

CARACTERIZACIÓN DE LA DIVERSIDAD ESTRUCTURAL DE PAISAJES FORESTALES MEDITERRÁNEOS AFECTADOS POR INCENDIOS RECURRENTES MEDIANTE DATOS LiDAR-PNOA

P. J. Gelabert Vadillo¹, A. L. Montealegre Gracia^{1,2}, M. T. Lamelas Gracia^{2,3}, D. Domingo Ruíz^{1,2}.

¹ Universidad de Zaragoza, Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España. pjgelabert@gmail.com

² Universidad de Zaragoza, Grupo GEOFOREST-IUCA, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España. monteale@unizar.es; tlamelas@unizar.es; ddomingo@unizar.es

³ Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090, Zaragoza, España. tlamelas@unizar.es

RESUMEN

El objetivo de este estudio es caracterizar la diversidad estructural de las masas de *Pinus halepensis* Miller, afectadas de manera recurrente por incendios, localizadas en el sector central de la Depresión del Ebro (Aragón). La metodología se basa en el filtrado e interpolación de los datos LiDAR (*Light Detection And Ranging*) de la segunda cobertura del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea para derivar los índices LHDI (*LiDAR Height Diversity Index*) y LHEI (*LiDAR Height Evenness Index*), así como diversas métricas relacionadas con la estructura vertical y la continuidad horizontal de la vegetación. Para contrastar las diferencias estructurales entre las áreas quemadas en distintas fechas (desde 1979 a 2009), se aplicó el test de Kruskal-Wallis. Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas entre las zonas quemadas en función de variables como la desviación típica de las alturas de los retornos láser, entre otras. Las zonas incendiadas recientemente presentan un bajo índice de diversidad estructural por el predominio del estrato arbustivo rebrotador, que contrasta con las áreas quemadas más antiguas.

Palabras clave: LiDAR-PNOA; *Pinus halepensis*; incendios; variables estructurales.

ABSTRACT

The aim of this study is to characterize the structural diversity of *Pinus halepensis* Miller stands affected recurrently by fires, located in the central sector of the Ebro Basin (Aragón). The methodology is based on the filtering and interpolation of LiDAR (*Light Detection And Ranging*) data from the second coverage of the National Plan for Aerial Orthophotography. LHDI (*LiDAR Height Diversity Index*), LHEI (*LiDAR Height Evenness Index*), as well as several metrics related to the vertical structure and the horizontal continuity of vegetation were derived to characterize the structural diversity. The Kruskal-Wallis test was applied to compare the structural differences between burned areas on different dates (from 1979 to 2009). The results show statistically significant differences between burned areas as a function of variables such as the standard deviation of the heights of laser returns, among others. Recently burned areas have a low index of structural diversity due to the predominance of the resprouting shrub layer, which contrast with the oldest burned areas.

Keywords: LiDAR-PNOA; *Pinus halepensis*; wildfires; structural variables.

1. INTRODUCCIÓN

Las variaciones en la estructura vegetal de las áreas boscosas a menudo revelan cambios en la biodiversidad y proporcionan una comprensión sobre el funcionamiento del ecosistema (McElhinny *et al.*, 2005). La estimación de la biodiversidad en hábitats forestales complejos sigue siendo un desafío para los ecólogos debido a la intensiva labor que conlleva la recopilación de datos para describir la estructura vertical de la vegetación, especialmente en áreas extensas (Maltamo *et al.*, 2014).

Las técnicas actuales de teledetección activa con sensores LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aeroportados, también conocidos como ALS (*Airborne Laser Scanning*), pueden proporcionar información relevante sobre la estructura forestal para grandes extensiones de territorio, siendo interesante examinar las relaciones entre los datos derivados del LiDAR y ciertos patrones de biodiversidad. De hecho, la diversidad estructural en los bosques se correlaciona con aumentos en la diversidad animal para taxones múltiples, basados parcialmente en el hecho de que hay más nichos de hábitat en bosques estructuralmente diversos (Maltamo *et al.* 2014).

Las nubes de puntos LiDAR permiten evaluar la estructura tridimensional del bosque con menor esfuerzo y coste económico que las mediciones basadas en trabajo de campo. Esta técnica de teledetección ha demostrado su utilidad para caracterizar masas forestales y realizar inventarios desde hace más de una década (e.g. Lefsky *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2003; Zimble *et al.*, 2003; Listopad *et al.*, 2011; Domingo *et al.*, 2017).

La aplicación del LiDAR puede resultar idónea en ecosistemas altamente dinámicos, que sufren frecuentes alteraciones que requieren de una gestión periódica. En este sentido, se ha analizado el papel del fuego en la configuración de la composición y la riqueza de especies del sotobosque (Glitzenstein *et al.*, 2008), y nuevas metodologías, como la desarrollada por Listopad *et al.* (2015), proporcionan estimaciones con un menor grado de subjetividad sobre la diversidad estructural de la vegetación. Así, por ejemplo, el conocido índice de diversidad de Shannon y el índice de Pielou, que mide la proporción de la diversidad observada en relación con la máxima diversidad (Moreno, 2001), han sido adaptados por Listopad *et al.* (2015) utilizando los retornos láser.

Estudios previos han utilizado datos LiDAR con una alta densidad de puntos, por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar la utilidad de los datos proporcionados por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), de baja densidad, para la obtención de varias métricas indicadoras de la complejidad estructural y la biodiversidad de un paisaje forestal mediterráneo frecuentemente afectado por incendios. La hipótesis es que las métricas derivadas de las nubes de puntos proporcionarán información sobre la diversidad estructural forestal, útil para una gestión sostenible del bosque.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el sector central de la Depresión del Ebro, concretamente en el entorno de los Montes de Zuera y la Sierra de las Pedrosas (Figura 1). El clima se enmarca dentro de los denominados mediterráneos continentalizados (Cuadrat, 2004). La zona presenta elevaciones que oscilan entre los 210 m.s.n.m., en el extremo suroeste cercano al río Ebro, y los 775 m.s.n.m. en la Sierra de las Pedrosas, situada al norte. Desde el punto de vista litológico, se observa una alternancia entre materiales calcareníticos, calizos y conglomeráticos cuaternarios. La vegetación, según la cartografía del III Inventario Forestal Nacional, está compuesta principalmente por masas de *Pinus halepensis* Miller (en adelante pino carrasco), que en ocasiones presenta un sotobosque de *Quercus ilex subsp. Rotundifolia*, *Quercus coccifera*, *Juniperus oxycedrus*, *Thymus vulgaris* y *Rosmarinus officinalis*. Existen también espacios cubiertos por cultivos de secano y matorral esclerófilo.

Como se puede apreciar en la Figura 1, el paisaje ha sido alterado por incendios forestales durante las últimas décadas. El área quemada total asciende a 8.075 ha, mientras que el área no incendiada supone 12.047,2 ha.

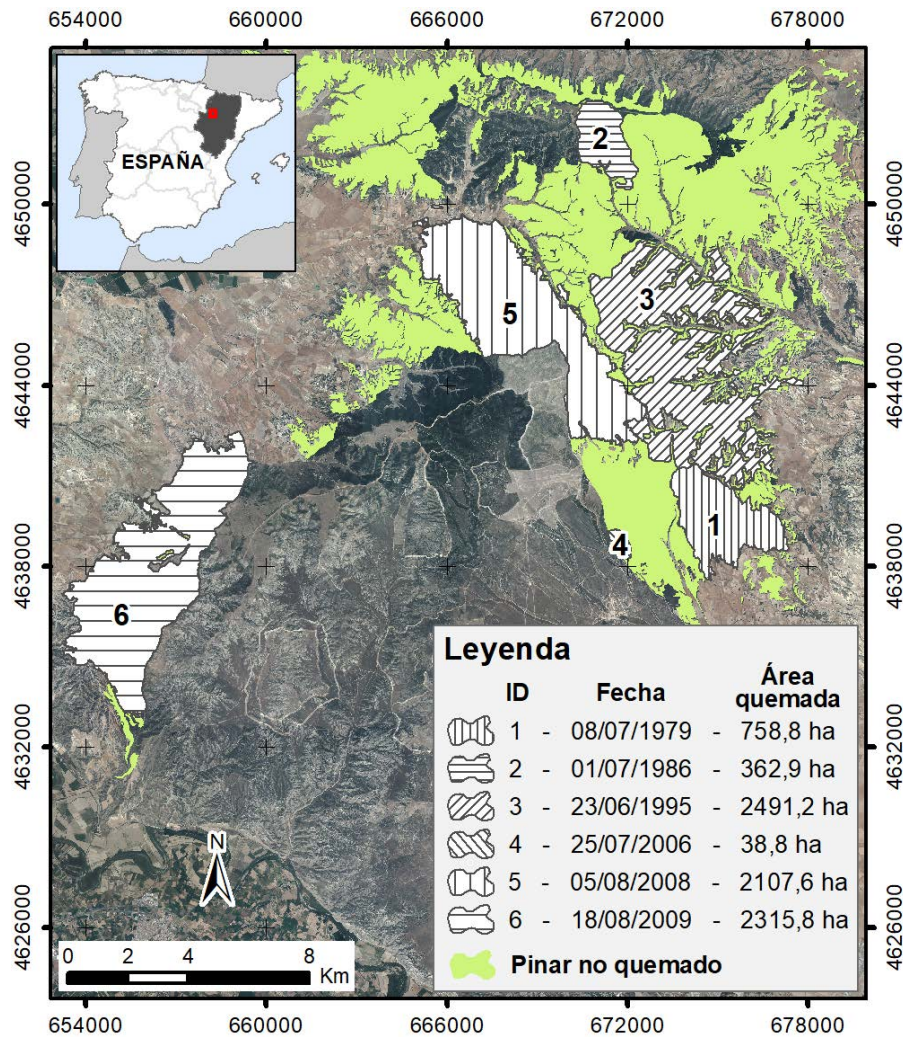


Figura 1. Área de estudio en la que se muestran los incendios ocurridos y las masas de pino carrasco

2.2. Datos LiDAR

Los datos LiDAR fueron proporcionados por el Instituto Geográfico de Aragón (IGEAR). Estos datos públicos pertenecen a la segunda cobertura del PNOA-LiDAR y fueron capturados entre el 21 de septiembre y el 15 de noviembre de 2016, utilizando un sensor aeroportado de pulsos discretos Leica ALS80. Se entregaron sin clasificar, en teselas de 2×2 km en formato LAS (v. 1.2), con coordenadas x, y, z (ETRS 1989 UTM Zona 30 N) y hasta cuatro retornos registrados por pulso. La densidad de puntos del área de estudio oscila entre 1,1 y 2,0 puntos/m², con una precisión vertical de 10 cm.

Los retornos se clasificaron utilizando el algoritmo de clasificación de curvatura multiescala implementado en el software MCC-LIDAR v.2.1 (Evans y Hudak, 2007). De acuerdo con Montealegre *et al.* (2015a), este filtro es el que mejores resultados proporciona para escenarios forestales de pinar propios del valle del Ebro.

El método de interpolación "Point-TIN-Raster" implementado en el software ArcGIS 10.5 se aplicó a los puntos de suelo para producir un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con una resolución de 1 m, siguiendo a Montealegre *et al.* (2015b), con la finalidad de normalizar las alturas de los retornos.

2.3. Variables de diversidad estructural

Para analizar la diversidad y las características estructurales de las masas forestales de pino carrasco se han utilizado tres tipologías de variables: i) índices de biodiversidad; ii) métricas de estructura vertical del bosque; y iii) métricas de continuidad horizontal en la estructura.

2.3.1 Índices de biodiversidad

De acuerdo con Listopad *et al.* (2015) se consideraron dos índices de biodiversidad adaptados a los datos ALS: LHDI (*LiDAR Height Diversity Index*) y LHEI (*LiDAR Height Evenness Index*).

El LHDI es una modificación del índice de diversidad Shannon-Weiner (H'), que típicamente se denota por $H' = -\sum [(pi) \times \ln(pi)]$, donde pi es la proporción de la muestra total representada por la especie i . En el caso del índice estructural LHDI, la especie se reemplaza por el intervalo de 0,5 m de altura, y pi es la proporción de retornos láser que queda contenido dentro de un rango de altura específico.

El LHEI es una modificación del índice de uniformidad de Pielou, $J' = H' / H'_{max}$, que expresa el índice de diversidad Shannon-Weiner en relación con el valor máximo que este puede adoptar. El LHEI se calculó dividiendo el LHDI por el logaritmo natural del número total de retornos.

Para calcular el parámetro pi de ambos índices se aplicó el comando "*DensityMetrics*" implementado en el software de código abierto FUSION 3.60, con una resolución espacial de 10 m. Este comando proporciona una serie de capas en formato ráster donde cada celda contiene la proporción de retornos para un rango específico de alturas sobre el suelo. En esta operación interviene el MDE generado previamente para normalizar los valores de elevación.

2.3.2 Métricas de estructura del bosque

Se generó un conjunto de métricas, comúnmente utilizadas como variables independientes en el modelado de vegetación, utilizando el comando "*GridMetrics*" de FUSION 3.60 con la misma resolución espacial (10 m). Este comando calcula estadísticas usando la elevación de todos los retornos dentro de cada celda del ráster. La Tabla 1 muestra las variables calculadas, que incluyen percentiles de altura y varias métricas que describen la altura media, la desviación estándar, la asimetría, y la curtosis de la distribución de las alturas de los retornos, así como la fracción cabida cubierta (FCC) y el *canopy relief ratio* (CRR).

2.3.3 Métricas de continuidad horizontal en la estructura

Para reconocer algunos patrones espaciales sobre la distribución de la vegetación, se calculó la desviación estándar de las capas ráster derivadas de los dos índices de biodiversidad y de las nueve variables de estructura vertical. Para ello se aplicó un filtro de paso alto a través de un operador focal con un núcleo de 3×3 .

2.4. Análisis estadístico

Las diferencias en la diversidad estructural forestal se estudiaron agrupando los incendios para hacer comparaciones utilizando los valores de los ráster generados en el paso anterior. El primer grupo (G1) compara cada incendio con el área no quemada; el segundo grupo (G2) compara los incendios de 1979, 1986 y 1995 con el área no quemada; el tercer grupo (G3) compara los incendios recientes de 2006, 2008 y 2009 con el área no quemada; el cuarto grupo (G4) compara el área no quemada con toda el área quemada; finalmente, el quinto grupo (G5) compara los incendios de más de veinte años (1979, 1986 y 1995) con los de más de nueve años (2006, 2008 y 2009).

El test de Kruskal-Wallis se utilizó para comprobar si las muestras provienen de la misma distribución. Dicha prueba no paramétrica es adecuada cuando no es posible asumir la normalidad y homocedasticidad de las muestras, y se usa comúnmente para seleccionar las variables más significativas.

Tabla 1. Variables de estructura vertical, donde x_i es el valor de la observación (altura del retorno), N es el número total de observaciones y r_i es el retorno

<i>Variable</i>	<i>Descripción</i>
Percentiles 90, 95 y 99 (P_{90} , P_{95} , P_{99})	Valor de altura por debajo del cual hay un determinado porcentaje de observaciones.
Altura media (μ)	$\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$
Desviación estándar (σ)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$
Curtosis	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{(N - 1)\sigma^4}$
Asimetría	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{(N - 1)\sigma^3}$
Fracción cabida cubierta (FCC)	$\frac{\sum_{i=1}^N r_i \text{ primeros } > \text{umbral}}{\sum_{i=1}^N r_i \text{ primeros}} 100$
Canopy relief ratio (CRR)	$\frac{\mu - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}}$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la prueba de Kruskal-Wallis presentaron un p -valor inferior a 0,05 para todas las variables consideradas, indicando que los datos provienen de diferentes distribuciones. En consecuencia, existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de los grupos analizados. Como se puede observar en la Tabla 2, el índice LHDl; las variables de estructura vertical, como la desviación estándar y la FCC; así como la desviación estándar de la altura media como una variable de continuidad horizontal, son las más útiles para analizar las diferencias en la diversidad de la estructura forestal del área de estudio atendiendo a los valores más altos de Chi-cuadrado.

En el primer grupo G1, la desviación estándar proporciona información sobre la variabilidad de las alturas de los retornos, es decir, cuanto mayor es el valor de la desviación, mayor diversidad estructural, ya que se encuentran retornos láser a distintas alturas. Por el contrario, cuando el valor de desviación es bajo hay menor dispersión de los retornos láser y el estrato vegetal es más homogéneo y menos diverso. Junto a los percentiles de altura de los retornos, permite diferenciar cada una de las áreas incendiadas de las no quemadas o control (Tabla 2).

En el segundo grupo G2, la desviación estándar de la altura media y los percentiles posibilitan, de nuevo, la distinción entre áreas quemadas hace más de veinte años y el área no incendiada (Tabla 2).

Por otro lado, cuando se analiza el contraste entre los incendios recientes de 2006, 2008 y 2009 y el área no quemada (tercer grupo G3), los índices LHDl y LHEl, que tienden a cero cuando la diversidad es baja, permiten evidenciar diferencias entre zonas. Estos índices son menos sensibles a los cambios en la diversidad estructural cuando la zona presenta un mayor nivel de regeneración vegetal, como ocurre con los incendios incluidos en el G1 (Tabla 2). Asimismo, la FCC, expresada en tanto por cien, permite evidenciar cambios en el cubrimiento vegetal. Los resultados revelan su utilidad, dado que las áreas quemadas en los últimos diez años cuentan con menos vegetación que cubra el suelo, en contraposición con los incendios ocurridos hace más de veinte años.

Tabla 2. Selección de métricas de diversidad estructural con los valores de Chi-cuadrado más altos para cada grupo

Grupo	Variable	Chi-cuadrado
G1	Desviación estándar	623.544,4
	P ₉₉	622.029,8
	P ₉₅	619.492,3
G2	Altura media (desviación estándar)	286.989,3
	P ₉₉	277.952,2
	P ₉₅	276.707,4
G3	LHDI	7.818,1
	Fracción cabida cubierta	7.440,9
	LHEI	7.284,8
G4	Altura media (Desviación estándar)	575.901,7
	Desviación estándar	553.019,2
	P ₉₉	547.322,9
G5	Fracción cabida cubierta	2.637,5
	LHEI	2.580,2
	Canopy relief ratio	2.426,6

El cuarto grupo G4 compara el área no quemada con toda el área quemada, destacando como variable más importante la desviación estándar de la altura media debido a su capacidad para mostrar diferencias en la dispersión de los retornos láser en función de la existencia de varios estratos vegetales (Tabla 2).

Por último, el análisis Kruskal-Wallis aplicado al quinto grupo (G5), que compara los incendios de más de veinte años (1979, 1986 y 1995) con los de más de nueve años (2006, 2008 y 2009), muestra que la FCC es una variable adecuada para discriminar áreas quemadas en distintos períodos de tiempo. Las más recientes presentarán un menor porcentaje de cubrimiento y unos valores de LHEI y CRR próximos a cero.

La Figura 2A muestra que los tres incendios de 1979, 1986 y 1995 cuentan con distribuciones de los retornos láser más próximas a las del área no quemada, dado que presentan una etapa avanzada de recuperación. Las alturas medias están alrededor de 3 m, y las ramas más gruesas del árbol están en la parte superior del tronco, asemejándose así al bosque no quemado. Los valores de LHDI y LHEI son altos, lo que demuestra, junto a los valores de FCC y CRR (Figura 3), la existencia de una gran diversidad estructural forestal y una distribución equitativa de los retornos láser. Particularmente, los incendios ocurridos en 1979 y 1995 presentan una densidad de árboles aproximada de 25 pies/m² debido a que la topografía plana reduce los procesos de erosión y el arrastre de las semillas (Madrigal *et al.*, 2005). Además, no se ha realizado aclareo del bosque, lo que genera masas de pinar con un sotobosque poco desarrollado y de escaso porte.

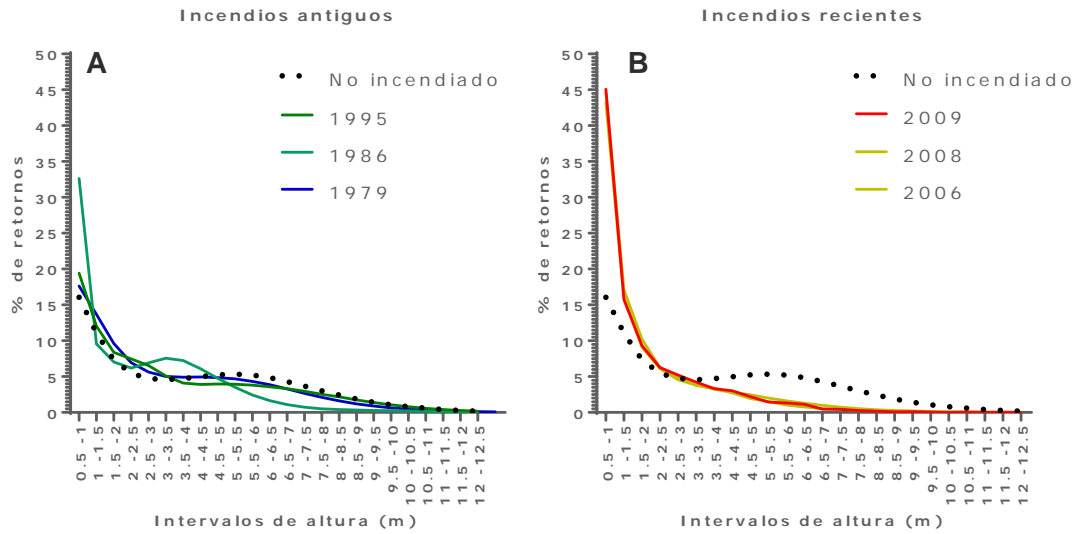


Figura 2. Porcentaje de retornos en intervalos de altura. A) Incendios de más de 20 años (1979, 1986 y 1995). B) Incendios recientes (2006, 2008 y 2009)

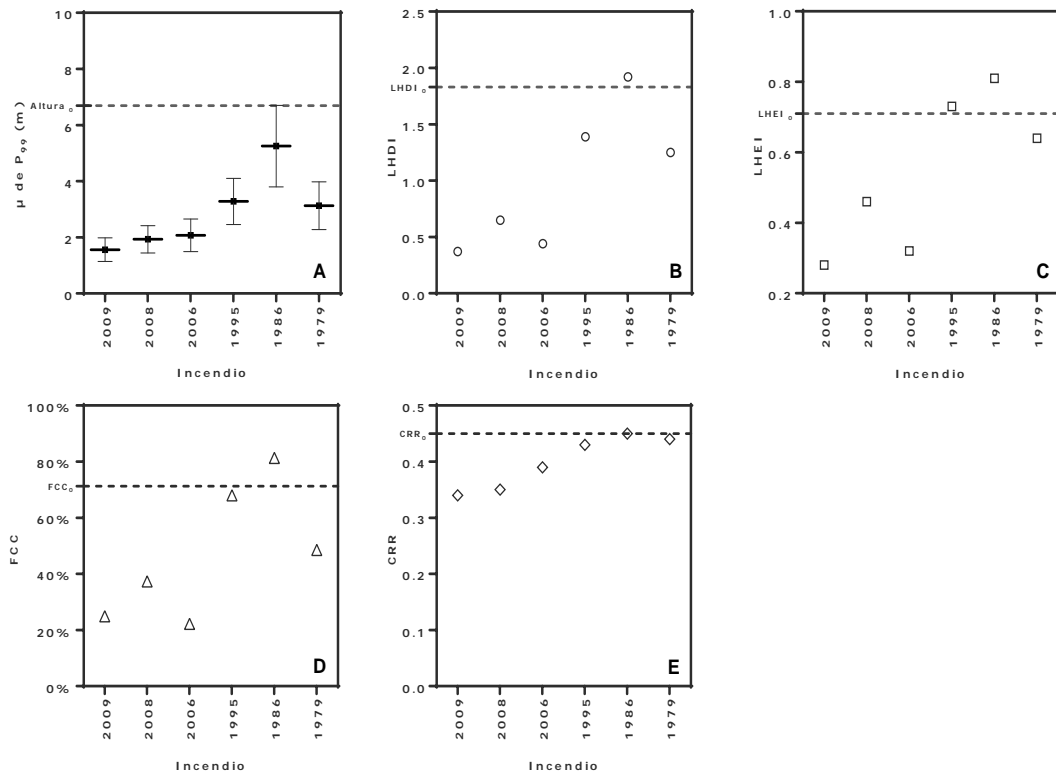


Figura 3. A) Media del P_{99} de la altura en los diferentes incendios y su desviación típica. B) LHDI medio en los diferentes incendios. C) LHEI medio en los diferentes incendios. D) Fracción cabida cubierta (FCC) en los diferentes incendios. E) *Canopy Relief Ratio* (CRR) en los diferentes incendios. La línea discontinua representa el valor medio de cada métrica en la masa de control (pinar no incendiado)

En el incendio de 1986 se puede observar una distribución bimodal, que describe la formación de dos estratos de vegetación muy diferenciados (Figura 2A). Algunas áreas presentan un

estrato arbustivo denso de hasta 1,5 m de altura, mientras que otras tienen masas de pino de aproximadamente 3,5 a 4 m. De hecho, esta área quemada presenta la altura media y la variabilidad más altas. Incluso los valores LHDÍ y LHEI superan el valor medio para el área no quemada (Figura 3). Cabe señalar que este incendio presenta una orografía más compleja, con pendientes pronunciadas y orientaciones contrastadas, lo que implica diferentes condiciones de recuperación para la vegetación. En algunas áreas, la erosión eliminó las semillas de pino; en otras, las condiciones naturales produjeron el crecimiento rápido de arbustos y pastos que dificultó la supervivencia de las semillas de pino debido a la baja disponibilidad de luz solar y agua (Serrada, 2003).

En contraste, los incendios recientes de 2006, 2008 y 2009 exhiben una similitud en la distribución de las alturas de los retornos (Figura 2B). Alrededor del 80% de éstos se sitúan entre 0,5 y 3 m porque la mayoría de los pinos fueron consumidos por el fuego. En general, estos incendios recientes presentan valores bajos de cobertura del dosel (20-40%) y valores de CRR cercanos a cero, lo que indica que las ramas de los árboles se encuentran en la parte inferior del fuste, con una FCC baja, indicando así que las copas tienen poco desarrollo (Figura 3). Esta uniformidad estructural implica bajos valores de ambos índices de diversidad vertical, (LHDÍ e LHEI), lo que demuestra un predominio del estrato arbustivo.

Al igual que en otros estudios (e.g. Glitzenstein *et al.*, 2008), los resultados indican que los incendios tienen una influencia sobre la diversidad de la estructura forestal. A diferencia de los incendios de más de 20 años, los recientes (2006, 2008 y 2009) presentaron una estructura homogénea y baja diversidad debido a que la vegetación arbustiva tiene una recuperación temprana que oscila entre 6 y 10 años (Rodríguez *et al.*, 2014).

4. CONCLUSIONES

Los datos LiDAR aerotransportados son cada vez más accesibles pero las aplicaciones centradas en el análisis de la distribución vertical de los retornos ligado a estudios de diversidad estructural siguen siendo limitadas.

Los resultados demuestran la utilidad de los datos LiDAR-PNOA de la segunda cobertura para obtener índices de biodiversidad, así como métricas que caracterizan la estructura vertical de la vegetación, constituyendo una información de gran relevancia para la toma de decisiones en la gestión y planificación de los espacios forestales.

A pesar de la baja densidad de puntos de las nubes, se han podido constatar diferencias estadísticamente significativas entre las zonas quemadas en función de diversas variables relacionadas con la distribución de las alturas de los retornos láser. Las zonas incendiadas en 2006, 2008 y 2009 presentan un bajo índice de diversidad estructural debido al predominio del estrato arbustivo rebrotador, hecho que contrasta con las áreas quemadas en 1979, 1986 y 1995 en las que el estrato arbóreo está presente.

En el futuro sería interesante analizar el efecto de la pendiente topográfica y la orientación, y considerar el dato de severidad del fuego, ya que podrían ayudar a comprender mejor la diversidad estructural existente en las áreas quemadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado y financiado dentro del programa de becas del Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA).

6. BIBLIOGRAFÍA

Cuadrat J.M. (2004): El clima de Aragón. En: Peña J.L., Longares, L.A., Sánchez, M. (Eds.): *Geografía Física de Aragón: Aspectos generales y temáticos*. Zaragoza, Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico, pp. 3–14.

- Domingo, D., Lamelas, M.T., Montealegre, A.L., de la Riva, J. (2017): Comparison of regression models to estimate biomass losses and CO₂ emissions using low density airborne laser scanning data in a burnt Aleppo pine forest. *European Journal of Remote Sensing* 50 (1), 384-396.
- Evans, J. y Hudak, A. (2007): A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return Lidar in Forested Environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45 (4), 1029–1038.
- Glitzenstein, J.S., Streng D.R., Masters, R.E., Platt W.J. (2008): Clarifying long-term impacts of fire frequency and fire season in southeastern Coastal Plain pine savannas. En: *Proceedings, 6th Eastern Native Grass Symposium*. Columbia, pp. 14–24.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., Harding, A.T. (2002): Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*, 52 (1), 19–30.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., Flood, M. (2003): LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in physical geography*, 27 (1), 88-106.
- Listopad, M.C.S., Drake, J.B., Masters, R.E., Weishampel, J.F. (2011): Portable and air-borne small footprint LiDAR: forest canopy structure estimation of fire managed plots. *Remote Sensing*, 3, 1284–1307.
- Listopad, M.C.S., Masters, R.E., Drake, J., Weishampel, J., Branquinho, C. (2015): Structural diversity indices based on airborne LiDAR as ecological indicators for managing highly dynamic landscapes. *Ecological Indicators*, 57, 268-279.
- Madrigal, J., Hernando, C., Martínez, E., Guijarro, M., Díez, C. (2005): Regeneración post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central, España): modelos descriptivos de los factores influyentes en la densidad inicial y la supervivencia. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 14, 36-51.
- Maltamo, M., Næsset, E., y Vauhkonen J. (2014): *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies. Managing Forest Ecosystems*. London: Springer, 464 p.
- McElhinny, C., Gibbons, P., Brack, C., Bauhus, J. (2005): Forest and woodland stand structural complexity: Its definition and measurement. *Forest Ecology and Management*, 218 (1–3), 1–24.
- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J. (2015a): Comparison of open source LiDAR filtering algorithms in a Mediterranean forest environment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8, 4072-4085.
- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J. (2015b): Interpolation routines assessment in ALS derived Digital Elevation Models for forestry applications. *Remote Sensing*, 7, 8631-8654.
- Moreno, C.E. (2001): *Métodos para medir la biodiversidad*. Zaragoza: M&T–Manuales y Tesis SEA, vol. 1, 84 p.
- Rodrigues, M., Ibarra, P., Echeverría, M., Pérez-Cabello, F., de la Riva, J. (2014): A method for regional-scale assessment of vegetation recovery time after high-severity wildfires: Case study of Spain. *Progress in Physical Geography*, 38 (5), 556-575.
- Serrada, R. (2003): Regeneración natural: situaciones, concepto, factores y evaluación. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 15, 11-15.
- Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C., Gerard, P.D. (2003): Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote sensing of Environment*, 87 (2), 171-182.