

Modelos predictivos de la regeneración natural de pino en ecosistemas con incendios forestales

Predictive models of the natural regeneration of pine in ecosystems with forest fires

Ana Graciela Flores-Rodríguez*

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. México.

José Germán Flores-Garnica

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, INIFAP. México.

Diego Raymundo González-Eguarte

Agustín Callegos-Rodríguez

Patricia Zarazúa-Villaseñor

Salvador Mena-Munguía

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. México.

*Autor para correspondencia: anal386@hotmail.com

Resumen

En los ecosistemas son variables los efectos de los incendios forestales dependiendo de la severidad del fuego. Por consiguiente, es diferente la recuperación que tendrá la vegetación en estas áreas. Sin embargo, la evaluación en campo de la respuesta de los ecosistemas ante este impacto significa un importante gasto de recursos, ya sea por la amplitud del incendio o la inaccesibilidad del terreno. Debido a esto se buscan estrategias alternativas, para la evaluación y la determinación de áreas de prioridad para la implantación de manejo, como es el uso de índices espectrales derivados de sensores remotos. En este trabajo se evaluó la correlación que presentan diferentes variables tomadas directamente en campo y obtenidas mediante la aplicación de índices espectrales a imágenes de satélite, para determinar modelos predictivos de la regeneración natural de pino después de la ocurrencia de un incendio forestal. Siendo las variables de diámetro de copa del arbolado, índice de vegetación mejorado y la pendiente las que se incluyeron en los modelos predictivos, presentando un valor mayor de R^2 el modelo en el que se toman tanto las variables ambientales como las tomadas de imágenes satelitales juntas. Finalmente, el modelo resultante con el índice de vegetación mejorado se aplicó a un incendio forestal un año después y a dos años después de la ocurrencia del fuego, obteniendo como resultado una disminución de individuos de regeneración dos años después del incendio, no obstante, es notoria la tendencia de encontrar mayor regeneración en áreas afectadas con incendios en comparación con las áreas no incendiadas.

Palabras clave: Áreas de atención prioritaria, Imágenes de satélite, índices espectrales, severidad de incendios, sensores remotos, resiliencia.

Abstract

In ecosystems the effects of forest fires are variable depending on the severity of the fire. Consequently, the recovery that the vegetation will have in these areas is different. However, the evaluation in the field of the ecosystems' response to this impact implies a significant expenditure of resources, either due to the extent of the fire or the inaccessibility of the terrain. Due to this, alternative strategies are sought for the evaluation and determination of priority areas for the implementation of management, such as the use of spectral indices derived from remote sensors. In this work, the correlation presented by different variables taken directly in the field and obtained by applying spectral indices to satellite images was evaluated to determine predictive models of the natural regeneration of pine after the occurrence of a forest fire. Being the variables of tree canopy diameter, improved vegetation index and slope those that were included in the predictive models, presenting a higher value of R^2 in the model in which both environmental variables and those taken from satellite images are taken together. Finally, the resulting model with the improved vegetation index was applied to a forest fire one year later and two years after the occurrence of the fire, obtaining as a result a decrease in regeneration individuals two years after the fire, however, it is notorious the tendency to find more regeneration in fire affected areas compared to non-burned areas.

Keywords: Priority attention areas, Satellite images, spectral indices, fire severity, remote sensing, resilience.

Introducción

Debido a los desafíos como la falta de recursos económicos, de personal, de tiempo y de accesibilidad para recorrer todas las áreas afectadas por incendios y evaluar el impacto que ha tenido el fuego de manera específica en cada área, existe la necesidad de métodos para evaluar las consecuencias ecológicas de las perturbaciones de manera remota (Van Leeuwen *et al.*, 2010). Ante esto, las imágenes satelitales derivadas de sensores remotos han mostrado un buen potencial en el estudio, tanto de la severidad de los incendios forestales como en la determinación de la recuperación de la vegetación (Röder *et al.*, 2008). Sin embargo, cuando se analiza la respuesta de los ecosistemas después del impacto del fuego se habla de la regeneración de la cubierta vegetal en general, normalmente solo se considera el cambio o el incremento de la reflectancia de los valores de los índices espectrales, como por ejemplo, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI o el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI (Tonbul *et al.*, 2016) Además, aunque muchos estudios han evaluado mediante sensores remotos la severidad de los incendios y la regeneración de la vegetación después del paso del fuego, son pocos los estudios que han integrado la interacción de estos dos factores (Viana-Soto *et al.*, 2017). De igual manera, también se han creado modelos con los cuales se pretende estimar la regeneración natural, dependiendo de los factores ambientales de los ecosistemas, sin embargo, estos modelos no siempre tienen mucho éxito, lo que complica las acciones de restauración de vegetación después de un incendio forestal (Vega, 2003).

Es por esto que es importante la búsqueda de una metodología de aplicación de modelos que permita estimar de manera correcta y más cercana a la realidad las características de la severidad de los incendios forestales en los ecosistemas mexicanos y su relación con la regeneración natural, para con esto poder correlacionar el impacto de los incendios con imágenes satelitales y poder generar cartografía temática que ayude a la toma de decisiones futuras relacionadas, tanto al reporte de la severidad de los incendios como a la regeneración natural y a los planes de restauración de áreas impactadas.

Materiales y Métodos

Muestreo en campo

El estudio se llevó a cabo en la Sierra de Tapalpa, la cual se encuentra al suroeste del Estado de Jalisco, en las coordenadas 19° 47' y 20° 06' de latitud norte y 103° 37' y 103° 54' de longitud oeste (INEGI, 2009). En donde se tomó información de tres condiciones de impacto por fuego:

- Sin incendios (si). Área donde no ha ocurrido un incendio forestal o donde han pasado más de cinco años desde el último incendio, donde ya se reestableció la estructura del bosque.
- Severidad media (m). Áreas donde el fuego no afectó en su totalidad la estructura del bosque, presentándose un escorchado (altura de la marca del fuego en el fuste) por debajo de la mitad de la altura total del árbol y donde la copa puede estar afectada parcialmente.
- Severidad muy alta (ma). Área donde se destruyó casi en su totalidad la estructura y composición del bosque, presentándose un escorchado mayor que la mitad de la altura total del árbol y la copa se afectó parcial o totalmente

Dentro de estas áreas se ubicaron sitios de muestreo de 400 m². En donde la regeneración del arbolado de pino menor a 30 cm de altura se registró dentro de tres círculos de 5 m² (Flores *et al.*, 2018), en dos áreas afectadas por incendio: A) la primera ubicada al noroeste del poblado de Tapalpa, la cual se incendió en el 2018 y fue evaluada una temporada de lluvias después de la ocurrencia del incendio y con la cual se ha trabajado a lo largo de este estudio para obtener finalmente el modelo de predicción de la regeneración del arbolado. B) la segunda área de estudio se encuentra en la parte noreste del poblado de Tapalpa, la cual se incendió en el 2017 y fue evaluada en el 2019 es decir dos años después de la ocurrencia del fuego y fue el área en donde se aplicó el modelo resultante (Figura 1).

VARIABLES AMBIENTALES EN CAMPO

Derivado del muestreo en campo, se obtuvieron 41 variables ambientales las cuales se muestran en el Cuadro 1.

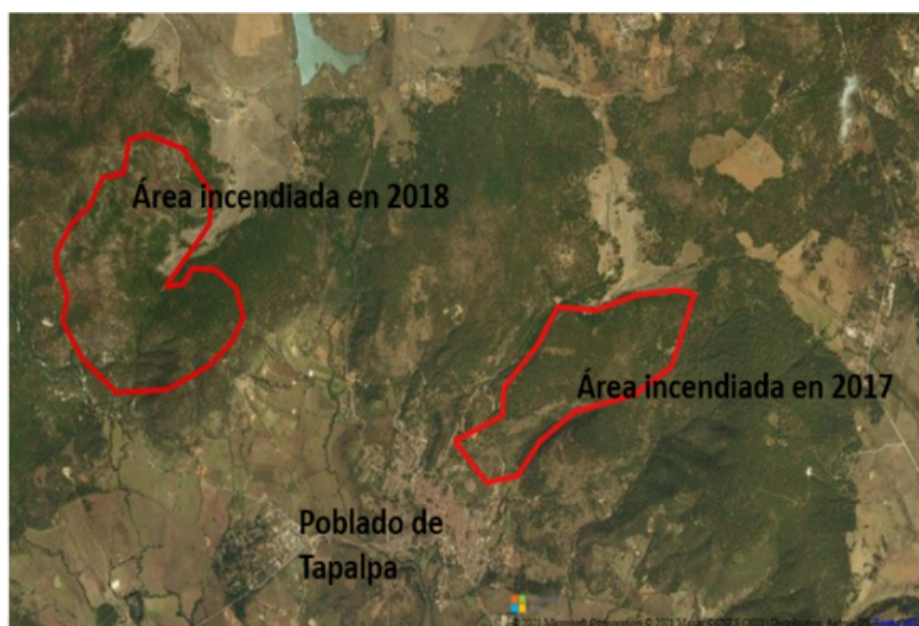


Figura 1. Imagen ilustrativa de la ubicación de las dos áreas afectadas por incendio que fueron evaluadas (imagen adaptada de Microsoft corporation 2021, a través de Qgis).

Cuadro 1. Variables ambientales evaluadas en campo, para determinar la regeneración potencial de arbolado en ecosistemas forestales impactados por incendios. CV= Combustibles vivos; CM= Combustibles muertos; T= Topografía; A= Arbolado.

Grupo	Variable	Grupo	Variable
CV	Peso seco de arbustos (AR)	CM	Porcentaje de cobertura de suelo mineral (PCSM)
	Peso seco de hierbas (HI)		Profundidad de fermentación (PFE)
	Peso seco de pastos (PA)		Profundidad de hojarasca (PHO)
	Porcentaje de cobertura de arbustos (PCA)		Altitud (AL)
	Porcentaje de cobertura de hierbas (PCH)		Exposición (EX)
	Porcentaje de cobertura de pastos (PCP)		Pendiente (PE)
	Altura de arbustos (AAR)		Densidad de arbolado (DA)
	Altura de hierbas (AHII)		Altura de escorchado (AE)
	Altura de pastos (APA)		Altura de quemado de copa (AQC)
	Diámetro de copa de arbustos (DCAR)		Altura del arbolado (ALT)
Diámetro de copa de hierbas (DCHI)	Diámetro a la altura del pecho (DAP)		
Diámetro de copa de pastos (DCPA)	Diámetro de copa de arbolado (DCA)		
CM	Combustibles 1 hora (XH)	A	Altura de fuste limpio (AFL)
	Combustibles 10 horas (XXH)		Grosor de corteza (GC)
	Combustibles 100 horas (100 horas)		Profundidad de quemado (PQ)
	Combustibles 1000 horas firmes (XXHF)		Número de caras de resinación (NCR)
	Combustibles 1000 horas podridos (XXHP)		Altura de caras de resinación (ACR)
	Peso seco de hojarasca (HO)		Porcentaje de copa quemada (PCQ)
	Peso seco de fermentación (FE)		Porcentaje de daño en arbolado (PD)
	Porcentaje de cobertura de hojarasca (PCHO)		Arbolado con conos (ACC)
	Porcentaje de cobertura de fermentación (PCFE)		

CV= Combustibles vivos; CM= Combustibles muertos; T= Topografía; A= Arbolado.

VARIABLES DE IMÁGENES SATELITALES

Se descargaron imágenes Landsat 8 (Operational Land Imager, OLI), mediante la plataforma de Google Earth Engine, antes y después de la ocurrencia de los incendios (abril y marzo 2018), las cuales fueron incorporadas al sistema de información geográfico Qgis. Posteriormente, haciendo uso de la herramienta de calculadora de Raster, se aplicaron índices espectrales, los cuales se pueden dividir de acuerdo a las fechas de las imágenes empleadas: a) Monotemporales. Considerando solo la evaluación de la imagen una temporada de lluvias después del incendio, los cuales fueron: NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada (Tran *et al.*, 2018); NDWI= Índice de agua de diferencia normalizada (Tran *et al.*, 2019); BAI= Índice de área de quemado (Fornacca *et al.*, 2018); EVI= Índice de vegetación mejorado (Smith *et al.*, 2007); NBRT= Relación de quemado normalizada con banda térmica (Tran *et al.*, 2019); SAVI= Índice de vegetación ajustado al suelo (Chen *et al.*, 2020); OSAVI= Índice de vegetación ajustado al suelo optimizado (Rondeaux *et al.*, 1996); ARVI= Índice de vegetación resistente a la atmósfera (Bannari *et al.*, 1995); GCI= Índice de clorofila verde (Fernandes *et al.*, 2020); SIPI= Índice de pigmentación insensible a la estructura (Fiodortsev *et al.*, 2019); GNDVI=, Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (Chen *et al.*, 2020); GRMI= Índice de monitoreo ambiental global (Bastarrika *et al.*, 2011); NBR= Relación de quemado normalizada (Key y Benson, 2006) y b) Bitemporales. Para su estimación se usan dos fechas de imágenes, obtenidas antes del incendio y una temporada de lluvias después de ocurrido el incendio, de tal forma que se obtiene un valor diferenciado al comparar las dos imágenes, los cuales fueron: dNBR= Diferencia normalizada de relación de quemado (Key y Benson, 2006); RdNBR= Diferencia relativa de relación de quemado normalizada (Miller y Thode 2007); RBR= Relación de combustión relativa (Parks *et al.*, 2014); RI= Índice de regeneración (Riaño *et al.*, 2002); NRI= Índice de regeneración normalizado (Riaño *et al.*, 2002). Cabe destacar que la toma de las imágenes consideradas para una temporada de lluvias después de la ocurrencia del incendio corresponde a la fecha de la imagen disponible más

próxima a la toma de datos en campo la cual se realizó a finales del 2019.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Todas las variables obtenidas se relacionaron con la regeneración natural correspondiente a las plántulas de arbolado menores o iguales a 30 cm, las cuales se refieren en este artículo como regeneración chica (RCH), de tres maneras diferentes a) solo variables de campo; b) solo variables de sensores remotos; y c) tanto variables de campo como variables de sensores remotos. Con cada uno de estos conjuntos de variables se realizó una matriz de correlación de Pearson para conocer la influencia de cada una de las variables. Con lo que se identificaron aquellas variables que tuvieron una $R > 0.25$. Posteriormente, se realizó un análisis de regresión escalonada (forward), con los softwares RStudio, infoStat y SPSS, para identificar las variables que mejor se ajustaran para la definición de un modelo multivariado para estimar la regeneración natural. Finalmente, el modelo resultante derivado de los índices espectrales se aplicó a las imágenes Landsat 8 obtenidas del incendio ocurrido en 2017, es decir que se evaluó - dos temporadas de lluvias después de la ocurrencia del incendio. Danto como resultado un mapa donde se puede identificar de manera práctica las áreas prioritarias para la atención de estrategias de restauración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Regeneración de arbolado y variables de campo:

Las variables independientes que resultaron con coeficientes de correlación más altos están relacionadas, con las características del arbolado, como son: el diámetro de copa, diámetro a la altura del pecho, altura del arbolado y profundidad de quemado, aunque también se presentan variables como la pendiente y el peso seco de hierbas. Para esta región, de las 42 variables de campo, 6 mostraron tener un valor de significancia menor a 0.05 y diez presentaron un valor de $R > 0.25$ las cuales fueron seleccionadas para realizar el análisis de regresión dando como resultado un modelo solo con la variable de diámetro de copa de arbolado ($R = 0.620$) (Cuadro 2).²

Cuadro 2. Resultados del proceso de regresión escalonada, de la relación entre la regeneración y las variables de campo.

Modelo	Variable	Coefficiente	R ²	(p)
1	Intercepto	-54350.195	0.620	
	Diámetro de copa de arbolado (DCA)	16136.026		

Con estos resultados se generó el modelo 1:
 $RCH = -54350.195 + 16136.026 * DCA$

Este modelo fue aplicado y comparado con la regeneración reportada en campo (Cuadro 3), donde se puede observar que, en un área sin incendio, el modelo subestima la regeneración, sin embargo, en la figura 2 se puede ver que el modelo sigue la tendencia de mostrar mayor regeneración en áreas con incendios moderados.

Cuadro 3. Ampliación del modelo 1 obtenido con las variables de campo, para Tapalpa.

Condición	RCH En campo	Modelo 1 (DCA)
Sin incendio	21709	-7408
Sin incendio	17104	60649
Sin incendio	40129	67224
Moderado	95388	145925
Moderado	163147	115336
Moderado	224327	159817
Extremo	41445	4957
Extremo	44076	53627
Extremo	25656	72842

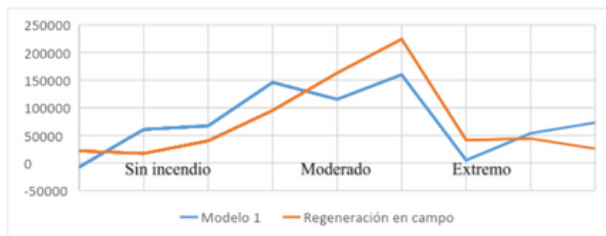


Figura 2. Gráfica de la regeneración de pino encontrada en campo, comparada con la estimación resultante de la aplicación del modelo con variables de campo, para Tapalpa.

Regeneración de arbolado y variables derivadas de sensores remotos: las variables independientes que resultaron con mayor R² están relacionadas con índices monotemporales como: EVI, OSAVI, GCI, GNDVI, SIPI, SAVI y NDVI, además de la exposición (Expo), excluyendo a los índices diferenciados. Sin embargo, de las 31 variables derivadas de sensores remotos, ninguna mostró tener un valor de significancia menor a 0.05 por lo que se seleccionaron para realizar el análisis de regresión, las 10 que presentaron un valor de R² ≥

0.25, dando como resultado un modelo con el índice de vegetación mejorado (Cuadro 4).

Cuadro 4. Resultados del proceso de regresión escalonada, de la relación entre la regeneración y las variables derivadas de sensores remotos, de Tapalpa.

Modelo	VARIABLE	Coefficiente	R ²	(p)
1	Intercepto	-338080	0.4243	
	Índice de vegetación mejorado (EVI)	982318		

Esta selección de variables da como resultado el modelo 2: $RCH = -338080 + 982318 * EVI$

Al aplicar este modelo y compararlo con la regeneración encontrada en campo (Cuadro 5), se puede observar que el modelo sobreestima la cantidad de regeneración para las áreas sin incendios y subestima la regeneración para las áreas con incendios, tanto moderado como extremo (Figura 3).

Cuadro 5. Ampliación del modelo 2 obtenido con las variables derivadas de sensores remotos, para Tapalpa.

Condición	RCH En campo	Modelo 1 (EVI)
Sin incendio	21709	63642
Sin incendio	17104	96137
Sin incendio	40129	31232
Moderado	95388	97014
Moderado	163147	149367
Moderado	224327	119988
Extremo	41445	6555
Extremo	44076	23358
Extremo	25656	85685

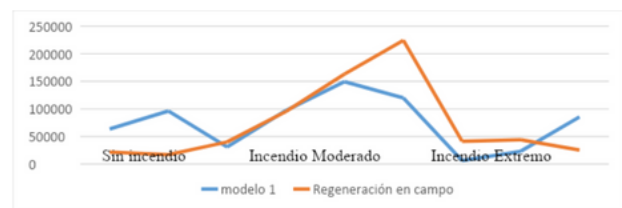


Figura 3. Gráfica de la regeneración de pino encontrada en campo, comparada con la estimación resultante de la aplicación del modelo con variables derivadas de sensores remotos, para Tapalpa.

Regeneración de arbolado y variables derivadas de datos de campo y sensores remotos: con las diez variables seleccionadas del muestreo en campo y las diez variables derivadas de los sensores remotos se realizó nuevamente, la regresión escalonada. Dando como resultado un modelo, el cual tiene una R² de 0.826, que

selecciona la variable de la pendiente tomada en campo (PTC) y el índice de vegetación mejorado (EVI) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Resultados del proceso de regresión escalonada, de la relación entre la regeneración, las variables de campo y las variables derivadas de sensores remotos, para Tapalpa.

Modelo	Variable	Coefficiente	R ²	(p)
1	Intercepto	-334056.062	0.826	0.010
	Pendiente	11848.529		
	Índice de vegetación mejorado (EVI)	756609.233		

Dando como resultado el modelo 3: $RCH = -334056.062 + 11848.529 \cdot PE + 756609.233 \cdot EVI$

Al aplicar este modelo y compararlo con la regeneración encontrada en campo (Cuadro 7), se observa una tendencia similar en los valores, en donde se estiman más plántulas para las áreas quemadas de manera moderada en comparación con las no quemadas o las quemadas de manera extrema (Figura 4).

Cuadro 7. Ampliación del modelo 3 obtenido con las variables de campo y de las derivadas de sensores remotos, para Tapalpa.

Condición	RCH En campo	Modelo 1 (PE, EVI)
Sin incendio	21709	34604
Sin incendio	17104	47784
Sin incendio	40129	68884
Moderado	95388	95854
Moderado	163147	136178
Moderado	224327	208338
Extremo	41445	-21214
Extremo	44076	62819
Extremo	25656	39734

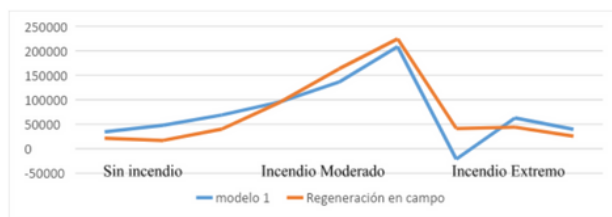


Figura 4. Gráfica de la regeneración de pino encontrada en campo, comparada con la estimación resultante de la aplicación del modelo con variables de campo y las derivadas de sensores remotos, para Tapalpa.

La primera área evaluada fue donde el incendio ocurrió en el 2018 y con los datos obtenidos se aplicó el modelo 2, generó el siguiente modelo para estimar la regeneración de pino.

$$RCH = -338080 + 982318 \cdot EVI$$

Este modelo fue aplicado sustituyendo los valores del Índice de vegetación mejorado (EVI) de las imágenes Landsat 8 obtenidas una temporada de lluvias después del incendio dando como resultado un mapa donde se puede identificar de manera práctica las áreas prioritarias para la atención de estrategias de restauración (Figura 5) en donde las áreas verdes son las áreas donde se espera una mayor regeneración natural de pino y mientras el color va cambiando la regeneración va disminuyendo hasta llegar a las áreas marcadas en rojo donde, por la reflectancia de los valores del índice EVI nos indican según el modelo, que la regeneración será nula.

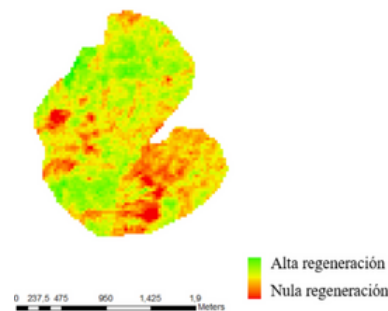


Figura 5. Mapa de la regeneración estimada con el modelo de EVI una temporada de lluvias después del incendio en la primera área de muestreo.

Posteriormente los modelos generados para Tapalpa, se aplicaron a ocho sitios que se evaluaron en campo dos años después (2019) de la ocurrencia del incendio forestal del 2017, también separando áreas sin incendio, áreas con incendio moderado y con incendio extremo. Con los datos obtenidos tanto de campo, como de las imágenes satelitales, de estos sitios, se aplicaron los modelos con el índice de vegetación mejorado (EVI), el diámetro de copa de arbolado y el EVI más la pendiente. Como se puede observar en la figura 6^A, cada uno de estos modelos estima de manera diferente la regeneración, siendo el modelo con EVI y la pendiente el que estima mayor número de individuos para las áreas de incendio moderado, seguido por el modelo con EVI. Sin embargo, al comparar lo estimado mediante los modelos, con lo encontrado en campo dos años después del incendio, se puede observar que la regeneración de pino encontrada es mucho menor a lo estimado por los modelos, siendo evidente que existe mayor regeneración en áreas donde ocurrió un incendio ya sea moderado o extremo, en comparación con las áreas sin incendio, donde no se reporta regeneración de pino (Figura 6^B).

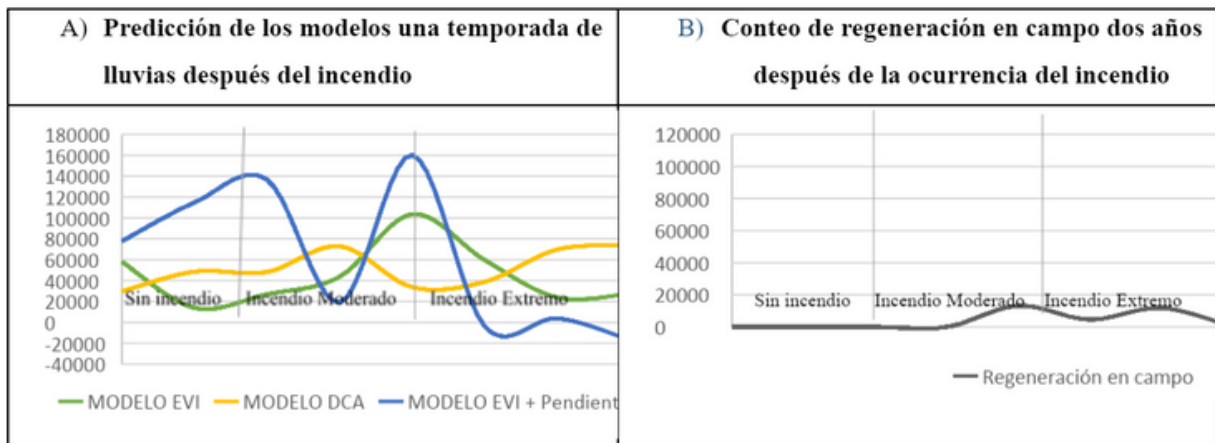


Figura 6. A) Gráfica de la regeneración de pino estimada resultante de los tres modelos para Tapalpa, B) Gráfica de la regeneración de pino encontrada en campo dos años después de la ocurrencia del incendio. EVI= Índice de vegetación mejorado, DCA= Diámetro de copa de arbolado.

La segunda área evaluada fue donde el incendio ocurrió en el 2017 y a la cual también se le aplicó el modelo:

$$RCH = -338080 + 982318 * EVI$$

Este modelo fue aplicado sustituyendo los valores del Índice de vegetación mejorado (EVI) de las imágenes Landsat 8. primeramente, obtenidas de manera inmediata después del incendio (Figura 7) y obtenidas en el 2019 (Figura 7) dando como resultado dos mapas muy diferentes, el primero donde es evidente el impacto de la trayectoria del incendio, el cual inició con mayor severidad de la parte suroeste del polígono y fue disminuyendo la severidad hacia la parte noreste en donde se puede ver que la regeneración se estima será más abundante.

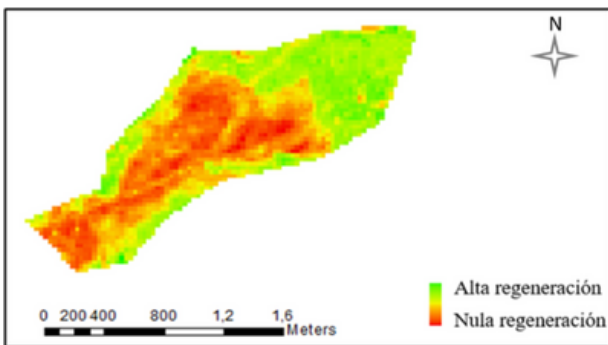


Figura 7. Mapa de la regeneración estimada con el modelo de EVI después del incendio en la segunda área de muestreo.

Por el contrario, en el mapa donde el valor el EVI fue tomado dos años después de la ocurrencia del incendio (Figura 8) se puede ver que el área marcada

con rojo, la cual es el área de menor regeneración a disminuido considerablemente su superficie sin embargo, como se muestra en la figura 6, es muy importante considerar que a pesar de que el modelo si estima mayor cantidad de regeneración para las áreas donde el incendio fue moderado, el número de indivisos de regeneración de pino estimados después de dos años de ocurrencia del incendio es mucho menor. Es por esto que además de enfocarnos en la regeneración inmediata después del incendio se evaluó la supervivencia de los individuos con el paso del tiempo.

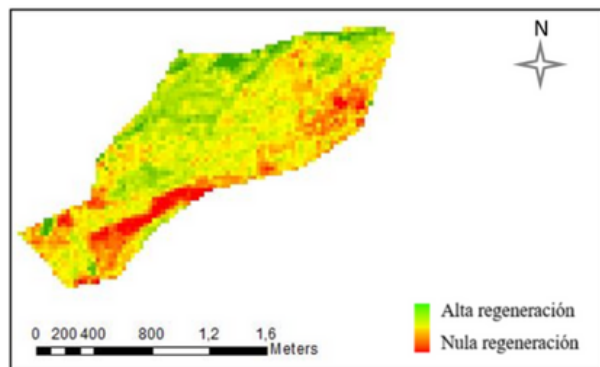


Figura 8. Mapa de la regeneración estimada con el modelo de EVI dos años después del incendio en la segunda área de muestreo.

En general con estos resultados es importante considerar diversos aspectos como la temporalidad en la aplicación del modelo ya que no es lo mismo la regeneración obtenida una temporada de lluvias después del incendio a la regeneración encontrado dos años después del incendio esto también se ha reportado en otros bosques del estado de Jalisco en

donde después de la ocurrencia del fuego *P. oocarpa* tiene buena respuesta a la regeneración sin embargo esto disminuye en las etapas de crecimiento (Sánchez *et al.*, 2014). así mismo también se ha reportado que la diversidad y riqueza de especies en incendios de baja severidad disminuyó con el tiempo después del incendio en ecosistemas de Encino (Heydar *et al.*, 2019). Si bien, es clara la disminución de la regeneración esperada, con el paso de un año, es notorio que la tendencia de encontrar mayor regeneración en áreas afectadas con incendios en comparación con las áreas no incendiadas permanece. Tendencia que también se ha encontrado, hasta cuatro años posteriores al incendio (Juárez-Martínez y Rodríguez-Trejo 2003).

Para poder abordar esta problemática es necesario establecer puntos de muestreo permanentes en donde se pueda dar seguimiento a la respuesta del arbolado ante el impacto de un incendio forestal y tomar en cuenta factores como el manejo que se le dé al área después de este incendio como puede ser la tala de árboles dañados para su aprovechamiento lo cual afecta la supervivencia de las plántulas que se pudieron establecer después del paso del fuego (Leverkus, 2016). Además de seguir monitoreando las variables ambientales que pueden afectar, por una parte, el establecimiento de las plántulas y por otra garantizar su supervivencia (Madrigal *et al.*, 2005). Así como también, realizar análisis de series de tiempo para establecer el régimen del fuego ya que tanto la frecuencia y la intensidad de los incendios que ocurren en un lugar con el paso del tiempo afectan la dinámica del entorno, más aún pueden afectar los comportamientos de la regeneración debido al grado de que tan serotinos son los conos con respecto al régimen del fuego como lo sugieren Rodríguez y Fule (2003).

Conclusiones

Aunque se esperaba solo trabajar con los datos obtenidos mediante las imágenes satelitales, el mejor modelo para la estimación de la regeneración de pino, fue el obtenido mediante la correlación de las variables ambientales tomadas en campo y las variables obtenidas de índices espectrales.

El modelo solo con el índice de vegetación mejorado dio buenos resultados para la estimación

de la regeneración y la creación de mapas temáticos para la identificación de áreas prioritarias. A pesar de la disminución de la regeneración esperada, con el paso de un año, es notorio que la tendencia de encontrar mayor regeneración en áreas afectadas con incendios en comparación con las áreas no incendiadas permanece.

Esta técnica de evaluación puede ser útil para la determinación de áreas prioritarias para la implantación de estrategias de manejo en áreas afectadas por incendios forestales. Aunque aún existen limitantes para su aplicación de forma general. Es recomendable establecer un mayor número de sitios de muestreo distribuidos de manera homogénea en toda el área afectada por el incendio para afinar el modelo.

Es necesario seguir trabajando en la implementación de índices espectrales para la evaluación de la severidad de los incendios forestales y la respuesta de la regeneración del arbolado, para crear metodologías más precisas, que faciliten el trabajo de evaluación y la toma de decisiones de manejo de los ecosistemas afectados por el fuego.

Literatura citada

- Bannari, A., Morin, D., y Bonn, F. (1995). A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95-120. DOI: 10.1080/02757259509532298
- Bastarrika, A., Chuvieco, E., y Martín, M. P. (2011). Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1003-1012. DOI:10.1016/j.rse.2010.12.005.
- Chen, Y., Lara, M. J. y Hu, F. S. (2020). A robust visible near-infrared index for fire severity mapping in Arctic tundra ecosystems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 101-113. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2019.11.012
- Fernandes, M.R., Aguiar, F.C., Martins, M.J., Rico, N., Ferreira, M.T. y Correia, A.C. (2020). Carbon Stock Estimations in a Mediterranean Riparian Forest: A Case Study Combining Field Data and UAV Imagery. *Forests*, 11, 376-397. DOI: 10.3390 / f11040376
- Fiodortsev, R.V., Silie C., A.R., Kozhevnikov, D.A., Medina, V.M. y Delgado, R. (2019). Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon Field Search. *Devices and Methods of Measurements*, 10, 373-381. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-373-381
- Fornacca, D., Ren, G. y Xiao, W. (2018). Evaluating the Best Spectral Indices for the Detection of Burn Scars at Several Post-Fire Dates in a Mountainous Region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing*, 10, 1196. DOI:10.3390/rs10081196.
- Flores G., J. G., Flores R., A. G., Lomelí Z., M. E., Ruiz G., E., y García B.J.M. (2018). Metodología para a toma de datos de regeneración natural en áreas impactadas por incendios forestales. Folleto Técnico. Núm. 3 INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, México. 84 p.
- Heydar, M., Moradzadeh, H., Omidipour, R., Mezbani, A. y Pothier, D. (2019). Spatio-temporal changes in the understory heterogeneity, diversity, and composition after fires of different severities in a semiarid oak (*Quercus brantii* Lindl.) forest. *Land Degradation & Development*, 31, 1039-1049. DOI: 10.1002/ldr.3518
- IBM Corp. Released (2017). IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0. Armonk, NY: IBM Corp. Disponible en: https://www.ibm.com/analytics/spss-statistics-software?lnk=STW_US_STESCH&lnk2=trial_SPSS&exp=def&psrc=none&mhsrc=ibmsearch_a&mhq=spss
- InfoStat(2010). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=15>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos; Tapalpa, Jalisco. 9p. Disponible: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/14/14102.pdf
- Juárez-Martínez, A. y Rodríguez-Trejo, D. A. (2003). Efecto de los incendios forestales en la regeneración de *Pinus oocarpa* var. *Ochoteranae*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(2): 125-130. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/237038014_EFECTO_DE_LOS_INCENDIOS_FORESTALES_EN_LA_REGENERACION_DE_Pinus_oocarpa_var_ochoteranae
- Key, C. H., Benson, N.C. (2006). Landscape assessment sampling and analysis Methods. En: D.C. Lutes, (Eds), *Firemon: Fire Effects Monitoring and Inventory System* (pp. LA1 – LA51). Rocky Mountain: USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Disponible de: https://www.researchgate.net/publication/241688462_Landscape_Assessment_LA_Sampling_and_Analysis_Methods
- Leverkus, A.B. (2016) Regeneración post-incendio de la encina mediante procesos naturales y asistidos y valoración económica de los servicios ecosistémicos. *Ecosistema*, 25(3), 121-127. Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-3.15

- Madrigal, J., Hernando, C., Martínez, E., Guijarro, M. y Díez C. (2005). Regeneración post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central, España): modelos descriptivos de los factores influyentes en la densidad inicial y la supervivencia. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 14(1), 36-51.
- Microsoft corporation (2021). QGIS 3.4 Development Team. Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- Miller, J.D. y Thode A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109, 66 - 80. DOI:10.1016/j.rse.2006.12.006
- Parks, S.A., Dillon, G. K. y Miller, C., (2014). A New Metric for Quantifying Burn Severity: The Relativized Burn Ratio. *Remote Sens.*, 6,1827-1844. DOI:10.3390/rs6031827
- QGIS 3.4 Development Team, (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. Disponible en: <http://www.rstudio.com/>.
- Röder, A., Hill, J., Duguay, B., Alloza, J., & Vallejo, R. (2008). Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora region (eastern Spain). *Remote Sensing of Environment*, 112(1), 259–273. DOI:10.1016/j.rse.2007.05.001
- Riaño, D., Chuvieco, E., Ustina, S., Zomer, R., Dennison, P., Roberts, D. y Salas, J. (2002). Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains. *Remote Sensing of Environment*, 79, 60– 71. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00239-5
- Rodríguez T., D. A. y P. Z. Fulé. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1): 23-37, DOI: 10.1071/WF02040
- Rondeaux, G., Steven, M., Baret, F., (1996). Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices
- *Remote Sens. Environ*, 55, 95-107. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00186-7
- Sanchez D., M., Gallegos R., A., González C., G.A., Castañeda G., J. C. y Cabrera O., R. G. (2014). EFECTO DEL FUEGO EN LA REGENERACIÓN DE *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(24):126-143. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000400011
- Smith, A.M.S., Drake, N.A., Wooster, M.J., Hudak, A. T., Holden, Z. A. y Gibbons, C. J. (2007). Production of Landsat ETM + reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: comparison of methods and application to MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 2753–2775. DOI: 10.1080/01431160600954704
- Tran, B. N., Tanase, M.A., Bemmett, L.T. y Aponte, C. (2018). Evaluation of Spectral Indices for Assessing Fire Severity in Australian Temperate Forests. *Remote sensing*, 10, 1680. DOI:10.3390/rs10111680
- Tran, N. B., Tanase, M. A., Bennett, L. T. y Aponte, C. (2019). Fire-severity classification across temperate Australian forests: random forests versus spectral index thresholding. *Proc. SPIE 11149, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI*, 111490U. DOI: 10.1117/12.2535616.
- Tonbul, H., Kavzoglu, T. y Kaya, S. (2016). Assessment of fire severity and post-fire regeneration based on topographical features using multitemporal Landsat imagery: a case study in Mersin, Turkey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B8, 763- 769. DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B8-763-2016
- van Leeuwen, W. J.D., Casady, G. M., Neary, D. G., Bautista, S., Alloza, J. A., Carmel, Y., Wittenberg, L., Malkinson, D. y Orr, B. J. (2010). Monitoring post-wildfire vegetation response with remotely sensed time-series data in Spain, USA and Israel. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 75–93 DOI: 10.1071/WF08078

- Vega H., J. A. (2003). Regeneración del género Pinus tras incendios. Actas de la III Reunión sobre regeneración natural IV reunión sobre ordenación de montes Cuad. Soc. Esp. Cien. For. 15:59-68. DOI: 10.31167/csef.v0i15.9318
- Viana-Soto, A., Aguado, I. y Martínez, S. (2017). Assessment of Post-Fire Vegetation Recovery Using Fire Severity and Geographical Data in the Mediterranean Region (Spain). Environments, 4, 90; DOI:10.3390/environments4040090