

Estimación de regeneración mediante variables ambientales e índices espectrales en ecosistemas con incendios forestales

Estimation of regeneration using environmental variables and spectral indices 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.

Diego Raymundo González-Eguiarte

Agustín Gallegos-Rodríguez

Patricia Zarazúa-Villaseñor

Salvador Mena-Munguía

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

*Autor para correspondencia: ana1386@hotmail.com

Resumen

La problemática de los incendios forestales requiere crear metodologías que permitan evaluar y predecir la respuesta que tendrá el ecosistema ante el impacto del fuego, para así dirigir las acciones de restauración de las áreas que más lo requieren. Sin embargo, evaluar estas áreas directamente en campo implica inversión de recursos (económicos y de personal) que, junto con el tiempo, son generalmente limitados. Para esto, las imágenes satelitales son una herramienta práctica para la evaluación de grandes áreas, o áreas inaccesibles, impactadas por incendios forestales. En este trabajo se evaluó la correlación que presentan diferentes variables medidas en campo y derivadas de sensores remotos, con relación a la regeneración natural de pino que se presenta en el bosque La Primavera y en Sierra de Quila, Jalisco. Los resultados mostraron diferentes variables para determinar los modelos predictivos de la regeneración natural de pino después de la ocurrencia de un incendio forestal, siendo los combustibles de 100 horas y de 1000 horas, grosor de corteza y profundidad de quemado, las variables tomadas directamente en campo que fueron incluidas en los modelos. Mientras que el índice de área de quemado, el índice de regeneración y la exposición, las variables tomadas mediante sensores remotos las que se incluyeron en los modelos predictivos. Los modelos que mostraron una mayor R^2 son los obtenidos mediante variables de campo para las dos regiones. No obstante, el modelo obtenido solo con variables de sensores remotos para La Primavera obtuvo un R^2 de 0.6083. Al contrario de Sierra de Quila en donde el modelo no toma ningún índice espectral para el modelo, por lo cual es recomendable establecer un mayor número de sitios de muestreo distribuidos de manera homogénea en toda el área afectada por el incendio, para mejorar la precisión de los modelos mediante sensores remotos.

Palabras clave: Imágenes satelitales, modelos predictivos, sensores remotos, severidad de incendios, resiliencia, regeneración de pino.

Abstract

The problem of forest fires requires creating methodologies that allow evaluating and predicting the response that the ecosystem will have to the impact of fire, in order to direct restoration actions in the areas that most require it. However, evaluating these areas directly in the field implies investment of resources (financial and personnel) which, along with time, are generally limited. For this, satellite images are a practical tool for the evaluation of large areas, or inaccessible areas, impacted by forest fires. In this work, the correlation presented by different variables measured in the field and derived from remote sensors, in relation to the natural regeneration of pine that occurs in the La Primavera forest and in Sierra de Quila, Jalisco, was evaluated. The results showed different variables to determine the predictive models of the natural regeneration of pine after the occurrence of a forest fire, being the fuels of 100 hours and 1000 hours, bark thickness and depth of burning, the variables taken directly in the field. that were included in the models. While the burn area index, the regeneration index and the exposure, the variables taken by remote sensors were included in the predictive models. The models that showed a higher R^2 are those obtained by field variables for the two regions. However, the model obtained only with remote sensor variables for La Primavera obtained an R^2 of 0.6083, Contrary to Sierra de Quila where the model does not take any spectral index for the model, therefore it is advisable to establish a greater number of Sampling sites evenly distributed throughout the area affected by the fire, to improve the accuracy of the remote sensing models.

Keywords: Satellite images, predictive models, remote sensing, fire severity, resilience, pine regeneration.

Introducción

El fuego es un factor de impacto importante, tanto negativo como positivo, en los ecosistemas templados de México (Tapias *et al.*, 2001). Por ejemplo dentro de los negativos, el fuego puede causar la muerte del arbolado y eliminar la cubierta vegetal, propiciando la erosión (Bodí *et al.*, 2012). Por su parte, entre los impactos positivos, se observa que algunas especies se favorecen por la apertura del dosel en donde entra la luz solar, beneficiando el arribo de especies intolerantes a la sombra (Juárez y Rodríguez, 2004). Tanta es esta importancia que éstos ecosistemas se pueden categorizar como ecosistemas dependientes del fuego (Rodríguez y Fulé, 2003;) y muchas especies que habitan en ellos, como son los pinos, han desarrollado adaptaciones para poder sobreponerse a este impacto (Juárez-Martínez y Rodríguez-Trejo, 2003). Sin embargo, la intensidad con la que se presenta el fuego durante un incendio forestal puede ser variable, lo que genera que el daño en el ecosistema sea diferente, y por lo tanto se presenten diferentes grados de severidad de daño en la vegetación (Botella-Martínez y Fernández-Manso, 2017). El nivel de severidad condiciona la respuesta que tendrá el ecosistema ante los efectos del fuego (Jakubauskas *et al.*, 1990), por lo que crece la importancia de comprender las variables que impulsan los cambios en la vegetación del ecosistema y la regeneración de vegetación, posterior a la ocurrencia de un incendio forestal (Casady *et al.*, 2010).

Sin embargo, las metodologías convencionales del análisis del impacto del fuego en los ecosistemas de manera directa en campo es un trabajo que se dificulta por limitación de recursos de personal, equipo, tiempo, dinero y hasta la inaccesibilidad a muchas de las áreas forestales. Lo que limita la evaluación de precisión de cada una de las áreas afectadas por los incendios. Es por esto que actualmente existen tendencias de evaluación de los incendios forestales mediante el uso de imágenes multiespectrales obtenidas de sensores remotos (van Wagendonk *et al.*, 2004) y la implementación de índices espectrales (Key y Benson, 2006). Para de esta manera, ampliar los conocimientos de la investigación ecológica (Chen *et al.*, 2014) y que éstos se puedan aplicar en una

política de restauración adecuada (Viana-Soto *et al.*, 2017) de una manera práctica y general para las áreas forestales afectadas por incendios.

Materiales y Métodos

Estrategia de muestreo en campo

El estudio se llevó a cabo en El Bosque La Primavera, ubicado en los municipios de Tala, Tlajomulco de Zúñiga y Zapopan en las coordenadas 103° 28' a 103° 42' de longitud oeste, y 20° 37' a 20° 45' latitud norte (CONANP, 2000) en donde se registró un incendio de diferentes severidades en abril y marzo 2018 de 2,740.0162 ha, y en el Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila que se encuentra entre los municipios de Tecolotlán, Tenamaxtlán y San Martín Hidalgo (SEMADET, 2016) en donde se registró un incendio de diferentes severidades entre los meses de abril y marzo 2018 de 21.586432 ha. Estas dos regiones cuentan con bosques de pino-encino en donde han ocurrido incendios forestales de diferentes severidades y de diferentes extensiones, por lo cual fueron consideradas para su evaluación y analizar la posibilidad de obtener un modelo de predicción de la regeneración natural de pino mediante el análisis de las variables ambientales tomadas en campo y sobre todo la implementación de las variables obtenidas mediante sensores remotos.

El estudio se basó en información de tres condiciones de impacto por fuego: 1) áreas sin incendio- en donde no ha ocurrido ningún incendio forestal o que han pasado más de 5 años del último incendio; 2) áreas con incendio moderado- áreas donde se presentó 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; y 3) áreas con incendio extremo- donde el fuego provocó un escorchado mayor que la mitad de la altura total del árbol y la copa se afectó parcial o totalmente. Dentro de estas tres áreas se ubicaron 18 sitios aleatorios de muestreo de 400 m² lo más homogéneos posible en relación a: la altura del arbolado, diámetro, densidad, estructura y mezcla de especies, en donde se evaluaron diversas variables ambientales. Además en cada uno de los sitios de muestreo, se registró el número de plántulas de regeneración de

pino, a su vez, dentro de tres círculos de 5 m² ubicados a 5.64 metros del centro del sitio de 400m² orientados a 0°, 120° y 240° , y solo se evaluaron las plántulas, de regeneración del arbolado de pino, menores a 30 cm de altura, las cuales serán referidas en este artículo por las siglas RCH. (Flores *et al.*, 2018).

Evaluación de variables ambientales en campo

Dentro de cada sitio de 400 m² se registraron todos los árboles adultos (diámetro normal > 7.5 cm). Tomando para cada uno los datos de género, nombre común, condición, vigor, diámetro normal, altura total, altura de fuste limpio, posición sociológica, grosor de corteza, profundidad de quemado en corteza, altura de escorchado, presencia de caras de resinación y su altura, altura de quemado de copa, diámetro de copa y porcentaje de copa quemada.

Para la evaluación de los combustibles vivos, se consideró un círculo concéntrico de 100 m², dividido en tres tercios en donde se midieron los arbustos, pastos y hierbas, los cuales fueron colectados y secados en estufa para posteriormente obtener su peso seco.

Los combustibles muertos fueron evaluados mediante la metodología de las intersecciones planares (Brown *et al.*, 1982) a lo largo de tres transectos de 10 m. Al final de cada transecto se midió la profundidad y se colectaron las capas de hojarasca y fermentación, dentro de un área definida por un cuadro de 60 x 60 cm las cuales también fueron secadas en estufa para obtener su peso seco (Flores *et al.*, 2018). Para la obtención de las cantidades de los combustibles muertos se utilizó el Sistema de Cálculo de combustibles forestales (SICCO) (Chávez *et al.*, 2011). Derivado del muestreo en campo, se obtuvieron 41 variables ambientales las cuales se muestran en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Variables ambientales evaluadas en campo, para determinar la regeneración potencial de arbolado en ecosistemas forestales impactados por incendios.

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

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

Evaluación de imágenes satelitales

Mediante la plataforma de Google Earth Engine se descargaron imágenes Landsat 8 (OLI), después de la ocurrencia de incendios forestales correspondientes a las fechas más cercanas a la toma de datos en campo (diciembre del 2018). Las cuales fueron incorporadas al sistema de información geográfico Qgis para su manipulación. Estas imágenes cuentan con 11 bandas multiespectrales que van desde el verde visible hasta el infrarrojo cercano, además de bandas térmicas y una pancromática (Herawati *et al.*, 2015), con una resolución espacial de entre 15 a 120 m y una resolución temporal de 16 días.

Mediante álgebra de mapas, en el sistema de información geográfica Qgis, se calcularon índices espectrales, los cuales se pueden dividir de acuerdo a las fechas de las imágenes empleadas: a) Monotemporales. Consideran una sola fecha de obtención de la imagen, obtenida 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 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 quema-

do 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 corresponde a la fecha de la imagen disponible más próxima a la toma de datos en campo.

Incorporación de variables derivadas de las imágenes satelitales: Cada una de las imágenes, correspondientes a: las bandas Landsat 8, los índices espectrales monotemporales, los índices espectrales bitemporales y datos de exposición y altitud obtenidos mediante modelos de elevación digital descargados de INEGI (INEGI, 2019). Se tomaron como variables para el análisis de la estimación de la regeneración natural de plántulas de pino por hectarea, en diferentes severidades de incendios forestales. Dando de esta manera un total de 31 variables derivadas de los sensores remotos.

Análisis estadísticos

Las variables obtenidas en campo y las variables obtenidas mediante los sensores remotos se relacionaron, primeramente, de manera separada y posteriormente de manera conjunta, con la regeneración natural correspondiente a las plántulas de pino menores o iguales a 30 cm, que se contabilizaron en campo calculando los individuos por hectárea para cada sitio y condición de impacto por incendio.

Para realizar los análisis estadísticos, primeramente, se realizó una matriz de correlación de Pearson para conocer la influencia de cada una de las variables y se realizó una gráfica de tendencia lineal para conocer la influencia de cada una de las variables con respecto a la regeneración natural. Derivado de esto, se identificaron aquellas variables que tuvieron una mayor significancia, tomando como punto de selección las variables que presentaran un $r \geq 0.25$.

Posteriormente, se realizó un análisis de regresión escalonada, hacia adelante (forward), con los softwares R estudio, infoStat y SPSS (para la comparación de resultados), para identificar las variables que mejor se ajustaran para la definición de un modelo multivariado para estimar la regeneración natural. Tomando como juicio para

conocer el ajuste del modelo, el valor de R^2 en donde valores cercanos a 1 se refieren a un mayor ajuste del modelo y el valor p que nos muestra el valor de significancia de cada variable seleccionada.

Resultados y discusión

Área de protección de flora y fauna La Primavera

Regeneración de arbolado y variables de campo: Las variables independientes que resultaron con coeficientes de correlación más altos están relacionadas en su mayoría con la cobertura del suelo forestal y con características del daño del fuego en el arbolado, así como la profundidad de quemado y la altura de escorchado. De las 42 variables de campo solo 6 mostraron tener un valor de significancia menor a 0.05 y 11 presentaron un valor de $R^2 \geq 0.25$, (Profundidad de quemado, Combustibles de 100 horas, Peso seco de hierbas, Peso seco de hojarasca, Grosor de corteza, Porcentaje de cobertura de hojarasca, Peso seco de pastos, Exposición, Profundidad de fermentación, Altura de escorchado, Porcentaje de cobertura de pastos), las cuales fueron seleccionadas para realizar el análisis de regresión, para identificar las variables que mejor se ajustaran para la definición de un modelo estimativo de la regeneración natural.

Como resultado de la regresión escalonada, con las variables seleccionadas, se generó un modelo con tres variables ($R^2 = 0.9512$): profundidad de quemado (PQ), combustibles de 100 h XXXH) y grosor de corteza (GC). Además, debido a que la variable de profundidad de quemado fue la de mejor ajuste se creó un segundo modelo solo con esta variable ($R^2 = 0.813$). Con estos resultados se generaron dos modelos:

$$\text{Modelo 1 (Variables de campo): } RCH = -10814 + 34413 \text{ PQ} - 11363 \text{ XXXH} + 16298 \text{ GC}$$

$$\text{Modelo 2 (Variables de campo): } RCH = -2798.293 + 60437.967 \text{ PQ}$$

Estos modelos y se compararon con los datos obtenidos de los muestreos de campo. Pudiéndose observar que para las áreas no afectadas por incen-

dio en donde en campo no se encontró ninguna plántula de regeneración de arbolado, el modelo 2 genera datos negativos lo que muestra una estimación nula de regeneración, contrario a los datos generados por el modelo 1 (Cuadro 2). Sin embargo, el modelo 1 se acerca más a la estimación de la regeneración en áreas moderadas donde el modelo 2 sobrestima el número de plantas de regeneración, esto es más evidente en la Figura 2, donde se observan los picos de sobrestimación del modelo.

Cuadro 2. Aplicación de los dos modelos obtenidos con las variables de campo, para La Primavera, donde se reportan los individuos de regeneración chica (<30cm) por hectárea, y los calculados con cada uno de los modelos (PQ= profundidad de quemado, XXXH= combustibles de 100 h, GC= grosor de corteza).

Condición	RCH en campo	Modelo 1 (Variables de campo) (PQ, XXXH, GC)	Modelo 2 (Variables de campo) (PQ)
Sin incendio	0	-4752	-2798
Sin incendio	0	1566	-1119
Sin incendio	0	3315	-2798
Moderado	14473	15985	25288
Moderado	13815	12127	16647
Moderado	40129	36989	30946
Extremo	23025	18913	17923
Extremo	2631	6642	12705
Extremo	35524	38808	32709

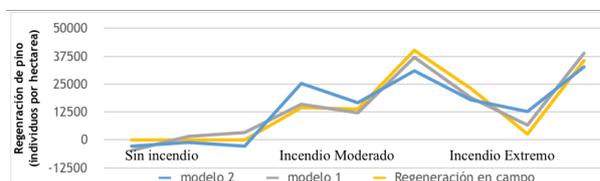


Figura 1. Gráfica de la regeneración de pino encontrada en campo, comparada con las estimaciones resultantes de la aplicación de los modelos con variables de campo, para La Primavera.

Regeneración de arbolado y variables derivadas

de sensores remotos: Para el área de La Primavera las variables independientes que resultaron con mayor R^2 están relacionadas con: a) índices monotemporales: BAI, SIPI, GEMI y EVI; la banda 5 (B5) la cual corresponde al infrarrojo cercano; la exposición; b) índices bitemporales, como son: dNBR y RBR. Sin embargo, de las 31 variables derivadas de sensores remotos solo 2 mostraron tener un valor de significancia menor a 0.05 y 18 presentaron un valor de $R^2 \geq 0.25$ las cuales fueron seleccionadas para realizar el análisis de regresión.

Con la regresión, se obtuvo un modelo con un R^2 de 0.6083, el cual correlaciona a la regeneración

con las variables BAI y la exposición. Sin embargo, se observa que la variable de exposición (expo) no es significativa ($p=0.225$), mientras que el índice BAI muestra una mayor significancia ($p=0.099$) pero aun así es mayor a 0.05 lo cual, implica que el modelo no está completamente ajustado. Por lo que se realizó un segundo modelo solo con la variable BAI ($R^2 = 0.489$) en donde el valor de p disminuye a 0.036, con estos resultados se generaron dos modelos:

Modelo 1(VARIABLES DE SENSORES): $RCH = 33791.4 + 587.8 BAI - 189.3 expo$

Modelo 2(VARIABLES DE SENSORES): $RCH = -31269.192 + 753.553 BAI$

Al aplicar estos modelos para calcular la regeneración natural y compararlos con la regeneración muestreada en campo, se observa que ambos modelos sobrestiman la cantidad de regeneración en áreas de incendio extremo (Cuadro 3). Esto es más apreciable en la figura 2 donde también se observa un poco de subestimación para la regeneración en áreas con severidad moderada.

Cuadro3. Ampliación de los dos modelos obtenidos con las variables derivadas de sensores remotos, para La Primavera, donde se reportan los individuos de regeneración chica (<30cm) por hectárea, y los calculados con cada uno de los modelos (BAI= Índice de área de quemado, Expo=exposición).

Condición	RCH en campo	Modelo 1 (Variables de sensores) (BAI, Expo)	Modelo 2 (Variables de sensores) (BAI)
Sin incendio	0	-4818	1092
Sin incendio	0	-3520	-3339
Sin incendio	0	7349	15289
Moderado	14473	17375	6627
Moderado	13815	18031	20497
Moderado	40129	30735	31049
Extremo	23025	19891	17449
Extremo	2631	22034	20198
Extremo	35524	22453	20735

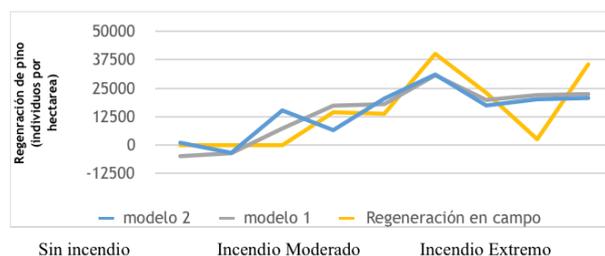


Figura 2. Gráfica de la regeneración de pino encontrada en campo, comparada con las estimaciones resultantes de la aplicación de los modelos con variables de sensores remotos, para La Primavera.

Regeneración de arbolado y variables derivadas de datos de campo y sensores remotos:

Con las once variables seleccionadas del muestreo en campo y con las 18 variables derivadas de los datos de los sensores remotos se realizó nuevamente, mediante el método de Forward, la regresión escalonada. Dando como resultado solo un modelo el cual tiene una R^2 alta (0.912) y selecciona tanto una variable tomada en campo como es la profundidad de quemado y una variable derivada de sensores remotos como es la exposición. Esta selección de variables da como resultado el siguiente modelo:

Modelo 1(VARIABLES DE CAMPO Y SENSORES): $RCH = -98667.369 + 94171.426 PQ + 296.804 Expo$

Al aplicar este modelo y compararlo con la regeneración encontrada en campo (Cuadro 4), se observa una tendencia similar en los valores, en donde se estiman más plántulas para las áreas quemadas en comparación con las no quemadas (Figura 3).

Cuadro 4. Ampliación del modelo obtenido con las variables de campo y de las derivadas de sensores remotos, para La Primavera, donde se reportan los individuos de regeneración chica (<30cm) por hectárea, y los calculados con cada uno de los modelos (PQ=Profundidad de quemado, Expo= exposición).

Condición	RCH en campo	Modelo 1 (PQ, Expo)
Sin incendio	0	2121
Sin incendio	0	-2767
Sin incendio	0	397
Moderado	14473	17668
Moderado	13815	20246
Moderado	40129	35466
Extremo	23025	15548
Extremo	2631	7417
Extremo	35524	38586

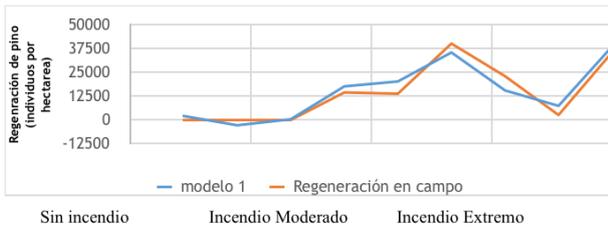


Figura 3. Gráfica de la regeneración de pino encontrada en campo, comparada con la estimación resultante de la aplicación del modelo con variables de campo y las derivadas de sensores remotos, para La Primavera.

Área de protección de flora y fauna Sierra de Quila

Las variables independientes que resultaron con coeficientes de correlación más altos están relacionadas mayormente a las características del suelo como son la pendiente y la exposición, así como su cobertura como los combustibles de 1000 horas firmes y podridos, porcentaje de cobertura de hierbas, su altura y su diámetro de copa. Para el área de Sierra de Quila de las 42 variables tomadas en campo solo 6 mostraron tener un valor de significancia menor a 0.05 y ocho presentaron un valor de $R^2 \geq 0.25$, las cuales fueron seleccionadas para realizar el análisis de regresión.

Con las variables seleccionadas, la regresión escalonada generó un modelo con tres variables ($R^2 = 0.997$): exposición (ex) y combustibles de 1000 horas firmes (XXHF) y podridos (XXHP). Debido a que en este modelo el valor de p para todas las variables fue < 0.001 , se realizó otro modelo añadiendo la variable porcentaje de cobertura de hierbas (PCH) el cual, aunque tenga un valor de p mayor a 0.05 genera un modelo de $R^2 = 1$. Con estos resultados se generaron dos modelos:

$$\text{Modelo 1 Quila (Variables de campo): } RCH = -381.451 + 86.011 \text{ ex} + 56.327 \text{ XXHP} - 22.395 \text{ XXHF}$$

$$\text{Modelo 2 Quila (Variables de campo): } RCH = 561.48 + 82.36 \text{ EX} + 58.25 \text{ XXHP} - 23.31 \text{ XXHF} - 58.83 \text{ PCH}$$

Al aplicar estos dos modelos y compararlos con la regeneración del arbolado encontrada en campo (Cuadro 5), se puede observar una tendencia muy similar en los valores (Figura 4).

Los resultados se tienen que tomar con reserva ya que al no tener regeneración en las áreas sin incen-

dio ni en las áreas con incendios moderados se provoca un sesgo en la información que afecta la precisión del modelo, con esto se reitera la importancia de que en futuros trabajos se establezca un número mayor de sitios de muestreo.

Cuadro 5. Ampliación del modelo obtenido con las variables de campo y de las derivadas de sensores remotos, para Sierra de Quila, donde se reportan los individuos de regeneración chica (<30cm) por hectárea, y los calculados con cada uno de los modelos (EX=Exposición, XXHF= combustibles de 1000 horas firmes, XXHP= combustibles de 1000 horas podridos, PCH= porcentaje de cobertura de hierbas).

Condición	RCH En campo	Modelo 1 Quila (Variables de campo) (EX, XXHP, XXHF)	Modelo 2 Quila (Variables de campo) (EX, XXHP, XXHF, PCH)
Sin incendio	0	-381	-39
Sin incendio	0	-237	-546
Sin incendio	0	-381	-92
Moderado	2631	2783	2618
Moderado	15788	15831	15815
Moderado	17762	17631	17713
Extremo	0	187	289
Extremo	0	895	317
Extremo	0	-146	108

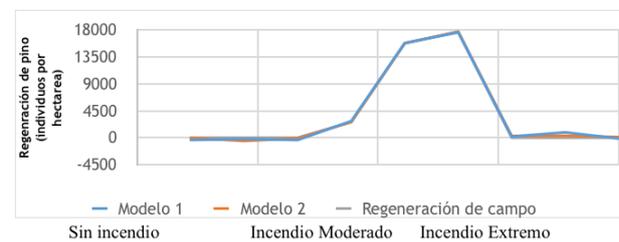


Figura 4. Gráfica de la regeneración de pino encontrada en campo, comparada con la estimación resultante de la aplicación del modelo con variables de campo, para Sierra de Quila.

Regeneración de arbolado y variables derivadas de sensores remotos: para el área de Sierra de Quila las variables independientes que resultaron con mayor R^2 están relacionadas con índices bitemporales: RI, NRI, RdNBR y RBR; índices monotemporales: GEMI, EVI; y con imágenes puramente de una banda como: la banda 1,3,5,10 y 11. A diferencia de los resultados para las otras dos regiones, en Sierra de Quila en algunas variables el valor de R^2 es igual o mayor a 0.5, de las 31 variables derivadas de los sensores remotos 11 mostraron tener un valor de significancia menor a 0.05 y 21 y presentaron un valor de $R^2 \geq 0.25$, las cuales fueron seleccionadas para realizar el análisis de regresión.

Modelo 1Quila (Variables de sensores): **RCH = -33509.852 + 33437 RI**

Al aplicar el modelo generado y compararlo con la regeneración encontrada en campo (Cuadro 6), se puede observar que el modelo sobreestima la cantidad de regeneración para el área sin afectación de incendio y subestima la regeneración en las áreas con presencia del fuego (Figura 5).

Cuadro 6. Ampliación del modelo obtenido con las variables derivadas de los sensores remotos y de las derivadas de sensores remotos, para Sierra de Quila, donde se reportan los individuos de regeneración chica (<30cm) por hectárea, y los calculados con cada uno de los modelos (RI=Índice de regeneración).

Condición	RCH En campo	Modelo 1 Quila (Variables de sensores) (RI)
Sin incendio	0	2041
Sin incendio	0	2582
Sin incendio	0	3188
Moderado	2631	7713
Moderado	15788	15969
Moderado	17762	8496
Extremo	0	-3700

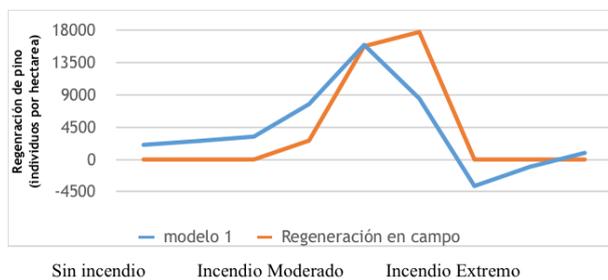


Figura 5. Gráfica de la regeneración de pino encontrada en campo, comparada con la estimación resultante de la aplicación del modelo con variables derivadas de sensores remotos, para Sierra de Quila.

Regeneración de arbolado y variables derivadas de datos de campo y sensores remotos: Con las ocho variables de campo y las 21 variables derivadas de los sensores remotos, seleccionadas para el área de Sierra de Quila, se realizó nuevamente la regresión escalonada y los resultados obtenidos descartan todas las variables obtenidas mediante los sensores remotos, generando el mismo modelo 1 que se generó solo

con las variables tomadas en campo el cual tomó como variables la exposición, y los combustibles de 1000h firmes y podridos. Generando el modelo:

Modelo 1Quila (Variables de campo y sensores):
RCH = -381.451 + 86.011 ex + 56.327 XXHP - 22.395 XXHF

El cual genera una tendencia muy similar de la regeneración natural de pino, entre los resultados muestreados en campo (Cuadro 5) con relación a los resultados estimados por el modelo (Figura 5).

Conclusiones

- Las variables ambientales muestreadas en campo que tuvieron una mayor relación con la predicción de la regeneración fueron las relacionadas con la presencia de combustibles forestales muertos como los combustibles de 100 horas y 1000 horas firmes y podridos y las variables relacionadas con el arbolado adulto como grosor de corteza y profundidad de quemado, siendo esta última tomada tanto los modelos solo con variables ambientales como para los modelos de variables ambientales y de sensores remotos solo para el área de La Primavera.
- El índice espectral que se relacionó con la predicción de la regeneración fue el índice de área de quemado (BAI) y la exposición tomada mediante imágenes satelitales para el área de La Primavera y el índice de regeneración² (RI) para Sierra de Quila.
- Los modelos que mostraron una mayor R son los obtenidos mediante variables de campo para las dos áreas de estudio y el modelo obtenido mediante la combinación de variables de campo e imágenes satelitales para La Primavera.
- La falta de incorporación de los índices espectrales en el modelo de Sierra de Quila puede deberse a que la extensión del incendio, analizado en esta área, fue pequeño en comparación al de La Primavera, además de la presencia de más nubosidad en las imágenes satelitales obtenidas de Sierra de Quila.

- Para ampliar la precisión de los modelos y poder establecer si es posible crear modelos de estimación de la regeneración generales para las áreas de bosque de pino o si se tendrían que realizar modelos específicos para cada área en particular, es recomendable establecer un mayor número de sitios de muestreo distribuidos de manera homogénea en toda el área afectada por el incendio, además de incorporar más incendios de diferentes extensiones para mejorar la precisión de esta metodología.

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.
- Bodí, M. B., A. Cerdá, J. Mataix-Solera y S. H. Doerr. 2012. Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín Asociación de Geógrafos Españoles* 58: 33-55
- Botella-Martínez, M.A. y Fernández-Manzo A. (2017). Study of post-fire severity in the Valencia region comparing the NBR, RdNBR and RBR indexes derived from Landsat 8 images, *Revista de Teledetección*, 49, 33-47. DOI:10.4995/raet.2017.7095.
- Brown, J.K., R.D. Oberheu y C.M. Johnston. (1982). Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior west. United States, Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range, Experiment Station, 48pp.
- Casady, G. M., van Leeuwen, W.J. D. y Marsh, S. E. (2010). Evaluating post-wildfire vegetation regeneration as a response to multiple environmental determinants. *Environ Model Assess*, 15:295–307 DOI 10.1007/s10666-009-9210-x
- Chávez D., Á.A., Flores G., J. G., y Xelhuantzi, C, J. (2011). Sistema de Cálculo de combustibles forestales (SICCO). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Folleto Técnico Núm. 4. 73 p.
- Chen, W., Moriya, K., Sakai, T., Koyama, L., y Cao, C. (2014). Monitoring of post-fire forest recovery under different restoration modes based on time series Landsat data. *European Journal of Remote Sensing*, 47:1, 153-168, DOI: 10.5721/ EuJRS20144710
- 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.isprs.2019.11.012
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2014). Criterios y recomendaciones para el manejo silvícola de los bosques de pinos ponderosa. 131 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), (2000). Programa de manejo del área de protección de flora y fauna La Primavera. Jalisco, México: CONANP. Recuperado de https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/35_libro_pm.pdf
- Flores G. J. G., Flores R. A. G., Lomelí Z. M. E., Ruiz G. E., 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.
- 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.
- Herawati, H., Gonzales-Olabarria, J.R., Wijaya, A., Martius, C., Purnomo, H. y Andriani, R. (2015). Tools for Assessing the Impacts of Climate Variability and Change on Wildfire Regimes in Forests, *Forests*, 6, 1476-1499. DOI:10.3390/f6051476.
- 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
- INEGI (2019). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) Disponible en : <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacione/smex/>
- InfoStat (2010). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=15>
- Jakubauskas, M. E., Lulla, K.P., Mausel, P.W. (1990). Assessment of vegetation change in a firealtered forest landscape. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 56, 371-377. Disponible en: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1990journal/mar/1990_mar_371-377.pdf
- Juárez M., A. y D. A. Rodríguez T. 2004. Efecto de los incendios forestales en la regeneración de *Pinus oocarpa* var. *ochoterena*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 9(2): 125-130. DOI: 10.29298/rmcf.v5i24.325
- Juárez-Martínez, A. y Rodríguez-Trejo, D. A. (2003). Efecto de los incendios forestales en la regeneración de *Pinus oocarpa* var. *Ochoterena*. *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_ochoterena
- 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/>.
- 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
- SEMADET, 2016. Programa de Manejo del Fuego Área de Protección de Flora Fauna Sierra de Quila. 55 p.
- 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
- Tapias, R., Gil, L., Fuentes-Utrilla, P. y Pardos, J.A. (2001). Canopy seed banks in Mediterranean pines of southeastern Spain. A comparison between *Pinus halepensis* Mill., *P. pinaster* Ait., *P. pinea* L. and *P. nigra* Arn. *J. Ecol.* 89, 629–638. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2001.00575.x.
- 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.
- Van Wagendonk, J. W., Root, R.R., Key C.H. (2004). Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment*, 92, 397–408. DOI:10.1016/j.rse.2003.12.015.
- 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