-259. Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid.
- Del Campo AD, Segura-Orenga G, Bautista I et al. 2021b. Assessing reforestation failure at the project scale: the margin for technical improvement under harsh conditions. A case study in a Mediterranean dryland. *Sci. Total Environ.* 796: 148952.
- Duque-Lazo J, Navarro-Cerrillo RM, Ruiz-Gómez FJ. 2018. Assessment of the future stability of cork oak (*Quercus suber* L.) afforestation under climate change scenarios in Southwest Spain. *For. Ecol. Manag.* 409: 444-456.
- D'Urban T, Williams GJ, Walker-Springett G et al. 2020. Three-dimensional digital mapping of ecosystems: a new era in spatial ecology. *Proc. R. Soc. B*, 287(1920): 20192383.
- Elena-Rosselló R. 2004. Las clasificaciones biogeoclimáticas: modelos territoriales necesarios para los estudios ecológicos forestales. *Invest. Agr. Sist. Rec. For.* 13(1): 63-74.
- FAO. 2023. *Country reporting process and voluntary updates FRA 2025*. Food and Agriculture Organization, Roma.
- Ferrari R, Lachs L, Pygas DR et al. 2021. Photogrammetry as a tool to improve ecosystem restoration. *Trends Ecol. Evol.* 36(12): 1093-1101.
- Franklin J. 1995. Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progr. Phys. Geogr.* 19(4): 474-499.
- Franklin J. 2013. Species distribution models in conservation biogeography: developments and challenges. *Divers. Distrib.* 19(10): 1217-1223.
- Gandullo JM, Sánchez-Palomares O. 1994. *Estaciones ecológicas de los pinares españoles*. ICONA, Madrid.
- Gann GD, McDonald T, Walder B et al. 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restor. Ecol.* 27: S1-S46.
- García-Feced C, González-Ávila S, Elena-Rosselló R. 2008. Metodología para la tipificación y caracterización estructural de paisajes en comarcas forestales españolas. *Invest. Agrar. Sist. Rec. For.* 17: 130-142.
- Gatica-Saavedra P, Echeverría C, Nelson CR. 2017. Ecological indicators for assessing ecological success of forest restoration: a world review. *Restor. Ecol.* 25(6): 850-857.
- GFRA 2020. *Global Forest Resource Assessment 2020*. Food and Agricultural Organization, Roma.
- Giongo M, Koehler H, do Amaral S et al. 2010. *LiDAR: principios e aplicações florestais*. *Pesq. Flor. Bras.* 30(63): 231-251.
- Gómez-Mendoza J. 2002. *Paisajes forestales e ingeniería de montes. Paisaje y ordenación del territorio*. Junta de Andalucía-Fundación Duques de Soria.
- Gómez V. 2021. La estación forestal y su homologación ecológica en los trabajos de repoblación forestal. En: Pemán J, Navarro RM, Para MA et al. (Eds.) *Bases técnicas y ecológicas del proyecto de repoblación forestal*, pp. 128-173. Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, Madrid.
- González-Sanchis M, del Campo A, Molina A et al. 2015. Modeling adaptive forest management of a semi-arid Mediterranean Aleppo pine plantation. *Ecol. Model.* 308: 34-44.
- Hernández GA, Rodríguez EV. 2016. Las geotecnologías y los sistemas de apoyo para la planeación en el ordenamiento territorial. *Rev. Tecnol.* 15(2).
- Hernández-Clemente R, Navarro-Cerrillo RM, Gitas IZ. 2009. Monitoring post-fire regeneration in Mediterranean ecosystems by employing multitemporal satellite imagery. *Int. J. Wildl. Fire* 18(6): 648-658.
- Hidy D, Barcza Z, Marjanović H et al. 2016. Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4.0: summary of improvements and new modeling possibilities. *Geosci. Model Dev.* 9: 4405-4437.
- Lechner AM, Foody GM, Boyd DS. 2020. Applications in remote sensing to forest ecology and management. *One Earth* 2(5): 405-412.
- Löf M, Madsen P, Metslaid M et al. 2019. Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. *New Forests* 50: 139-151.
- López-Tirado J, Hidalgo PJ. 2016. Ecological niche modelling of three Mediterranean pine species in the south of Spain: a tool for afforestation/reforestation programs in the twenty-first century. *New Forests* 47: 411-429.
- Magdaleno F, Martínez R. 2006. Aplicaciones de la teledetección láser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. *Ing. Civil* 142: 1-15.
- Mola I, de Torre R, Sopena A. 2018. Guía práctica de restauración ecológica. Fundación Biodiversidad-Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid.
- Montero de Burgos JL. 1990. Evolución vegetal. Óptimo natural y óptimo forestal. *Ecología* (nº esp.) 1: 309-319.
- Morales NS, Fernández IC, Durán LP et al. 2023. Re-Plant Alfa: integrating Google Earth engine and R coding to support the identification of priority areas for ecological restoration. *Land* 12(2): 303.
- Mansourian S. 2018. In the eye of the beholder: reconciling interpretations of forest landscape restoration. *Land Degrad. Dev.* 29(9): 2888-2898.
- Navarro RN, Senra F. 1997. Desarrollo de un sistema de información geográfico para la caracterización de estaciones forestales en el contexto de las repoblaciones forestales. *Actas 2º Congreso Forestal Español*. Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Navarro-Cerrillo RM, del Campo AD, Ceacero CJ et al. 2014. On the importance of topography, site quality, stock quality and planting date in a semiarid plantation: feasibility of using low-density LiDAR. *Ecol. Eng.* 67: 25-38.
- Navarro RM, Madrigal J. 2021. Restauración de áreas afectadas por grandes incendios. *Montes* 143: 33-38.
- Navarro RM, Duque-Lazo J, Rios-Gil N et al. 2021. Can habitat prediction models contribute to the restoration and conservation of the threatened tree *Abies pinsapo* Boiss. in Southern Spain? *New Forests* 52: 89-112.
- Navarro-Cerrillo RM, Rivas CA, Quinto L et al. 2023. Afforestation on agricultural land in southern Spain: An important driver to improve forest landscape connectivity. *New Forests* 54(6): 1061-1084.
- Ocampo-Penuela N, Jenkins CN, Vijay V et al. 2016. Incorporating explicit geospatial data shows more species at risk of extinction than the current Red List. *Sci. Adv.* 2(11): e1601367.
- Ortega A, Montero G. 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. *Ecología* 2: 155-184.
- Peman J, Iriarte I, Lario FJ. 2017, eds. *La restauración forestal en España. 75 años de una ilusión*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Pemán J, Serrada R, Navarro-Cerrillo RM et al. 2021. Condicionantes del proyecto de repoblación. En: Pemán J, Navarro RM, Para MA et al. (Eds.) *Bases técnicas y ecológicas del proyecto de repoblación forestal*, pp. 361-391. Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, Madrid.
- Reif MK, Theel HJ. 2017. Remote sensing for restoration ecology: application for restoring degraded, damaged, transformed, or destroyed ecosystems. *Integ. Environ. Assess. Manag.* 13(4): 614-630.