

Mapeado del perímetro de grandes incendios a partir del interpolado de puntos de calor en México.

Carlos Ivan Briones-Herrera^{1*}, Daniel José Vega-Nieva¹, Norma Monjarás-Vega¹, Pablito Marcelo López-Serrano¹, José Javier Corral-Rivas¹, Ernesto Alvarado Celestino², Stéfano Arellano Pérez³, Juan Gabriel Álvarez González³, Ana Daria Ruiz González³, William Matthew Jolly⁴

¹Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales, 34120, carlos.briones.ipi@gmail.com. Técnico en laboratorio de geomática, FCF, UJED.

²University of Washington, College of Forest Resources, Applied Research Group on Fire and the Environment, 98195, alvarado@uw.edu

³Universidad de Santiago de Compostela, Escuela Politécnica Superior de Ingenierías, 27002, juangabriel.alvarez@usc.es, stefano.arellano@gmail.com, anadaria.ruiz@usc.es

⁴USDA Forest Service, Missoula Fire Sciences Laboratory, 59808, mjolly@fs.fed.us

*Autor para la correspondencia: E-mail: carlos.briones.ipi@gmail.com

Resumen

El calentamiento global ha favorecido la ocurrencia de incendios forestales y el mapeo del área quemada puede ser susceptible de mapear en tiempo casi real mediante imágenes satelitales. Tradicionalmente, el mapeo de área quemada se realiza a partir de cambios mensuales de reflectancia y presencia de puntos de calor por pixel, por lo general derivándose un mes después de cada incendio. Algunos trabajos han sugerido el potencial del interpolado de puntos de calor para el mapeo del perímetro de grandes incendios en tiempo casi real, si bien estas técnicas han sido poco testadas a nivel global. Este trabajo integra dos fuentes de información de puntos de calor como lo son MODIS 1,000m y VIIRS 375m desde el año 2012 al 2018. Se compararon cuatro distancias de agregación (750, 1,000, 1,125 y 1,500m) para la interpolación "convex hull" del perímetro de incendios a partir de puntos de calor en zonas forestales de México. Las áreas de los interpolados se compararon con el producto de área quemada MODIS (C6 MCD64A1, 500m). Los resultados mostraron buen acuerdo entre ambos productos demostrando el potencial que tiene el interpolado de puntos de calor para el mapeo directo de áreas quemadas de grandes incendios. Estas agregaciones estarán disponibles en el Sistema de Predicción de Incendios Forestales de México junto a sus históricos, permitiendo apoyar el monitoreo y la planeación estratégica en tiempo casi real. Estas distancias de agregación podrían ser calibradas para los tipos de vegetación mexicana en futuros estudios.

Palabras clave: Área quemada; MODIS; VIIRS; Incendios forestales; Puntos de calor.

Introducción

Existen diversas técnicas en cuanto al mapeo de área quemada se refiere y quizás el enfoque más común ha sido asumir que el área quemada es proporcional a conteos simples de píxeles en los que se detecta fuego o puntos de calor (Chuvienco *et al.*, 2019). Los puntos de calor son detectados a través de umbrales en los canales medio e infrarrojo térmico a una resolución espacial de 1km (Giglio *et al.*, 2009), este algoritmo ha sufrido mejoras para detectar pequeños incendios y asignarles una fecha de quema con mayor precisión en la clasificación de píxeles de 500m de resolución espacial como quemados o no, resultando en el producto de área quemada C6 MCD64A1 (Giglio *et al.*, 2016)

La falta de datos globales en tiempo real y a largo plazo ha significado que los puntos de calor disponibles en tiempo casi real a menudo se deban emplear como una aproximación para estimar el área quemada (van der Werf *et al.*, 2003; Hantson *et al.*, 2013; Giglio *et al.*, 2016;2018). En este sentido algunos esfuerzos globales proponen el método de la unión de píxeles para mapeo de área quemada e.g. Oliva and Schroeder, (2015) proponen agregar los píxeles contiguos detectados como quemados en imágenes de VIIRS (375m), obteniendo el perímetro total del incendio con una forma de borde cuadrado que comparan con perímetros de forma irregular obtenidos del dNBR en 10 imágenes Landsat seleccionadas representantes de los distintos tipos de vegetación, clasificando los distintos tipos de error entre el acuerdo de los dos productos.

En otros trabajos se ha estudiado el interpolado al conglomerado de puntos de calor para el mapeo del perímetro de grandes incendios en tiempo casi real, siendo una técnica compleja tal y como lo describe Chiaraviglio *et al.*, (2016) en los que se compara el área total obtenida por agregación de puntos de calor MODIS en dos incendios de Europa empleando el "alpha shape" algoritmo (variación del algoritmo convex hull) y los compara con perímetros de incendios ocurridos en Europa en los años 2012 y 2014 obtenidos de la base de datos EFFIS. Al ser una técnica para obtener perímetros en tiempo casi real la resolución espectral del radiómetro de imágenes infrarrojas visibles (VIIRS) a bordo del satélite Asociación Nacional de Orbita Polar Suomi (Suomi National Polar-orbiting Partnership, S-NPP), lanzado en el año 2011 brinda un mayor potencial para la detección de pequeños incendios por tener una mayor resolución temporal y espacial (375m) (Schroeder *et al.* 2014; Csiszar *et al.*, 2014), comparada con la capacidad de MODIS para detectar pequeños incendios que oscilan aproximadamente de 120 a 200ha totales (Giglio *et al.*, 2009).

Los trabajos que han testado el potencial de la agregación de puntos de calor particularmente de VIIRS son escasos, e.g. Artes *et al.*, (2017) calibró el algoritmo alpha shape algoritmo propuesto por Chiaraviglio *et al.*, (2016) para incendios ocurridos en la sesión de incendios del 2016 en Europa, siendo un método poco probado nivel mundial en grandes superficies y para largos periodos de estudio, este estudio propone

obtener de manera automática el dNBR de imágenes Sentinel para el mapeo de la severidad del área quemada de un incendio ocurrido en Portugal en 2016 empleando como entrada el perímetro obtenido por la agregación de puntos de calor.

El Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales (European Forest Fire Information System, EFFIS), actualmente realiza la agregación de puntos de calor en tiempo casi real en colaboración con la NASA para el monitoreo y mapeo del perímetro de incendios forestales en tiempo casi real (Justice *et al.*, 2013; Artés *et al.*, 2017).

El presente estudio tiene como objetivo calibrar las distintas distancias de agregación al conglomerado de puntos de calor en el área forestal de México con la finalidad de generar mapas de perímetros de incendios, mejorando la estrategia de combate y supresión de incendios en México en tiempo casi real (Oliva and Schroeder, *et al.*, 2015; Chiaraviglio *et al.*, 2016; Vega-Nieva *et al.*, 2019). Estos perímetros estarán disponibles junto con los históricos de área quemada en el Sistema Nacional de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México.

Materiales y métodos

El área de estudio comprendió la república mexicana, para el análisis se excluyeron zonas que correspondían con agricultura, asentamientos humanos y cuerpos de agua, de acuerdo a INEGI Mapa de Uso de Suelo VI (2014), (1:250,000). Se emplearon los puntos de calor del período de 2012 a 2018 de MODIS y VIIRS, estos fueron descargados del Sistema de Información de Incendios para la Gestión de Recursos (*The Fire Information for Resource Management System*, FIRMS), provenientes del espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, MODIS, C6, 1,000m) y del conjunto de radiómetros de imágenes de infrarrojos visibles (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*, VIIRS, V1, 375m). Los perímetros de área quemada utilizados fueron del periodo 2012 a 2018 de manera mensual, estos se descargaron del servidor FTP de la Universidad de Maryland, producto que proviene de la colección de imágenes C6 MCD64A1 a una resolución espacial de 500m descrito en Giglio *et al.*, (2018).

Los perímetros a partir del acumulado mensual de puntos de calor MODIS y VIIRS fueron obtenidos mediante la herramienta "*aggregate points*" a cuatro distancias de agregación (750, 1,000, 1,125 y 1,500m) esta envolvente se basa en el algoritmo "*convex hull*", modulo precargado en el software ArcGIS (ESRI; 2011, Redlands, CA, USA).

Para testear los perímetros se emplearon las áreas quemadas del producto C6 MCD64A1 desde 2012 a 2018, siendo de los pocos trabajos que abordan un periodo de validación grande a diferencia de los trabajos que toman días (Veraverbeke *et al.*, 2015), algunos que consideran meses (Artes *et al.*, 2017) y otros e.g. Chiaraviglio *et al.*, (2016) que tomaron dos incendios de corta duración (3 a 6 días) como objeto de estudio.

Estas fueron comparadas con aquellas áreas que ocurrieron en el mismo mes, año y que espacialmente compartían la misma ubicación que las áreas quemadas del producto C6 MCD64A1.

Se emplearon modelos lineales para predecir el área quemada C6 MCD64A1 a partir del interpolado al acumulado mensual de puntos de calor a 750, 1,000, 1,125 y 1,500m, tanto para nivel objeto o superficie de cada incendio como para superficie total mensual utilizando la siguiente ecuación (1):

Forma matemática

$$BA = a * x$$

BA = Área quemada MODIS C6 MCD64A1 (ha), a = parámetro del modelo, x = agregación de puntos de calor (ha). El modelo fue ajustado con regresión lineal empleando el comando "lm" del software R (R Core Team, 2017 Vienna, Austria). Se evaluaron los modelos candidatos utilizando el coeficiente de determinación ajustado de regresión lineal (R^2_{aj}) como criterio estadístico, junto con el error cuadrático medio (RECM) y el sesgo del modelo (Sesgo) (Ryan, 1997).

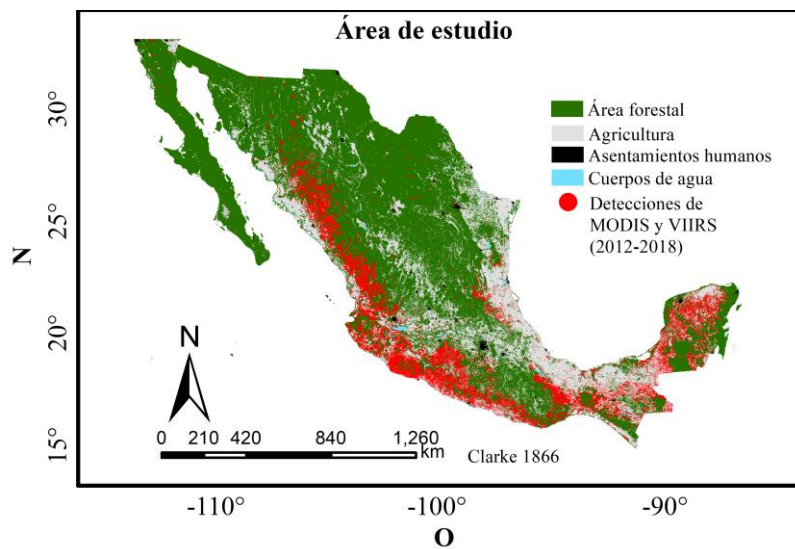


Figura 1. Mapa del área de estudio considerando el mapa de Uso de Suelo Serie VI (2014), 1:250,000, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014). Áreas forestales en verde y áreas no forestales en gris, Asentamientos humanos en negro, los cuerpos de agua en azul y las detecciones de puntos de calor MODIS y VIIRS de 2012 a 2018 en rojo, de acuerdo con INEGI Mapa de Uso de Suelo VI (2014), (1:250,000).

Resultados y discusión

Las estimaciones y el intervalo de confianza de los parámetros del modelo lineal y los valores de las estadísticas de la bondad de ajuste para cada región se muestran en la Tabla 1. La bondad de ajuste para las distancias de agregación de puntos de calor a 750, 1,000, 1,125 y 1,500m

para el período de estudio (2012-2018) varió entre sí. Las mejores estadísticas de la bondad del ajuste de la función lineal para el nivel incendio individual se obtuvieron para la distancia 1,125m, con un valor R^2 de 0.54 y un error del 43 %.

En el ajuste de la suma mensual de superficie quemada las mejores estadísticas se obtuvieron para las distancias 750 y 1,000m, con un valor R^2 0.94 y un error del 32 % (Tabla 1). Seguido de la distancia 1,1125m con $R^2 = 0.94$ y error del 39 %.

El parámetro de escala del parámetro de la función lineal (a), que influye en el valor de la distancia de agregación, varió de 0.3 a 1.7, en ambos niveles a nivel incendio individual y en la suma mensual de superficie quemada. La distancia a 1,125m obtuvo el valor más cercano a 1 con un valor de 1.14. Los menores valores de los coeficientes de área quemada posiblemente se explican por la contribución de los pequeños incendios que si son detectados por los puntos de calor a diferencia del producto de área quemada C6 MCD64A1 (Randerson *et al.*, 2012)

Los valores predichos y observados y la bondad de ajuste a nivel de incendio individual se muestran en la figura 1. La evolución de la suma mensual de superficie de área quemada para las distintas distancias de agregación se muestra en la Figura 2 junto con los valores predichos, observados y la bondad de ajuste.

Tabla 1. Coeficiente a y estadísticas de bondad de ajuste de los mejores modelos para predecir la superficie quemada a partir de la agregación de puntos de calor para nivel objeto o superficie de cada incendio y suma mensual de superficie quemada.

Dag. (m)	Incendio individual				Suma mensual de superficie quemada			
	Coef. a	R^2 aj	RECM (ha)	sesgo (ha)	Coef. a	R^2 aj	RECM (ha)	sesgo (ha)
750	1.7313 (±0.0531)	0.41	1,368	65	1.2240 (±0.0308)	0.94	28,799	8,625
1,000	1.2657 (±0.0277)	0.50	1,231	18	0.7510 (±0.0186)	0.94	29,406	9,851
1,125	1.1355 (±0.0223)	0.54	1,185	-9	0.6060 (±0.0178)	0.92	34,917	12,381
1,500	0.8150 (±0.0158)	0.41	1,315	-55	0.3268 (±0.0110)	0.89	40,540	14,837

Dónde: Dag.: Distancia de agregación en función al modelo lineal seleccionado (unidades en metros); Coef. a: es el parámetro estimado por la función lineal ajustado para la predicción de superficie quemada a partir de la agregación de puntos de calor (intervalos de confianza entre paréntesis); R^2 aj: Coeficiente de determinación ajustado; RECM: Raíz del error cuadrático medio (unidades en ha); sesgo: sesgo del modelo (unidades en ha).

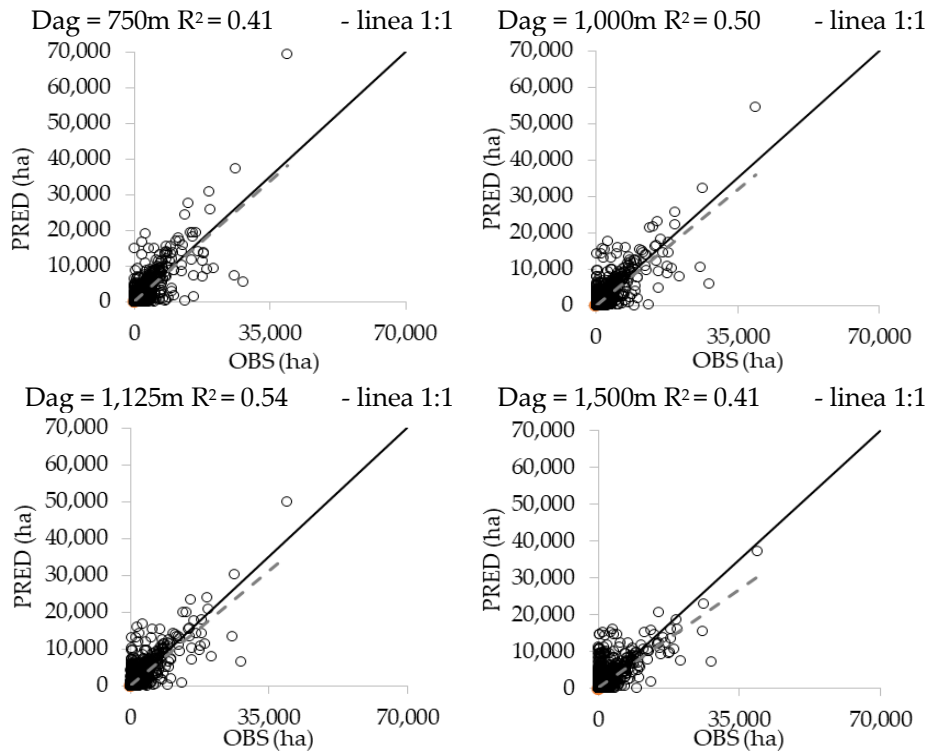
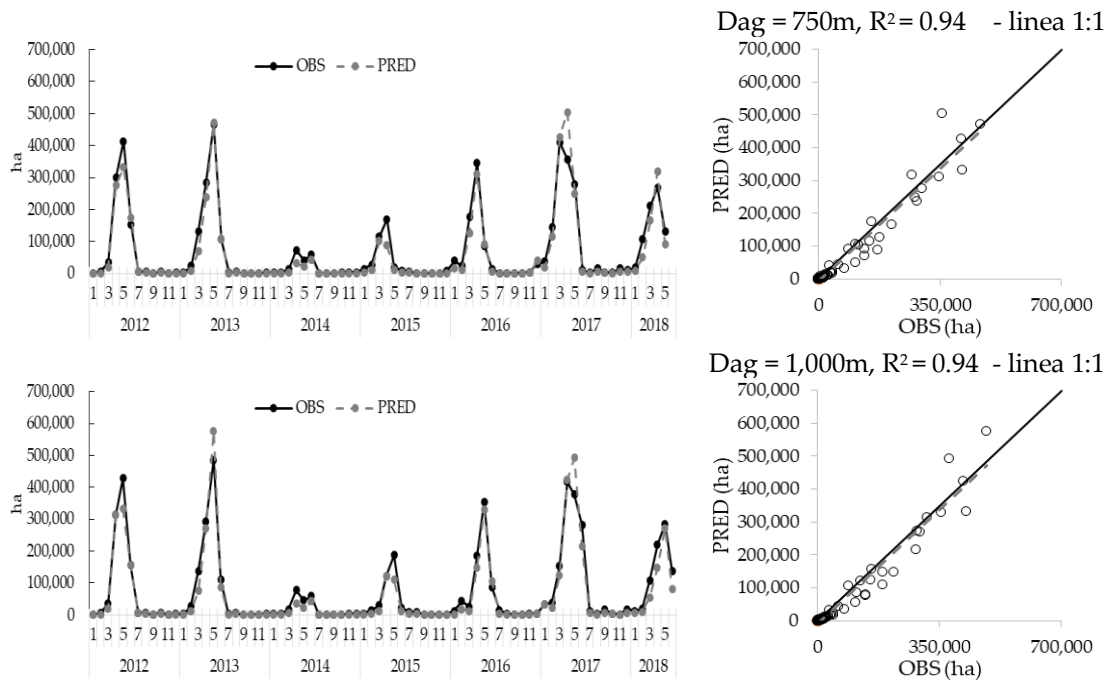


Figura 1. PRED: hectáreas predichas (ha) (eje Y); OBS: hectáreas observadas (ha) (eje X); Dag: distancia de agregación (m); La línea continua representa la línea 1:1 y la línea punteada representa la relación entre observado y predicho de la regresión lineal.



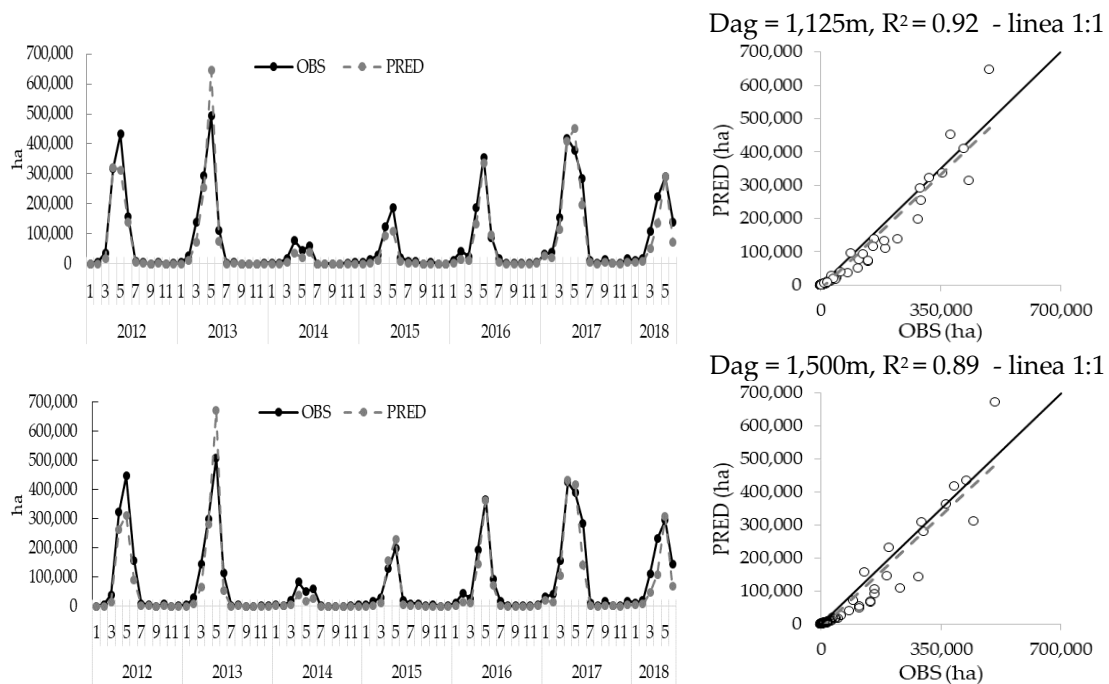


Figura 2. Izq. Evolución de superficie quemada predicha y observada mensual de 2012 a 2018 para cada distancia de agregación PRED: hectáreas predichas línea punteada en gris (unidades en ha); OBS: hectáreas observadas línea continua en negro (ha); Der. PRED: hectáreas predichas (ha) (eje Y); OBS: hectáreas observadas (ha) (eje X); Dag: distancia de agregación (m); La línea continua representa la línea 1:1 y la línea punteada representa la relación entre observado y predicho de la regresión lineal.

Los resultados hacen creer que para el ajuste individual el buen acuerdo de la agregación de puntos de calor con perímetros de área quemada C6 MCD64A1 se deba al análisis en conjunto de siete años de estudio que incluye pequeños y grandes incendios. En este sentido presumimos que la relación entre la agregación de puntos de calor y el área quemada observada es influida por el tamaño del incendio (Randerson *et al.*, 2012), siendo los pequeños incendios difíciles de mapear en comparación con los grandes incendios, aunada a la menor la capacidad de detección de pequeños incendios del producto C6 MCD64A1 comparada a la de los puntos de calor especialmente de VIIRS con resolución espacial de 375m (Giglio *et al* 2006; Oliva and Schroeder, *et al.*, 2015; Schroeder *et al.* 2014; Csiszar *et al.*, 2014), en este sentido nuestro ajuste fue calibrado para pequeños y grandes incendios, posiblemente algunos incendios pequeños no fueron detectados por los satélites siendo estos los de mayor incertidumbre a diferencia de los grandes donde ocurre lo contrario (Randerson *et al.*, 2012; Giglio *et al.*, 2018).

La capacidad del satélite para detectar los puntos de calor correspondientes al incendio podría verse influida por múltiples factores (Hawbaker *et al.*, 2008; Giglio *et al.*, 2016) entre ellos las características de los combustibles (Hanston *et al.*, 2013) y las distintas regiones

forestales determinadas por el clima (Briones-Herrera *et al.*, 2019) que en su conjunto definen el comportamiento del fuego especialmente la velocidad de propagación (Scott y Burgan, 2005).

Este estudio corrobora el potencial del interpolado de puntos de calor para el mapeado de perímetros de incendios en tiempo casi real, diferenciándose de estudios que han usado el número de puntos de calor para calcular la suma mensual de superficie quemada, derivándose un mes después (Giglio *et al.*, 2006; van der Werf *et al.*, 2017).

Para nuestro conocimiento este trabajo es el primer estudio que toma en cuenta la relación individual y la suma mensual de superficie quemada a partir del interpolado de puntos de calor en grandes superficies territoriales y para largos periodo de estudios a diferencia de trabajos previos que toman escenas locales que resultan en pequeñas extensiones geográficas (Oliva and Schroeder, *et al.*, 2015) y periodos de tiempo más cortos que consideran incendios ocurridos en una sola temporada (Chiaraviglio *et al.*, 2016; Artés *et al.*, 2017).

Una ventaja a destacar de este estudio a diferencia de otros con algoritmos más complejos (Chiaraviglio *et al.*, 2016) es la implementación de un algoritmo sencillo y de uso en software sig, que podría ser una herramienta operacional para el mapeo de área quemada en tiempo casi real por ejemplo Artés *et al.*, 2017 describen como lo implementan en el Sistema Europeo y reportan como puede ayudar a mejorar la planeación, estrategia de combate y específicamente a obtener estimas de área quemada en tiempo casi real.

En este trabajo se propone particularmente la técnica de agregación de puntos de calor de dos fuentes de información (MODIS y VIIRS) para el mapeo de perímetros de incendios, con ello pretendemos mejorar las estimas de área quemada en tiempo casi real con menor costo y de uso operacional para pequeños y grandes incendios, ayudando en la mejora de las estimas de área quemada, siendo una herramienta susceptible a ser calibrada en futuros estudios para los distintos tipos de combustibles y regiones de México que están determinadas por el clima (Hanston *et al.*, 2013; Vega-Nieva *et al.*, 2018; Briones-Herrera *et al.*, 2019).

Conclusiones

Este trabajo toma en cuenta la relación individual y mensual de la agregación al conglomerado de los puntos de calor con el área quemada MODIS (C6 MCD64A1) a gran superficie, sirviendo para el mapeo de área quemada a escala nacional en tiempo casi real. La distancia 1,125m mostró el mejor acuerdo para predecir el área quemada a nivel individual (C6 MCD64A1) y una buena capacidad predictiva para la suma de área quemada.

La interpolación de puntos de calor para la generación de perímetros a partir del acumulado de puntos de calor MODIS y VIIRS tuvieron buen acuerdo con el producto de área quemada C6 MCD64A1, confirmando el

potencial que tiene el acumulado de puntos de calor para mapear el perímetro de grandes incendios en tiempo casi real.

La estrategia de modelación presentada basada en puntos de calor puede ser replicada en otros países o regiones. Estas podrían ser calibradas en trabajos futuros para los distintos tipos de combustibles y regiones en México e inclusive podrían ser validadas con perímetros referentes de la verdad provenientes de imágenes Landsat y Sentinel de alta resolución y a gran escala. Estos perímetros serán implementados en el Sistema de Predicción de Incendios Forestales de México, contando con disponibilidad de consulta de perímetros históricos y actuales de área quemada.

Agradecimientos

Se agradece al personal de CONAFOR por proporcionar soporte durante el proyecto. El financiamiento para este trabajo fue proporcionado por el Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica y Forestal, proyecto CONAFOR / CONACYT-2018-C02-B-S-131553, "Reforzamiento al sistema nacional de predicción de peligro de incendios forestales de México para el pronóstico de conglomerados y área quemada".

Referencias

- Artés, T. *et al.*, 2017. "Non-supervised method for early forest fire detection and rapid mapping", Proc. SPIE 10444, Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2017), 104440R (6 September 2017).
- Briones-Herrera, C.I. *et al.*, 2019. Modeling and Mapping Forest Fire Occurrence from Aboveground Carbon Density in Mexico. *Forests*, 10, 402.
- Chiaraviglio, N. *et al.*, "Automatic fire perimeter determination using MODIS hotspots information," 2016 IEEE 12th International Conference on e-Science (e-Science), Baltimore, MD, 2016, pp. 414-423.
- Chuvienco, E., 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation, *Remote Sensing of Environment*, 225, 2019, p.p. 45-64, ISSN 0034-4257.
- Csiszar, I. *et al.*, 2014. Active fires from the Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite: Product status and first evaluation results, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 803-816.
- ESRI. ArcGIS Desktop 10.1; Environmental Systems Research Institute: Redlands, CA, USA, 2011.
- Giglio, L. *et al.*, 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sens. Environ.* 87, 273–282.

- Giglio, L. *et al.*, 2006. Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua MODIS sensors, *J. Geophys. Res.*, 111, G02016.
- Giglio, L. *et al.*, 2009. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Rem. Sens. of Environm.* 113, 408.
- Giglio, L. *et al.*, 2016. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 178: p.p 31-41, ISSN 0034-4257.
- Giglio, L. *et al.*, 2018. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product, *Rem. Sens. of Environm.* 217, p.p. 72-85, ISSN 0034-4257.
- Hantson, S., *et al.*, 2013. Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence, *Remote Sensing of Environment*, Volume 131, 2013, Pages 152-159.
- Hawbaker, T.J. *et al.*, 2008. Detection rates of the MODIS active fire product in the United States, *Remote Sensing of Environment*, 112:5, p.p. 2656-2664, ISSN 0034-4257.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía-México). Guía Para la Interpretación de Cartografía: Uso del suelo y Vegetación. Escala 1, 250, 000: Serie VI; 2014 Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Ciudad de México, México.
- Oliva, P. and Schroeder, W. 2015. Assessment of VIIRS 375m active fire detection product for direct burned area mapping, *Rem. Sens. of Environm.* 160, 015, p. 144-155, ISSN 0034-4257.
- R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria. Available online: <https://www.R-project.org/> (accesado el 20 de Marzo del 2017).
- Randerson, J.T. *et al.*, 2012. Global burned area and biomass burning emissions from small fires, *J. Geophys. Res.*, 117, G04012.
- Ryan, T.P. *Modern Regression Methods*. In *Wiley Series in Probability and Statistics*; John Wile and Sons: New York, NY, USA, 1997; 515p.
- Schroeder, W., *et al.*, 2014. The New VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment, *Remote Sensing of Environment*, 143, 2014, 85-96, ISSN 0034-4257.
- Scott, J.H. and Burgan, R.E. 2005. *Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 78 p.
- van der Werf, G.R. *et al.*, 2017. Global fire emissions estimates during 1997–2016, *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 697–720.
- van der Werf, G.R., 2003. Carbon emissions from fires in tropical and subtropical ecosystems. *Global Change Biology*, 9: 547-562.
- Vega-Nieva, D.J., *et al.*, 2018. Developing Models to Predict the Number of Fire Hotspots from an Accumulated Fuel Dryness Index by Vegetation Type and Region in Mexico. *Forests*. 2018, 9, 190.
- Vega-Nieva, D.J., *et al.*, 2019. Temporal patterns of active fire density and its relationship with a satellite fuel greenness index by vegetation type and region in Mexico during 2003-2014. *fire ecol.* 15, 28.

Veraverbeke, S., *et al.*, 2015 Daily burned area and carbon emissions from boreal fires in Alaska, *Biogeosciences*, 12, 3579–3601.