

Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador



Forest fire hazard associated with climatic factors in Ecuador

Pazmiño, Daniel

 Daniel Pazmiño

daniel.pazmino.v@gmail.com

Universidad de Melbourne. Parkville, Australia

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN: 1390-7042

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 7, núm. 1, 2019

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 04 Diciembre 2018

Aprobación: 20 Abril 2019

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/624/6243825001/>

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1800>

Autor de correspondencia: daniel.pazmino.v@gmail.com



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

Cómo citar: Pazmiño, D. (2019). Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 7(1), 10–18. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1800>

Resumen: Los incendios forestales producen severos impactos en Ecuador. El Ministerio del Ambiente de Ecuador señala que los incendios forestales destruyeron 21,570 hectáreas en este país en 2012. Esta temporada de incendios forestales le costó al Distrito Metropolitano de Quito, la capital de Ecuador, aproximadamente 50 millones de dólares. A pesar de las pérdidas que producen los incendios forestales, se desconoce como el clima influye en la ocurrencia de los mismos en Ecuador. Este estudio es la primera investigación acerca del clima que produce incendios forestales en la región tropical andina. Esta investigación cuantifica el peligro de incendios forestales en función de variables climáticas. Para este fin, se empleó el Índice de Peligro de Incendios Forestales (FFDI) de McArthur. Se empleó este índice debido a que no existe un índice local; por otra parte, el mismo está diseñado para bosques de Eucalyptus, los cuales son muy vulnerables ante la ocurrencia de incendios forestales en los Andes de Ecuador. Este estudio determinó que el Índice de Peligro de Incendios Forestales de McArthur es una métrica útil para evaluar el riesgo de incendios forestales en la región andina de Ecuador. Usando este índice, esta investigación establece por primera vez mediante un análisis cuantitativo que la temporada de incendios forestales en esta región abarca el período julio-noviembre. Este período reporta los valores más altos del índice FFDI acumulado (entre 750 y 1000 puntos aproximadamente) en la región Andina de Ecuador para el período 1997-2012.

Palabras clave: cambio climático, variabilidad climática, meteorología, riesgos, bosques, fuego.

Abstract: Wildfires yield severe impacts in Ecuador. The Ministry of Environment of Ecuador declared that wildfires destroyed 21,570 hectares in this country in 2012. The same fire season cost to the Metropolitan District of Quito, the capital of Ecuador, approximately 50 million dollars. In spite of the losses that wildfires produce, it is still unknown how climate influences fire occurrences in Ecuador. This is the first investigation about fire weather in the tropical Andes. This research quantifies wildfire danger as a function of meteorological variables. The investigation used the McArthur's Forest Fire Danger Index. Since there is no local fire weather index, the McArthur's metric was considered a suitable choice because it was designed for Eucalyptus forests, which are dominant in wildfire-prone regions in Ecuador. This research concluded that the McArthur's Forest

Fire Danger Index is indeed a useful metric to evaluate wildfire risk in the Ecuadorian Andes. Using this index, the results show with a quantitative approach that the fire season in this region spans from July to November.

Keywords: climate change, climate variability, meteorology, risks, forests, fire.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales producen severos impactos en el Ecuador. Sin embargo, la información acerca de estos impactos es escasa y se encuentra dispersa. Los incendios forestales quemaron un área de 21,570 hectáreas en Ecuador en 2012 de acuerdo a datos del Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE, 2013). El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), la capital del país es particularmente vulnerable a esta amenaza. La vulnerabilidad es alta porque 15.4% de la población del país habita en esta ciudad. Además, la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito (SADMQ) señala que la vegetación cubre un 60.5% de su territorio (SADMQ, 2013). Los incendios forestales destruyeron 2,700 hectáreas de vegetación del DMQ en el año 2009 (Estacio y Narváez, 2012). En 2012, el área afectada por incendios forestales se incrementó a 4,882.2 hectáreas (SADMQ, 2013). Esta temporada de incendios forestales le costó al DMQ aproximadamente 50 millones de dólares (SADMQ, 2013). En 2015, los incendios forestales en Quito cobraron la vida de tres bomberos (El Comercio, 2015).

Desafortunadamente, los incendios forestales en Ecuador son muchas veces de naturaleza antropogénica (MAE, 2013). De hecho, el DMQ reportó que los humanos son responsables por el 95% de los incendios forestales en la ciudad (SADMQ, 2013). La quema de bosques para cambiar el uso de suelo a agrícola es la principal causa de incendios forestales en el país (MAE, 2013; SADMQ, 2013; Rodas, 2015). Forzar un cambio de uso de suelo para asentamientos humanos es otra causa común para la ocurrencia de incendios forestales (SADMQ, 2013). Las comunidades rurales queman desperdicios agrícolas; esta es una práctica ancestral que también fomenta los incendios forestales (Estacio y Narváez, 2012). Las personas que habitan en áreas rurales incineran residuos domésticos por la falta de servicios básicos, lo cual también es otro factor de riesgo. Finalmente, los incendios forestales ocurren por actos destructivos deliberados (MAE, 2013; SADMQ, 2013).

Los incendios forestales ocurren en todas las regiones de Ecuador. Sin embargo, la Sierra soporta la mayor cantidad de eventos. Esta región tiene grandes extensiones de bosques de Eucalyptus introducidos (Anchaluisa, 2013). Por lo tanto, la cantidad de combustible disponible para el desarrollo de incendios forestales hacen a esta la región más susceptible a este tipo de amenaza. Aunque no existen datos cuantitativos robustos, los reportes locales estiman que la temporada de incendios forestales en los Andes de Ecuador abarca el período julio-noviembre (SADMQ, 2013). Sin embargo, los meses más críticos son julio, agosto y septiembre (Estacio y Narváez, 2012; SADMQ, 2013). En la Costa y las islas Galápagos, los incendios forestales ocurren en los meses de enero a mayo (SADMQ, 2013).

A pesar de las pérdidas que producen los incendios forestales, se desconoce como el clima influye en la ocurrencia de los mismos en Ecuador. Este estudio es la primera investigación acerca del clima que produce incendios forestales en la región tropical andina. Esta investigación busca cuantificar el peligro de incendios forestales en los Andes de Ecuador en función de variables climáticas. Para este fin, se empleó el Índice de Peligro de Incendios Forestales (FFDI por sus siglas en Inglés). Se empleó este índice debido a que no existe

NOTAS DE AUTOR

daniel.pazmino.v@gmail.com

un índice local; por otra parte, el FFDI está diseñado para bosques de Eucalyptus, los mismos que son muy vulnerables ante la ocurrencia de incendios forestales en los Andes de Ecuador.

Después de la Introducción, este artículo se encuentra estructurado de la siguiente manera: se describe al clima de incendios forestales en función de las variables meteorológicas más relevantes, se explica en qué consisten los índices de peligro de incendios forestales, y describe en detalle el índice FFDI usado en esta investigación. Se presenta una caracterización del área de estudio que incluye una descripción de la geografía y clima del Ecuador con énfasis en la región andina. Se describe los datos y la metodología empleadas en esta investigación. Después se presentan los resultados y una discusión de los mismos. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

Clima de incendios forestales

Esta investigación se enfoca en el clima que produce incendios forestales. Por lo tanto, esta sección introduce algunas ideas importantes para entender este tema. En primer lugar se explica que variables meteorológicas contribuyen para que existan condiciones propicias para la ocurrencia de incendios forestales. Adicionalmente, se detalla como estas variables ejercen su influencia. Esta sección también describe como los modelos matemáticos representan el efecto del clima sobre los bosques para la ocurrencia de incendios. Se incluye también una descripción detallada del Índice de Peligro de Incendios Forestales de McArthur (FFDI por sus siglas en Inglés). En este estudio se utilizó el FFDI debido a que fue diseñado para ecosistemas en los que predomine las especies Eucalyptus. Este es el caso de Ecuador.

Variables meteorológicas

El clima que produce incendios forestales se lo estudia analizando variables como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la precipitación. El comportamiento de estas variables meteorológicas influye en cada aspecto de los incendios forestales incluyendo su ignición, velocidad de propagación e intensidad. Un incendio forestal se produce si existen elevadas temperaturas, baja humedad relativa y si los niveles de precipitación han secado a la vegetación hasta un punto inflamable. Para que ocurra un incendio forestal, también se necesita una fuente de ignición, natural o antropogénica.

La velocidad del viento contribuye en la intensidad de un incendio forestal al reducir la cantidad de humedad en la vegetación y al proveer oxígeno para la combustión (Haynes Bradstock et al., 2012). La propagación de un incendio también es controlada por el viento, que además puede incluso cambiar el flanco de avance del mismo de acuerdo con lo señalado por el Servicio Meteorológico Australiano (BoM por su siglas en inglés) (BoM, 2008).

La inflamabilidad y distribución de la vegetación influyen en la intensidad de un incendio forestal. Estas características están controladas por la precipitación en escalas de tiempo estacionales (Haynes Bradstock et al., 2012). Los suelos y la elevación también determinan la ocurrencia de incendios forestales. Suelos secos y pendientes positivas incrementan la intensidad y la velocidad de propagación de un incendio (Keetch y Byram, 1968; Haynes Bradstock et al., 2012).

Índices de peligro

El efecto de las variables meteorológicas que inciden en el clima que produce incendios forestales se ha combinado en varios modelos matemáticos diseñados como índices de peligro. Estos modelos representan la ignición, la velocidad de propagación o la intensidad de los incendios forestales. Los esfuerzos de modelación se enfocan en una variable o en una combinación de las mismas. Por ejemplo, el Índice de Peligro de Incendios

Forestales (FFDI por sus siglas en Inglés) (McArthur, 1966) cuantifica el peligro de un incendio basado en el efecto que produce el clima en la vegetación. Por lo tanto, este índice incorpora la facilidad de ignición, la velocidad de propagación y la facilidad de supresión. Por otra parte, el Índice Haines se basa en el efecto de la inestabilidad atmosférica para propagar las llamas (“spotting” en inglés) (Haines y Service, 1988). Este índice se enfoca en la velocidad de propagación y la intensidad. El Sistema Canadiense del Clima de Incendios Forestales (Van Wagner, 1974) modela los tres aspectos (ignición, la velocidad de propagación y la intensidad). En muchos casos, el modelamiento del clima que produce incendios forestales requiere de un proceso de calibración. Las calibraciones toman en cuenta condiciones locales como el tipo de vegetación y el tiempo atmosférico. Esta investigación utilizó el índice FFDI para investigar la variabilidad del clima que produce incendios forestales en Ecuador debido a que está calibrado para vegetación con especies Eucalyptus.

Índice de peligro de incendios forestales (FFDI)

Las autoridades australianas utilizan el índice FFDI para la gestión del riesgo de incendios forestales (Luke y McArthur, 1978). Este índice fue originalmente formulado por Alan Grant McArthur (McArthur, 1966, 1967). Inicialmente, los operadores usaban medidores mecánicos para calcular el índice (Luke y McArthur, 1978). Estos medidores estaban hechos de un conjunto de ruedas de cartón, los mismos que facilitaban la introducción de los datos meteorológicos para calcular el índice. El índice FFDI fue luego formulado como una ecuación (Noble et al., 1980). La ecuación que representa el índice es la siguiente (ecuación 1):

$$FFDI = 2e^{(-0.45+0.987 \ln(DF)-0.0345HR+0.0338T+0.0234v)} \quad \text{Ec. (1)}$$

En donde:

T: Temperatura media (°C)

v: Velocidad del viento (Km/h)

RH: Humedad relativa (%)

DF: Factor de sequía

El cómputo del índice requiere usar valores a una hora específica del día cuando el máximo valor de FFDI se puede alcanzar. En Australia el valor que se toma usualmente es el de las 3 pm. (Lucas, 2010).

Factor de sequía: Este factor representa el efecto de la precipitación acumulada en el contenido de agua de la vegetación que pasa a ser combustible en un incendio forestal. Griffiths (1999) desarrolló la ecuación del factor de sequía (DF por sus siglas en Inglés) y los procedimientos de cálculo. Esta contribución constituye una mejora a la fórmula propuesta por Noble et al. (1980). El factor DF oscila entre 1 y 10. Estos valores dependen del número de días desde que el último día de lluvia “significativa”. La identificación de este día requiere del análisis de los últimos 20 días consecutivos. La suma de la precipitación de todo el rango (20 días) es asignada al día con mayor precipitación (día de precipitación significativa). Este valor representa el efecto de largo plazo de la precipitación sobre la vegetación.

El factor DF también requiere el cálculo de un índice de sequía del suelo. En este contexto, la sequía del suelo representa la cantidad de lluvia necesaria para saturar, en un evento de precipitación, los 200 mm superficiales del suelo. Este índice representa el efecto de corto plazo de la precipitación sobre el suelo, y de este a su vez, sobre la vegetación. Los índices de sequía del suelo más comunes para calcular el factor DF son los propuestos por Keetch y Byram (1968) y Mount (1972). Para esta investigación se usó el índice de Keetch y Byram (1968) que usualmente se usa para el cálculo del FFDI.

Índice de sequía de Keetch y Byram: Keetch y Byram (1968) desarrollaron este índice para el Departamento de Agricultura y Bosques de los Estados Unidos. El índice usa ocho pulgadas de la capa superficial del suelo para la evaluación. Su escala oscila entre 0 y 800. Un valor de cero representa la saturación

del suelo. Los valores de precipitación diaria y temperatura máxima son fundamentales para el cálculo de este índice. Adicionalmente, el cálculo de este índice sólo es posible en lugares donde se cuente con datos de precipitación media.

Escalas de peligro del índice FFDI: El FFDI cuenta con seis escalas de peligro basadas en valores diarios del índice. Inicialmente, el FFDI fue calibrado para producir un valor máximo de 100, en función de un incendio forestal extremo ocurrido en Australia en 1939. En los últimos años las condiciones climáticas han propiciado incendios forestales que han rebasado este valor límite (Lucas, 2010). Las escalas de peligro usadas para este índice son: “bajo-moderado” (valores entre 0-11), “alto” (valores entre 12-14), “muy alto” (valores entre 25-49), “severo” (valores entre 50-74), “extremo” (valores entre 75-99) y “código rojo” (valores mayores 100).

Caracterización del área de estudio Geografía

Ecuador se encuentra localizado en la parte nor-occidental de Sudamérica (ver Figura 1). El país tiene una geografía diversa. Comprende un territorio continental ubicado entre las latitudes 01° 28' Norte y 5° 02' Sur y las longitudes 75° 11' Este y 81° 04' Este, de acuerdo al Instituto Geográfico Militar de Ecuador (IGM). El territorio nacional tiene un área total de 256,370 Km². En el año 2010, el país tenía una población de 14.5 millones de personas (Instituto Geográfico Militar, 2013). La cadena montañosa de los Andes es el rasgo geográfico más importante de Ecuador (Insel et al., 2010). Estas montañas dividen al Ecuador continental en tres regiones: Costa, Sierra y Amazonía. Cada una de estas regiones tiene diferentes características geográficas, clima y ecosistemas.



FIGURA 1
Ubicación de Ecuador

La mayoría de los incendios forestales en Ecuador ocurren en la Sierra. Los Andes en Ecuador están conformados por dos flancos: las cordilleras Oriental y Occidental. Entre estos dos flancos (que incluyen volcanes activos) existen varios valles interandinos. Varias de estas planicies se encuentran sobre los 3,000 metros sobre el nivel del mar. Estas elevaciones de gran pendiente ejercen un efecto importante sobre el clima local. El gradiente atmosférico en esta región crea las condiciones para que existan diversas zonas bioclimáticas (Pourrut et al., 1995). Sin embargo, la vegetación original de los valles andinos ha desaparecido casi por completo (Anchaluisa, 2013). La mayor parte de la vegetación endémica fue reemplazada por la especie *Eucalyptus globulus* alrededor del año 1860 (MAE, 2012). Otras especies que fueron masivamente introducidas fueron el *Pinus radiata* (de California) y el *Pinus patula* (de México). La introducción de estas especies se dio para fomentar la industria forestal (Anchaluisa, 2013).

Estas especies son susceptibles a los incendios forestales durante la época seca en los Andes de Ecuador.

Clima

Debido a que la mayoría de los incendios forestales en Ecuador ocurren en la Sierra, la caracterización climática se enfoca a esta región. Los bosques amazónicos, las corrientes oceánicas, y la topografía son los principales factores que influyen en las características del clima de los Andes tropicales (Martínez et al., 2011). Los bosques amazónicos producen una gran cantidad de vapor de agua. La topografía obliga a que esta agua se precipite en la Cordillera Oriental. La precipitación orográfica también se produce en la Cordillera Occidental. La advección de masas de aire desde el Océano Pacífico trae humedad a este flanco de los Andes. La influencia del Océano Pacífico en la variabilidad del clima de los Andes tropicales es importante. La variabilidad interanual del clima de esta región depende de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Vuille et al., 1999; Villacís et al., 2003; Martínez et al., 2011). Estas influencias crean varias regiones climáticas dentro de los Andes.

La mayor parte de los Andes ecuatorianos (entre 1500 m y 3000 m) tienen un clima “semi-húmedo mesotérmico” (Pourrut et al., 1995). La temperatura media en esta región oscila entre 8 °C y 20 °C. Las temperaturas máximas se encuentran en un rango entre 22 °C y 30 °C. Las temperaturas mínimas varían entre -4 °C y 5 °C. Las masas de aire que provienen del Océano Pacífico y de la Amazonía crean tres estaciones climáticas en la Sierra (Pourrut et al., 1995). Dos estaciones húmedas durante los periodos febrero-mayo y octubre-noviembre. Además, una temporada seca durante el período junio-septiembre. La precipitación acumulada anual varía en 800 mm y 1500 mm. La humedad relativa oscila entre 65% y 85%.

Es importante también mencionar la influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en Ecuador. ENOS es un proceso de gran escala que influye en el clima a nivel global (Bjerknes, 1966, 1969). Durante los eventos ENOS, el Océano Pacífico tropical interactúa con la atmósfera en un sistema acoplado (Bjerknes, 1969). La manifestación más común de este proceso es el calentamiento de la temperatura superficial del mar. Condiciones cálidas al este del Océano Pacífico tropical representan a la fase “El Niño” de este fenómeno. Este estado usualmente ocasiona precipitaciones superiores al promedio en las costas de Ecuador y Perú (Aceituno, 1988), mientras que produce condiciones de calor y sequía en Indonesia y Australia (Williams y Karoly, 1999; Wooster et al., 2012). Por otra parte, anomalías de frío en esta misma región del Océano Pacífico producen una fase “La Niña”, que produce en el clima el efecto contrario a la fase cálida. El fenómeno ENOS involucra una oscilación debido a que las fases cálida y fría ocurren de forma intercalada con una periodicidad de dos a 7 años de acuerdo a lo señalado por la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica de los Estados Unidos (NOAA por sus siglas en inglés) (NOAA, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

El estudio requirió el uso de observaciones meteorológicas ubicadas en los Andes de Ecuador. La Figura 2 ilustra la distribución espacial de las estaciones seleccionadas. Adicionalmente, la Tabla 1 presenta información acerca de cada una de estas estaciones. Únicamente seis estaciones disponían de datos completos a nivel diario (requisito para el cálculo del índice FFDI) para el período 1997-2012. Cada una de las estaciones posee datos cada ocho horas. Por lo tanto, los datos seleccionados para los cálculos fueron los de la 1 pm hora local (GMT 18:00). Los análisis requirieron el uso de cuatro variables meteorológicas: temperatura media, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación.

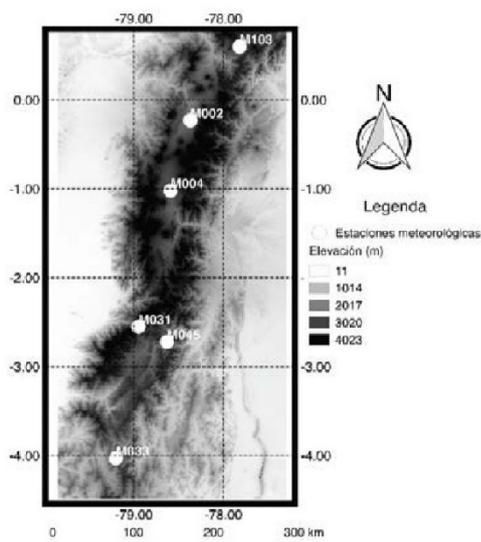
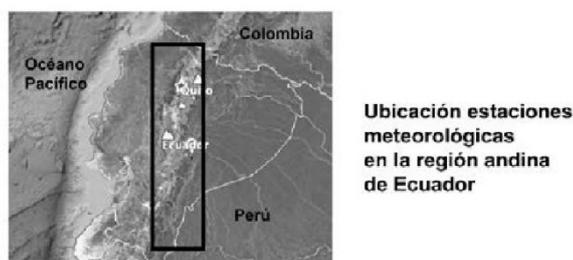


FIGURA 2
Ubicación estaciones meteorológicas en la región andina de Ecuador

TABLA 1
Estaciones meteorológicas seleccionadas para investigar el clima de incendios forestales en la región andina de Ecuador

Estación	Código	Latitud	Longitud	Elevación
La Tola	M002	0.23° S	78.37° E	2480
Rumipamba-Salcedo	M004	1.02° S	78.59° E	2685
Cañar	M031	2.55° S	78.95° E	3083
La Argelia-Loja	M033	4.03° S	79.20° E	2160
Palmas-Azuay	M045	2.72° S	78.63° E	2400
San Gabriel	M103	0.60° N	77.82° E	2860

Instituto Ecuatoriano de Meteorología e Hidrología (INAMHI)

Métodos

El estudio examinó la capacidad del índice FFDI de representar el clima de incendios forestales en los Andes de Ecuador. Este índice fue seleccionado debido a que no existe un índice local; y por otra parte, debido a que el mismo fue calibrado usando la vegetación Eucalyptus. Este tipo de vegetación domina las áreas en las que los incendios forestales son recurrentes en los Andes de Ecuador. Las validaciones del índice para Ecuador abarcan el período para el cual se disponía de información meteorológica (1997-2012). Adicionalmente, los análisis usaron la métrica acumulada del FFDI (FFDIcum). Ensayos preliminares demostraron que usar

(en este caso sumar) todos los valores diarios del índice FFDI de la temporada de incendios forestales en los análisis permite visualizar de mejor forma los cambios en el clima de incendios forestales en la región. Desafortunadamente, la falta de datos robustos con respecto a la ocurrencia de incendios forestales en Ecuador no permite una validación directa del uso del FFDI. Por lo tanto, para verificar la precisión de este índice para representar el clima de incendios en los Andes de Ecuador se ensayaron varios análisis.

En primer lugar, el estudio verificó si existe consistencia física entre las relaciones de las variables utilizadas para el cálculo del FFDI y los resultados del cálculo del índice usando correlaciones lineales (tipo Pearson). Los datos diarios de las variables meteorológicas utilizadas para el cálculo del índice fueron promediados para todas las estaciones (promedio espacial) para realizar los cálculos del FFDI y las correlaciones. El resto de análisis de este estudio utilizaron los datos meteorológicos diarios promediados.

Esta investigación evaluó si el índice FFDI representa adecuadamente la variabilidad temporal del clima que produce incendios forestales en los Andes de Ecuador. Este análisis requirió el cómputo de series de tiempo del índice FFDI. Este análisis tuvo como objetivo verificar si los resultados del cálculo del índice coinciden con los reportes locales que sugieren una mayor actividad de incendios forestales durante la temporada julio-agosto-septiembre (JAS). Además, en la sección de caracterización del área de estudio se señaló que el año 2012 se experimentó una temporada particularmente severa con respecto a la ocurrencia de incendios forestales. Por lo tanto, se investigó si la temporada de incendios forestales 2012 exhibe un valor del índice FFDI "alto".

Adicionalmente, se investigó la variabilidad a nivel mensual del clima que produce incendios forestales. Esta evaluación buscó complementar el análisis de series de tiempo del índice FFDI. Si el FFDI es una métrica adecuada, debería mostrar valores altos durante los meses julio, agosto y septiembre.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS

La Figura 3 muestra los coeficientes de correlación entre los valores del índice FFDI y sus variables. El análisis usó datos de observaciones meteorológicas para la temporada julio-agosto-septiembre (JAS) para el período 1997-2012. El gráfico presenta coeficientes de correlación en círculos sombreados para los resultados con significancia estadística mayor al 5% (usando una prueba "Student-t").

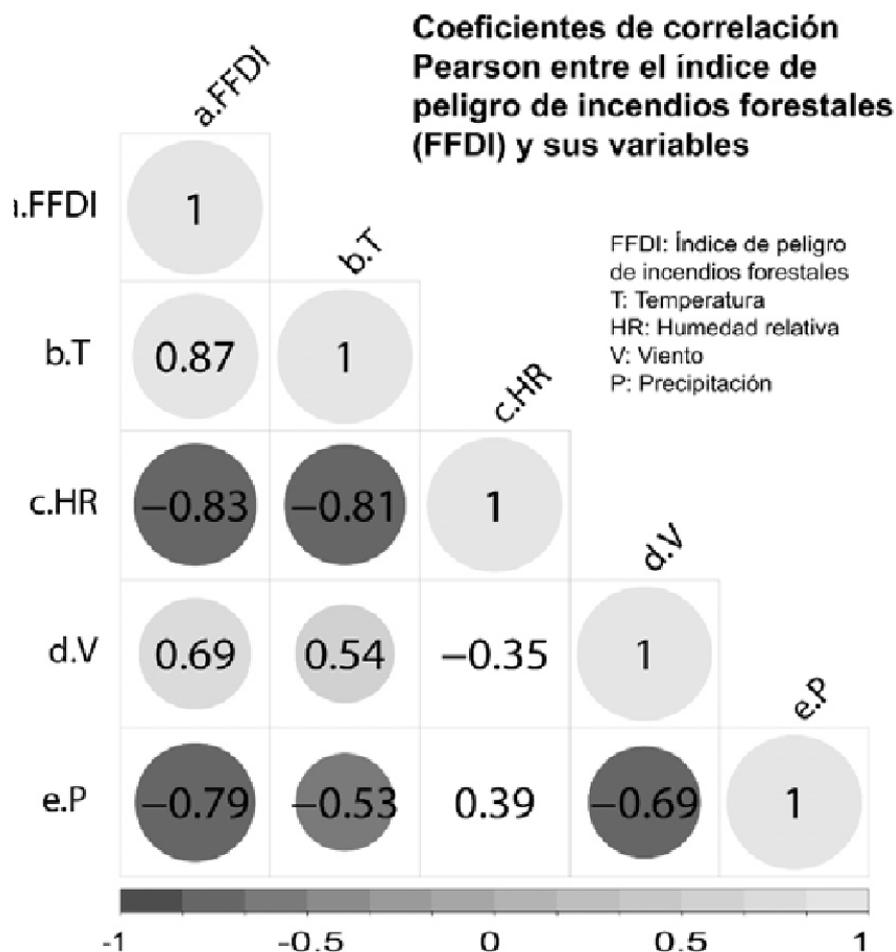


FIGURA 3
 Coeficientes de correlación Pearson entre el Índice de Peligro de Incendios Forestales (FFDI) y sus variables en la región andina de Ecuador para el período 1997-2012
 Los valores en círculos representan correlaciones con significancia estadística mayor al 5%

Los resultados demuestran consistencia física en las relaciones entre las variables meteorológicas del índice y el clima de incendios forestales representado por el índice FFDI. Por ejemplo, se constata una relación directamente proporcional de la temperatura y los valores del índice. Es decir, a mayor temperatura mayor riesgo de incendios forestales. Por otra parte, se verifica una relación inversamente proporcional entre la humedad relativa y el resultado del FFDI. Por lo tanto, mientras menos humedad relativa exista en el ambiente, el peligro de incendios forestales aumenta. Adicionalmente, los resultados demuestran que la temperatura y la humedad relativa son los parámetros más sensibles en esta región. Es decir, son las variables que más inciden en la ocurrencia de incendios forestales. Estas variables tienen coeficientes de correlación con los resultados del índice FFDI de 0.87 y -0.83 respectivamente. Por otra parte, la precipitación ($r=-0.79$) y la velocidad del viento ($r=0.69$) son menos sensibles.

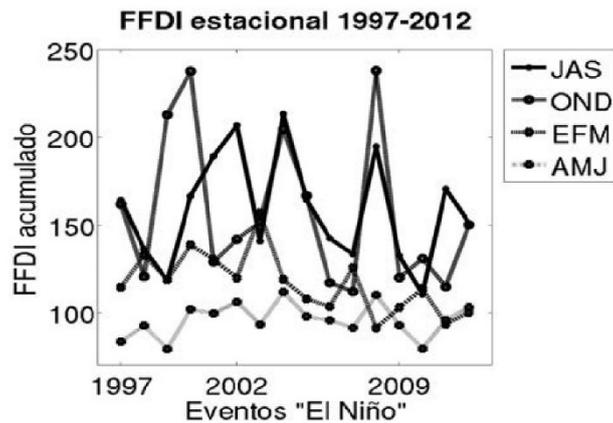


FIGURA 4

Serie de tiempo del Índice de Peligro de Incendios Forestales FFDI estacional para los períodos julio-agosto-septiembre (JAS), octubre- Noviembre-Diciembre (OND), enero-febrero-marzo (EFM), Abril-Mayo- junio (AMJ) en la región andina de Ecuador para el período 1997-2012
 Las temporadas JAS y OND son las que evidencian un riesgo más alto de ocurrencia de incendios forestales.

La Figura 4 presenta una serie de tiempo de valores de FFDI en los Andes de Ecuador. Los cálculos usaron los datos de las variables meteorológicas promediados para la región andina. Los cálculos se realizaron usando la métrica FFDI_{cum} para cuatro temporadas: Julio- agosto-septiembre (JAS), octubre- noviembre- diciembre (OND), enero-febrero-marzo (EFM), Abril-Mayo-Junio (AMJ). De conformidad con lo esperado, la temporada JAS evidenció un mayor peligro de incendios forestales en comparación con el resto de temporadas. Sorprendentemente, la temporada OND exhibió un nivel de peligro de incendios forestales de similar magnitud a la temporada JAS. De hecho, ambas temporadas registran un valor promedio de FFDI_{cum} casi igual (158 y 157 unidades respectivamente). Adicionalmente, esta figura muestra que esta región experimentó los niveles más altos de peligro de incendios forestales durante los años 2000 y 2008.

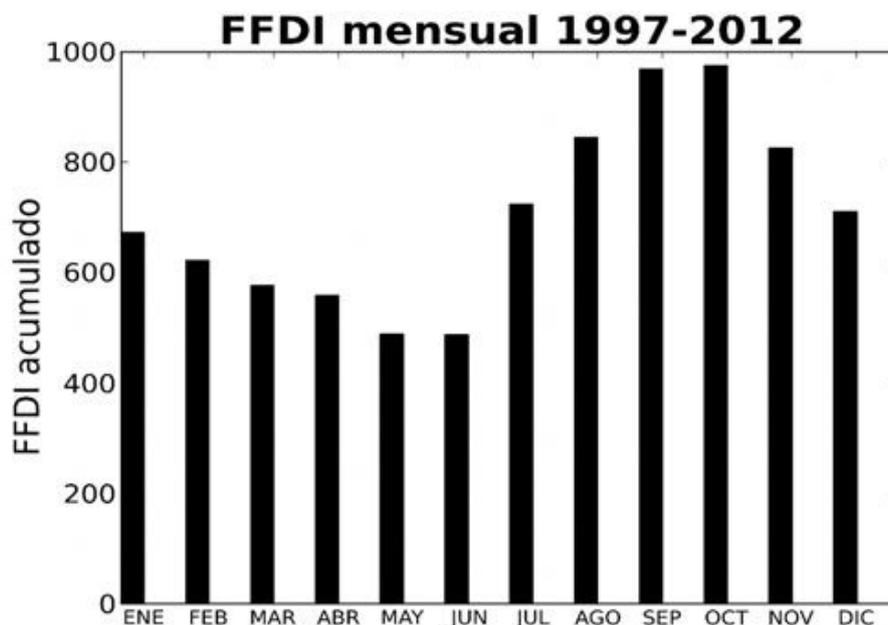


FIGURA 5

Variabilidad mensual acumulada del Índice de Peligro de Incendios Forestales (FFDI) en la región andina de Ecuador durante el período 1997- 2012

El gráfico muestra que los meses de mayor peligro de incendios comprenden el período julio-noviembre.

La Figura 5 presenta la variabilidad mensual de peligro de incendios forestales durante el período 1997-2012. La figura muestra como el peligro de incendios forestales empieza a elevarse desde el mes de julio. En los siguientes meses, el peligro de incendios forestales continúa incrementándose hasta alcanzar sus máximos valores en septiembre y octubre. Durante el período de noviembre a abril, el peligro de incendios forestales empieza a decrecer de forma constante. En los meses de mayo y junio el nivel de peligro se estabiliza antes de iniciar la temporada de incendios forestales. El período de julio a noviembre es el que mayores valores del índice FFDI acumulado reporta (entre 750 y 1000 puntos aproximadamente).

DISCUSIÓN

El índice FFDI es una métrica útil para estimar el peligro de incendios forestales en los Andes de Ecuador. Usando este índice se determinó de forma cuantitativa que los meses percibidos como de mayor peligro de incendios forestales efectivamente presentan un alto riesgo (temporada JAS). Además, se demostró que octubre y noviembre también presentan un elevado riesgo de incendios forestales.

Los resultados del cálculo del índice FFDI demuestran que los Andes de Ecuador experimentan un elevado riesgo de incendios forestales durante el período julio a noviembre. Estacio y Narvárez (2012) reportaron que el período JAS los incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) son recurrentes. Esta ciudad es la capital de Ecuador y es el lugar de donde más información se dispone acerca de incendios forestales en este país. El DMQ se encuentra ubicado en la parte norte de los Andes de Ecuador. Por lo tanto, el reporte nacional de este tipo de eventos puede tener un sesgo para esta región. De hecho, existe escasa información de ocurrencias de incendios forestales en otros sectores de la Sierra que podrían ocurrir en octubre y noviembre. SADMQ (2013) afirma que durante estos meses si ocurren incendios forestales, aunque con menor intensidad.

Los resultados de la evaluación del peligro de incendios forestales usando el índice FFDI evidencian que el año 2012 no fue el de mayor riesgo en los Andes ecuatorianos (considerando factores climáticos) en

comparación con otros años durante el periodo de estudio 1997-2012. Este resultado contrasta con los reportes locales en Quito que señalan que este año fue de gran severidad de incendios forestales (MAE, 2013; SADMQ, 2013). Por lo tanto, la magnitud de los incendios forestales del año 2012 se podría explicar por factores no climáticos (ej. mayor número de igniciones). Adicionalmente, pruebas más robustas de la efectividad del índice FFDI para estimar el peligro de incendios forestales en los Andes de Ecuador requieren necesariamente de registros confiables acerca de la ocurrencia de incendios forestales. Por lo tanto, generar este tipo de información a nivel nacional es de suma importancia para continuar investigando este problema.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio determinó que el Índice de Peligro de Incendios Forestales de McArthur (FFDI) es una métrica útil para representar el clima de incendios forestales en la región andina de Ecuador. Usando este índice, esta investigación establece por primera vez mediante un análisis cuantitativo que la temporada de incendios forestales en esta región abarca el período julio-noviembre.

El desarrollo de una base de datos robusta de ocurrencias de incendios forestales podría abrir el camino para varias oportunidades de programas de investigación asociados (ej. uso de suelo, impactos ambientales, estudios sociales, etc.). La construcción de esta base de datos requiere el uso de imágenes satelitales y reportes locales oficiales de ocurrencias de incendios forestales (incluso reportes no oficiales de periódicos podrían ser útiles).

Investigar la meteorología de días específicos en los que ocurrieron incendios forestales extremos podría proveer información valiosa para los servicios que atienden estas emergencias. Este análisis podría evaluar las características sinópticas de las variables meteorológicas asociadas al clima de incendios forestales usando datos modelados.

Finalmente, en esta investigación se estudió el clima de incendios forestales de la Sierra de Ecuador. Sin embargo, sería interesante extender el área de estudio a otras regiones andinas (ej. Colombia y Perú).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al apoyo de varias instituciones. La Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) financió el programa de doctorado del que esta investigación es parte. El Instituto Ecuatoriano de Meteorología e Hidrología (INAMHI) proporcionó la información meteorológica de este estudio. Adicionalmente, se extienden agradecimientos al Profesor David Karoly y al Dr. Alex Pezza por proporcionar críticas constructivas durante la ejecución de esta investigación.

REFERENCIAS

- Acetuno, P. (1988). On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Monthly Weather Review*, 116(3) 505–524. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<0505:OTFOTS>2.0.CO;2.
- Anchaluiza, S. (2013). *Efecto del fuego sobre la estructura, microclima y funciones ecosistémicas de los bosques introducidos de eucalipto (Eucalyptus globulus, Mytaceae) en el Distrito Metropolitano de Quito*. Universidad San Francisco de Quito. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/2899/1/109458.pdf>
- Bjerknes, J. (1966). A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus A*, 18(4), 820. doi: 10.3402/tellusa.v18i4.9712.
- Bjerknes, J. (1969) Atmospheric Teleconnections From The Equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 97(3), 163–172. doi:10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2.
- BoM. (2008). *Climate of Australia*.

- El Comercio. (2015). *Incendio forestal en Puenbo segó la vida de un tercer bombero*.
- Estacio, J. y Narváez, N. (2012). *Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ): conocimiento e intervención pública del riesgo*. Disponible en: <http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/3814#.Vdv0l2AxEWo>.
- Griffiths, D. (1999). Improved Formula for the Drought Factor in McArthur's Forest Fire Danger Meter. *Australian Forestry*, 62(2), 202–206. doi: 10.1080/00049158.1999.10674783.
- Haines, D. A. and Service, F. (1988). A lower atmosphere severity index for wild fires. *National Weather Digest*, 13(2), 23–27.
- Haynes Bradstock, R. A., Gill, A. M. and Williams, R. J. B. (2012). *Flammable Australia: Fire Regimes, Biodiversity and Ecosystems in a Changing World*. CSIRO Publishing.
- Insel, N., Poulsen, C. J. and Ehlers, T. A. (2010) Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation. *Climate Dynamics*, 35(7), 1477–1492. doi: 10.1007/s00382-009-0637-1.
- Instituto Geográfico Militar (IGM). (2013). *Contextos Históricos y Políticos Generales, en Atlas Geográfico de la República del Ecuador*. Primera ed, 350.
- Keetch, J. and Byram, G. (1968). *A Drought Index for Forest Fire Control*.
- Lucas, C.(2010). On developing a historical fire weather data-set for Australia. *Australian meteorological and Oceanographic Journal*, 60, 1–14.
- Luke, R. and McArthur, A. (1978). *Bushfires in Australia*. Edited by A. G. P. Services. Canberra.
- MAE. (2012). *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural.
- MAE. (2013). *Plan de contingencia de incendios forestales*.
- Martínez, R. et al. (2011). Synthesis of the climate of the tropical Andes, Climate change and biodiversity in the tropical Andes.
- McArthur, A. G. (1966). Weather and grassland fire behavior.
- McArthur, A. G. (1967). Fire behavior in eucalypt forests.
- Mount, A. B. (1972). The derivation and testing of a soil dryness index using run-off data.
- NOAA. (2015). Southern Oscillation Index. Disponible en: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/> [Consulta: 3 Septiembre 2015]
- Noble, I. R., Gill, A. M. and Bary, G. A. V. (1980). McArthur's fire-danger meters expressed as equation. *Austral Ecology*, 5(2), 201–203. doi: 10.1111/j.1442-9993.1980.tb01243.x.
- Pourrut, P. et al. (1995). Clima del Ecuador, en *El agua en el Ecuador*, 13–26.
- Rodas, M. (2015) *Análisis del comportamiento de incendios forestales en la cuenca del río Paute mediante sensores remotos*. Universidad de Cuenca. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22325/1/Tesis.pdf>
- SADMQ. (2013). *Los incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito evaluación 2012*.
- Villacís, M. et al. (2003). Variabilité climatique dans la sierra équatorienne en relation avec le phénomène ENSO, Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions. *Proceedings of an international symposium held at Montpellier*, April 2003. IAHS Publ. N° 278, 202–208.
- Vuille, M., Bradley, R. S. and Keimig, F. (1999). Climate Variability in the Andes of Ecuador and Its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies. *Journal of Climate*, 13(14), 2520–2535. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2.
- Van Wagner, C. E. (1974). *Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Ottawa.
- Williams, A. A. J. and Karoly, D. J. (1999). Extreme fire weather in Australia and the impact of the El Niño-Southern Oscillation. *Australian Meteorological Magazine*, 48(1), 15–22.
- Wooster, M. J., Perry, G. L. W. and Zoumas, A. (2012) Fire, drought and El Niño relationships on Borneo (Southeast Asia) in the pre-MODIS era (1980-2000). *Biogeosciences*, 9(1), 317–340. doi: 10.5194/bg-9-317-2012.