

Desarrollo y evaluación preliminar de un índice climático simple para detección estacional de incendios forestales para Victoria, Australia

Development and preliminary testing of a simple seasonal fire weather index for Victoria, Australia

Pazmiño, Daniel; Pezza, Alexandre Bernardes; Karoly, David

 Daniel Pazmiño

daniel.pazmino.v@gmail.com

Universidad de Melbourne, Parkville, Australia

Alexandre Bernardes Pezza

alex.pezza@gw.govt.nz

Universidad de Wellington, Wellington, Nueva Zelanda

 David Karoly

dkaroly@unimelb.edu.au

Universidad de Melbourne, Parkville, Australia

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN: 1390-7042

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 8, núm. 2, 2019

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 04 Diciembre 2018

Aprobación: 31 Octubre 2019

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/624/6243771005/>

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.1418>

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



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

Cómo citar: Pazmiño, D., Pezza, A. B., & Karoly, D. (2019). Desarrollo y evaluación preliminar de un índice climático simple para detección estacional de incendios forestales para Victoria, Australia. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 8(2), 39–51. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.1418>

Resumen: El Índice de Incendios Forestales de McArthur (FFDI, por sus siglas en inglés), es la herramienta más utilizada para investigar el clima de incendios forestales en Australia. Sin embargo, son escasos los avances en este campo en Australia desde el desarrollo del FFDI en 1967. El presente estudio tiene como objetivo desarrollar un índice simple para el análisis del clima de incendios forestales en Victoria, Australia. El índice propuesto “Índice Estacional Victoriano de Incendios Forestales” (VSBI por sus siglas en inglés) incorpora conocimiento local y de precursores remotos del clima de incendios forestales en esta región. Este índice fue diseñado para Victoria debido a que esta es una de las regiones más propensas a la ocurrencia de incendios forestales en el mundo. La formulación del VSBI se basó en datos locales de clima de incendios e indicadores de “El Niño Oscilación del Sur”. Este índice es una alternativa al FFDI que se basa en una compilación simple. Usando observaciones de estaciones meteorológicas, el VSBI y métricas estacionales del FFDI, se demostró un incremento en la tendencia al peligro de incendios forestales en Victoria durante el período 1974-2010. Adicionalmente, el VSBI demuestra capacidad para predecir el clima en temporadas extremas de incendios forestales. No obstante, la capacidad del VSBI para predecir incendios forestales per se es moderada. Estos resultados demuestran que un índice simple como el VSBI puede ser una alternativa útil a métricas tradicionales que miden el clima de incendios forestales en Australia.

Palabras clave: Peligro de incendios, variabilidad climática, riesgo, historia de incendios, prevención.

Abstract: The McArthur Forest Fire Danger Index (FFDI) is the most common tool to investigate fire weather in Australia. However, there have been scarce advances in the creation of fire weather metrics in this country since the FFDI development in 1967. This study aims to test a simple fire weather index for Victoria, Australia. The proposed index “Victorian Seasonal Bushfire Index” (VSBI) incorporates knowledge of local and remote fire weather drivers for this region. The index was designed for Victoria since it is one of the most bushfire prone regions in the world. The VSBI formulation is based on local fire weather data and El Niño-Southern Oscillation indicators.

The index is a seasonal alternative to the FFDI with a simple compilation. Using weather stations observations, the VSBI and seasonal metrics of the FFDI show an increasing trend in fire danger in Victoria during the period 1974-2010. Additionally, VSBI and FFDI show strong correlations during the antecedent (September-October-November) and concurrent (December-January-February) bushfire seasons. Moreover, the VSBI shows a strong fire weather seasonal forecasting skill. The VSBI fire activity forecasting skill is moderate. These results show that a simple index like the VSBI can be a useful alternative to traditional fire weather metrics in Australia.

Keywords: Fire danger, climate variability, risk, fire history, prevention.

INTRODUCCIÓN

Los índices de clima de incendios cuantifican el riesgo que las condiciones climáticas suponen en la ocurrencia y el comportamiento de estos. También son métricas útiles para evaluar los cambios en el peligro de incendios durante largos períodos de tiempo. El uso del Índice de Peligro de Incendios Forestales de McArthur (“FFDI” por sus siglas en Inglés) (McArthur, 1966, 1967) ha sido común en Australia. Esta sección describe el uso del FFDI y sus deficiencias.

El FFDI ha sido la base para entender el clima de incendios en Australia. Williams y Karoly (1999) encontraron que los eventos de “El Niño” aumentan el peligro de incendios en la mayor parte del centro y este de Australia. Long (2006) descubrió que el clima de incendios extremos (incluso catastróficos) en Victoria ocurrió con un viento que circulaba desde el norte o noroeste. Blanchi et al. (2010) demostraron que la mayoría de las pérdidas de viviendas durante incendios forestales en Australia ocurrieron en los días con condiciones climáticas extremas que favorecen la ocurrencia de incendios. Lucas (2010) desarrolló una base de datos histórica del clima de incendios para Australia utilizando datos de estaciones meteorológicas. Clarke et al. (2013) demostraron que el modelo de investigación y pronóstico del clima (WRF) (Skamarock et al., 2008) fue útil para simular la distribución espacial del peligro de incendios en el sureste de Australia. Engel et al. (2013) examinaron la variabilidad espacial y temporal del peligro de incendio durante los incendios extremos del “Sábado Negro”. Estos estudios utilizaron el FFDI para representar el clima de incendios en Australia. A nuestro entender, el FFDI no ha sido utilizado internacionalmente. Sin embargo, Field et al. (2015) sugieren que se utilice el FFDI para contrastar sus resultados en el desarrollo de un conjunto de datos meteorológicos globales de incendios utilizando el índice canadiense de clima de incendios (FWI por sus siglas en Inglés) (Van Wagner, 1974).

El FFDI también se ha utilizado para analizar las tendencias climáticas asociadas a incendios. El clima que promueve incendios en el sureste de Australia se ha vuelto más peligroso. Lucas et al. (2007) investigaron las tendencias del clima de incendios durante el período 1973-2007 en el sureste de Australia. Encontraron que había tendencias positivas significativas en varias métricas del FFDI. Clarke et al. (2013) concuerdan con las conclusiones de Lucas et al. (2007). Clarke et al. (2013) se basaron en el trabajo de Lucas (2010) calculando el FFDI en más estaciones, extendiendo el período de análisis y homogeneizando los datos de velocidad del viento para los cálculos. Clarke et al. (2013) analizaron tendencias con métricas del FFDI y

NOTAS DE AUTOR

daniel.pazmino.v@gmail.com

encontraron que hay un aumento significativo en el peligro de incendios en Australia, especialmente en el sureste del continente.

Por otro lado, la investigación acerca de proyecciones climáticas del futuro clima de incendios ha recibido más atención. Las proyecciones climáticas que utilizan el FFDI sugieren que el peligro de incendio continuará su tendencia creciente en el sureste de Australia. Lucas et al. (2007) determinaron que la cantidad de días con clima extremo que promueven incendios podrían experimentar un aumento en el rango de 15% a 65% para 2020 en relación con 1990. Hasson et al. (2009) mostraron que la frecuencia de los eventos extremos de incendios forestales aumentará a 1 o 2 por año a finales del siglo XXI. Clarke et al. (2011) argumentan que se espera un mayor riesgo de incendio en el siglo XXI. Este estudio también muestra evidencia de que las futuras temporadas de incendios forestales podrían comenzar antes y ser más prolongadas.

La mayoría de los estudios utilizan el FFDI para describir el clima con el que ocurren incendios en Australia. A pesar de su aceptación por parte de la comunidad científica, el FFDI tiene importantes deficiencias. En primer lugar, la investigación empírica es la base de este índice. Por lo tanto, su ecuación puede no representar la relación física real entre sus variables. El índice no considera la influencia de la topografía en el clima del incendio. Además, la calibración del FFDI consideró las características de la vegetación del sureste de Australia. En consecuencia, puede no representar condiciones de incendio en otras regiones del continente. Incluso el lenguaje de las clasificaciones de riesgo de incendios del FFDI también han sido cuestionadas (VBRC, 2009). Después de los incendios del “Sábado Negro”, las calificaciones de FFDI se actualizaron para representar eventos catastróficos como este.

Las críticas al FFDI se han equilibrado con estudios que demuestran su eficiencia. Por ejemplo, Dowdy et al. (2009) presentaron un estudio comparativo del FFDI y el ampliamente utilizado FWI canadiense. La investigación matemáticamente deconstruyó los dos índices para establecer comparaciones. El estudio encontró que ofrecen resultados comparables en el contexto australiano. A pesar de sus limitaciones, el FFDI sigue siendo la base de la investigación del clima de incendios en Australia.

El FFDI estima el riesgo de incendios forestales en función de las condiciones meteorológicas actuales (diarias) y las precipitaciones antecedentes. Aunque, adaptar este índice para pronosticar el clima estacional que promueve incendios es una tarea más compleja. Un nuevo índice meteorológico de incendios podría aprovechar las investigaciones que vinculan la actividad de incendios con los impulsores climáticos remotos.

El clima de Victoria tiene fuertes influencias remotas. El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y el Dipolo del Océano Índico (IOD por sus siglas en Inglés) son importantes impulsores de la variabilidad climática interanual en Victoria (Verdon et al., 2004) y sus referencias. Estos controladores pueden producir condiciones más húmedas o secas en esta región. Esta influencia depende de la fase de cada modo de clima. Por ejemplo, los eventos fuertes de “El Niño” pueden traer condiciones cálidas y secas a Victoria (BoM, 2016). Lo contrario es cierto para los eventos de “La Niña”. Estas variaciones climáticas pueden fomentar eventos catastróficos de incendios forestales en esta región.

Tasmania y Victoria ofrecen habilidades de pronóstico de actividad de incendios utilizando los índices de El Niño de Oscilación del Sur (ENOS) (Nicholls and Lucas, 2007; Harris et al., 2013). Nicholls y Lucas (2007) correlacionaron los datos sobre el área quemada en Tasmania con las variables climáticas y los indicadores ENOS. Su análisis abarcó el período de 1952 a 2004. El estudio encontró que la precipitación de invierno es la principal variable de la actividad de incendios en el verano. Esta investigación también estableció que los valores de temperaturas superficiales del mar (SST por sus siglas en inglés) en invierno están fuertemente correlacionados con el área quemada en verano. Por otro lado, Harris et al. (2013) realizaron un enfoque similar para Victoria. En este estudio, los autores también correlacionaron los datos de área quemada con los índices ENOS y las variables climáticas. El estudio abarcó desde 1972 hasta 2010 y determinó que la presión de vapor a las 15:00 horas durante la temporada de septiembre a octubre y noviembre proporcionan la mejor habilidad de pronóstico. También encontró que los índices ENOS ofrecen una habilidad moderada para pronosticar incendios en Victoria.

Los incendios forestales en Victoria han producido impactos masivos. Por ejemplo, la mitad de las pérdidas económicas en Australia debido a incendios forestales ocurrió en esta región (Luke and McArthur, 1978). La mayoría de estos impactos corresponden a eventos catastróficos mayores (Blanchi et al., 2012). Tres de las catástrofes más graves fueron “Black Friday” (1939), “Ash Wednesday” (1983) y “Black Saturday” (2009) (DEPI, 2014). Las condiciones climáticas estacionales han desempeñado un papel clave en el desarrollo de estos eventos.

Este estudio tiene como objetivo desarrollar y probar un índice alternativo del clima que promueve incendios forestales en Victoria, Australia. Este nuevo índice combina linealmente tres variables climáticas del fuego (temperatura, humedad relativa y precipitación), que tienen una influencia estacional en la sequedad de la vegetación que potencialmente se convierte en combustible para incendios. El índice también incorpora en su formulación lineal un parámetro de “El Niño” para probar si este factor agrega la habilidad de pronóstico estacional al nuevo índice. Esta investigación es importante porque Victoria, Australia, es una de las regiones más propensas a incendios forestales en el mundo (2009 VBRC, 2010). Por lo tanto, sería beneficioso probar alternativas a las métricas actuales del clima de incendios, especialmente si aportan habilidades de pronóstico estacional con el fin de prepararse mejor para las temporadas de incendios extremos.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: Se describe el área de estudio, los registros de incendios utilizados, métodos aplicados para desarrollar el “Índice Estacional Victoriano de Incendios Forestales” (VSBI, por sus siglas en inglés), así como detalles adicionales sobre el FFDI. A continuación describe los resultados del estudio, incluye estadísticas que vinculan incendios forestales en Victoria con los eventos ENOS, series de tiempo que comparan las métricas estacionales del FFDI con el VSBI y las correlaciones que utilizan el nuevo índice para investigar las relaciones estacionales del clima con los incendios forestales en Victoria. Finalmente se discuten los resultados y presentan comentarios finales.

MÉTODO

Área de estudio

El estado de Victoria en el sureste de Australia en la figura 1, es una región propensa a incendios forestales. Las condiciones climáticas inducen largas temporadas de incendios en Victoria. Su régimen de incendios comprende la temporada de verano austral de diciembre a febrero, según el Australian Bureau of Meteorology (BoM) (BoM, 2009). Durante estos meses la actividad del fuego es más intensa. Aunque, los incendios forestales severos también pueden ocurrir en noviembre y marzo.

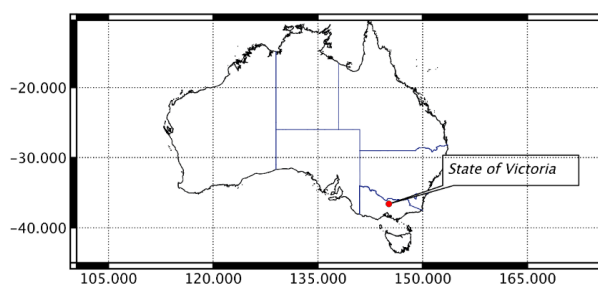


FIGURA 1
Ubicación de Victoria, Australia

Fuentes de datos de incendios forestales

Este estudio utilizó dos conjuntos de datos de incendios forestales. La primera base de datos pertenece al Department of Environment, Land, Water and Planning (DELWP) del Gobierno del Estado de Victoria. Este conjunto de datos emite una compilación de incendios forestales desde 1900 hasta el presente. Además, proporciona el área quemada por cada evento de incendio forestal. La base de datos de DELWP difunde información oficial. Por lo tanto, se seleccionó como la principal fuente de datos de incendios forestales para los análisis. Sin embargo, la metodología para su compilación no ha sido publicada o revisada por pares. Por lo tanto, el uso de un conjunto de datos alternativo de incendios forestales que cubra el mismo período fue necesario para validar esta información.

Los investigadores en Risk Frontiers (Macquarie University) desarrollaron una base de datos de ocurrencia de peligros naturales (“PerilAUS”). Este conjunto de datos comprende eventos como ciclones tropicales, inundaciones e incendios forestales en Australia. La información abarca más de doscientos años hasta el presente (Haynes et al., 2010). La información se validó con periódicos locales e información oficial cuando fue necesario (Crompton et al., 2010). Según Coates (1996), el subconjunto de incendios forestales de esta base de datos se desarrolló inicialmente en 1991 con información de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO).

Las dos bases de datos utilizadas tienen información a partir de principios del siglo XX. No obstante, sus definiciones de incendios forestales son diferentes. El conjunto de datos de DELWP incorpora eventos de incendio, incluida la zona quemada. Por otro lado, el conjunto de datos de Risk Frontiers no incluye esta información y solo informa la ocurrencia de eventos “importantes” (informados en los periódicos). En consecuencia, fue necesario investigar los umbrales de área quemada en el conjunto de datos de DELWP. Este proceso permitió comparaciones con la base de datos de Risk Frontiers (RF). Según este análisis preliminar, ambas bases de datos arrojan resultados similares desde 1961 hasta 2010 (último año de información disponible). Los resultados fueron comparables al establecer un umbral de área quemada de 10,000 hectáreas o más para definir un evento de incendio forestal extremo en el conjunto de datos DELWP. Consecuentemente, este umbral arbitrario se usó en esta investigación porque los conjuntos de datos “coinciden mejor” con esta definición (incendios forestales > 10,000 Ha). La información permitió investigar patrones a gran escala relacionados con la ocurrencia de incendios forestales, así como las relaciones estacionales entre el clima y los incendios forestales. El archivo de Material suplementario proporciona detalles de las fechas de incendio forestal utilizadas en esta investigación.

Anomalías climáticas vinculadas a los eventos de incendios forestales

Se realizó un análisis compuesto para describir las condiciones generales (promedio) prevalecientes de Victoria durante los incendios forestales. Anomalías estacionales compuestas se calcularon para la primavera y el verano austral. Estos compuestos representan los patrones a gran escala en las temporadas de incendios forestales anteriores (septiembre octubre noviembre) y concurrentes (diciembre enero febrero). Las variables calculadas fueron la temperatura del aire de la superficie, humedad relativa, precipitación y temperatura de la superficie del mar (ver figura 2).

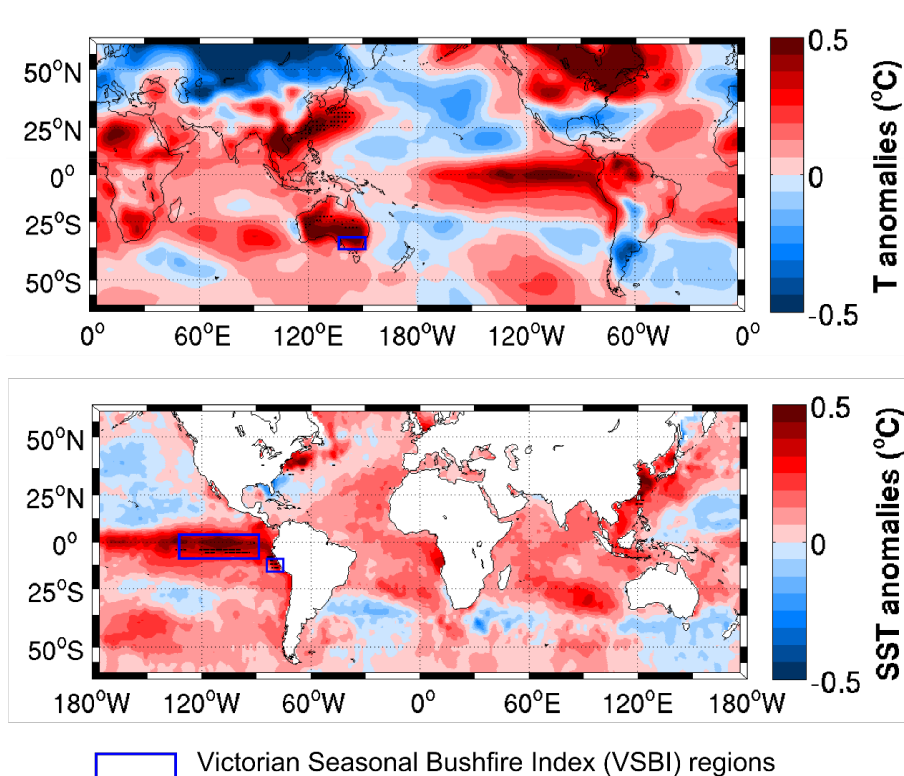


FIGURA 2

Anomalías de la temperatura en la superficie

Regiones del Índice Victoriano de Incendios Forestales Estacionales (VSBI). La gráfica muestra estas áreas sobre los compuestos estacionales de anomalías de la temperatura de la superficie (T) y la temperatura de la superficie del mar (SST) durante los incendios forestales en Victoria. Los materiales compuestos muestran anomalías para la temporada diciembre enero febrero durante el período 1961 - 2010.

Estos análisis utilizaron datos del Proyecto de Reanálisis del Siglo XX (versión 2) (20CRV2) (Compo et al., 2011) y el conjunto de datos de Hadley Center Sea Ice and Sea Surface Temperature (HadISST) (Rayner et al., 2003). Este conjunto de datos, se seleccionaron porque proporcionan datos espaciales durante un período de tiempo prolongado (100 años). El cálculo de una prueba de “t de Student” utilizando las anomalías calculadas probó la trascendencia estadística de los resultados con un nivel del 5%. El análisis identificó regiones anómalas relacionadas con la ocurrencia de incendios forestales en Victoria para desarrollar un nuevo índice de clima de incendios en esta región.

Índice victoriano de incendios forestales estacionales

El diseño de este índice utilizó los resultados de la investigación de patrones a gran escala relacionados con la ocurrencia de incendios forestales en esta región. El VSBI representa una relación simplificada entre las variables climáticas del fuego: temperatura (T), humedad relativa (HR) y precipitación (P). El VSBI asume una relación lineal entre estas variables. El índice también incorpora SST en las regiones de El Niño como otra variable. Las regiones de El Niño son áreas sobre el Océano Pacífico tropical donde se monitorea el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (BoM, 2016). Los patrones de anomalías estacionales revelaron que esta variable es un importante predictor de la actividad de incendios forestales en Victoria. El patrón de SST era fuerte y estaba vinculado a temporadas de fuego extremo. Esta relación vincula los procesos climáticos locales y de gran escala que producen condiciones severas de incendios forestales. Las variables climáticas del

fuego tienen el efecto de precondicionar los sucesos de incendios forestales al secar las cargas de combustible (BoM, 2009). Este fue el criterio principal para su selección.

La Figura 2 muestra las regiones seleccionadas para calcular el VSBI. La gráfica ilustra las anomalías de la superficie T y SST durante eventos extremos de incendios forestales en Victoria. El análisis abarcó el período 1961-2010. Las regiones representan áreas con fuertes anomalías. La región El Niño 3.4 ($^{\circ}\text{N}-5^{\circ}\text{S}$; $170^{\circ}\text{W}-120^{\circ}\text{W}$), la región El Niño 1 + 2 ($0-10^{\circ}\text{S}$, $90^{\circ}\text{W}-80^{\circ}\text{W}$) y Victoria ($33^{\circ}\text{S}-36^{\circ}\text{S}$; $145^{\circ}\text{E}-150^{\circ}\text{E}$) mostró las anomalías más fuertes. Algunas de estas áreas son estadísticamente significativas al nivel del 5% (áreas punteadas en cajas azules) usando una prueba de "Student-t", que sugiere una conexión entre este controlador de clima remoto (SST) y el clima de incendios en Victoria. Las anomalías en el cálculo de la superficie T confirmaron las regiones anómalas encontradas para HR y P (no mostradas). Estas anomalías son una manifestación de la dinámica climática regional y global. Estas dinámicas están vinculadas a la ocurrencia de incendios forestales en Victoria.

El cálculo del VSBI utilizó las anomalías de las regiones seleccionadas para calcular los promedios espaciales. Posteriormente, las medias diarias se promediaron para las temporadas SON y DEF respectivamente. Aunque los datos de 20CRV2 fueron útiles para identificar las regiones anómalas, el resultado final que se muestra en este estudio computó los promedios espaciales en la región victoriana utilizando seis estaciones meteorológicas (WS). Estas estaciones son representativas de áreas propensas a incendios forestales y se han utilizado en estudios anteriores (Lucas, 2010).

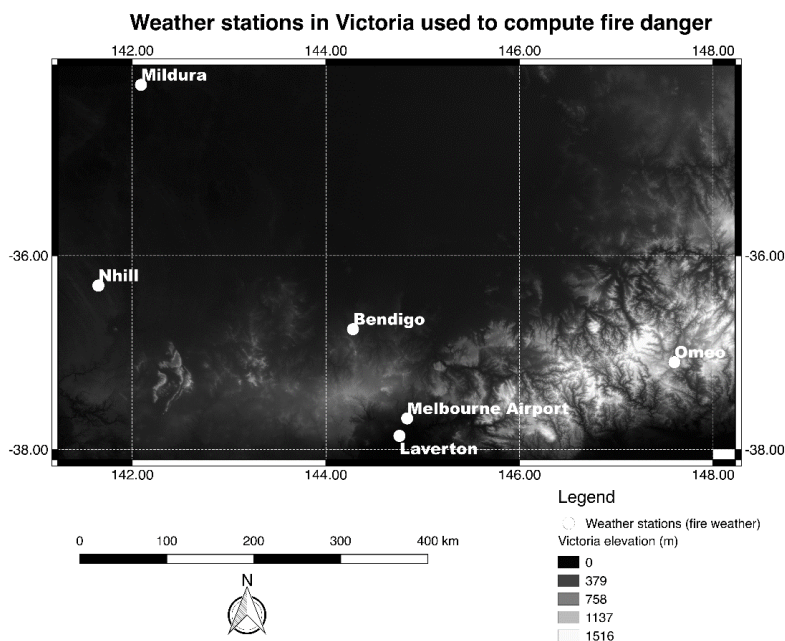


FIGURA 3
Ubicación estaciones meteorológicas

Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para los cálculos de climas que promueven incendios en Victoria

La figura 3 muestra la ubicación de estas estaciones. Además, el Anexo muestra sus detalles. Los cálculos que utilizaron observaciones arrojaron los subíndices VSBI. El período disponible de datos de WS fue 1974-2010, que es el período de análisis utilizado para los análisis de correlaciones. Las series temporales generadas se dividieron por su desviación estándar para normalizarlas. La formulación del VSBI comprende la agregación de los subíndices basados en las variables meteorológicas.

FIGURA 4

Procedimiento de cálculo de índice victoriano de incendios forestales estacionales (VSBI)

En la figura 4, el VSBI es representado en la Ecuación 1.

$$VSBI = \frac{T}{\sigma_T} + \frac{HR}{\sigma_{HR}} - \frac{P}{\sigma_P} + \frac{SST}{\sigma_{SST}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Índice de Peligro de Incendios Forestales

La validación del VSBI requirió el cálculo de un índice alternativo de clima que promueve incendios. El índice seleccionado fue el Índice de peligro de incendio forestal de McArthur (FFDI). Las autoridades australianas contra incendios utilizan el FFDI para la gestión del riesgo de incendios forestales (Luke y McArthur, 1978). El FFDI fue formulado como ecuaciones por Noble et al. (1980). La ecuación 2 representa el índice:

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

Donde:

T: Temperatura del Aire (°C)

HR: Humedad relativa

v: Velocidad del viento (Km/h)

DF: Factor de Sequía

El cálculo del índice requiere el uso de valores en el momento específico del día en el que es probable que se produzca el FFDI máximo. Los valores del índice usualmente alcanzan su pico en la tarde, a las 3 pm. Este es el tiempo estándar para calcular el FFDI en Australia (Lucas, 2010). El índice también requiere del cálculo de un factor de sequía que represente el efecto de la precipitación acumulada en la sequedad de las cargas de combustible. Griffiths (1999) desarrolló la ecuación del Factor de Sequía (DF) y los procedimientos de cálculo.

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar una nueva métrica meteorológica de incendios estacionales. Por lo tanto, el estudio utilizó dos métricas estacionales de la FFDI (en lugar de la métrica diaria tradicional) para realizar las validaciones. La primera métrica fue un FFDI acumulativo (FFDIcum) la cual agrega los valores FFDI diarios de la temporada. La segunda métrica fue el número de días en la temporada con valores FFDI mayores que 25 (FFDI > 25). Este umbral representa los días con al menos peligro de incendio "muy alto".

Relaciones estacionales entre clima e incendios forestales

La investigación usó correlaciones lineales para analizar las relaciones entre cuatro grupos de datos: incendios forestales (datos obtenidos de las bases de datos DEWLP y Risk Frontiers), índices de clima de incendios forestales por temporadas (VSBI, FFDIcum, FFDI > 25), variables meteorológicas (T, HR, P) e índices de modos de variabilidad climática (NINO 3.4, NINO1+2, SOI, DMI). Los primeros tres grupos de datos ya se describieron en este artículo. Esta sección describe los índices climáticos que se usaron.

El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y el Dipolo del Océano Índico (IOD por su siglas en Inglés) son importantes moduladores del clima en esta región (Williams et al., 2001; Cai et al., 2009; Risbey et al., 2009;

White et al., 2013). Por esta razón, el análisis usó tres índices ENSO y un índice IOD. Los índices ENSO que se usaron fueron: Índice de Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en inglés), NINO3.4 y NINO1+2. El índice del Modo Dipolo (DMI por sus siglas en Inglés) se usó para investigar las relaciones con IOD. Los índices NINO3.4 y NINO1+2 se seleccionaron puesto que muestran una relación con el clima de incendios forestales en Victoria. Debido a que NINO3.4 y NINO1+2 son indicadores oceánicos, el SOI se seleccionó como indicador alternativo asociado a la presión con el fin de establecer comparaciones. El DMI se escogió porque es el índice más usado para medir la intensidad del fenómeno Dipolo del Océano Índico.

La relación entre los eventos “El Niño” y “La Niña” y los incendios forestales en Victoria se investigó calculando correlaciones lineales entre los valores del índice NINO 3.4 y el número de incendios forestales registrados en las dos bases de datos descritas en este artículo. Se definió a los eventos “El Niño” y “La Niña” como todo período de 3 meses con un valor promedio de $+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Una fase neutral se definió como todo valor dentro del rango $+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. En este caso, el indicador NINO 3.4 se seleccionó debido a que los patrones climáticos de gran escala revelaron anomalías fuertes de temperatura superficial del mar asociadas a incendios forestales en Victoria. La relación entre el IOD y los incendios forestales en Victoria no se analizó ya que los patrones climáticos evidenciaron una relación más fuerte con el fenómeno ENOS.

El análisis usó datos de índices climáticos de varias instituciones: “Australian Bureau of Meteorology” (SOI), “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NINO3.4), “Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology” (DMI). Las climatologías que estas agencias utilizaron en los cálculos de estos índices fueron 1951-2000 (NINO3.4) y 1958-2010 (DMI). El índice NINO1+2 se calculó usando los datos “HadISST”. La climatología de este índice fue 1911-2011.

Las correlaciones se calcularon para primavera (SON-SON), verano (DJF-DJF), y de primavera a verano (SON-DJF). Los análisis abarcaron el período 1974-2010. Las figuras resaltan los resultados estadísticamente significativos al 5 % usando la prueba “Student-t test”.

RESULTADOS

Los patrones espaciales que se muestran en la Figura 2, sugieren que los eventos de “El Niño” provocan incendios forestales en Victoria. Las estadísticas básicas refuerzan esta idea. La Tabla 1, muestra el porcentaje de ocurrencia de incendios forestales en esta región. Estos porcentajes están vinculados a diferentes fases ENOS. Los análisis comprendieron el período 1961-2010. Las dos bases de datos de incendios forestales acuerdan mostrar que los incendios extremos ocurren predominantemente durante los eventos de “El Niño”. Los resultados establecen que 48.8% a 59.3% de los incendios forestales extremos ocurrieron durante una fase de “El Niño”. Estos resultados justificaron la incorporación de un indicador de “El Niño” en el VSBI.

TABLA 1
El acontecimiento de incendios forestales (porcentaje) durante diferentes fases de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en Victoria, Australia, para la temporada diciembre enero febrero durante el período 1961-2010.

Fase de El Niño Oscilación Sur	Occurrencia de Incendios Forestales (%) Department of Environment, Land, Water and Planning of Victoria bushfire database	Base de Datos de Incendios Forestales de Risk Frontiers
El Niño	59.3	48.8
La Niña	29.6	34.1
Neutral	11.1	17.1

Esta investigación definió una fase de El Niño y La Niña como cualquier período de 3 meses con un valor promedio del indicador NINO 3.4 de +0.5 °C o -0.5 °C respectivamente (umbrales arbitrarios). Una fase neutral se definió como cualquier valor entre el rango de +0.5 °C y -0.5 °C. Fuente de datos ENSO: base de datos de El Niño-Oscilación del Sur de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos y registros de incendios forestales del Department of Environment, Land, Water and Planning of Victoria (DELWP) y Risk Frontiers.

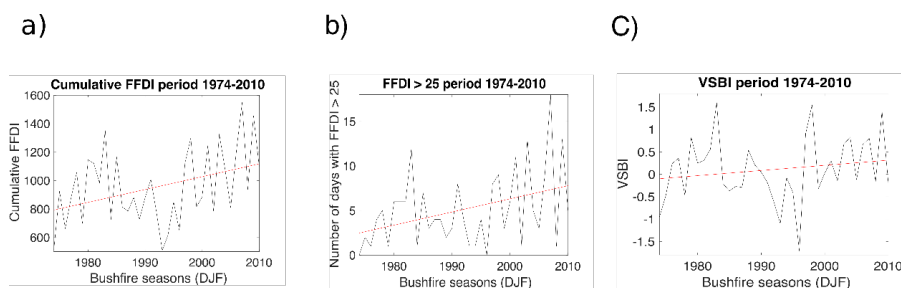


FIGURA 5
Variables y series de tiempo

Series de tiempos de a) Índice acumulativo de peligro de incendio forestal, b) Número de días con valores de Índice de peligro de incendio forestal superiores a 25 (peligro de incendio “muy alto”) y c) Índice Victoriano de Incendios Forestales Estacionales (VSBI) para Victoria, Australia durante la temporada diciembre enero febrero (DEF) para el período 1974-2010. Las tres series temporales coinciden al mostrar una tendencia creciente en el peligro de incendio en esta región.

En la Figura 5 se compara series cronológicas de métricas meteorológicas contra incendios calculadas para Victoria, Australia. El análisis comprende la temporada diciembre enero febrero (DEF) para el período 1974 2010. La figura muestra tres índices climáticos estacionales de incendios. Los paneles a), b) y c) muestran los resultados para FFDIcum, FFDI>25 y VSBI respectivamente. Los tres indicadores acuerdan mostrar una tendencia creciente en el peligro de incendios forestales en esta región. La serie de tiempo FFDIcum evidencia la tendencia positiva más alta (pendiente = 9). La serie FFDI> 25 muestra la mayor varianza (varianza = 17.77).

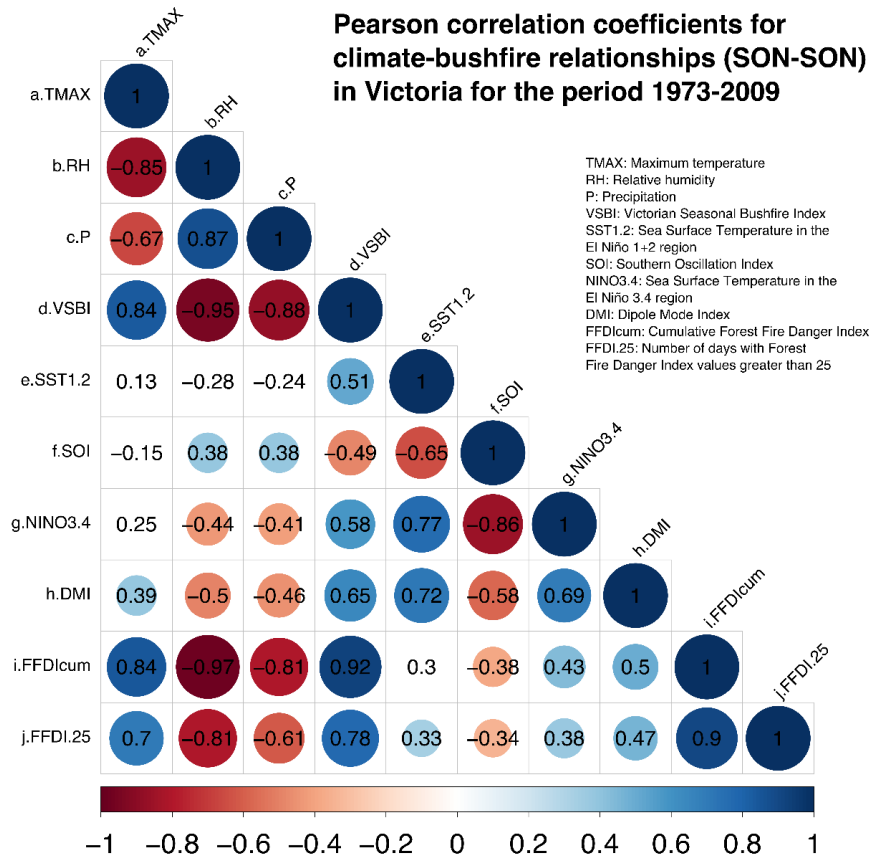


FIGURA 6
 Coeficiente de correlación de Pearson clima – incendio (SON)

Coeficientes de correlación de Pearson para las relaciones clima-incendio forestal para septiembre-octubre-noviembre (SON) en Victoria durante el período 1973-2009. Las figuras resaltan los resultados estadísticamente significativos al 5 % usando la prueba “Student-t test”. Fuente de datos: Datos de estaciones meteorológicas en Victoria, Australia (WS).

La Figura 6 muestra los coeficientes de correlación lineal para las relaciones clima-incendio forestal en Victoria, Australia. El análisis comprende la temporada SON para el período 1973-2009. Los resultados demuestran que las métricas estacionales de VSBI y FFDI están altamente correlacionadas (como se esperaba). VSBI muestra relaciones sólidas y estadísticamente significativas con las dos métricas FFDI. VSBI y FFDIcum tienen una correlación más fuerte que VSBI y FFDI > 25. Por otro lado, la RH tiene la correlación más fuerte con cada una de las tres métricas del clima de incendios. Además, el DMI tiene la influencia más fuerte con las tres métricas del clima de incendios. Las figuras resaltan los resultados estadísticamente significativos al 5 % usando la prueba “Student-t test”.

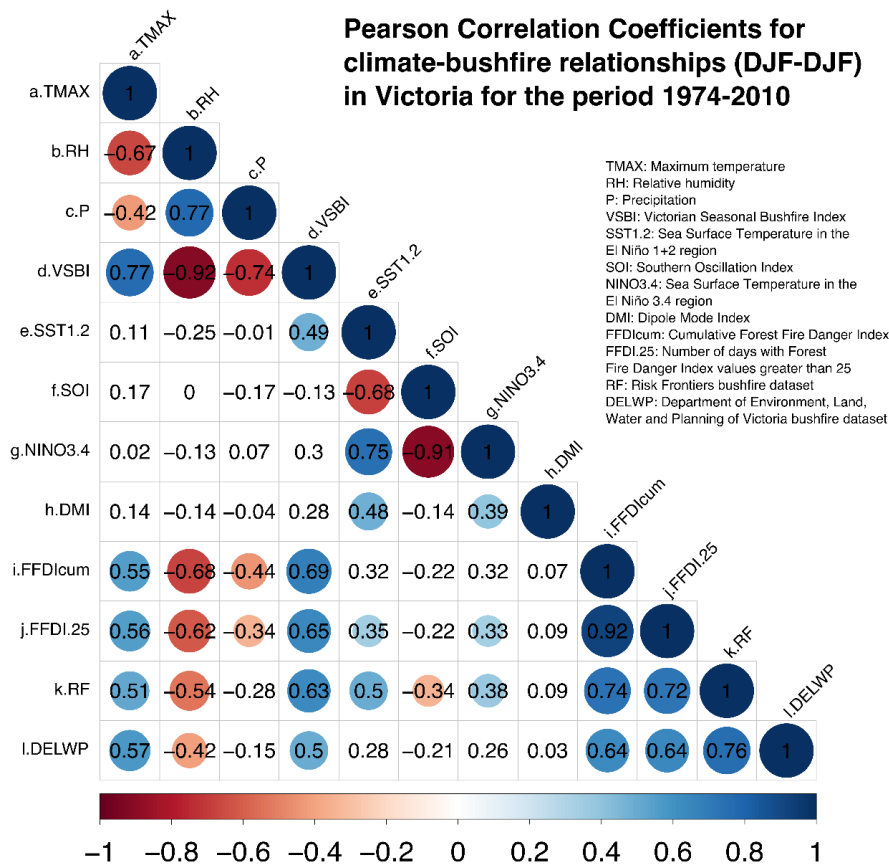


FIGURA 7
 Coeficiente de correlación de Pearson clima – incendio (DEF)

Coeficientes de correlación de Pearson para las relaciones clima-incendio forestal para diciembre-enero-febrero (DEF) en Victoria durante el período 1974-2010. Fuente de datos: Datos de estaciones meteorológicas en Victoria, Australia.

La Figura 7, muestra la correlación lineal entre coeficientes para la relación clima-incendios forestales durante la temporada DEF. Los análisis comprendieron a Victoria, Australia para el período 1974-2010. La relación entre VSBI y FFDI disminuye en verano en comparación con la primavera. Por ejemplo, las correlaciones entre estas métricas en SON oscilaron entre 0,78 y 0,92. Sin embargo, las correlaciones disminuyen a 0,46 a 0,69 durante el verano.

La Figura 7, incorpora los datos de actividad de incendios en la correlación. Las métricas FFDI tienen una correlación más fuerte con la actividad de incendio que el VSBI. Las métricas de FFDI muestran correlaciones más altas con los registros de actividad de incendio utilizando la base de datos Risk Frontiers. La HR es el principal impulsor climático del clima de incendios y la actividad de incendios en verano. El resultado es consistente en primavera y verano.

Los modos climáticos de variabilidad tienen menos influencia sobre el clima del fuego en verano. Los índices de “El Niño” están correlacionados moderadamente con el clima del fuego. Además, no hay correlación entre las métricas de incendios con el DMI. Esta falta de influencia es un resultado esperado, ya que la influencia del IOD se debilita después de la primavera.

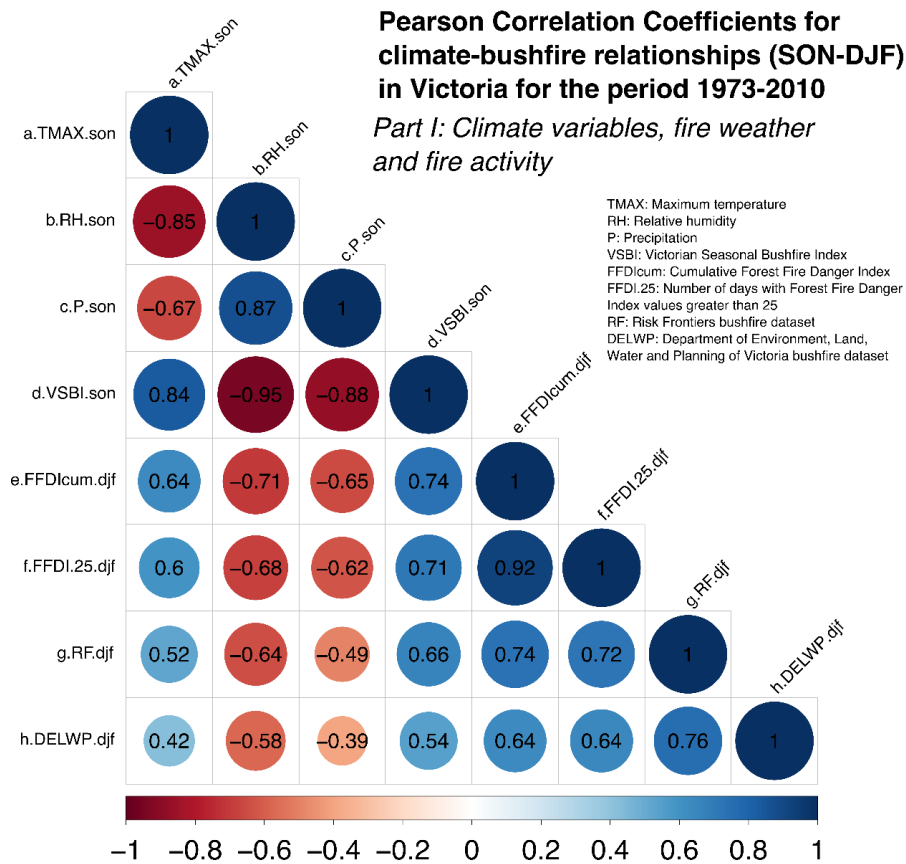


FIGURA 8
 Coeficiente de correlación de Pearson clima – incendio (SON)

Coeficientes de correlación de Pearson para las relaciones clima-incendio forestal desde septiembre-octubre-noviembre (SON) hasta diciembre-enero-febrero (DEF) en Victoria, Australia, durante el período 1973-2010 (Parte I). Fuente de datos: conjunto de datos de Hadley Center Sea Ice and Sea Surface Temperature (HadISST) y estaciones meteorológicas en Victoria (WS).

La figura 8 ilustra las relaciones clima-incendio forestal desde la primavera hasta el verano. El período de análisis fue 1973-2010. Las correlaciones incluyeron variables climáticas, clima del fuego y datos de actividad del fuego. El VSBI muestra una gran habilidad para pronosticar el clima de incendio representado por las métricas de FFDI. Las correlaciones van desde 0.71 a 0.74 con FFDI > 25 y FFDIcum respectivamente. Como se esperaba, la habilidad de pronóstico de VSBI es menor para la actividad de incendio en comparación con el clima de incendio. Las correlaciones de VSBI con registros de fuego van desde 0.54 a 0.66. Los resultados sugieren que la HR tiene la habilidad de pronóstico más fuerte. Las correlaciones entre la HR de primavera y las métricas de FFDI de verano varían de -0.71 a -0.68. Además, la HR tiene una correlación de -0.64 y -0.58 con las bases de datos de RF y DELWP, respectivamente.

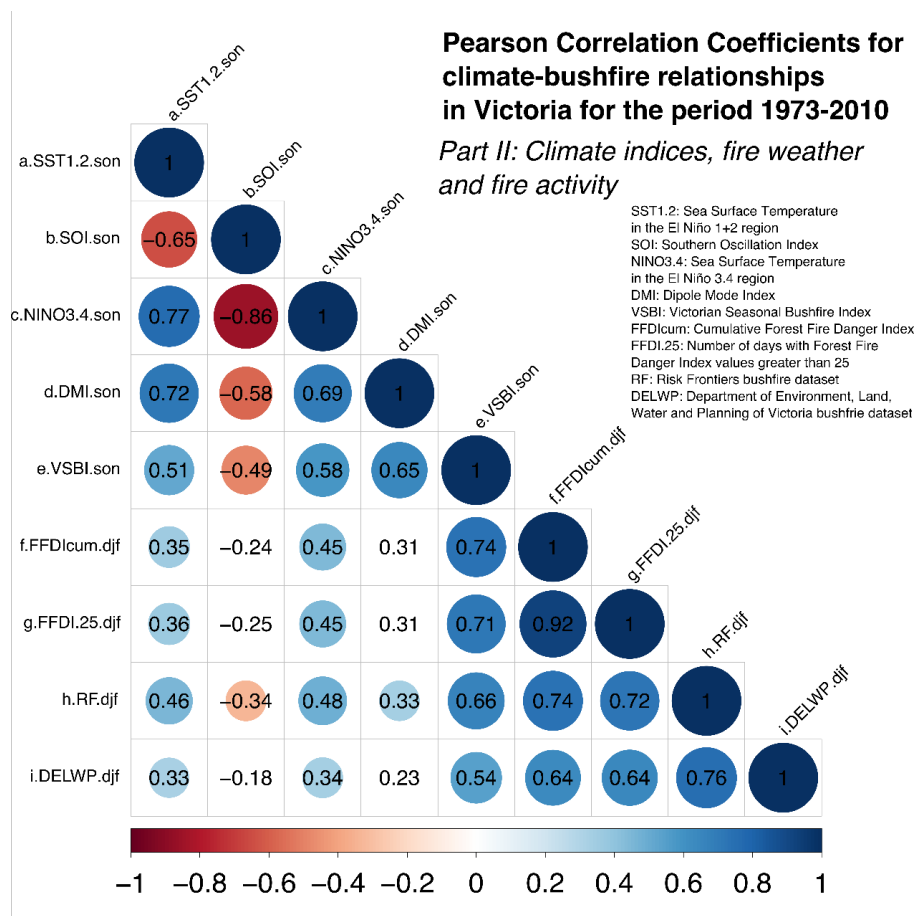


FIGURA 9
 Coeficiente de correlación de Pearson clima – incendio (DEF)

Coeficientes de correlación de Pearson para las relaciones clima-incendio forestal desde septiembre-octubre-noviembre (SON) hasta diciembre-enero-febrero (DEF) en Victoria, Australia, durante el período 1973-2010. La figura muestra los resultados de los índices climáticos, el clima de incendio y la actividad utilizando los análisis de reanálisis y los datos de la estación meteorológica respectivamente (Parte II). Fuente de datos: conjunto de datos de Hadley Center Sea Ice and Sea Surface Temperature (HadISST) y estaciones meteorológicas en Victoria (WS).

La figura 9, también muestra las relaciones clima-incendio forestal desde la primavera hasta el verano. Esta figura evidencia las correlaciones entre los índices climáticos, el clima del incendio y los datos de actividad del incendio. Curiosamente, el DMI muestra la correlación más fuerte con el VSBI. Por otro lado, los indicadores oceánicos de “El Niño” demuestran una relación moderada con las métricas de FFDI. El SOI y el DMI tienen correlaciones débiles con el FFDI. Estas correlaciones no fueron estadísticamente significativas. Finalmente, los indicadores oceánicos de “El Niño” están moderadamente correlacionados con la actividad del fuego. Estas correlaciones son estadísticamente significativas.

DISCUSIÓN

Esta investigación está de acuerdo con investigaciones anteriores (Lucas et al., 2007; Lucas, 2010; Clarke et al., 2013) que muestran una tendencia creciente de peligro de incendio en Victoria durante el periodo 1974-2010. No es sorprendente que las métricas FFDI muestren una mayor tendencia positiva en el peligro de incendio que el VSBI. La diferencia se produce porque el FFDI es más sensible a la temperatura. Esta variable demuestra tendencias crecientes claras. Además, la tendencia es más fuerte teniendo en cuenta todos los días en la temporada de incendios. La métrica FFDIcum indica un aumento mayor en el peligro de

incendio que $FFDI > 25$ y VSBI. Esta sección también analiza la relación entre ENSO y la variabilidad del clima de incendios.

El VSBI muestra que puede representar el clima del incendio y su relación con los incendios forestales. Por ejemplo, el índice demostró ser una métrica equivalente en comparación con el FFDI. Los resultados señalan que están altamente correlacionados durante la primavera y el verano. También, VSBI y FFDI muestran correlaciones similares con la actividad de incendio. El índice también demostró ser una herramienta de pronóstico útil (como se explica más adelante en esta sección).

Además de su precisión, el VSBI tiene la ventaja de ser más fácil de calcular que el FFDI. Representa el peligro de incendio basado en una relación simple entre las variables climáticas y ENOS. Razón por la que, podría ser útil en estudios que requieren grandes recursos informáticos. En contraste, los FFDI incorporan factores y subíndices que aumentan la complejidad del cálculo.

Por otro lado, el VSBI también tiene advertencias específicas a considerarse. En primer lugar, no representa la relación física “verdadera” entre sus variables. De hecho, la formulación lineal de VSBI oculta la contribución real al peligro de incendio. Por ejemplo, la influencia de la SST es menor en comparación con las variables del clima local. En consecuencia, la ecuación de VSBI podría sobreestimar el efecto de SST en el clima de fuego. La formulación lineal del VSBI tampoco refleja la naturaleza real no lineal de ENOS. Además, algunas de las variables de VSBI están directamente correlacionadas (por ejemplo, temperatura y humedad relativa).

A pesar de sus limitaciones, el VSBI fue útil para comprender las relaciones fundamentales entre el clima y los incendios forestales. Las correlaciones mostraron que las condiciones climáticas regionales impulsan el clima de incendios en Victoria. En contraste, los controladores remotos tienen menos influencia que las variables climáticas (como se esperaba). Estos hallazgos concuerdan con Harris et al. (2013). No obstante, los modos de variabilidad climáticos desempeñan un papel en la conducción del clima de incendios. Por ejemplo, ENOS y IOD influyen moderadamente en la humedad relativa. Esta variable demostró ser el componente principal que impulsa el fuego. Asimismo, estos controladores remotos también demostraron tener una influencia moderada en la actividad de incendio. Sin embargo, la influencia de ENOS e IOD no es constante.

La influencia de los conductores climáticos remotos sobre el clima de incendio decae desde la primavera hasta el verano. Durante la primavera, el IOD ejerce un nivel de control ligeramente más alto que ENOS (según las observaciones). De hecho, este estudio no encontró pruebas sólidas que demuestren que el IOD tenga una influencia significativamente mayor que ENOS durante esta temporada. En efectos, los dos modos de clima están altamente correlacionados. Estos hallazgos contrastan con Cai et al. (2009) quienes argumentan que el IOD es el conductor principal que preconditiona las cargas de combustible para los incendios. Por otro lado, durante el verano, el IOD no ejerce influencia sobre el clima del fuego. Este comportamiento se esperaba de su dinámica estacional. Inesperadamente, la influencia de ENOS se debilita durante esta temporada. Por lo tanto, el efecto de los factores climáticos remotos es mayor en primavera que en verano.

El VSBI presenta una fuerte habilidad de pronóstico. De hecho, el índice tiene mayor poder predictivo que las variables e índices climáticos (NINO3.4, SOI, IOD, etc.) por sí mismos. Además, las correlaciones muestran una mayor habilidad para predecir el clima de incendios que los incendios forestales en sí. Este resultado demuestra una consistencia física, ya que los incendios forestales también ocurren debido a factores no climáticos (por ejemplo, número de incendios). Estos hallazgos se basan en el análisis de las observaciones.

CONCLUSIONES

Los aspectos para resaltar de este estudio son:

Victoria experimentó un aumento en el peligro de incendio durante el periodo 1974-2010. Las observaciones confirmaron este hallazgo utilizando tres métricas estacionales del clima de incendios.

Los eventos positivos de Dipolo del Océano Índico (IOD) y “El Niño” preconditionan la actividad de incendios en Victoria. El principal efecto de estos dos controladores es reducir la humedad relativa en la primavera. Esta reducción genera condiciones secas que preparan la vegetación para las igniciones. La influencia de los eventos positivos de IOD sobre el clima que promueve incendios es mayor que las fases de “El Niño” en la primavera. Sin embargo, los dos modos de variabilidad climática están fuertemente vinculados. En verano, los eventos de “El Niño” se convierten en el conductor remoto más importante del clima de incendios.

Un índice simple (VSBI) basado en conductores locales y remotos del clima muestra habilidad para pronosticar el clima de incendios en Victoria. Esta métrica demuestra la capacidad predictiva estacional desde la primavera hasta el verano. Asimismo, el VSBI demuestra una precisión comparable para representar el clima de incendios a la que tiene el Índice de peligro de incendios forestales de McArthur.

RECOMENDACIONES

Además, dos aspectos requieren mayor investigación:

Las investigaciones futuras podrían expandir el área de investigación al sureste de Australia. Este enfoque podría facilitar el uso de los datos de reanálisis para investigar los cambios climáticos del incendio antes de 1974.

La investigación adicional podría utilizar los Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) para proyectar el VSBI. Esta investigación podría proporcionar información sobre futuros cambios climáticos de incendios en Victoria o el sureste de Australia.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador, SENESCYT, institución que brindó apoyo financiero al autor durante sus estudios de doctorado. Se reconoce a Risk Frontiers por proporcionar uno de los conjuntos de datos de incendios forestales utilizados en este estudio. A. Pezza quisiera reconocer el financiamiento del ARC a través del número de Proyecto de Descubrimiento 120103950.

Los autores no tienen conflictos de intereses que declarar.

REFERENCIAS

- 2009 VBRC. (2010). Final report.
- Blanchi, R. et al. (2010). Meteorological conditions and wildfire-related house loss in Australia. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 914–926.
- Blanchi, R. et al. (2012). *Life and house loss database description and analysis*. Final report.
- BoM. (2009). *Bushfire Weather*. Available at: <http://www.bom.gov.au/weather-services> (Accessed: 4 December 2015).
- BoM. (2016). *What is El Niño and what might it mean for Australia?* Available at: <http://www.bom.gov.au/climate/updates/articles/a008-el-nino-and-australia.shtml> (Accessed: 27 January 2016).
- Cai, W., Cowan, T. and Raupach, M. (2009). Positive Indian Ocean Dipole events precondition southeast Australia bushfires. *Geophysical Research Letters*, 36(19), p. L19710. doi: 10.1029/2009GL039902.
- Clarke, H., Evans, J. P. and Pitman, A. J. (2013). Fire weather simulation skill by the Weather Research and Forecasting (WRF) model over south-east Australia from 1985 to 2009. *International Journal of Wildland Fire*, 22(6), 739–756. doi: 10.1071/WF12048.

- Clarke, H. G., Smith, P. L. and Pitman, A. J. (2011). Regional signatures of future fire weather over eastern Australia from global climate models. *International Journal of Wildland Fire*, 20(4), 550–562.
- Clarke, H., Lucas, C. and Smith, P. (2013). Changes in Australian fire weather between 1973 and 2010. *International Journal of Climatology*, 33(4), 931–944. doi: 10.1002/joc.3480.
- Coates, L. (1996). An Overview of Fatalities from some Natural Hazards in Australia, in *Conference on Natural Disaster Reduction 1996: Conference Proceedings*. Institution of Engineers, Australia, p. 49.
- Compo, G. P. et al. (2011). The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654), 1–28. doi: 10.1002/qj.776.
- Crompton, R. P. et al. (2010). Influence of Location, Population, and Climate on Building Damage and Fatalities due to Australian Bushfire: 1925—2009. *Weather, Climate, and Society*, 2(4), 300–310. doi: 10.1175/2010WCAS1063.1.
- DEPI. (2014). *Bushfire History*. Available at <http://www.depi.vic.gov.au/fire-and-emergencies/managing-risk-and-learning-about-managing-fire/bushfire-history> (Accessed: 17 December 2015).
- Dowdy, A. J. et al. (2009). Index sensitivity analysis applied to the Canadian Forest Fire Weather Index and the McArthur Forest Fire Danger Index. *Meteorological Applications*, 312(December). doi: 10.1002/met.170.
- Engel, C. B. et al. (2013). The meteorology of Black Saturday. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(672), 585–599. doi: 10.1002/qj.1986.
- Field, R. D. et al. (2015). Development of a Global Fire Weather Database. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(6), 1407–1423. doi: 10.5194/nhess-15-1407-2015.
- Griffiths, D. (1999). Improved Formula for the Drought Factor in McArthurs Forest Fire Danger Meter. *Australian Forestry*, 62(2), 202–206. doi: 10.1080/00049158.1999.10674783.
- Harris, S., Nicholls, N. and Tapper, N. (2013). Forecasting fire activity in Victoria, Australia, using antecedent climate variables and ENSO indices. *International Journal of Wildland Fire*. doi: <http://dx.doi.org/10.1071/WF13024>.
- Hasson, A. et al. (2009). Assessing the impact of climate change on extreme fire weather events over southeastern Australia. *Climate Research*, 39(August), 159–172. doi: 10.3354/cr00817.
- Haynes, K. et al. (2010). Australian bushfire fatalities 1900–2008: exploring trends in relation to the Prepare, stay and defend or leave early policy. *Environmental Science & Policy. Elsevier Ltd*, 13(3), 185–194. doi: 10.1016/j.envsci.2010.03.002.
- Long, M. (2006). A climatology of extreme fire weather days in Victoria. *Australian Meteorological Magazine*, 55, 3–18.
- Lucas, C. et al. (2007). Bushfire Weather in Southeast Australia: Recent Trends and Projected Climate Change Impacts CSIRO. Marine and Atmospheric Research, September 2007, Consultancy Report prepared for The Climate Institute of.
- 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.
- McArthur, A. G. (1966). *Weather and grassland fire behavior*.
- McArthur, A. G. (1967). *Fire behavior in eucalypt forests*.
- Nicholls, N. and Lucas, C. (2007). Interannual variations of area burnt in Tasmanian bushfires: Relationships with climate and predictability. *International Journal of Wildland Fire*, 16(5), 540–546. doi: 10.1071/WF06125.
- Noble, I. R., Gill, a. M. and Bary, G. a. V. (1980). McArthurs fire-danger meters expressed as equations. *Austral Ecology*, 5(2), 201–203. doi: 10.1111/j.1442-9993.1980.tb01243.x.
- Rayner, N. et al. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, 108(D14), p. 4407. doi: 10.1029/2002JD002670.
- Risbey, J. S. et al. (2009). On the Remote Drivers of Rainfall Variability in Australia. *Monthly Weather Review*, 137(10), 3233–3253. doi: 10.1175/2009MWR2861.1.
- Skamarock, W. C. et al. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. University Corporation for Atmospheric Research Technical Report, (June), p. 113. doi: 10.5065/D6DZ069T.

- VBRC (2009). *Interim Report*. Melbourne. doi: 10.1037/e530172011-002.
- Verdon, D. C., Kiem, a. S. and Franks, S. W. (2004). Multi-decadal variability of forest fire risk-eastern Australia. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 165–171. doi: 10.1071/WF03034.
- Van Wagner, C. E. (1974). *Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Ottawa.
- White, C. J., Hudson, D. and Alves, O. (2013). ENSO, the IOD and the intraseasonal prediction of heat extremes across Australia using POAMA-2. *Climate Dynamics*, 1–20. doi: 10.1007/s00382-0132007-2.
- Williams, A. A. J. and Karoly, D. J. (1999). Extreme fire weather in Australia and the impact of the El Nino-Southern Oscillation. *Australian Meteorological Magazine*, 48(1), 15–22.
- Williams, A. A. J., Karoly, D. J. and Tapper, N. (2001). The sensitivity of Australian fire danger to climate change. *Climatic Change*, 49, 171–191.