



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1626

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

Organiza





Reconstrucción de usos históricos del suelo mediante procesado automático de ortofotografías históricas

GELABERT, P. (1,2), FONTOVA-MUSTÉ, A. (1), L. COLL (1,2), AMEZTEGUI, A. (1,2)

(1) Departamento de Ciencia e Ingeniería Forestal i Agrícola, Universitat de Lleida.
(2) Joint Research Unit CTFC-Agrotecnio.

Resumen

Las actividades humanas han moldeado los paisajes mediterráneos durante siglos, dejando un legado que condiciona su configuración actual. La disponibilidad de cartografía histórica precisa es esencial para caracterizar los cambios en los usos del suelo y analizar los legados de los usos agrosilvopastorales en las masas forestales actuales. En esta comunicación se presenta un proceso metodológico para reconstruir de manera automatizada la expansión de la superficie forestal a partir de las ortofotos históricas del vuelo americano de 1956. El proceso incluye el realce radiométrico de las imágenes para mejorar el contraste entre valores claros y oscuros, seguido de una segmentación espectral utilizando el algoritmo *Mean Shift* y una clasificación supervisada con el algoritmo *Random Forest*. Esta propuesta metodológica ha sido aplicada en la provincia de Barcelona, donde se estima que el 34% de las formaciones forestales actuales se han originado en los últimos 60 años, evidenciando patrones espaciales marcados que reflejan dinámicas territoriales diferenciadas.

Palabras clave

Expansión forestal, usos del suelo, clasificación imágenes históricas, Machine Learning.

1. **Introducción** Los bosques mediterráneos actuales son el resultado de milenios de influencia humana, marcada por actividades agrícolas y ganaderas que controlaron su extensión, y una gestión forestal de intensidad variable para la obtención de madera (NOCENTINI Y COLL 2013). La prolongación de estas prácticas en el tiempo condujo a una simplificación en su estructura y composición y a una superficie forestal bajo mínimos a inicios del siglo pasado (VALBUENA-CARABAÑA ET AL., 2010). A partir de la segunda mitad de ese mismo siglo, la tendencia de pérdida de superficie forestal comenzó a revertirse de manera significativa gracias a ambiciosos programas de repoblación forestal y a procesos de expansión natural del bosque asociados al abandono de las actividades económicas tradicionales, el éxodo rural y el progresivo envejecimiento de la población residente en zonas rurales (GELABERT ET AL., 2021). Como resultado de estos procesos de expansión forestal, los bosques mediterráneos actuales pueden categorizarse, según su temporalidad, en bosques recientes y bosques antiguos. Los primeros tienden a formar masas continuas y densas, con bajos niveles de diversidad tanto estructural como específica (ALFARO-SÁNCHEZ ET AL., 2019; VILÀ-CABRERA ET AL., 2017). Esta configuración podría limitar su capacidad de respuesta frente a futuras perturbaciones y su adaptación al calentamiento global (VILÀ-



CABRERA ET AL., 2023). Entre los productos cartográficos del uso y cobertura del suelo, el producto más ampliamente utilizado es el Corine Land Cover (CLC), que permite analizar retrospectivamente los cambios acaecidos en los usos y coberturas del suelo desde 1990. Sin embargo, presenta algunas limitaciones técnicas y diferencias en la precisión entre ediciones, derivadas de los avances metodológicos y tecnológicos de cada época (MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ ET AL., 2019). Durante los años noventa, la fotointerpretación se realizaba directamente sobre soportes físicos, mientras que en la actualidad se emplean imágenes satelitales provenientes de la misión espacial europea Sentinel-2 y algoritmos de aprendizaje automático. A nivel estatal, la cartografía del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE) es especialmente útil, ya que permite retroceder hasta 2005 y ofrece una alta precisión en la definición de las categorías de uso, así como en la proporción de estas dentro de cada polígono cartografiado, con una elevada resolución espacial en las ediciones más recientes del producto (VALCARCEL ET AL., 2008). Los productos anteriormente mencionados, debido a su cobertura temporal relativamente corta, no proporcionan datos operativos que posibiliten el análisis de los efectos del legado de los usos y coberturas del suelo en las masas forestales actuales. Sin embargo, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico publicó el año pasado la cartografía sobre el uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y selvicultura (LULUCF, por sus siglas en inglés), que integra y combina información cartográfica publicada desde los años 70 hasta la actualidad, generando así una cartografía temática decadal sobre el uso y cobertura del suelo. Aunque esta cartografía permite realizar análisis a lo largo de un horizonte temporal de unos 50 años, puede resultar insuficiente y ofrecer una visión incompleta de los cambios en los usos y coberturas del suelo, ya que estos sucedieron con mayor intensidad en las décadas de los 50 y 60 (VADELL ET AL., 2022). Por ello, la incorporación de información proveniente de las imágenes ortorectificadas del vuelo estadounidense de 1956 sería de gran interés, aunque, al tratarse de imágenes analógicas en escala de grises se ve considerablemente limitada la posibilidad de generar cartografía de forma automática a partir de ellas. Existen experiencias de generación de cartografía de usos del suelo con estas imágenes en la provincia de Barcelona (<https://dadesobertes.diba.cat/datasets/mapa-de-cobertes-del-sol-de-lany-1956>) y en Andalucía (<https://portalrediam.cica.es/geonetwork/srv/api/records/5cc04841-5eaf-4e9f-b425-d774d51c8170>), donde han sido digitalizadas mediante fotointerpretación. Este método es costoso en términos de tiempo y está sujeto a sesgos de interpretación del operador. Actualmente, los equipos informáticos cuentan con una mayor capacidad para gestionar y analizar grandes volúmenes de datos, lo que, junto con nuevos métodos de tratamiento y segmentación de imágenes, así como algoritmos de aprendizaje automático, abre nuevas posibilidades para la generación automatizada de cartografía histórica. Esta cartografía constituye una valiosa base de información para diversos análisis sobre los efectos del legado de los usos y coberturas del suelo en las masas forestales.

2. Objetivos

Este trabajo propone una aproximación metodológica para generar una



cartografía binaria de vegetación leñosa de porte arbustivo o arbóreo frente a otras coberturas sobre las ortofotografías del vuelo americano de 1956, y que sirva como base de referencia para futuros estudios destinados a analizar los efectos del legado de los usos y coberturas del suelo. Como objetivo secundario, se propone utilizar la clasificación realizada para analizar la transición desde otros usos y coberturas del suelo a vegetación leñosa durante el periodo 1956-2018 en la provincia de Barcelona y cuantificar la extensión de las formaciones forestales recientes.

3. Metodología

El área de estudio se centra en la provincia de Barcelona, dada su elevada proporción de superficie forestal (64% - (IDESCAT, 2022)) y su alta diversidad de ambientes. Para simplificar la metodología y evitar posibles ruidos de otras categorías, el área de estudio se restringió a todas las coberturas forestales registradas en el *Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya MCSC2018* (ICGC, 2018).

Este trabajo consta de varias etapas metodológicas que combinan técnicas tradicionales de fotointerpretación con métodos avanzados de procesamiento de imágenes y aprendizaje automático (Ver Figura 1). En primer lugar, se descargaron las imágenes aéreas del vuelo americano de 1956 a través del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), las cuales se distribuyen en escala de grises, con resolución radiométrica de 8 bits y resolución espacial de 0,5 metros. Sobre las imágenes originales, se generó una muestra de entrenamiento y validación utilizando una geometría de tipo punto con 2017 registros, identificando mediante fotointerpretación dos categorías binarias: 0, ausencia de vegetación leñosa, y 1, presencia de vegetación leñosa, con la distribución muestral que se detalla a continuación (Tabla 1):

Tabla 1: Distribución muestral de las muestras entrenamiento y validación por categorías

Tipología de formaciones forestales	Entrenamiento	Validación
0-Ausencia de V. Leñosa	584	180
1-Presencia de V. Leñosa	1001	252

Para mejorar el contraste de las imágenes y facilitar el posterior procesamiento, se aplicó un realce radiométrico (*stretch*), que extiende los valores de píxeles al rango completo de 0 a 256, maximizando el contraste entre áreas claras y oscuras. Posteriormente, se utilizó el filtro *mean shift* en el entorno de ArcGIS Pro (ESRI, 2024), un algoritmo de segmentación que agrupa píxeles adyacentes con valores espectrales similares, produciendo así segmentos homogéneos. Este proceso se parametrizó de la siguiente manera: *detalle espectral = 15,5 píxeles (px)*, *detalle espacial = 15 px*, y *un mínimo de 5 px por segmento*, garantizándose uniformidad y las áreas mínimas segmentadas.



A partir de las imágenes segmentadas, se entrenó un modelo probabilístico de *Random Forest (RF)* utilizando la muestra de entrenamiento previamente generada. Como parte del proceso requerido en este tipo de modelado, se aseguró un ajuste óptimo de los hiperparámetros del modelo (*mtry*, *min.node.size* y *ntree*) mediante validación cruzada repetida (*repeated CV*). Esta estrategia de modelado permitió asignar a cada píxel una probabilidad de pertenencia a la clase 1 (vegetación leñosa). El análisis del rendimiento del modelo se llevó a cabo utilizando la muestra de prueba, midiendo la capacidad discriminativa del modelo para separar sendas categorías mediante el Área Bajo la Curva (AUC) de la curva Característica Operativa del Receptor (ROC), en este caso considerándose las presencias y ausencias como valores numéricos (1 y 0).

Para convertir los resultados probabilísticos en categorías binarias, se determinó un umbral óptimo, definido como el umbral en el que se minimizan conjuntamente la especificidad y la sensibilidad, asegurando una separación adecuada entre las clases. Posteriormente, se evaluó la precisión de la cartografía categórica generada utilizando las métricas *F1-score* y el *coeficiente de correlación de Matthews (MCC)*. Finalmente, este producto se superpuso con la cartografía actual de formaciones forestales recogidas en *MCSC-2018* (ICGC, 2018) para analizar las transiciones entre categorías. De esta comparación, se genera una cartografía que representa las formaciones forestales preexistentes en 1956 y las formadas entre 1956 y 2018.

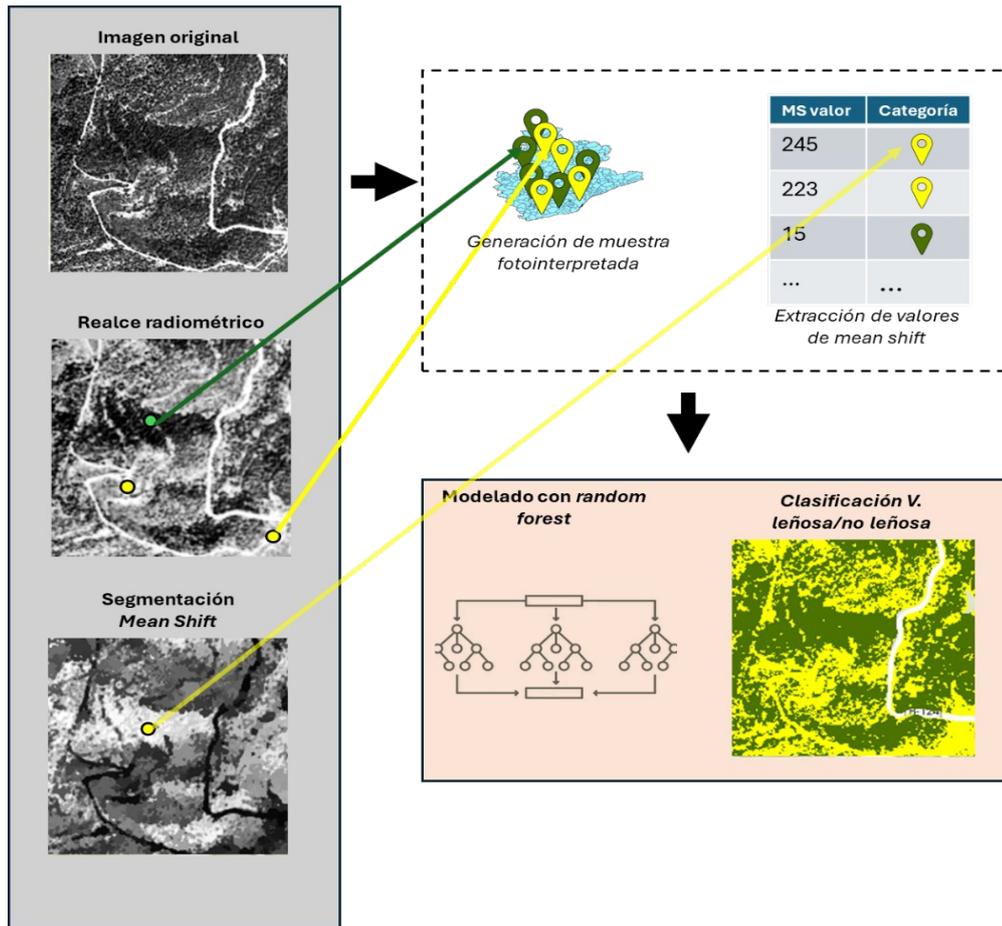


Figura 1: Resumen metodológico

4. Resultados

El modelo de clasificación desarrollado para identificar masas forestales antiguas (1956) y recientes (1956–2018) a partir de las ortofotos históricas del vuelo americano demostró un alto rendimiento, y una elevada precisión. Los resultados obtenidos presentan un AUC de 0.95, un F1-score de 0.92 y un MCC de 0.85, lo que evidencia una excelente capacidad del modelo para discriminar entre las categorías de vegetación leñosa y no leñosa y habilitando estos resultados para realizar el análisis de evolución temporal (Figura 2).

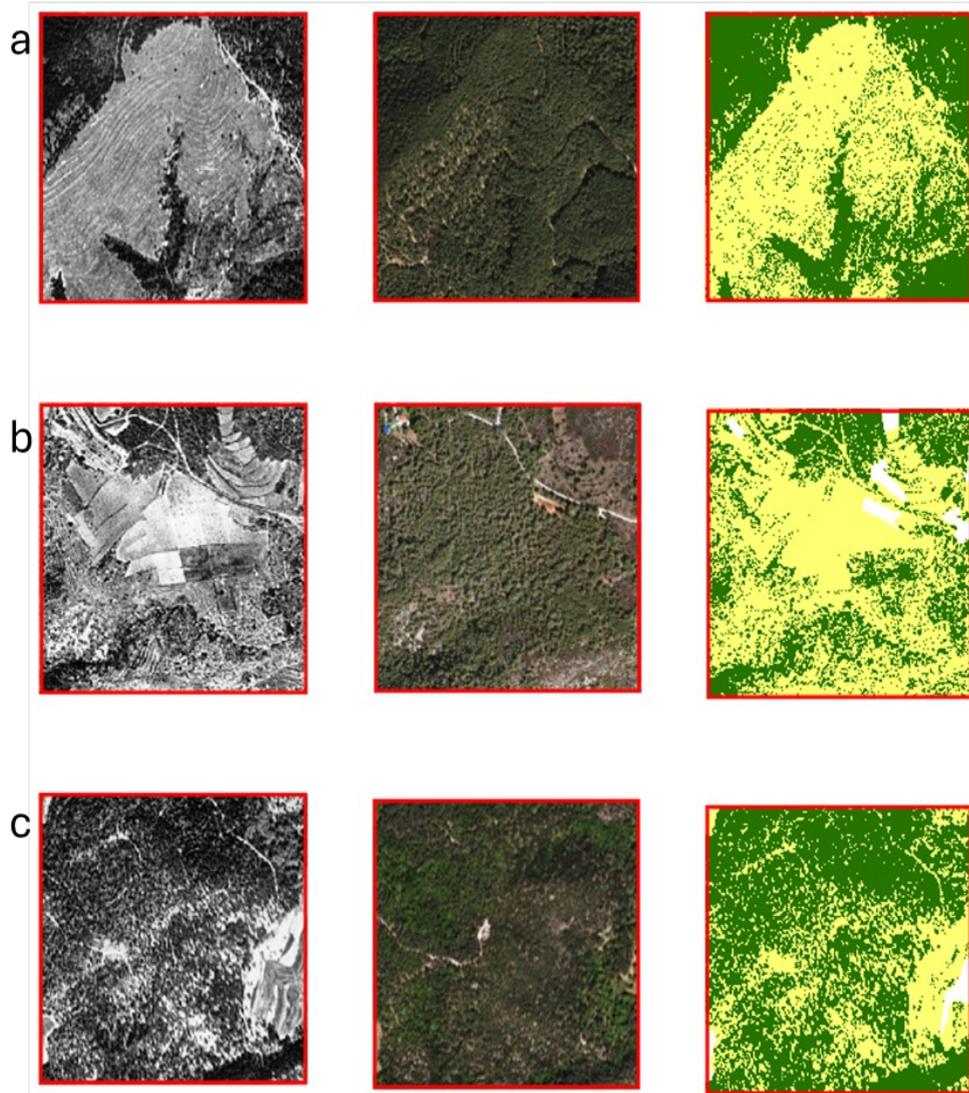


Figura 2: Ejemplos de clasificación de formaciones forestales recientes (amarillo) y formaciones forestales antiguas (verde) bajo diferentes casuísticas. a) Repoblación; b) Expansión forestal sobre cultivos, c) Densificación. Cada recuadro representa 25ha a una escala 1:10.000.

La clasificación y el posterior análisis de transiciones, estima que el 66% del total de la superficie forestal de la provincia de Barcelona (315.009,8 ha) corresponde a formaciones forestales antiguas, mientras que las formaciones forestales recientes abarcan 159.136,6 ha, equivalentes al 34% restante. Este patrón de distribución refleja una dinámica de expansión forestal significativa durante las últimas décadas, vinculada a procesos socioeconómicos y ecológicos que han configurado los paisajes forestales actuales.

A pesar de que la expansión forestal se da en todo el territorio, se identificaron tres zonas destacadas de expansión del bosque, localizados en regiones con dinámicas de abandono rural marcadamente diferentes. El primero se sitúa en la zona sur de la provincia de Barcelona, particularmente en el Baix Llobregat y el Garraf. La segunda zona se localiza en el Berguedà, en el Prepirineo catalán. La

tercera zona con altas tasas de expansión forestal se ubica principalmente en las zonas de mayor complejidad topográfica colindantes a la llanura de Vic (Figura 3).

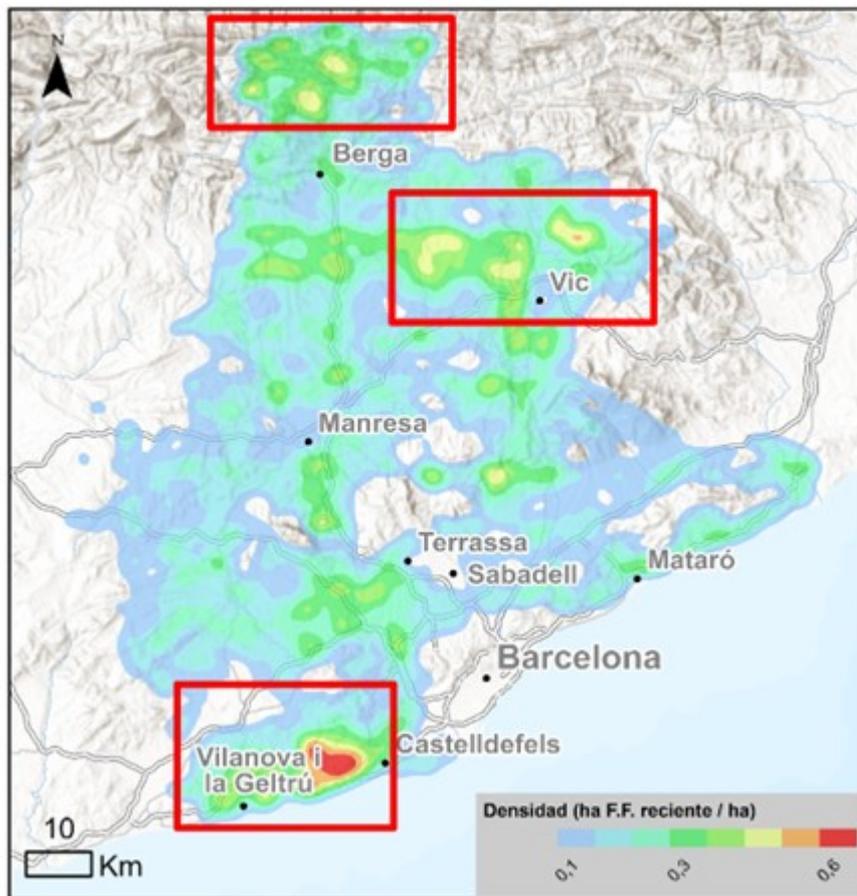


Figura 3: Densidad de hectáreas de formaciones forestales recientes. Créditos mapa base: IGN, TomTom, Esri, Garmin, FAO, NOAA y USGS

5. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio reflejan un desempeño notable del modelo de clasificación, evidenciado por las altas métricas de precisión alcanzadas (AUC de 0.95, F1-score de 0.92 y MCC de 0.85). Estos indicadores demuestran que el enfoque metodológico permite discriminar con una notable precisión las formaciones forestales antiguas (1956) de formaciones forestales recientes (1956–2018), lo que respalda su aplicabilidad como herramienta en estudios de cambios de uso y cobertura del suelo y análisis del legado histórico en los paisajes forestales actuales.

El uso de las ortofotos históricas del vuelo americano de 1956 se destaca como una fuente de datos clave para reconstruir dinámicas pasadas del paisaje (VEGA-POZUELO ET AL., 2017, AMEZTEGUI ET AL., 2010). A pesar de las limitaciones



técnicas inherentes a este tipo de imágenes, como su escala de grises, baja profundidad radiométrica (8 bits) y el carácter analógico de los datos originales, el uso de técnicas de análisis avanzadas permitió generar una cartografía histórica fiable de forma semiautomática. Este ejercicio metodológico demuestra el gran potencial de estos datos cuando se procesan con técnicas de mejora radiométrica y se combinan con algoritmos de segmentación y clasificación robustos.

En este contexto, el enfoque de segmentación mediante el filtro *Mean Shift* resultó especialmente informativo. La capacidad de este método para generar segmentos con alto grado de coherencia espectral y espacial permitió simplificar la complejidad de las imágenes y resultó esencial para el modelo y su capacidad de discriminativa entre categorías. Por último, aunque el algoritmo RF mostró ser efectivo, su desempeño podría verse comprometido por diferencias significativas en las condiciones de iluminación de las imágenes, donde el realce radiométrico podría no ser suficiente para corregirlas adecuadamente. Además, podrían darse errores en la segmentación generados por la diferencia en la distribución o los patrones espaciales de los cultivos y masas forestales si el algoritmo se aplicara en otras áreas.

A pesar de los buenos resultados obtenidos, el método presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, las características técnicas de las ortofotos de 1956, como la baja resolución radiométrica, limitan la cantidad de información disponible para diferenciar las diferentes coberturas, por lo que solo permite clasificar categorías simplificadas. En segundo lugar, el modelo de clasificación se basa en la interpretación de un conjunto de entrenamiento generado manualmente, lo que introduce posibles sesgos subjetivos y limita la replicabilidad de la metodología si no se dispone de criterios estandarizados.

Desde una perspectiva territorial, los resultados permiten explorar en detalle la transformación de los usos y coberturas del suelo en la provincia de Barcelona, donde se observaron dinámicas de expansión forestal en todo el territorio. El principal resultado de esta investigación es la predicción de la cobertura forestal de 1956 que permite estimar que el 34% de los bosques de la provincia de Barcelona son de reciente formación. Este dato se alinea con otros estudios hechos a nivel de Andalucía y Provincia de Barcelona donde se calcula que el 23% de las formaciones forestales en estos territorios son recientes (VILÀ-CABRERA ET AL., 2023). Las diferencias observadas se deben al tamaño muestral, ya que estos estudios solo utilizan parcelas del Inventario Forestal Nacional, y a la unidad mínima cartografiable, dado que la metodología aplicada contabiliza también espacios donde se ha producido densificación forestal.

Por otro lado, estudios más centrados en la zona pirenaica reflejan incremento cerca del 25% de la superficie de bosques densos en Parques Nacionales de montaña durante el mismo periodo de estudio (AMEZTEGUI ET AL., 2021), o valores altamente superiores de expansión forestal como 66% durante el periodo 1984-2019 (GELABERT ET AL., 2021). En los Pirineos Orientales catalanes, se determinó que el 36% de las tierras cultivadas fueron abandonadas entre 1993 y 2005 (BADIA ET AL., 2014). Sin embargo, las tasas de expansión forestal en esta



región mostraron una notable variabilidad, oscilando entre el 96% registrado en la Alta Garrotxa (VILA SUBIRÓS ET AL., 2009) y el 25% en la cuenca de Cal Rodó, en la cabecera del río Llobregat (POYATOS ET AL., 2003).

En la provincia de Barcelona se observan casuísticas diferenciadas de abandono rural que han propiciado la expansión forestal, asociadas a las diferentes realidades socioeconómicas que se dan en su territorio. En la zona del Prepirineo donde dominaban los cultivos de montaña, los cuales presentan una menor capacidad de producción y mecanización, se generó el éxodo rural masivo hacia las grandes y medianas ciudades y la costa (VILA SUBIRÓS ET AL., 2009) o llanuras con alta intensificación agrícola (PINILLA, 2006). Por otro lado, zonas como las del Baix Llobregat o el Garraf su cercanía a la ciudad de Barcelona fue primordial para la planificación de zonas de industriales, de comunicaciones y residenciales que facilitaron el traspaso de la población activa hacia otros sectores económicos (RIBA ROMEVA, 2003).

6. Conclusiones

Los resultados de este estudio destacan que el 33% de las formaciones forestales en la provincia de Barcelona son de reciente formación, evidenciando una notable expansión forestal durante el periodo 1956–2018. El uso de ortofotos históricas del vuelo americano de 1956, junto con técnicas avanzadas como el realce radiométrico, la segmentación por Mean Shift y el algoritmo *RF*, permitió diferenciar espacios con presencia y ausencia de vegetación leñosa con gran precisión (AUC 0.95, F1 0.92 y MCC 0.85), superando en parte las limitaciones de resolución espectral y radiométrica propias de estas imágenes. Este desarrollo metodológico no solo aporta una herramienta robusta para analizar la transformación del paisaje y los cambios en los usos y coberturas del suelo en contextos mediterráneos como el de Barcelona, sino que también ofrece una información de partida para futuros análisis sobre los efectos del legado de los usos y coberturas del suelo en las masas forestales. Sin embargo, debe utilizarse con cautela al extrapolarlo a otros territorios, ya que podrían darse diferencias significativas en la iluminación o en los patrones de distribución de las coberturas del suelo, lo que requeriría ajustes en los parámetros de segmentación.

7. Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de los proyectos Llegats (CNS2023-145351) y Vulnifor (PID2022-142108OB-I00). Los cuatro autores forman parte del Grupo de Investigación ADAPTAFOR, reconocido como Grupo de Investigación Consolidado por la Generalitat de Catalunya (2021 SGR 01530)

8. Bibliografía

ALFARO-SÁNCHEZ, R.; JUMP, A.S.; PINO, J.; DÍEZ-NOGALES, O.; ESPELTA, J.M.; 2019. Land use legacies drive higher growth, lower wood density and enhanced climatic sensitivity in recently established forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 276,



107630.

AMEZTEGUI, A.; BROTONS, L.; COLL, L.; 2010. Land-use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography* 19, 632–641.

AMEZTEGUI, A.; MORÁN-ORDÓÑEZ, A.; MÁRQUEZ, A.; BLÁZQUEZ-CASADO, Á.; PLA, M.; VILLERO, D.; GARCÍA, M.B.; ERREA, M.P.; COLL, L.; 2021. Forest expansion in mountain protected areas: Trends and consequences for the landscape. *Landscape and Urban Planning* 216, 104240. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104240>

BADIA, A.; PÈLACHS, A.; VERA, A.; TULLA, A.F.; SORIANO, J.M.; 2014. Cambios en los usos y cubiertas del suelo y los efectos en la vulnerabilidad en las comarcas de montaña de Cataluña. Del rol del fuego como herramienta de gestión a los incendios como amenaza. *Pirineos* 169, e001.

ESRI; 2024. Segment Mean Shift.

GELABERT, P.; RODRIGUES, M.; DE LA RIVA, J.; AMEZTEGUI, A.; SEBASTIÀ, M.T.; VEGA-GARCIA, C.; 2021. LandTrendr smoothed spectral profiles enhance woody encroachment monitoring. *Remote Sensing of Environment* 262, 112521.

ICGC; 2018. Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (MCSC) v1.0 - 2018.

IDESCAT; 2022. Usos del sòl. Comarques i Aran, àmbits i províncies.

MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; RUIZ-BENITO, P.; BONET, A.; GÓMEZ, C.; 2019. Methodological variations in the production of CORINE land cover and consequences for long-term land cover change studies. The case of Spain. *International Journal of Remote Sensing* 40, 8914–8932.

NOCENTINI, S.; COLL, L.; 2013. Mediterranean forests: human use and complex adaptive systems En: MESSIER, C.; PUETTMANN, K.J.; COATES K.D.; (Eds.) *Managing Forests as complex adaptive systems. Building resilience to the challenge of global change*. The Earthscan Forest Library (series). Routledge. NY, USA, pp: 214-243

PINILLA, V. 2006. The development of irrigated agriculture in twentieth-century Spain: a case study of the Ebro basin. *Agricultural History Review* 54 (1), 122-141

POYATOS, R.; LATRON, J.; LLORENS, P.; 2003. Land use and land cover change after agricultural abandonment: The case of a Mediterranean Mountain area (Catalan



Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development* 23, 362–369.

RIBA ROMEVA, C.; 2003. Transformació del Baix Llobregat (notes per a dues reflexions). *Materials del Baix Llobregat* 103–106.

VADELL, E.; PEMÁN, J.; VERKERK, P.J.; ERDOZAIN, M.; DE-MIGUEL, S.; 2022. Forest management practices in Spain: Understanding past trends to better face future challenges. *Forest Ecology and Management* 524, 120526.

VALBUENA-CARABAÑA, M.; DE HEREDIA, U.L.; FUENTES-UTRILLA, P.; GONZÁLEZ-DONCEL, I.; GIL, L.; 2010. Historical and recent changes in the Spanish forests: A socio-economic process. *Review of Palaeobotany and Palynology* 162, 492–506.

VALCARCEL, N.; VILLA, G.; AROZARENA, A.; GARCÍA-ASENSIO, L.; CABALLERO, M.; PORCUNA, A.; PECES, J.J.; 2008. SIOSE, a successful test bench towards harmonization and integration of land cover/use information as environmental reference data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 1159–1164.

VEGA-POZUELO, R.; TORRES MÁRQUEZ, M.; NARANJO-RAMÍREZ, J.; 2017. Recursos cartográficos y geohistóricos para el inventario de humedales temporales y desecados mediterráneos. *GeoFocus* 19, 151–179.

VILA SUBIRÓS, J.; RIBAS PALOM, A.; VARGA LINDE, D.; LLAUSÀS PASCUAL, A.; 2009. Medio siglo de cambios paisajísticos en la montaña mediterránea. Percepción y valoración social del paisaje en la alta Garrotxa (Girona). *Pirineos* 164, 69–92.

VILÀ-CABRERA, A.; ASTIGARRAGA, J.; JUMP, A.S.; ZAVALA, M.A.; SEIJO, F.; SPERLICH, D.; RUIZ-BENITO, P.; 2023. Anthropogenic land-use legacies underpin climate change-related risks to forest ecosystems. *Trends in Plant Science* 28, 1132–1143.

VILÀ-CABRERA, A.; ESPELTA, J.M.; VAYREDA, J.; PINO, J.; 2017. “New Forests” from the Twentieth Century are a Relevant Contribution for C Storage in the Iberian Peninsula. *Ecosystems* 20, 130–143.