

## ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE BIOMASA Y DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> GENERADAS POR LA COMBUSTIÓN DE MASAS FORESTALES DE *PINUS HALEPENSIS* MILL. EN EL INCENDIO DEL MUNICIPIO DE LUNA (ARAGÓN), MEDIANTE DATOS LiDAR-PNOA.

Darío Domingo-Ruiz<sup>1</sup>, M. Teresa Lamelas-Gracia<sup>1,2</sup>, Antonio L. Montealegre-Gracia<sup>1</sup>, Juan de la Riva-Fernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Zaragoza, Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, Grupo GEOFOREST-IUCA, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España. [domingo@unizar.es](mailto:domingo@unizar.es); [tlamelas@unizar.es](mailto:tlamelas@unizar.es); [monteale@unizar.es](mailto:monteale@unizar.es); [delariva@unizar.es](mailto:delariva@unizar.es)

<sup>2</sup> Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090, Zaragoza, España. [tlamelas@unizar.es](mailto:tlamelas@unizar.es)

### RESUMEN

Los incendios forestales actúan como focos emisores de gases de efecto invernadero a la atmósfera pudiendo alterar el funcionamiento del ciclo de carbono. La disponibilidad de datos LiDAR-PNOA de baja resolución espacial (0,5 puntos/m<sup>2</sup>) con anterioridad a la ocurrencia en 2015 del incendio de Luna (Aragón), así como la idoneidad de estos datos para la estimación de la biomasa aérea total (BT), han motivado el objetivo de este trabajo, que se centra en el cálculo de la pérdida de biomasa y en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera generadas por la combustión, en el citado incendio, de masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. La BT prefuego se calculó extrapolando un modelo de regresión lineal múltiple, obtenido en un área próxima al incendio, a partir de los valores de BT estimados en 46 parcelas de campo, y de una serie de variables independientes obtenidas de la nube de puntos LiDAR. Al modelo se le aplicó una validación cruzada dejando un dato fuera, obteniéndose un coeficiente de determinación de 0,89. La posterior implementación del modelo en un SIG permitió cartografiar la BT prefuego, así como estimar la pérdida de BT producida por el fuego y las emisiones de CO<sub>2</sub>, que suponen 426.754,84 tn.

**Palabras clave:** LiDAR; biomasa total; emisiones de CO<sub>2</sub>; regresión lineal múltiple; incendio forestal

### ABSTRACT

Wildfire acts as a source of greenhouse gas emissions to the atmosphere, being able to alter the carbon cycle. The availability of LiDAR-PNOA data of low spatial resolution (0.5 points/m<sup>2</sup>) previous to the occurrence in 2015 of a wildfire in Luna (Aragón), as well as the suitability of those data to estimate total biomass (TB), determined the main objective of this research. Thus, this study focuses on the estimation of biomass losses and CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere generated by combustion of *Pinus halepensis* Mill. In this regard, prefire TB was calculated using a model obtained in a close area by applying a multivariate linear regression analysis to the TB estimated in 46 field plots and several independent variables calculated from the LiDAR point cloud. The model was validated using a leave-one-out cross-validation technique and the coefficient of determination was 0.89. The implementation of the model in a GIS allowed prefire TB mapping, as well as the estimation of TB losses caused by fire and CO<sub>2</sub> emissions, which account 426,754.84 tons.

**Keywords:** LiDAR; total biomass; CO<sub>2</sub> emissions; multiple linear regression; wildfire

### 1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen un problema ambiental y socio-económico de primer orden en los ecosistemas mediterráneos, disminuyendo la capacidad de fijación de carbono de los bosques (van der Werf *et al.*, 2006) y erigiéndose como fuentes importantes de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Seiler y Crutzen, 1980; Andreae *et al.*, 1988; Narayan *et al.*, 2007; van der Werf *et al.*, 2010; Akagi *et al.*, 2011; Wiedinmyer *et al.*,

2011). En este contexto, la estimación de la cantidad de biomasa forestal ha adquirido un interés creciente. La teledetección con sistemas LiDAR (*Light Detection and Ranging*) aeroportados está demostrando un gran potencial en la estimación de parámetros estructurales de la vegetación, como la biomasa aérea total (BT). La estimación de la biomasa consumida, empleando factores de combustión asociados a la severidad del incendio (Oliva *et al.*, 2011), así como la cuantificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Trozzi *et al.*, 2002), pueden proporcionar información acerca de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Por consiguiente, el objetivo principal del presente trabajo se centra en la estimación de la pérdida de biomasa y de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera producidas por la combustión de masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. en el incendio ocurrido en 2015 en Luna (Aragón).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Ámbito de estudio

El área de estudio se localiza en una zona quemada en el incendio de Luna de julio de 2015, que arrasó 14.263 ha de monte y afectó a diversos municipios de la comarca de Cinco Villas (Aragón). Concretamente, 2.115 ha quemadas correspondieron a masas monoespecíficas de *Pinus halepensis* Mill., fragmentadas en rodales de tamaño variable. Estos bosques presentan un sotobosque dominado por especies como *Quercus ilex* subsp. *Rotundifolia*, *Quercus coccifera*, *Juniperus oxycedrus*, *Buxus sempervirens* y *Juniperus phoenicea* (figura 1).

### 2.2 Datos LiDAR

Los datos LiDAR fueron capturados durante los meses de enero y febrero de 2011 mediante un sensor de pulsos discretos Leica ALS60 en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). El desfase temporal con la fecha de adquisición de los datos de inventario de campo, tomados entre junio y julio de 2015 (figura 1), no se consideró relevante, dado que no se habían producido cambios significativos en la estructura forestal. Tras eliminar los retornos referentes al ruido, los ficheros LiDAR se filtraron según el algoritmo de clasificación de curvatura multiescala (Evans y Hudak, 2007) y, siguiendo las recomendaciones de Montealegre *et al.* (2015), se generó un MDE con una resolución de 1 m mediante el método de interpolación "*Point-TIN-Raster*" (Renslow, 2013), que fue utilizado para normalizar las alturas de los puntos. Finalmente, utilizando los comandos "*ClipData*" y "*CloudMetrics*" de FUSION LDV 3.30, se extrajeron las estadísticas de la nube de puntos LiDAR, recortada con las delimitaciones de las parcelas de campo (figura 1).

### 2.3 Datos de campo

Los datos de campo se obtuvieron en 46 parcelas circulares de 15 m de radio (figura 1), distribuyéndose según un muestreo aleatorio estratificado en una zona próxima al incendio. El levantamiento de las parcelas de inventario se realizó empleando un GPS-GNSS Leica VIVA GS15, obteniendo una precisión planimétrica media de 0,18 m. El diámetro normal a la altura del pecho (dap) se midió a 1,3 m de altura en todos los árboles con un dap superior a 7,5 cm. Se inventariaron 1.870 árboles, a partir de los cuales se calculó la BT de las parcelas muestreadas mediante la ecuación de regresión de Montero *et al.* (2005) (ecuación 1).

$$BT(\text{kg/ha}) = \frac{CF \cdot e^{-2,0939 \cdot dap^{2,20988}}}{\text{Superficie de la parcela}} * 10.000 \quad (1)$$

Siendo CF el factor de corrección ( $CF = e^{SEE^2/2}$ ); SEE el error estándar de la estimación; e el número de Euler y dap el diámetro a la altura del pecho en cm.

### 2.4 Modelo predictivo para la estimación de la BT prefuego

Como paso previo, se preseleccionaron las variables LiDAR que presentaban una mejor correlación con la BT, calculando los coeficientes de correlación de Spearman (Rho) y analizando la significación estadística de los mismos (Watt *et al.*, 2013). Estas variables se incluyeron en el análisis de regresión lineal múltiple utilizando un proceso de selección “paso a paso”, para ajustar el modelo por el método de mínimos cuadrados. La selección del modelo se realizó considerando los estadísticos de bondad del ajuste: R<sup>2</sup> corregido, sesgo y error cuadrático medio (RMSE), comprobándose el cumplimiento de las hipótesis básicas (García *et al.*, 2012). Posteriormente, se analizó la capacidad predictiva del modelo mediante una validación cruzada dejando un dato fuera (Maltamo *et al.*, 2014). El modelo generado en una zona próxima al incendio se implementó en la zona quemada utilizando un SIG, con el fin de estimar la BT prefuego.

## 2.5 Estimación de la pérdida de BT a causa del fuego y del total de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

La estimación de la BT perdida en el incendio se realizó en tres fases: i) estimación de la severidad del incendio mediante el cálculo del índice dNBR (*differenced Normalized Burn Ratio*) (Key y Benson, 2005) a partir de las imágenes Landsat 8 OLI-TIRS prefuego (30-06-2015) y postfuego (09-07-2015); ii) delimitación de las masas de pinar quemadas a partir del Mapa Forestal de España MFE50 (MAGRAMA, 2016) y de la información LiDAR; y iii) recopilación de coeficientes de combustión asociados a bosques de coníferas en ecosistemas mediterráneos y aplicación de los factores de combustión 0,25; 0,42; y 0,57 (Oliva *et al.*, 2011) asociados a tres niveles de severidad del incendio, baja (dNBR de 100 a 269), media (dNBR de 270 a 659) y alta (dNBR de 660 a 1300), respectivamente. Posteriormente, los valores de BT perdida fueron convertidos a contenido de carbono aplicando el factor de conversión 0,499 (Montero *et al.*, 2005). Finalmente, se obtuvo el CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera en la combustión de las masas forestales analizadas utilizando la fórmula propuesta por Trozzi *et al.* (2002) (ecuación 2).

$$CO_2 = \varepsilon * \delta * C \quad (2)$$

Siendo  $\varepsilon$  la fracción del contenido de carbono emitido como CO<sub>2</sub> (0,888);  $\delta$  el factor de conversión de emisiones de carbono a emisiones de CO<sub>2</sub> expresado en toneladas (44/12); y C el contenido de carbono.

## 3. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El modelo de estimación de la BT incluye dos métricas LiDAR: el porcentaje de primeros retornos sobre 2 m y el percentil 40 (tabla 1). Ambas presentan signos positivos, indicando una relación directa y coherente con la BT. A mayor porcentaje de primeros retornos por encima de 2 m sobre el suelo, mayor será la superficie cubierta por el estrato arbóreo. Asimismo, el percentil 40 expresa que cuanto mayor es la BT, el 40 por ciento de los retornos se encuentra a mayor altura, indicador de un mayor porte de la masa forestal. Como se observa en la tabla 1, el modelo presenta un ajuste elevado, con un R<sup>2</sup> de 0,89 y un RMSE de 6.146,04 kg/ha. El sesgo presenta un valor de -0,34 lo que evidencia una ligera subestimación del modelo.

Variable	Ecuación del modelo	R <sup>2</sup>	RMSE	Sesgo
BT (kg/ha)	$1,007 * 10689,32 * e^{(0,0158 * \text{porcentaje } 1^{\circ} \text{ retornos sobre } 2 \text{ m})} * e^{(0,0713 * P_{40})}$	0,89	6.146,04	-0,34

Tabla 1. Resumen del modelo de estimación de la BT tras la validación.

El adecuado ajuste del modelo obtenido, así como los resultados alcanzados por otros autores en masas forestales similares (Cabrera *et al.*, 2014; Montealegre *et al.*, 2015), permiten extrapolar el modelo al área de pinar incendiada. Con la implementación del modelo en un SIG se estima que la BT prefuego es de 546.486,74 tn (figura 1). La aplicación de los coeficientes de combustión (de Santis *et al.*, 2010; Oliva *et al.*, 2011) ha permitido obtener la biomasa perdida durante el incendio, que alcanza las 262.659,74 tn. Finalmente, la aplicación de los factores de conversión a carbono y posteriormente a valores de CO<sub>2</sub>, ha

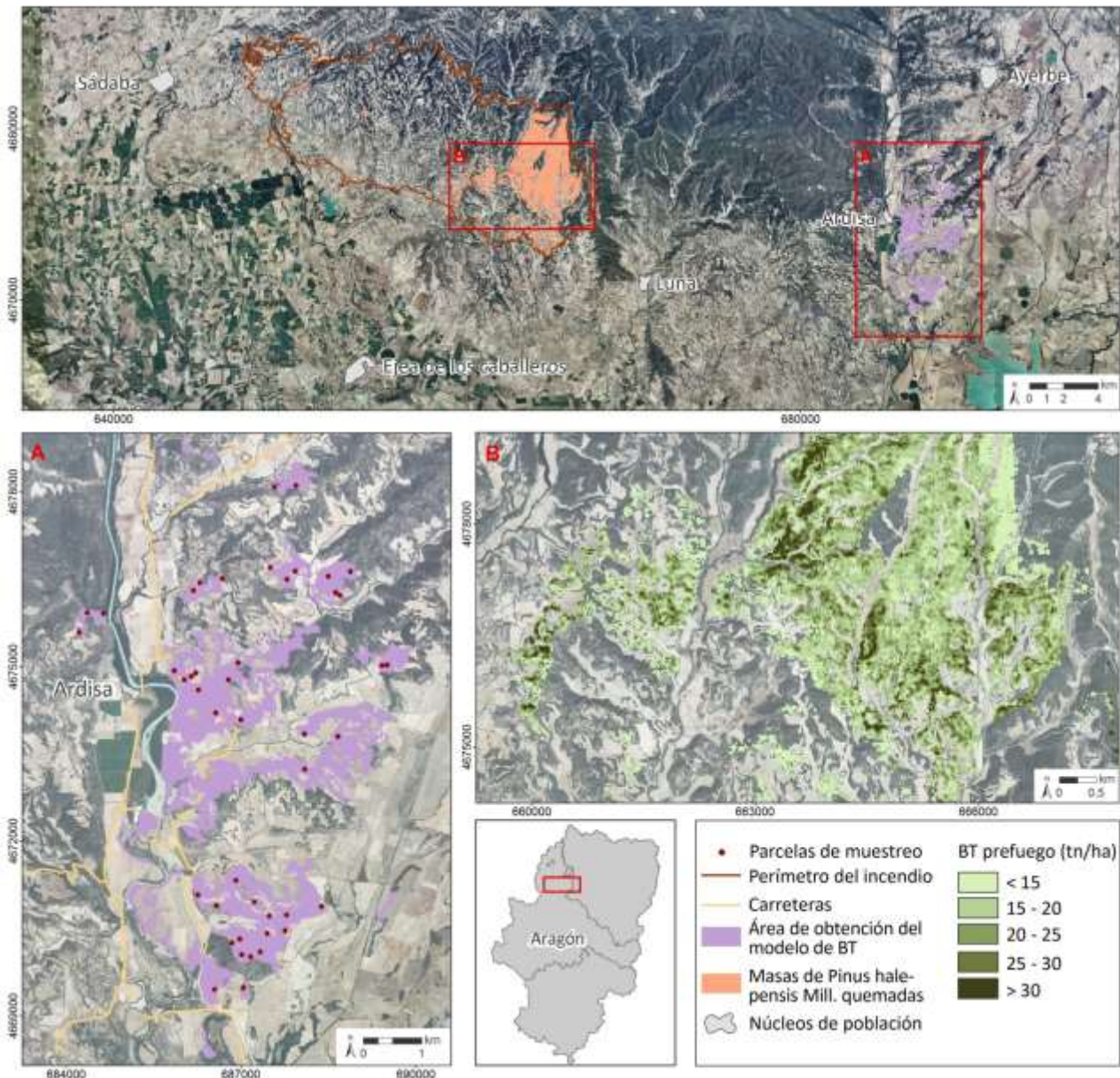


Figura 1. Área de estudio con la localización de las parcelas de campo, ubicadas en las masas de *Pinus halepensis* Mill. cercanas al incendio (A), y BT prefuego estimada en el incendio (B).

determinado que la combustión de los pinares de *Pinus halepensis* Mill. en el incendio de Luna emitió 426.754,84 tn de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo verifican la utilidad de los datos LiDAR-PNOA de baja densidad de puntos en la estimación de la BT en masas monoespecíficas de *Pinus halepensis* Mill., evitando la utilización de metodologías basadas en un intenso trabajo de campo y en un muestreo destructivo. La metodología empleada ha resultado adecuada para la estimación de la biomasa prefuego, a través de la extrapolación del modelo obtenido en un área próxima a la incendiada. Asimismo, se ha demostrado la idoneidad de las variables LiDAR, que tienen relación con parámetros forestales, para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera causadas por la combustión de las masas de pinar estudiadas.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de la beca predoctoral del Ministerio de Educación Cultura y Deporte (FPU-MECD). Los autores agradecen al Centro Universitario de la Defensa (CUD) los recursos materiales proporcionados para poder llevar a cabo el trabajo de campo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Akagi, S.K., Yokelson, R.J., Burling, I.R., Meinardi, S., Simpson, I., Blake, D.R., McMeeking, G.R., Sullivan, A., Lee, T., Kreidenweis, S., Urbanski, S., Reardon, J., Griffith, D.W.T., Johnson, T.J., Weise, D.R. (2013): "Measurements of reactive trace gases and variable O<sub>3</sub> formation rates in some South Carolina biomass burning plumes", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 3, pp. 1141–1165.

Andreae, M.O., Browell, E.V., Garstang, M., Gregory, G.L., Harris, R.C., Hill, G.F., Jacob, D.J., Pereira, M.C., Sachse, G.W., Setzer, A.W., Silva Dias, P.L., Talbot, R.W., Torres, A.L., Wofsy, S.C. (1988): "Biomass-burning emissions and associated haze layers over Amazonia", *Journal of Geophysical Research*, 93, pp. 1509-1527.

Cabrera, J., Lamelas, M.T., Montealegre, A.L., de la Riva, J. (2014): "Estimación de variables dasométricas a partir de datos LiDAR PNOA en masas regulares de *Pinus halepensis* Mill.", en Ramón, A. (Ed.): *Tecnologías de la información para nuevas formas de ver el territorio*, Alicante, Universidad de Alicante, pp. 123-129. 25-27 julio de 2014, Alicante, XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica.

De Santis, A., Asner, G.P., Vaughan, P.J., Knapp, D.E. (2010): "Mapping burn severity and burning efficiency in California using simulation models and Landsat imagery", *Remote Sensing of Environment*, 114, pp. 1535-1545.

Evans, J.S., Hudak, A.T. (2007): "A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 4, pp. 1029-1038.

García, D., Godino, M., Mauro, F. (2012): *Lidar: Aplicación Práctica Al Inventario Forestal*. Editorial Academica Española.

Key, C.H., Benson, N. (2005): "Landscape Assessment: Ground Measure of Severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the normalized burn ratio", en Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Gangi, L.J. (Eds.): *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. Ogden, UT, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164.

MAGRAMA (2016): *Mapa Forestal de España 1:50.000 (MFE50)*. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50.aspx>, consulta en marzo de 2016, Madrid, Banco de Datos de la Naturaleza, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Maltamo, M., Naesset, E., Vauhkonen, J. (2014): *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies*. Londres, Springer.

Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J., García-Martín, A., Escribano, F. (2015): "Cartografía de la biomasa aérea total en masas de *Pinus halepensis* Mill. en el entorno de Zaragoza mediante datos LiDAR-PNOA y trabajo de campo", en de la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., Rodrigues, M. (Eds.): *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. Zaragoza, Universidad de Zaragoza – AGE, pp. 769-776. 28-30 octubre de 2015, Zaragoza, XXIV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles.

Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. (2005): *Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles*. Madrid, Monografías INIA.

Narayan, C., Fernandes, P.M., van Brusselen, J., Schuck, A. (2007): "Potential for CO<sub>2</sub> emissions mitigation in Europe through prescribed burning in the context of the Kyoto Protocol", *Forest Ecology and Management*, 251, pp. 164-173.

Oliva, P., Chuvieco, E. (2011): "Towards a dynamic burning efficiency factor", en San-Miguel, J., Gitas, I., Camia, A., Oliveira, S. (Ed.): *Advances in Remote Sensing and GIS applications in Forest Fire Management: From local to global assessment*. Luxemburgo, JRC66634 Scientific and Technical Reports, Publications Office of the European Union, pp. 51-56. 20-21 octubre de 2011, Stresa, Italia, 8th International EARSeL FF-SIG Workshop.

Renslow, M. (2013): *Manual of Airborne Topographic Lidar*. Bethesda, MD, The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Seiler, W., Crutzen, P.J. (1980): "Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning", *Climate Change*, 2, pp. 207-247.

Trozzi, C., Vaccaro, R., Piscitello, E. (2002): "Emissions estimate from forest fires: methodology, software and European case studies", en *Proceedings of the 11th International Emission Inventory Conference. Emission Inventories - Partnering for the Future*, Atlanta, GA, U.S. Environmental Protection Agency, disponible en <http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei11>. 15-18 de abril de 2002, Atlanta, GA, EPA 11th International Emission Inventory Conference.

van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Collatz, G.J., Kasibhatla, P.S., Arellano, A.F. (2006): "Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, pp. 3423-3441.

van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Collatz, G.J., Mu, M., Kasibhatla, P.S., Morton, D.C., DeFries, R.S., Jin, Y., van Leeuwen, T.T. (2010): "Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009)", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, pp. 11707-11735

Watt, M., Meredith, A., Watt, P., Gunn, A. (2013): "Use of LiDAR to estimate stand characteristics for thinning operations in young Douglas-fir plantations", *New Zealand Journal of Forestry Science*, 43, 18, pp. 1-10.

Wiedinmyer, C., Akagi, S.K., Yokelson, R.J., Emmons, L.K., Al-Saadi, J.A., Orlando, J.J., Soja, A.J. (2011): "The Fire Inventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning", *Geoscientific Model Development*, 4, pp. 625-641.