

Análisis de datos de inventarios forestales

Rafael M^a NAVARRO CERRILLO

M^a Ángeles VARO MARTÍNEZ

Antonio M. CACHINERO VIVAR

Francisco J. RUIZ GÓMEZ

Pablo GONZÁLEZ MORENO

Resumen

En las últimas décadas, el acceso a datos a diferentes escalas ha crecido a un ritmo sin precedentes, duplicándose el volumen de datos cada dos años. En contraste con otros campos, los datos forestales cubren ámbitos muy diversos, no siempre complementarios, tienen una clara orientación territorial y temporal, (multidimensionales) y demandan una cierta recurrencia temporal, que hacen que su procesamiento sea más difícil. Sin embargo, la forma en cómo se adquieren, se procesan y se analizan los datos procedentes de inventarios forestales desde que comenzaron las mediciones forestales ha cambiado sustancialmente; muy particularmente en las dos últimas décadas. Los datos derivados de inventarios forestales y de fuentes complementarias suelen ser muy voluminosos, presentan estructuras muy dispares, suelen estar ordenados de acuerdo con criterios poco sistemáticos, incluyen información de aspectos muy diversos (multi-informativos) y, además, su adquisición suele ser costosa y no se suele optimizar todo su potencial analítico. Es evidente que las tecnologías emergentes han hecho que cambiemos completamente la forma de abordar la silvicultura: cada vez se utiliza más los procesos de digitalización para optimizar el uso de la información de diferentes fuentes, la capacidad de análisis de procesos y la modelización relacionados con la gestión de los recursos y sistemas forestales.

En este capítulo, se desarrollan de forma teórica y práctica los aspectos relacionados con el acceso, el procesado, el análisis y el uso práctico de datos forestales para ayudar a comprender la aplicación de bases de datos en la silvicultura, incluyendo los datos disponibles, la arquitectura de datos, el desarrollo y la aplicación de nuevas aproximaciones estadísticas, así como las tendencias futuras en el desarrollo de macrodatos forestales. A lo largo del texto, se proponen ejemplos de análisis de datos de inventario mediante diferentes aproximaciones estadísticas. Este capítulo relaciona los ejemplos con el código fuente y las salidas numéricas y gráficas, para lo cual se ofrece el acceso a las librerías de R en GitHub.

Palabras clave: minería de datos, inventarios, silvicultura, ordenación de montes.

1. Introducción

1.1. La necesidad de medir el bosque: inventarios forestales

En las últimas décadas, el acceso a datos a diferentes escalas ha crecido a un ritmo sin precedentes. El cambio en la cantidad y la calidad de la información ha revolucionado todo el ámbito científico y técnico a través de lo que se ha dado en llamar *big data*. Con el desarrollo de nuevos métodos de análisis estadístico, el procesamiento de datos y la capacidad computacional, la tecnología de *big data* se ha extendido a casi todos los campos del conocimiento y se utiliza ampliamente en los ámbitos relacionados con la ciencia y la ingeniería forestal, desde la ecología a la silvicultura. Sin embargo, el formato de datos y el flujo de procesamiento de *big data* son bastante diferentes de los métodos tradicionales de procesamiento de datos, y los métodos informáticos y estadísticos tradicionales no son suficientemente efectivos para manejar este tipo de información.

La silvicultura ha requerido, desde su origen, la adquisición de datos relacionados con la métrica del bosque, así como su análisis para tomar decisiones basadas en información objetiva y poder responder a numerosas preguntas relevantes en torno a la gestión forestal: ¿cuál es el volumen maderable actual y futuro de un monte? ¿qué capacidad de secuestro de carbono tiene un sistema forestal particular? ¿cuántas especies aparecen en un hábitat? La dasimetría es, por tanto, una parte fundamental de la silvicultura y ha sido uno de pilares fundamentales para llevar a la práctica sus fundamentos teóricos. Sin embargo, la forma en cómo se adquieren, se procesan y se analizan los datos procedentes de inventarios forestales desde que comenzaron las mediciones forestales ha cambiado sustancialmente. Los datos derivados de inventarios forestales y de fuentes complementarias suelen ser muy voluminosos, presentan estructuras muy dispares, suelen estar ordenados de acuerdo con criterios poco sistemáticos, incluyen información de aspectos muy diversos (multi-informativos) y, además, su adquisición suele ser costosa y no se suele optimizar todo su potencial analítico. Por otro lado, los retos que enfrenta actualmente la silvicultura son cada vez más complejos (desde la métrica del bosque al cambio climático) y las implicaciones técnicas, sociales y económicas de las decisiones relacionadas con los sistemas forestales son también más complejas. Además, muchos de los procesos que se evaluaban a partir de los inventarios forestales han adquirido una dinámica-escala espacio temporal muy diferente a aquella basada en sistemas más estables espacial y temporalmente. En definitiva, la gestión forestal actual requiere mayor rapidez en la toma de decisiones, la modelación y la simulación de sus dinámicas de futuro en base a análisis complejos de un gran volumen de datos con objeto de optimizar los numerosos servicios ecosistémicos demandados.

Afortunadamente, hoy en día la silvicultura ha progresado mucho en el uso de herramientas propias de la dasimetría (por ejemplo, la estadística); cuenta, además, con nuevas herramientas (por ejemplo, la teledetección, la computación avanzada, la inteligencia artificial, etc.), que son fundamentales para adecuarse a los retos del siglo

XXI. En un sentido amplio, este nuevo contexto incluye no sólo el acceso a bases de datos estructurados, semiestructurados y no estructurados (independientemente de su origen), sino también a las técnicas y a las herramientas más avanzadas de procesamiento de estos datos. Las principales características de los macrodatos son su gran volumen (ej., el Inventario Forestal Nacional), la variedad (por ej., en un mismo inventario se recogen datos geográficos, dendrométricos, ecológicos, etc.), la velocidad (ej., se debe poder procesar datos con un ritmo de análisis alto), y la veracidad (ej., si los datos contienen una gran cantidad de registros erróneos puede dificultar o incluso imposibilitar su análisis) (ver Capítulo 4). Por otro lado, con el desarrollo de tecnologías aeroespaciales (como sensores, satélites y drones), la resolución temporal y espectral de los datos de observación de la Tierra han mejorado significativamente. El número de sensores que generan datos relacionados, directa o indirectamente, con los sistemas forestales aumenta gradualmente y la recurrencia con la que éstos se adquieren se incrementa constantemente. Es evidente que este entorno ha cambiado completamente la forma en como entendemos la silvicultura, que cada vez utiliza más los procesos de digitalización (ej., altas capacidades computacionales, geoinformática, Internet de las cosas, *big data* y otras tecnologías emergentes de la información) para optimizar el uso de la información de diferentes fuentes, la capacidad de análisis de procesos y la modelización relacionados con la gestión de los recursos y sistemas forestales. La integración del análisis de bases de datos en la silvicultura no supone un cuestionamiento de sus principios; más bien al contrario, permite que la gestión forestal se apoye en información más veraz, dinámica, interconectada y eficiente a la hora de tomar decisiones fundamentadas en un contexto dominado por una mayor incertidumbre. Los datos forestales son la base para el desarrollo de esta “nueva” silvicultura, necesaria para afrontar las crecientes y complejas demandas relacionadas con la gestión forestal. El desafío, por tanto, no está tanto cambiar el uso que la silvicultura ha hecho de los datos, sino en utilizar todo el potencial disponible para responder a las nuevas preguntas que la gestión de los sistemas forestales requiere resolver en la actualidad. Por tanto, es importante considerar los inventarios forestales como base para comprender los problemas que la gestión forestal (dinámica) plantea, dado que, en muchos casos, los inventarios ya contienen elementos relacionados directamente con estos problemas. No obstante, pueden ser necesarias medidas y observaciones suplementarias (nuevas variables) que, a través de un análisis adecuado de las variables ya registradas, proporcionen información relevante para la silvicultura. Sin embargo, no debemos olvidar que la silvicultura es una ciencia aplicada y, por tanto, dotarla de un buen fundamento numérico no elude la necesidad de que, en última instancia, estos análisis se conviertan en decisiones de gestión de los recursos forestales en toda su amplitud.

En este capítulo se desarrollan, de forma teórica y práctica, aspectos relacionados con el acceso, el procesado, el análisis y el uso práctico de datos forestales para ayudar a comprender la aplicación de bases de datos en la silvicultura, incluyendo los datos disponibles, la arquitectura de datos, el desarrollo y la aplicación de nuevas aproximaciones estadísticas, así como las tendencias futuras en el desarrollo de macrodatos forestales (Figura 16.1).

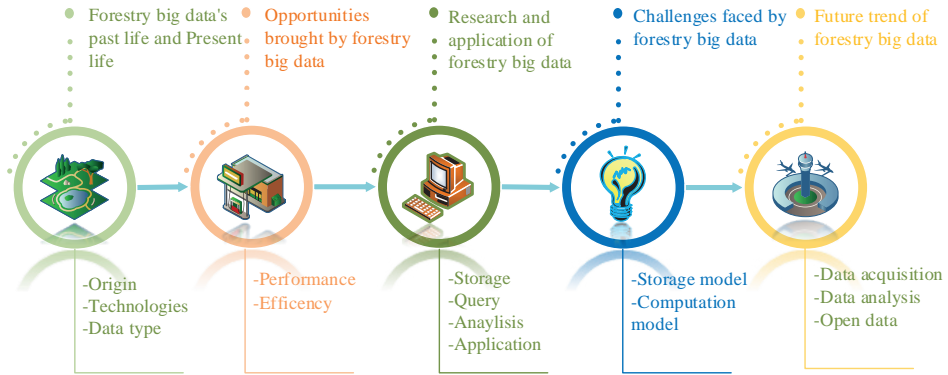


Figura 16.1. Esquema de *big data* aplicados a la gestión forestal (fuente: Zou *et al.*, 2019).

El capítulo está organizado en seis secciones, en la primera sección revisamos las principales fuentes de datos forestales, el acceso y los procesos fundamentales de preanálisis de datos y ejecución de procedimientos básicos. La segunda sección describe el uso de bases de datos forestales en entornos de Sistemas de Información Geográfica para ilustrar las oportunidades que brindan estos sistemas para la tecnología de *big data* forestal, incluyendo la importancia de la información auxiliar. En la sección tercera se describen brevemente algunas de las aplicaciones más avanzadas para el procesamiento de datos procedentes de inventarios en el ámbito de la estereometría de masas y su análisis en plataformas estadísticas. La sección cuarta sugiere varias vías alternativas para el uso de datos de inventarios, sobre todo en la modelización forestal y la modelización en ecología. La sección quinta resume algunas áreas de desarrollo de la ciencia de datos en ciencias forestales y recursos naturales. Por último, en la última sección presentamos y resolvemos un ejemplo sobre el uso de bases de datos relacionadas para la planificación y optimización de modelos de hábitat en el Parque Nacional de Sierra de la Nieves (Málaga).

A lo largo del texto, se proponen ejemplos de análisis de datos de inventario mediante diferentes aproximaciones estadísticas; en su mayoría proceden de trabajos previos de los autores. Por otro lado, al igual que en el resto de los capítulos de este libro, nuestro objetivo es que el proceso de aprendizaje se desarrolle en un entorno basado en R.

2. Gestión de datos forestales

2.1. Conceptos básicos

La silvicultura tiene una escala temporal a largo plazo, por lo que requiere información dinámica que aporte datos sobre la distribución, la composición, la estructura y los cambios de los sistemas forestales a lo largo del tiempo. Por lo tanto, desde su origen se basa principalmente en la obtención de una gran variedad de datos por métodos directos

(ej., el inventario de campo) o métodos indirectos (ej., la fotogrametría forestal). Entre ellos, los inventarios forestales han sido la forma principal de recopilar y gestionar la información necesaria en la silvicultura de acuerdo con los métodos contrastados de inventario (Pita, 1973; Pardé y Bouchon, 1994; Prodan, 1997). En este capítulo lo que nos interesa, principalmente, es la “naturaleza” de esos datos, en particular, se tratan los los procedentes de inventarios forestales.

Los inventarios forestales suelen estar diseñados para ejecutarse con diferentes procedimientos y a diferentes escalas espaciales y temporales, que hacen del procesamiento de los datos una tarea no siempre sencilla. Con el acceso público a muchos de esos inventarios, la operatividad de los datos ha mejorado significativamente, el número y variedad de los datos disponibles ha aumentado gradualmente, así como la periodicidad de adquisición. Por lo tanto, el volumen de datos procedentes de inventarios se ha disparado y supera con creces los datos disponibles con anterioridad, lo que supone, por un lado, una mayor capacidad de análisis (reflejada en la producción científica) y, por otro, una oportunidad mayor para generar servicios y soluciones técnicas (ej. integración con productos del Plan Nacional de Observación Aérea). Sin embargo, los recursos forestales se sitúan en un marco dinámico, donde los procesos asociados (desde su estructura hasta los ciclos bioedáficos) cambian constantemente como respuesta a factores naturales y antrópicos, por lo que se pueden añadir otras variables relativas a una amplia gama de objetivos más amplios de la gestión forestal (ej., la biodiversidad). En ese sentido, aunque los inventarios de campo sigan siendo las medidas más fiables de una determinada realidad forestal en cuanto a la precisión de las variables registradas, los métodos tradicionales de almacenamiento y análisis de datos de inventarios forestales no garantizan los resultados deseados en un tiempo aceptable, especialmente para aplicaciones en tiempo pseudo real, como la evaluación de perturbaciones (ej., los incendios forestales). Plantear el análisis de datos procedentes de un inventario implica no sólo fijar los objetivos para los cuales fue diseñado el inventario, sino también conocer de forma la escala del análisis y la frecuencia de las observaciones.

En esta sección: i) se enumeran algunas de las fuentes principales de datos de inventario forestales disponibles, a modo de ejemplo de la accesibilidad de los datos, ii) se describe la estructura de esos datos y su preprocesado para facilitar la interpretación comparada de distintas fuentes de información (armonización), y iii) se indican algunos análisis descriptivos de la información de forma previa a su uso en aplicaciones concretas (fiabilidad estadística). Se incluye, por tanto, una descripción de las diferentes estructuras de datos comunes a la mayor parte de los inventarios utilizados en aplicaciones forestales y agroforestales y se describen los métodos utilizados para su procesado. Dado que los inventarios forestales tienen una proyección espacial/cartográfica en unidades relativamente homogéneas (ej., rodal-cantón), se proyectará y complementará la información con aquella procedente del uso de ortofotos, imágenes de satélite, bases de datos cartográficas y otras fuentes alternativas de información.

Cantón: Unidad mínima de inventario. Se trata de divisiones del cuartel más homogéneas. Los criterios seguidos para marcar los cantones son las masas monoespecíficas, las masas con misma especie principal y acompañante y las masas con calidad de estación homogénea. La superficie mínima de un cantón suele ser de 10 hectáreas, aunque lo normal es entre 40 y 50 hectáreas.

Rodal: Superficie del monte con unas características determinadas de pendiente, orientación, vegetación que generalmente difieren de las de alrededor. Se considera que la superficie mínima del rodal es 1 hectárea, aunque puede ser menor en función de la superficie del monte.

González-Molina *et al.*, (2006).

2.2. Tipos de inventarios y estructura de los datos

El objetivo de esta sección no es describir el diseño y la ejecución de un inventario forestal, en sus diferentes modalidades, y que se utilizan para recopilar la información sobre los recursos de un área determinada. En ese sentido remitimos al lector a los diferentes, y excelentes, manuales que existen sobre técnicas de inventario (http://libros.inia.es/libros/product_info.php?products_id=1285).

Tipos de inventarios disponibles

Un inventario forestal es un proceso sistemático de recopilación, análisis y evaluación de datos relacionados con la composición, la estructura, la distribución y el estado de los recursos forestales dentro de un área determinada. Este proceso implica la medición y el registro de diversos parámetros, como la composición específica, la densidad, la altura, el diámetro, o la regeneración, entre otros factores relevantes. Los inventarios forestales son una herramienta imprescindible para conocer la estructura y el funcionamiento de los sistemas forestales con el objetivo de poder llevar a cabo las actuaciones necesarias para su planificación, gestión y conservación. Un inventario forestal proporciona una información estadística homogénea y adecuada sobre el estado y la evolución de un área forestal particular, pero comparable con otros sistemas forestales análogos. Los métodos más aplicados para inventariar las masas forestales incluyen los inventarios de base estadística, y cada uno de los posibles métodos es aplicable a situaciones específicas, dependiendo de las condiciones del rodal y de los objetivos del inventario. La naturaleza de los inventarios puede variar también según las escalas espaciales y temporales adoptadas (ej., a nivel local, regional, nacional o global). En consecuencia, es importante poder disponer de variables normalizadas para poder realizar comparaciones, tanto en el espacio como en el tiempo. El método elegido debe ser apropiado para las características físicas y ambientales de la zona de estudio (desde el monte al país completo), de las características de los sistemas forestales que se quieren estudiar (por ej., de un pastizal o un bosque), y de la calidad y cantidad de información que se quiere recopilar en un período de tiempo determinado. Los inventarios forestales se llevan a cabo para diferentes

propósitos, pero generalmente se han diseñado para apoyar la planificación forestal a diferentes escalas (políticas nacionales-Inventario Forestal Nacional, hasta proyectos de ordenación, o planes de conservación). No hay que olvidar que, además, recopilan información auxiliar necesaria para el plan de manejo forestal, como fuentes cartográficas de diferente naturaleza.

En el caso del acceso a bases de datos de inventario, la cuestión no es qué método seleccionó el organismo competente, sino más bien si el método de muestreo que se ha utilizado para recopilar la información es el adecuado a los objetivos analíticos que el usuario requiere de esos datos, por lo que éste debe conocer las limitaciones de cada método de forma previa a su análisis. Los métodos de muestreo más frecuentes se basan en la medición de un porcentaje de la superficie total, partiendo de la premisa que la proporción del área que se mide es representativa de todo el terreno estudiado. Por tanto, la mayor parte de los inventarios (Capítulo 4; Tabla 16.1) se podrían agrupar en tres grandes categorías:

- Inventarios forestales por muestreo estadístico. Este es el caso de la mayoría de los inventarios propiamente forestales, independientemente de la escala espacial usada, adecuados a la mayor parte de los propósitos de planificación forestal. Se muestrea un porcentaje bajo de la superficie. Los porcentajes de muestreo pueden variar desde un 0,2% (por ej., utilizando parcelas de regeneración de radio fijo en rodales homogéneos), hasta un 20% para parcelas de radio variable para áreas forestales pequeñas llevándose a cabo de acuerdo con un patrón predefinido subjetivamente, siguiendo una ley de uniformidad.
- Censos. Por el contrario, determinados tipos de inventarios forestales no tienen un carácter estadístico, sino que se acercan más al concepto de un censo, ya que intentan recoger toda la información posible de un aspecto concreto (ej., el conjunto de una población, y no una muestra). Es un método eficaz cuando el número de entidades es el principal atributo de interés (por ej., flora endémica o aves) o se dirige hacia determinados procesos (por ej., una plaga).
- Inventarios que emplean otros métodos, como transectos, bloques, etc.

Tal y como ya se ha mencionado, es importante considerar la validez de los inventarios forestales ya existentes para muchos de los problemas que la gestión forestal plantea, bien utilizando los datos que se refieren directamente al problema objeto de estudio, como a través de variables indirectas o derivadas que proporcionan información adicional o que no se puede medir directamente en el campo, como puede ser el volumen o la biomasa (que requiere de ecuaciones alométricas para su determinación) o la biodiversidad (a través de índices de diversidad, como el índice de Shannon-Wiener o el índice de Simpson), entre muchos ejemplos. Estas variables indirectas (nuevas variables o variables derivadas) son fundamentales para obtener una comprensión más completa y detallada de los recursos forestales y para apoyar la toma de decisiones en la silvicultura. Si los inventarios existentes son aprovechables, es esencial procesarlos de forma correcta, planificando eficazmente los recursos y procesos, para así poder aumentar/optimizar su utilidad.

Tabla 16.1. Acceso a algunos ejemplos de bases de datos de inventario.

Inventario	Tipo de inventario	Acceso
Inventario Forestal Nacional (IFN) - España INF 1: 1966-1975 INF 2: 1986-1996 INF 3: 1997-2007 INF 4: 2008-202X	Inventario continuo con repetición de las mismas parcelas de los IFN. IFN3-IFN 4 registra más de 100 indicadores el estado y evolución de los montes. 1:50.000	https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.html
Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (IEFC) - Cataluña 1989-1998	Inventario realizado en 10644 parcelas dispuestas al azar sobre la superficie arbolada de Cataluña. Recursos forestales, biomasa, nutrientes y variables ecológicas	http://www.creaf.uab.cat/sibosc/programari.htm Vayreda et al. (2016).
Inventario Forestal Nacional - Perú 2013	Inventario continuo en parcelas permanentes con revisita cada 5 años. Composición específica y variables dasométricas	https://www.serfor.gob.pe/portal/wp-content/uploads/2020/03/INFORME-DEL-INFFS-PANEL-1.pdf

Estructura de datos de los inventarios

La estructura de los datos de inventario es el primer reto que se debe abordar cuando se quieren utilizar datos procedentes de este tipo información. Hay que partir de la premisa que cada inventario tiene una estructura diferente, por lo que hay que:

- Comprender la estructura original.
- Comprender las variables incluidas y sus procedimientos de medición y cálculo.
- Comprender la interacción entre variables y sus relaciones numéricas.

Lo deseable es que los manuales del inventario incluyan toda la información para poder usar de forma sencilla y eficiente estos datos (ej., https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/documentador_ifn4_campo_tcm30-536595.pdf; Figura 16.2). La información mínima que deben aportar es la siguiente:

- Estructura de la base de datos
- Variables principales
- Variables derivadas
- Confiabilidad estadística
- Estructura espacial de los datos: ubicaciones de las parcelas, tipo de muestreo (sistemático), que implica un patrón espacial (cartografía) (Figura 16.2), ubicaciones de la parcela (por ejemplo, GPS sistema de navegación, etc.).

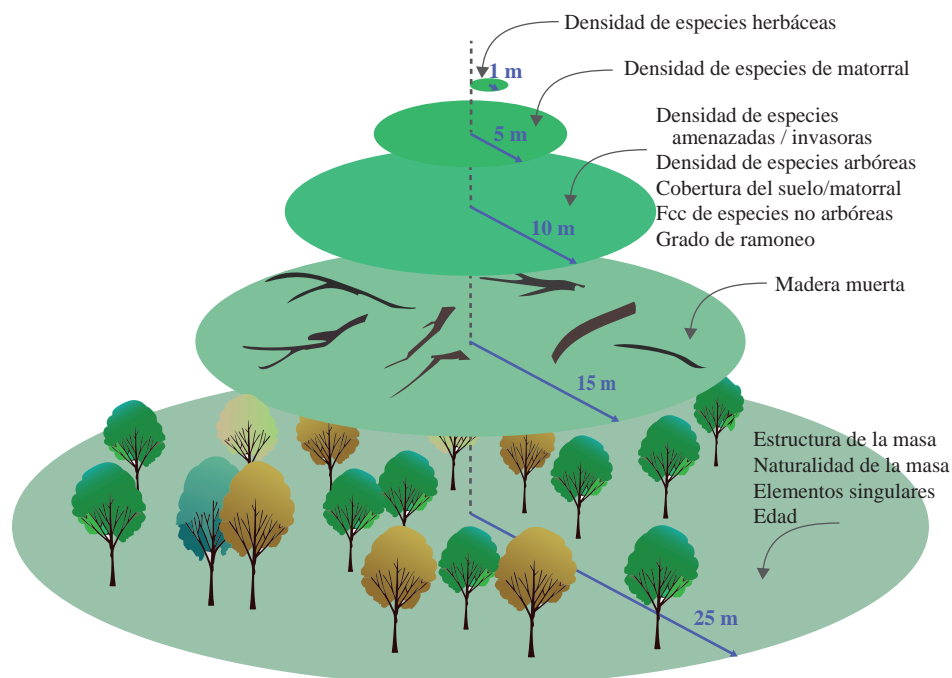


Figura 16.2. Detalles del diseño de la parcela y variables asociadas en el IFN-3 de España (fuente: Alberdi *et al.*, 2016).

Tipos de variables

Los inventarios forestales suelen incluir variables principalmente dendrométricas (Tabla 16.2) relacionadas con la composición específica, tanto del dosel superior como del regenerado y del subpiso, en particular las que influyen sobre la productividad forestal. Existen variables derivadas o variables nuevas que se pueden obtener a partir de las recogidas de manera directa en los inventarios y que hacen referencia a otros aspectos no directamente relacionados con el objetivo del inventario (ej., la biodiversidad) o que están asociadas a datos de tipo ambiental (ej., variables edáficas) o relacionadas con la vegetación acompañante (ej., plantas indicadoras), la composición arbórea por estratos, o la incidencia de agentes bióticos o abióticos en el estado de la vegetación. Por ejemplo, pueden generarse variables estructurales mediante datos de fácil acceso, como la distribución de clases diamétricas, la composición de especies, la altura de los árboles, la caracterización de las tasas de crecimiento, o las tasas de mortalidad. Estas variables relacionadas con la estructura forestal mantienen una estrecha conexión con los demás elementos del ecosistema, tales como el suelo, la flora y la fauna. Por lo tanto, es frecuente que muchas de las variables registradas en un inventario enfocado a las existencias puedan ofrecer perspectivas más amplias de aplicación.

Tabla 16.2. Bases de datos y descripción de los principales campos de los inventarios disponibles en los Parques Naturales del área de distribución de los pinsapares (*Abies pinsapo* Boiss.) en Andalucía en el año 2019.

Campos	Variables	IFN	Red Pinsapo	Ordenaciones
Generales	Coordenada X de la parcela	•	•	•
	Coordenada Y de la parcela	•	•	•
	Código del punto		•	
	Rumbo del pie al centro de la parcela	•	•	
	Distancia del pie al centro de la parcela	•	•	
Estado selvícola	Especie	•	•	•
	Cambio de especie	•		
	Diámetro	•	•	•
	Altura	•	•	
	Altura en árboles tipo			•
	Estimación de la edad	•		
	Espesor de corteza en árboles tipo	•		•
	Forma	•		
	Volumen maderable en árboles tipo	•		•
Regeneración	Especie	•		•
	Cambio de especie	•		
	Número	•	•	•
	Densidad	•		
	Abundancia		•	
	Distribución			•
	Altura media	•		
	Supervivencia		•	
	Potencial de supervivencia			•
Vigor	Calidad del árbol	•		
	Elemento dañado del árbol	•		
	Causas productoras del daño	•		
	Importancia/Severidad del daño	•		
	Agente causante del daño	•	•	
	Naturaleza causante del daño		•	
	Abundancia del agente causante del daño		•	
	Porcentaje de defoliación		•	
	Decoloración		•	
	Tipos de daños (bióticos/abióticos)			•
	Tipos de agentes (bióticos/abióticos)			•

A continuación, se presentan algunos ejemplos ilustrativos de variables que pueden derivarse de los inventarios forestales (Pescador *et al.*, 2022):

- Descripción de la vegetación de los estratos herbáceos, de la vegetación del subpiso, etc.
- Historia del uso del suelo.
- Caracterización de hábitats de alto valor biológico.
- Estado sanitario o de vigor de la vegetación.
- Localización de árboles notables para la conservación.

La definición de las variables directas o derivadas que se van a analizar depende del objetivo establecido y de la capacidad del inventario para ofrecer información cuantitativa o cualitativa sobre el proceso estudiado. A veces, las limitaciones del diseño del inventario y la rigidez relativa de las variables medidas no es compatible con determinados análisis (ej., biodiversidad) o con la integración de otras fuentes de información (ej., LiDAR; <https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/red-parques-nacionales/seguimiento/seguimiento-ecologico/documentos-lidar.html>). Esta situación ha hecho que haya un interés creciente por explorar la capacidad de los inventarios forestales tradicionales para evaluar otros procesos a escala del hábitat. En la práctica, es viable combinar estas dos perspectivas, lo que posibilita que el inventario cubra de manera uniforme la totalidad de un área, proporcionando una representación cartográfica de las variables registradas. Simultáneamente, se puede emplear un enfoque más selectivo que permita un análisis detallado de ciertos aspectos que operan en diferentes escalas, como la biodiversidad de hábitats específicos o el ciclo del carbono. No obstante, es esencial encontrar un equilibrio entre los objetivos de medición y las limitaciones impuestas por los recursos humanos y materiales disponibles. Por tanto, teniendo en cuenta las limitaciones espaciales y temporales y las modalidades de ejecución de la mayor parte de los inventarios forestales, es oportuno considerar los siguientes aspectos a la hora de utilizar datos procedentes de ellos:

- Utilizar información ya disponible o que puede derivarse de los datos conocidos y contrastados/verificados.
- Optimizar la utilidad de los datos para estudiar la distribución y la frecuencia de especies vegetales o de las características estructurales de la vegetación.
- Vincular la información a aspectos no relacionados con las existencias (por ej., sanidad forestal, regeneración, etc.).
- Facilitar la integración de los datos en un SIG.
- Complementar la frecuencia del inventario a través de su integración con datos de teledetección.

A pesar de estas limitaciones, los inventarios por muestreo (IFN, Redes, inventarios de ordenaciones, etc.) siguen siendo una base sólida para muchos de los análisis necesarios

para la planificación de la silvicultura, incluidos aspectos más actuales, como el ciclo del C, la biodiversidad, la conservación, el impacto del cambio climático en especies y hábitat, entre otros, ya que son observaciones realizadas con arreglo a un sistema estructurado que abarca de forma homogénea un territorio (a diferentes escalas).

Aunque es prácticamente imposible encontrar un inventario que recoja todas las variables adaptadas a todas las necesidades, es posible acceder a inventarios que incluyan un conjunto bien definido de variables cuantitativas y cualitativas que permitan estimaciones detalladas y más complejas que las relacionadas con las existencias. En ese sentido, en muchos casos es necesario armonizar los datos procedentes de inventarios nacionales, regionales e inventarios de ordenación (ver epígrafe 2.4, Tabla 16.2) para analizar de manera pormenorizada diferentes escalas del territorio.

Se están proponiendo métodos de inventario que, junto con las variables dendrométricas y estructurales recogidas tradicionalmente en las unidades de muestreo (parcelas), se recogen datos de indicadores de hábitat, como la vegetación herbácea y del matorral, los árboles muertos o en descomposición, etc. (Pescador *et al.*, 2022).

Inventarios nacionales

En España y otros países, los inventarios forestales se constituyen como proyectos de levantamiento exhaustivo de los recursos forestales en el conjunto del territorio nacional. Estos inventarios se fundamentan en muestreos sistemáticos y multifásicos con el propósito de suministrar información detallada acerca de los sistemas forestales y de su evolución desde perspectivas dendrométricas y ecológicas. Incluyen atributos relativos a la ubicación geográfica, variables forestales, de diversidad biológica, de desarrollo temporal, de conservación y la función productiva, entre otros aspectos. En España, los Inventarios Forestales Nacionales (IFNs) se organizan administrativamente por provincias y se ejecutan de manera continua, con mediciones repetidas de las mismas variables en las mismas parcelas con una frecuencia de, al menos, diez años (conforme al artículo 28 de la Ley de Montes vigente). Este enfoque permite la comparación y deducción de tendencias en las masas forestales. Hasta la fecha, en España se han realizado tres IFNs (IFN1 – no disponible –, IFN2, IFN3) (Tabla 16.3; Alberdi *et al.*, 2016). Desde 2008 se está llevando a cabo el IFN4, que introduce algunas novedades en comparación con su predecesor, ya que se incluyen una serie de anexos que establecen las relaciones entre las parcelas de ambos inventarios por clases y subclases. En particular, se ha refinado la metodología establecida en el IFN3 en relación con los parámetros relacionados con la biodiversidad forestal. Además, en el IFN4 se ha aumentado la frecuencia de inventario en las comunidades autónomas con clima atlántico, donde se realizará un inventario de baja intensidad cada cinco años (https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-forestal-nacional/cuarto_inventario.html). La base cartográfica empleada para el IFN4 es el Mapa Forestal de España a escala 1:25.000 (MFE25), lo que supone una mejora considerable en comparación con el Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 (MFE50) utilizado como base cartográfica en el IFN3. Esta mejora se refleja tanto en la

precisión geométrica como en la temática, siendo particularmente relevante la inclusión de áreas sin árboles. Además, el IFN4 adopta una nueva metodología para estimar la captura de carbono de los bosques, tanto en la parte aérea como en la subterránea, en respuesta a la necesidad de proporcionar este dato.

Tanto el IFN3 como el IFN4 proporcionan datos a partir de cuatro bases de datos claramente diferenciadas. Estas bases de datos contienen información diversa, como detalles generales de cada parcela (altitud, orientación, pendiente, cobertura del dosel, suelo desnudo, uso del suelo, etc.), medidas dendrométricas de las especies principales, especies de árboles y arbustos acompañantes, así como información sobre la regeneración de la vegetación. Una de las bases de datos, especialmente valiosa y recientemente incorporada al IFN, es la relacionada con las parcelas de biodiversidad. Esta base de datos contienen información de una muestra representativa de las parcelas del IFN en relación con características ecológicas altamente específicas vinculadas a la diversidad de especies de árboles, arbustos y herbáceas (identificando especies amenazadas o invasoras), cobertura de suelo sin vegetación arbórea y con vegetación de menor altura (como líquenes, hepáticas y musgos), estructura del bosque, madera muerta, consumo de vegetación y edades de los árboles dominantes en cada parcela, entre otros aspectos. Los IFN cuentan con una base de datos asociada a un SIG y tablas resumen que contienen información procesada (<https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-forestal-nacional.html>).

Tabla 16.3. Descripción de las principales características del Inventario Forestal Nacional (IFN).

Inventario	Ciclo	Estratificación	Parcelas de muestreo	Nº de parcelas
IFN-2	1986-1996	Malla sobre el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos, escala 1:50.000	Malla UTM 1 km × 1 km. Parcelas permanentes	84.203
IFN-3	1997-2007	Malla sobre el Mapa Forestal de España, escala 1:50.000 (MFE 50)	Malla UTM 1 km × 1 km. Parcelas permanentes Repetición de parcelas Parcelas remedidas aprox. 85%.	95.327
IFN-4	2008-202X	Malla sobre el Mapa Forestal de España, escala 1:25.000 (MFE 25)	Malla UTM 1 km × 1 km Parcelas nuevas Repetición de parcelas Parcelas de refuerzo Parcelas apeadas	>100.000

Redes de Seguimiento de Bosques

Las redes de seguimiento del estado de los bosques en Europa se establecieron en el año 1985 a través del Programa de Cooperación Internacional para la Evaluación y Seguimiento

de los Efectos de la Contaminación Atmosférica en los Bosques (ICP-*Forests*; <http://icp-forests.net/>). El objetivo de estas redes es evaluar el estado y la evolución de las masas forestales mediante metodologías y protocolos armonizados para toda Europa, que son desarrollados, revisados y actualizados de manera periódica. El Programa ICP-*Forests* es coordinado por Alemania y cuenta con la participación de 36 países europeos, además de Estados Unidos y Canadá. Cada país participante designa un Centro Focal Nacional responsable de llevar a cabo los trabajos a nivel nacional. En España, el Centro Focal es el MITECO a través de la D.G. de Biodiversidad, Bosques y Desertificación (<https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques.html>).

Las redes de seguimiento forestal del ICP-*Forests* se han convertido en uno de los sistemas de monitoreo biológico más amplios a nivel mundial, proporcionando datos a la comunidad científica internacional y contribuyendo con sus resultados a numerosos informes, tanto a nivel nacional como internacional. Además, las Redes aportan información relacionada con cuatro de los indicadores de Gestión Forestal Sostenible de Europa: depósito de contaminantes atmosféricos, estado de los suelos forestales, defoliación y daños forestales. En los últimos años, se ha iniciado un proceso de integración con otras redes de seguimiento e información forestal existentes, tales como los IFNs o la red LTER Europe (<https://lter-spain.csic.es/>), que se encarga de la investigación socioecológica a largo plazo vinculada a un espacio natural.

La Red ICP comprende dos niveles de seguimiento de los bosques, uno a gran escala (Nivel I) y otro de Seguimiento Intensivo y Continuo de los Ecosistemas Forestales (Nivel II). El primer nivel, que se estableció junto con la creación del ICP-*Forests*, utiliza una malla sistemática de 16×16 km que cubre toda Europa (Tabla 16.4, Figura 16.3). Esta red permite analizar la variación temporal y espacial del estado de vitalidad de los bosques, definido por parámetros fundamentales como la defoliación y la decoloración, así como los agentes asociados a los daños en los árboles y su relación con diversos factores de estrés, incluyendo la contaminación atmosférica en la baja troposfera. La Red de Nivel II se estableció en la década de los años noventa con el propósito de llevar a cabo un seguimiento exhaustivo de los ecosistemas forestales, proporcionando información completa sobre la relación entre los distintos factores de estrés y el estado de vitalidad y funcionalidad de los bosques (relaciones de causa y efecto). A lo largo del tiempo, las Redes de Seguimiento de Bosques han ido adaptando sus objetivos para responder a las nuevas demandas de información sobre los bosques en Europa y se han ampliado con nuevas redes autonómicas y del Organismo Autónomo Parques Nacionales (Figura 16.3).

Las bases de datos del ICP, de forma independiente o integradas permiten estudiar la variación espacio temporal en el estado de los bosques, así como su relación con los factores de estrés. Esta información se ha usado en numerosas publicaciones científicas relacionadas con los agentes bióticos, el impacto de los contaminantes atmosféricos, la contribución de los bosques como sumideros de carbono, los cambios de la biodiversidad en los ecosistemas forestales, etc.

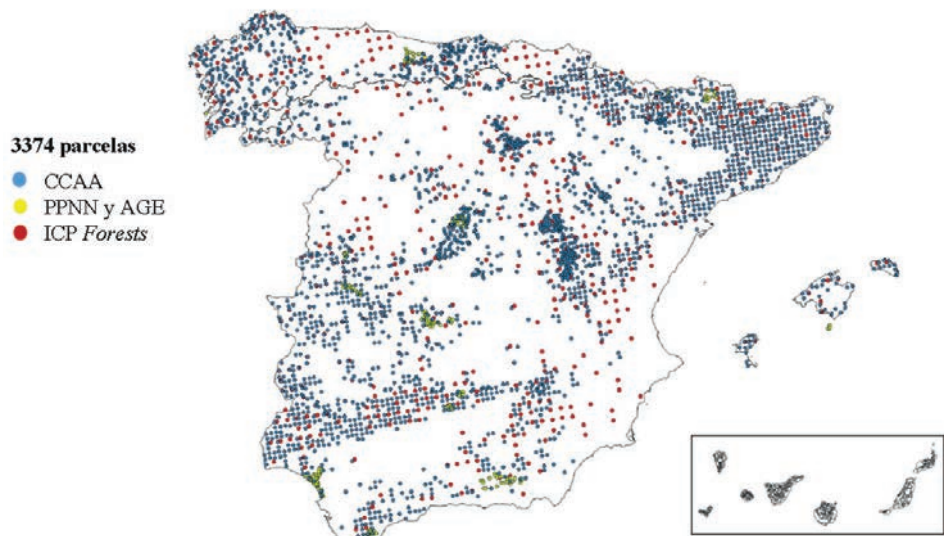


Figura 16.3. Redes de seguimiento de bosques Nivel I (ICP-España, redes autonómicas y redes de Parques Nacionales; https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/11_inia03_jornadas_intercal_20230510_tcm30-570068.pdf, Adame *et al.*, 2022).

Tabla 16.4. Descripción de diferentes redes de seguimiento de bosques nivel I en España.

Red	Ciclo	Malla	Nº de parcelas	Acceso
ICP-España	1987-actualidad	16 × 16 km	620	https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques.html
ICP Parques Nacionales	1986-actualidad	4 × 4 km	217	https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/red-parques-nacionales/seguimiento/seguimiento-ecologico/informes-fitosanitario.html
Red SEDA	2000-actualidad	8 × 8 km	375	https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/medio-forestal/sanidad-forestal
Red SEDA-Pinsapo	2000-actualidad	1 × 1 km	27	https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/medio-forestal/sanidad-forestal

Inventarios de ordenaciones

Por último, se puede acceder a los inventarios forestales realizados en los proyectos de ordenación. Estos inventarios proporcionan información detallada sobre la composición, la estructura y el estado de los bosques, lo que ayuda a tomar decisiones informadas para la planificación y el manejo de los recursos naturales (ej., https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documents_Tecnicos/manual_ordenacion_montes_andalucia/manual_ord_montes.pdf).

La información principal que se puede obtener de esos inventarios incluye:

- Especies forestales principales, diversidad de especies vegetales y datos de flora.
- Estructura del bosque, con información sobre la edad, el tamaño y la distribución de los árboles.
- Inventario de biomasa y carbono acumulado para evaluar la contribución del bosque a la mitigación del cambio climático.
- Inventario de recursos maderables, en particular los volúmenes/lotés de madera, incluyendo especies comerciales y no comerciales.
- Evaluación de amenazas y enfermedades; detección y evaluación de la presencia de plagas, enfermedades y otros factores de amenaza para los bosques.
- Zonificación y planificación selvícola en función de diferentes características dasocráticas, tipos de vegetación, prioridades de conservación, áreas de aprovechamiento forestal, etc.

Los inventarios forestales se realizan a intervalos regulares (revisiones de las ordenaciones, aproximadamente cada 10 años), lo que facilita el monitoreo a largo plazo de los cambios en el bosque y evaluar la efectividad de la silvicultura aplicada. En capítulos previos se ha mostrado como los avances tecnológicos, como la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), han modificado completamente la planificación, la ejecución y el análisis de los datos procedentes de inventarios de proyectos de ordenación. La información recopilada en estos inventarios puede almacenarse en bases de datos que sirven como valiosos recursos para numerosos trabajos relacionados con las ciencias forestales (Tabla 16.5).

En la Tabla 16.6 y en la Figura 16.4 se puede ver la distribución espacial de tres tipos de inventario, IFN, Red SEDA de seguimiento de bosques y datos de inventario en el Parque Nacional de Sierra de las Nieves. La integración de estos inventarios permite el análisis a diferentes escalas; en el ejemplo incluido, se dispone de una cuadrícula de ocho kilómetros de lado (Red SEDA), de un kilómetro de lado (IFN) o de menos de 0,5 km de lado (inventario de ordenaciones), que componen, en su conjunto, una malla regular de parcelas proyectadas sobre distintas bases cartográficas (fotografías aéreas y/o imágenes desde satélite); a partir de ella es posible establecer una estratificación basada en las diferentes cubiertas forestales.

Tabla 16.5. Descripción de diferentes fuentes de acceso a inventarios de proyectos de ordenación en España.

Catálogo de Montes	Acceso
Castilla y León	https://datosabiertos.jcyl.es/web/jcyl/set/es/medio-ambiente/montes-ordenados-cyl/1284813417265
Navarra	http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Montes/Planificacion+forestal.htm#header4
Andalucía	https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page-%C3%ADndice/-/asset_publisher/zX2ouZa4r1Rf/content/cat-c3-a1logo-de-montes-p-c3-bablicos-de-andaluc-c3-ada/20151

Tabla 16.6. Principales características de los inventarios disponibles en los Parques Naturales del área de distribución de los pinsapares (*Abies pinsapo* Boiss.) en Andalucía en el año 2019 (fuente: REDIAM).

Monte	Año	Variables medidas	Parcelas de muestreo	Nº de parcelas
IFN-3	2007	Diámetro; especie; posición relativa en la parcela; altura total; calidad; forma de cubicación; agente causante de daño; Importancia del daño; elemento dañado; espesor de corteza y diámetro de copa en árboles tipo; pies menores y regeneración (número, spp y altura); arbustos (spp, fcc y altura)	Malla sobre el Mapa Forestal de España UTM 1 km × 1 km. Parcelas permanentes. Repetición de parcelas. Parcelas remedidas aprox. 85%.	181
Red SEDA/ PINSAPO	2001	Diámetro especie; altura total; daño; presencia de agentes de afección y su abundancia; decoloración; defoliación; presencia de ganado; hidromorfismo; regeneración y su abundancia	Inventario del estado fitosanitario de la vegetación forestal con muestreo sistemático con malla de 1 km × 1 km	31
Ordenación monte Pinar de Yunquera (PU-110)	2006	Diámetro de todos los pies; especie; posición relativa en la parcela; altura total, altura de fuste, espesor de corteza, y diámetro de copa en árboles tipo; pies menores y regeneración (número, spp y altura); arbustos (número, spp, fcc y altura)	Inventario sistemático estratificado con parcelas circulares de radio 13 m	459

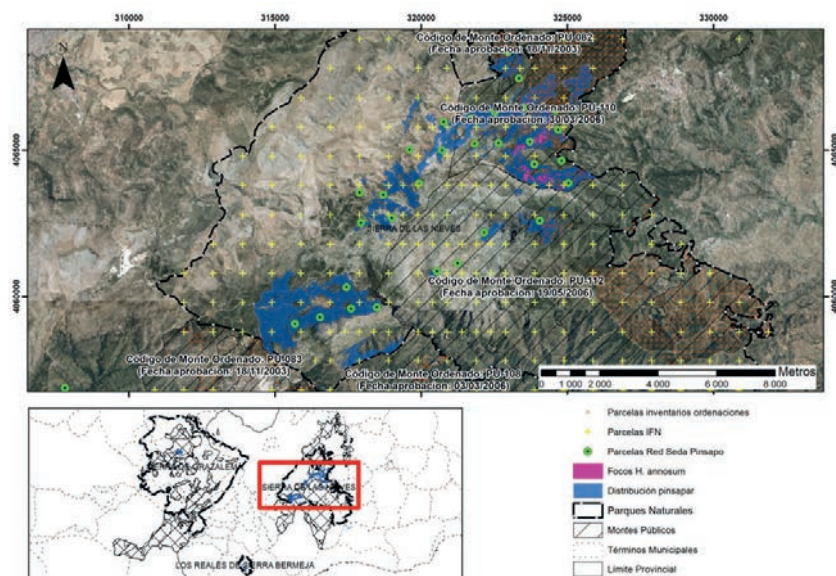


Figura 16.4. Detalles de la distribución de parcelas de inventario o censos en el P.N. Sª de las Nieves.

Ejemplo 1

Bases de datos para estudios de *Abies pinsapo* en Andalucía: recopilación de datos

En este ejemplo se va a trabajar con el monte público Pinar de Yunquera, con código MA-30037-AY. Se trata de un monte de unas 2.000 ha de titularidad pública, perteneciente al Ayuntamiento de Yunquera y cuya gestión ha venido realizando la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Está localizado en el interior del Parque Natural Sierra de las Nieves y contiene una variedad florística de incalculable valor.

Dentro de las acciones encaminadas a la redacción del Proyecto de Ordenación, se realizó un inventario forestal mediante un muestreo sistemático estratificado. Se comienza con el análisis de las bases de datos del inventario derivado de la documentación referente a la ordenación.

(Ver QR al final del capítulo para acceder a ejemplos).

3. Análisis numéricos de datos de inventarios

3.1. Armonización de datos de inventario

Un paso previo para el análisis conjunto de datos de inventarios consiste en la armonización de las bases de datos que se van a usar (Tabla 16.6). El proceso de armonización de datos implica una serie de actividades destinadas a mejorar la coherencia en la utilización de la sinergia de

elementos de datos en lo que respecta a su significado y su formato de representación. Por lo general, se realiza de manera semántica antes de abordar las estructuras de los datos.

La nomenclatura utilizada en cada inventario puede ser muy diferente. Se pueden construir reglas de equivalencias que quedarán recogidas en un único diccionario de códigos. Por lo general, es preferible utilizar los elementos semánticos que tenga mayor vigencia (por ejemplo, IFN), en lugar de desarrollar un conjunto nuevo. Esta estrategia asegura que la terminología utilizada puede ser interpretada por cualquier usuario mediante una regla de nomenclatura (ej., manuales de inventario). Posteriormente, usando diversas herramientas, se establecen relaciones entre variables equivalentes de las bases de datos, seguido de una depuración básica de las mismas. El resultado de estos pasos es un conjunto de datos estandarizados, que servirán para desarrollar los posteriores análisis.

En todo caso, el proceso de armonización debe incorporar una identificación clara y precisa de los elementos de datos (nombre de las variables, descripción, unidades, naturaleza, etc.) así como listas de códigos recomendados. Esto no solo contribuye a validar el proceso, sino que también garantiza una mayor interoperabilidad con los sistemas que ya emplean estos estándares.

Ejemplo 2

Bases de datos para estudios de *Abies pinsapo* en Andalucía: preparación y limpieza de los datos

La preparación y limpieza de bases de datos de inventarios forestales es un paso crucial en el proceso de análisis de la información. Antes de poder extraer información significativa, es fundamental asegurarse de que los datos estén completos, precisos y coherentes.

Una vez recopilados, los datos suelen requerir una limpieza inicial para corregir errores de entrada, como valores atípicos o registros duplicados. Luego, se realiza una verificación más detallada para garantizar la coherencia y precisión de los datos. Esto implica la identificación y corrección de errores adicionales, como inconsistencias en la nomenclatura de especies o coordenadas geográficas incorrectas. Además de corregir errores, también es importante estandarizar los datos para facilitar su análisis posterior. Esto puede implicar la conversión de unidades de medida, la normalización de nombres de especies o la estructuración de la base de datos de acuerdo con un formato específico.

Una vez que los datos han sido preparados y limpiados adecuadamente, están listos para su análisis y utilización posterior. La preparación y limpieza de bases de datos de inventarios forestales no solo garantiza la integridad y calidad de los datos, sino que también mejora la eficacia y fiabilidad de los análisis posteriores, lo que contribuye a una gestión más efectiva de los ecosistemas forestales.

(Ver QR al final del capítulo para acceder a ejemplos).

3.2. Descripción de datos e inferencia estadística

Estadística descriptiva

Las estadísticas descriptivas son herramientas fundamentales para analizar y resumir las características de las variables en inventarios forestales. Estas estadísticas proporcionan una comprensión general de la distribución, las tendencias y la variabilidad de los datos recopilados en los inventarios. En las talas 16.7 y 16.8 se presentan algunas de las estadísticas descriptivas comunes que se pueden utilizar en el análisis de variables de inventarios forestales.

Tabla 16.7. Estadísticas descriptivas más comunes que se pueden utilizar en el análisis de variables de inventarios forestales.

Estadístico	Definición
Media (Promedio)	Representa el valor promedio de una variable en el inventario forestal. Ayuda a entender el valor típico de la variable y su nivel central.
Mediana	Es el valor que divide el conjunto de datos en dos partes iguales, con la mitad de los valores por encima y la mitad por debajo. La mediana es útil para describir la ubicación central de los datos y es menos sensible a valores atípicos que la media.
Desviación Estándar	Indica la dispersión o variabilidad de los valores en relación con la media. Una desviación estándar alta sugiere mayor dispersión de los datos, mientras que una baja indica menor dispersión.
Rango	Es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de una variable. Ofrece una idea de la amplitud de los datos.
Percentiles	Los percentiles dividen los datos en porcentajes específicos. Por ejemplo, el percentil 25 (P25) es el valor por debajo del cual se encuentra el 25% de los datos. Los percentiles ayudan a identificar valores típicos y extremos.
Coefficiente de Variación	Es el cociente entre la desviación estándar y la media, expresado como porcentaje. Proporciona una medida relativa de la variabilidad en comparación con el tamaño promedio de la variable.
Histograma	Un gráfico de barras que muestra la distribución de frecuencias de una variable. Ayuda a visualizar cómo se distribuyen los valores a lo largo del rango.
<i>Boxplot</i> (diagrama de caja y bigotes)	Proporciona una representación gráfica de la mediana, cuartiles y valores atípicos en una variable.
<i>Skewness</i> (asimetría)	Mide la asimetría de la distribución de los datos. Un valor positivo indica asimetría hacia la derecha (cola larga a la derecha), mientras que un valor negativo indica asimetría hacia la izquierda.
Curtosis	Indica la forma de la distribución de los datos en relación con la distribución normal. Un valor mayor indica una distribución más puntiaguda en comparación con la normal.
Correlación	Si se tienen múltiples variables en el inventario, se puede calcular la correlación para evaluar las relaciones lineales entre ellas.
Regresión	Si se sospecha que una variable puede estar influenciando a otra, se puede realizar un análisis de regresión para modelar la relación entre las variables.

Tabla 16.8. Ejemplo de estadísticas descriptivas más comunes que se pueden utilizar en el análisis de variables de inventarios forestales.

Variable	Media	Mediana	Desviación estándar	Rango	P ₂₅	P ₇₅	Asimetría	Kurtosis
Altura (m)	15,2	14,8	3,1	9,5	12,3	17,6	0,42	-0,18
Densidad (árboles ha ⁻¹)	380	372	48,7	126	350	408	1,10	2,08

Ejemplo 3

Bases de datos para estudios de *Abies pinsapo* en Andalucía: análisis previos y visualización de los datos

Los análisis previos y la visualización de las bases de datos de un inventario forestal son etapas fundamentales para comprender la estructura y la distribución espacial de los recursos forestales, así como para identificar patrones y tendencias importantes. Antes de realizar un análisis detallado, es importante realizar una exploración inicial de los datos para comprender su contenido y calidad. Esto implica revisar las variables disponibles, como la especie de árboles, la edad, la altura y la densidad, entre otras, y evaluar la integridad y coherencia de los datos.

Una vez que los datos han sido evaluados y preparados, se puede realizar una variedad de análisis para extraer información significativa. Esta etapa puede incluir análisis de distribución espacial para identificar patrones de vegetación, análisis de estructura de la población, para comprender la composición y la diversidad del sistema forestal estudiado, o los análisis de tendencias temporales para detectar cambios en el tiempo.

Por último, la visualización juega un papel crucial en este proceso ya que permite representar gráficamente los datos de manera clara y comprensible. Esto puede incluir la creación de mapas temáticos para visualizar la distribución de especies, gráficos de barras o diagramas de dispersión para representar relaciones entre variables y diagramas de caja y bigotes para mostrar la variabilidad en los datos. En otros capítulos se muestra el uso de Sistemas de información geográfica (SIG) y *software* de análisis estadístico que facilitan la exploración y la interpretación de los datos forestales. Estas herramientas permiten a los usuarios realizar análisis espaciales, realizar interpolaciones y modelar escenarios futuros para evaluar el impacto de diferentes estrategias de gestión.

(Ver QR al final del capítulo para acceder a ejemplos).

Librerías de R para el análisis de datos de inventario

El aumento de la complejidad y cantidad de datos que se manejan en los análisis de inventarios ha dado lugar a que numerosos autores hayan desarrollado librerías de R (www.r-project.org) para establecer plataformas capaces de adaptarse a las nuevas estrategias y necesidades de los inventarios forestales. Su objetivo es, normalmente,

mejorar el uso que hacen los gestores forestales, investigadores y profesionales del medio ambiente de las estimaciones estadística sólidas que comprenden dimensiones espaciales y temporales muy distintas. Estas librerías se han desarrollado dentro del entorno de código abierto de R, ya que se aprovecha las capacidades de programación estadística de R, la compatibilidad entre plataformas y la amplia biblioteca de paquetes disponibles (<https://cran.r-project.org>). Las librerías desarrollan una serie de funciones que permiten consultas de bases de datos, resumir los datos de inventario, la extracción y agregación de información espacial complementaria y la generación de análisis estadísticos de mayor o menor complejidad. En algunos casos, incluyen análisis basados en SIG (ej., QGIS) o teledetección (Tabla 16.9).

Tabla 16.9. Bibliotecas de paquetes de R aplicados a inventarios forestales.

Referencia	Acceso	Descripción
Bravo et al. (2015)	Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible	Análisis de datos selvícolas con R
Bravo et al. (2022)	Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible	basifoR: paquete de R para manejar los datos del Inventario Forestal Nacional
Frescino et al., (2023)	https://cran.r-project.org/package=FIESTA	El paquete 'FIESTA' R (Estimación y análisis de inventario forestal) es una herramienta que permite investigaciones personalizadas utilizando los datos de inventario basados el Servicio Forestal, Inventario y Análisis Forestal de EE. UU. (Programa FIA).
Silva et al. (2023)	https://rdr.io/rforge/rForest/	rForest: Forest Inventory and Analysis
Stanke et al. (2020)	https://rfia.netlify.app/	Análisis de los datos de inventario basados el Servicio Forestal, Inventario y Análisis Forestal de EE. UU. (Programa FIA).

4. Análisis espacial de datos de inventarios

4.1. Rodalización

La rodalización es uno de los principales resultados derivados del inventario y de su integración con fuentes de información procedentes de teledetección (ej., la fotointerpretación aérea). La definición de rodales (unidad mínima de actuación selvícola; ver Capítulo 11), parte de la información suministrada por las parcelas de muestreo, el análisis selvícola, y las diferentes interfaces de zonas forestales y no forestales obtenidos por fotointerpretación o técnicas de clasificación, lo que constituyen las tres fuentes esenciales

de datos para definir dichos rodales (González-Molina *et al.*, 2006). La fotointerpretación combinada con los datos de inventario y el informe selvícola permite caracterizar los rodales (ej., especies, estructuras, fases de desarrollo, ecosistemas particulares), en la medida en que se haya establecido una tipología pertinente, y proporciona informaciones precisas de variables dasométricas (ej., densidad, altura, diámetro, área basimétrica, etc.). Por otro lado, estas variables permiten caracterizar la diversidad estructural presente en los bosques, así como la evaluación de la fragmentación y la configuración (ej., conectividad) de la cobertura forestal. El examen de la disposición espacial de los rodales y su relación con otros tipos de usos del suelo ayuda a comprender las interacciones entre la vegetación y otros organismos (ej., avifauna o entomofauna). En estas zonas de transición entre distintos componentes del paisaje y hábitats, se pueden analizar procesos poco convencionales, tales como la estructura y densidad de la vegetación en los ecotonos, las dinámicas de cambio de los componentes de los ecosistemas, o los cambios fisiológicos asociados a los efectos de borde, entre muchos otros.

4.2. Interpolación de datos de inventario

En los actuales inventarios basados en muestreo, las unidades de muestreo consisten en parcelas con tamaños fijos o variables, por lo que no siempre reflejan completamente los patrones espaciales de algunas características evaluadas (ej., regeneración o biodiversidad). En ese sentido, en muchos casos es importante que las áreas donde se proyectan los datos no se limiten únicamente a las superficies de las parcelas, sino que se extiendan al conjunto de la superficie. Además, resulta esencial integrar los datos de los inventarios forestales tradicionales con otras fuentes de información, como cartografía de variables ambientales, y desarrollar enfoques de evaluación compatibles con esas variables (ej., modelos de hábitat). Por tanto, se necesita presentar esta información de manera espacialmente explícita.

La proyección de datos puntuales a datos proyectados espacialmente se puede hacer a través de diferentes técnicas de interpolación que permiten convertir datos puntuales distribuidos en el espacio en una representación ráster (Olmo, 2005). Existen diversos métodos para interpolar valores en ubicaciones no muestreadas, incluyendo interpolación de puntos, distancia inversa y varianza mínima. Los métodos de estimación puntual pueden dividirse en poligonales y métodos de interpolación triangular. Uno de los más frecuentes son los métodos de mínima varianza, como el *kriging*, que están diseñados para generar las mejores estimaciones según un criterio de estimaciones imparciales con la mínima variabilidad. Algunas preguntas básicas que debemos abordar a fin de disponer de un contexto adecuado para el análisis son:

- ¿Interesa obtener estimaciones a nivel global o local?
- ¿Se buscan parámetros poblacionales, como la media y la varianza, o se desea la distribución completa de valores?
- ¿Se necesitan valores puntuales o estimaciones en áreas, como polígonos?

Los inventarios forestales han enfocado sus esfuerzos en estimaciones globales, como el volumen de madera a nivel de rodal. Sin embargo, cada vez más se demanda información específica de otras variables. Para estimaciones globales, se utilizan todos los valores del inventario y generalmente se estima la distribución de atributos en el área de interés (ej., el rodal), aunque esto puede verse influido en gran medida por la agrupación de datos. Una vez decidido si estamos interesados en obtener estimaciones espaciales (locales), es necesario determinar si queremos estimar parámetros de una distribución o la distribución completa en sí. La media es el parámetro más comúnmente estimado. Si se busca estimar toda la distribución, se pueden usar métodos paramétricos y no paramétricos. Los métodos paramétricos asumen una distribución subyacente de los datos, aunque estas suposiciones pueden ser difíciles de verificar y podrían no ser apropiadas para ciertos casos donde los datos o la superficie no son continuos. Los métodos no paramétricos, por otro lado, no realizan estas suposiciones, pero requieren interpolación entre puntos.

La continuidad espacial de los datos es crucial, ya que determina los métodos de predicción adecuados. El tamaño del área que se está estimando y la densidad de los datos de muestra influyen en el método empleado. Es importante tener presente que, si necesitamos extrapolar más allá de la superficie con disponibilidad de datos, los resultados podrían carecer de validez. Por lo tanto, es importante determinar si queremos predecir valores a nivel local (ej., rodal o monte) o en áreas más grandes (ej., hábitat).

Existen numerosos métodos de interpolación que se puede aplicar usando diferentes softwares, pero un repaso en profundidad de todos ellos supera el alcance de este capítulo. Por ello, en este capítulo vamos a ilustrar la interpolación de datos de inventario usando uno de los tipos más básicos de interpolación, el *kriging* ordinario, que permite la predicción de variables en ubicaciones no medidas utilizando las relaciones entre los puntos de muestreo. El método se usa comúnmente cuando se toman muestras de un área (ej., parcelas de inventario) y el objetivo es obtener una cobertura completa de un atributo (ej., regeneración) con alguna medida de incertidumbre sobre el valor predicho (ej., rodal o monte). Para utilizar este método, tenemos que hacer algunas suposiciones sobre el proceso que estamos intentando predecir:

- Debemos asumir que la variable que estamos tratando de predecir es una variable aleatoria sobre la región de interés.
- Debemos asumir que el valor esperado de la variable es constante sobre la región.
- Debemos asumir que la varianza es constante y finita.
- Debemos asumir que la función de covarianza depende solo de la distancia entre dos puntos y no las posiciones absolutas de los datos.

En la Figura 16.5 se muestran los resultados de la interpolación mediante *kriging* de los patrones de regeneración de cuatro especies forestales en el Monte Pinar de Yunquera (PU-110, Málaga).

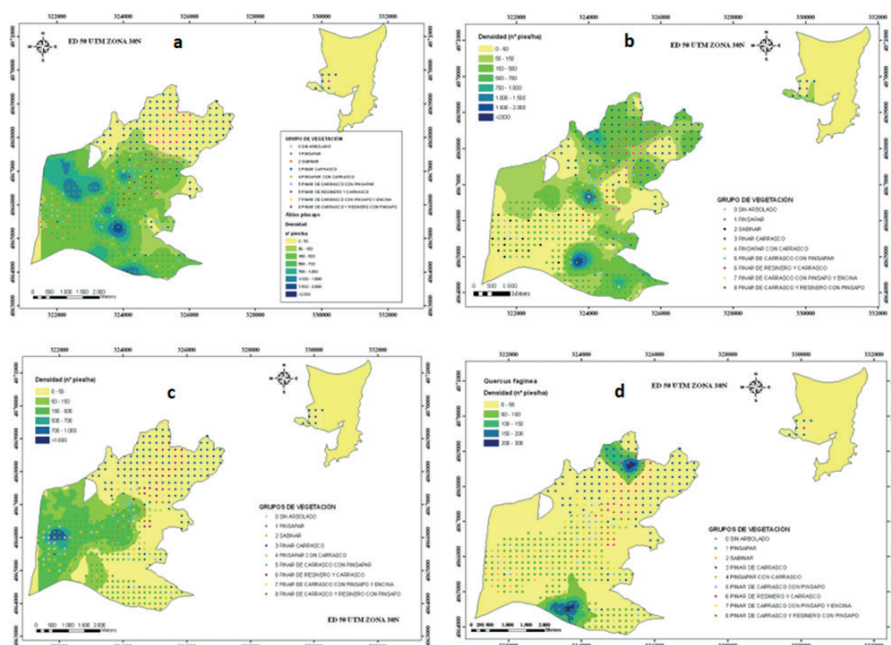


Figura 16.5. Distribución de la regeneración de pinsapo (a), encina (b), quejigo (c) y sabina (d) mediante la interpolación de los datos de inventario forestal usando la técnica *kriging* en el Monte Pinar de Yunquera (Málaga).

Ejemplo 4

Bases de datos para estudios de *Abies pinsapo* en Andalucía: Análisis de la red de equilibrios biológicos de pinsapo

El Reglamento CEE 3528/86 sobre protección de bosques contra los efectos de la contaminación atmosférica, puso en marcha una serie de acciones para el seguimiento del estado de los ecosistemas forestales en todos los países comunitarios, entre ellos, el establecimiento de la Red Europea de Seguimiento de Daños en los Bosques con muestreos sistemáticos anuales de la evolución del estado de salud de los bosques en parcelas sobre una malla de 16×16 km.

Posteriormente, la Junta de Andalucía lanzó en el año 2000 una Red Autonómica de Equilibrios Biológicos, sobre la base de la malla kilométrica existente, pero densificada de 8×8 km (Red SEDA). Para el caso concreto de la especie de pinsapo el muestreo se intensificó en una malla de 1×1 km en ecosistemas con presencia de *Abies pinsapo* (Red PINSAPO).

En este ejemplo se analizan la base de datos de la Red PINSAPO disponibles en la REDIAM.

(Ver QR al final del capítulo para acceder a ejemplos).

4.3. Integración de datos en modelos de predicción de hábitat

En concreto, como hemos visto en los epígrafes previos, los inventarios forestales de las ordenaciones de montes suelen ofrecer información sobre el regenerado (brinzales y chirpiales), así como sobre los individuos juveniles (normalmente $\text{dbh} \leq 7,5 \text{ cm}$), lo que permite su integración en los modelos de predicción de hábitat o modelos de distribución de especies (MDE, ver Capítulo 18, Navarro Cerrillo *et al.*, 2016). Los MDE tienen varias aplicaciones en ecología y conservación; se han utilizado con éxito para predecir la restauración de hábitats críticos, los cambios de distribución de especies debidos al cambio climático, la fragmentación de hábitats y la distribución de especies singulares y amenazadas, entre otros. En ese sentido, los MDE pueden incorporar datos demográficos, como pueden ser variables selvícolas derivadas de inventarios forestales, para predecir los procesos de naturalización de las masas artificiales favoreciendo dichos procesos a partir de los hábitats potenciales de las especies de interés restaurador. La cartografía derivada de aplicar los MDE al estudio de los procesos de regeneración de especies forestales puede ser muy útil para definir muchos aspectos relacionados con la conservación, la planificación y la silvicultura de ecosistemas forestales que mejoren su dinámica natural.

La disponibilidad actual de datos de inventario en formatos digitales espacialmente explícitos (incluidas, en algunos casos, sus series temporales -inventarios asociados a las revisiones de las ordenaciones-) permite mejorar la precisión de los modelos de predicción de hábitats. Así, por ejemplo, se pueden elaborar mapas de regeneración de especies vegetales con un alto nivel de confianza estadística, identificar áreas adecuadas para la reintroducción de especies forestales clave (Navarro-Cerrillo *et al.*, 2016) y desarrollar medidas selvícolas eficaces que promuevan la regeneración natural. Los MDE consideran factores bióticos (características del dosel, presencia de dispersores, etc.) y abióticos (variables climáticas, características edáficas, etc.) relacionados directamente con los procesos de regeneración. Así, la información obtenida puede ayudar a responder preguntas del tipo cómo se distribuye espacialmente la regeneración y cuáles son los factores condicionantes o limitantes, o cómo responde a las perturbaciones antrópicas y a los cambios ambientales globales (Blanco-Cano *et al.*, 2022). En este contexto, la integración de los datos de inventario y los MDE pueden usarse como una herramienta que aporta un nuevo enfoque a diferentes actuaciones selvícolas (Figura 16.6).

5. Modelización y simulación y optimización

5.1. Construyendo modelos

La utilización de datos de inventarios forestales para la construcción de modelos es una práctica cada vez más común en trabajos científicos, aunque su generalización al ámbito de la gestión todavía es más limitada. Los inventarios forestales proporcionan

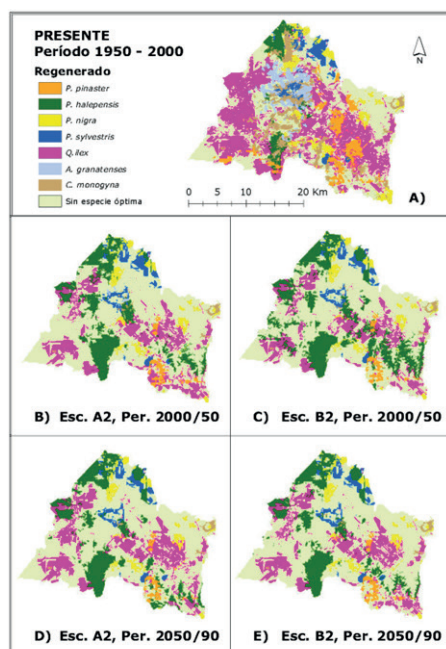


Figura 16.6. Áreas óptimas de regeneración de las especies estudiadas para el periodo actual y futuro (CGCM2) considerando dos escenarios de cambio climático. A) Predicción presente, B) Escenario A2 (2050), C) Escenario B2 (2050), D) Escenario A2 (2090) y E) Escenario B2 (2090). (ver Tabla 16.2 para nomenclatura).

información detallada que puede ser fundamental para desarrollar diferentes tipos de modelos. De forma general, los pasos clave para utilizar datos de inventarios forestales en la construcción de modelos son los siguientes:

1. Recopilación y preparación de los datos (como se vio en los epígrafes correspondientes).
2. Selección del tipo de modelo que se quiere construir. Se pueden utilizar diversos enfoques, como modelos lineales, modelos de regresión, modelos de clasificación, modelos de series temporales o incluso modelos de *machine learning*, según los objetivos y la naturaleza de los datos.
3. Selección de las características relevantes de los datos de inventario que se utilizarán como entradas para el modelo. Estas características pueden incluir datos biológicos (especies, edad, diámetro), datos de ubicación (latitud, longitud) y datos de condiciones ambientales (clima, suelo).
4. División de los datos en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba. Este paso permitirá entrenar el modelo, ajustar sus parámetros y evaluar la precisión del modelo.

5. Construcción del modelo, mediante la selección del algoritmo/modelo adecuado a los datos y los objetivos. Pueden usarse algoritmos paramétricos y no paramétricos.
6. Entrenamiento y ajuste del modelo y optimización de su rendimiento. Este paso puede requerir iteraciones y ajustes para lograr un buen ajuste a los datos.
7. Validación y evaluación para ajustar los hiperparámetros y evaluar el rendimiento del modelo utilizando diferentes estadísticos.
8. Prueba y aplicación para evaluar su capacidad de generalización. Si el modelo funciona bien, se puede utilizar en aplicaciones prácticas para la toma de decisiones forestales.

La construcción de modelos basados en datos de inventarios forestales es un buen ejemplo de la selvicultura basada en datos, ya que puede ser un proceso complejo que integra conocimientos en estadísticas, ciencias de datos y selvicultura, como se ha puesto de manifiesto en varios de los capítulos de este libro. Es posible que nunca se logre una resolución satisfactoria del modelo que se busca porque faltan efectos fijos clave; en este caso, hay que alcanzar un cierto nivel de compromiso. Al final del proceso de ajuste del modelo, se buscará el modelo más simple que satisfaga los supuestos necesarios del modelo y responda las preguntas de interés. Es tentador buscar efectos aleatorios más complejos que puedan proporcionar un mejor ajuste, pero si un modelo simple satisface las suposiciones y responde a los objetivos marcados, tratar de maximizar la probabilidad puede no dar frutos. En la Figura 16.7 se muestran los resultados de la obtención de un modelo para la estimación de la capacidad de secuestro de carbono en la S^a de los Filabres (Almería) a partir de la integración de datos de varios inventarios forestales (Navarrete-Poyatos *et al.*, 2019).

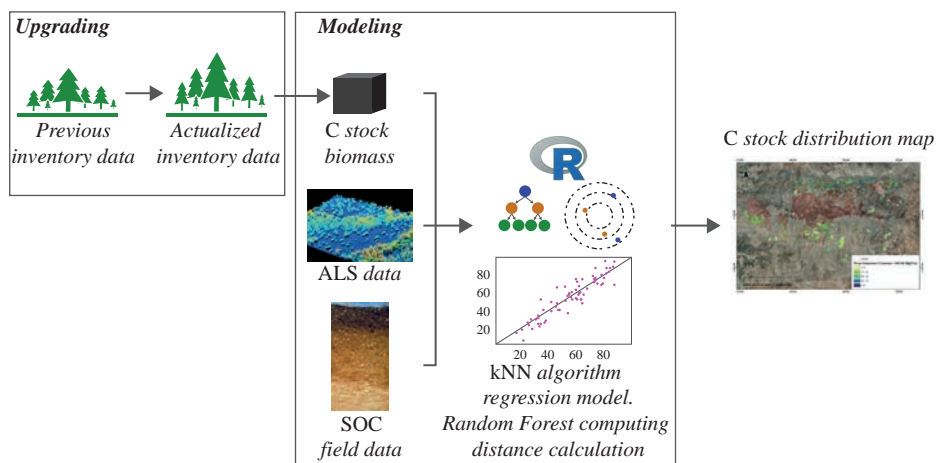


Figura 16.7. Esquema del proceso de modelización para la estimación de la capacidad de secuestro de carbono en la S^a de los Filabres a partir de datos de inventario y cartografía de carbono secuestrado para las masas de *Pinus halepensis* en la zona de estudio.

5.2. Simulaciones

Al igual que para la modelización, el uso de datos de inventarios forestales para la simulación de procesos de interés forestales es una estrategia muy valiosa para comprender y prever el comportamiento de los ecosistemas forestales en diferentes escenarios (ej., cambio climático). La simulación permite probar hipótesis, tomar decisiones informadas y planificar la gestión forestal de manera más efectiva en varios aspectos. El proceso de simulación debe considerar varios aspectos:

- Elegir el modelado que represente el comportamiento y la dinámica de un ecosistema forestal frente a diferentes factores de cambio en la estructura de los árboles, la distribución de especies, el crecimiento y la mortalidad de los árboles, y otros factores relevantes.
- Parametrizar el modelo de simulación utilizando los datos de inventario puede implicar calibrar las tasas de crecimiento, la mortalidad o la regeneración de acuerdo con las condiciones observadas en el inventario.
- Definir los escenarios de simulación que se desean explorar, como cambios en el clima, prácticas selvícolas, perturbaciones (incendios, plagas) o políticas de conservación.
- Utilizar el modelo de simulación para ejecutar cada escenario, determinando los datos relevantes, como cambios en las condiciones ambientales o intervenciones selvícolas, y observar cómo evoluciona el ecosistema a lo largo del tiempo.
- Analizar los resultados de las simulaciones para evaluar cómo responden los ecosistemas forestales a los diferentes escenarios. Se pueden examinar métricas clave, como la densidad de árboles, la composición de especies, la biomasa forestal y otros indicadores relevantes.
- Validar y ajustar los resultados de las simulaciones con datos reales de inventario y observaciones de campo. Si es necesario, se pueden ajustar los parámetros para mejorar la correspondencia entre las simulaciones y la realidad.
- Utilizar los resultados obtenidos de las simulaciones para tomar decisiones informadas sobre la gestión forestal. Por ejemplo, identificar prácticas selvícolas que maximicen la salud del bosque, mitiguen el riesgo de plagas o reduzcan la vulnerabilidad al cambio climático.
- Comunicar los resultados de las simulaciones a las partes interesadas, como gestores forestales, científicos y responsables de la toma de decisiones. Estos resultados pueden guiar la planificación estratégica y la implementación de medidas de conservación y gestión forestal.

La simulación basada en datos de inventarios forestales proporciona una herramienta poderosa para explorar posibles escenarios y mejorar la comprensión de la dinámica de los ecosistemas forestales en un entorno en cambio permanente. Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones del modelo y la necesidad de seguir incorporando nuevos datos y conocimientos científicos para refinar y mejorar continuamente las simulaciones. En la Figura 16.8 se

muestran los resultados de la simulación para optimizar la selvicultura en repoblaciones de pinar en la S^a de los Filabres (Almería) en función de diferentes escenarios de los precios de carbono en el mercado de compensación de emisiones (Acuña *et al.*, 2021).

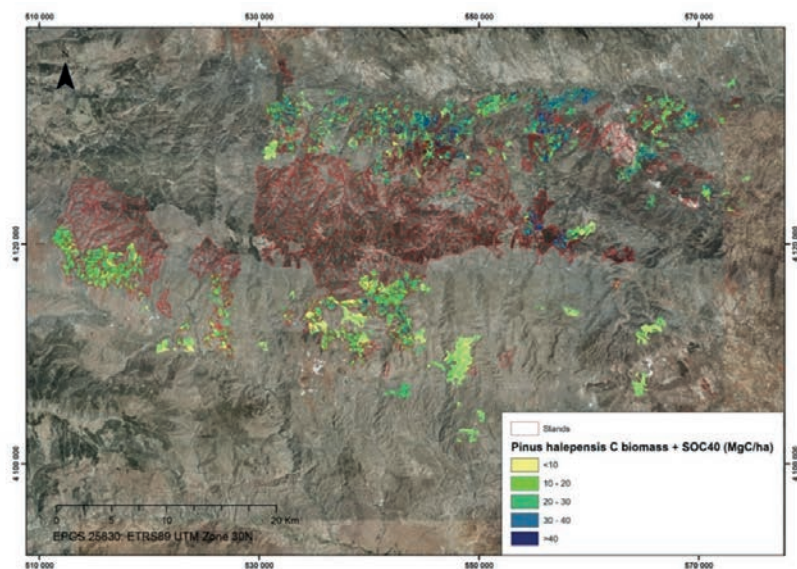


Figura 16.8. Planificación de claras en repoblaciones de pinar en la S^a de los Filabres a partir de la simulación de diferentes escenarios de precios de la tonelada de carbono (de 0 a 25 €) en el mercado de compensación de emisiones.

6. Retos científicos tecnológicos

El uso de datos de inventario forestal es una fuente muy valiosa de información; su integración en diferentes aplicaciones geoestadísticas permiten una comprensión más profunda de los ecosistemas forestales y apoyar la toma de decisiones selvícolas mejor informadas. Algunos de los retos científicos y tecnológicos derivados del uso de datos de inventarios forestales en este contexto incluyen:

- Desarrollar modelos de simulación avanzados que puedan prever cómo los ecosistemas forestales responderán a diferentes escenarios de cambio climático, manejo forestal y perturbaciones naturales o antropogénicas.
- Predecir el crecimiento y la producción/servicios ecosistémicos de los bosques que pueda orientar a los gestores forestales a planificar mejor la selvicultura a largo plazo, optimizar la ordenación forestal, promover la regeneración, así como en otras muchas decisiones clave.
- Evaluar con alta precisión los cambios en la distribución de especies o procesos dinámicos (ej., fragmentación y conectividad) integrando información procedente

de la teledetección y de las tecnologías geoespaciales (ej., imágenes de satélite y tecnologías LIDAR) en diferentes escenarios y condiciones.

- Facilitar la adaptación a riesgos y perturbaciones, como incendios forestales, plagas y enfermedades forestales.
- Identificar áreas degradadas o amenazadas y desarrollar estrategias de restauración y conservación. Es decir, ayudar a la priorización de las acciones de reforestación, restauración de hábitats y conservación de la biodiversidad.
- Proporcionar evidencias científicas para respaldar la formulación de políticas públicas relacionadas con la gestión forestal, la conservación de la biodiversidad y la mitigación-adaptación del cambio climático.
- Desarrollar herramientas para la toma de decisiones que ayuden a los gestores forestales y planificadores a tomar decisiones basadas en datos.
- Promover la investigación científica en áreas como la ecología forestal, la dinámica de los ecosistemas, la interacción planta-suelo, la captura de carbono y la resiliencia frente a perturbaciones.

Como conclusión, podemos afirmar que el uso de datos de inventario forestal impulsa la innovación en silvicultura y gestión forestal, permitiendo un enfoque más integral y basado en evidencia para abordar los desafíos ambientales y sociales asociados a los recursos forestales.

Bibliografía

- Acuña, M., Navarro-Cerrillo, R. M., Ruiz-Gómez, F., Lara-Gómez, M., Pérez-Romero, J., Varo-Martínez, M. Á., Palacios-Rodríguez, G. 2021. How does carbon pricing impact optimal thinning schedules and net present value in Mediterranean pine plantations? *Forest Ecol. Manag.*, 482, 118847.
- Adame, P., Alonso, L., Cañellas, I., Hernández, L., Pasalodos-Tato, M., Robla, E., Alberdi, I. 2022. Hacia un seguimiento más completo y armonizado de los daños en los bosques: Aplicación a la defoliación arbórea en España. *Ecosistemas*, 31(3), 2387-2387.
- Alberdi, I., Sandoval, V., Condes, S., Cañellas, I., Vallejo, R. 2016. El Inventario Forestal Nacional español, una herramienta para el conocimiento, la gestión y la conservación de los ecosistemas forestales arbolados. *Ecosistemas*, 25(3), 88-97).
- Blanco-Cano, L., Navarro-Cerrillo, R. M., González-Moreno, P. 2022. Biotic and abiotic effects determining the resilience of conifer mountain forests: The case study of the endangered Spanish fir. *Forest Ecol. Manag.*, 520, 120356.
- Bravo Oviedo, F., Herrero, C., Ruano, I., Bravo-Núñez, A., Lara, W., Riofrío, J.G. 2015. Análisis de datos selvícolas con R. Universidad de Valladolid
- Bravo Oviedo, F.; Ordóñez Alonso, C., Lara Henao, W. 2022 BasifoR: paquete de R para manejar los datos del Inventario Forestal Nacional. Congreso SECF, 2022.
- Frescino, T. S., Moisen, G. G., Patterson, P. L., Toney, C., White, G. W. 2023. 'FIESTA': a forest inventory estimation and analysis R package. *Ecography*, e06428.

- González-Molina, J. M. G., Nicolau, M. P., Grau, P. V. 2006. Manual de ordenación por rodales. Gestión multifuncional de los espacios forestales. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya.
- Navarrete-Poyatos, M. A., Navarro-Cerrillo, R. M., Lara-Gómez, M. A., Duque-Lazo, J., Varo, M. D. L. A., Palacios Rodríguez, G. 2019. Assessment of the carbon stock in pine plantations in Southern Spain through ALS data and K-nearest neighbor algorithm based models. *Geosciences*, 9(10), 442.
- Navarro-Cerrillo, R. M., Rumbaó, I. C., Vidaña, A. L., Pérez, J. L. Q., Duque-Lazo, J. 2016. Integración de datos de inventario y modelos de hábitat para predecir la regeneración de especies leñosas mediterráneas en repoblaciones forestales. *Revista Ecosistemas*, 25(3), 6-21.
- Olmo, M. C. 2005. La Geoestadística como herramienta de análisis espacial de datos de inventario forestal. *Cuad Soc Esp Cien For*, (19), 47-55.
- Pardé, J., Bouchon, J., 1994: *Dasometría*. Editorial Paraninfo, 387 pag. Madrid
- Pescador, D. S., Vayreda, J., Escudero, A., Lloret, F. 2022. El potencial del Inventario Forestal Nacional para evaluar el estado de conservación de los tipos de Hábitat forestales de Interés Comunitario: nuevos retos para cumplir con las políticas de conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 31(3), 2384-2384.
- Pita, P.A. 1973. El inventario en la ordenación de montes. INIA. Madrid.
- Prodan, M. (1997). *Mensura forestal* (No. 1). Agroamerica.
- Silva, C.A., Klauberg C., Carvalho, S., Rosa, M., Madi, J., Hamamura, C. 2023. rForest: Forest Inventory and Analysis, <https://rdr.io/rforge/rForest/>.
- Stanke, H., Finley, A. O., Weed, A. S., Walters, B. F., Domke, G. M. 2020. rFIA: An R package for estimation of forest attributes with the US Forest Inventory and Analysis database. *Environ. Model. Softw.* 127, 104664.
- Vayreda, J., Martínez-Vilalta, J., Vilà-Cabrera, A. 2016. El Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña: una herramienta para la ecología funcional. *Ecosistemas*, 25(3), 70-79.
- Zou, W., Jing, W., Chen, G., Lu, Y., Song, H. 2019. A survey of big data analytics for smart forestry. *IEEE Access*, 7, 46621-46636

**Acceso al
material complementario**



Ordenaciones



redSEDA