Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 50(1): 21-34 (2024)
Doi: https://doi.org/10.31167/csef.v5i50.20152
Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales
Acceso abierto disponible en http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/index

Accésit SECF 2022 en el apartado de Tesis Doctoral

Desarrollo de nuevos métodos para la caracterización y gestión del patrimonio forestal mediante teledetección

Developing of new methods to forest heritage characterization and management through remote sensing

Alonso L.[1, 2*]; Picos J.[1]; Armesto J.[1,2]

[1] *Escola de Enxeñaría Forestal, Universidade de Vigo, 36005 Pontevedra, España*

[2] *Grupo Xestión Segura e Sostible de Recursos Minerais (XESSMin), CINTECX, FUniversidade de Vigo, 36310 Vigo, España*

laura.alonso.martinez@uvigo.es, jpicos@uvigo.es, julia@uvigo.es

[*] Autor de correspondencia: laura.alonso.martinez@uvigo.es

Resumen

En la presente tesis doctoral se aborda la utilización de diferentes combinaciones de sensores de teledetección para monitorizar y gestionar los bosques en sistemas forestales dominados por minifundismo y continuamente sujetos a perturbaciones (cortas e incendios). En particular: imágenes Sentinel-2, imágenes WorldView-3, ALS (LiDAR aerotransportado), UAV-LiDAR, TLS (LiDAR terrestre) y PLS (LiDAR portable). En primer lugar, se desarrolla una metodología para generar un mapa de recursos forestales a escala de paisaje eficiente en monitorizar este tipo de sistemas forestales. Así mismo, se identifican procedimientos para incorporar a este mapa las perturbaciones y la identificación de su naturaleza (cortas o incendios forestales). Además, se desarrollan métodos para conocer automáticamente a escala paisaje y de rodal la distribución de diferentes especies características de estos sistemas forestales y caracterizar árboles individuales (especies de los géneros *Pinus* y *Eucalyptus* y dos tipologías de bosques de *Castanea sativa*). Finalmente se demuestra los mapas de usos del suelo se utilizan como herramienta base (entre otras) para: comprender el desarrollo de grandes incendios forestales, identificar áreas relevantes para implementar medidas preventivas y desarrollar mapas de modelos de combustible en paisajes atlánticos. El desarrollo de estas metodologías permitirá mejorar la gestión forestal en regiones dominadas por estos tipos de sistemas forestales (i.e. Galicia).

Palabras claves: *teledetección, Sentinel-2, LiDAR, minifundismo, incendios, gestión forestal.*

Abstract

This PhD thesis addresses the use of different combinations of remote sensing sensors to monitor and manage forests in smallholder-dominated forest systems continuously subject to disturbances (logging and fire). In particular: Sentinel-2 imagery, WorldView-3 imagery, ALS (airborne LiDAR), UAV-LiDAR, TLS (terrestrial LiDAR) and PLS (portable LiDAR). First, a methodology to generate a landscape-scale forest resource map efficient in monitoring this type of forest systems is developed. Likewise, procedures to incorporate to this map disturbances and the identification of their nature (logging or forest fires) are identified. In addition, methods to automatically identify at landscape and stand scale the distribution of different species characteristic of these forest systems and to characterize their individual trees (*Pinus* and *Eucalyptus* species and two typologies of *Castanea sativa* forests) are developed. Finally, land use maps are used as a basic tool (among others) to: understand the development of large forest fires, identify relevant areas to implement preventive measures and develop fuel model maps in Atlantic landscapes. The development of these methodologies will allow improving forest management in regions dominated by these type of forest systems (i.e. Galicia).

Keywords: *remote sensing, Sentinel-2, LiDAR, small-holding, wildfire, forest management.*

1. Introducción

La información sobre los recursos forestales es esencial para la gestión forestal sostenible (FAO, 2020). Los avances de las tecnologías de teledetección, los sistemas de información geográfica (SIG) y los algoritmos de aprendizaje automático, están demostrando ser esenciales para satisfacer las demandas actuales de información forestal (Kangas *et al.*, 2018; White *et al.*, 2016; Wulder *et al.*, 2018). La investigación sobre el uso de estas tecnologías avanza cada día, proporcionando información cada vez más completa y precisa de los recursos forestales. Sin embargo todavía existen retos y oportunidades por resolver.

En primer lugar, es necesario profundizar en el desarrollo de metodologías adecuadas para la monitorización de los sistemas forestales dominados por minifundismo, donde las coberturas forestales están altamente fragmentadas. En este tipo de sistemas, la escala a la que se reporta la información es crítica y por ello no suelen ser apropiadas los productos o metodologías desarrollados fuera de este contexto. Además, hay regiones donde el sector forestal es muy activo, como zonas con abundancia de especies de crecimiento rápido. En estas áreas, es crucial que las metodologías aseguren la posibilidad de realizar un monitoreo continuo de los bosques y sus cambios para asegurar la trazabilidad de los productos forestales.

Además, los productos globales a menudo no tienen altos niveles de desagregación de leyendas y muchas veces pueden no ser válidos para rastrear la evolución de todas las especies forestales de interés de una determinada región (Fassnacht *et al.*, 2016). Las metodologías desarrolladas para evaluar una determinada especie pueden no ser válidas para otras especies (Fassnacht *et al.*, 2016). De ahí que también sea importante la investigación científica para cubrir las necesidades de una región en relación con las especies o tipologías de bosques presentes en la misma, tanto a escala paisaje como a escala rodal.

Finalmente, es necesario profundizar en el monitoreo de las perturbaciones naturales y sus impactos en los diferentes sistemas forestales, así como diseñar estrategias específicas para aumentar la resiliencia del sistema después de las perturbaciones (Johnstone *et al.*, 2016; Lindner *et al.*, 2010).

Galicia es una región que concentra las casuísticas mencionadas anteriormente. Alrededor del 40% de la superficie forestal está en parcelas menores de 0.5 ha (DGC, 2023) y en ella se corta anualmente más del 50% del volumen de madera de España (MITECO, 2021). Así mismo es una región dominada por incendios forestales (MITECO, 2022). Las principales especies presentes en la región son Eucalyptus globulus, Eucalyptus nitens, Pinus pinaster, Pinus radiata, Pinus sylvestris y bosques de frondosas (MMAMM, 2011). Cabe destacar que para monitorear esta región el último mapa forestal oficial disponible (MFE25) fue publicado en 2011 y tiene una unidad mínima de tesela de 1 hectárea (MITECO, 2011).

La tesis aborda los siguientes objetivos específicos en Galicia:

1. Generar una metodología para mapear los recursos forestales a escala de paisaje.

2. Generar una metodología para la detección automatizada de perturbaciones forestales (cortas e incendios).

3. Generar metodologías para identificar automáticamente determinadas especies arbóreas claves para el sector forestal y caracterizar sus rodales.

4. Proporcionar herramientas para la evaluación y prevención de los incendios forestales con base en las metodologías desarrolladas en los objetivos previos.

2. Material y métodos

La *Tabla 1* resume las principales fuentes de datos y métodos utilizados para alcanzar cada uno de los objetivos específicos desarrollados en la tesis. Así mismo detalla las publicaciones científicas en la que se puede encontrar el desarrollo completo de las investigaciones.

3. Resultados

3.1. Objetivo I

La metodología desarrollada permite obtener un mapa raster de coberturas del suelo eficiente en el mapeo de áreas dominadas por minifundismo. Así mismo permite obtener una desagregación de leyenda adaptada a necesidades específicas del sector forestal gallego, desagrega el arbolado entre eucaliptos, coníferas y otras frondosas. La precisión general del mapa es de 91.6%. Una vista general del mapa se presenta en la *Figura 1*. En esta figura también se muestra un ejemplo de comparación entre este mapa y el MFE25. Se observa que el mapa Sentinel-2 permite

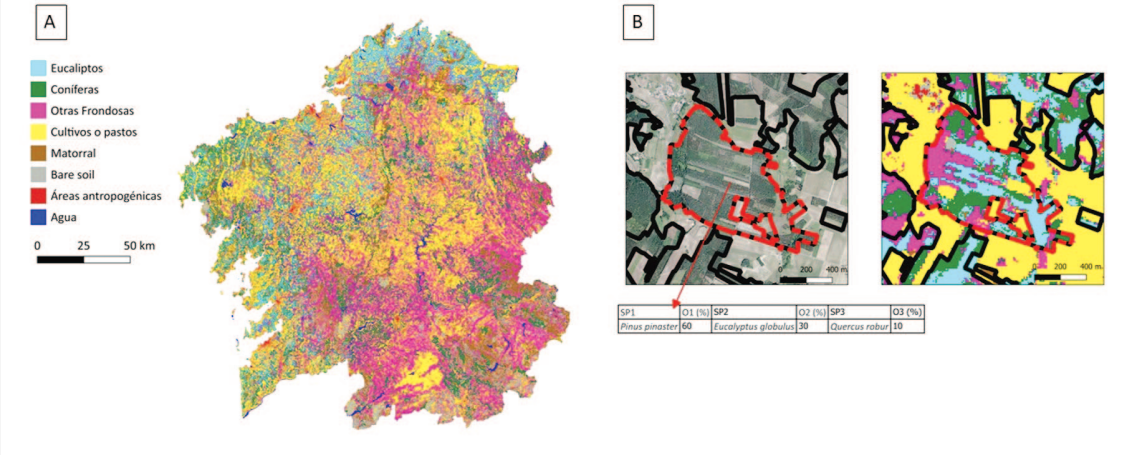


Figura 1. A: mapa raster de coberturas Sentinel-2. B: detalle de comparación con el MFE25.

Tabla 1. Resumen de fuentes de datos y métodos utilizados para cada uno de los objetivos de la tesis. Ob: Objetivo; Ayto: Ayuntamiento; ITD: Detección de árbol individual; UAV: Vehículo aéreo no tripulado: ALS: LiDAR aéreo, PLS: LiDAR portable, TLS: LiDAR terrestre, MDT: Modelo Digital del Terreno, BTG: Base Topográfica de Galicia, RF: Random Forest, CHM: Modelo de altura de copas.

Ob	**Desarrollo**	**Datos fuente**	**Metodología**	**Área de estudio**	**Publicaciones asociadas**
I	Mapeado de coberturas forestales	Sentinel- (series temporales)	Clasificación RF, criterios de decisión	Galicia	Alonso *et al.* (2021a) Alonso *et al.* (2023a)
	Mapeado coberturas forestales, estructura vectorial	Mapa raster de coberturas forestales, SIGPAC	Árboles de decisión	Galicia	Alonso *et al.* (2022a)
II	Monitorización de coberturas forestales	Mapas raster de coberturas forestales (2019, 2020)	Análisis pixel-pixel	Galicia	Alonso *et al.* (2023b)
	Mapeado de cambios de coberturas	Sentinel-2 (series temporales)	NDVI vs NBR, árboles de decisión	Galicia	Alonso *et al.* (2023c)
	Mapeado de cortas e incendios	Mapa raster de coberturas forestales, mapa de cambios de coberturas	Análisis geométrico	Galicia	Alonso *et al.* (2022b)
II	Detección y caracterización masas *Castanea sativa*	Sentinel-2, ALS	Clasificación RF, modelado CHM, ITD	Ayto Riós, Ayto Folgoso do Courel, Ourense	Alonso *et al.* (2020a) Alonso *et al.* (2020b)
	Detección masas *P. pinaster*, *P. radiata*, *P. sylvestris*	Worldview-2	Clasificación RF	Área piloto X x Y m, A Coruña	Alonso *et al.* (2021b)
	Detección y caracterización masas *E. globulus*, *E. nitens*	Worldview-3, Sentinel-2, ALS, TLS, PLS, LiDAR-UAV	Clasificación RF, ITD	Galicia-Costa, rodales piloto	Alonso*et al.* (2023d) Solares-Canal *et al.* (2023e) Picos*et al.* (2020c)
IV	Evaluación severidad incendios forestales	Sentinel-2	Análisis dNBR	Provincia Pontevedra	Picos *et al.* (2019)
	Identificación de áreas estratégicas de gestión potenciales	Mapa raster de coberturas forestales, MDT, BTG	Análisis espacial	Comarca Baixo Miño	Solares-Canal *et al.* (2022c)
	Mapeado de modelos de combustible	Mapa raster de coberturas forestales, ALS	Clasificación RF, árboles de decisión	Comarca Baixo Miño	Solares-Canal *et al.* (2023f)

un mayor grado de actualización de coberturas del suelo. Así mismo permiten profundizar en distribución espacial de las distintas coberturas forestales presentes en una tesela del MFE25, así como la detección de parcelas forestales aisladas entre otros usos del suelo, debido a su alta resolución espacial. En consecuencia, los mapas derivados de la metodología presentada en esta tesis podrían ser utilizados para complementar la cartografía oficial española, especialmente en áreas como Galicia.

Así mismo se observó que proporcionar un mapa vectorial de coberturas basado en recintos catastrales, o subdivisiones de los mismos, puede facilitar la interoperabilidad del mapa con procedimientos administrativos. Sin embargo, el mapa pixel es más apropiado cuando se pretende conocer con un alto nivel de detalle la distribución espacial de los recursos. Por ello, la decisión de que estructura de mapa utilizar debería estar en el usuario final y sería interesante producir ambos. La *Figura 2* muestra un detalle del mapa vectorial de coberturas.

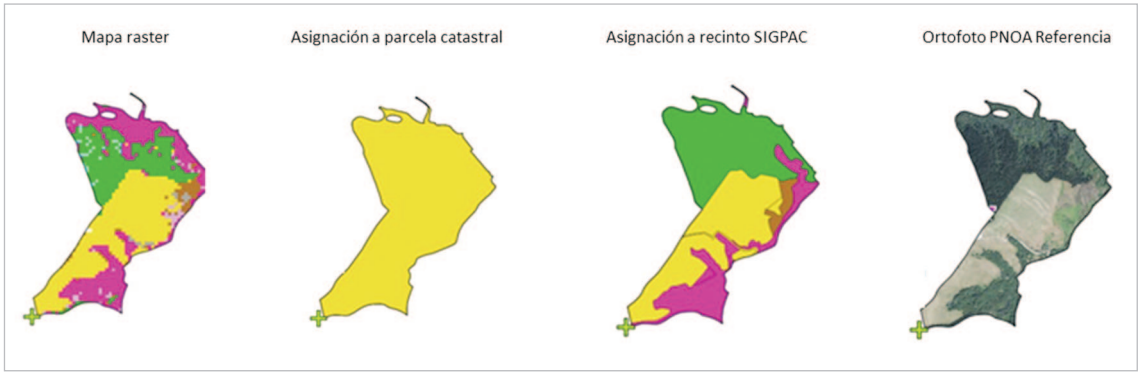


Figura 2. Comparación mapa raster de coberturas y mapa vectorial de coberturas.

3.2. Objetivo II

La comparación pixel-pixel de mapas raster de cobertura de anualidades consecutivos no permite identificar los cambios en el territorio, a pesar de que los mapas cuenten con altas métricas de precisión. Se observó que, una gran cantidad de cambios espurios (cambios que no podrían haber ocurrido dentro del marco temporal analizado) desdibujan la dinámica forestal del territorio (ver *Figura 3*).

Ante estos resultados, se concluyó que es necesario desarrollar una metodología para la detección automática de cambios. Se observó que mediante el análisis estadístico de series bi-anuales del índice NDVI y la clasificación mediante árboles de decisión es posible identificar cambios en el territorio (cortas e incendios) con una precisión general del 82%. La misma metodología aplicada al índice NBR genera una mayor cantidad de errores de comisión. Un ejemplo de los cambios detectados se muestra en la *Figura 4*. Así mismo se observa que la aplicación de árboles de decisión a métricas de geometría de las perturbaciones previamente detectadas permite diferencia automáticamente entre cortas e incendios (ver *Figura 5*).

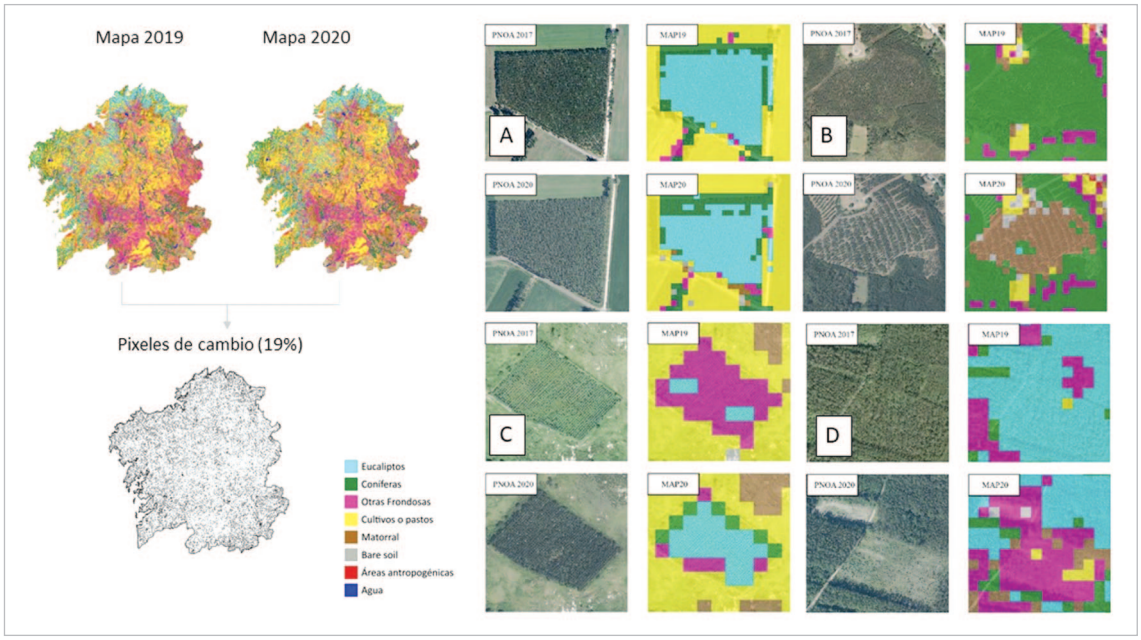


Figura 3. Comparativa de mapas anuales y ejemplos de cambios espurios. A. Cambios debido a pixeles de borde. B. Cambios debido a realización de claras. C. Cambios debido a crecimiento de plantación. D. Cambio debido a corta erróneamente asignado a frondosas.

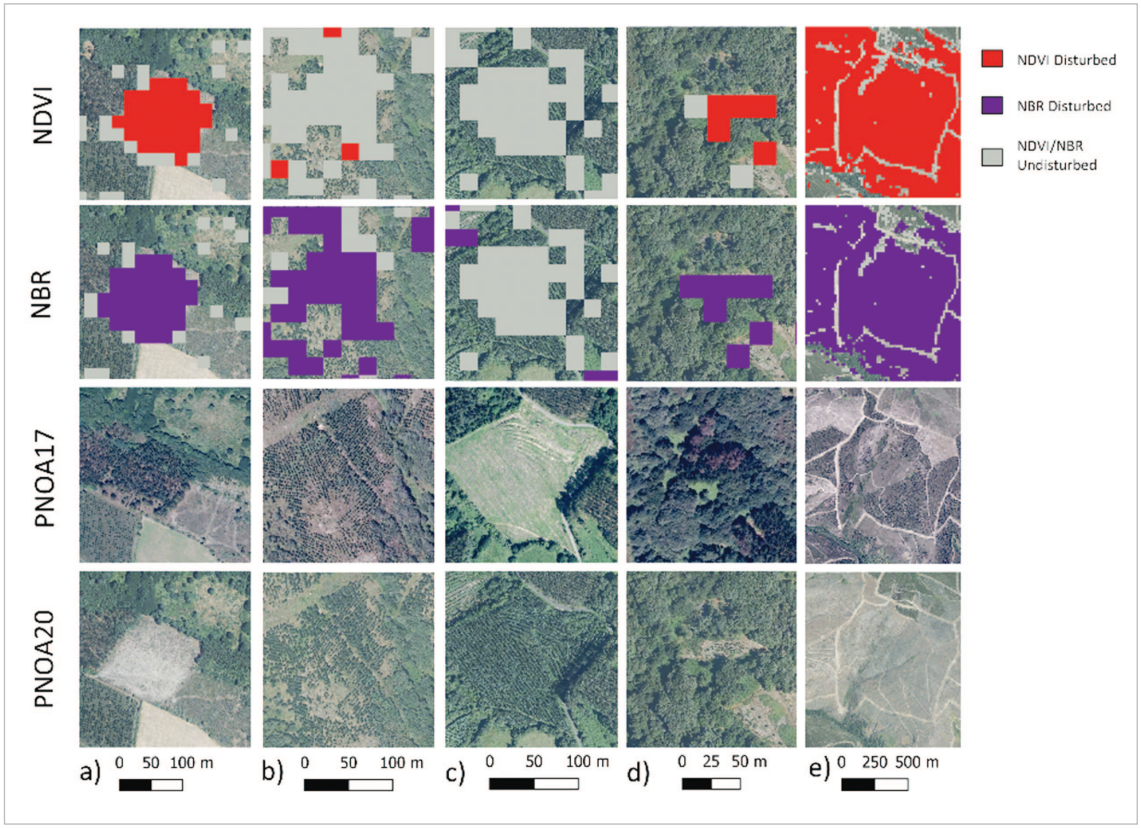


Figura 4. Resultado de la detección de cambios.

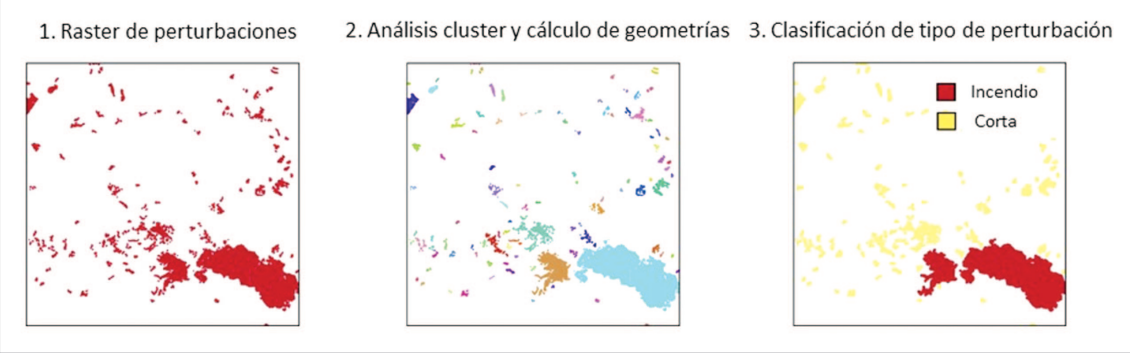


Figura 5. Detección automática de tipo de perturbación mediante métricas de geometría de la perturbación.

3.3. Objetivo III

Las metodologías desarrolladas permitieron detectar dos tipologías de masa de *Castanea sativa*: plantaciones recientes y soutos. La diferencia de estructuras entre los dos tipos de masa, llevó a la necesidad de desarrollar metodologías diferenciadas. La metodología para detectar pequeñas plantaciones de castaños dispersas en el territorio utiliza imágenes multiespectrales Sentinel-2 y LiDAR PNOA (Ver *Figura 6*). Esta proporciona una precisión global del 95,67%. Así mismo se realizó detección automática de árbol individual utilizando los datos LiDAR (tasa de detección del 96%), así como una medición de alturas de los árboles individuales y superficies de copa (valores R2 de 0,83 y 0,74). Para detectar soutos se utilizaron los mismos datos de partida pero con un flujo de trabajo diferente (precisión global 76%).

En cuanto a la metodología para mapear las especies de *Pinus* spp., en áreas de dominancia de minifundismo, se observó que las imágenes WorldView-2 son eficientes para ello (precisión global en área piloto del 83%).



Figura 6. Detección de plantaciones de castaño y detección y caracterización de árbol individual.

Por el contrario, Sentinel-2 demostró ser la herramienta más eficaz para distinguir entre *E. globulus* y *E. nitens*, mientras que WorldView demostró una eficacia limitada. La fecha de adquisición de las imágenes ha sido identificada como un parámetro clave para lograr diferenciar entre las dos especies. Destacar que la utilización de WorldView trajo consigo retos asociados. Esta tesis abre la puerta a continuar explorando su aplicabilidad a grandes escalas (i.e. regional).

Así mismo se observa la eficiencia del PLS y el LiDAR-UAV para detectar árboles individuales a escala rodal (tasa de detección del 103,7% y de 100% respectivamente) y obtener métricas de altura (R2 de 0,99 para el LiDAR-UAV y un R2 de 0,87 para el PLS) y diámetro (R2 0.87). La *Figura 7* muestra el flujo de trabajo final para el PLS y LiDAR-UAV.

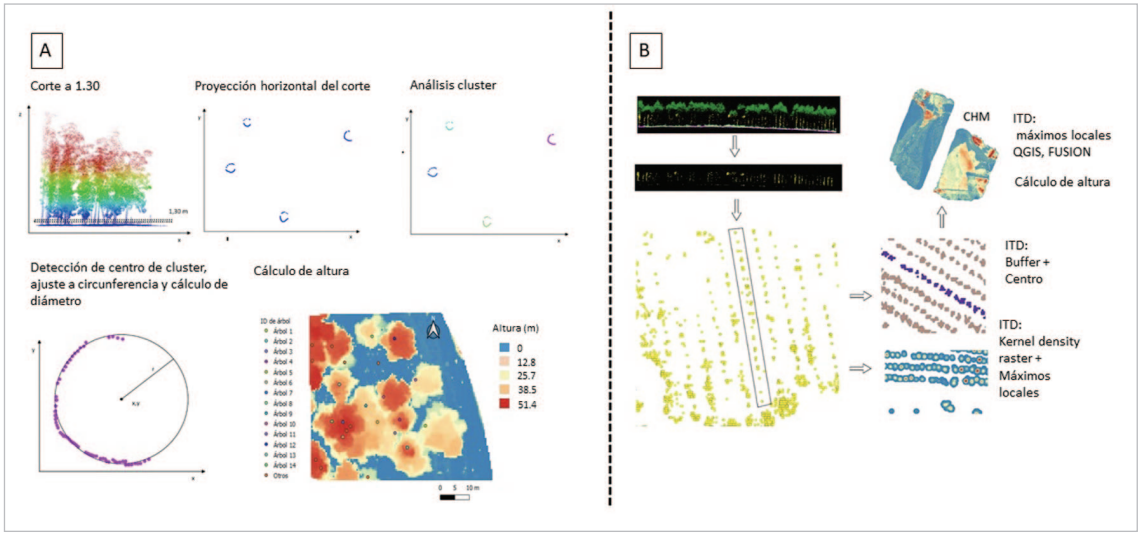


Figura 7. A: Flujo de trabajo PLS. B: Flujo de trabajo LiDAR-UAV.

3.4. Objetivo IV

El análisis del dNBR permitió obtener un mapa de severidad de los incendios forestales ocurridos en Pontevedra en Octubre de 2017 (ver *Figura 8*). El análisis espacial detallado de la severidad permitió observar que áreas previamente afectadas por incendios están relacionadas con altos niveles de severidad. En cambio fue complicado establecer relaciones claras con el resto de parámetros analizados (ej. cobertura del suelo), ya que se observó que la severidad estaba íntimamente ligada a múltiples parámetros como la presencia de arroyos, la orografía y la dirección del viento. En este análisis se observó que los enclaves arqueológicos, dada su ubicación geográfica, podrían actuar como áreas estratégicas de gestión y que las acciones de intervención en estas áreas podrían actuar sinérgicamente para la preservación conjunta del elemento patrimonial y el territorio.

Así mismo utilizando el mapa raster de cobertura del suelo y ALS fue posible crear un mapa de modelos de combustibles actualizados adaptado a la realidad gallega y de alta resolución espacial (5 m) (ver *Figura 9*).

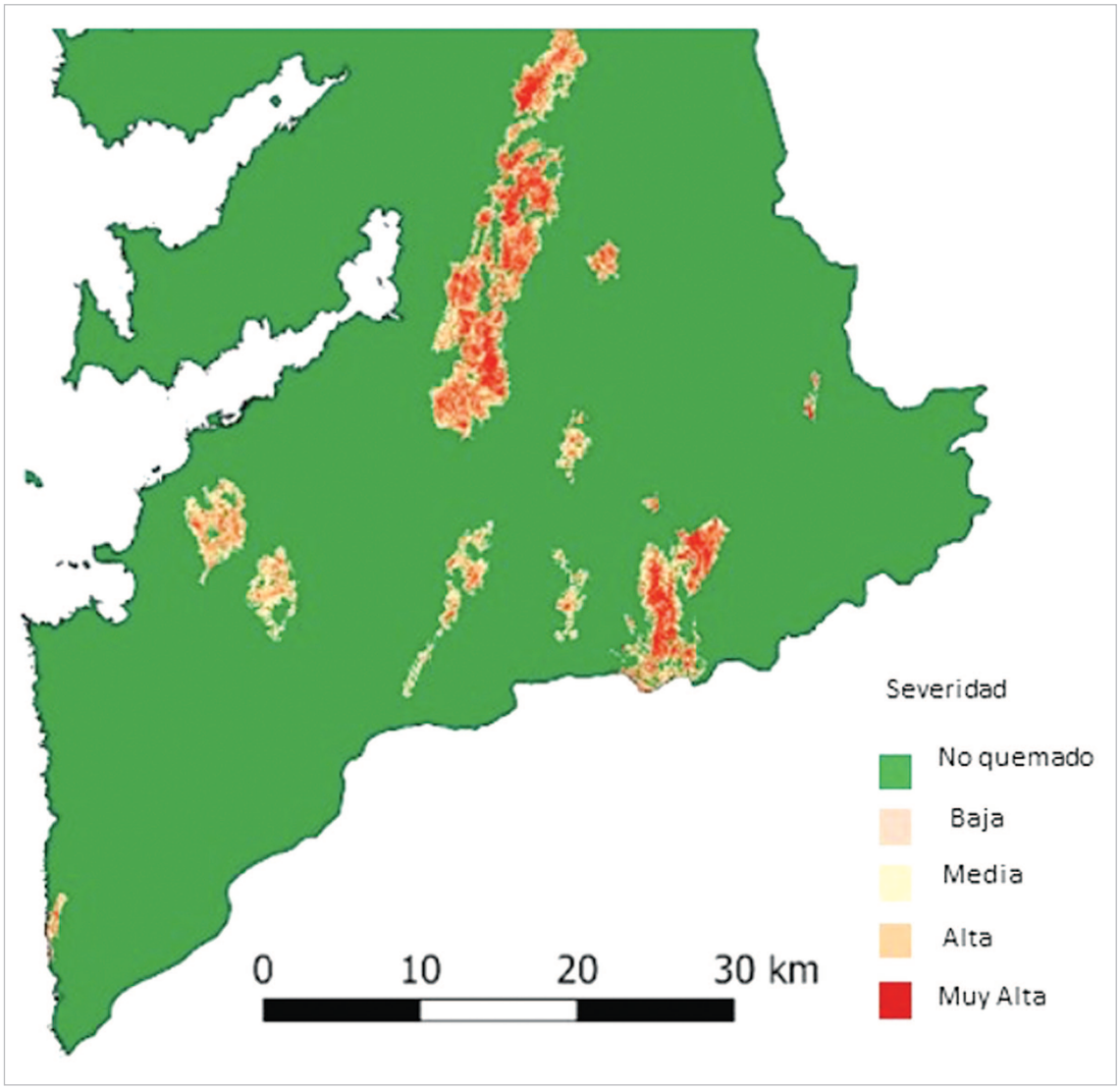


Figura 8. Mapeado de severidad mediante dNBR.

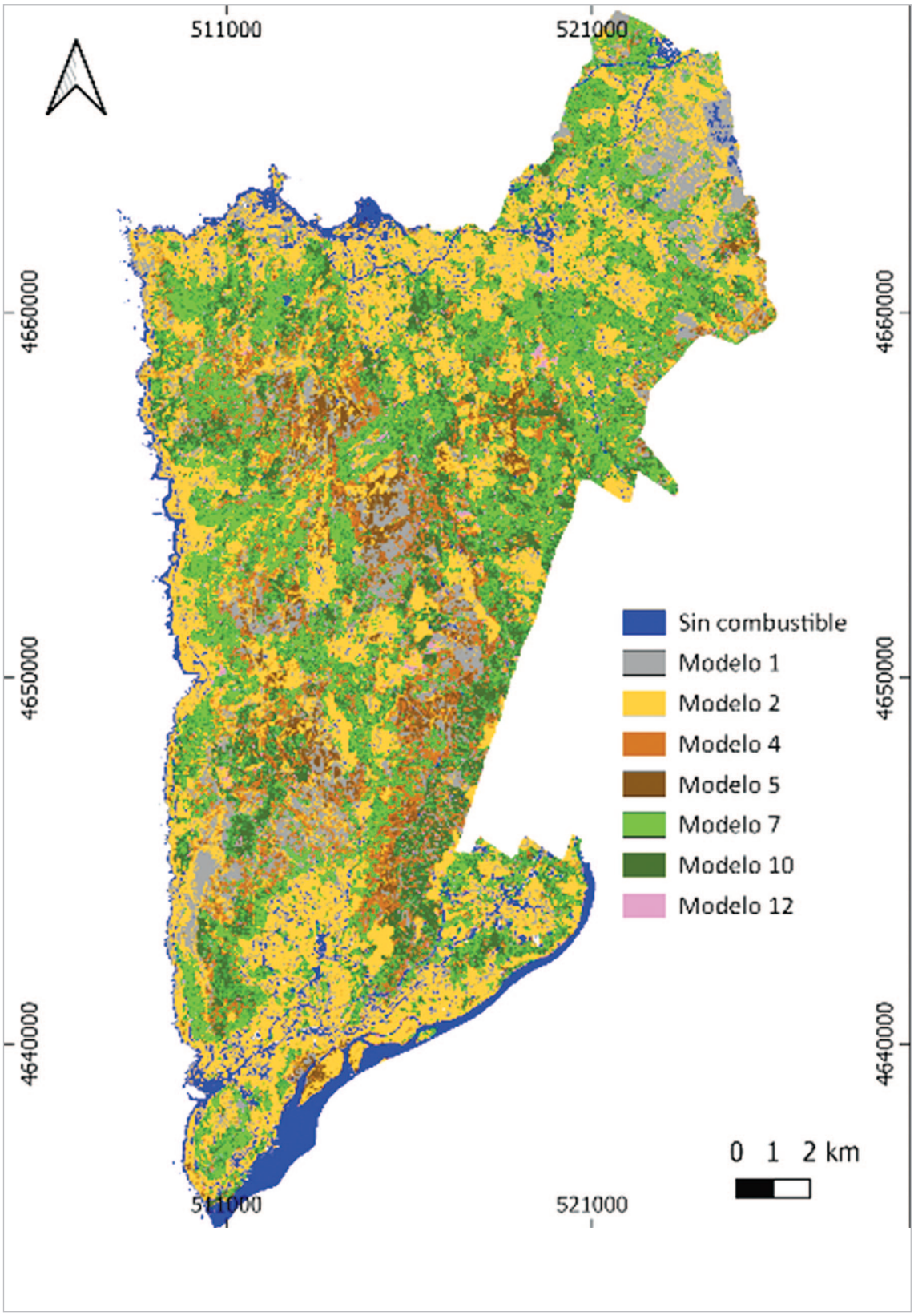


Figura 9. Mapa de modelos de combustible (modelos Rothermel).

4. Conclusiones

Esta tesis presenta valiosas metodologías y productos cartográficos que representan un paso adelante en el monitoreo forestal en áreas de minifundismo y sujetas a altas tasas de cambio. Destaca el gran potencial de las fuentes de datos de acceso abierto (Sentinel-2 y LiDAR PNOA) para realizar esta tarea a diferentes escalas. Esto permite la transferencia de los resultados de la tesis al sector forestal, muchos de los resultados obtenidos fueron ya transferidos a la Consellería de Medio rural de la Xunta de Galicia (Xunta de Galicia, 2023).

Agradecimiento y financiación

Agradecer a mis directores de tesis Julia Armesto y Juan Picos. Así mismo a mis compañeros de equipo del Laboratorio de Ingeniería Cartográfica de la Universidad de Vigo.

Esta tesis fue financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades bajo la ayuda FPU19/02054. Así mismo fue financiado por: 1) Inventario Forestal Continúo de Galicia, Consellería de Medio Rural, Xunta de Galicia, 2020CONVINVENTARIOFORESTALR002. 2) FIREPOCTEP, INTERREG VA España Portugal. 3) PALEOINTERFAZ, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, PID2019-111581RB-I00.

5. Bibliografía

DGC, 2023. Dirección General del Catastro, Ministerio de Hacienda y Función Pública, Gobierno de España. Available online: http://www.catastro.minhap.gob.es/webinspire/index.html Accessed 01 March 2023.

Fassnacht, F.E.; Latifi, H.; Stere_czak, K.; Modzelewska, A.; Lefsky, M.; Waser, LT.; Straub, C.; Ghosh, A.; (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 186, 64-87. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.013

Johnstone, J.F.; Allen, C.D.; Franklin, J.F.; Frelich, L.E.; Harvey, B.J.; Higuera, P.E.; Mack, M.C.; Meentemeyer, R.K.; Metz, M.R.; Perry, G.L.W.; Schoennagel, T.; Turner, M.C.; (2016). Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience. *Frontiers in ecology and the environment*, 14(7), 369-378. https://doi.org/10.1002/fee.1311

Kangas, A.; Astrup, R.; Breidenbach, J.; Fridman, J.; Gobakken, T.; Korhonen, K.T.; Maltamo, M.; Nilsson, M.; Nord-Larsen, T.; Næsset, E.; Olsson, H.; (2018) Remote sensing and forest inventories in Nordic countries – roadmap for the future. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33(4), 397-412. https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1416666

Lindner, M.; Maroschek, M.; Netherer, S.; Kremer, A.; Barbati, A.; Garcia-Gonzalo, J.; Seidl, R.; Delzon, S.; Corona, P.; Kolström, M.; Lexer, M.J.; Marchetti, M.; (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698-709. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023

MITECO, 2021. Anuario de Estadística. 2021. Available online: https://www.mapa.gob.es/es/es-

tadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2021/default.aspx Accessed 01 March 2023.

MITECO. (2011). Mapa Forestal de Españza a escala 1:25000. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/mapa-forestal-espana/mfe_25.html Accessed 01 March 2023.

MITECO. (2022) Avance Informativo de Incendios Forestales. Available online: https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/estadisticas-avances.aspx (accessed on March 2023).

White, J.C.; Coops, N.C.; Wulder, M.A.; Vastaranta, M.; Hilker, T.; Tompalski, P.; (2016). Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(5), 619-641. https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484

Wulder, M.A.; Coops, N.C.; Roy, D.P.; White, J.C.; Hermosilla, T.; (2018). Land cover 2.0. *International Journal of Remote Sensing*, 39(12), 4254-4284. https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1452075

Xunta de Galicia, 2023. Inventario Forestal continúo de Galicia. https://invega.xunta.gal/invega/ Accessed 14 June 2024.