

Resumen

Los ecosistemas forestales son una importante fuente de vida y económica, por su capacidad para almacenar carbono y estar formados por una materia prima renovable. No obstante, la gestión forestal inapropiada puede reducir considerablemente estas capacidades y aumentar el riesgo de incendios forestales. En las últimas décadas, las técnicas de teledetección han demostrado su contribución a la gestión forestal. El láser escáner aerotransportado (ALS, por sus siglas en inglés) proporciona información horizontal y vertical de las diferentes capas del dosel arbóreo. En concreto, el láser escáner aerotransportado *full-waveform* (ALS_{FW}), que registra la totalidad de la señal emitida por el sensor que es retrodispersada, proporciona mayor información que el láser escáner aerotransportado tradicional o discreto (ALS_D) sobre la estructura vertical del bosque. Sin embargo, el ALS_{FW} ha recibido menor atención que el ALS_D, debido a la gran cantidad y complejidad de sus datos y a la falta de disponibilidad de herramientas para su procesado.

Esta tesis aborda el desarrollo de métodos de procesado y análisis de datos ALS_{FW} para la caracterización de la estructura vertical del bosque y, en particular, del sotobosque. Para responder a este objetivo general, se establecieron seis objetivos específicos: En primer lugar, se analiza la influencia de la densidad de pulso, de los parámetros de voxelización (tamaño de vóxel y valor de asignación) y de los métodos de regresión sobre los valores de las métricas ALS_{FW} y sobre la estimación de atributos de estructura del bosque. Para ello, se redujo aleatoriamente la densidad de pulsos y se modificaron los parámetros de voxelización, obteniendo los valores de las métricas ALS_{FW} para las diferentes combinaciones de parámetros. Estas mismas métricas ALS_{FW} se emplearon para la estimación de atributos de la estructura del bosque mediante diferentes métodos de regresión. En segundo lugar, se integran métodos de procesado y análisis de datos ALS_{FW} en una nueva herramienta llamada *WoLFEX (Waveform Lidar for Forestry eXtraction)* que incluye los procesos de recorte, corrección radiométrica relativa, voxelización y extracción de métricas a partir de los datos ALS_{FW}, así como nuevas métricas descriptoras del sotobosque. En tercer lugar, se evalúa la influencia del ángulo de escaneo utilizado en la adquisición de datos ALS y la corrección radiométrica en la extracción de métricas ALS_{FW} y en la estimación de atributos de combustibilidad forestal. Para ello, se extrajeron métricas ALS_{FW} con y sin corrección radiométrica relativa y empleando diferentes ángulos de escaneo. En cuarto lugar, se caracteriza la oclusión de la señal a lo largo de la estructura vertical del bosque empleando y comparando tres tipos diferentes de láser escáner (ALS_{FW}, ALS_D y láser escáner terrestre: TLS, por sus siglas en inglés), determinando así sus limitaciones en la detección de material vegetativo en dos ecosistemas forestales diferenciados: el boreal y el mediterráneo. Para cuantificar la oclusión de la señal a lo largo de la estructura vertical del bosque se propone un nuevo parámetro, la tasa de reducción del pulso, basada en el porcentaje de haces láser bloqueados antes de alcanzar una posición dada. En quinto lugar, se evalúa la forma en que se detectan y determinan las clases de densidad de sotobosque mediante

los diferentes tipos de ALS. Se compararon los perfiles de distribución vertical en los estratos inferiores descritos por el ALS_{FW} y el ALS_D con respecto a los descritos por el TLS, utilizando este último como referencia. Asimismo, se determinaron las clases de densidad de sotobosque aplicando la curva Lorenz y el índice Gini a partir de los perfiles de distribución vertical descritos por ALS_{FW} y ALS_D. Finalmente, se aplican y evalúan las nuevas métricas ALS_{FW} basadas en la voxelización, utilizando como referencia los atributos extraídos a partir del TLS, para estimar la altura, la cobertura y el volumen del sotobosque en un ecosistema mediterráneo.

Los resultados muestran que las variaciones de los valores de las métricas ALS_{FW} se pueden reducir empleando una densidad de pulso mínima o incrementando el tamaño de vóxel y modificando el valor de asignación. Debido a que los atributos forestales se estiman mediante datos ALS_{FW}, también se ven influenciados por la densidad de pulsos. Esta influencia también se puede reducir incrementando el tamaño de vóxel o modificando el método de regresión. Asimismo, los valores de las métricas ALS_{FW} y la estimación de atributos de combustibilidad forestal también se ven influenciados por el ángulo de escaneo. Esta influencia se puede reducir, pero no eliminar por completo, aplicando la corrección radiométrica.

Por otro lado, se observó una dependencia en la detección de la distribución vertical con respecto a la oclusión. El grado de oclusión a lo largo de la estructura vertical se puede cuantificar mediante la tasa de reducción del pulso y, por lo tanto, se puede estimar la fiabilidad en la caracterización de la distribución vertical. En este sentido, el ALS (ALS_D y ALS_{FW}) demostró ser útil en la detección del sotobosque, obteniendo mucha mayor precisión con el ALS_{FW}. Este último demostró su potencial para la detección y determinación de las clases de densidad de sotobosque en un bosque boreal y otro mediterráneo mediante el uso del índice Gini, así como para la estimación de la altura, la cobertura y el volumen del sotobosque en bosques mediterráneos.

La utilización de los datos ALS_D es suficiente para la mayoría de aplicaciones actuales del ALS. No obstante, y contrariamente al ALS_{FW}, presenta algunas limitaciones en la identificación y/o caracterización de los estratos intermedios e inferiores de la vegetación. Estas limitaciones en la detección de los estratos verticales se pueden identificar y cuantificar mediante la extracción de perfiles verticales de la tasa de reducción del pulso para los diferentes tipos de láser escáner. Por otro lado, para la utilización de datos ALS_{FW} es conveniente identificar los parámetros adecuados (densidad de pulso óptima y parámetros de voxelización) y aplicar una corrección radiométrica, como paso previo a cualquier procesado de datos. Los resultados destacan el potencial del ALS_{FW} como sustituto del TLS en la extracción de la estructura interna del bosque en áreas extensas. No obstante, a pesar de que el ALS_{FW} presenta menores limitaciones con respecto al ALS_D en la detección de los estratos intermedios e inferiores, la oclusión de la señal puede ser significativa en los estratos inferiores de bosques que presenten doseles arbóreos altos y una gran densidad de vegetación en su estructura interna (por ejemplo, áreas tropicales), conllevando una falta de identificación del material vegetativo. Estos hallazgos en la caracterización de la estructura vertical del

bosque y, en particular, del sotobosque, son relevantes para su aplicación en la planificación del desbroce de los bosques y de las tareas de mantenimiento para la prevención de los incendios forestales, la modelización del comportamiento del fuego o la conservación de la biodiversidad, entre otras aplicaciones.